

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS**  
**NATURALES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE**  
**RECURSOS NATURALES**



**“APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN-COMPOST EN LA**  
**FITORREMEDIACIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO USANDO ZEA**  
**MAYS EN SUELOS CONTAMINADOS CON RELAVES MINEROS,**  
**CERRO DE PASCO, 2021”**

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

VEGA GUEVARA FRANCO RODRIGO  
VIRÚ VÁSQUEZ PAUL HERMES

ASESOR:  
RICHARD JOAO HUAPAYA PARDAVÉ

Callao, 2023

PERÚ

Three handwritten signatures in blue ink are positioned to the right of the text. The top signature is the most legible, appearing to be 'Rodrigo Vega'. The middle signature is 'Paul Vasquez' and the bottom one is 'Richard Joao Huapaya PardaVe'.



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

## COMISION DE GRADOS Y TITULOS

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES N° 008-2023-JEDT-FIARN

Siendo las 11:15 horas del día miércoles 15 de noviembre del 2023, en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales ubicado en la Av. Juan Pablo II N° 306-Bellavista-Callao; en cumplimiento de la resolución N° 156-2023-D-FIARN se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **“APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN-COMPOST EN LA FITORREMEDIACIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO USANDO ZEA MAYS EN SUELOS CONTAMINADOS CON RELAVES MINEROS, CERRO DE PASCO, 2021”**, presentada para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales de los Bachilleres Franco Rodrigo Vega Guevara y Paul Hermes Virú Vásquez.

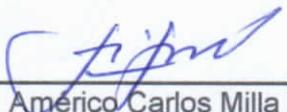
Contando con la asistencia del Jurado Evaluador y Asesor a fin de dar cumplimiento a la Resolución N° 156-2023-D-FIARN de fecha 02 de noviembre del 2023, los mismos que están integrados por los siguientes docentes:

Mtro. Américo Carlos Milla Figueroa	(Presidente)
Mtro. Dan Skipper Anarcaya Torres	(Secretario)
Mtra. María Lucila Gabriel Gaspar	(Vocal)
MBA. Richard Joao Huapaya Pardavé	(Asesor)

Terminada la exposición y la absolución de las preguntas del Jurado Evaluador, se invita a los Bachilleres y al público en general se retiren del Auditorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, para las deliberaciones del caso.

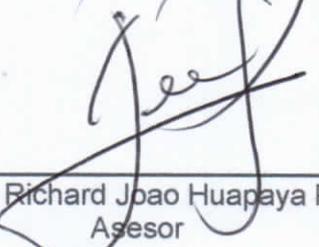
Luego de las deliberaciones el Jurado Evaluador acuerda APROBAR POR UNANIMIDAD, con la escala de calificación cualitativa MUY BUENO y calificación cuantitativa DIECISIETE (17) la presente tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 24 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU del 15 de junio del 2023.

En señal de conformidad firma el Jurado Evaluador, siendo las 12:05 horas del día miércoles 15 de noviembre del 2023.

  
Mtro. Américo Carlos Milla Figueroa  
Presidente

  
Mtro. Dan Skipper Anarcaya Torres  
Secretario

  
Mtra. María Lucila Gabriel Gaspar  
Vocal

  
MBA. Richard Joao Huapaya Pardavé  
Asesor

## Document Information

<b>Analyzed document</b>	1A_VEGA GUEVARA; Franco Rodrigo_VIRU VASQUEZ; Paul Hermes_IF TESIS.pdf (D178804944)
<b>Submitted</b>	2023-11-14 21:19:00
<b>Submitted by</b>	
<b>Submitter email</b>	fiarn.investigacion@unac.edu.pe
<b>Similarity</b>	4%
<b>Analysis address</b>	unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://portal.indeci.gob.pe/emergencias/reporte-de-peligro-inminente-n-055-25-2-2021-coen-ind...">https://portal.indeci.gob.pe/emergencias/reporte-de-peligro-inminente-n-055-25-2-2021-coen-ind...</a> Fetched: 2023-11-14 21:20:00		4
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.desdeadentro.pe/2022/03/lluvias-y-granizadas-extreman-ponen-en-riesgo-de-colapso-a...">https://www.desdeadentro.pe/2022/03/lluvias-y-granizadas-extreman-ponen-en-riesgo-de-colapso-a...</a> Fetched: 2023-11-14 21:21:00		3
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / ROMERO BUSTAMENTE - CULQUI CARO - ROMAN YSIDRO - PROTOTIPO DE CAMELLÓN MODIFICADO PARA LA MEJORA DE LA CAPACIDAD FITORREMIADORA DEL Stipa Ichu EN SUELOS CONTAMINADOS CON PLOMO, LA OROYA 2022.pdf</b> Document ROMERO BUSTAMENTE - CULQUI CARO - ROMAN YSIDRO - PROTOTIPO DE CAMELLÓN MODIFICADO PARA LA MEJORA DE LA CAPACIDAD FITORREMIADORA DEL Stipa Ichu EN SUELOS CONTAMINADOS CON PLOMO, LA OROYA 2022.pdf (D149903413) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		16
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / REYNA MANDUJANO, Samuel Carlos -MAESTRIA -2023.pdf</b> Document REYNA MANDUJANO, Samuel Carlos -MAESTRIA -2023.pdf (D173358703) Submitted by: fiarn.posgrado@unac.edu.pe Receiver: fiarn.posgrado.unac@analysis.arkund.com		4
<b>SA</b>	<b>Arteaga_J_Ucanan_L_EF.docx</b> Document Arteaga_J_Ucanan_L_EF.docx (D151833368)		7
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4516/wu-loli-diego-antonio.p...">https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4516/wu-loli-diego-antonio.p...</a> Fetched: 2023-11-14 21:21:00		16
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / ALVA CERVANTES-NOGUEIRA ISLA-TESIS -"FITOEXTRACCIÓN CON SENECIO TEPHROSIOIDES PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR PLOMO EN HUANZALÁ - ANCASH".pdf</b> Document ALVA CERVANTES-NOGUEIRA ISLA-TESIS -"FITOEXTRACCIÓN CON SENECIO TEPHROSIOIDES PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR PLOMO EN HUANZALÁ - ANCASH".pdf (D141517030) Submitted by: fiarn.investigacion@unac.edu.pe Receiver: unidad.de.investigacion.fiarn.unac@analysis.arkund.com		7
<b>SA</b>	<b>REVISIONSISTEMATICA_TALLERDETESIS1_MALLQUICHICMANASIXTOANTONIO_VALENZUELALARAPAUAJANIT.docx</b> Document REVISIONSISTEMATICA_TALLERDETESIS1_MALLQUICHICMANASIXTOANTONIO_VALENZUELALARAPAUAJANIT.docx (D141968493)		3
<b>SA</b>	<b>TRABAJO FINAL.docx</b> Document TRABAJO FINAL.docx (D120102676)		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32533482/">https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32533482/</a> Fetched: 2023-11-14 21:20:00		1

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:** INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

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

**TÍTULO:** APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN-COMPOST EN LA FITORREMEDIACIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO USANDO ZEA MAYS EN SUELOS CONTAMINADOS CON RELAVES MINEROS, CERRO DE PASCO, 2021.

**AUTOR (ES):** FRANCO RODRIGO VEGA GUEVARA, CODIGO ORCID: 0009-0004-9304-9862- DNI: 70808550; PAUL HERMES VIRÚ VÁSQUEZ, CÓDIGO ORCID: 0000-0002-5334-3192- DNI: 72881590

**ASESOR(A):** MG. RICHARD HUAPAYA PARDAVÉ, CODIGO ORCID: 0000-0002- 4997-2041 DNI: 44127158

**CO-ASESOR(A):** MG. MARY FLOR CESARÉ CORAL, CODIGO ORCID: 0000-0002- 6901-3171, DNI: 25731842

**LUGAR DE EJECUCIÓN:** SIMÓN BOLIVAR – CERRO DE PASCO

**UNIDAD DE ANÁLISIS:** KG DE SUELO CONTAMINADO POR RELAVE MINERO.

**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** APLICADA

**ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN:** CUANTITATIVO

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:** EXPERIMENTAL

**TEMA OCDE:** 1.05.00-CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE

## **DEDICATORIA**

Esta investigación va dedicada a Dios por tantas bendiciones en el día a día; a mis padres, abuelos y hermano, quienes son mi mayor inspiración y pilar fundamental en mi vida. Gracias por siempre creer en mí y apoyarme en cada idea y meta que me he planteado, este es un reconocimiento hacia a cada uno de sus esfuerzos y sacrificios. **Franco Vega.**

Esta investigación se la dedico en primer lugar a Dios, quien me brinda la fuerza y voluntad para seguir adelante en cada paso de mi vida; a mi madre G.V.T. por siempre creer en mí. A mi abuelo B.V.H. (Q.E.P.D) y mi abuela N.D.V. (Q.E.P.D.), quien en vida me motivaron a culminar la carrera de Ing. Ambiental y de Recursos Naturales. **Paul Virú**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestra familia, por ser un soporte moral en cada momento y apoyarnos a culminar con esta etapa.

A nuestro asesor, Maestro Richard Joao Huapaya Pardavé por sus consejos, orientación, apoyo técnico y sobre todo paciencia durante el desarrollo de la investigación.

A nuestra co-asesora la Doctora Mary Flor Cesaré Coral, profesora de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por su apoyo técnico y consejos.

Al ingeniero Luigi Alfonso Bravo Toledo y al Ingeniero Anthony Fow Esteves, egresados de nuestra casa de estudios, por sus invaluable consejos y apoyo técnico durante el proceso de la investigación.

Al Doctor Gustavo Curaqueo, profesor de la Universidad Católica de Temuco - Chile, por sus sugerencias y revisiones del informe durante el proceso de investigación.

A nuestro colega Antony Luis, estudiante de la facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao por su apoyo en la parte experimental.

A Bladimir Quiroz por su apoyo y el acceso a la planta de valorización de compost de la Municipalidad Distrital de Pueblo Libre.

Al ingeniero Jorge López, profesor de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao por el diseño y la construcción del horno pirolítico automatizado para la producción del biocarbón.

Al Maestro Dan Anarcaya Torres por facilitarnos el laboratorio de Biología Aplicada durante la fase pre-experimental del presente trabajo de investigación.

A nuestros profesores de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad del Callao.

Por último, a aquellas personas que influenciaron en nuestra formación académica-científica por medio de sus experiencias.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO .....	7
INDICE DE TABLAS.....	10
INDICE DE FIGURAS.....	13
INDICE DE ABREVIATURAS.....	15
RESUMEN.....	16
ABSTRACT.....	17
INTRODUCCIÓN.....	18
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.1 Descripción de la realidad problemática .....	20
1.2 Formulación del problema.....	23
1.2.1 Problema general.....	23
1.2.2 Problemas específicos .....	23
1.3 Objetivos .....	24
1.3.1 Objetivo general.....	24
1.3.2 Objetivo específico.....	24
1.4 Justificación.....	25
1.4.1 Ambiental .....	25
1.4.2 Social .....	25
1.4.3 Económica .....	26
1.5 Delimitantes de la investigación .....	27
1.5.1 Delimitante teórica .....	27
1.5.2 Delimitante temporal .....	27
1.5.3 Delimitante espacial .....	27
II. MARCO TEÓRICO.....	28
2.1. Antecedentes .....	28
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	28
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	34
2.2. Bases teóricas.....	39
2.2.1. Teoría del biocarbón-compost .....	39
2.2.2. Teoría del suelo contaminado con metales pesados .....	61
2.2.3. Metales pesados.....	61
2.2.4. Pasivos ambientales mineros (PAMs).....	65
2.2.5. Fitorremediación de suelos contaminados.....	67
2.2.6. Zea mays .....	72
2.2.7. Aplicación del biocarbón-compost .....	76
2.2.8. Fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays..	77

2.3.	Marco conceptual.....	78
2.3.1.	Aplicación del Biocarbón-compost.....	78
2.3.2.	Fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays..	79
2.4.	Definición de términos básicos.....	80
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	83
3.1.	Hipótesis.....	83
3.1.1.	Hipótesis general.....	83
3.1.2.	Hipótesis específicas.....	83
3.1.3.	Operacionalización de las variables.....	83
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	86
4.1.	Diseño metodológico.....	86
4.1.1.	Tipo de la investigación.....	86
4.1.2.	Nivel de investigación.....	86
4.1.3.	Enfoque de la investigación.....	86
4.1.4.	Diseño de la investigación.....	86
4.2.	Método de investigación.....	87
4.2.1.	Etapa 1: Muestreo y análisis del relave minero.....	88
4.2.2.	Etapa 2: Producción del biocarbón y compost.....	89
4.2.3.	Etapa 3: Caracterización de las enmiendas y bioensayos de germinación	93
4.2.4.	Etapa 4: Dosificación del relave, biocarbón y compost....	101
4.2.5.	Etapa 5: siembra de Zea mays y evaluación de la aplicación del biocarbón-compost.....	103
4.2.6.	Diseño Experimental.....	105
4.3.	Población y muestra.....	105
4.3.1.	Población.....	105
4.3.2.	Muestra.....	105
4.4.	Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	106
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.	108
4.5.1.	Técnicas para la recolección de la información.....	108
4.5.2.	Toma de muestra.....	108
4.5.3.	Entregas de muestra al laboratorio.....	108
4.5.4.	Instrumentos para la recolección de datos.....	111
4.6.	Análisis y procesamiento de datos.....	112
4.7.	Aspectos éticos en Investigación.....	113
V.	RESULTADOS.....	114
5.1.	Resultados descriptivos.....	114
5.1.1.	Características del relave minero.....	114
5.1.2.	Producción y caracterización del biocarbón.....	115

5.1.3.	Producción y caracterización del compost.....	119
5.1.4.	Características del suelo.....	124
5.1.5.	Resultados experimentales.....	125
5.2.	Resultados inferenciales.....	139
5.2.1.	Análisis de la normalidad.....	139
5.2.2.	Análisis de la varianza (ANOVA) para FBA, FBR y FT en As y Pb	144
5.3.	Otros resultados.....	146
5.3.1.	Bioensayos preliminares de germinación.....	146
5.3.2.	Dosificación estadística de los bioensayos de germinación	149
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	156
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	156
6.1.1.	Contrastación de la hipótesis general.....	156
6.1.2.	Contrastación de hipótesis específicas.....	157
6.2.	Contrastación de los resultados con otros estudios similares.	159
6.2.1.	Relaves mineros, producción del biocarbón y evaluación de las características fisicoquímicas.....	159
6.2.2.	Aplicación del Biocarbón-Compost en la Fitorremediación del As y Pb usando Zea mays.....	161
6.3.	Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes	170
	CONCLUSIONES.....	171
	RECOMENDACIONES.....	172
	BIBLIOGRAFÍA.....	173
	Anexo 01. Matriz de consistencia.....	212
	Anexo 02. Validación de los Instrumentos.....	214
	Anexo 03. Resultados de Normalidad.....	223
	Anexo 04. Análisis Fisicoquímicos.....	236
	Anexo 05. Otros Anexos.....	268

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Estudios del biocarbón-compost en la fitorremediación.....	40
<b>Tabla 2.</b> Sorción e inmovilización de metales pesados en el suelo. ....	47
<b>Tabla 3.</b> Rangos de rendimiento del biocarbón según tipo de producción. ....	48
<b>Tabla 4.</b> Rendimiento del biocarbón de residuos agropecuarios y forestales..	49
<b>Tabla 5.</b> Normativa internacional referente a la calidad del biocarbón .....	52
<b>Tabla 6.</b> Normativa Austriaca e internacional en cuanto a parámetros de calidad del compost.....	58
<b>Tabla 7.</b> Normativa chilena en cuanto a parámetros de calidad del compost..	59
<b>Tabla 8.</b> Límite de metales pesados (mg/kg) para estiércol en corea, USA y países de Europa .....	59
<b>Tabla 9.</b> Descripción de problemas en personas, referentes a metales pesados .....	62
<b>Tabla 10.</b> Efectos del PAM en el medio ambiente y la salud humana .....	66
<b>Tabla 11.</b> Descripción de los mecanismos de fitorremediación .....	69
<b>Tabla 12.</b> Investigaciones sobre el <i>Zea mays</i> en la fitorremediación de metales pesados .....	75
<b>Tabla 13.</b> Operacionalización de las variables.....	84
<b>Tabla 14.</b> Método para caracterización de relaves .....	89
<b>Tabla 15.</b> Metodologías para caracterización del biocarbón.....	93
<b>Tabla 16.</b> Metodologías para caracterización del compost.....	94
<b>Tabla 17.</b> Biocarbón, compost y arena para las pruebas de fitotoxicidad.....	96
<b>Tabla 18.</b> Codificación de las macetas en el área experimental .....	102
<b>Tabla 19.</b> Cantidad de relave, suelo, biocarbón y compost en gramos .....	103
<b>Tabla 20.</b> Recipientes para la toma de muestras, método, equipos e instrumentos para biocarbón .....	109
<b>Tabla 21.</b> Recipientes para la toma de muestras, método, equipos e instrumentos para compost .....	109
<b>Tabla 22.</b> Recipientes para muestras, métodos de preservación, equipos e instrumentos y método de análisis para <i>Lactuca sativa</i> y <i>Zea mays</i> .....	110
<b>Tabla 23.</b> Recipientes para muestras, método de preservación, equipos e instrumentos y método de análisis para el suelo.....	111

<b>Tabla 24.</b> Expertos para validación de instrumentos .....	112
<b>Tabla 25.</b> Caracterización de metales pesados en el relave minero.....	114
<b>Tabla 26.</b> Resultados de la caracterización fisicoquímica del relave minero .	115
<b>Tabla 27.</b> Análisis de las características fisicoquímicas del bicoarbón de 300°C y 500°C .....	116
<b>Tabla 28.</b> Resultados de la caracterización elemental de biocarbón producido a 300°C y 500°C .....	117
<b>Tabla 29.</b> Resultados de la caracterización mediante ICP en muestras de biocarbón .....	118
<b>Tabla 30.</b> Parámetros del monitoreo de la calidad del compost .....	119
<b>Tabla 31.</b> Características fisicoquímicas del compost .....	121
<b>Tabla 32.</b> Límites (nacional e internacional) de metales pesados en Compost .....	122
<b>Tabla 33.</b> Resultados de las características fisicoquímicas del suelo utilizado .....	124
<b>Tabla 34.</b> FBA, FBR y FT para la Fitorremediación de Arsénico .....	126
<b>Tabla 35.</b> Clasificación de FBA, FBR y FT para el Arsénico.....	127
<b>Tabla 36.</b> FBA, FBR y FT para el Pb .....	128
<b>Tabla 37.</b> FBA, FBR y FT para el Pb .....	130
<b>Tabla 38.</b> Características fisicoquímicas del suelo tras la aplicación del biocarbón-compost en los diferentes tratamientos.....	136
<b>Tabla 39.</b> Desarrollo vegetativo durante la fitorremediación (altura).....	137
<b>Tabla 40.</b> Prueba de normalidad para el FBA para el As.....	140
<b>Tabla 41.</b> Prueba de normalidad para el FBR para el As .....	140
<b>Tabla 42.</b> Prueba de normalidad para el FT para el As .....	141
<b>Tabla 43.</b> Prueba de normalidad para el FBA para el Pb .....	142
<b>Tabla 44.</b> Prueba de normalidad para el FBR para el Pb .....	143
<b>Tabla 45.</b> Prueba de normalidad para el FT para el Pb .....	143
<b>Tabla 46.</b> Cuadro del análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales en la variación del FBA .....	145
<b>Tabla 47.</b> Cuadro del análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales en la variación del FBR .....	145

<b>Tabla 48.</b> Cuadro del análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales en la variación del FT .....	145
<b>Tabla 49.</b> ANOVA para el modelo cúbico especial .....	149
<b>Tabla 50.</b> Coeficientes en términos de factores codificados .....	150
<b>Tabla 51.</b> Resultados de bioensayos de germinación .....	155

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Tipos de hornos para producción de biocarbón</i> .....	50
<b>Figura 2</b> <i>Biocarbón en la fitorremediación</i> .....	53
<b>Figura 3</b> <i>Fases del compostaje</i> .....	55
<b>Figura 4</b> <i>Aplicación del compost en la fitorremediación del suelo contaminado</i> .....	60
<b>Figura 5</b> <i>Mecanismos de fitorremediación</i> .....	68
<b>Figura 6</b> <i>Planta hiperacumuladora</i> .....	72
<b>Figura 7</b> <i>Zea mays y sus partes</i> .....	74
<b>Figura 8</b> <i>Método de investigación</i> .....	88
<b>Figura 9</b> <i>Recolección de pino y producción de biocarbón</i> .....	91
<b>Figura 10</b> <i>Horno pirolítico</i> .....	92
<b>Figura 11</b> <i>Etapas para la producción del compost</i> .....	93
<b>Figura 12</b> <i>Bioensayos de germinación, desarrollo de la planta Lactuca sativa L.</i> .....	100
<b>Figura 13</b> <i>Mapa de ubicación del lugar de estudio</i> .....	107
<b>Figura 14</b> <i>Procesamientos estadísticos de los datos obtenidos</i> .....	113
<b>Figura 15</b> <i>Rendimiento del biocarbón</i> .....	115
<b>Figura 16</b> <i>Espectro infrarrojo del biocarbón de pino producido a 300°C</i> .....	116
<b>Figura 17</b> <i>Espectro infrarrojo del biocarbón de pino producido a 500°C</i> .....	117
<b>Figura 18</b> <i>Gráfico de metales pesados en muestras de biocarbón y normativas internacionales</i> .....	119
<b>Figura 19</b> <i>Evolución de los parámetros del compost</i> .....	120
<b>Figura 20</b> <i>Producción del compost</i> .....	120
<b>Figura 21</b> <i>Resultados de la caracterización de metales pesados en el compost (Cr, Ni, Cd y Hg)</i> .....	123
<b>Figura 22</b> <i>Resultados de la caracterización de metales pesados en el compost (As, Cu, Pb y Zn)</i> .....	124
<b>Figura 23</b> <i>Comparación entre el FBA y FBR para el As y Pb en los tratamientos</i> .....	131
<b>Figura 24</b> <i>Comparación entre el FT para el As y Pb en los tratamientos</i> .....	131

<b>Figura 25</b> Comparación entre la concentración del metal pesado en el suelo (mg/kg) para el As y Pb en los tratamientos.....	133
<b>Figura 26</b> Concentración del As y Pb y comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para el Suelo .....	134
<b>Figura 27</b> Variación de parámetros fisicoquímicos en el suelo tras la aplicación del biocarbón-compost y control .....	135
<b>Figura 28</b> Altura en los diferentes días de fitorremediación de la planta <i>Zea mays</i> .....	138
<b>Figura 29</b> Pruebas de biocarbón con compost y arena en <i>Lactuca sativa L.</i>	147
<b>Figura 30</b> Peso del biocarbón, arena y tamizado .....	147
<b>Figura 31</b> Pruebas de germinación de <i>Lactuca sativa L.</i> .....	148
<b>Figura 32</b> Bioensayos de germinación, desarrollo de semilla <i>Lactuca sativa L.</i> .....	148
<b>Figura 33</b> Análisis complementarios del diseño <i>i</i> -optimal.....	151
<b>Figura 34</b> Diseños complementarios en superficie 3D .....	152
<b>Figura 35</b> Diseños complementarios en superficie 3D .....	152
<b>Figura 36</b> Comportamiento del Índice de germinación de Zucconi (IG) para diferentes corridas.....	154
<b>Figura 37</b> Comportamiento del Índice de germinación normal (IGN) y el Índice de germinación Radicular (IER) para diferentes “r” .....	154

## **INDICE DE ABREVIATURAS**

FBA: Factor de bioconcentración Aéreo

FBR: Factor de bioconcentración Radicular

FT: Factor de Traslocación

PAM = Pasivo Ambiental Minero

EPT = Elementos Potencialmente Tóxicos

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación del As y Pb usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros. La investigación es de tipo aplicada, nivel explicativo, con diseño experimental, de enfoque cuantitativo. La metodología consistió en usar pino del distrito de Cutervo-Cajamarca para producir biocarbón a dos temperaturas (BP300, BP500) en un horno de pirólisis lenta (20°C/min), también se produjo compost a partir de residuos orgánicos municipales. Tanto el biocarbón y el compost se caracterizaron de manera elemental (C,H,O,N) y fisicoquímico (pH, Conductividad Eléctrica, Capacidad de Intercambio Catiónico). El relave minero fue de Quiulacocha-Cerro de Pasco. Se preparó el suelo contaminado con relave a 30% y 60% w/w, los factores estudiados fueron: (F1) Temperatura del biocarbón (300°C y 500°C) y (F2) Dosificación de biocarbón-compost (0.16 y 0.08 kg biocarbón-compost/kg relave), aplicando un diseño ANOVA factorial (una vía). Los resultados indicaron que, todos los tratamientos mostraron distribución normal a excepción del control (CR30) para el Factor de Bioconcentración Radicular (FBR) del As y CR30 para FBR del Pb. En cuanto a los efectos principales (factor de temperatura de biocarbón y factor de dosificación del bicabón-compost), solo hubo efecto significativo con la dosificación biocarbón-compost ( $p < 0.05$ ). Se concluyó que la capacidad fitorremediadora del *Zea mays* se ve influenciada solo por la dosificación del biocarbón-compost para todos los tratamientos y se espera que la presente investigación ayude a dilucidar mejor el comportamiento de la sinergia entre el biocarbón-compost como enmienda al suelo y su influencia en la fitorremediación del As y Pb usando *Zea mays*.

**Palabras clave:** Biocarbón, Biocarbón-compost, Compost, Fitorremediación, *Zea mays*.

## ABSTRACT

The aim of the research was to evaluate the application of biochar-compost in the phytoremediation of As and Pb using *Zea mays* in soils contaminated with mine tailings. The research is of an applied type, explanatory level, with an experimental design, with a quantitative approach. The methodology consisted of using pine from the Cutervo-Cajamarca district, to produce biochar at two temperatures (BP300, BP500) in a slow pyrolysis oven (20°C/min), compost was also produced from municipal organic waste. Both the biochar and the compost were characterized elementally (C,H,O,N) and physicochemically (pH, EC, CIC). The mine tailings were from Quiulacocha-Cerro de Pasco. The contaminated soil was prepared with tailings at 30% and 60% w/w, the factors studied were: (F1) Biochar temperature (300°C and 500°C) and (F2) Biochar-compost dosage (0.16 and 0.08 kg biochar-compost/kg tailings), applying a factorial ANOVA design (one way). The results indicated that all the treatments showed normal distribution except for the control (CR30) for the Root Bioconcentration Factor (FBR) of As and CR30 for FBR of Pb. Regarding the main effects (biochar temperature factor and bicarbonate-compost dosage factor), there was only a significant effect with the biochar-compost dosage ( $p < 0.05$ ). It was concluded that the phytoremediation capacity of *Zea mays* is influenced only by the dosage of biochar-compost for all treatments and it is expected that the present investigation will help to better elucidate the behavior of the synergy between biochar-compost as a soil amendment and its influence on the phytoremediation of As and Pb using *Zea mays*

**Keywords:** Biochar, Biochar-compost, Compost, Phytoremediation, *Zea mays*.

## INTRODUCCIÓN

Los Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) son un problema importante en la contaminación de suelos y ecosistemas terrestres (Menéndez y Muñoz 2021). La región de Cerro de Pasco, en los últimos años se ha visto impactada por los Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) de la Relavera Quiulacocha debido al desborde de estos por las lluvias intensas reportadas en 2021 (INDECI 2021) y 2022 (SNMPE 2022).

Es por ello que, en esta investigación se plantea como objetivo aplicar el biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros de Quiulacocha, ya que la fitorremediación es una estrategia que utiliza las plantas para reducir la movilidad y biodisponibilidad de metales pesados; además la aplicación del biocarbón-compost se considera una enmienda orgánica que mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo y la capacidad fitorremediadora del *Zea mays*.

La metodología para la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación de Arsénico y Plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados por relaves mineros de Quiulacocha consistió en 5 etapas, las cuales fueron: el muestreo y análisis del relave minero; la producción del biocarbón y compost; la caracterización fisicoquímica de las enmiendas y los bioensayos de germinación; la dosificación del relave, el biocarbón y el compost y la siembra del *Zea mays* y evaluación de la aplicación del biocarbón-compost. Los resultados obtenidos muestran que en cuanto a los factores (factor de temperatura del biocarbón, y factor de dosificación biocarbón-compost), solo hubo efecto significativo en la dosificación del biocarbón-compost ( $p < 0.05$ ). Asimismo, tras la aplicación de la dosificación biocarbón-compost existe una variación considerable en cuanto a las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado con relaves mineros, respecto a los controles.

No obstante, es importante señalar algunas limitaciones de esta investigación, las cuales fueron la accesibilidad a la zona de estudio (Cerro de Pasco), así como, los permisos necesarios y el traslado de los relaves mineros para posteriores análisis fisicoquímicos. Finalmente, de la presente investigación

se concluye que la eficacia de *Zea mays* en la recuperación de suelos contaminados se ve directamente influenciada por la cantidad de biocarbón-compost en todos los tratamientos. Se anticipa que esta investigación promoverá un mayor conocimiento sobre cómo la adición de biocarbón-compost al suelo afecta la capacidad fitorremediadora del *Zea mays* para estabilizar Arsénico y Plomo.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática

La minería produce inevitablemente transformaciones y efectos en el ambiente, algunos de estos son los residuos mineros que se generan, que pueden ser sustancias de valor económico significativo, incluyendo minerales, productos químicos e incluso el agua empleada en los procedimientos de extracción, que dan como resultado la producción de relaves mineros (Ojeda-Pereira y Campos-Medina 2021). A nivel mundial, se estima que 5-7 mil millones de toneladas de relaves mineros se generan de manera anual (Xu et al. 2019).

Los relaves mineros pueden encontrarse en depósitos, donde las actividades mineras dejaron de extraer recursos hace muchos años, aquel sitio es denominado un Pasivo Ambiental Minero (PAM) y puede incluir, además, instalaciones, infraestructuras, superficies afectadas por derrames, cursos de agua perturbados, talleres mecánicos y depósitos de herramientas (Salgado-Almeida et al. 2022b). Estos sitios representan un riesgo potencial permanente para la salud humana y el medio ambiente a nivel mundial, ya que los lixiviados producto de los relaves mineros contienen altas cantidades de metales pesados, elementos cuya denominación es la de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), y pueden ser: Arsénico (As), Níquel (Ni), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Cobre (Cu), Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) (Sun, Gao y Yang 2022), que fácilmente podrían contaminar la tierra circundante (Jain y Das 2017), influenciados por lluvias torrenciales o factores de erosión (Uugwanga y Kgabi 2020).

Las actividades mineras a nivel mundial siguen siendo una preocupación ya que, generan contaminación y específicamente al suelo; esto se da en muchos países del mundo, como en China (Ai et al. 2023), Australia (Vasuki et al. 2019), España, Sudáfrica (Ngole-Jeme y Fantke 2017), México (Fernández-Macías et al. 2020), Perú (Velásquez Ramírez et al. 2020; 2021). Además, se ha registrado una cantidad notable de PAM en países de América Latina como, Ecuador (Salgado-Almeida et al. 2022), Perú (Cruzado-Tafur et al. 2021), Colombia (Rodríguez-Zapata y Ruiz-Agudelo 2021) y Chile (Lam et al. 2017).

En Perú, En la relavera Quiulacocha, en la provincia de Cerro de Pasco empezaron las actividades mineras a partir de 1930 con Copper Corporation, hoy en día es un PAM, que contiene depósitos de relaves mineros, que estuvo en funcionamiento hasta 1994 con Centromin Perú (Astete et al. 2009). Dichos relaves mineros, que se encuentran alrededor de una laguna ácida (Barreto-Pio et al. 2023), han sido depositados sin algún tratamiento y teniendo una composición en peso del 50% de pirita, provocando efectos negativos en los ecosistemas cercanos (Baylón Coritoma et al. 2018), con un total de aproximadamente 79 toneladas métricas (Mt), y que pueden impactar en las comunidades que residen en esas áreas (Astete et al. 2009).

En el 2021, se reportaron lluvias extraordinarias con precipitaciones superiores a 10 mm/día en la relavera Quiulacocha, generando que los niveles del borde libre del dique de la referida relavera disminuyan considerablemente hasta 55 cm (INDECI 2021). En el 2022, también se reportaron niveles de precipitación en Quiulacocha de 13.2 mm/día y que han llevado a la rápida pérdida de borde libre de la relavera de 61 cm (SNMPE 2022). Mientras que en 2023, algunos distritos como el de Paucartambo registraron lluvias intensas (INDECI 2023). Estas lluvias registradas en los últimos años podrían provocar que los ríos adyacentes como el río Ragra y el río San Juan puedan contaminarse con EPT por medio de estos relaves mineros, así como los suelos adyacentes, y consecuentemente intoxicar a la población a través del consumo del agua y/o contacto con suelos. Por lo que resulta crucial aplicar técnicas de remediación que resulten ser eficientes en la descontaminación de suelos ante este suceso. En ese contexto, se encuentra la biorremediación que emplea microorganismos para eliminar o desintoxicar los contaminantes del suelo y el agua, además involucra a la flora para controlar el efecto de los contaminantes presentes en el medio ambiente, donde a dicho proceso se le conoce como fitorremediación. (Ramírez-Zamora et al. 2022). La remediación se puede lograr mediante la inactivación o inmovilización de sustancias tóxicas o contaminantes dentro de las raíces o en la rizosfera. La actividad estabilizadora de las raíces de las plantas limita la movilidad y la biodisponibilidad de los contaminantes, lo que da como resultado efectos tóxicos reducidos, este proceso se denomina

fitoestabilización (Kafle et al. 2022). Así también, se encuentran las enmiendas orgánicas que aportan o asisten en el proceso de fitorremediación, como el biocarbón (Shi et al. 2022), compost (Pandey, Sarkar y Pandey 2022), así también ambos en conjunto, la interacción biocarbón-compost que incrementa las propiedades físicas y químicas del suelo, al aportar ciertos nutrientes (Virú-Vásquez et al. 2022).

Numerosos estudios se han llevado a cabo para estabilizar los metales pesados por medio de la fitorremediación utilizando biocarbón-compost para reducir la biodisponibilidad de Cd, Zn (Novak et al. 2019; Sigua et al. 2019), Pb, As (Alidou-Arzika et al. 2021). Por otro lado, el *Zea mays*, es una planta que ha sido mundialmente estudiado en el ámbito de la fitorremediación de diferentes metales pesados, como Cu (Máthé-Gáspar y Anton 2005), Zn (Korentajer 1991; Máthé-Gáspar y Anton 2005), Pb (Alaboudi, Ahmed y Brodie 2019; Irfan et al. 2021; Saqib Rashid et al. 2022), Cr (Irfan et al. 2021). En ese sentido, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación mediante el uso de *Zea mays* en suelos contaminados por relaves mineros en la relavera Quiulacocha del distrito de Simón Bolívar – Cerro de Pasco; esta propuesta se sustenta en estudios como el de Cerrón et al. (2018) quien utilizó *Zea mays* y compost de Stevia para remediar suelos contaminados por plomo y arsénico obteniendo resultados prometedores en cuanto a técnicas de mejora de la capacidad fitorremediadora de dicha planta; asimismo la investigación de Ogundiran et al. (2015) utilizó el *Zea mays*, biocarbón de cáscaras de arroz y compost de residuos del girasol y heces de aves de corral, en conjunto para una fitorremediación asistida en suelos contaminados por plomo, obteniendo hasta un 85% de remoción; estas investigaciones abren una puerta hacia la investigación de técnicas que busquen el potenciamiento de la fitorremediación y/o la capacidad fitorremediadora de una planta mediante el uso asistido de enmiendas orgánicas.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿En qué medida la aplicación del biocarbón-compost influye en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros?

### **1.2.2 Problemas específicos**

¿En qué medida la temperatura de pirólisis del biocarbón influye en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros?

¿En qué medida la dosificación biocarbón-compost influye en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros?

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la influencia de la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros.

#### **1.3.2 Objetivo específico**

Determinar la influencia de la temperatura de pirólisis de biocarbón en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros.

Determinar la influencia de la dosificación biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros.

## **1.4 Justificación**

### **1.4.1 Ambiental**

Frente a la problemática de la contaminación de suelos con relaves mineros, se propone como solución, la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación del As y Pb usando *Zea mays*, lo cual se justifica ambientalmente. Estudios preliminares indican que la aplicación conjunta del biocarbón-compost tiene mejores efectos que su aplicación independiente (solo biocarbón y solo compost) en el proceso de fitorremediación del *Zea mays*, además mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado, incrementando la materia orgánica, equilibrando el pH, aumentando también la capacidad para retener nutrientes.

Además de impulsar el avance del conocimiento científico, esta investigación también presenta una propuesta con una clara justificación ambiental para fitorremediar el Pb y As presente en los suelos contaminados con relaves mineros de Quiulacocha, un Pasivo Ambiental Minero (PAM) ubicado en Cerro de Pasco. Los resultados obtenidos son de gran relevancia para poder incorporarse en estrategias de remediación ambiental ya que se han identificado en Perú un total de 7 668 PAM (MINEM 2021).

### **1.4.2 Social**

La justificación social para la presente investigación, radica en los impactos positivos que esta podría tener en la sociedad y en la mejora de la calidad de vida de las personas que residen en zonas cercanas a los suelos contaminados con los relaves mineros. Abarca aspectos de salud pública, ya que la presencia de arsénico y plomo en suelos contaminados representa un riesgo para la salud humana. Estos metales pesados pueden ser absorbidos por las plantas y llegar a la cadena alimentaria, lo que potencialmente expone a las comunidades locales a efectos adversos para la salud. Al implementar una técnica de fitorremediación efectiva con biocarbón-compost y *Zea mays*, se puede reducir significativamente la concentración de estos metales en el suelo y, por ende, disminuir el riesgo de exposición de las personas a estas sustancias tóxicas. Por otro lado, mejora el entorno local ya que muchas comunidades

cercanas a relaves mineros contaminados enfrentan una degradación ambiental significativa debido a la liberación de metales pesados en el suelo y el agua. Al emplear una estrategia de fitorremediación, es posible restaurar la calidad del suelo y reducir la contaminación ambiental, lo que beneficiaría directamente a los residentes locales al mejorar la calidad del aire, el agua y el suelo en sus alrededores. Así también, en cuanto al empoderamiento comunitario, ya que aborda la problemática de la contaminación por arsénico y plomo a través de una tesis de investigación y aplicar soluciones prácticas como la fitorremediación, se empodera a las comunidades locales al brindarles una opción efectiva y accesible para resolver los problemas ambientales que enfrentan en su entorno.

### **1.4.3 Económica**

La justificación económica para la presente investigación está basada en los beneficios financieros y económicos que su aplicación podría generar a largo plazo, e involucra a los costos de remediación, ya que actualmente, los tratamientos físicos y avanzados para remediar suelos contaminados con arsénico y plomo suelen ser costosos. La aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación del As y Pb usando *Zea mays* representa una alternativa más económica en comparación con otras técnicas de remediación, lo que podría reducir significativamente los costos asociados con la remediación de sitios contaminados.

## **1.5 Delimitantes de la investigación**

### **1.5.1 Delimitante teórica**

Esta investigación se delimita en base a las teorías y estudios preliminares que han demostrado que la aplicación del biocarbón-compost puede contribuir a la fitorremediación, mejorando significativamente la eficiencia en la remoción de metales pesados. Esta tesis se delimita en las teorías que evalúan la influencia de la aplicación biocarbón-compost en la fitorremediación de suelos contaminados con relaves mineros en Cerro de Pasco. Así también esta tesis, abarca la teoría de la fitoestabilización de metales pesados por medio de la capacidad fitorremediadora del *Zea mays* en suelos contaminados por relaves mineros.

### **1.5.2 Delimitante temporal**

La investigación se realizó durante el periodo del 2022, a pesar de que el relave minero se obtuvo durante octubre - diciembre del 2021, por lo que se tuvo que considerar su correcto almacenamiento. Se tuvo que considerar diferentes momentos para la recolección del relave, ya que el acceso a la zona fue complicado por la distancia desde Lima hacia Cerro de Pasco y debido a consideraciones logísticas por el COVID-19.

### **1.5.3 Delimitante espacial**

La delimitación espacial se debe a la ubicación de los relaves mineros de la localidad de Cerro de Pasco. Esta delimitación se justifica por la accesibilidad de la zona y además con las cuestiones relacionadas con permisos para accesibilidad.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Saum et al. (2018) en su trabajo de investigación titulado “Influencia del biocarbón y el compost en la fitorremediación de suelos contaminados con aceite” tuvo como objetivo comparar los efectos del biocarbón, plántulas de árboles de mezquite, compost y combinaciones de estos tratamientos sobre la tasa de biodegradación del aceite en un suelo contaminado y el tamaño de la población de bacterias que degradan el aceite. En cuanto a la metodología, se realizaron 4 réplicas, y el suelo fue contaminado de manera uniforme con aceite de motor de 2% w/w, y en cuanto al compost y el biocarbón fueron mezclados con 5% w/w y 1.5% w/w respectivamente. Además, se realizaron análisis fisicoquímicos en el suelo, compost y biocarbón (pH, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>). Los resultados indicaron que la presencia de plantas de mezquite mejoró significativamente la degradación del aceite en todos los tratamientos, excepto cuando se utilizó biocarbón como única enmienda sin compost. El mayor grado de degradación del aceite se logró en suelo sembrado con mezquite y modificado con compost (44% de la fracción de hidrocarburos ligeros). Los ensayos numéricos más probables mostraron que el biocarbón generalmente redujo el tamaño de la población de la comunidad que degrada el petróleo. Se concluye que la adición de biocarbón a suelos contaminados con petróleo no mejora la tasa de biorremediación, en contraste, el uso de plantas y compost al suelo se confirman con tecnologías de biorremediación más eficientes.

Coelho et al. (2018) en su trabajo de investigación titulado “La combinación de compost o biocarbón con urea y NBPT puede mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno en el maíz”, tuvo como objetivo evaluar las respuestas fisiológicas y nutricionales del maíz a la aplicación de compost y biocarbón combinado con urea (N) y N- (n-butyl) triamida tiosfórica (NBPT). En cuanto a la metodología, el experimento se realizó en macetas de plástico con 3 kg de suelo en condiciones de invernadero durante 30 días. El compost y el biocarbón se aplicaron a razón de 0.3 ton/ha, utilizando una cantidad de nutriente (nitrógeno,

fósforo y potasio). Las respuestas fisiológicas del maíz se controlaron midiendo la altura de la planta, el diámetro del tallo, el contenido de clorofila de las hojas, el peso seco de los brotes y el peso seco de las raíces. Las respuestas nutricionales del maíz se evaluaron utilizando la concentración de nutrientes y la asimilación total de nutrientes por las plantas. Se concluye que la adición de compost o biocarbón no alteró la respuesta fisiológica del maíz en comparación con la adición de fertilizante mineral utilizado en las mismas condiciones.

Aladesanmi et al. (2019) en su trabajo de investigación titulado “Factor de bioacumulación de metales pesados seleccionados en *Zea mays*” tuvo como objetivo realizar una revisión bibliográfica con el fin de analizar la capacidad que tiene el *Zea mays* para acumular metales pesados. La metodología consistió en realizar un análisis sistemático, para ello se analizaron investigaciones de fitorremediación con *Zea mays* en suelos contaminados por minería, industrias, fertilizantes, fundición, regadío de aguas residuales municipales y desechos de batería; los cuales presentaban altas concentraciones de cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), cobre (Cu) y zinc (Zn) en el suelo. Por lo que la metodología consistió en utilizar palabras clave asociadas a “*Zea mays*”, “Metales pesados” en repositorios de investigación internacionales para luego sistematizar la información. La investigación concluyó que, el *Zea Mays* es un gran acumulador de metales pesados, además, que la capacidad fitorremediadora está influenciada por diversos factores como la textura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, el pH del suelo y la forma química del metal pesado en el suelo.

Novak et al. (2019) en su trabajo de investigación titulado “Las mezclas de compost-biocarbón facilitan el crecimiento de pasto varilla en suelos de minas al reducir la biodisponibilidad de Cd y Zn”, tuvo como objetivo, evaluar la capacidad del biocarbón producido a partir de tres materias primas diferentes junto con una mezcla de compost para mejorar las condiciones de crecimiento de la hierba varilla en un suelo impactado por una mina, esto se logró al examinar las influencias en el pH del suelo, el contenido de metales del pasto y las concentraciones de metales extraíbles del suelo. La metodología utilizó un diseño factorial completo, el suelo se trató con un 0%, 2.5% y 5% (p/p) mezcla de

compost (astillas de pirolizado a partir de estiércol de ganado vacuno, lecho de aves de corral y madera + estiércol de ganado vacuno), y 0%, 2,5% y 5% de cada biocarbón materias primas de pino carnero. Se cultivó pasto varilla (*Panicum virgatum*) en un invernadero durante 50 días y se evaluó la masa de brotes (biomasa aérea) y raíces, mientras que el pH del suelo desionizó  $H_2O$  y 0,01 M  $CaCl_2$ - se midieron las concentraciones extraíbles de Cd y Zn. El biocarbón y el compost de la hojarasca de aves de corral tenían la mayor capacidad para elevar el pH del suelo (de 4,40 a 6,61), el biocarbón y el compost del estiércol de ganado de carne aumentaron moderadamente el pH (de 4,4 a 5,92), además el biocarbón y el compost de pino ligeramente elevaron el pH (de 4,40 a ,05). Los suelos tratados con biocarbón de estiércol de ganado vacuno, biocarbón de lecho de aves de corral, redujeron significativamente el  $H_2O$  y 0,01 M  $CaCl_2$  desionizado - concentraciones extraíbles de Cd y Zn, mientras que los suelos tratados con biocarbón de pino mostraron resultados mixtos. Las masas de brotes y raíces de pasto (varilla) fueron mayores en suelos tratados con compost en combinación con biocarbón de estiércol de ganado vacuno o biocarbón de cama de aves de corral. Los suelos tratados con biocarbón de estiércol de vacuno al 5% + compost al 5% tuvieron mayores reducciones en las concentraciones totales de Cd y Zn medidas en brotes y raíces de pasto varilla en comparación con los otros dos tratamientos. Los tres biocarbonos y las mezclas de compost aplicadas a suelos de metales pesados impactados por minas tenían diferencias de rendimiento considerables para mejorar la productividad del pasto varilla. El crecimiento de la hierba varilla mejoró notablemente después del tratamiento con el compost en combinación con biocarbón de estiércol de ganado vacuno o basura de aves de corral. Esto puede explicarse por el aumento del pH del suelo que promovió la precipitación de Zn y Cd y los grupos funcionales orgánicos que redujeron las concentraciones de metales pesados disponibles en el suelo. Los resultados implican que la creación de biocarbón de diseño es un componente de gestión importante en el desarrollo de programas exitosos de fitoestabilización en sitios mineros. Se concluye que las enmiendas del biocarbón y compost han surgido como posibles agentes de remediación para remover metales pesados en la mina.

Zafar-ul-Hye et al. (2020) en su trabajo de investigación titulado “Papel potencial del biocarbón mezclado en compost con rizobacterias en la mitigación de la toxicidad del plomo en la espinaca” tuvo como objetivo evaluar el efecto de la desaminasa de biocarbón (CB) y ACC que produce PGPR en el crecimiento y rendimiento de las plantas de espinaca bajo toxicidad por Pb inducida artificialmente. Se aplicaron seis tratamientos diferentes, es decir, control, *Alcaligenes faecalis* (PGPR1), *Bacillus amyloliquefaciens* (PGPR2), compost + biocarbón (CB), PGPR1 + CB y PGPR2 + CB bajo 250 mg Pb kg<sup>-1</sup>tierra. Los resultados mostraron que la inoculación de PGPR (*Alcaligenes faecalis* y *Bacillus amyloliquefaciens*) solo y junto con CB mejoró significativamente el peso fresco (47%) y seco (31%) de la raíz, la concentración de potasio (11%) en la planta de espinaca. Mientras que CB *Bacillus amyloliquefaciens* disminuyó significativamente (43%) la concentración de Pb en la raíz de espinaca sobre el control. En conclusión, CB *Bacillus amyloliquefaciens* tiene el potencial de mitigar la toxicidad inducida por Pb en la espinaca. El resultado obtenido se puede utilizar más en la planificación y ejecución de rizobacterias y enmienda de suelo a base de biocarbón mixto de compost.

Li et al. (2021) en su trabajo de investigación titulado “Respuesta de los microorganismos oxidantes del amoníaco a las enmiendas de biocarbón y compost de suelos contaminados con metales pesados”, tuvo como objetivo evaluar la aplicación del biocarbón, compost y su uso combinado, y su influencia en los microorganismos oxidantes del amoníaco en suelos contaminados con metales pesados. En cuanto a la metodología, se determinó la abundancia de arqueas oxidantes de amoníaco (AOA) y bacterias (AOB). Así también, la actividad de amoníaco monooxigenasa (AMO) se evaluó mediante el ensayo inmunoabsorbente ligado a enzimas. Los resultados mostraron que el abono en lugar del biocarbón mejoró la conversión de nitrógeno en el suelo. El biocarbón, el compost o su aplicación integrada redujo significativamente la especiación efectiva de Zn y Cd. La adición de compost aumentó la especiación efectiva de As y Cu, la abundancia de ARNr 16S bacteriano y la actividad de AMO, AOB, estimulado por la adición de compost, fue significativamente más abundante que AOA durante la remediación. El análisis de correlación mostró que la abundancia

de AOB se correlacionó positivamente con  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  ( $r = 0.830$ ,  $P < 0.01$ ), y que la actividad de AMO tuvo una correlación significativa con EC ( $r = -0.908$ ,  $P < 0.01$ ) y carbono soluble en agua ( $r = -0.868$ ,  $P < 0.01$ ). Esos parecen ser los factores más vitales que afectan a la comunidad AOB y su función en suelos contaminados con metales pesados remediados por biocarbón y compost. La investigación concluye que los niveles de toxicidad de metales pesados cambiaron significativamente al agregar biocarbón y compost al suelo y la adición de compost en lugar de biocarbón mejoró la conversión de nitrógeno

Liu et al. (2021) en su trabajo de investigación titulado “Efectos combinados del biocarbón y el estiércol de pollo sobre el crecimiento del maíz (*Zea mays L.*), la absorción de plomo y las actividades de las enzimas del suelo bajo estrés por plomo”, tuvo como objetivo evaluar los efectos aditivos del biocarbón y el estiércol de pollo en el crecimiento del *Zea mays L.* en suelos contaminados con Pb. En lo que corresponde a la metodología se llevó a cabo un experimento en una maceta para investigar cómo el biocarbón en el suelo (20, 40 g/kg), el estiércol de pollo en el suelo (20, 40 g/kg) o una combinación de biocarbón y estiércol de pollo en suelo (cada uno a 20 g/kg) afectan el crecimiento del maíz, la absorción de Pb, las actividades enzimáticas antioxidantes de las hojas y las actividades de las enzimas del suelo en condiciones artificiales para simular una contaminación moderada del suelo (800 Pb mg/kg). Los resultados mostraron que todos los tratamientos con biocarbón y/o estiércol de pollo aumentaron significativamente ( $p < 0,05$ ) la altura de la planta de maíz, la biomasa y la actividad de superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT), pero disminuyeron el contenido de malondialdehído (MDA). Estos resultados indicaron que modificar el suelo con biocarbón y/o estiércol de pollo podría aliviar la fitotoxicidad del Pb. Los tratamientos con biocarbón y/o estiércol de pollo redujeron notablemente la concentración de Pb en raíces, tallos y hojas de maíz, el factor de bioconcentración (BCF), el factor de translocación (TF) y la concentración de Pb disponible en el suelo. Modificar el suelo solo con estiércol de pollo fue más eficaz para aumentar el crecimiento del maíz y la actividad enzimática antioxidante; el tratamiento con biocarbón solo fue más eficaz para inducir la alcalinización del suelo y contribuir a la inmovilización del Pb. El uso

combinado de biocarbón y estiércol de pollo tuvo un efecto aditivo y produjo los mayores aumentos en el crecimiento del maíz, la actividad enzimática, antioxidante de las hojas y la actividad enzimática del suelo. Su uso combinado también condujo a las disminuciones más significativas en el Pb de los tejidos del maíz y el Pb disponible en el suelo. Se concluye que una combinación de biocarbón y estiércol de pollo fue más eficaz para reducir la biodisponibilidad y la absorción de Pb en el suelo por parte de los tejidos del maíz y aumentar el crecimiento del maíz.

Liao et al. (2022) en su trabajo de investigación titulado “Efecto de diferentes especies de biomasa y temperaturas de pirólisis en la adsorción de metales pesados, estabilidad y economía de biocarbón” tuvo como objetivo, evaluar el biocarbón bajo diferentes escenarios, fisicoquímicos, en la estabilidad y economía de producción, para lo cual dentro de la metodología empleada se utilizaron tres residuos agrícolas para preparar biocarbón a temperaturas que oscilan entre 300 ° y 600 ° C y los mecanismos correlativos entre el proceso de preparación, características fisicoquímicas, costo, propiedades de adsorción y estabilidad de biocarbón fueron estudiados sistemáticamente. Los resultados mostraron que, con el aumento de la temperatura de pirólisis, el rendimiento del biocarbón disminuyó, mientras que la estabilidad y la capacidad de adsorción aumentaron. Los análisis económicos mostraron que biocarbón preparado a partir de cascarilla de arroz a 500 ° C tuvo el mayor valor económico (292,73 mg/\$ para Pb<sup>2+</sup>, 84,29 mg/\$ para Cu<sup>2+</sup>). Además, el biocarbón preparado con cáscara de arroz tuvo la mayor estabilidad de adsorción debido al dominio de la complejación y el intercambio iónico. Se concluye que la capacidad de adsorción de metales pesados de biocarbón con diferentes materias primas fue significativamente diferente, CSC alcanzó la mayor capacidad de adsorción de Pb<sup>2+</sup> (61,07 mg/g) debido a mejor estructura de poros y grupos funcionales de superficie más ricos que el otros, y RHC alcanzó la mayor capacidad de adsorción de Cu (17,35 mg/g) debido a un mayor contenido de cenizas que los demás.

Saqib Rashid et al. (2022) en su trabajo de investigación titulado “Eficacia del biocarbón de cáscara de arroz y enmiendas de compost en la translocación, biodisponibilidad y especiación de metales pesados en suelos contaminados:

papel de la producción de radicales libres en el maíz (*Zea mays L.*)” tuvo como objetivo evaluar efectividad del biocarbón de cáscara de arroz (RHB) y el compost de estiércol de pollo (CMC), por lo que la metodología que emplearon contempló los siguientes tratamientos (T1: Control, T2: 2% RHB, T3: 2% CMC, T4: 1% RHB + 1% CMC) para así evaluar la movilidad de metales pesados y el crecimiento de plantas de maíz en suelo contaminado. Los resultados indicaron que la fracción móvil potencial de Cr (44,43%), Ni (29,93%) y Zn (44,68%) representó T2, mientras que Cu (69,33%) y Pb (34,38%) por T4. La modificación del suelo resultó en un aumento significativo en el crecimiento y producción de la biomasa del maíz, mientras que T4 mostró un incremento de 156% en el peso fresco del maíz. Mientras que la biomasa de raíces fue más alta con el tratamiento T2, que incrementó el peso fresco y seco en 35% y 90%. El factor de bioacumulación (BF) y el factor de translocación (FT) fue menor a uno, lo que indica que el bajo contenido de acumulación de HM en las raíces de suelo y ligeramente transferido a disparar (tejidos comestibles). Los resultados de la resonancia paramagnética electrónica (EPR) reveló la generación de radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ) como especies reactivas de oxígeno (ROS) en raíces y brotes de maíz. La espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) y el espectro infrarrojo transformado de Fourier (FTIR) confirmaron la complejación y la adsorción de metales pesados como mecanismos destacados debido a su complejación con grupos hidroxilo, carbonilo y carboxilo. De la investigación se concluyó que RHB y la CMC, y su combinación se pueden usar de manera efectiva para la remediación de HM al reducir su toxicidad y biodisponibilidad en matrices alimentarias y suelos.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Grandez (2017) en su trabajo de investigación titulado “Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus*) y maíz (*Zea mays*) usando enmiendas” tuvo como objetivo evaluar la fitorremediación de *Helianthus annuus* L. (girasol) y *Zea Mays* (maíz) asistida con enmiendas, como humus y compost, en suelos contaminados por plomo y cadmio en el distrito de Huaripampa, departamento de Junín. La metodología consistió en tomar muestra total de 50

kg de suelo del área de estudio, luego se aplicaron 3 tratamientos a cada planta, para dichos tratamientos se estableció el uso de humus, compost y la combinación de estos. En cuanto al análisis estadístico se realizó en base la ANOVA factorial, en el cual se determinó la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos aplicados con enmiendas, girasol y maíz. Los resultados obtenidos, de la concentración de Pb y Cd, después de 64 días mostraron que los tratamientos aplicados fueron significativos. La investigación concluyó que una de las mejores alternativas para remediar suelos contaminados con metales pesados es el *Zea Mays*.

Munive et al. (2018) en su trabajo de investigación “Fitorremediación con maíz (*Zea mays*) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados” el objetivo de este artículo científico fue evaluar la capacidad fitorremediadora del cultivo de maíz (*Zea mays*) asistido con enmiendas orgánicas de stevia, como compost y vermicompost, en suelos agrícolas contaminados por metales pesados en las localidades Mantaro y Muqui del valle del Mantaro. La metodología de la investigación consistió en analizar el contenido de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en suelo agrícola, luego el suelo fue acondicionado en macetas, donde se cultivó el maíz, para comparar 3 tipos de asistencias (tratamientos): compost de stevia, vermicompost de stevia y una enmienda sintética; cada tratamiento tuvo 3 repeticiones. Los resultados muestran que el maíz tiene la capacidad de absorber el Pb y Cd, acumulando en promedio el 80% en la raíz, 15% en las hojas y el 5% en el tallo. La investigación concluye que la adición enmiendas orgánicas contribuyen en la solubilización del Pb y Cd de tal forma que se genera una mejor absorción, además, que el maíz se comporta como una plantaestabilizadora de Pb y Cd.

Ríos (2018) en su trabajo de investigación “Aplicación de biocarbón de *Mespilus germanica l.* y *Mangifera indica l.* en suelos contaminados para reducir plomo en la zona de la Huaca - Huaral, 2018” esta investigación tuvo como objetivo disminuir la concentración de plomo en el suelo mediante la aplicación de biocarbón de *Mespilus germanica L.* (níspero) y *Mangifera indica L.* (mango). Para ello, se analizó y comparó la concentración del plomo en el suelo (391.00 ppm) del área de estudio con los estándares de calidad ambiental (ECA), luego se

produjo el biocarbón, a través un proceso termoquímico (pirólisis), a base de la poda de árboles frutales para su aplicación en paralelo a 1 kg de suelo en diferentes dosis (5% ,10% y 20%) durante un periodo de 30 a 60 días. Los resultados encontraron que la aplicación de biocarbón al 10% de *Mangifera indica L.* (mango) obtuvo la adsorción (358.14 ppm) más alta durante los 60 días de tratamiento. La investigación concluyó que la aplicación de biocarbón logró disminuir la concentración de plomo y también mejoró las propiedades fisicoquímicas del suelo, además, el autor recomienda utilizar la dosis de biocarbón al 10% en suelos contaminados con metales pesados.

Gama (2019) en su tesis de maestría titulado “La fitorremediación como alternativa en la recuperación de suelos afectados con desmontes de construcción – Cajabamba” tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la fitorremediación de metales pesados como plomo, cadmio y cromo en suelos utilizados como desmonte en la ciudad de Cajabamba, región Cajamarca; utilizando especies, como maíz (*Zea mays L.*), taya (*Tara spinosa Kuntze*) y el uso en paralelo del trébol rojo (*Trifolium pratense L.*) y rye grass (*Lolium multiflorum Lam.*); de uso común para los pobladores de la zona. La metodología consistió en tomar muestras del suelo antes y después cada tratamiento, además, para el desarrollo de cada tratamiento se tomaron tres áreas de 60 m<sup>2</sup> para cada tratamiento. Se utilizó el diseño estadístico descriptivo - longitudinal, considerando las tres parcelas por cada especie y realizando una evaluación del suelo en pre y post cosecha. La investigación concluyó que los tres tratamientos lograron disminuir la concentración de los metales pesados en suelos; siendo el plomo uno de los metales pesados con resultados más relevantes, ya que el maíz (*Zea mays*) y el uso en paralelo del trébol rojo (*Trifolium pratense L.*) y rye grass (*Lolium multiflorum Lam.*) removieron el 80%, seguido de la taya (*Tara spinosa Kuntze*) con un 60%.

Fow (2021) en su investigación titulada “Evaluación de la capacidad fitorremediadora de tres especies vegetales altoandinas asistidas con biochar en suelos contaminados por drenaje ácido de roca en la microcuenca Quillcayhuanca, Ancash” tuvo como objetivo evaluar la capacidad fitorremediadora de especies vegetales altoandinas asistidas con Biochar en

suelos contaminados por Drenajes Ácidos de Roca (DAR). Para lo cual, la metodología consistió en realizar visitas a la zona afectada por DAR en la Microcuenca Quillcayhuanca, es así que se evaluaron parámetros ambientales y concentración de metales en el área de estudio. Las especies utilizadas en la fitorremediación fueron *Calamagrostis spp.*, *Paranephelium ovatus* y *Werneria nubigena*. Se utilizaron macetas con suelo contaminado por DAR y dosificaciones del 0%, 1% y 3% de biochar en un invernadero a 3 850 m.s.n.m, el experimento en invernadero tuvo una duración aproximada de 3 meses. Los resultados demostraron que la presencia del DAR genera que sus áreas adyacentes tengan altas concentraciones de metales, los cuales son acumulados por las plantas que se desarrollan en esas zonas. Con respecto al experimento de fitorremediación en invernadero, se determinó que la aplicación de biochar influye significativamente en el aumento del pH en el sustrato, mientras que, en niveles de acumulación de metales, hubo diferencias significativas por parte de la dosificación del 1% de biochar en concentraciones de Cu para *Werneria nubigena* y *Paranephelium ovatus*. En cuanto al potencial fitorremediador de las plantas evaluadas en el experimento, estas tuvieron variaciones específicas en cada metal analizado y, por último, mediante un análisis de la variación de concentración de metales, de inicio al final del experimento, se determinó que *Calamagrostis spp.* presentó un aumento significativo de Cu y Al en su parte aérea, mientras que, *Werneria nubigena* y *Paranephelium ovatus* presentaron aumentos significativos de Fe, Mn, Zn y Cu en sus partes radicales. Se concluye que la capacidad fitorremediadora de las especies vegetales altoandinas se ve modificada tras ser sometidas a un suelo con mayor concentración de metales y/o diferentes dosificaciones de biochar. Además, las dosificaciones del biochar modifican las características físico-químicas del suelo; generando así que las plantas en estudio cambien su potencial fitorremediador de estabilizador a extractor o viceversa.

Poma y Quiñones (2022) en su investigación titulada “Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea mays* en un suelo contaminado con cadmio. Leonor Ordoñez, Jauja – 2021” tuvo como objetivo evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas en la fitorremediación con *Zea*

*mays* en un suelo contaminado con cadmio en Leonor Ordoñez, Jauja. La investigación corresponde a un estudio con un diseño completamente al azar. En cuanto a la metodología, las pruebas se realizaron utilizando macetas de plástico, con 7 tratamientos y 3 repeticiones, lo que totalizó 21 unidades experimentales. Cada maceta contenía 2 kg de sustrato (suelo + porcentaje de enmienda orgánica) y se emplearon 2 tipos de enmiendas orgánicas (vermicompost y compost) en tres dosis diferentes (5%, 10% y 20%), además de un grupo de control. Las semillas de maíz de la variedad San Gerónimo fueron previamente germinadas durante 5 días y luego trasplantadas, con 7 semillas por maceta. Las plantas se desarrollaron durante un período de 60 días. Al finalizar el experimento, se analizaron las muestras de suelo, así como las partes foliares y radiculares del *Zea mays* L. Los resultados demostraron que la aplicación de enmiendas orgánicas aumentó la concentración de cadmio total en el *Zea mays* L., en un rango que osciló entre 6,94 mg/kg y 13,79 mg/kg. Los tratamientos que utilizaron vermicompost en dosis de 5%, 10% y 20% obtuvieron los mejores resultados en este sentido. La concentración de cadmio total en el suelo también se incrementó en un rango de 7,38 mg/kg a 8,77 mg/kg en comparación con el tratamiento control. Los tratamientos que emplearon compost en dosis de 10% y 20%, así como vermicompost en dosis de 20%, tuvieron la menor concentración de cadmio en el suelo. Así mismo, el uso de enmiendas orgánicas incrementó el factor de bioconcentración (FBC) en la raíz del *Zea mays*, en un rango de 0,59 a 1,23. Nuevamente, los tratamientos con vermicompost en dosis de 5%, 10% y 20% presentaron los mejores resultados en este aspecto. Asimismo, el factor de traslocación (FT) aumentó en un rango de 0,08 a 0,1 en comparación con el tratamiento control. Los tratamientos que utilizaron compost en dosis de 5%, 10% y 20% obtuvieron los mejores resultados en este indicador. Se concluyó que la aplicación de enmiendas orgánicas no favorece el proceso de fitorremediación con *Zea mays* en un suelo contaminado con cadmio en este estudio específico.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Teoría del biocarbón-compost**

Por biocarbón-compost, se entiende a una mezcla de compost y biocarbón, es decir, biocarbón-compost, donde el biocarbón se produce a partir de un residuo y el compost de otros, y cuando están listos en cuanto a calidad, se mezclan para su aplicación en el suelo (Virú-Vásquez et al. 2022). A lo largo de los años, se ha venido estudiando la aplicación del biocarbón y el compost con otras enmiendas en el suelo, para evaluar la sinergia y mejora que podría haber, no solo con metales pesados, sino también con contaminantes como el petróleo. A continuación, se muestran los diferentes estudios; en la Tabla 1. se ilustra los diferentes autores que han realizado investigaciones sobre el biocarbón y el compost como mezcla y su aplicación en el suelo utilizando diferentes plantas y evaluando la fitorremediación.

En los últimos años, la aplicación de enmiendas, como biocarbón y compost, en la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados se ha propuesto como una alternativa adecuada para reducir los impactos ambientales asociados a estos contaminantes (Fangueiro et al. 2017) ya que esta técnica puede disminuir la dinámica de los contaminantes potencialmente tóxicos en el suelo. También puede reestablecer la funcionalidad del sitio contaminado a largo plazo e incrementar la diversidad microbiana en el suelo asociada al desarrollo del cultivo (Pardo, Clemente y Bernal 2011; Zornoza et al. 2015). Los beneficios asociados con la aplicación de biocarbón o compost en el suelo varían principalmente en las características fisicoquímicas y biológicas (Arienzo et al., 2004; Yang et al., 2016). La mitigación de las características adversas del suelo genera la aparición de cobertura vegetal, la cual aporta a la estabilización del suelo y ayuda a reducir la dispersión de los contaminantes por la erosión del suelo (Arienzo, Adamo y Cozzolino 2004). Es importante diferenciar la adición del biocarbón al compost, una se denomina co-compostaje, es decir que el biochar se agrega durante el compostaje (Antonangelo, Sun y Zhang 2021) (antes de que el compost se estabilice), mientras que la otra significa que el biocarbón y el compost se mezclan)(Ogundiran et al., 2018).

**Tabla 1.***Estudios del biocarbón-compost en la fitorremediación*

Contaminante	Biocarbón	Compost	Planta asistida	Días	Conclusiones	Autor
Cd, Zn	estiércol de ganado vacuno, cama de aves de corral y materias primas de pino (0%, 2.5%, 5%)	Astillas de madera + estiércol de ganado vacuno (0%, 2.5%, 5%)	<i>Switchgrass</i>	50	Los suelos tratados con 5% de biocarbón de estiércol de ganado vacuno + 5% de compost tuvieron mayores reducciones en las concentraciones totales de Cd y Zn	(Novak et al. 2019)
Pb	biocarbón de cáscara de arroz (RHB) y biocarbón de cáscara de maní (GSB)* 10 g/kg	Compost de estiércol de girasol y aves* 10 g/kg	<i>Moringa oleifera</i>	240	Se puede recomendar la utilización de compost, RHB de arroz y GSB con <i>M. oleifera</i> para la fitorremediación de suelos contaminados con Pb	(Ogundiran et al., 2015)
Pb, As	Biocarbón de madera dura, biocarbón de pino (5%)	Compost comercial (Scotts France SAS, France) (5%)	<i>A. altissima seedlings</i>	36	El biocarbón de madera dura combinado con compost (HBCP) fue la enmienda del suelo más eficaz para promover la estabilización de los metales en el suelo y reducir la lixiviación del metal en las aguas subterráneas.	(Alidou-Arzika et al. 2021)
Suelo contaminado con petróleo	Biocarbón de tallos de maíz (1.5%)	Compost a partir de residuos de crucíferas y estiércol de vaca (5%)	<i>Prosopis articulata</i>	105	Las enmiendas de biocarbón y compost junto con la fitorremediación son de interés para facilitar la limpieza de suelos contaminados con petróleo.	Saum et al. (2018)

Fuente: Elaboración propia.

### **2.2.2.1. El Biocarbón**

El Biochar o biocarbón en español, es un material rico en carbono obtenido mediante la conversión térmica de la biomasa en condiciones limitantes de oxígeno y a temperaturas relativamente bajas (<700 °C) (Lehmann y Joseph 2009).

Un tipo de carbón negro es el biocarbón, el cual es generado a partir de la quema de materiales carbonosos, como madera, residuos alimentarios, etc.; en altas temperaturas y en condiciones bajas o ausentes de oxígeno, este proceso es conocido como pirólisis (Atkinson, Fitzgerald y Hipps 2010; Karhu et al. 2011). A diferencia de otros tipos de carbón negro, el biocarbón tiene como fin ser utilizado para mejorar la calidad del suelo (Barrow 2012), ya que según Schnell et al. (2012) el biocarbón puede incrementar el pH del suelo, la retención de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (CEC), la biomasa de los cultivos y otros aportes que mejoran la calidad del suelo y la agricultura, además, incrementa el secuestro de carbono en el suelo (Lehmann 2007). Así también, el biocarbón es una enmienda utilizada para la restauración de suelos contaminados por la minería, por investigaciones como las de (Alidou-Arzika et al. 2021; Ducey et al. 2021), ya que se ha demostrado que el biocarbón puede unirse a metales pesados (Novak et al. 2019).

El biocarbón está formando las bases de “La doble revolución verde” por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través del secuestro de carbono en el suelo y por abordar la inseguridad alimentaria simultáneamente (Barrow 2012). Este tipo de carbón negro está generando mucha atención en los suelos tropicales donde la agricultura es difícil de mantener debido al déficit de minerales en el suelo, el cual, es generado por el clima cálido y lluvioso, y también por la rápida degradación de la materia orgánica (Glaser et al. 2001), ya que la naturaleza estable del biocarbón genera condiciones idóneas para el suelo a largo plazo. Según Major et al. (2010) una sola aplicación de biocarbón, durante 4 años, mejora la calidad de los cultivos.

### **a. Aplicaciones del biocarbón**

Las primeras investigaciones del biocarbón como las de Lehmann et al. (2006), muestran que es una tecnología eficiente para el secuestro del carbono. Actualmente, el biocarbón es un producto multifacético y versátil ya que sus distintas aplicaciones abarcan temas generales como la mitigación del cambio climático, el manejo de residuos sólidos, la producción de energía, sorbente de contaminantes en agua y suelo y muchas más, y se posiciona como un gran enmendador para el suelo. A continuación, se muestra una breve descripción de las aplicaciones generales del biocarbón.

#### **Remoción de contaminantes en el agua.**

La contaminación del agua es uno de los problemas globales más grandes hoy en día debido a la intensificación de las actividades humanas, incluida la industria y la agricultura (Li, Zhao y Zhang 2018). La sorción es el método preferido para la remoción de contaminantes aniónicos en el agua. Existen diferentes adsorbentes tales como la zeolita, el carbón activado, la bentonita y el biocarbón (Li, Zhao y Zhang 2018; Ibrahimi y Sayyadi 2015). El carbón activado probablemente es uno de los adsorbentes más utilizados para tratar aguas contaminadas. Sin embargo, cuando se hace la comparación entre el biocarbón y el carbón activado, el primero puede producirse a partir de una gran cantidad de residuos (Baltrėnaitė et al. 2017). Además, demuestra ser una tecnología costo-efectiva. Se calcula que el costo de producción del biocarbón oscila entre 0.2 - 0.5 \$/kg mientras que los adsorbentes como las resinas de intercambio iónico pueden llegar a costar hasta 150\$/Kg (Ahmed et al. 2015).

En ciertas ocasiones el biocarbón prístino tiene baja capacidad de adsorción en soluciones acuosas, es por eso que se han desarrollado métodos de ingeniería mediante la modificación física, química y biológica del biocarbón (Wang, Gao y Fang 2017). La modificación química consiste en la adición de químicos a la biomasa y como resultado, el área superficial y capacidad de intercambio catiónico se incrementan, favoreciendo la capacidad de adsorción (Usman et al. 2016; Wang, Gao y Fang 2017). Por otro lado, la impregnación de elementos al biocarbón también ha resultado ser eficiente. Por ejemplo Park et

al. (2019) obtuvo una capacidad máxima de adsorción de 107 mg/g en el biocarbón de astillas de madera impregnado con azufre elemental para la remoción de Hg (II) en aguas contaminadas. Cabe resaltar que la presencia de celulosa, hemicelulosa, proteínas, azúcares y lípidos en los residuos agropecuarios proporciona una gran variedad de grupos funcionales que pueden activarse físicamente mediante pirólisis proporcionando una gran capacidad de adsorción de metales pesados (Inyang et al. 2011).

### **Remoción de metales en el suelo**

El biocarbón tiene una alta capacidad de adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. A lo largo de los años, recurrente literatura respecto a la aplicación del biocarbón para la remediación del suelo contaminado con metales pesados es acerca del biocarbón prístino, biocarbón sin modificación (Wang, Gao y Fang 2017). Sin embargo, la modificación del biocarbón también conlleva a una alta eficiencia en la remoción de contaminantes en el suelo y actualmente estudios se están enfocando en ello.

La Tabla 2 muestra al sorbato objetivo, tipo de suelo y porcentaje de remoción de los contaminantes, también las propiedades fisicoquímicas y modificación de los biocarbonos, obtenidos a partir de los residuos agropecuarios y forestales aplicados en la sorción e inmovilización de contaminantes en el suelo. Como se aprecia en dicha Tabla, Herath et al. (2014) obtuvo un 99% de remoción de Cr, mediante la aplicación de biocarbón de biomasa leñosa, mientras que obtuvo un 42% de remoción de Mn con el mismo sustrato, también utilizó plantas de tomate como bioindicadores de acumulación de metales pesados, logrando concluir que el biocarbón inmovilizaba los metales. Igalavithana et al. (2017) aplicó biocarbón obtenido a partir de piñones y una mezcla entre piñones y residuos vegetales a suelos agrícolas contaminados con Pb (II) y obtuvo un máximo de 87.3 % de remoción aplicando la mezcla la cual fue producida mediante pirolisis lenta, a pesar de que el piñón solo ha producido a 500°C, y tuvo un área superficial mucho mayor que la mezcla, solo removió un 15,7%. Esto se puede explicar ya que, al mezclar dos sustratos existe una sinergia tal que se pueden formar nuevos grupos

funcionales lo que permite la atracción de metales pesados hacia la superficie. Por último, Shen et al. (2019) aplicó biocarbón de tuza de maíz prístino (sin modificar) y modificado con MgO para la remoción de Pb (II) en suelos contaminados, obtuvo un 74% y 23% de remoción para el primero y segundo respectivamente. Esto se debe ya que al modificar un biocarbón químicamente el volumen de poros y área superficial se pueden incrementar favoreciendo la capacidad de adsorción.

### **Mitigación de gases de efecto invernadero**

El biocarbón tiene alto contenido de carbono, es recalcitrante y posee estabilidad debido a sus estructuras aromáticas conjugadas, lo que hace que sea más difícil de degradar en el entorno, por ende, puede permanecer en el suelo por miles de años (Liu et al. 2014; Pires 2019). La incorporación del biocarbón al suelo puede cambiar sus propiedades físicas, químicas y biológicas y consecuentemente puede tener efectos en las emisiones de gases de efecto invernadero como CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> (Li et al. 2018).

En el informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) el biocarbón fue incluido como una posible tecnología de emisión negativa (NET) (Rogelj et al. 2018), tecnología que permite lograr un balance negativo de carbono en la atmósfera, favoreciendo la mitigación del cambio climático (Pires 2019). Con este hito importante se espera que las investigaciones concernientes a la aplicación del biocarbón para la mitigación de gases de efecto invernadero aumente a nivel mundial.

Angst et al. (2014) y LIN et al. (2017) produjeron biocarbón a partir de pino y estiércol de pollo, respectivamente. Ambos no tuvieron diferencias significativas en las emisiones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Mientras que Senbayram et al. (2019), obtuvo una disminución del 64% con respecto a una muestra control de suelo modificado con nitrógeno, la investigación fue realizada a nivel laboratorio. Esto puede esclarecer porque las primeras investigaciones no obtuvieron resultados favorables ya que se realizaron a nivel campo, en donde las condiciones climáticas como la temperatura, presión, precipitación pueden variar y son difíciles de controlar. Se necesita más trabajos de investigaciones a nivel

campo que demuestren que el biocarbón a partir de residuos agropecuarios es eficiente en la disminución de flujos de emisiones de gases de efecto invernadero.

### **Biocarbón como enmienda para suelo**

La aplicación del biocarbón como enmienda del suelo sirve para enriquecer la sostenibilidad del suelo de varias formas y es una práctica prometedora para la agricultura sostenible (Peiris et al. 2018). Su aplicación influye en las propiedades del suelo como, pH, aireación densidad aparente, capacidad de retención del agua, disponibilidad de nutrientes, sorción de componentes orgánicos e inorgánicos y puede tener múltiples efectos en las comunidades microbianas, las cuales son esenciales para las funciones del suelo como la provisión de nutrientes a las plantas (Steiner, Bayode y Ralebitso-Senior 2016). La eficiencia de la aplicación del biocarbón al suelo depende de múltiples factores como, el tipo de sustrato que se empleó para producción, las condiciones del proceso, como la temperatura, la velocidad del calentamiento y el tiempo de residencia. También depende de las propiedades fisicoquímicas propias del suelo y la modificación del biocarbón que puede ser física, química y biológica (Wang, Gao y Fang 2017).

Guo et al. (2014) aplicó biocarbón de estiércol de vaca en un suelo ácido con una dosis de 20,40 g/kg como consecuencia obtuvo un incremento del fósforo, potasio y nitrógeno del suelo. La aplicación del biocarbón también tiene efectos favorables en el incremento de comunidades bacterianas. Como ejemplo tenemos a la investigación de JIANG et al. (2017), que utilizó biocarbón de tuza de maíz para incrementar la calidad en un suelo franco, como impacto mejoró la abundancia y diversidad de bacterias de los géneros Bacteroidales, Flavobacteriales, Bacilli y Cellvibrionales. La modificación física y biológica también ha mostrado resultados favorables en la mejora de la calidad del suelo. Brantley et al. (2015) produjo biocarbón mediante pirólisis lenta a partir de pino, prístino y modificado con nitrógeno de urea, como indicador utilizó maíz para analizar el rendimiento. Para el biocarbón modificado obtuvo un mayor rendimiento que con el prístino y esto se puede deber al incremento y movilidad

de la comunidad bacteriana y las mejoras de las propiedades fisicoquímicas del suelo como la relación C/N la cual es muy importante para evaluar la evolución de la materia orgánica en los suelos. Muy similar, Duan et al. (2019) mejoró la calidad del suelo, incrementando las comunidades bacterianas al aplicar biocarbón de madera y paja de trigo modificado con compost y consorcios bacterianos.

**Tabla 2.***Sorción e inmovilización de metales pesados en el suelo*

Sustrato	T(°C)	Mo.	Contaminante	Propiedades fisicoquímicas del biocarbón								A.S.(m <sup>2</sup> /g)	V.P (cm <sup>3</sup> /g)	P.R. (%)	Referencia
				C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	pH	H/C	O/C					
Biomasa Leñosa	900	-	Cr <sup>1</sup> , Ni <sup>2</sup> , Mn <sup>3</sup>	50 ± 0.12	1 ± 0.05	44 ± 0.02	0.5 ± 0.01	0.10 ± 0.07	0.02 ± 0.001	0.88 ± 0.002	714 ± 0.85		99 <sup>1</sup> 61 <sup>2</sup> 42 <sup>3</sup>	(Herath et al. 2014)	
Estiércol de pollo	500	-	Cu (II)	29.67	-	-	2.13	9.1	-	-	11.51	0.009	-	(Meier et al. 2015)	
Piñón	200	-		69.74	2.13	27.09	1.03	4.15	0.42	0.21	0.47	-	-		
	500	-		74.64	2.62	20.94	1.81	6.77	0.37	0.29	192.97	-	15.7 <sup>2</sup>		
Residuos vegetales <sup>1</sup> + piñón	200	-	Pb (II)	54.66	5.91	38.85	0.57	5.26	1.3	0.53	0.44	-	58.4 <sup>2</sup>	(Igalavithana et al. 2017)	
	500	-		83.85	2.7	9.73	3.71	10.39	0.39	0.09	50.26	-	73.9 <sup>1</sup> 87.3 <sup>2</sup>		
Tuza de maíz	600	-	Pb (II)	82.95 ± 0.17	2.42 ± 0.16	-	0.56 ± 0.03	7.17 ± 0.03	-	-	0.07	-	23	(Shen et al. 2019)	
		MgO		53.51 ± 0.25	4.187 ± 0.03	-	0.14 ± 0.01	10.45 ± 0.01	-	-	26.56	-	74		

Mo=Modificación, A.S.=Área superficial, V. P=Volumen de poros, P.R.=Porcentaje de remoción.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2.2. Factores que influyen en la producción del biocarbón

La pirólisis, gasificación y la carbonización hidrotérmica son los métodos de producción del biocarbón (Wang y Wang 2019). En la Tabla 3 Qian et al. (2015) hace mención del rendimiento en peso de cada tipo de producción, siendo la pirólisis en general la que mayor biocarbón produce (Yang et al. 2019).

La pirólisis constituye una importante alternativa para la valorización de la biomasa residual y como resultado de este proceso se puede generar compuestos de carácter sólido (materiales carbonosos), gaseoso (bio-gases), líquido (Herdia-salgado y Tarelho 2018). El proceso de pirólisis se puede dividir en lenta, rápida y flash, la diferencia entre los tres son las condiciones del proceso, que implican la velocidad del calentamiento, tiempo de residencia, temperatura (Canabarro et al. 2013) y el rendimiento en peso de biocarbón que producen.

**Tabla 3.**

*Rangos de rendimiento del biocarbón según tipo de producción*

Producción	Rendimiento (%)		Referencia
	Mínimo	Máximo	
Pirólisis lenta	18	77	(Inyang et al. 2010) (Zhang et al. 2013)
Pirólisis rápida	12	60	(Agblevor et al. 2010) (Kim et al. 2012)
HTC	30	60	(Poerschmann et al. 2013) (Kruse, Funke y Titirici 2013)
Gasificación	10		(Meyer, Glaser y Quicker 2011)

Fuente: Adaptado de Qian et al. (2015)

La Tabla 4 muestra los artículos abarcados entre los años 2010 y 2020 donde se observa los parámetros de producción a partir de residuos agropecuarios, forestales y los rendimientos en peso del biocarbón. Como se puede apreciar el rendimiento en peso del biocarbón se reduce mientras la temperatura aumenta, este parámetro de producción también influye en las características físico-químicas y estructurales del biocarbón (Kim et al. 2012). Por otro lado, la velocidad del calentamiento y el tiempo de residencia influyen significativamente en su estabilidad y el grado de carbonización (Leng y Huang 2018).

**Tabla 4.***Rendimiento del biocarbón de residuos agropecuarios y forestales*

Residuo Agropecuario	Parámetros de producción			Rendimiento en peso (%)	Referencia
	Tiempo de Residencia(h)	Temperatura (°C)	Velocidad de Calentamiento (°C/min)		
Pino ( <i>Pinus sylvestris</i> )	0.17	500	-	22,2- 22,5	(Kwapinski et al. 2010)
Madera de Pino	2	700	10	-	(Liu, Zhang y Wu 2010)
<i>Pinus spp.</i>	-	500	-	-	(Brantley et al. 2015)
<i>Pinus sylvestris L.</i>	0.75	700 ±5	10	21.6	(Chemerys y Baltrėnaitė 2017)
Tuza de maíz	1	400	-	-	Haga clic o pulse aquí para escribir texto.(Vu et al. 2017)
Piñón	-	200 500	7	- -	(Igalavithana et al. 2017)
Piñón	1	350 450 550	-	36.53 33.09 29.23	(Mohammed et al. 2018)
Estiércol de vaca	2	700	5	-	(Wan et al. 2018)
Tuza de maíz	3 6	600 300	- -	26.55 48.89	(Zhao y Filonchik 2019)

Fuente: Elaboración propia

En lo que respecta a los tipos de horno para la producción del biocarbón, a continuación se muestran algunos de los tipos de horno que pueden producir biocarbón. En la Figura 1 se exhibe diferentes hornos pirolíticos, en la sección a, se observa un horno de tipo KONTIKI, mediante el cual el oxígeno es de carácter controlado (Ithaka Institute 2019), en la sección b, el horno es denominado “de doble tambor”, modelo muy similar al propuesto por la International Biochar Initiative (IBI 2019), este horno se caracteriza por poseer un reactor (que está dentro del ciclindo) (Virú Vásquez et al. 2020), después se encuentra el Adam retort, el cual está hecho de ladrillos y cumple con los mismos principios de un horno de retorta de doble tambor (Biochar Project 2018).

**Figura 1**

*Tipos de hornos para producción de biocarbón*



Nota. Obtenido de a) Horno Kontiki, Wilson Castañeda. y b) Fotografía propia, horno de doble tambor, Cutervo. c) Bioenergy (2018) d) BIOCOAL (2014).

### **2.2.2.3. Normativas referentes a la calidad del biocarbón**

En los Estados Unidos de América (USA) aún no han adoptado estándares regulatorios para los niveles de contaminantes del biocarbón, aunque se han establecido valores de umbral máximos para un número limitado de sustancias tóxicas en los marcos propuestos por el **Certificado Europeo de Biocarbón (EBC)** (European Biochar Certificate 2015) y la guía del **International Biochar Initiative (IBI)** (IBI 2015) Las diferencias en estos estándares han llevado a inconsistencias tanto en la literatura científica como en la legislativa. Existe una necesidad apremiante de un marco regulatorio unificado, que facilitaría la comunicación en los campos académicos y en el

mercado emergente del biocarbón. Un desafío adicional presentado por los criterios EBC e IBI es que los valores umbral representan concentraciones 'totales', medidas a través de una digestión ácida robusta para metales pesados, o por extracción exhaustiva con solventes para orgánicos. Estos métodos tienden a sobrestimar la fracción de tóxicos "biodisponibles" y, por lo tanto, los efectos eco-toxicológicos, por lo que se necesita más investigación sobre cómo los tóxicos pueden liberarse del biocarbón con el tiempo y ponerse a disposición del sistema respiratorio humano. Este campo de estudio ayudaría a refinar la definición conceptual de los tóxicos "biodisponibles" en el biocarbón y contribuiría a estándares regulatorios más seguros y consistentes. Finalmente, se deben hacer intentos para investigar tóxicos, carcinógenos o disruptores endocrinos adicionales desconocidos, pero potencialmente peligrosos, en la matriz de biocarbón utilizando análisis no objetivo. Por lo que en la Tabla 5 se presentan algunos elementos adoptados por la normativa referente al biocarbón internacional.

**Tabla 5.**

**Normativa internacional referente a la calidad del biocarbón**

Metales pesados/ Unidades	Normas voluntarias de productos						Legislación Nacional				Regulación EC	Regulación EC
	IBI	EBC		BQM		Alemania	Austria	Suiza	Italia	2003/2003	2003/2003	
		Basic	Premium	Standard Gr.	High Gr.	Ordenanza Fertilizante	Fertilizante Ordenanza Mejorador de Suelo etc.	Fertilizante Ordenanza 4	Fertilizante Decreto #75	REFERTIL Recomendaciones	ESPP Sugerencia	
Arsénico (As)	mg/kg dm	≤100	<13	<13	≤100	≤10	≤40	≤40	–	–	≤10	–
Cadmio (Cd)	mg/kg dm	≤39	<1.5	<1	≤39	≤3	≤1,5	≤3	≤1	≤1.5	≤1.5	≤3
Cromo (Cr)	mg/kg dm	≤1200	<90	<80	≤100	≤15	–	–	–	–	≤100	–
Cromo VI (Cr VI)	mg/kg dm	–	–	–	–	–	≤2	≤2	–	≤0.5	≤0.5	≤2
Cobalto (Co)	mg/kg dm	≤100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cobre (Cu)	mg/kg dm	≤6000	<100	<100	≤1500	≤40	–	–	≤100	≤230	≤200	–
Plomo (Pb)	mg/kg dm	≤300	<150	<120	≤500	≤60	≤150	≤100	≤120	≤140	≤120	≤150
Mercurio (Hg)	mg/kg dm	≤17	<1	<1	≤17	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1.5	≤1	≤1 – 1.3
Manganeso (Mn)	mg/kg dm	–	–	–	–	≤3500	–	–	–	–	–	–
Molibdeno	mg/kg dm	≤75	–	–	≤75	≤10	–	–	–	–	–	–
Níquel (Ni)	mg/kg dm	≤420	<50	<30	≤600	≤10	≤80	≤100	≤30	≤100	≤50	≤90
Selenio (Se)	mg/kg dm	≤200	–	–	≤100	≤5	–	–	–	–	–	–
Talio (Tl)	mg/kg dm	–	–	–	–	–	≤1	–	–	–	–	–
Zinc (Zn)	mg/kg dm	≤7400	<400	<400	≤2800	≤150	–	–	≤400	≤500	≤600	–

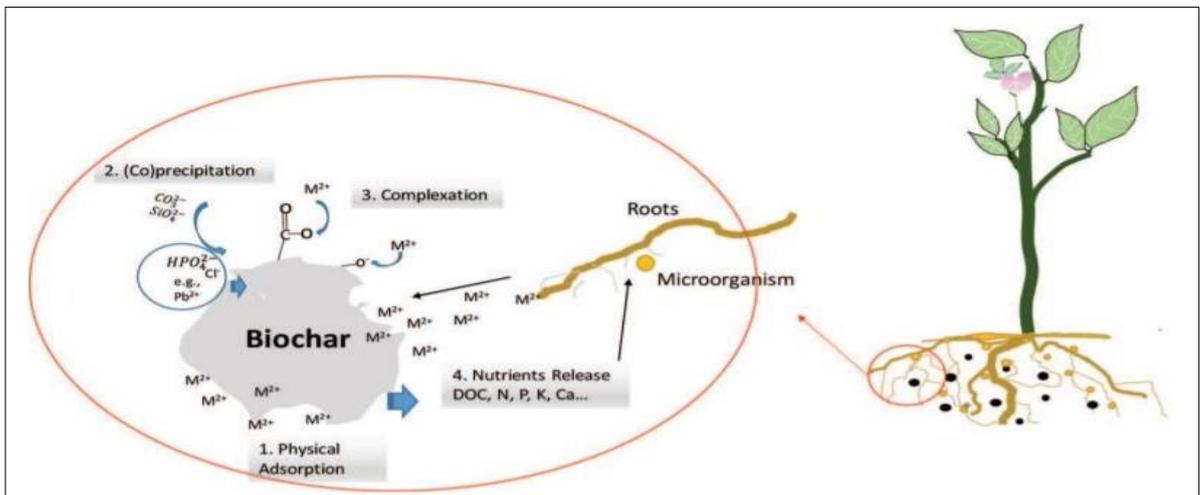
Fuente: Adaptado de Meyer et al. (2017)

#### 2.2.2.4. Biocarbón en la fitorremediación

La aplicación del biocarbón en el suelo ha mostrado tener efectos positivos en el desarrollo de las plantas, ya que, puede estimular el crecimiento de los cultivos, mejorar los mecanismos de defensa, incrementar el carbono en el suelo y disminuir la lixiviación de los nutrientes (Elad et al. 2010; Hussain et al. 2017). Además, Brassard et al. (2019) menciona que el aumento de microorganismos en el suelo puede relacionarse con el uso del biocarbón, ya que, interfiere en la transmisión de señales entre los microorganismos de la planta y podrían afectar a las bacterias involucradas en el crecimiento de las plantas, y esta con la resistencia de la planta y la formación de hongos micorrízicos arbusculares en la raíz (Elad et al. 2010), asimismo, en un meta-análisis de 114 artículos científicos, realizado por Biederman y Stanley (2013) se encontró que el desarrollo de las plantas y la calidad de los cultivos en una gran variedad de suelos y entornos climáticos se vieron beneficiados por la aplicación de la enmienda de biocarbón. La Figura 2 explica la interacción del biocarbón en la raíz de las plantas a nivel químico molecular.

**Figura 2**

*Biocarbón en la fitorremediación*



Nota. Obtenido de Sun et al. (2018)

### **2.2.2.5. El Compost**

El compost es el producto obtenido a través del compostaje, que se define como el proceso de tipo microbiológico para el tratamiento de componentes orgánicos basado en procesos de mineralización y transformación de materia orgánica a través de condiciones aeróbicas y termófilas, con una duración promedio de 6 semanas, el resultado de este proceso genera compost, dióxido de carbono y agua (Norma Chilena Oficial 2004). Rynk (1992), menciona que, es un proceso biológico termofílico en donde la materia orgánica se logra descomponer por una gran cantidad de participación de microorganismos, entre ellos hongos, protozoos, ácaros, miriápodos, en que las moléculas orgánicas complejas se descompondrán a moléculas orgánicas simples, donde ocurre la oxidación de la materia orgánica en condiciones controladas de humedad, temperatura y aireación.

#### **a. Etapas del compostaje**

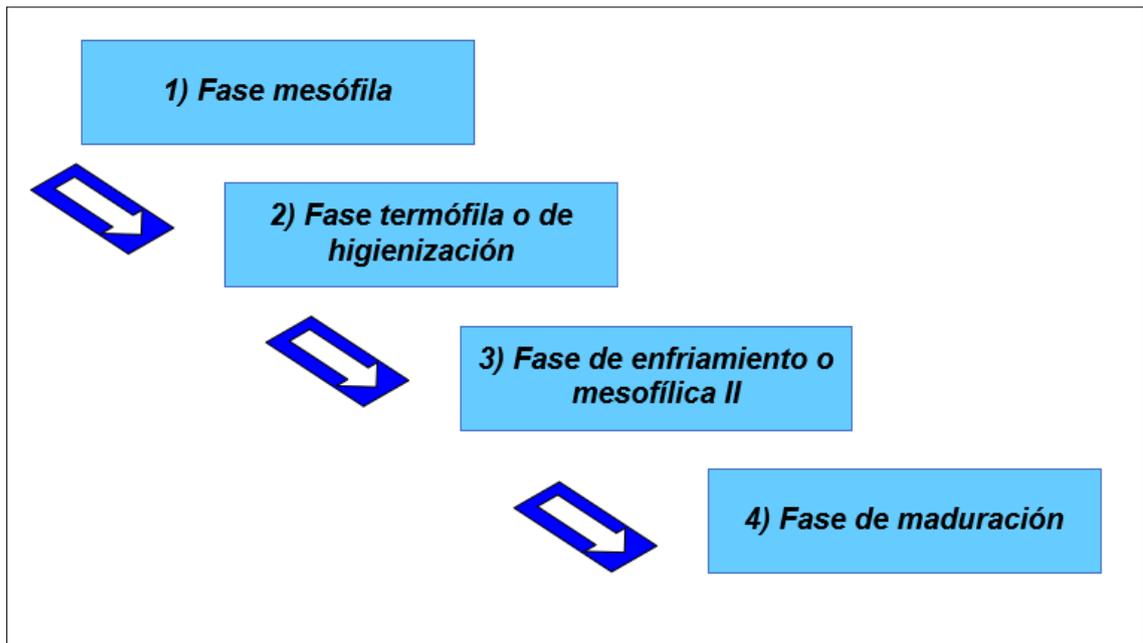
El compostaje es un proceso biológico, que ocurre en condiciones aerobias, con adecuada humedad y temperatura, se asegura una transformación biológica adecuada para usarse como enmienda en el suelo.

Es posible interpretar el compostaje como el sumatorio de procesos metabólicos complejos realizados por parte de diferentes microorganismos que, en presencia de oxígeno, aprovechan el nitrógeno (N) y el carbono (C) presentes para producir su propia biomasa. En este proceso, adicionalmente, los microorganismos generan calor y un sustrato sólido, con menos Carbono (C) y Nitrógeno (N), pero más estable, que es llamado compost (Román, Martínez y Pantoja 2015)

Las fases del proceso del compostaje son las que se ilustran en la Figura 3, y se describen a continuación (Román, Martínez y Pantoja 2015)

**Figura 3**

*Fases del compostaje*



Nota. Obtenido de Román et al. (2015)

**Fase Mesófila:** El material de partida comienza en el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso en horas), la temperatura aumenta hasta los 45°C. Este aumento de temperatura es debido a actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH puede bajar (hasta cerca de 4.0 o 4.5). Esta fase dura pocos días (entre dos y ocho días) (Román, Martínez y Pantoja 2015).

**Fase Termófila o de Higienización:** Cuando el material alcanza temperaturas mayores que los 45°C, los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias (bacterias termófilas), que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de Carbono, como la celulosa y la lignina. Estos microorganismos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio sube. En especial, a partir de los 60 °C aparecen las bacterias que producen esporas y

actinobacterias, que son las encargadas de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de Carbono complejos. Esta fase puede durar desde unos días hasta meses, según el material de partida, las condiciones climáticas y del lugar, y otros factores. Esta fase también recibe el nombre de fase de higienización ya que el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp.* (Román, Martínez y Pantoja 2015).

**Fase de Enfriamiento o Mesófila II:** Agotadas las fuentes de carbono y, en especial el nitrógeno en el material en compostaje, la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45°C. Durante esta fase, continúa la degradación de polímeros como la celulosa, y aparecen algunos hongos visibles a simple vista. Al bajar de 40 °C, los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, aunque en general el pH se mantiene ligeramente alcalino. Esta fase de enfriamiento requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración (Román, Martínez y Pantoja 2015).

**Fase de Maduración:** Es un período que demora meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos.

#### **2.2.2.6. Factores que influyen en la producción del compost**

Estos parámetros según lo recomendado por el Manual de compostaje del agricultor de la FAO son, temperatura, humedad, pH, oxígeno y la relación del C/N. Los cuales se explican a continuación (Román et al.,2015)

**Temperatura:** Cuenta con rango amplio de variación en función de la fase del proceso, el proceso de compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir hasta los 65°C, sin una actividad externa (calentamiento externo), para luego llegar nuevamente a la temperatura ambiente. Es recomendable que la temperatura no varíe rápidamente, ya que, con mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y la higienización es mayor.

**Humedad:** Un parámetro que se vincula a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, utiliza el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos. La humedad óptima sitúa entre un promedio del 65%. Si la humedad baja por debajo de 45%, disminuye la actividad microbiana, sin dar tiempo a que se completen todas las fases de degradación, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (>60%) el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material.

**pH:** El pH del compostaje depende de los materiales de origen y este varía en el proceso, de acuerdo a los parámetros. En los primeros estadios, el pH se acidifica y se alcaliniza para finalmente neutralizarse.

**Oxígeno:** El proceso de compostaje es un proceso aerobio, se debe mantener a una aireación adecuada, esto permitirá que los microorganismos puedan respirar, liberando a su vez dióxido de carbono. Además, la aireación evita que el material se compacte.

#### **2.2.2.7. Normativas referentes a la calidad del compost**

Determinar la calidad de compost es muy variado, ya que a nivel mundial existen diferentes normativas y también legislaciones, entre ellas se encuentran las de Japón y Canadá, las cuales han creado acreditaciones de la calidad del compost como: ECN-QAS en Europa, STA en EEUU, RAL en Alemania, BSI PAS 100 en Inglaterra. La normativa referente a la variedad de la calidad del compost puede deberse al contexto y realidad de cada país, su producción y características dependen mucho del material con el que se produce, estiércoles, restos de parques y jardines, entre otros (Wu Loli 2020). La valoración de la calidad del compost depende de una serie de parámetros específicos que se miden a lo largo del proceso de compostaje como en el producto final, para realizar la mejor aplicación de dicho compost, mejorador de suelo, sustrato o componente de cultivo, y otro tipo de usos (Masaguer y Benito 2008). Para el presente trabajo de investigación se usó la normativa referente a la calidad del compost la chilena (Norma Chilena Oficial 2004), austriaca (Ö-NORM S 2022 y S2200), la peruana (INACAL 2021), y la información del artículo de Cho et al.

(2016). En la Tabla 6, se muestra la normativa austriaca en cuanto a la calidad del compost. Además, en las siguientes tablas se muestran otras normas como la Chilena (Tabla 7), y europeas (Tabla 8). Cabe resaltar que también existe la norma técnica peruana sobre Compost

**Tabla 6.**

*Normativa Austriaca e internacional en cuanto a parámetros de calidad de compost*

Parámetro	Norma	Valor
Físico		
Humedad		25-50%
Densidad Aparente	Ö-NORM S 2022 y S2200	< 0,85 kg/litro
Capacidad de retención de agua		85 y 120 gramos/100 gramos de MS
Químico		
pH	Ö-NORM S 2022 y S2200	7-8.5
Conductividad eléctrica (C.E.)	O-NORM S2022	<5.0Ms/cm
Nitrógeno total	NOM- AA-024	≥ 0.8 % de muestra seca
Fósforo	NOM- AA-024	≤0.1% para plantas sensibles al fósforo
Potasio	NOM- AA-024	No determinado
%MO	Ö-NORM S 2022	≥ 45 %
Carbono orgánico	Ö-NORM S 2022	> 12 % de muestra seca.
C/N	Ö-NORM S 2022 y S2200	35:1 a 20:1
Cadmio	EEC 488/98 Ecolabel	< 1mg/kg
Cobre	EEC 488/98 Ecolabel	< 100mg/kg
Níquel	EEC 488/98 Ecolabel	< 50mg/kg
Plomo	EEC 488/98 Ecolabel	< 100mg/kg
Zinc	EEC 488/98 Ecolabel	< 300mg/kg
Cromo	EEC 488/98 Ecolabel	< 100mg/kg
Mercurio	EEC 488/98 Ecolabel	< 1mg/kg
Arsénico	EEC 488/98 Ecolabel	< 10mg/kg
Microbiológico		
Coliformes totales	Sayden and Eder (2014)	Ausente
Coliformes fecales	Sayden and Eder (2014)	Ausente
<i>Escherichia Coli</i>	Sayden and Eder (2014)	Si sale positivo se recomienda su remediación
Salmonella	Sayden and Eder (2014)	Ausente
Shigella	Sayden and Eder (2014)	Ausente
Análisis complementarios -Madurez del compost		
Prueba de germinación	Federal Government of Germany (2001)	≤ 80%
AT4-mgO2/MS	Federal Government of Germany (2001)	≤ 7

Fuente: Neyra (2017), \*Compuesto de sulfuros, mercaptanos, gases TRS.

**Tabla 7.***Normativa chilena en cuanto a parámetros de calidad del compost.*

Parámetro	Clase A	Clase B	Compost Inmaduro
Microbiológicos			
Coliformes fecales (NMP)	< 1000	<1000	<1000
<i>Salmonella sp</i> (NMP)	<3 EN 4g de compost seco	<3 EN 4g de compost seco	<3 EN 4g de compost seco
Huevos de helmintos	<1 en 1 g de compost seco	<1 en 1 g de compost seco	<1 en 1 g de compost seco
Olores	No presentar olor fuerte*	No presentar olor fuerte*	No presentar olor fuerte*
Físicos			
Humedad	> 30%	> 30%	> 30%
Conductividad eléctrica (C.E.)	< 5 (ds/ m)	5/12 (ds/ m)	-
Químicos			
Arsénico	15 (mg/ kg) b.s.	15 (mg/ kg) b.s.	15 (mg/ kg) b.s.
Cadmio	2 (mg/ kg) b.s.	2 (mg/ kg) b.s.	2 (mg/ kg) b.s.
Cobre	100 (mg/ kg) b.s.	100 (mg/ kg) b.s.	100 (mg/ kg) b.s.
Mercurio	1 (mg/ kg) b.s.	1 (mg/ kg) b.s.	1 (mg/ kg) b.s.
Molibdeno	2 (mg/ kg) b.s.	2 (mg/ kg) b.s.	2 (mg/ kg) b.s.
Níquel	20 (mg/ kg) b.s.	20 (mg/ kg) b.s.	20 (mg/ kg) b.s.
Plomo	100 (mg/ kg) b.s.	100 (mg/ kg) b.s.	100 (mg/ kg) b.s.
Zinc	200 (mg/ kg) b.s.	200 (mg/ kg) b.s.	200 (mg/ kg) b.s.
C/N	10 a 25	10 a 40	máximo 50
pH	7 - 8.5	6.5 - 8.5	6 - 8.5
Materia orgánica	> 45%	> 25 %	> 25 %

Fuente: Norma Chilena Oficial (2004), \*Compuesto de sulfuros, mercaptanos, gases TRS; b.s.: base seca

**Tabla 8.**

Límite de metales pesados (mg/kg) para estiércol en Corea, USA y países de Europa

Metal pesado	Rango límite en Corea (mg/kg)	Rango límite de la Unión Europea (mg/kg)	Rango Límite biosólidos USA (mg/kg)
Cobre (Cu)	360	70- 600	1500
Cadmio (Cd)	5	0.7 - 10	39
Cromo (Cr)	200	70 - 200	1200
Níquel (Ni)	45	20 - 200	420
Mercurio (Hg)	2	0.7 - 10	17
Plomo (Pb)	130	70 - 1000	300
Zinc (Zn)	900	210 - 4000	2800
Arsénico (As)	45	25	41

Nota: Extraído de (Cho et al. 2016)

### 2.2.2.8. Compost en la fitorremediación

Los cultivos en suelos contaminados por metales asistidos por compost pueden mejorar el desarrollo de las plantas, debido a que los factores fisicoquímicos y biológicos involucrados en las reacciones de absorción en el suelo, como la capacidad de intercambio catiónico, pH, materia orgánica, minerales, superficie específica y los electrolitos; se ven afectados (Chamon et al. 2005; Appel et al. 2008; Sauvé, Hendershot y Allen 2000)

De los factores mencionados, la materia orgánica es la más importante, debido a que, la dosis y el origen de la materia orgánica suministrado, al cultivo; afectan en gran parte la dinámica de los metales, ya que, estos forman con la materia orgánica, complejos y quelatos de diferentes estabilidades (Zhou y Wong 2001). El éxito de la interacción entre los metales y una materia orgánica fresca es opuesto a comparación de una materia orgánica descompuesta, puesto que, el material orgánico fresco unida con los metales se separa al descomponerse la materia orgánica (Karaca 2004). En general, el factor materia orgánica puede mejorar las propiedades fisicoquímicas, biológicas y la capacidad de inmovilización de metales en el suelo (Chamon et al. 2005; Walker, Clemente y Bernal 2004). En la Figura 4 se muestra la aplicación del compost en la estabilización de metales pesados.

**Figura 4**

*Aplicación del compost en la fitorremediación del suelo contaminado*



Nota. Obtenido de Radziemska et al. (2019).

### **2.2.2. Teoría del suelo contaminado con metales pesados**

La contaminación del suelo por metales pesados es un tema de gran preocupación debido a su impacto en el medio ambiente y la salud humana. Los metales pesados, como el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg) y el arsénico (As), son elementos tóxicos que se acumulan en el suelo como resultado de actividades industriales, agrícolas y otras fuentes antropogénicas (Wuana y Okieimen 2011).

La contaminación del suelo por metales pesados puede originarse a partir de diversas fuentes. Investigaciones han señalado que la actividad industrial, incluyendo la minería y la fundición de metales, es una de las principales fuentes de liberación de metales pesados en el suelo (Khan et al. 2013). Además, el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas que contienen metales pesados también contribuye significativamente a la contaminación del suelo (Li et al. 2022). La exposición prolongada a suelos contaminados con metales pesados representa un riesgo significativo para la salud humana. Diversos estudios han demostrado que la presencia de metales pesados en el suelo puede tener efectos adversos en el sistema nervioso, el sistema cardiovascular y el sistema renal de las personas (Järup 2003). Además, la acumulación de metales pesados en los cultivos puede conducir a la ingestión de estos elementos tóxicos a través de la dieta, aumentando así los riesgos para la salud humana (Vareda, Valente y Durães 2019).

La presencia de metales pesados en el suelo también afecta negativamente la biodiversidad y los ecosistemas. Estudios han revelado que altas concentraciones de metales pesados en el suelo reducen la diversidad de especies vegetales y afectan la actividad microbiana, lo que desequilibra el ciclo de nutrientes y afecta la estabilidad del ecosistema (Järup 2003)

### **2.2.3. Metales pesados**

Los metales pesados son un grupo de elementos de la tabla periódica, ubicados entre el cobre y bismuto, que tienen un peso atómico entre 63.5 - 200.6

g/g.mol y/o una densidad específica mayor que 5.0g/cm<sup>3</sup> Pueden ser agrupados de la siguiente manera (Fu y Wang 2011; Lakherwal 2014; Nur et al. 2013):

Metales tóxicos: Cd, Pb, Hg, Zn, Cu, Ni, As, Co, Sn, etc.

Metales preciosos: Pd, Pt, Ag, Au, Ru, Etc.

Radionucleidos: Th, Ra, Am, U.

Los metales pesados como el cobalto, cobre, estroncio, manganeso, molibdeno, hierro, selenio, vanadio y zinc son esenciales en mínimas cantidades para el desarrollo de organismos vivos y las plantas; pero una exposición a altas cantidades de estas sustancias podría generar efectos nocivos (Chehregani y Malayeri 2007). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), metales pesados como el cadmio, plomo, arsénico y mercurio; se encuentran entre las 10 sustancias químicas más peligrosas, puesto que, presentan una elevada toxicidad, son cancerígenos y presentan una alta solubilidad en el agua (Gunatilake SK 2015).

En la Tabla 9 se resumen algunos de los efectos adversos generados por los metales pesados.

**Tabla 9.**

*Descripción de problemas en personas, referentes a metales pesados*

Sustancia	Descripción del problema	Concentración permitida(mg/L)
Cadmio	Disfunción renal y cancerígeno	0.01
Plomo	Anemia, insomnio, dolor de cabeza, mareos, irritabilidad, debilidad muscular, alucinaciones y daños renales	0.006
Arsénico	Altamente tóxico, causa la descomposición del ADN y la muerte, cánceres viscerales, enfermedades vasculares	0.05
Mercurio	Debilitamiento de la función pulmonar y renal, dolor de pecho, las alteraciones neurológicas y renales, afectan a la fotosíntesis y al metabolismo oxidativo.	0.00003

Fuente: Tasharofi et al. (2018)

### **2.2.3.1. Metales pesados en el ambiente**

La contaminación ambiental, pérdida de la calidad del agua, aire y suelo; asociada a niveles altos de metales pesados es un problema que se viene incrementando de manera insostenible a nivel mundial. Los metales pesados se forman de manera natural, pero debido a las diversas actividades humanas como las industrias, minería, etc.; se introducen enormes cantidades de estas sustancias al ambiente y debido a que son bioacumulables y no biodegradables están comprometiendo la capacidad intrínseca del ambiente en fomentar la vida, puesto que, la salud humana, animal y vegetal se ve amenazada (Masindi y Muedi 2018). Según He et al. (2015) hay más de 50 millones de sitios contaminados por metales alrededor del mundo. Específicamente en el suelo, se pueden modificar las propiedades fisicoquímicas provocando alteraciones en las plantas, además, ocasiona una pérdida de calidad del suelo, lo cual reduce la productividad de este. Por otro lado, la contaminación por metales pesados en los recursos hídricos, por ejemplo, lagos y ríos; afecta tanto la calidad del agua como de la flora y fauna nativa (Nordberg y Fowler 2015).

Hay un gran interés por el incremento del Arsénico (As) en el suelo ya que puede ser uno de los metales más contaminantes, el cual exhibe efectos adversos en la actividad biológica del suelo, la interacción con el oxígeno u otras moléculas presentes en el aire, el agua o el suelo, así como con las bacterias que viven en el suelo o los sedimentos puedan provocar cambios en la estructura del suelo. Además, la ingestión de pequeñas concentraciones de arsénico en el polvo o el suelo a través de actividades habituales de las manos a la boca puede ser una vía importante de exposición entre los niños pequeños (Chung, Yu y Hong 2014)

La contaminación del suelo por plomo (Pb) es una tema relevante y generalizado en materia ambiental, debido a que este metal presenta una alta densidad, convirtiéndolo en uno de los metales menos móviles en el suelo, por lo que su bioacumulación puede representar un gran riesgo en salud pública y ambiental (Clark y Knudsen 2013). Generalmente, el contenido de este elemento en rocas y suelo se encuentra como elemento traza, es decir menor al 0.1% por peso. De manera general, las formas en las que el plomo puede encontrarse en

el suelo dependen mucho de la composición de este, así como su mineralogía, materia orgánica, pH de la solución del suelo (Tello Peramás 2018).

Actualmente hay una vasta literatura sobre el plomo y sus impactos negativos en el suelo como también, la dinámica que este metal pesado presenta, por ejemplo, en el tránsito de la atmósfera al suelo, el plomo puede llegar como sulfato de plomo o es convertido a sulfato de plomo. Esta sal es soluble en agua, por lo que, puede lixiviar en un suelo relativamente poroso.

### **2.2.3.2. Metales pesados en las personas**

Los metales pesados poseen diferentes mecanismos de acción y un lugar específico de acumulación, cuando se almacenan en el cuerpo humano. Los metales pesados sin alguna función biológica conocida, como el antimonio, arsénico, berilio, cadmio, estroncio, mercurio, níquel, plomo y titanio; están asociados a efectos adversos sobre la salud humana, siendo uno de los más relevantes el plomo, porque afecta tanto el sistema nervioso central como el periférico, la sangre, el riñón, el sistema cardiovascular, el tracto gastrointestinal además de la reproducción masculina y femenina (Rodríguez Heredia 2017). Otro de los metales pesados con mayor capacidad de daño hacia la salud es el arsénico debido a que puede generar cáncer en la piel, dañar el sistema nervioso y el sistema periférico (Fowler et al. 2015).

Las afecciones generadas por este grupo de metales pesados son diversas, pero en general ocasionan una lesión celular. Otros metales pesados, por ejemplo, el cobre, cobalto, cromo y zinc; son considerados como micronutrientes esenciales, porque requieren algunos miligramos de estas sustancias por día (Rodríguez Heredia 2017)

Los seres humanos pueden encontrar arsénico en el agua de pozos perforados en estratos de suelo contaminados por desechos industriales o agroquímicos (Saha et al. 1999). Este elemento se ha asociado durante mucho tiempo con la actividad delictiva y todavía es un tema con una gran carga emocional, ya que grandes dosis homicidas pueden causar síntomas similares al cólera (intoxicación aguda) y la muerte. La ingestión de dosis bajas a través de los alimentos o el agua es la vía principal de este metaloide en el organismo,

donde la absorción tiene lugar en el estómago y los intestinos, seguida de la liberación en el torrente sanguíneo.

En la intoxicación crónica, el hígado convierte el arsénico en una forma menos tóxica, hasta que finalmente se excreta en gran medida en la orina. De hecho, solo una exposición muy alta puede conducir a una acumulación apreciable en el cuerpo. Se conocen vías de entrada alternativas menores a través de la inhalación y la exposición dérmica (Saha et al. 1999)

El plomo una vez en el cuerpo humano, es una sustancia que afecta y se acumula en los diferentes sistemas como: hematológico, gastrointestinal, cardiovascular, nervioso y renal. Dentro de la población vulnerable, los niños son los que podrían resultar mayormente afectados a los efectos neurotóxicos del plomo; un nivel bajo de la exposición de este elemento puede causar daños neurológicos graves e irreversibles (WHO 2020). Por ejemplo: problemas de comportamiento, déficit de aprendizaje y un coeficiente intelectual reducido (Rubin y Taller, 2008).

#### **2.2.4. Pasivos ambientales mineros (PAMs)**

En la actualidad, el proceso minero industrial se somete a la regulación de la normativa ambiental vigente en cada país, para de esta forma evitar, remediar, mitigar y/o compensar los impactos en el medioambiente y en la población, sin embargo, lo que realmente representa un riesgo significativo para la seguridad, la salud de las personas y para el medio ambiente son las faenas mineras abandonadas o como también se denominan “Pasivos Ambientales Mineros” (PAMs), denominación que tiene orígenes empresariales, utilizando el concepto contable “pasivo” para asociarlo al conjunto de deudas y gravámenes que las empresas tienen con la comunidad y el medioambiente (Jorquera Aliste 2019)

Un pasivo ambiental minero (PAM) es aquella instalación, efluente, emisión o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas que constituyen un riesgo permanente y potencial para la población, el ecosistema circundante y la propiedad (MINAM

2017b). La minería, especialmente la que se desarrolla a cielo abierto, puede generar cambios substanciales en las formas del relieve, y causa la destrucción de la cubierta vegetal y el suelo, o pone en marcha procesos de degradación del mismo; muchas veces el ambiente biológico es completamente destruido, o radicalmente modificado, al menos durante el tiempo en el que se realizan labores mineras, por lo que, en ausencia de acciones de remediación o rehabilitación, muchos de estos efectos se perpetúan como cicatrices en el paisaje o como procesos dinámicos que continúan afectando al entorno (ASGMI 2010). La liberación de compuestos tóxicos contenidos en los residuos mineros desde la obra, tajos abiertos, etc., producto de una incorrecta gestión del riesgo ambiental en la mina genera efectos al entorno y estos se pueden clasificar en afecciones al ambiente (agua superficial, agua subterránea, suelo, aire) y la salud humana, los cuales se describen a continuación (Tabla 10):

**Tabla 10.**

*Efectos del PAM en el medio ambiente y la salud humana*

Entorno		Efectos
Ambiente	Agua superficial subterránea	Suele generar el incremento de sólidos totales disueltos y sedimentos, mediante la formación de drenajes ácidos de mina (DAM), lo cual se relaciona fuertemente con la reducción del pH, altas concentraciones de metales (depende también de las formaciones geológicas) degradación de ecosistemas hídricos y contaminación de agua potable. Se debe al arrastre de material contaminado por el viento y la contaminación por la inadecuada disposición de residuos y químicos en las actividades mineras, además, la erosión y degradación de los suelos puede darse por la exposición de materiales removidos y procesados, la destrucción de la capa vegetal protectora existente y también por la disposición de residuos mineros en la superficie.
	Suelo	
	Vegetación y fauna	La perturbación sufrida por la vegetación se extiende desde el área minera a las superficies adyacentes, incluso después de la paralización o el abandono de la explotación.

---

Aire

Un problema muy recurrente y asociado a los PAMs es el arrastre de material particulado por la acción del viento que podría contaminar el suelo y afectar por inhalación, ingestión o contacto dérmico a las personas o animales. La extensión del transporte del material particulado depende de las características de condiciones climáticas, del material particulado y del terreno. Normalmente el material particulado proviene de los tanques de relave sin cubierta adecuada, desmontes, pilas y caminos.

---

Nota: Extraído de ASGMI (2010); Oblasser y Chaparro (2008)

### **2.2.5. Fitorremediación de suelos contaminados**

Hasta hace algunos años sustituir suelos contaminados por un nuevo suelo era una técnica muy recurrente, esto debido a la dificultad que implica remediarlos (Recharte Tello, Mejía Rodríguez y Fajardo Cuevas 2018). La fitorremediación es una tecnología emergente que ha eclipsado las anteriores tecnologías físicas y químicas utilizadas para la recuperación del suelo, se refiere al uso de plantas para mitigar las concentraciones de contaminantes orgánicos y no orgánicos; hacia el 2015 se habían identificado más de 400 especies de plantas en todo el mundo que tienen la capacidad de extraer metales pesados del suelo (Rehman Hakeem et al. 2015)

La fitorremediación tiene el potencial de utilizar la capacidad de las plantas para acumular contaminantes del medio ambiente y degradar o acumular estos contaminantes tóxicos (Iqbal et al. 2018). Según Maqueda Gálvez (2003), la fitorremediación es una técnica de biorremediación que utiliza plantas para remover, degradar o contener contaminantes localizados en suelos, sedimentos, aguas subterráneas y aguas superficiales, y que, además, ha sido principalmente aplicada en suelos contaminados por derivados del petróleo, pesticidas, metales pesados, etc.

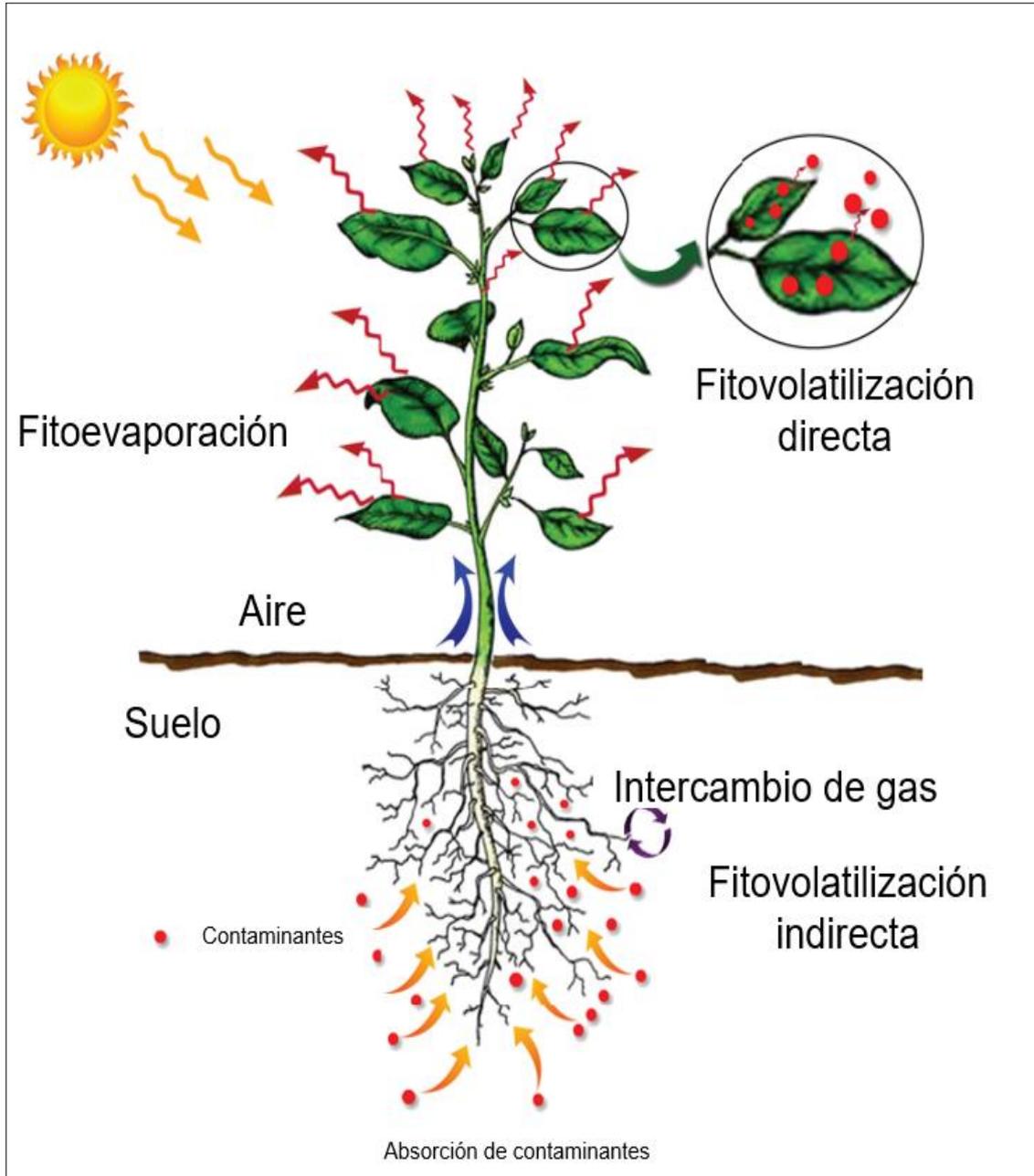
#### **2.2.5.1. Mecanismos de la fitorremediación**

En función a la estrategia que utiliza una planta para remediar un suelo contaminado, se pueden diferenciar los siguientes mecanismos (Tabla 11):

En la Figura 5 se muestra, los diferentes mecanismos de fitorremediación que son fitoevaporación, fitoestabilización, rizofiltración, entre otros.

**Figura 5**

*Mecanismos de fitorremediación*



Nota. Obtenido de Chandra et al. (2018)

**Tabla 11.**

*Descripción de los mecanismos de fitorremediación*

Mecanismo de fitorremediación	Descripción
<i>Fitoestabilización</i>	Se refiere al uso de plantas para inmovilizar contaminantes mediante la absorción y acumulación en las raíces, como también precipitación en la rizosfera provocando que la movilidad y biodisponibilidad del contaminante disminuya.
<i>Fitovolatilización</i>	Este mecanismo hace referencia a la capacidad que tiene la planta para extraer contaminantes volátiles, es así que los modifica y los libera mediante la evapotranspiración a la atmósfera
<i>Fitoextracción</i>	Capacidad que tiene la planta de acumular y concentrar los contaminantes en sus partes aéreas y/o cosechables a fin de eliminarlos del suelo.
<i>Fitodegradación</i>	Mecanismo mediante el cual las plantas capturan y acumulan el contaminante en la parte aérea, metabolizándolo y transformándolo en un material inerte para el suelo.
<i>Fitoestimulación</i>	Mecanismo mediante el cual las plantas capturan el contaminante en su parte aérea y lo transforman en un compuesto que no genera riesgo para el medio natural.

Nota: Extraído de (Maqueda Gálvez 2003; Flores et al. 2016; Paiva Prado 2015)

**2.2.5.2. Factores de bioconcentración y factor de traslocación**

**Factores de bioconcentración**

La capacidad fitorremediadora está relacionada con el Factor de Bioconcentración (BCF, por sus siglas en inglés), que es una medida utilizada para evaluar la capacidad de una planta para acumular contaminantes en su biomasa a partir de la concentración presente en el medio ambiente . El BCF se calcula dividiendo la concentración del contaminante en la planta (en peso seco) entre la concentración del contaminante en el suelo o el agua (Pandey, Sarkar y Pandey 2022)

La eficacia de bioconcentración de una planta en la capacidad que tiene esta para acumular metales a partir de suelos contaminados y esta eficacia se puede estimar usando el factor de bioconcentración (FB), el cual se define mediante la relación entre la concentración del metal en la planta (puede ser en

la raíz o en la parte aérea) y la concentración del metal en el suelo o sedimento donde se desarrolla la planta (Chandra, Dubey y Kumar 2018).

Para las plantas, el factor de bioconcentración es utilizado como una medida de la capacidad de acumulación de metales en biomasa, donde valores superiores a 1 indican que las especies tienen potencial de ser hiperacumuladoras, es decir, que tienen la capacidad efectiva de acumular metales ya sea en la raíz o en la parte aérea, mientras que, aquellas especies que poseen valores inferiores a 1 son consideradas como exclusoras, es decir, que no tienen una capacidad efectiva de acumular metales ya sea en la raíz o en la parte aérea (Riffo Estay 2016)

Estos factores se obtienen para la parte aérea de la planta (Factor de bioconcentración aéreo, FBA) y para la parte radicular de la planta (Factor de bioconcentración radicular, FBR) y se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$FBA = \frac{\text{Concentración de metal en la parte aérea de la planta}}{\text{Concentración del metal en el suelo}}$$

$$FBR = \frac{\text{Concentración de metal en la parte radicular de la planta}}{\text{Concentración del metal en el suelo}}$$

### **Factor de traslocación**

Una planta tiene la capacidad de traslocar y/o movilizar metales desde las raíces hacia las hojas y esta capacidad es medida utilizando el factor de traslocación (FT), este factor se define como la concentración de metal en las hojas sobre la concentración de metal en las raíces (Chandra et al., 2018); Asimismo, los factores de traslocación mayores a 1 indican que la planta tiene capacidad traslocadora efectiva, mientras que valores inferiores a 1 indican lo contrario (Riffo Estay, 2016).

$$FT = \frac{\text{Concentración de metal en la parte aérea de la planta}}{\text{Concentración de metal en la parte radicular de la planta}} \quad \text{ó} \quad \frac{FBA}{FBR}$$

### **2.2.5.3. Plantas para la fitorremediación**

Las plantas han desarrollado mecanismos para absorber metales pesados, sin embargo, debido al efecto nocivo de los metales pesados, las

plantas se verán obstaculizadas cuando se cultiven en suelos con altas concentraciones de metales pesados (Oladoye, Olowe y Asemoloye 2022). Los metalofitos (***Metallophytes***), generalmente son plantas que se emplean para la fitorremediación, y existen tres categorías de metalofitos, son: indicadores metálicos, exclusora e hiperacumuladoras (Zalewska y Danowska 2017)

### **Hiperacumuladora de metal**

Una planta hiperacumuladora de metales es una planta que tiene la capacidad de desarrollarse en suelos con altas concentraciones de metales en sus órganos aéreos, sin sufrir ningún efecto adverso (Rascio y Navari-Izzo 2011). Una planta hiperacumuladora se distingue de una no-hiperacumuladora por tres características: una tasa alta de absorción de metales pesados, una translocación más rápida de raíz a brote, y una mayor capacidad para remover metales pesados hacia las hojas (Oladoye, Olowe y Asemoloye 2022).

Se han identificado casi 400 especies de plantas hiperacumuladoras (Liu, Yingzu et al. 2018), algunas de estas plantas pueden ser cultivos de alta producción de biomasa y se han utilizado para la fitoextracción de metales pesados, ejemplos de tales son: *Cannabis sativa*, *Nicotiana tabacum* y *Zea mays* (Herzig et al. 2014). En la Figura 6 se observa a una planta que posee dos secciones, la primera hace referencia a una no-hiperacumuladora (sección izquierda), donde el mayor contenido de metales pesados se encuentra en la raíz; mientras que en la segunda sección está una planta hiperacumuladora (sección derecha), donde una mayor cantidad de metales pesados se encuentra en la parte aérea respecto de la raíz.

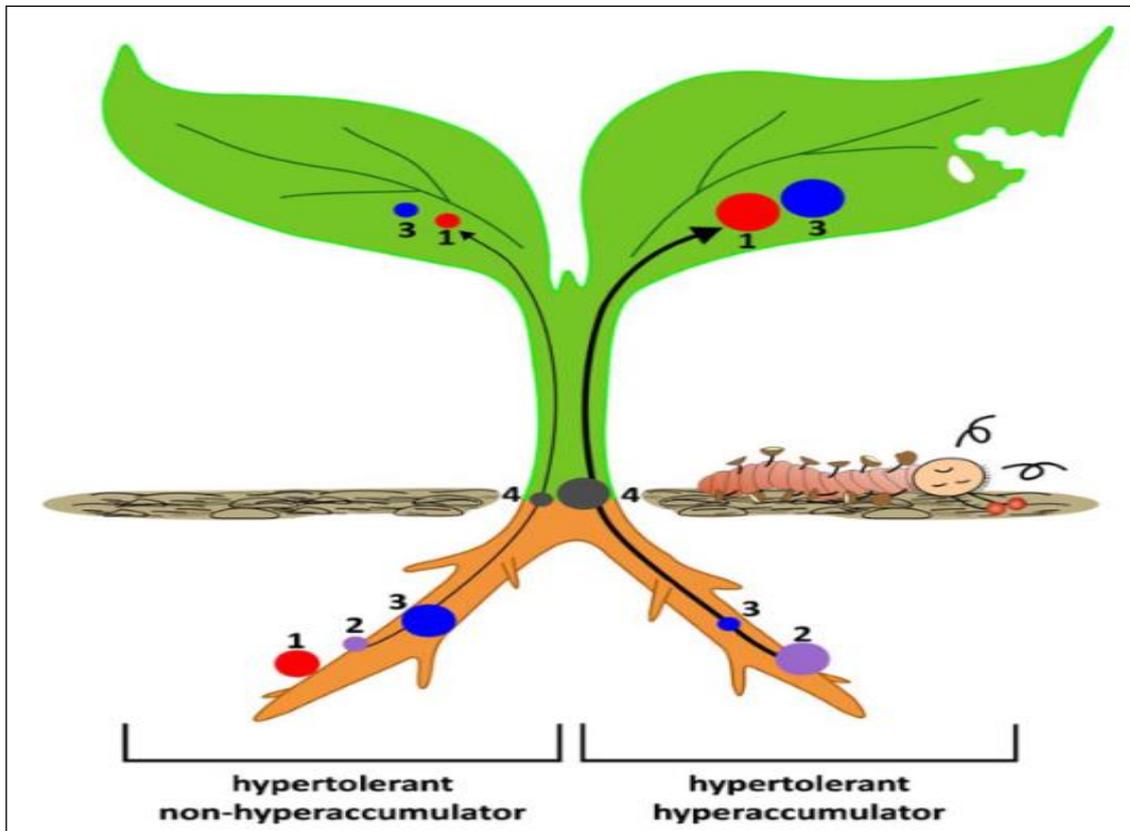
### **Exclusora de metal**

Una planta exclusora de metal restringe la cantidad de metales que son translocados de raíces a los brotes, resultando en bajas concentraciones de metales en las secciones aéreas (Oladoye, Olowe y Asemoloye 2022). Las plantas exclusoras pueden desarrollarse en el suelo con altas concentraciones de metales pesados; sin embargo, su absorción será baja. Algunas plantas que excluyen metales pesados son: *Commelina communis*, *Agrostis stolonifera* L.,

*Silene marítima*, plantas leñosas como *Pinus radiata*, *Populus* y *Salix*, y *Oenothera biennis* (Maestri et al. 2010).

## Figura 6

Planta hiperacumuladora



Nota. Obtenido de Rascio y Navari-Izzo (2011)

### Indicadoras de metal

Las plantas indicadoras de metal, al igual que las acumuladoras, acumulan metales en su tejido aéreo; sin embargo, los niveles de metal en su tejido sobre el suelo suelen reflejar la concentración de metal en el medio ambiente (Baker y Walker 1990). Eventualmente, estas plantas morirán si continúan absorbiendo metales.

### 2.2.6. *Zea mays*

*Zea mays*, planta comúnmente conocida como maíz, es un miembro de la familia de las gramíneas Poaceae; se cree que el maíz se originó hace 55-70 millones de años en lo que hoy es América Central o del Sur y desde entonces

se ha diversificado en casi 10 000 parientes no domésticos (Scott y Emery 2016). Es uno de los cereales más sembrados a nivel mundial, producido para el consumo animal, forraje y el consumo humano, producto fundamental en la nutrición de los países en vía de desarrollo y muy estudiado por la genética a fin de mejorar sus características (Iglesias Abad 2018)

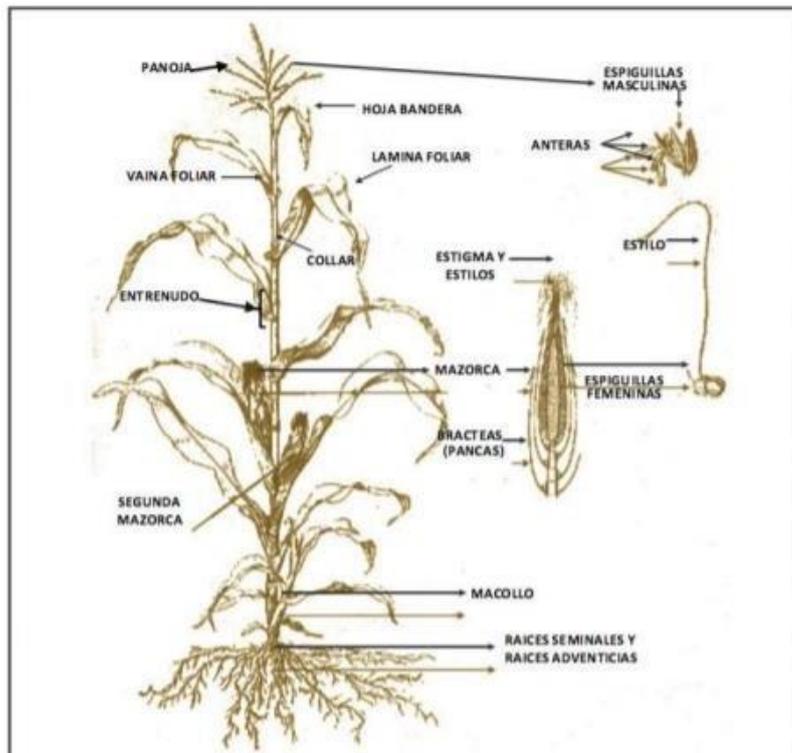
El maíz comparte varias características con otras gramíneas, como: nudos conspicuos en el tallo, una sola hoja en cada nudo y que las hojas se dividen en dos filas opuestas; por otro lado, se sabe que el maíz es una planta monoica, que las flores masculinas y femeninas están separadas, pero desarrollándose en la misma planta (Arendt y Zannini 2013)

El maíz se desarrolla de una pequeña semilla a una planta, generalmente llega a medir entre 1.8 a 3.5 metros de altura en unas pocas semanas; el tamaño de la planta, la duración del periodo de crecimiento y el potencial de rendimiento varían mucho según el lugar de producción, el ambiente, la fertilización, la irrigación y las prácticas agrícolas, en general, los suelos más idóneos para el cultivo del maíz son los de textura media, fértiles, con adecuado drenaje, profundos y con elevada capacidad de retención para el agua (CENTA 2018)

El maíz, en general, crece bien en suelos con pH entre 5.5 y 7.8, fuera de estos límites suele aumentar o disminuir la disponibilidad de ciertos elementos y se produce toxicidad o carencia. Cuando el pH es inferior a 5.5 a menudo hay problemas de toxicidad por metales, además de carencia de fósforo y magnesio; con un pH superior a 8 (o superior a 7 en suelos calcáreos), tiende a presentarse carencia de hierro, manganeso y zinc y tiende a desarrollar entre 20 a 21 hojas y una especie de seda (el mechón de estilos largos y finos de la mazorca) en unos 65 días y logra alcanzar la madurez fisiológica en 125 días; sin embargo, el número de hojas el tiempo entre las fases de crecimiento varían según la madurez del híbrido, el lugar, la fecha de plantación, etc. (Arendt y Zannini 2013; Deras Flores 2012). En la Figura 7, se ilustran el *Zea mays* y sus partes.

**Figura 7**

*Zea mays* y sus partes



Nota. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Riego (2020).

### **2.2.6.1. *Zea mays* en la fitorremediación**

El *Zea mays* en los últimos años ha sido utilizado y estudiado en una gran variedad de investigaciones a nivel mundial, mejorando su técnica de fitorremediación, y aplicado en diferentes ámbitos y problemáticas, por ejemplo: (Sheng et al. 2012) utilizó al *Zea mays* en la fitorremediación, pero adicionó un consorcio microbiano en la remediación de suelos contaminados con Cobre. Košnář et al. (2018) utilizó el *Zea mays* para fitorremediar suelos contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos. Así también, Praburaman et al. (2020) utilizó el *Zea mays* con la adición de una formulación orgánica para la fitorremediación de suelos contaminados por plomo y zinc.

Se aprecia y observa que a lo largo de los años el *Zea mays* sigue generando investigaciones en diferentes ámbitos de la ciencia en cuanto a fitorremediación, desde los años 1991 hasta el 2022 (Ver Tabla 12)

El tiempo normal de maduración de la planta de maíz es de 120 días, aunque en las variedades mejoradas se ha reducido a 80-90 días o incluso menos. Diversas investigaciones han estudiado la absorción de metales pesados por parte del maíz cultivado en suelos contaminados durante diferentes períodos de tiempo, a saber: 21 días (Pečiulytė, Repečkienė y Levinskaitė 2006), 30 días (Nathan et al. 2012), 35 días (Wuana y Okieimen 2010), 45 días (Sozubek, Belliturk y Saglam 2015), 60 días (Zhang et al. 2009) y 90 días (Nathan et al. 2012). Así también, en la Tabla 12 se muestra el factor de bioconcentración (F.B) y el factor de traslocación (F.T.) de diferentes investigaciones referentes a la fitorremediación del *Zea mays*, y además si la fitorremediación fue asistida, como en el caso de ciertas enmiendas, biocarbón, compost, estiércol.

**Tabla 12**

*Investigaciones sobre el Zea mays en la fitorremediación de metales pesados*

Metal	Título de la investigación	Asistida con	F.B.	F.T.	Referencia
Zn		No reporta	1.0 - 2.0		
Cd	Una revisión del uso agrícola de los lodos de depuradora: beneficios y peligros potenciales	No reporta	0.01-0.05		(Korentajer, 1991)
Cu		No reporta	0.01-0.05		
Pb		No reporta	0.01-0.05		
Zn	Estudio de fitorremediación: factores que influyen en la absorción de metales pesados por parte de las plantas	No reporta	0.82		(Máthé-Gáspar y Anton 2005)
Cd		No reporta	3.33		
Cu		No reporta	1.08		
Pb		No reporta	0.07		
Pb	Fitorremediación con Maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados	Compost (2% w/w)	0.05		
Pb		Vermicompost (2% w/w)	0.07		
Cd		Compost (2% w/w)	0.13		
Cd		Vermicompost (2% w/w)	0.11		
Pb	Inmovilización de metales pesados y mejoramiento del crecimiento de maíz ( <i>Zea mays L.</i> ) modificado con biocarbón y compost	Biocarbón (5% w/w)	0.32		(Alaboudi, Ahmed y Brodie 2019)
Cd		Biocarbón (5% w/w)	0.35		
Cr		Biocarbón (5% w/w)	0.21		
Pb		Biocarbón (4% w/w)	0.19		
Cd		Biocarbón (4% w/w)	0.29		(Irfan et al. 2021)
Cr		Biocarbón (4% w/w)	0.15		
Pb		Compost (4% w/w)	0.17		
Cd		Compost (4% w/w)	0.18		

Cr		Compost (4% w/w)	0.11		
		Estiércol de pollo (2 % w/w)	0.034	0.29	
	Efectos combinados del biocarbón y el estiércol de pollo sobre el crecimiento del maíz	Estiércol de pollo (4 % w/w)	0.029	0.28	
Pb	Eficacia del biocarbón de cáscara de arroz y enmiendas de compost en la translocación, biodisponibilidad y especiación de metales pesados en suelos contaminados: papel de la producción de radicales libres en el maíz ( <i>Zea mays L.</i> )	Biocarbón (2 % w/w)	0.04	0.31	(Liu et al. 2021)
		Biocarbón (4 % w/w)	0.043	0.29	
		Biocarbón (2 % w/w) y Estiércol de pollo (2 % w/w)	0.023		
		Control	0.6	0.26	
		Biocarbón de cascarilla de arroz (2% w/w)	0.42	0.18	
Pb		Compost de estiércol de pollo (2 % w/w)	0.44	0.005	(Saqib Rashid et al. 2022)
		Biocarbón de cascarilla de arroz (1 % w/w) y Compost de estiércol de pollo (1 % w/w)	0.16	0.23	

Nota. F.B.= factor de bioconcentración, F.T.= factor de traslocación, % w/w= porcentaje en peso. Elaboración propia.

### 2.2.7. Aplicación del biocarbón-compost

La aplicación del biocarbón-compost hace referencia al propósito de utilizar proporciones de biocarbón y compost como mezclas independientes en el suelo (Oldfield et al. 2018). Esto puede realizarse mediante la mezcla directa de estos materiales en el suelo, en proporciones o porcentaje en el suelo, por ejemplo, Novak et al. (2019), aplicó biocarbón a partir de diversas materias primas, juntamente con compost de estiércol a un suelo contaminado con metales pesados, para estimular potencialmente la actividad microbiana del suelo y la producción de enzimas.

La teoría de aplicación de biocarbón-compost sugiere que la combinación de estos dos materiales en el suelo puede tener beneficios sinérgicos para la salud del suelo y el crecimiento de las plantas, por los siguientes motivos, en la retención de agua y nutrientes, ya que el biocarbón tiene la capacidad de retener agua y nutrientes en sus poros, lo que ayuda a mantener un suministro constante

de agua y nutrientes disponibles para las raíces de las plantas. Esto es especialmente beneficioso en suelos arenosos o poco fértiles (Steiner et al. 2008); mejora de la estructura del suelo, tanto el biocarbón como el compost mejoran la estructura del suelo al aumentar su capacidad de retención de agua y aireación, esto facilita el crecimiento de las raíces y promueve un suelo más saludable (Yan et al. 2021); aumento de la actividad microbiana, ya que el compost como el biocarbón pueden proporcionar un ambiente propicio para microorganismos beneficiosos en el suelo, lo que contribuye a la descomposición de materia orgánica y la liberación de nutrientes (Novak et al. 2019); y la reducción de la lixiviación de nutrientes, ya que la combinación de biocarbón y compost puede ayudar a reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación, lo que significa que los nutrientes se mantienen en la zona de la raíz de las plantas en lugar de lavarse hacia las capas más profundas del suelo (Zhaoxiang et al. 2020).

#### **2.2.8. Fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays***

La teoría de la fitorremediación se define como un conjunto de métodos para degradar, metabolizar, asimilar o detoxificar metales pesados y compuestos orgánicos. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de plantas que poseen la capacidad de sobrevivir en entornos contaminados, siendo en su mayoría especies endémicas de la región donde se realiza la actividad (Gama Retamozo 2019). La fitorremediación es una técnica muy utilizada, que se utiliza para remediar suelos contaminados con metales pesados (Fowler et al. 2015), entre estos metales se encuentran el arsénico (Ansari et al. 2015), cuya toxicidad del está determinada por la forma en que se ocurre (dependiendo de si es en forma  $As^{+3}$  o  $As^{+5}$  o como orgánico), donde la especiación As determina en gran medida su toxicidad y biodisponibilidad, además de determinar el establecimiento de un mecanismo de transporte adecuado; el plomo, cuyos componentes pueden estar presentes en el suelo como los fosfatos, carbonatos, hidróxidos y sulfuros de plomo (Ansari et al. 2015). La fitorremediación de arsénico y plomo utilizando *Zea mays* (maíz) es una estrategia de remediación ambiental que se basa en la capacidad de esta planta para absorber, acumular y reducir los niveles de estos metales pesados en suelos contaminados. La

teoría detrás de esta técnica implica varios procesos como, la absorción y acumulación del *Zea mays*, que es capaz de tomar arsénico y plomo del suelo a través de sus raíces (Nathan et al. 2012); la translocación, ya que los metales pueden moverse a través del sistema vascular de la planta, desde las raíces hacia los tallos, hojas y otras partes aéreas y este proceso contribuye a la acumulación de metales en la parte superior de la planta; la inmovilización, ya que los metales pesados transformados o acumulados en la planta pueden ser inmovilizados en los tejidos vegetales o en el suelo circundante, esto reduce la movilidad de los contaminantes en el suelo, disminuyendo su disponibilidad y, por lo tanto, su impacto ambiental (Novak et al. 2019); y la mejora del suelo debido a que el *Zea mays* también puede contribuir a la mejora de la calidad del suelo al liberar exudados radiculares y materia orgánica, lo que aumenta la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo, así como la actividad microbiana beneficiosa (Oldfield et al. 2018).

## **2.3. Marco conceptual**

### **2.3.1. Aplicación del Biocarbón-compost**

La "aplicación de biocarbón-compost" se puede definir conceptualmente como un enfoque de gestión sostenible de residuos orgánicos y biomasa, que combina el uso de biocarbón y compost para mejorar la calidad del suelo y promover la retención de nutrientes y agua en los sistemas agrícolas o agropecuarios (Oldfield et al. 2018; Virú-Vásquez et al. 2022). A continuación, se presentan algunos conceptos.

#### **En su definición**

*“El biocarbón es también conocido como carbón vegetal, es un material carbonoso que se obtiene mediante la pirólisis o recuperación térmica de biomasa orgánica, como restos de cultivos, madera, cáscaras de nueces o residuos agrícolas. El biocarbón es altamente poroso, lo que le permite retener nutrientes, agua y microorganismos potenciadores en su estructura (Lehmann 2009).”*

*“El compost es el resultado de un proceso de rehabilitación aeróbica controlada de materiales orgánicos, como restos de alimentos, hojas, residuos de jardinería, entre otros. Este proceso produce un material rico en nutrientes y materia orgánica descompuesta, que mejora la estructura del suelo y fomenta el crecimiento de las plantas (Román, Martínez y Pantoja 2015).”*

En este contexto, la aplicación del biocarbón-compost se refiere al uso intencionado de biocarbón y compost en el suelo. Puede llevarse a cabo mezclando estos materiales directamente en el suelo o aplicándolos superficialmente en la capa superior.

### **2.3.2. Fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays***

La "fitorremediación de arsénico y plomo utilizando *Zea mays*" se puede definir conceptualmente como un proceso de biorremediación en el que se utiliza la planta *Zea mays*, conocida como maíz, para eliminar o reducir la concentración de arsénico y plomo en suelos contaminados (Ansari et al. 2015; Fowler et al. 2015). A continuación, se presentan algunos conceptos.

#### **En su definición**

*“La fitorremediación es un enfoque de biorremediación que emplea plantas para limpiar o minimizar la contaminación de suelos y aguas subterráneas. Las plantas utilizadas en este proceso tienen la capacidad de acumular, transformar o degradar contaminantes, ayudando así a restaurar la calidad ambiental (Ansari et al. 2015).”*

*“El arsénico y el plomo son elementos tóxicos que pueden estar presentes en el suelo como resultado de actividades humanas como la minería, la industria o el uso de ciertos pesticidas y fertilizantes. Estos elementos son perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente (Baragaño et al. 2020).”*

*“*Zea mays*, es el nombre científico del maíz, una planta de gran importancia agrícola en todo el mundo. En el contexto de la fitorremediación, *Zea mays* se utiliza porque tiene la capacidad de acumular metales pesados, como el arsénico y el plomo, en sus tejidos sin sufrir daños significativos (Aladesanmi et al. 2019).”*

Por lo tanto, la "fitorremediación de arsénico y plomo utilizando *Zea mays*" se refiere al proceso en el cual la planta de maíz es cultivada en suelos contaminados con altas concentraciones de arsénico y plomo. Durante su ciclo de crecimiento, el *Zea mays* puede tomar estos contaminantes del suelo y los acumula en sus tejidos, reduciendo así la concentración de arsénico y plomo en el suelo, contribuyendo a la descontaminación de la zona. Este método representa una estrategia de remediación ambiental más sostenible y ecológica en comparación con las técnicas tradicionales de limpieza de suelos contaminados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la efectividad de la fitorremediación depende de diversos factores, como las condiciones del suelo, el tipo y nivel de contaminantes presentes y la capacidad de acumulación de la planta.

#### **2.4. Definición de términos básicos**

##### **Biocarbón**

Conocido también como carbón, carbón vegetal y carbón agrícola; es producido a partir de materia orgánica no fósil como la biomasa y utilizado como enmienda para el suelo (Lee, Sarmah y Kwon 2018).

##### **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) indica el grado al cual un suelo puede retener e intercambiar cationes básicos tales como calcio, magnesio y potasio, así como el hidrógeno, el aluminio, el hierro y el manganeso (Ríos Tello, 2018). La CIC está relacionada con el nivel de pH, la proporción de arcillas y la cantidad de materia orgánica presente en el suelo (Piedrahíta 2009)

##### **Compost**

Sustancia obtenida a partir de la materia orgánica descompuesta en condiciones aeróbicas, empleada para mejorar la calidad del suelo (Pandey y Singh 2018).

## **Compostaje**

Es el proceso en que la materia orgánica se descompone naturalmente bajo condiciones controladas de humedad, temperatura y oxígeno (Lobo y Dorta 2019).

## **Enmienda**

Sustancias utilizadas en la agricultura para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, mediante el aporte de nutrientes orgánicos e inorgánicos al suelo y mejorando su capacidad de retención de agua (Clements y Bihn 2019).

## **Estándar de Calidad Ambiental (ECA)**

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos por el MINAM, fijan los valores máximos permitidos de contaminantes en el ambiente.

El propósito es garantizar la conservación de la calidad ambiental mediante el uso de instrumentos de gestión ambiental sofisticados y de evaluación detallada (Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Para suelo (MINAM 2017a)

## **Estructura de suelo**

Se refiere a la agrupación de las partículas presentes en el suelo, tales como arena, limo y arcilla formando agregados. Su importancia radica en la circulación del agua y el aire en dichos poros para poder desarrollar la actividad microbiana de manera óptima (Munive Cerrón 2018)

## **Factor de bioconcentración**

Se define mediante la relación entre la concentración del metal en la planta (puede ser en la raíz o en la parte aérea) y la concentración del metal en el suelo o sedimento donde se desarrolla la planta (Chandra, Dubey y Kumar 2018)

### **Factor de traslocación**

Una planta tiene la capacidad de traslocar y/o movilizar metales desde las raíces hacia las hojas y esta capacidad es medida utilizando el factor de traslocación (FT), este factor se define como la concentración de metal en las hojas sobre la concentración de metal en las raíces (Chandra, Dubey y Kumar 2018)

### **Fitorremediación**

Se define como la utilización de plantas para la recuperación, rentable y ecológica, de suelos y aguas contaminadas por metales y/o compuestos orgánicos (Van Aken 2011).

### **Fitotoxicidad**

Es la capacidad de cualquier sustancia química para producir efectos que perjudiquen el desarrollo de algún ser vivo (Sobrero y Ronco 2004)

### **Pirólisis**

Consiste en la degradación de la biomasa en condiciones anoxigénicas o en ausencia de aire a una temperatura específica, conocida como la temperatura de pirólisis, y mantenerla allí durante el tiempo necesario (Basu, 2010).

### **Relave minero**

Los relaves mineros son desechos, subproductos de los procesos mineros, usualmente son una mezcla de tierra, minerales, agua y roca que contienen altas concentraciones de químicos (Astete et al. 2009).

### **Textura de suelo**

Los diversos tamaños de las partículas que componen suelo (de arcilla < 2  $\mu\text{m}$  a partículas gruesas > 2000  $\mu\text{m}$ ) forman su textura, siendo muy importante ya que determina propiedades como la tasa de infiltración y la capacidad de intercambio catiónico; asimismo, influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua (Munive Cerrón 2018)

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. Hipótesis general

La aplicación del biocarbón-compost influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros.

##### 3.1.2. Hipótesis específicas

La temperatura de pirólisis del biocarbón influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros.

La dosificación biocarbón-compost influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros.

##### 3.1.3. Operacionalización de las variables

Las variables de la investigación cumplen con la siguiente función:  $Y = f(X)$

X: Aplicación del Biocarbón - compost.

Y: Fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays*

**Tabla 13.**

*Operacionalización de las variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INDICES	MÉTODO	TÉCNICA
<b>Variable Independiente:</b> Aplicación del biocarbón-compost	La aplicación del biocarbón-compost hace referencia al propósito de utilizar deliberadamente biocarbón y compost en el suelo (Oldfield et al. 2018). Esto puede realizarse mediante la mezcla directa de estos materiales en el suelo, en proporciones o porcentaje en el suelo (Novak et al. 2019)	La aplicación biocarbón-compost se medirá en función de la dosificación de biocarbón-compost y además considerando el tiempo de pirólisis del biocarbón	Temperatura biocarbón	Temperatura de pirólisis	300°C 500°C		
			Dosificación de biocarbón-compost	(kg) de biocarbón-compost kg/ (kg) de relave	0.16 kg biocarbón - compost/ kg relave 0.08 kg biocarbón - compost/ kg relave		
VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES		
<b>Variable dependiente:</b> Fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i>	La fitorremediación es una técnica que consiste en el uso de plantas para remediar sitios contaminados, pudiendo estos ser relaves mineros (Gama Retamozo 2019). La fitorremediación de arsénico y plomo utilizando <i>Zea mays</i> es un procedimiento mediante el cual se cultiva la planta de maíz en suelos que están contaminados con niveles elevados de arsénico y plomo (Ansari et al. 2015; Fowler et al. 2015)	La fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros es medida a través de las características fisicoquímicas del suelo contaminado mediante los indicadores: pH, conductividad N, P, K, entre otros; así también, con la capacidad fitorremediadora de la planta <i>Zea mays</i> , y también del desarrollo vegetativo de la planta (altura).	Características fisicoquímicas del suelo contaminado con relaves mineros	pH	0-14	Método: hipotético-deductivo La observación	
				Conductividad Eléctrica (C.E.)	uS/cm		
				N, P, K	%		
				Acidez cambiante	cmol/L		
				Materia orgánica	%		
				Textura	-		
				Estructura	-		
				Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g		
Cationes cambiables	-						

	Concentración de arsénico y plomo en el suelo	mg/kg
	Concentración de arsénico y plomo en la parte aérea de la planta (hojas)	mg/kg
Capacidad fitorremediadora de <i>Zea mays</i>	Concentración de arsénico y plomo en la raíz de la planta	mg/kg
	Factor de bioconcentración (FBA)	Adimensional
	Factor de bioconcentración Radicular (FBR)	Adimensional
	Factor de Traslocación (FT)	Adimensional
Desarrollo vegetativo de la planta	Altura de la planta	cm

## **IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO**

### **4.1. Diseño metodológico**

#### **4.1.1. Tipo de la investigación**

La presente investigación es de tipo aplicada debido a que se plantea resolver problemas mediante una técnica innovadora, que tiene como finalidad su pronta aplicación sobre una realidad, y está dirigida a determinar a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, protocolos y tecnologías) por los cuales se puede cubrir una necesidad reconocida y específica (Gobierno del Perú 2021).

#### **4.1.2. Nivel de investigación**

De acuerdo con el enfoque de investigación aplicado, este estudio se clasifica como de nivel explicativo o nivel causa-efecto (Ñaupas et al. 2013). De acuerdo con Ñaupas et al. (2013), el nivel explicativo representa el nivel más complejo, profundo y riguroso en la investigación básica, ya que su objetivo principal es verificar hipótesis causales o explicativas. Además, busca el descubrimiento de nuevas leyes y teorías que puedan explicarse mediante relaciones causales entre las propiedades o dimensiones de los fenómenos.

#### **4.1.3. Enfoque de la investigación**

El enfoque es cuantitativo, ya que se busca describir, explicar, comprobar fenómenos (causalidad), generar y probar teorías. Por eso, se recolectan datos con instrumentos estandarizados y validados (Hernández-Sampieri y Mendoza 2018).

#### **4.1.4. Diseño de la investigación**

La investigación es de diseño experimental, de acuerdo a Supo (2012) debido a que habrá intervención del investigador, se utilizó para encontrar el comportamiento de una variable a partir de diferentes combinaciones de factores o variables de entrada de un proceso, que al cambiar afectan la respuesta (Hernández-Sampieri & Mendoza 2018), además es longitudinal, analítica y explicará un proceso de “causa-efecto” entre la aplicación de las enmiendas en

las unidades experimentales y la fitorremediación del suelo contaminado; además, será un experimento controlado.

#### **4.2. Método de investigación**

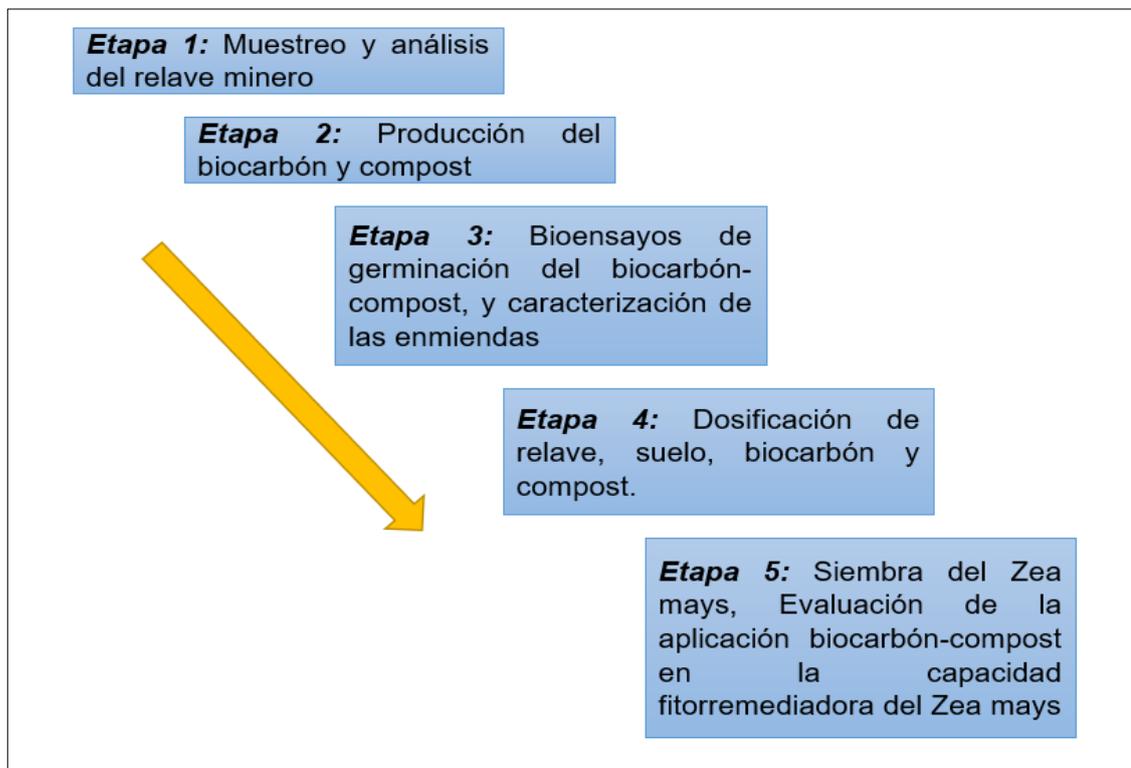
El método de la investigación corresponde al hipotético-deductivo ya que en el proceso se irá deduciendo de la teoría lo que encuentra en su estudio (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). Así también este método, se basa en el uso de deducciones para someter a prueba y validar las hipótesis (Sánchez Flores 2019).

Mediante el método de Sánchez Flores (2019), se logró demostrar la Hipótesis General a través de una secuencia deductiva en la que el cumplimiento o no de las Hipótesis Específicas respaldó o no la validez de la Hipótesis General. En base a los resultados obtenidos en esta investigación, de las tres hipótesis planteadas, solo una fue confirmada y las otras dos fueron refutadas. Por lo que, de acuerdo al razonamiento deductivo, no se pudo validar la Hipótesis General.

La metodología de la investigación será descrita en función a las actividades necesarias para dar cumplimiento a cada objetivo específico. Así también, en una investigación cuantitativa se pretende generalizar los resultados encontrados en un grupo (muestra) a una colectividad mayor (población). Por lo que, para verificar las hipótesis planteadas, se llevaron a cabo una serie de procedimientos, cuya implementación permitió confirmar las hipótesis. A continuación, se presenta el detalle de este procedimiento experimental (Figura 8).

## Figura 8

### Método de investigación



#### 4.2.1. Etapa 1: Muestreo y análisis del relave minero

En cuanto a la obtención de muestras representativas de relave minero, se utilizó la guía para el muestreo de suelos (MINAM 2014b) y los criterios indicados en la “Guía para el Manejo Ambiental de Relaves Mineros del Ministerio de Energía y Minas” (MINEM 2019). Se muestreó un total de 24,3 kg, para fines del diseño de la investigación y de acuerdo a la investigación realizada por Grandez (2017).

En cuanto a la caracterización de los relaves mineros se realizó una caracterización completa que se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 14.****Método para caracterización de relaves**

Análisis	Parámetros	Unidad de medida
Caracterización del relave	pH	0-14
	Conductividad Eléctrica (C.E.)	uS/cm
	P, K	%
	Acidez cambiabile	cmol/L
	Materia orgánica	%
	Textura	-
	Estructura	-
	Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g
Metales pesados	Cationes cambiables	meq/100g
	Plomo	mg/kg
	Arsénico	mg/kg

**4.2.2. Etapa 2: Producción del biocarbón y compost****4.2.2.1. Producción del biocarbón**

Para la producción del biocarbón, la materia prima y la recolección se muestran a continuación:

**Materia prima**

La materia prima utilizada fue ramas de Pino. Las ramas de pino se recolectaron en el distrito y provincia de Cutervo, región de Cajamarca.

**Producción de biocarbón**

La pirólisis se llevó a cabo en un horno pirolítico, con control de temperatura, visualización de presión, con salida y lavado de gases. La producción del biocarbón se realizó a dos temperaturas (300°C y 500°C) por un total de 1 hora con 30 minutos para cada temperatura. El horno pirolítico sigue las recomendaciones establecidas por el International Biochar Initiative y fue diseñado y construido bajo del Ing. Jorge López-Herrera, bajo el principio de mantener las condiciones en un ambiente limitante de oxígeno (IBI 2015),

La producción del biocarbón fue a partir de ramas de Pino de residuos forestales de Cutervo - Cajamarca, figura 9 (a). En el Anexo 05, se ubica las

coordenadas de los puntos de recolección de las ramas de pino. Estos residuos se generan debido a la naturaleza de su tamaño y altitud del pino, y tienden a caer por gravedad en gran parte de la zona. En la Figura 9 se muestra el flujograma respecto a la producción del biocarbón. Las ramas de pino fueron recolectadas de Cutervo Cajamarca, debido a que se consideró que el biocarbón se debe encontrar libre de metales pesados, y en esa zona no existe predominio de carros o vehículos, ni actividades industriales. El pino se recolectó y se cortó con dimensiones apropiadas para su traslado del campo a la ciudad, ya que estos residuos al caer su distribución son irregulares (ramas) (Apartado b y c). Las ramas de pino una vez trasladadas a Lima, se cortó en pedazos (apartado d) aún más pequeños para que puedan ingresar al horno pirolítico con dimensiones aproximadas de 10cm de largo.

Se visualiza en la Figura 10, El horno pirolítico con sus diferentes partes. En la Figura 10 se muestra las secciones del horno pirolítico, el horno posee un volumen de aproximadamente 4 L, con un diámetro 40 cm (a). Además, posee dos terminaciones en círculo apropiadas para disipar el calor y el manómetro pueda registrar una temperatura adecuada (b). El manómetro registra presión de 0 a 7 bar (0 – 100 psi) (c). Además, se tiene una válvula (e) para regular la salida de gases esto hace que la presión aumente (cuando se mantenga cerrada) y disminuya (cuando se mantenga abierta) (e). Por otro lado, se puede regular la temperatura (d), el lavado de gases se realiza en una bandeja de acero para evitar que sufra algún desperfecto por la salida caliente del vapor (f), por último, un sensor de temperatura (g).

## Figura 9

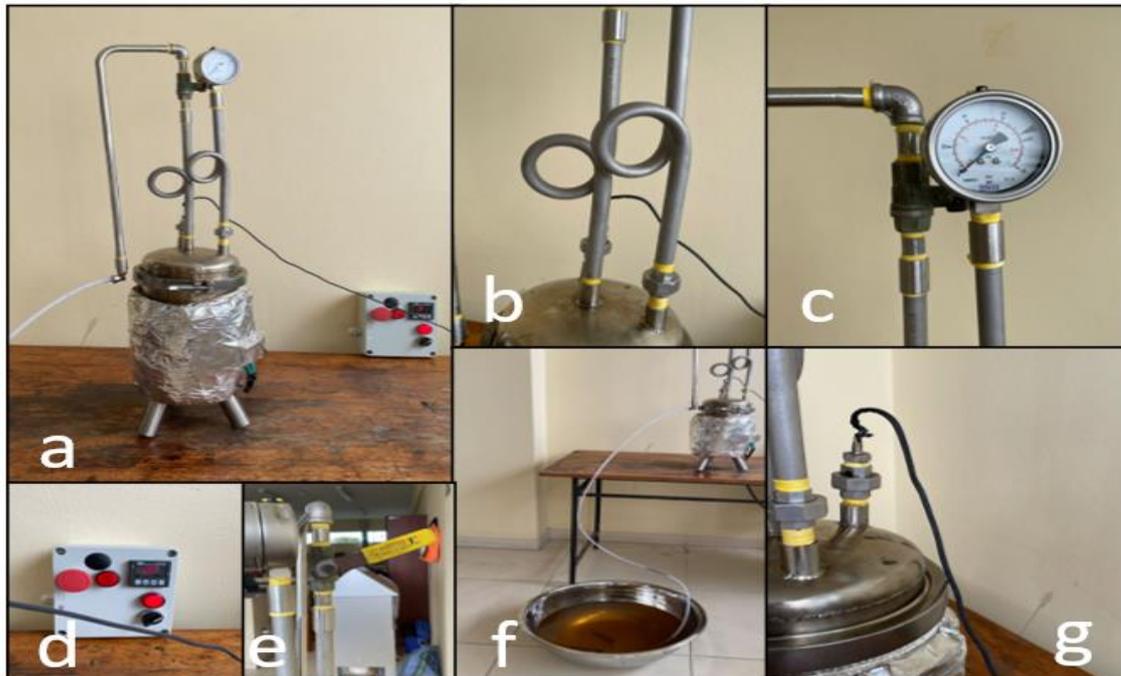
### Recolección de pino y producción de biocarbón



Nota. a) Zona de recolección de pino en Cutervo – Cajamarca, b) Recolección de madera de pino caída por gravedad, c) cortado de ramas en longitudes homogéneas, d) cortado de pino en formas más pequeñas, e) Vista de pino cortado f) peso inicial de pino, g) secado de pino en secador adaptado a 100°C, h) medición, control y monitoreo, i) producción de biocarbón en horno pirolítico, j) producción de biocarbón.

## Figura 10

### Horno pirolítico



Nota. Horno pirolítico con control de temperatura. a) Horno pirolítico. b) "colas de chancho". c) manómetro. d) Control de temperatura. e) control de presión. f) bandeja de acero inoxidable para recepción de gases. g) sensor de temperatura.

#### 4.2.2.2. Producción del compost

##### Materia prima

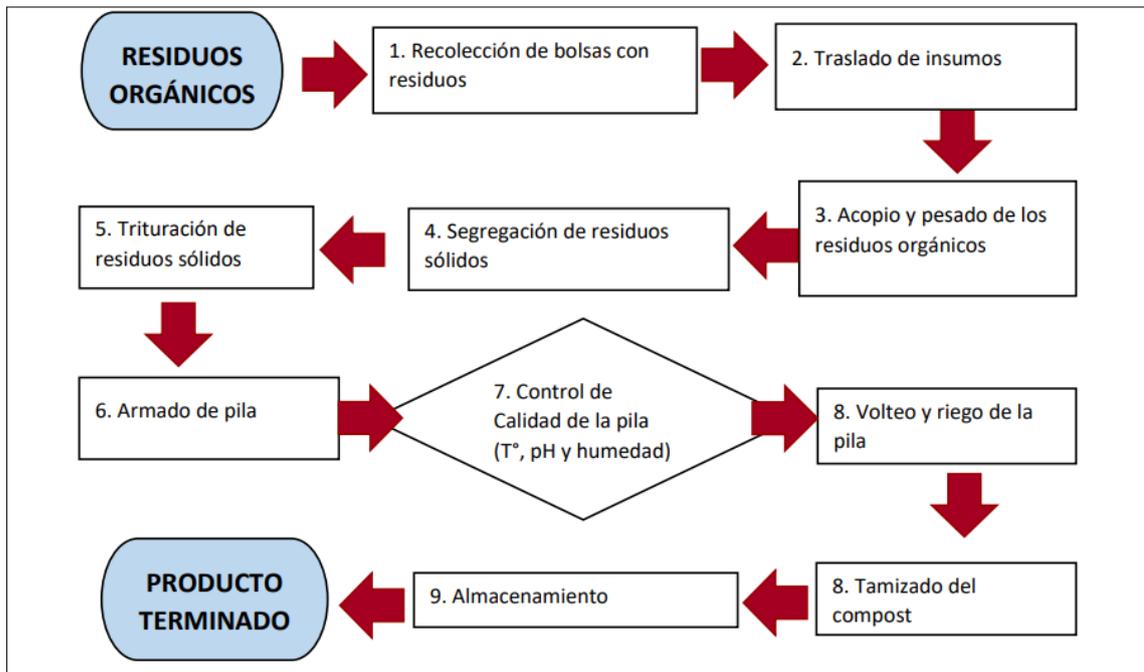
Residuos orgánicos municipales, residuos de poda de áreas verdes.

##### Producción del compost

El compost fue obtenido a partir de los residuos orgánicos municipales y de poda de áreas verdes, este compost se elabora en la planta de valorización de residuos sólidos (planta de compostaje) de la Municipalidad de Pueblo Libre, la cual cuenta con un área de 192 m<sup>2</sup>. Para la producción del compost se siguió lo descrito en el flujograma de la Figura 11

**Figura 11**

*Etapas para la producción del compost*



Nota. Obtenido de Quiroz Valencia (2021)

### 4.2.3. Etapa 3: Caracterización de las enmiendas y bioensayos de germinación

#### 4.2.3.1. Caracterización de las enmiendas

Se realizó el análisis del biocarbón y el compost. Se indican a continuación en las tablas (15 y 16) las metodologías que se llevaron a cabo.

**Tabla 15.**

*Metodologías para caracterización del biocarbón*

Muestra	Parámetro	Unidad	Método de Referencia
Biocarbón de 300°C y 500°C	C, H, O, N, S.	%	ASTM D5373/Mét A
	pH	Unidad de pH	Potenciometría
	Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/cm	Electrométrico
	Materia orgánica	%	Volumetría Redox
	$P_2O_5$	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	$K_2O$	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica

CaO	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
MgO	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Na	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Capacidad de Intercambio Catiónico	meq/100gr	Método del Acetato de Amonio
Metales totales	mg/kg	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Identificación de grupos funcionales	Longitud de Onda	FTIR

En cuanto al análisis fisicoquímico del compost, se muestra a continuación las siguientes tablas con las metodologías:

**Tabla 16.**

*Metodologías para caracterización del compost*

Muestra	Parámetro	Unidad	Método de Referencia
Compost	pH	Unidad de pH	Potenciometría
	Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/cm	Electrométrico
	Materia orgánica	%	Walkley Black (Volumetría Redox)
	Carbono	%	Walkley Black (Volumetría Redox)
	Nitrógeno Total (N)	%	Kjeldahl
	Fósforo, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	Potasio, K <sub>2</sub> O	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	Relación C/N	Adimensional	Calculo
	CaO	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	MgO	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	Humedad	%	Gravimetría
	Sodio	%	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	Nitrógeno amoniacal	mg/kg	UV Visible
	Nitrógeno nítrico	%	UV Visible
	Metales totales	mg/kg	Espectrofotometría por Absorción Atómica

#### **4.2.3.2. Bioensayos de germinación el *Lactuca sativa* L.**

Los bioensayos de germinación y evaluación del desarrollo de la plántula *Lactuca sativa* L. hacen referencia a un método rápido para evaluar la toxicidad del sustrato a utilizar, para la presente tesis, el uso del biocarbón y compost podrían poseer elementos fitotóxicos, por lo que previamente, se realiza un estudio de fitotoxicidad, estudios previos muestran la importancia de realizar un análisis de la fitotoxicidad, estudios como los de Milon et al. (2022), en el estudio se utiliza un compost que se generó a partir de diferentes sustratos como estiércol de cerdo (SM), biocarbón (BC) a las siguientes proporciones, SM + SD + 3% BC (T1), SM:SD 5% BC (T2), SM:SD + 10% BC (T3), y SM:SD ( C), como resultado se tiene que las muestras compostadas usando diferentes tratamientos fueron una fuente de nutrientes, varios de las muestras no mostraron efectos de fitotoxicidad. Potro lado, en la investigación de (Fow, 2021) se hicieron estudios preliminares sobre la fitotoxicidad del biocarbón para evaluar su aplicación en la capacidad fitorremediadora de plantas altoandinas. En ese sentido, para el presente caso, el uso de biocarbón y compost, se realizó un ensayo de germinación, ya que es uno de los más usados para evaluar la calidad del compost, y estimar la aplicación de dosis óptima. Estas pruebas fueron inicialmente promovidas por la Iniciativa Internacional del Biocarbón, mediante el boletín técnico #101 generado por Major (2011), sin embargo, estos bioensayos insertan a la metodología índices correspondientes al análisis de toxicidad de distintas enmiendas a fin de generar pruebas rápidas que eviten que el biocarbón afecte al suelo y/o el desarrollo de alguna planta. Además, las pruebas permitirán definir un rango de aplicación del biocarbón y del compost en una prueba posterior.

Las pruebas de fitotoxicidad se realizarán siguiendo la metodología de Ravindran et al. (2017), donde se analizó la fitotoxicidad del biocarbón y compost mediante el índice de germinación. Se llevó a cabo la evaluación de fitotoxicidad y se determinó una dosis adecuada mediante la aplicación del tipo de diseño "I-optimal" con un diseño de mezcla mixto, con dos bloques (300°C y 500°C), y con 19 "corridas" o "tratamientos". Las proporciones de biocarbón, compost y arena se muestran en la Tabla 17, se muestra la temperatura, el número de corrida

(Run), el porcentaje de compost, el porcentaje de arena y el porcentaje de biocarbón, así como sus pesos respectivos en gramos (g).

**Tabla 17.**

*Biocarbón, compost y arena para las pruebas de fitotoxicidad*

T (°C)	Run	Compost (%)	Biocarbón (%)	Arena (%)	Compost (g)	Biocarbón (g)	Arena (g)
300°C	1	0.00	0.07	0.93	0.00	9.39	130.61
300°C	2	0.09	0.15	0.76	12.82	21.00	106.18
300°C	3	0.09	0.15	0.76	12.82	21.00	106.18
300°C	4	0.15	0.14	0.71	21.51	19.16	99.33
300°C	5	0.00	0.01	0.99	0.00	1.67	138.33
300°C	6	0.16	0.06	0.78	22.00	8.48	109.51
300°C	7	0.10	0.08	0.83	14.00	10.50	115.50
300°C	8	0.00	0.01	0.99	0.00	1.67	138.33
300°C	9	0.10	0.08	0.83	14.00	10.50	115.50
300°C	10	0.20	0.00	0.80	28.00	0.00	112.00
500°C	11	0.05	0.06	0.88	7.60	9.06	123.34
500°C	12	0.20	0.08	0.72	28.00	10.84	101.16
500°C	13	0.20	0.08	0.72	28.00	10.84	101.16
500°C	14	0.10	0.08	0.83	14.00	10.50	115.50
500°C	15	0.14	0.01	0.85	19.87	1.76	118.37
500°C	16	0.00	0.13	0.87	0.00	18.55	121.45
500°C	17	0.00	0.13	0.87	0.00	18.55	121.45
500°C	18	0.20	0.15	0.65	28.00	21.00	91.00
500°C	19	0.10	0.00	0.90	13.51	0.00	126.49

Nota: Orden aleatorio obtenido a partir del software Design Expert. T.: Temperatura

### **Materiales e insumos**

Los materiales utilizados fueron un contenedor cilíndrico de 8 oz, semillas de *Lactuca sativa L.*, agua destilada, piceta, arena fina, tamiz (U.S.A. Standar Testing Stieve) de 850 micrometros, pinzas metálicas, calibre de vernier con un rango de precisión de  $\pm 0.02\text{mm}$ , balanza analítica con precisión de  $\pm 0.0001\text{g}$ . El espacio en donde se realizaron las pruebas de germinación fue una instalación adecuada y controlada (Laboratorio de Biología de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales).

### **Bioensayos**

El bioensayo de germinación es una prueba de toxicidad (Torti, Butti y Fain 2019). Esta prueba se realizó con el fin de determinar que dosificaciones

son las que brindan los mejores resultados en la planta *Lactuca sativa L*, para a partir de ahí evaluar la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación del *Zea Mays*. Los pasos realizados fueron los siguientes:

- Se tamizó la arena, el biocarbón y el compost a malla #20.

- Se realizó la mezcla de arena, biocarbón, y compost en cada contenedor, según la Tabla 17 que indica el diseño del experimento.

- Se añadieron 25 ml de agua destilada a cada mezcla y con ayuda de unas pinzas se colocaron 10 semillas de *Lactuca sativa L*.

- Una vez que se colocaron las semillas, estas fueron cubiertas por cada recipiente.

- Los tratamientos se mantuvieron en una zona oscura durante 10 días.

- Al terminar el bioensayo de germinación, se procedió a contabilizar lo requerido para la investigación

- Una vez que se dio por concluido el bioensayo, se procedió a retirar con cuidado y en orden cada plántula para realizar las mediciones respectivas.

- Con ayuda de un calibre de vernier se midió la radícula e hipocótilo de cada plántula, a estos datos ordenados se les extrajo la siguiente información:

- Promedio y desviación estándar de la elongación de la radícula y del hipocótilo de las plántulas de cada repetición.

- Porcentaje promedio de semillas germinadas para cada tratamiento o porcentaje de aplicación.

Todos los datos fueron anotados en el Instrumento 01.

#### **4.2.3.3. Procesamiento de datos de los bioensayos de germinación**

Con las mediciones realizadas a cada plántula y los promedios obtenidos de cada tratamiento se proceden a calcular los índices descritos en Fow (2021); el primero de ellos es el Índice de germinación de Zucchini (IG), éste índice sirve como una primera prueba que determinará presencia o no de sustancias fitotóxicas que inhiben el crecimiento y/o la germinación de las semillas de

*Lactuca sativa* L.; esta prueba establece el siguiente criterio de interpretación: “valores de IG  $\geq$  80% indicarían que no hay sustancias fitotóxicas o están en muy baja concentración; si el IG  $\leq$  50% indicaría que hay una fuerte presencia de sustancias fitotóxicas y si se obtiene un valor entre 50% y 80% se interpretaría como la presencia moderada de estas sustancias”. En función a este resultado se continuará con el diagrama establecido en la Figura 12, es decir si los resultados indican que uno o todos los tratamientos resultan con un IG menor al 50% las dosificaciones utilizadas en el experimento estarían presentando ciertos niveles de toxicidad y por ende no podrían ser utilizados como enmienda del suelo; por otro lado, si los resultados del IG es mayor al 50% se procede a realizar el cálculo del índice de germinación normalizada (IGN) y el índice de elongación radicular (IER), los cuales permitirán obtener el rango de dosificación de la enmienda en los suelos contaminados por relave minero.

Con respecto al IG, este se calcula mediante las siguientes fórmulas:

$$GRS (\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas según porcentaje de aplicación}}{\text{Número de semillas germinadas en la muestra control}} \times 100$$

$$CRR (\%) = \frac{\text{Longitud promedio de las radículas según porcentaje de aplicación}}{\text{Longitud promedio de las radículas en la muestra control}} \times 100$$

$$IG (\%) = \frac{GRS \times CRR}{100}$$

Donde GRS hace referencia a la germinación relativa de la semilla y CRR al crecimiento relativo de la radícula. Mientras el índice de germinación normalizada (IGN) y el índice de elongación radicular (IER) se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$IGN = \frac{Germ_x - Germ_{control}}{Germ_{control}}$$

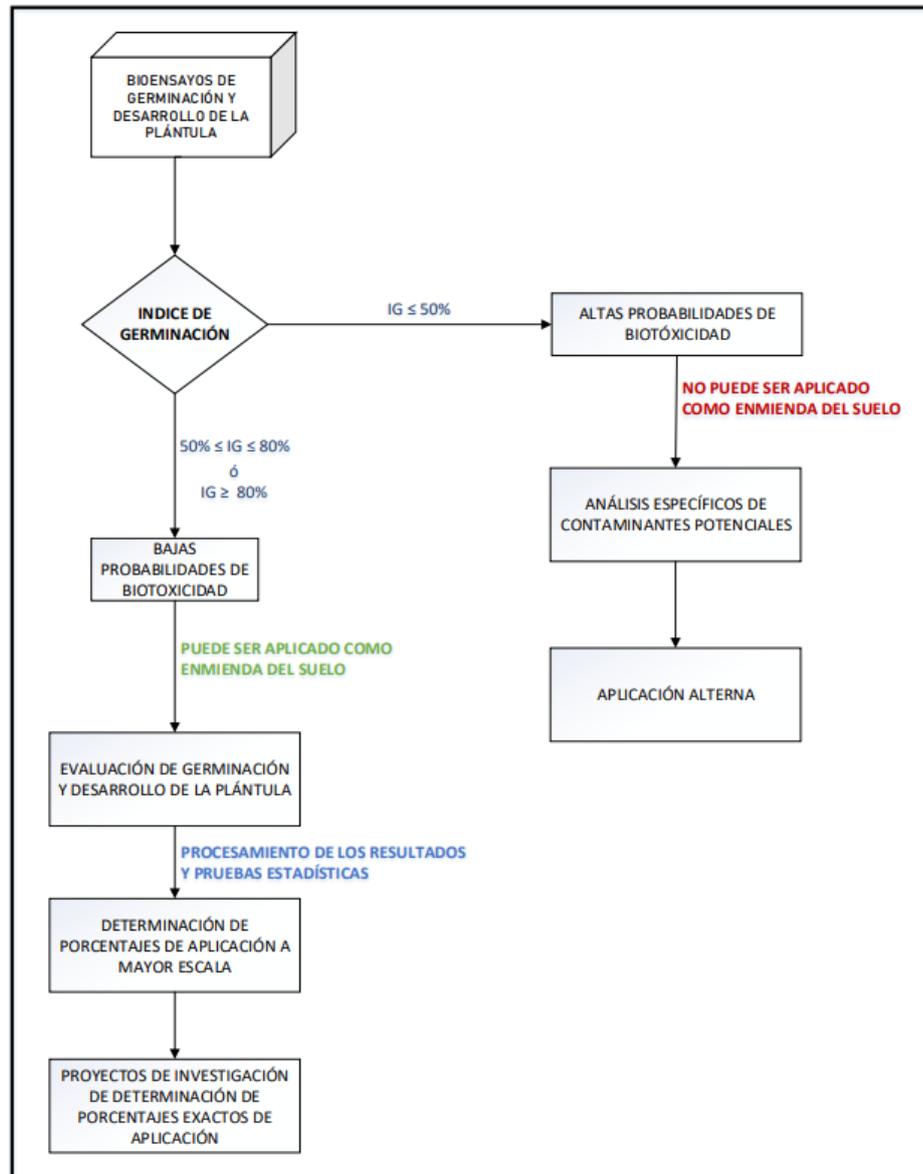
$$IER = \frac{Elong_x - Elong_{control}}{Elong_{control}}$$

Es importante mencionar que IGN representa el porcentaje residual normalizado de semillas germinadas después del experimento, donde “Germ<sub>x</sub>” es el porcentaje promedio de semillas germinadas en cada unidad experimental y “Germ<sub>control</sub>” es el porcentaje de semillas germinadas en el control o blanco; mientras que IER, en representa el alargamiento residual normalizado de la raíz de las semillas germinadas por tratamiento, donde “Elong<sub>x</sub>” es la longitud promedio de la radícula de las semillas germinadas en cada unidad experimental, y “Elong<sub>control</sub>” es la longitud promedio de la radícula de las semillas germinadas en el control o blanco. Además, cada uno de estos índices se evalúan bajo el siguiente criterio *“índice de 0 a -0.25 baja toxicidad, de -0.25 a -0.5 toxicidad moderada, de -0.5 a -0.75 muy tóxico y de -0.75 a -1.0, toxicidad muy alta; valores del índice > 0 indican crecimiento de la radícula u hormesis”* (Bagur-González et al. 2011). En la Figura 12 se muestra el procedimiento a seguir.

Posteriormente, a partir de los análisis de superficie respuesta se procederá a escoger la mejor dosis. Y después se realizará el diseño de mezclas para determinar la dosis óptima para cada aplicación de biocarbón-compost en la fitorremediación.

**Figura 12**

*Bioensayos de germinación, desarrollo de la planta *Lactuca sativa* L.*



Nota. Obtenido de Fow esteves (2021).

#### **4.2.3.4. Diseño de mezcla I: optimal**

El tipo de estudio para evaluar y validar el modelo generado con los índices de germinación y las dosificaciones de biocarbón y compost, corresponde a experimentos de mezcla, bajo el diseño I-optimal, con 19 tratamientos (runs) y dos bloques (300°C y 500°C), en el experimento de mezcla I-óptima, la respuesta media depende, en las proporciones de los componentes en la mezcla (Sinha et al. 2014).

#### **4.2.4. Etapa 4: Dosificación del relave, biocarbón y compost**

Cada maceta estuvo codificada según la temperatura de producción del biocarbón a partir de residuos de pino y en función de la dosificación del relave contaminado, ya que la contaminación fue de tipo sintética, es decir se mezcló el relave con un tipo de suelo apto para cultivos.

Se realizaron dosificaciones de biocarbón y compost según lo contemplado en el diseño experimental, además dichas dosificaciones se determinaron en función de los resultados de los bioensayos de germinación y desarrollo de la plántula *Lactuca sativa* L., dicha relación biocarbón: compost fue de 1/0.61, y se utilizó 3% w/w de biocarbón y 1.8% w/w de compost.

Una vez determinada la dosis de biocarbón-compost, se procedió a realizar el área experimental que consta de un ambiente adecuado de tal forma que se pueda desarrollar el experimento, se implementó una mesa y en dicho ambiente se colocó 18 macetas de 3 kg cada una las cuales están codificadas (Tabla 18) y se detallan en la Tabla 19, con sus respectivos pesos de cada componente.

**Tabla 18.***Codificación de las macetas en el área experimental*

Biocarbón	Temperatura	Dosificación	Compost	Relave (%)	Componente	Codificación		
						Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
BC300	300°C	0.16 kg biocarbón-compost/ kg de relave	SI	30%	Suelo + <i>Zea mays</i>	T300CP-30-1	T300CP-30-2	T300CP-30-3
BC300	300°C	0.08 kg biocarbón-compost/ kg de relave	SI	60%	Suelo + <i>Zea mays</i>	T300CP-60-1	T300CP-60-2	T300CP-60-3
BC500	500°C	0.16 kg biocarbón-compost/ kg de relave	SI	30%	Suelo + <i>Zea mays</i>	T500CP-30-1	T500CP-30-2	T500CP-30-3
BC500	500°C	0.08 kg biocarbón-compost/ kg de relave	SI	60%	Suelo + <i>Zea mays</i>	T500CP-60-1	T500CP-60-2	T500CP-60-3
Control Sin adición de biocarbón-compost)	NO	NO	NO	30%	Suelo + <i>Zea mays</i>	CR30-1	CR30-2	CR30-3
	NO	NO	NO	60%	Suelo + <i>Zea mays</i>	CR60-2	CR60-2	CR60-3

Nota: Elaboración propia

Debido a que se realizará la siembra directa de semillas de tres *Zea mays* en cada maceta (unidad experimental), ésta debe de contemplar ciertos niveles de materia orgánica y/o nutrientes básicos para el suelo, como el N, P y K, entonces, con el fin de generar condiciones mínimas y básicas que permitan el desarrollo de la planta no se utilizarán unidades experimentales con el 100% de relave minero, según corresponda en el diseño experimental, sino que todas las unidades experimentales respetarán una relación de relave minero y suelo. Por lo que solo se utilizaron dos dosificaciones de relave minero una de 30% y otra de 60% (Jara-Peña et al. 2014). Se muestra la codificación de la tabla 18 y se muestra las cantidades que van exactamente en una maceta. Se resalta que todas las aplicaciones a excepción de los controles poseen una relación de biocarbón: compost (1:0.61), esto es 3% w/w de biocarbón y 1.8% w/w de compost, esto significa una dosis de 90g de biocarbón y 54.9 g de compost, esta cantidad fue escogida debido a la mejor dosis que dio como resultado en los ensayos de germinación, y debido a que se utilizaron dos dosis de relave minero (30%, cuyo peso es de 900g y de 60%, cuyo peso es de 1800g), las dosis de

biocarbón-compost fueron 0.16 kg biocarbón-compost/ kg de relave, y 0.08 kg biocarbón-compost/ kg de relave, que se muestran en la tabla 19.

**Tabla 19.**

*Cantidad de relave, suelo, biocarbón y compost en gramos*

Datos	Dosis de biocarbón-compost	Temperatura de Producción del biocarbón	Codificación	C.S. (g)	C.R. (g)	C.BC. (g)	C.P. (g)
Con aplicación de biocarbón-compost	0.16 kg biocarbón-compost/ kg de relave	300°C	T300CP-30-1	1955.1	900	90	54.9
			T300CP-30-2	1955.1	900	90	54.9
			T300CP-30-3	1955.1	900	90	54.9
	0.08 kg biocarbón-compost/ kg de relave	300°C	T300CP-60-1	1055.1	1800	90	54.9
			T300CP-60-2	1055.1	1800	90	54.9
			T300CP-60-3	1055.1	1800	90	54.9
	0.16 kg biocarbón-compost/ kg de relave	500°C	T500CP-30-1	1955.1	900	90	54.9
			T500CP-30-2	1955.1	900	90	54.9
			T500CP-30-3	1955.1	900	90	54.9
	0.08 kg biocarbón-compost/ kg de relave	500°C	T500CP-60-1	1055.1	1800	90	54.9
			T500CP-60-2	1055.1	1800	90	54.9
			T500CP-60-3	1055.1	1800	90	54.9
Control (Sin aplicación de biocarbón-compost)			CR30-1	2100	900	0	0
			CR30-2	2100	900	0	0
			CR30-3	2100	900	0	0
			CR60-2	1200	1800	0	0
			CR60-2	1200	1800	0	0
			CR60-3	1200	1800	0	0

Nota: C.S.: Cantidad de suelo, C.R.: Cantidad de relave, C.BC.: Cantidad de biocarbón. C.P.: Cantidad de compost

#### **4.2.5. Etapa 5: siembra de *Zea mays* y evaluación de la aplicación del biocarbón-compost**

##### **4.2.5.1. Siembra del *Zea mays***

Se realizó la siembra directa de entre 03 semillas de *Zea mays* en cada unidad experimental, y se mantendrán las condiciones de humedad del suelo, además la planta requiere niveles de agua apropiados, por lo que se utilizó agua destilada y el riego fue continuo y constante cada 2 días (Chavez y Jara 2020), por igual cantidad para todos los tratamientos hasta el momento de su retiro para el análisis en el laboratorio. Es importante mencionar que el riego de cada

unidad experimental se realizó siempre a capacidad de campo, evitando la generación de lixiviados.

#### **4.2.5.2. Evaluación de la aplicación biocarbón-compost en la capacidad Fitorremediadora del *Zea mays***

##### **Monitoreo del desarrollo del *Zea mays* durante la fase experimental**

Desde la plantación del *Zea mays* en las macetas, es decir, desde la siembra, se realizaron monitoreos cada tres días en cuanto al tamaño de la planta (Altura) monitoreos diarios de altura realizando las mediciones correspondientes. Posterior a dicha etapa, se realizaron monitoreos semanales con respecto a la altura de la planta y aparición de hojas, dicho monitoreo se mantuvo hasta dar por concluido el experimento que duró 60 días.

##### **Análisis de plomo y arsénico en *Zea mays***

La fase experimental tuvo una duración de 60 días. Concluido el experimento se realizó el análisis de los metales pesados (Arsénico y Plomo) para 18 tratamientos. El análisis de cada tratamiento (18) fue realizado por triplicado y fue realizado en el suelo, en la raíz y en la parte aérea. Además, se realizó el análisis de plomo en la parte aérea, radicular y en la raíz de cada unidad experimental, a fin de generar los factores de acumulación o bioconcentración de la aplicación de la enmienda biocarbón-compost en cada tratamiento establecido.

##### **Análisis de la altura de la planta *Zea mays***

La fase experimental tuvo una duración de 60 días. Por lo que la altura de las plantas se midió en tres etapas, los cuales fueron los días 40, 50 y 60. Todos los datos de altura fueron anotados en el Instrumento 02.

Una vez finalizado el experimento se realizó la caracterización fisicoquímica del suelo contaminado con relave minero y también el análisis de plomo y arsénico en una muestra de suelo de cada unidad experimental, con respecto a la dosificación del relave al suelo, con la finalidad de comparar si hubo cambios significativos entre los tratamientos durante la fase inicial y la fase final del experimento (al terminar la fitorremediación, 60 días).

#### **4.2.6. Diseño Experimental**

El diseño experimental planteado corresponde a un diseño factorial. Donde los factores que se estudiaron fueron: Temperatura de biocarbón y Dosificación de biocarbón-compost, el factor temperatura de biocarbón tuvo 2 niveles (300°C y 500°C) y el factor dosificación de biocarbón-compost, también tuvo 2 niveles (0.16 kg biocarbón - compost/ kg relave y 0.08 kg biocarbón - compost/ kg relave). El diseño experimental contempló 4 tratamientos con 2 controles, cada uno con tres réplicas, siendo un total de 18 tratamientos (Tabla 18 y Tabla 19).

#### **4.3. Población y muestra**

##### **4.3.1. Población**

La población corresponde a los suelos contaminados con todos los relaves mineros (79 Mt) (Dold, Wade y Fontboté 2009) ubicados en Cerro de Pasco, Quiulacocha.

##### **4.3.2. Muestra**

El relave minero a colocar en cada maceta corresponde a un “relave minero seco” es decir sin presencia de humedad, por lo que, para la obtención de la cantidad de la muestra se ha procedido sumar los valores de la columna C.R. (g) (Cantidad de relave minero seco en gramos), de la tabla 19. El resultado obtenido corresponde a 24 300 g, lo que es equivalente a 24,3 kg en total de muestra requerida.

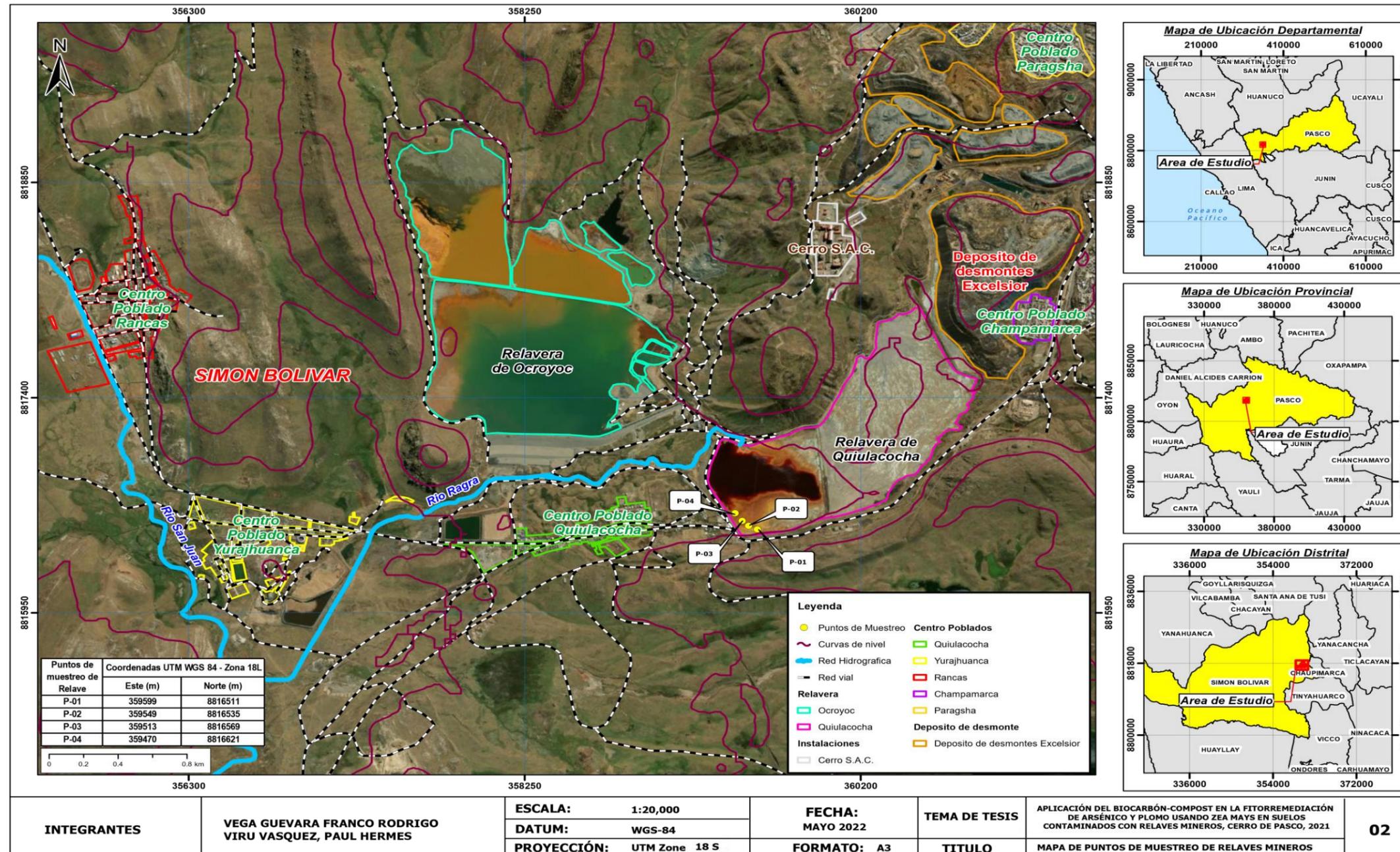
Siguiendo esa línea, la muestra de estudio corresponde a 24,3 kg de relaves mineros seco de la zona Quiulacocha. Considerando que el tamaño de la muestra es muy pequeño (24,3kg) respecto al de la población, 79 Mt (Dold, Wade y Fontboté 2009), se considera a la población como infinita (López-Roldán y Fachelli 2015). Así también el muestreo corresponde a uno no probabilístico (Cuesta y Herrero 2010).

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

En la figura 13 se encuentra la ubicación del área de estudio, esta se sitúa en la relavera Quiulacocha en el distrito de Simón Bolívar. Además, se encuentran los 4 puntos de recolección del relave minero, P-01: 359599, 8816511; P-02: 359549, 8816535; P-03: 359513, 8816569; P-04: 359470, 8816621.

Figura 13

Mapa de ubicación del lugar de estudio



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

En el presente trabajo de investigación, diferente información fue recopilada y extraída a partir de repositorios nacionales e internacionales en cuanto a tesis de pregrado y posgrado. Para artículos científicos se utilizó la base de datos Scopus principalmente mediante Science Direct, Springer, Scielo, Microsoft Academic. Además, se utilizó algunos informes, reportes nacionales e internacionales. En cuanto a las técnicas e instrumentos se muestran a continuación.

##### **4.5.1. Técnicas para la recolección de la información**

La técnica a usar fue la observación, en esta etapa se reconoce el área de estudio y define la ubicación estratégica de los puntos donde se obtuvieron los relaves mineros.

##### **4.5.2. Toma de muestra**

La técnica utilizada en la presente sección es la aplicación del experimento mediante la obtención de muestras representativas de relave minero (24,3 kg), para lo cual se utilizó la guía para el muestreo de suelos (MINAM 2014b) y los criterios indicados en la “Guía para el Manejo Ambiental de Relaves Mineros del Ministerio de Energía y Minas” (MINEM 2019).

##### **4.5.3. Entregas de muestra al laboratorio**

Las muestras del relave, biocarbón, muestras de suelo contaminadas, etc., fueron almacenadas para su preservación hasta el laboratorio y/o posterior análisis de tratamiento, estas muestras son enviadas al laboratorio certificados, para la credibilidad de los resultados analizados.

En el caso del biocarbón, se realizaron análisis de tipo químico (pH, conductividad eléctrica (C.E.), Capacidad de intercambio Catiónico (C.I.C.) y de composición), análisis “ultimate” o análisis ultimo (CHON), análisis de superficie (Grupos funcionales, FTIR) (Tabla 20). En cuanto al compost de igual manera se realizaron análisis muy similares al biocarbón (Tabla 21). Para el *Zea mays*, se

realizaron análisis después de la fitorremediación (Tabla 22), y para el suelo también (Tabla 23), este laboratorio estuvo acreditado.

**Tabla 20.**

*Recipientes para toma de muestras, método, equipos e instrumentos para biocarbón*

Muestra	Parámetro	Unidad	Recipiente	Preservación	Equipo/ Instrumento	Método
Parámetros físicoquímicos del Biocarbón de 300°C y 500°C	C, H, O, N, S.	%		-	Equipo para análisis elemental	ASTM D5373/Mét A
	pH	Unidad de pH		-	Potenciómetro	Potenciometría
	C.E.	dS/cm		-	Potenciómetro	Electrométrico
	Materia orgánica	%		-	Instrumentos de laboratorio	Volumetría Redox
	$P_2O_5$	%		-	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	$K_2O$	%		-	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	CaO	%	Bolsa hermética ziploc	-	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	MgO	%		-	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	Na	%		-	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
	Capacidad de Intercambio Catiónico	meq/100gr		-	Instrumentos de laboratorio	Método del Acetato de Amonio
Metales totales	mg/kg		-	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica	
Identificación de grupos funcionales	longitud de Onda		-	Espectrofotómetro de infrarrojo	FTIR	

**Tabla 21.**

*Recipientes para toma de muestras, método, equipos e instrumentos para compost*

Muestra	Parámetro	Unidad	Recipiente	Preservación	Equipo/Instrumento	Método
Compost	pH	Unidad de pH		-	Potenciómetro	Potenciometría
	C.E.	dS/cm		-	Potenciómetro	Electrométrico
	Materia orgánica	%	Bolsa hermética ziploc	-	Instrumentos de laboratorio	Walkley Black (Volumetría Redox)
	Carbono	%		-	Instrumentos de laboratorio	Walkley Black (Volumetría Redox)

Nitrógeno Total (N)	%	-	Instrumentos de laboratorio	Kjeldahl
Fósforo, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	-	Espectrofotómetro de	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Potasio, K <sub>2</sub> O	%	-	Absorción	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Relación C/N	Adimensional	-	Atómica	Calculo
CaO	%	-	Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
MgO	%	-	Absorción	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Humedad	%	-	Atómica	Gravimetría
Sodio	%	-	Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Nitrógeno amoniacal	mg/kg	-	Espectrofotometro UV	UV Visible
Nitrógeno nítrico	%	-	Espectrofotometro UV	UV Visible
Metales totales	mg/kg	-	Espectrofotómetro de Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica

**Tabla 22.**

*Recipientes para muestras, método de preservación, equipos e instrumentos y método de análisis para Lactuca sativa y Zea mays*

Parámetro	Unidad	Recipiente	Equipo/Instrumento	Método	
Capacidad fitorremediadora del <i>Zea mays</i>	Concentración de metales en la radícula	Unidad de pH	Bolsa hermética ziploc	Espectrofotómetro	Absorción atómica
	Concentración de metales en la biomasa aérea	dS/cm		Espectrofotómetro	Absorción atómica
Desarrollo vegetativo de la planta	Altura de la planta	cm	-		-
	Longitud de la raíz	cm	-		-
	índice de germinación	%	-		Poder germinativo
Capacidad de germinación de las enmiendas	Índice de germinación normalizado	-	-	Ficha de recolección de datos	Nro. de semillas germinadas en función de la prueba control
	Índice de elongación radicular normalizado	-	-		Elongación de la raíz de las plántulas en función de la prueba control

**Tabla 23.**

*Recipientes para muestras, método de preservación, equipos e instrumentos y método de análisis para el suelo*

Parámetro	Unidad	Recipiente	Preservación	Equipo/ Instrumento	Método
pH	Unidad de pH				
Conductividad eléctrica	uS/cm		-	Potenciómetro	Potenciometría
Carbonatos	% p/p		-	Espectrofotometría por Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Fosforo disponible	mg/kg		-	Espectrofotometría por Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Potasio disponible	mg/kg		-	Espectrofotometría por Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Calcio	meq/100g	Bolsa zip loc	-	Espectrofotometría por Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Magnesio	meq/100g		-	Espectrofotometría por Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Potasio	meq/100g		-	Espectrofotometría por Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Sodio	meq/100g		-	Espectrofotometría por Absorción Atómica	Espectrofotometría por Absorción Atómica
Suma de cationes	meq/100g		-		
Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g			Instrumentos de laboratorio	Método del Acetato de Amonio

#### 4.5.4. Instrumentos para la recolección de datos

En la presente investigación se aplicó la técnica de la observación, debido a que se examinó el efecto que produce la dosificación del biocarbón-compost en la fitorremediación con *Zea mays*. Los instrumentos 1 y 2 utilizados fueron la ficha de registro de datos que se encuentran validados por 3 expertos (Anexo 02), mediante el cual se realizó la recolección de datos cuantitativos de la toma

de muestras en los ensayos de germinación (Instrumento 01) y en la altura de la planta (Instrumento 02). Los datos de los expertos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 24.**

*Expertos para validación de instrumentos*

N°	Experto	ID Scopus	Profesión	Especialidad
1	Anthony Jean Pier Fow Esteves	57223963382	Ing. Ambiental y de Recursos Naturales	Consultor en el INAIGEM - Perú
2	Mary Flor Cesará Coral	57196416420	Ph.D. en Ciencias e Ingeniería Ambiental	Docente Principal en la Universidad Nacional Agraria La Molina - Perú
3	Gustavo Curaqueo Fuentes	26031992400	Ph.D en Ciencias de los Recursos Naturales	Director Magister en Ciencias Agropecuarias en la Universidad Católica de Temuco - Chile

Los documentos, que fueron enviados a los expertos, fueron: 1) la carta de presentación, 2) ficha para el criterio de validar el instrumento, 3) Matriz de operacionalización de variables, 4) Instrumentos.

Los aspectos de validación los siguientes criterios: 1. Claridad, 2. Objetividad, 3. Actualidad, 4. Organización, 5. Suficiencia, 6. Intencionalidad, 7. Consistencia, 8. Coherencia, 9. Metodología, 10. Pertinencia, siguiendo los lineamientos de la investigación de (De la Cruz 2018). Por cada experto se obtuvo un promedio de valoración que se muestra en el Anexo 02.

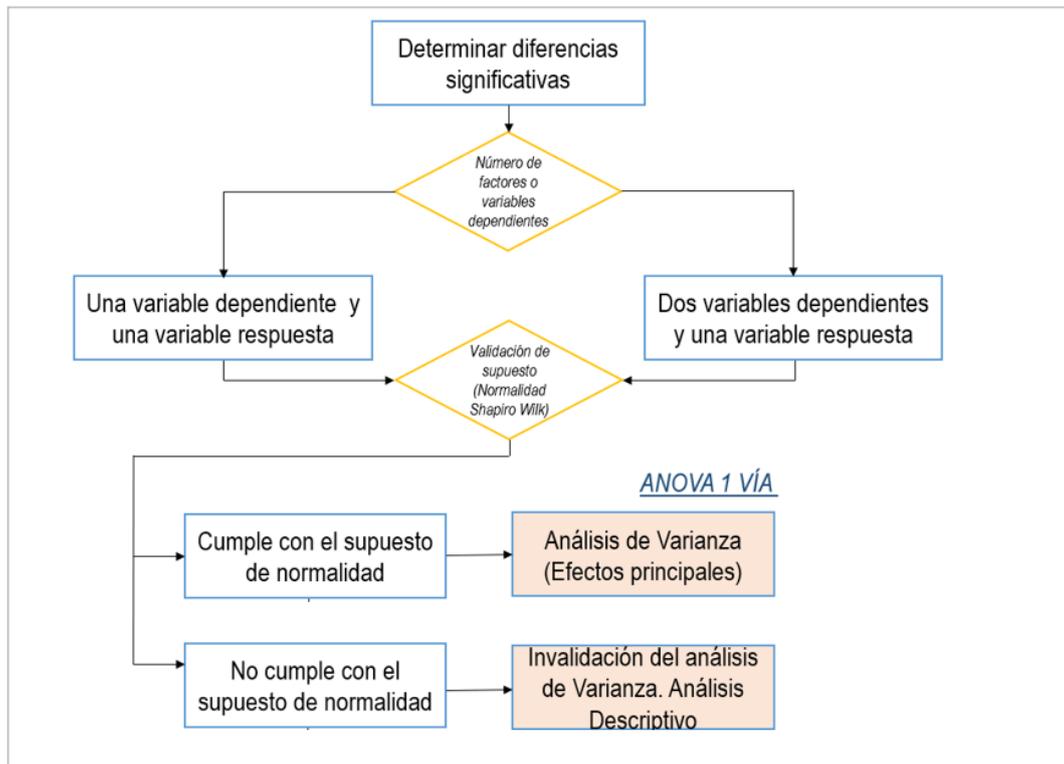
#### **4.6. Análisis y procesamiento de datos**

A los resultados de la fase experimental, factores de concentración de metales, en la planta y suelo, se aplicaron procesamientos estadísticos adecuados a los resultados que se deseaban obtener; dichos procedimientos responden a lo diagramado en la Figura 14. Para el procesamiento de datos, se recopilaron en una base de datos utilizando Excel Office 16, y en cuanto a los análisis, se utilizó la prueba de normalidad (Shapiro Wilk), posteriormente al determinar la normalidad respectiva, correspondiente a una prueba paramétrica,

se realizó el análisis ANOVA de una vía, para lo cual se utilizó el software JMP versión 16.

**Figura 14**

*Procesamientos estadísticos de los datos obtenidos*



**Nota. Adaptado de de Fow (2021)**

#### 4.7. Aspectos éticos en Investigación

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

## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados descriptivos

#### 5.1.1. Características del relave minero

El relave se muestreó en Quiulacochoa, para lo cual se tuvo en consideración una muestra representativa de 4 puntos con las siguientes coordenadas P-01: 359599, 8816511; P-02: 359549, 8816535; P-03: 359513, 8816569; P-04: 359470, 8816621, según lo indica la guía del Ministerio del Ambiente (MINAM 2014a). Los metales totales del relave fueron analizados en los laboratorios de MINLAB S.R.L. El análisis de metales pesados total se llevó a cabo a través de la técnica ICP Digestión Regia (ICP\_REG). En la Tabla 25 se muestran los resultados de los metales totales del relave minero. En la Tabla 26, se muestran los resultados de las características fisicoquímicas del relave minero, cuyos resultados muestran un pH ácido de 5.63, entre otras propiedades, como la Conductividad Eléctrica (C.E.), Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.)

**Tabla 25.**

*Caracterización de metales pesados en el relave minero*

Elm.	C. (ppm)	Elm.	C. (ppm)	Elm.	C. (ppm)
Ag	42.8	Ga	12	S	4
Al	0.42	Hg	36	Sb	98
As	1020	K	0.13	Sc	2
Ba	17	La	2.8	Se	<10
Be	<0.5	Mg	0.42	Sn	39
Bi	64	Mn	2432	Sr	83.6
Ca	2.68	Mo	3	Te	15.14
Cd	18	Na	0.03	Ti	<0.01
Co	5	Ni	10	Tl	9
Cr	41	P	0.09	V	33
Cu	286.9	Pb	3996	Zn	9123.9
Fe	14.25				

Nota: Extraído a partir del documento del laboratorio MINLAB S.R.L. Elm: Elemento, C.: Concentración. Ppm: parte por millón.

**Tabla 26.**

*Resultados de la caracterización fisicoquímica del relave minero*

pH	C.E (dS/m)	CaCO <sub>3</sub> (%)	M.O. (%)	P (ppm)	K (ppm)	Análisis mecánico			C.I.C. (meq/100g)
						Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	
5.63	7.12	0.36	2.01	0.8	97	51	31	18	4.32
Clase		Cationes cambiables				Suma	Suma		
Textural	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> +H <sup>+</sup>	de Cationes	de Bases	% Sat. De Bases	
Fr.	2.04	1.05	0.08	0.01	0.5	3.68	3.18	74	

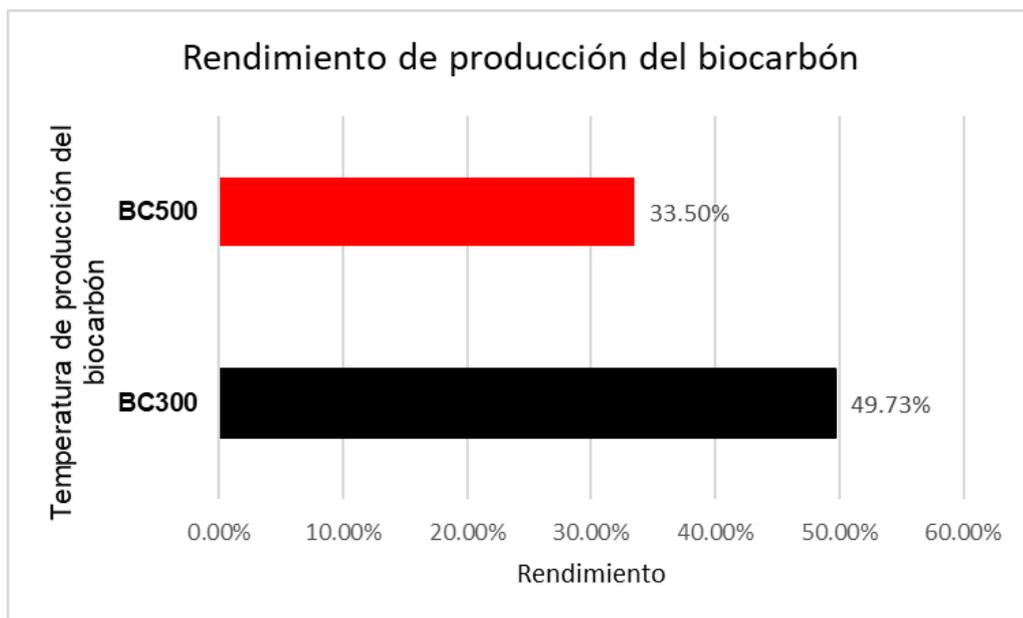
Nota: Fr: Franco.

### 5.1.2. Producción y caracterización del biocarbón

El biocarbón se pesó inicialmente para determinar el rendimiento en peso, luego se introdujo en una estufa con un promedio de 3 horas para reducir la humedad que pueda presentar. En lo que respecta a la producción del biocarbón se realizará a dos temperaturas, la primera a una temperatura de 300°C por un total de 1.5 horas. El rendimiento promedio de este se encuentra en la Figura 15. Como se observa, el Biocarbón de 500°C obtuvo un menor rendimiento, con un valor de 33.50%, mientras que la producción del biocarbón a 300°C, mostro un rendimiento del 49.73%.

**Figura 15**

*Rendimiento del biocarbón*



### 5.1.2.1. Características fisicoquímicas del biocarbón

En la Tabla 27, se observan los valores que se obtuvieron a partir del análisis de caracterización realizados en los biocarbón de 300°C y 500°C, esto se llevó a cabo en el laboratorio SLAB S.A.C.

**Tabla 27.**

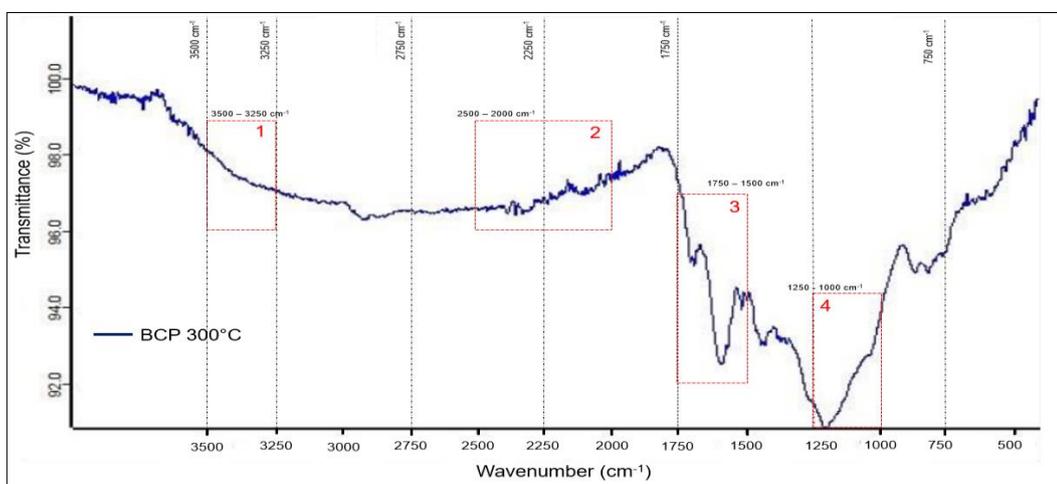
*Análisis de las características fisicoquímicas del biocarbón de 300°C y 500°C*

T.(°C)	pH	CE (uS/cm)	M.O. (%)	Na (mg/ kg)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	MgO (%)	C.I.C. (meq/100g)
300	7.07	164.8	54.39	< 0.004	0.02	0.04	0.14	0.04	39.4
500	7.94	249.8	38.04	< 0.004	0.1	0.32	0.43	0.11	25

En cuanto a los resultados obtenidos, se encuentran en el rango establecido por la normativa italiana para pH: 4-12. De igual manera la conductividad eléctrica ( $\leq 1000$  mS/m). Mientras que en cuanto a los demás parámetros (materia orgánica, N, P, K, Ca y Mg), los valores obtenidos para la muestra de biocarbón se encuentran dentro del promedio de la composición nutricional de diferentes enmiendas orgánicas, utilizadas para mejorar la calidad del suelo (Hirzel y Salazar 2011). Por otro lado, se muestran los resultados referentes a la identificación de grupos funcionales en la superficie del biocarbón en las siguientes Figura 16 y Figura 17.

**Figura 16**

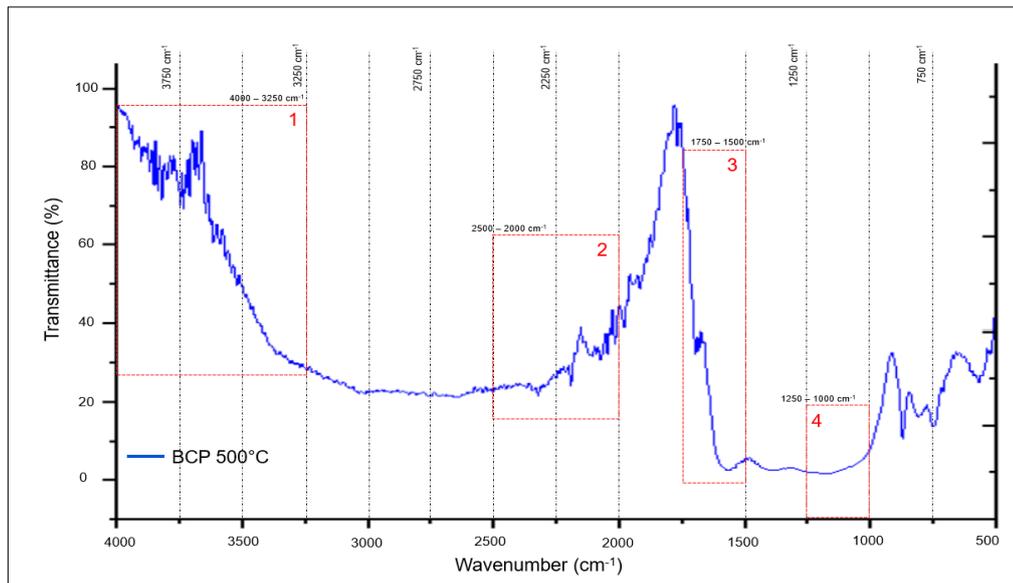
*Espectro infrarrojo del biocarbón de pino producido a 300°C*



Nota. Adaptado a partir de los resultados del laboratorio SLAB S.A.C.

**Figura 17**

*Espectro infrarrojo del biocarbón de pino producido a 500°C*



Nota. Adaptado a partir de los resultados del laboratorio SLAB S.A.C.

### **5.1.2.2. Caracterización elemental del biocarbón**

En la Tabla 28, se presentan, los resultados que se obtuvieron a partir del análisis de la caracterización elemental a los biocarbón en el laboratorio SLAB S.A.C. Se observa que, a partir de los resultados para el biocarbón de 300°C, el valor de H/C es de 0.058, O/C es 0.34, el contenido de carbono orgánico es de 71.1%, todos los valores mencionados se encuentran dentro de los establecido en los estándares voluntarios propuestos por la IBI, EBC y la norma italiana (Meyer et al. 2017). Por otro lado, en cuanto al biocarbón de 500°C el valor de H/C es de 0.041, O/C es 0.21, el contenido de carbono orgánico es de 79.11%, estos valores también se encuentran dentro de los establecido en los estándares voluntarios propuestos por la IBI, EBC y la norma italiana (Meyer et al. 2017).

**Tabla 28.**

*Resultados de la caracterización elemental de biocarbón producido a 300°C y 500°C*

Muestra	Temperatura (°C)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Biocarbón de pino	300	71.11	4.16	24.26	0.45	0.02
	500	79.11	3.29	16.96	0.6	0.04

### 5.1.2.3. Caracterización mediante ICP en biocarbón

Los resultados de los metales pesados, se presentan en la Tabla 29. Para el biocarbón de 300°C, se presentan bajas concentraciones de Fe (0.001 mg/kg), Cu (0.0002 mg/kg), Pb (0.002 mg/kg), Zn (0.0001 mg/kg), de estas solo el Cu, Pb y Zn cuentan con normativa internacional en cuanto a límites de sus concentraciones. Mientras que para Mn y As las concentraciones de metales fueron de 32.10 mg/kg y 12.66 mg/kg respectivamente. Se resalta que estas concentraciones no superan los límites de la EBC, IBI y la legislación de Italia.

Para el biocarbón de 500°C, los análisis de metales en el biocarbón muestran concentraciones altas de Fe y Mn con concentraciones 2487.9 mg/kg y 160.39 mg/kg respectivamente; sin embargo, para estos elementos no existe límite por parte de las normativas internacionales voluntarias. Los resultados indican concentraciones de Zn y As de 20.06 mg/kg y 23.66 mg/kg respectivamente. El Zn se encuentra dentro de los límites, mientras que el As supera los límites, pero únicamente de la EBC (13 mg/kg). En cuanto a las concentraciones del Cu y Pb, son 0.89 mg/kg y 0.002 mg/kg respectivamente.

En la Figura 18, se presentan los resultados de los metales pesados comparando con normativas internacionales, a falta de una normativa nacional o Norma Técnica Peruana. Estos estándares de carácter no obligatorio, son de la EBC, IBI (Gelardi, Li y Parikh 2019) y normativas también en diferentes países como Italia, Alemania, Austria, Switserland (Meyer et al. 2017). Se resalta que el presente estudio solo analiza los metales pesados de As y Pb; sin embargo, se realizaron el análisis de diferentes metales pesados por recomendaciones de las instituciones internacionales.

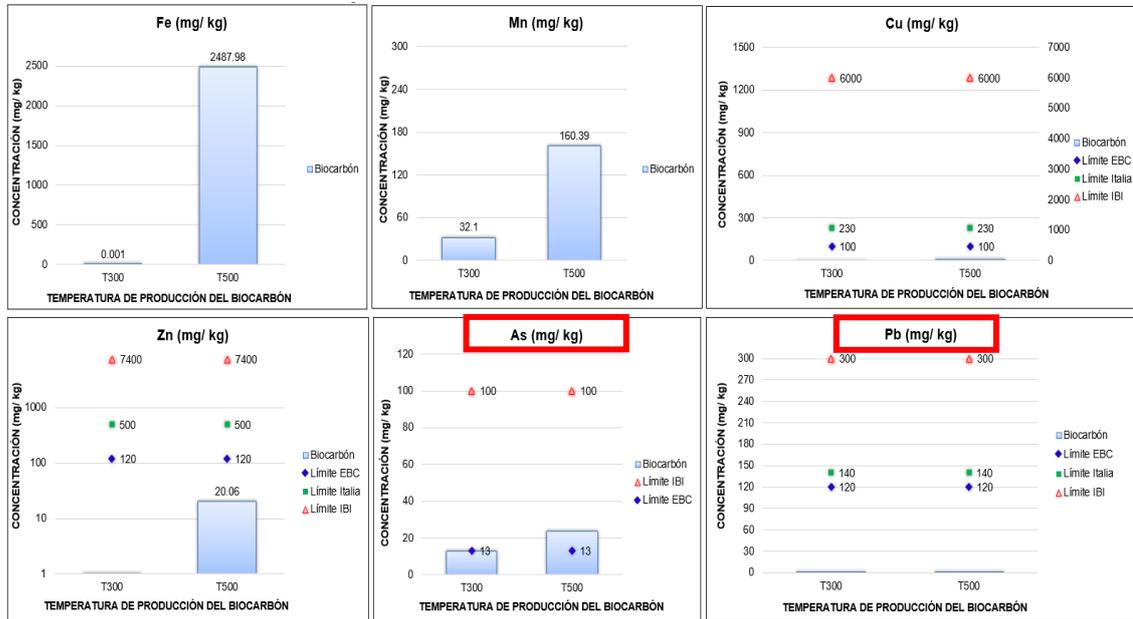
**Tabla 29.**

*Resultados de la caracterización mediante ICP em muestras de biocarbón*

Temperatura (°C)	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
300	<0.005	12.66	<0.0002	<0.001	32.1	<0.002	<0.0001
500	<0.005	23.66	0.89	2487.98	160.39	<0.002	20.06

**Figura 18**

*Gráfico de metales pesados en muestras de biocarbón y normativas internacionales*



### 5.1.3. Producción y caracterización del compost

El compost se produjo a partir de residuos orgánicos, bajo el programa de valorización de residuos de la municipalidad de Pueblo Libre. Los parámetros de monitoreo durante el proceso de compostaje obtenido en las cinco pilas fueron medidos, estos fueron, el pH, la temperatura y la humedad, que se muestran en la Tabla 30 (Quiroz Valencia 2021).

**Tabla 30.**

*Parámetros del monitoreo de la calidad del compost*

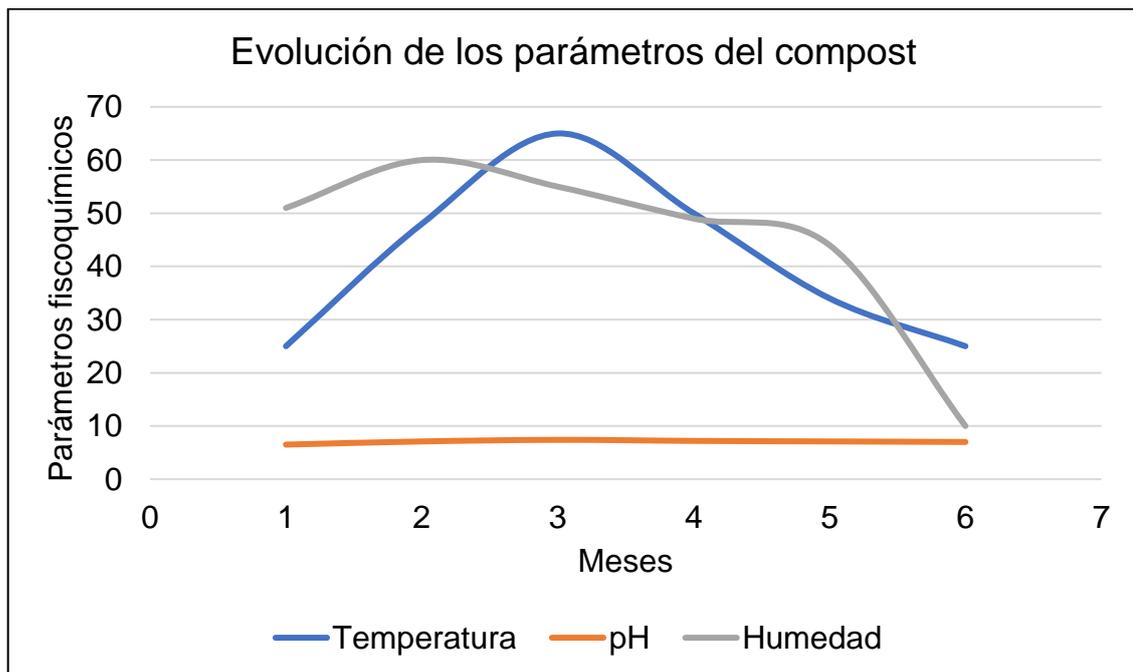
Mes	Temperatura	pH	Humedad
Julio	25	6.5	51
Agosto	48	7.1	60
Setiembre	65	7.4	55
Octubre	50	7.2	49
Noviembre	34	7.1	44
Diciembre	25	7	10

Nota: Extraído de Quiroz Valencia (2021)

Por otro lado, en la Figura 19, se muestra la evolución de los parámetros fisicoquímicos, se observa que la etapa termófila logra alcanzar una temperatura de 65°C en el mes de setiembre, además se observa una disminución en el % de humedad y en el pH. Asimismo, se muestra en la figura 20, la producción del compost.

**Figura 19**

*Evolución de los parámetros del compost*



Nota. Obtenido de Quiroz Valencia (2021)

**Figura 20**

*Producción del compost*



Nota. Obtenido de Quiroz Valencia (2021).

### 5.1.3.1. Resultados de la caracterización fisicoquímica del compost

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del compost producido a partir de residuos de mercado y de jardín se presentan en la Tabla 31, la caracterización se realizó en los laboratorios de SLAB S.A.C.

En cuanto a normas internacionales referentes a la calidad del compost se encuentran la Ö-NORM S 2022 y la NOM- AA- 024. Para la Ö-NORM S 2022, los parámetros que cumplieron con el estándar son el carbono orgánico cuyo valor fue de 19.76%, pH (8.3) y la conductividad eléctrica ( $1.019 \times 10^{-6} \text{ MS/cm}$ ); mientras que los parámetros que no cumplieron, fueron la humedad, cuyo valor es de 17.15% y el estándar menciona un rango de 25- 50%, además de la materia orgánica cuyo valor fue de 34.06% y la norma menciona >45%.

En cuanto a la NOM- AA-024, los parámetros que cumplieron fueron el Nitrógeno Total (N) cuyo valor fue de 1.7%, la norma indica  $\geq 0.8 \%$  de muestra seca, y el fósforo cuyo valor fue de  $P_2O_5$ : 0.63% y la norma indica,  $\leq 0.1\%$  para plantas sensibles al fósforo. En Perú, la norma que rige la calidad del compost es la Norma Técnica Peruana NTP 201.208: 2021 (ANDINA 2022a) y en cuanto a dicha norma los parámetros elementales que cumplieron el límite o rango fueron: el nitrógeno (rango establecido de 0.3 a 1.5%), el fósforo (rango establecido de 0.1 a 1.0%), el magnesio (rango establecido de 0.2 a 0.7%) y el calcio (rango establecido de 2.0 a 6.0%), mientras que el Potasio superó lo establecido en el rango (rango establecido 0.3 a 1.0%). Por otro lado, en cuanto a los parámetros fisicoquímicos, los que cumplieron fueron el pH y la Materia Orgánica cuyos valores establecidos son de 6.5 – 8.5 y >20% respectivamente.

**Tabla 31.**

#### *Características fisicoquímicas del compost*

Muestra	Parámetro	Unidad	Valor
Compost	pH	Unidad de pH	8.3
	Conductividad eléctrica	dS/cm	10.19
	Materia orgánica	%	34.06
	Carbono	%	19.76
	Nitrógeno Total (N)	%	1.7

Fósforo, $P_2O_5$	%	0.63
Potasio, $K_2O$	%	2.04
Relación C/N	Adimensional	11.62
CaO	%	3.13
MgO	%	0.69
Humedad	%	17.15
Sodio	%	505.63
Nitrógeno amoniacal	mg/kg	12.23
Nitrógeno nítrico	%	1.29

### 5.1.3.2. Resultados de la caracterización mediante ICP en compost

La comparación en cuanto a metales pesados de normativas internacionales y nacionales se presenta en la Tabla 32, La tabla presenta diferentes normativas internacionales (Wu Loli 2020; Milon, Chang y Ravindran 2022) y la Norma Técnica Peruana del Compost. De la tabla mencionada, se puede observar que los valores de los metales pesados para la NTP 201.208:2021 se encuentran con valor inferior respecto al Límite de Biosólidos – USA, para los siguientes metales pesados: Cu, Cd, Cr, Ni, Hg, Pb, Zn y As.

La caracterización de metales pesados mediante ICP en el compost producido a partir de residuos orgánicos de mercado y de jardín, se presentan en las figuras 21 y 22. La caracterización se realizó en el laboratorio de SLAB S.A.C.

**Tabla 32.**

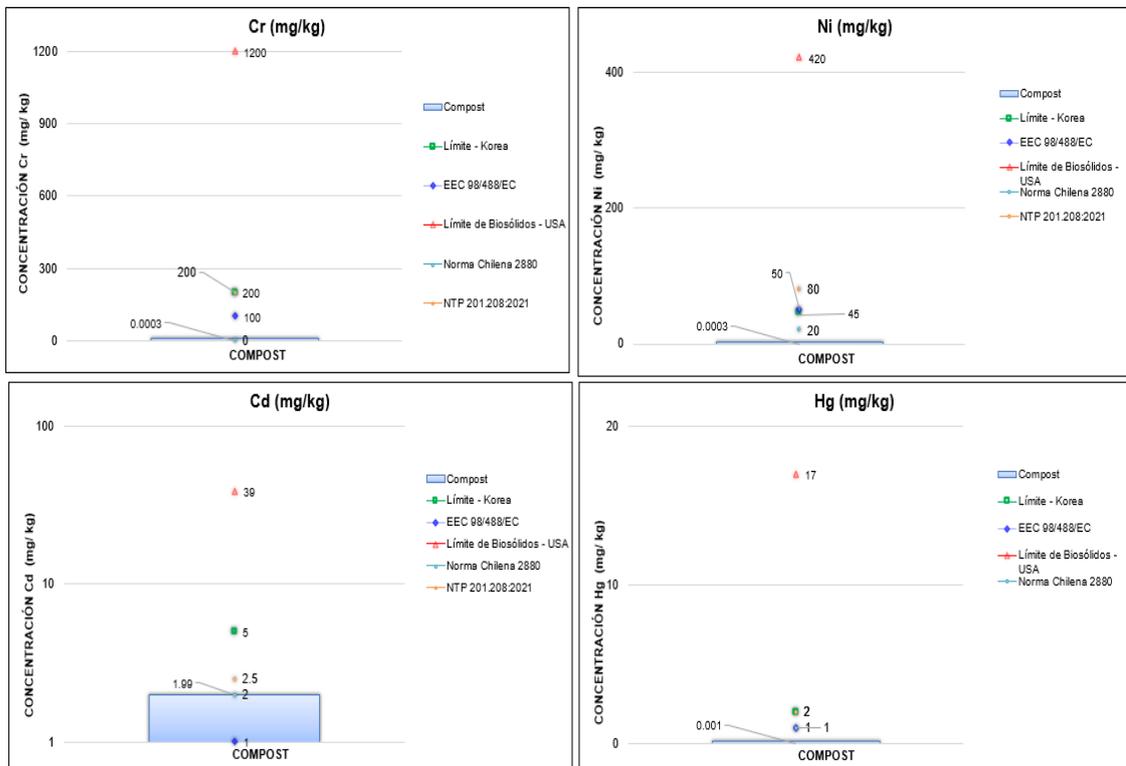
*Límites (nacional e internacional) de metales pesados en Compost*

Metal	Rango de límites de izquierda (menor valor) a derecha (mayor valor)				
Cobre	EEC 98/488/EC (mg/kg)	Norma Chilena 2880 (mg/kg)	NTP 201.208:2021 (mg/kg)	Límite Korea (mg/kg)	Límite de Biosólidos – USA (mg/kg)
	100	100	250	360	1500
Cadmio	EEC 98/488/EC	Norma Chilena 2880	NTP 201.208:2021	Límite Korea	Límite de Biosólidos - USA
	1	2	2.5	5	39
Cromo	EEC 98/488/EC		NTP 201.208:2021	Límite Korea	Límite de Biosólidos - USA
	100		200	200	1200

Níquel	Norma Chilena 2880	Límite Korea	EEC 98/488/EC	NTP 201.208:2021	Límite de Biosólidos - USA
	20	45	50	80	420
Mercurio	Norma Chilena 2880	EEC 98/488/EC	NTP 201.208:2021	Límite Korea	Límite de Biosólidos - USA
	1	1	2	2	17
Plomo	EEC 98/488/EC	Norma Chilena 2880	Límite Korea	NTP 201.208:2021	Límite de Biosólidos - USA
	100	100	130	150	300
Zinc	Norma Chilena 2880	EEC 98/488/EC	Límite Korea	NTP 201.208:2021	Límite de Biosólidos - USA
	200	300	900	1000	2800
Arsénico	EEC 98/488/EC	NTP 201.208:2021	Norma Chilena 2880	Límite de Biosólidos - USA	Límite Korea
	10	15	15	41	45

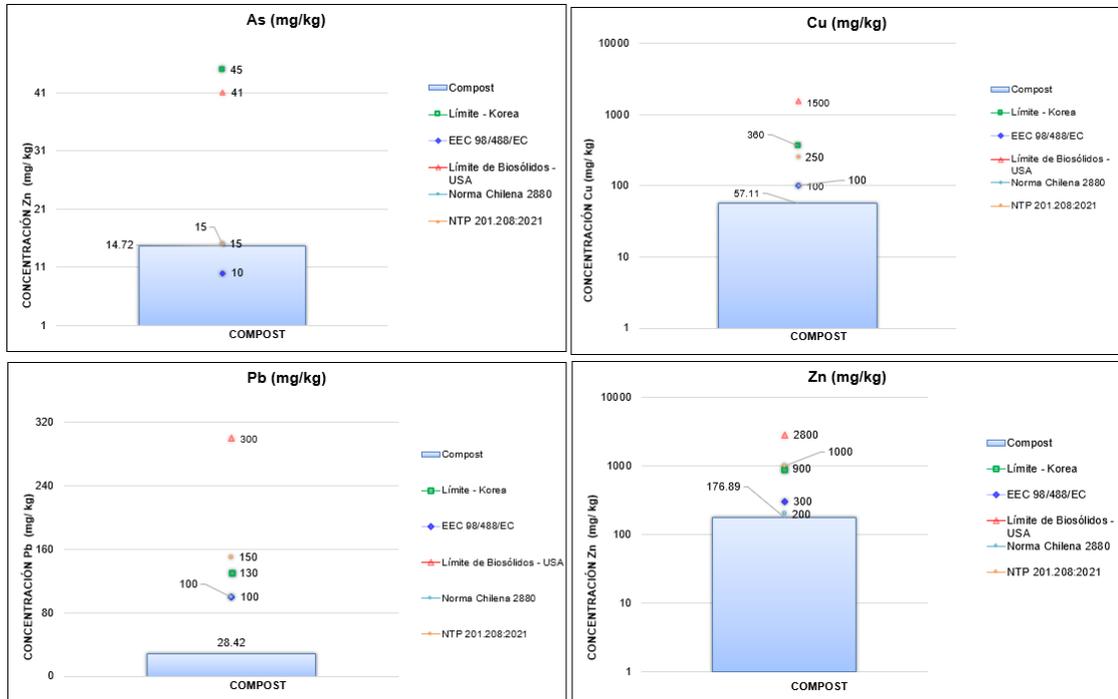
**Figura 21**

*Resultados de las caracterización de metales pesados en el compost (Cr, Ni, Cd y Hg)*



**Figura 22**

*Resultados de la caracterización de metales pesados en el compost (As, Cu, Pb y Zn)*



**5.1.4. Características del suelo**

Los resultados de la caracterización del suelo antes de la fitorremediación se muestran en la Tabla 33.

**Tabla 33.**

*Resultados de las características fisicoquímicas del suelo utilizado*

Parámetro	Unidad	Valor
pH	Unidad de pH	7.55
Conductividad eléctrica	uS/cm	3.88
Carbonatos	% p/p	1.34
Fosforo disponible	mg/kg	89.96
Potasio disponible	mg/kg	1400.12
Calcio	meq/100g	13.91
Magnesio	meq/100g	3.3
Potasio	meq/100g	3.9
Sodio	meq/100g	2.27
Suma de cationes	meq/100g	23.38

Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g	23.6
Arena	%	50
Arcilla	%	25
Limo	%	25
Textura	Sin unidades	Franco Arcillo Arenoso

Se realizó un análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo, tras la aplicación del biocarbón-compost en los diferentes tratamientos. Los resultados se muestran en la Tabla 33. En dicha Tabla se puede observar los resultados de los diferentes análisis fisicoquímicos como el pH, C.E., CaCO<sub>3</sub> (Carbonatos), materia orgánica (M.O.), elementos como el potasio y el fósforo, así también como la C.I.C., clase textural y cationes.

### 5.1.5. Resultados experimentales

#### 5.1.5.1. Capacidad fitorremediadora del *Zea mays*: análisis en el As

El análisis de Arsénico y Plomo se realizó después de los 60 días de realizado el sembrado las semillas del *Zea mays*, cada tratamiento tuvo tres réplicas en las Tablas 34 y 36 se muestra el contenido de metales pesados (As y Pb) y el Factor de Bioconcentración Aérea (FBA), Factor de Bioconcentración Radicular (FBR) y el Factor de Traslocación (FT)

El contenido del Arsénico en la parte aérea del *Zea mays*, fue menor en comparación que el Pb. Los tratamientos que obtuvieron mayor contenido de Arsénico en la raíz fueron los que tuvieron un mayor porcentaje de relave minero (60%). De todos los tratamientos con aplicación de biocarbón-compost T500CP-60, fue el mayor en cuanto al contenido de arsénico en la raíz, con un valor promedio de 16.393 mg/kg. En el suelo el contenido de Arsénico de mayor contenido para concentración de relave 30% fue para el promedio T300CP-30 (204.27 mg/kg). Para la concentración de relave 60%, el mayor contenido de arsénico lo tuvo el promedio de T300CP-60 (411.77 mg/kg).

**Tabla 34.***FBA, FBR y FT para la Fitorremediación de Arsénico*

Tratamiento	parte aérea (mg/kg)	Raíz (mg/kg)	Suelo (mg/kg)	FBA	FBR	FT
T300CP-30-1	0.13	1.96	152.36	0.00085324	0.01286427	0.06632653
T300CP-30-2	0.46	2.13	230.13	0.00199887	0.00925564	0.21596244
T300CP-30-3	0.08	5.37	230.31	0.00034736	0.0233164	0.01489758
T300CP-60-1	0.07	6.31	416.37	0.00016812	0.01515479	0.0110935
T300CP-60-2	0.07	11.5	476.38	0.00014694	0.02414039	0.00608696
T300CP-60-3	0.07	6.04	342.55	0.00020435	0.01763246	0.0115894
T500CP-30-1	0.07	3.06	264.11	0.00026504	0.01158608	0.02287582
T500CP-30-2	0.07	1.9	248.29	0.00028193	0.00765234	0.03684211
T500CP-30-3	0.07	2.51	95.12	0.00073591	0.02638772	0.02788845
T500CP-60-1	0.07	10.99	396.37	0.0001766	0.02772662	0.00636943
T500CP-60-2	0.07	19.93	408.7	0.00017127	0.04876437	0.00351229
T500CP-60-3	0.07	18.26	307.4	0.00022772	0.05940143	0.00383352
CR30-1	0.07	15.4	134	0.00052239	0.11492537	0.00454545
CR30-2	0.07	3.9	100.67	0.00069534	0.03874044	0.01794872
CR30-3	0.07	5.58	148.41	0.00047167	0.03759854	0.0125448
CR60-1	0.07	49.12	405.17	0.00017277	0.12123306	0.00142508
CR60-2	0.07	9.9	228.31	0.0003066	0.0433621	0.00707071
CR60-3	0.07	4.14	225.04	0.00031106	0.01839673	0.01690821

Todos los valores del FBA, FBR, y el FT para el metal Arsénico (As) fueron menores a uno, lo que indica que el *Zea mays*, es una planta fitoestabilizadora, y la clasificación en la parte aérea y parte radicular tienen de denominación exclusiva por la misma razón (FBA, FRB <1).

En la tabla 35, se muestra el promedio de los valores FT, FBR y FBA. El color verde significa que tuvo un mayor valor en comparación con el color rojo (menor valor). Respecto al porcentaje de relave 30%, T300CP-30 y T500CP-30 tuvieron valores del FT mayor al control (CR30), lo que indica que el contenido de concentración del As (mg/kg) fue mayor en la raíz en el control respecto a los tratamientos, por lo que la aplicación de las enmiendas influye en la inmovilización y evita que el metal vaya directamente a la raíz. Para el porcentaje de relave 60%, T300CP-60 (0.00959) tuvo un contenido mayor de FT promedio que el control CR60 (0.008468). A pesar de que el contenido FT de CR60 (0.008468) fue mayor que T500CP-60 (0.0045717), la concentración del metal

pesado (As) promedio en la raíz en ambos tratamientos (T300CP-60 y T500CP-600) fue menor que en el control CR60. Para el FBR, respecto al porcentaje de relave 30%, T300CP-30 (0.01514) y T500CP-30 (0.01521) tuvieron valores menores en comparación con el control CR30 (0.0637548), esto debido a que el FBR es la división entre la concentración del metal radicular y la concentración del metal del suelo, por lo que los tratamientos con la aplicación de las enmiendas (T300CP-30 y T500CP-30) tuvieron un mayor contenido de metal en el suelo, y menor contenido de metal en la raíz, respecto al control. Mientras que para el porcentaje de relave 60%, T300CP-60 (0.0189759) y T500CP-60 (0.0452974) tuvieron menores valores respecto al control CR60 (0.0609973), esto debido a que hubo una mayor concentración de metales en el suelo para los tratamientos que se aplicaron las enmiendas biocarbón-compost (T300CP-60 y T500CP-60). Para el FBA (Tabla 35), respecto al porcentaje de relave 30%, T300CP-30 (0.00106649) tuvo mayor valor en comparación con el control CR30 (0.000563132), esto debido a que el FBA es la división entre la concentración de metal aérea y la concentración del suelo. Sin embargo, T300CP-30 tuvo un contenido mayor de metal en la parte aérea (promedio de 0.2233 mg/kg) a diferencia de los otros tratamientos. Mientras que para el porcentaje de relave 60%, el contenido del FBA de T300CP-60 (0.000173137) y T500CP-60 (0.000191865) fue menor en comparación del control (0.000263474), esto debido a que los tratamientos con aplicación del biocarbón-compost tuvieron una mayor retención de metales en el suelo.

**Tabla 35.**

*Clasificación de FBA, FBR y FT para el Arsénico*

Tratamiento	FT	Potencial	FBA	FBR	CLASIFICACIÓN	
					Parte aérea	Parte radicular
T300CP-30	0.0990622	Fitoestabilizadora	0.00106649	0.015145436	Exclusora	Exclusora
T300CP-60	0.00959	Fitoestabilizadora	0.000173137	0.018975882	Exclusora	Exclusora
T500CP-30	0.0292021	Fitoestabilizadora	0.000427627	0.015208715	Exclusora	Exclusora
T500CP-60	0.0045717	Fitoestabilizadora	0.000191865	0.045297475	Exclusora	Exclusora
CR30	0.0116797	Fitoestabilizadora	0.000563132	0.063754786	Exclusora	Exclusora
CR60	0.008468	Fitoestabilizadora	0.000263474	0.060997296	Exclusora	Exclusora

Nota: Factor de bioconcentración (FBA), Factor de bioconcentración Radicular (FBR) y el Factor de Traslocación (FT).

### 5.1.5.2. Capacidad fitorremediadora del *Zea mays*: análisis en el Pb

El contenido del Plomo en la parte aérea del *Zea mays*, fue mayor en comparación que el As, esto debido a que el contenido de Pb en el relave fue mayor al As (3.9 veces más). Los tratamientos que obtuvieron mayor contenido de Plomo en la raíz fueron los que tuvieron un mayor porcentaje de relave minero (60%). De todos los tratamientos con aplicación del biocarbón-compost, T500CP-60 al igual que para el As, fue el mayor en cuanto al contenido de Plomo en la raíz (promedio de 92.62 mg/kg). El contenido de Plomo que fue mayor en el suelo, lo obtuvo el tratamiento T300CP-60 cuyo promedio fue 1686.68 mg/kg.

Todos los valores del FBA, FBR, y el FT para el Plomo (Pb) fueron menores a uno (Tabla 36), lo que indica que el *Zea mays* para este metal, es una planta fitoestabilizadora, y la clasificación en la parte aérea y radicular tienen denominación exclusiva por la misma razón (FBA, FBR < 1).

**Tabla 36.**

*FBA, FBR y FT para el Pb*

Tratamiento	parte aérea	Raíz	Suelo	FBA	FBR	FT
T300CP-30-1	0.19	4.76	629.1	0.00030202	0.00756636	0.03991597
T300CP-30-2	0.17	4.41	1034.57	0.00016432	0.00426264	0.03854875
T300CP-30-3	0.9	30.06	1035.4	0.00086923	0.02903226	0.02994012
T300CP-60-1	0.21	23.03	1756.49	0.00011956	0.01311138	0.00911854
T300CP-60-2	0.58	55.91	1956.51	0.00029645	0.02857639	0.01037382
T300CP-60-3	0.44	34.74	1347.05	0.00032664	0.02578969	0.01266552
T500CP-30-1	0.18	16.93	1141.87	0.00015764	0.01482656	0.01063201
T500CP-30-2	0.35	2.43	1089.67	0.0003212	0.00223003	0.14403292
T500CP-30-3	0.23	13.31	330.52	0.00069587	0.04026988	0.01728024
T500CP-60-1	0.39	67.6	1830.95	0.000213	0.03692072	0.00576923
T500CP-60-2	0.65	114.51	1801.88	0.00036073	0.06355029	0.00567636
T500CP-60-3	0.24	95.76	1385.71	0.0001732	0.06910537	0.00250627
CR30-1	0.1	87.45	557.17	0.00017948	0.15695389	0.00114351
CR30-2	0.13	17.42	411.1	0.00031622	0.04237412	0.00746269
CR30-3	0.22	25.43	641.94	0.00034271	0.03961429	0.0086512
CR60-1	0.15	217.67	1674.65	8.9571E-05	0.1299794	0.00068912
CR60-2	0.32	56.98	986.33	0.00032444	0.05776971	0.00561601

En la tabla 37 se muestra el promedio de los valores FT, FBR y FBA. El color verde significa que tuvo un mayor valor en comparación con el color rojo. Respecto al porcentaje de relave 30%, T300CP-30 y T500CP-30 tuvieron valores del FT mayor al control (CR30), lo que indica que el contenido de concentración del Pb (mg/kg) fue mayor en la raíz en el control respecto a los tratamientos, por lo que la aplicación de las enmiendas influye en la inmovilización y evita que el metal se dirija directamente a la raíz. Para el porcentaje de relave 60%, T300CP-60 (0.01071929) tuvo un contenido mayor de FT promedio que el control CR60 (0.006165039). A pesar de que el contenido FT de CR60 (0.006165039) fue mayor que T500CP-60 (0.004650619), la concentración del metal pesado (Pb) promedio en la raíz en ambos tratamientos (T300CP-60 y T500CP-600) fue menor que en el control CR60.

Para el FBR, respecto al porcentaje de relave 30%, T300CP-30 (0.013620421) y T500CP-30 (0.019108822) tuvieron valores menores en comparación con el control CR30 (0.079647435), esto debido a que el FBR es la división entre la concentración del metal radicular y la concentración del metal del suelo, por lo que los tratamientos con la aplicación de las enmiendas (T300CP-30 y T500CP-30) tuvieron un mayor contenido de metal en el suelo, y menor contenido de metal en la raíz, respecto al control. Mientras que, para el porcentaje de relave 60%, T300CP-60 (0.022492486) y T500CP-60 (0.056525461) tuvieron menores valores respecto al control CR60 (0.070797334), esto debido a que hubo una mayor concentración de metales en el suelo para los tratamientos que se aplicaron las enmiendas biocarbón-compost (T300CP-60 y T500CP-60).

Para el FBA, respecto al porcentaje de relave 30%, T300CP-30 (0.000445189) y T500CP-30 (0.000391569) tuvieron mayor valor en comparación con el control CR30 (0.000279471), esto debido a que el FBA es la división entre la concentración de metal aéreo y la concentración del suelo. Mientras que para el porcentaje de relave 60%, el contenido del FBA de T300CP-60 (0.000247548) y T500CP-60 (0.000248978) fueron menores en comparación

que el control (0.000238134), esto debido a que los tratamientos con aplicación del biocarbón-compost tuvieron una mayor retención de metales en el suelo.

**Tabla 37.**

*FBA, FBR y FT para el Pb*

Tratamiento	FT	Potencial	FBA	FBR	CLASIFICACIÓN	
					Parte aérea	Parte radicular
T300CP-30	0.036134946	Fitoestabilizadora	0.000445189	0.013620421	Exclusora	Exclusora
T300CP-60	0.01071929	Fitoestabilizadora	0.000247548	0.022492486	Exclusora	Exclusora
T500CP-30	0.057315059	Fitoestabilizadora	0.000391569	0.019108822	Exclusora	Exclusora
T500CP-60	0.004650619	Fitoestabilizadora	0.000248978	0.056525461	Exclusora	Exclusora
CR30	0.005752466	Fitoestabilizadora	0.000279471	0.079647435	Exclusora	Exclusora
CR60	0.006165039	Fitoestabilizadora	0.000238134	0.070797334	Exclusora	Exclusora

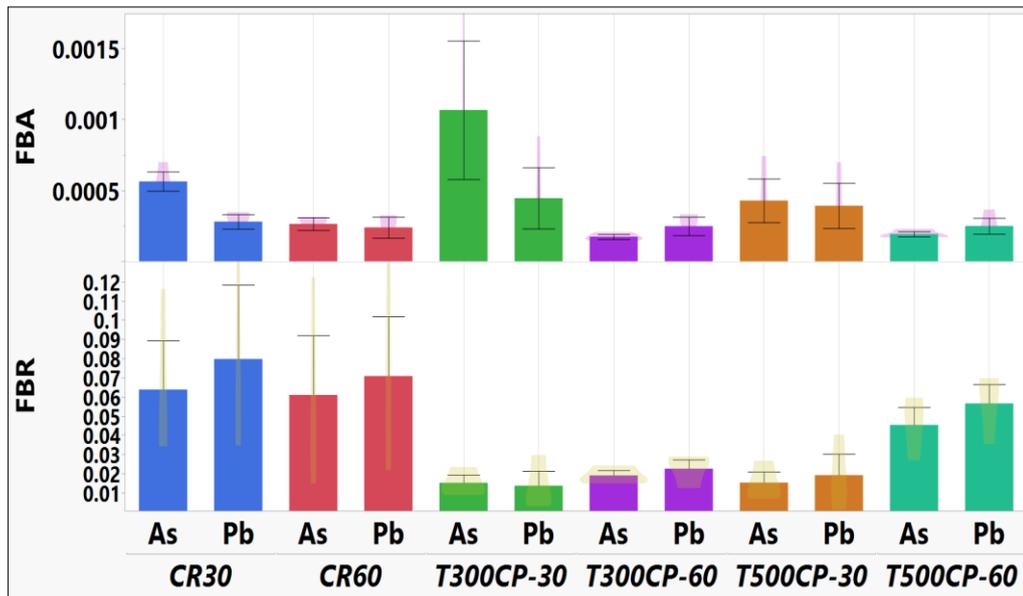
### **5.1.5.3. Comparación de la capacidad fitorremediadora del *Zea mays***

En la Figura 23 se observa la comparación entre el FBA y FBR para el As y Pb en los diferentes tratamientos. En el caso del FBR, los tratamientos que tuvieron dosis de biocarbón-compost tuvieron un menor valor de FBR, en comparación con los controles (CR30 y CR60). Otro resultado que resaltó, fue que T500CP-60 tuvo un mayor FBR respecto a T300CP-60 para el As y Pb. En cuanto al contenido mayor del FBA, lo obtuvo T300CP-30.

En la Figura 24, se muestra el FT para todos los tratamientos, se resalta el FT del T300CP-30, dado que su valor fue mayor con respecto a todos los tratamientos.

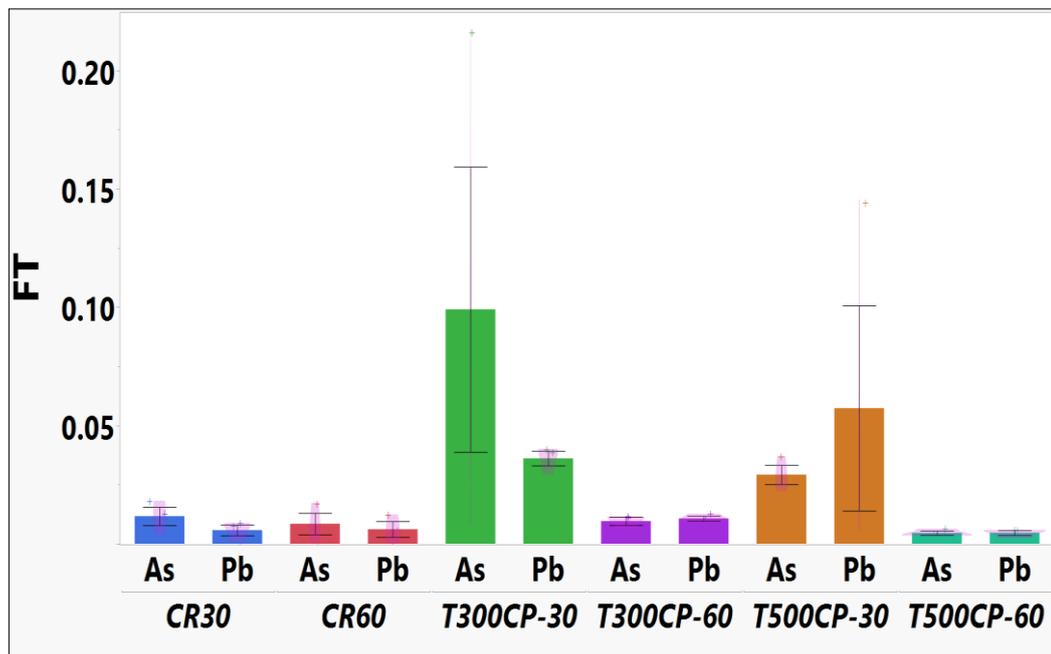
**Figura 23**

*Comparación entre el FBA y FBR para el As y Pb en los tratamientos*



**Figura 24**

*Comparación entre el FT para el As y Pb en los tratamientos*



**5.1.5.4. Características fisicoquímicas del suelo después de la fitorremediación**

En la Figura 25, se muestra la comparación de los metales pesados y los tratamientos presentes en la muestra del suelo, haciendo la comparación para el

30% de relave, se muestra que los tratamientos que tuvieron biocarbón-compost, T300CP-30 (204.67 mg/kg) y T500CP-30 (202.51 mg/kg) tuvieron una mayor presencia de As en el suelo que el control CR30 (127.693 mg/kg). Para el 60% de relave, los tratamientos que tuvieron biocarbón-compost, T300CP-60(411.77 mg/kg) y T500CP-60 (370.82 mg/kg) también tuvieron un mayor contenido de Pb en comparación con el control CR60 (286.17 mg/kg). Para el caso del Pb, los tratamientos T300CP-30 (899.69 mg/kg) y T500CP-30 (854.02 mg/kg) tuvieron un mayor contenido de Pb que el control CR30 (536.74 mg/kg), en el caso del relave de 60%, los tratamientos con aplicación de biocarbón-compost, T300CP-60 (1686.68 mg/kg) y T500CP-60 (1672.85 mg/kg) tuvieron un mayor contenido de este metal pesado en comparación con el control CR60 (1208.79 mg/kg). En la Figura 26 se muestra la comparación de los metales pesados, incluyendo el ECA suelo como límite. Por otro lado, en la Tabla 38 se puede observar los resultados de los diferentes análisis fisicoquímicos como el pH, C.E., CaCO<sub>3</sub>, materia orgánica (M.O.), elementos como el potasio y el fósforo, así también como la C.I.C., clase textural y cationes.

En la Figura 27 se muestra de acuerdo a la variación tras la aplicación del biocarbón-compost en diferentes tratamientos del suelo, así como aquellos que no tuvieron ninguna aplicación de biocarbón-compost (control).

En el caso del pH, aquellos para el relave de 30% en los tratamientos se obtuvo lo siguiente,  $pH_{T500CP-30} > pH_{T300CP-30} > CR30$ , es decir el biocarbón cuya producción fue de 500°C tuvo un efecto mucho mayor al incrementar el valor del pH frente al tratamiento CR30 (pH : 7.49). Para el caso del relave en proporción 60%, se obtuvo lo siguiente,  $pH_{T500CP-60} > pH_{T300CP-60} > pH_{CR60}$

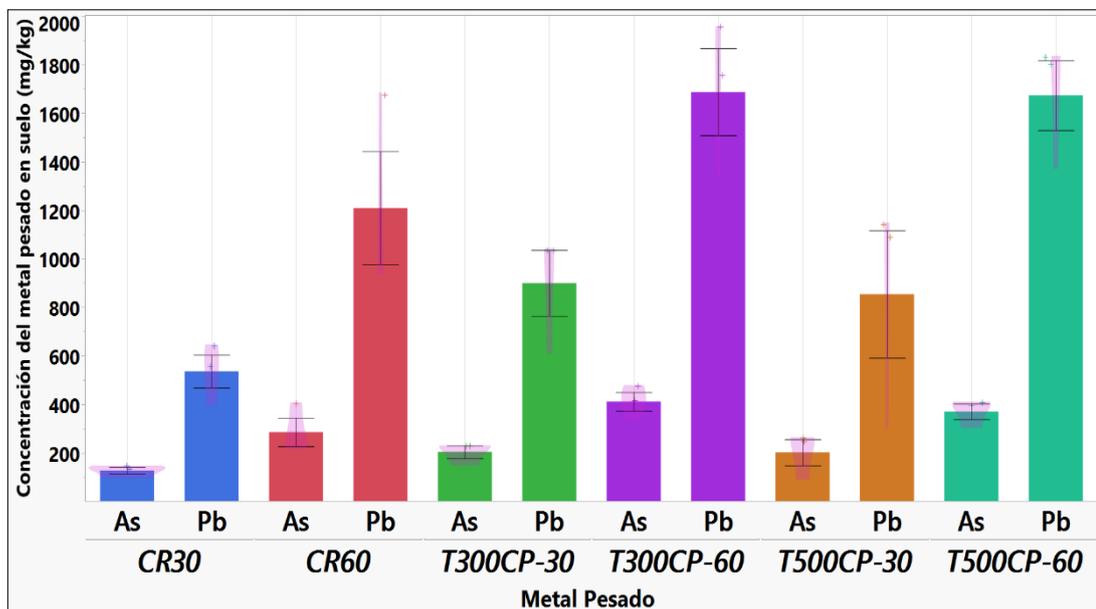
Para el caso de la Conductividad Eléctrica (C.E.), para la concentración de relave de 30% en el suelo, en los tratamientos se obtuvo lo siguiente para la concentración de relave minero 30%,  $C.E._{T500CP-30} > C.E._{T300CP-30} > C.E._{CR30}$  es decir el biocarbón cuya producción fue de 500°C tuvo un efecto mucho mayor al incrementar el valor del C.E. frente al tratamiento CR30 (C.E. : 6.92 dS/m). Para el caso del relave en proporción 60%, se obtuvo lo siguiente,  $C.E._{CR60} > C.E._{T300CP-60} > C.E._{T500CP-60}$ .

En el caso de la Materia Orgánica (M.O.) del suelo tras la exposición de las enmiendas biocarbón-compost, así también como las que no fueron expuestas, en los tratamientos se obtuvo lo siguiente, para el relave de 30%,  $M.O.T300CP-30 > M.O.CR30 > M.O.T500CP-30$ . Para la concentración de relave de 60% en el suelo, se obtuvo lo siguiente,  $M.O.T300CP-60 > M.O.CR60 > M.O.T500CP-60$ .

En el caso de la Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.) del suelo tras la exposición de las enmiendas biocarbón-compost, así también como el suelo que no fue expuesto con enmienda biocarbón-compost, en los tratamientos se obtuvo lo siguiente, para el relave de 30%,  $C.I.C.CR30 > C.I.C.T300CP-30 > C.I.C.T500CP-30$ . Para la concentración de relave de 60% en el suelo, se obtuvo lo siguiente,  $C.I.C.CR60 > C.I.C.T300CP-60 > C.I.C.T500CP-60$ .

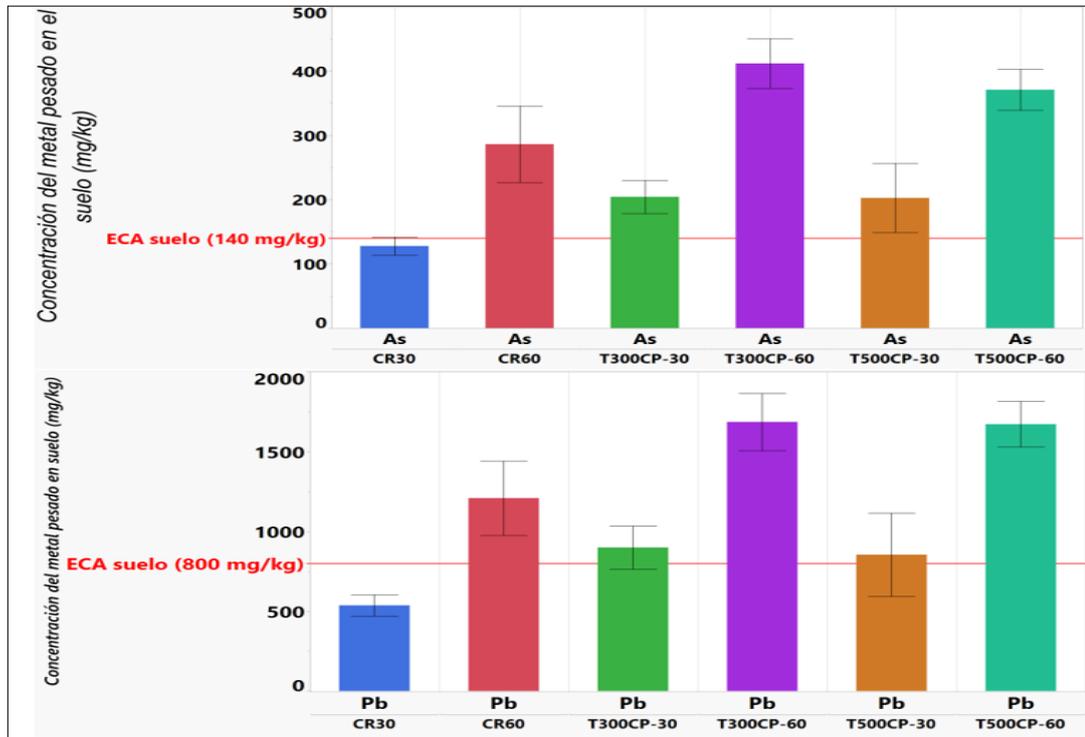
### Figura 25

Comparación entre la concentración del metal pesado en el suelo (mg/kg) para el As y Pb en los tratamientos



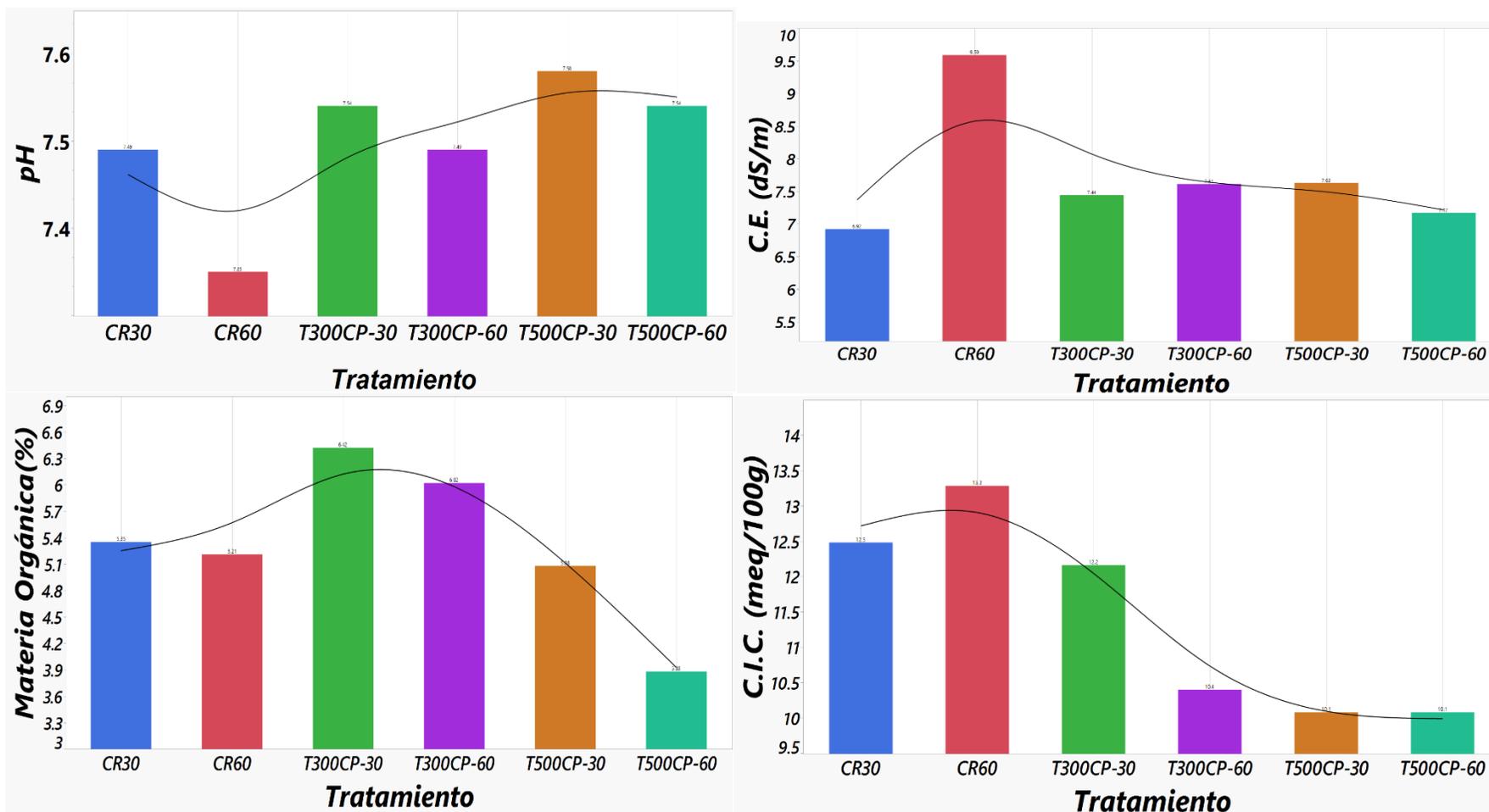
**Figura 26**

*Concentración del As y Pb y comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para el Suelo*



**Figura 27**

*Variación de parámetros fisicoquímicos en el suelo tras la aplicación del biocarbón-compost y control*



**Tabla 38.**

*Características fisicoquímicas del suelo tras la aplicación del biocarbón-compost en los diferentes tratamientos*

Propiedad	Tratamiento						
	CONTROL	CR-30	CR-60	T300CP-30	T500CP-30	T300CP-60	T500CP-60
pH	7.81	7.49	7.35	7.54	7.58	7.49	7.54
C.E. (dS/m)	6.78	6.92	9.59	7.44	7.63	7.61	7.17
CaCO <sub>3</sub> (%)	0.8	0.45	0.27	0.63	0.63	0.36	0.36
M.O. (%)	6.68	5.35	5.21	6.42	5.08	6.02	3.88
P (ppm)	195.4	53	26.3	76.9	73.8	53	46.5
K (ppm)	2770	2660	2010	2450	2430	2090	1920
Arena (%)	57	53	51	49	47	47	49
Análisis mecánico							
Limo (%)	25	29	33	37	39	37	35
Arcilla (%)	18	18	16	14	14	16	16
Clase Textural	Fr. A.	Fr. A.	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.
C.I.C. (meq/100g)	15.84	12.48	13.28	12.16	10.08	10.4	10.08
Ca <sup>+2</sup> (meq/100g)	7.66	7.35	9.19	8.17	6.37	7.49	7.36
Mg <sup>+2</sup> (meq/100g)	4.44	3.03	2.65	2.17	2.14	1.91	1.76
K <sup>+</sup> (meq/100g)	3.12	1.98	1.41	1.71	1.51	0.96	0.95
Na <sup>+</sup> (meq/100g)	0.62	0.12	0.03	0.1	0.05	0.04	0.01
Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup> (meq/100g)	0	0	0	0	0	0	0
Suma de Cationes	15.84	12.48	13.28	12.16	10.08	10.4	10.08
Suma de Bases	15.84	12.48	13.28	16.16	10.08	10.4	10.08
% de saturación de bases (%)	100	100	100	100	100	100	100

Nota: Fr. A: Franco Arenoso, Fr.: Franco

#### **5.1.5.5. Desarrollo vegetativo de la planta**

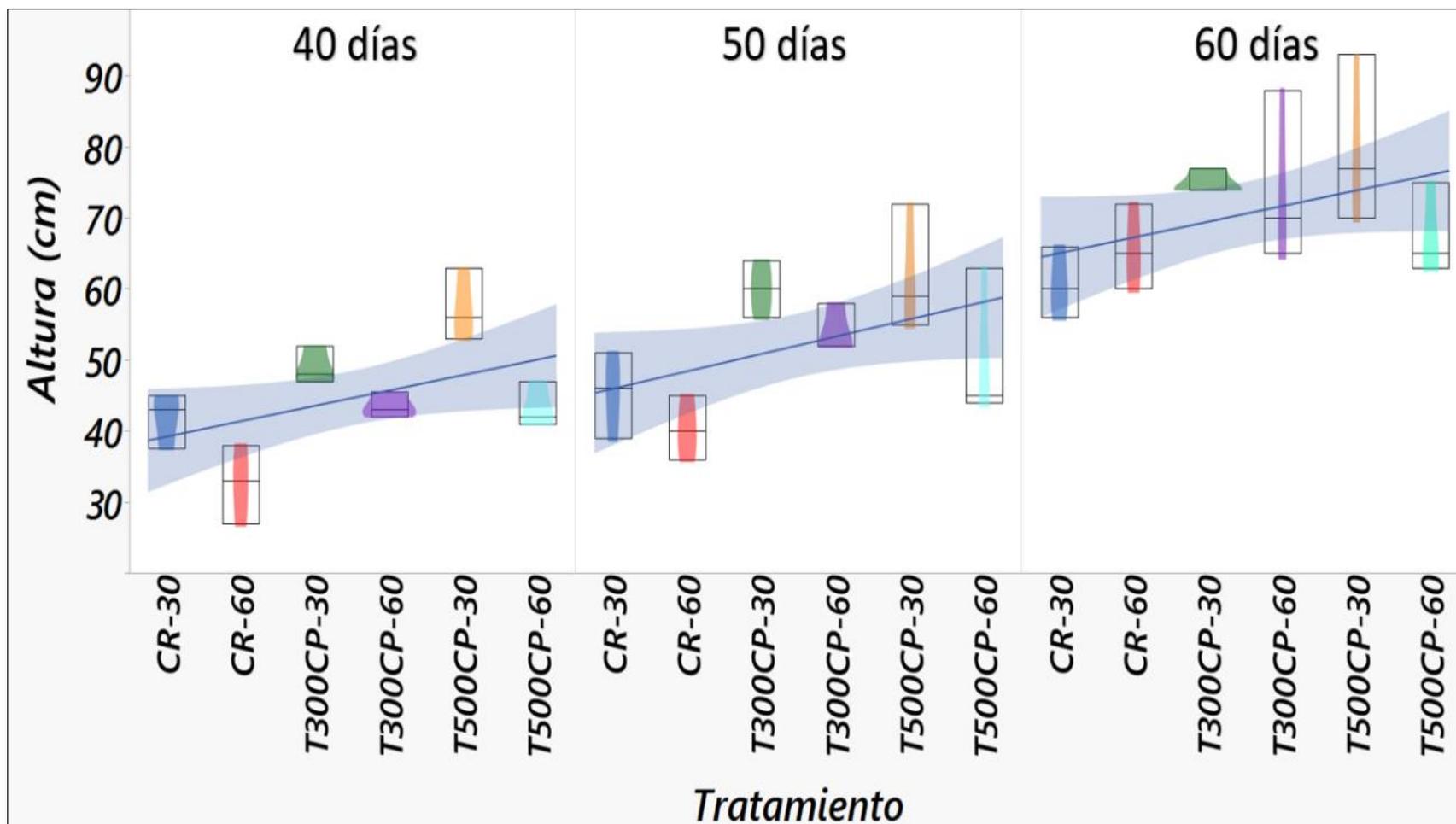
En este caso, se determinó la altura de la planta (cm) al término de la duración del tratamiento que fueron 60 días. Para lo cual se midieron en los días 40, 50 y 60. En la Tabla 39, se muestra la altura del *Zea mays* durante el proceso de fitorremediación, se observa que los tratamientos que tuvieron dosis de aplicación de biocarbón-compost, tuvieron una mayor altura que con respecto a los controles (CR30 y CR60). En cuanto a la concentración de 30% de relave, quien presento una mayor altura fue T500CP-30, para la dosificación de 60% de relave quien presento mayor altura fue T300CP-60. En la figura 28, se muestra la variación para los diferentes días, se observa que conforme pasan los días la altura del *Zea mays* en los tratamientos incrementa.

**Tabla 39.***Desarrollo vegetativo durante la fitorremediación (altura)*

Tratamiento	Altura (cm)		
	40 días	50 días	60 días
CR30	41.83 ± 3.88	45.33 ± 6.03	60.67 ± 5.03
CR60	32.67 ± 5.51	40.33 ± 4.51	65.67 ± 6.03
T300CP-30	49 ± 2.65	60 ± 4.00	75 ± 1.73
T500CP-30	57.33 ± 5.13	62 ± 8.89	80 ± 11.79
T300CP-60	43.5 ± 1.81	54 ± 3.46	74.33 ± 12.096
T500CP-60	43.33 ± 3.21	50.67 ± 10.69	67.67 ± 6.43

**Figura 28**

*Altura en los diferentes días de fitorremediación de la planta Zea mays*



## 5.2. Resultados inferenciales

La prueba de normalidad se utiliza para determinar si una muestra de datos sigue una distribución normal o Gaussiana. La distribución normal es una distribución simétrica en forma de campana que es comúnmente encontrada en muchos fenómenos naturales y datos de muestra. Las pruebas de normalidad que se usó fue Shapiro-Wilk, debido a que el tamaño de la muestra fue menor a  $n < 50$  (Peña D. 2014)

Esta prueba compara los datos de muestra con la distribución normal esperada y generan un valor  $p$ , que indica si hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal. Un valor  $p$  bajo (generalmente por debajo de 0,05) sugiere que los datos no siguen una distribución normal.

En la investigación se plantearon dos hipótesis específicas. Para comprender la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad a los datos que comprenden la fitorremediación, estos son Factor de Bioacumulación Aérea (FBA), Factor de Bioacumulación Radicular (FBR) y Factor de Traslocación (FT). Luego, se realizó el análisis de varianza de una vía (ANOVA), prueba estadística paramétrica con su respectiva significancia bilateral.

### 5.2.1. Análisis de la normalidad

#### 5.2.1.1. Análisis de normalidad del FBA para el As

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

Para lo cual:

$H_0$ : La distribución es normal

$H_1$ : La distribución no es normal

O de manera formal:

$$H_0: X \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$H_1: X \neq N(\mu, \sigma^2)$$

**Tabla 40.***Prueba de normalidad para el FBA para el As*

Factor	Tratamiento	Estadístico	Shapiro-Wilk	
			gl	Sig.
FBA	CR30	0.90947	3	0.4163
	CR60	0.774135	3	0.0541
	T300CP-30	0.952364	3	0.5798
	T300CP-60	0.977598	3	0.7131
	T500CP-30	0.776862	3	0.0604
	T500CP-60	0.82011	3	0.1635

Nota: gl: Grados de libertad, sig.: significancia

Según la Tabla 40 se puede observar que 6 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha = 0.05$ , por lo tanto, *no rechazamos la hipótesis nula*. Los datos tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza para todos los tratamientos.

**5.2.1.2. Análisis de normalidad del FBR para el As**

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

Para lo cual:

*H<sub>0</sub>: La distribución es normal**H<sub>1</sub>: La distribución no es normal*

O de manera formal:

$$H_0: X \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$H_1: X \neq N(\mu, \sigma^2)$$

**Tabla 41.***Prueba de normalidad para el FBR para el As*

Factor	Tratamiento	Estadístico	Shapiro-Wilk	
			gl	Sig.
FBR	CR30	0.761	3	0.0246
	CR60	0.919	3	0.4486
	T300CP-30	0.927	3	0.4768
	T300CP-60	0.937	3	0.5161
	T500CP-30	0.899	3	0.3828
	T500CP-60	0.965	3	0.6422

Nota: gl: Grados de libertad, sig.: significancia

Según la Tabla 41 se puede observar que 5 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha = 0.05$ , por lo tanto, *no rechazamos la hipótesis nula*. Los datos tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza para dichos tratamientos. Sin embargo, para el tratamiento CR30, se observa que sig. (P valor) es menor a  $\alpha = 0.05$ , entonces *se rechaza la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa*. Los datos no poseen una distribución normal.

### 5.2.1.3. Análisis de normalidad del FT para el As

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

Para lo cual:

$H_0$ : La distribución es normal

$H_1$ : La distribución no es normal

O de manera formal:

$H_0: X \sim N(\mu, \sigma^2)$

$H_1: X \neq N(\mu, \sigma^2)$

**Tabla 42.**

*Prueba de normalidad para el FT para el As*

Factor	Tratamiento	Estadístico	Shapiro-Wilk	
			gl	Sig.
FT	CR30	0.987655	3	0.7874
	CR60	0.97615	3	0.7039
	T300CP-30	0.926335	3	0.4751
	T300CP-60	0.816995	3	0.1558
	T500CP-30	0.974144	3	0.6916
	T500CP-60	0.833137	3	0.1963

Nota: gl: Grados de libertad, sig.: significancia

Según la Tabla 42 se puede observar que los 6 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha=0.05$ , por lo tanto, *no rechazamos la hipótesis nula*. Los datos tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza.

#### 5.2.1.4. Análisis de normalidad del FBA para el Pb

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

Para lo cual:

$H_0$ : La distribución es normal

$H_1$ : La distribución no es normal

O de manera formal:

$$H_0: X \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$H_1: X \neq N(\mu, \sigma^2)$$

**Tabla 43.**

*Prueba de normalidad para el FBA para el Pb*

Factor	Tratamiento	Estadístico	Shapiro-Wilk	
			gl	Sig.
FBA	CR30	0.867986	3	0.2898
	CR60	0.825876	3	0.1779
	T300CP-30	0.889875	3	0.354
	T300CP-60	0.85699	3	0.2585
	T500CP-30	0.95122	3	0.5747
	T500CP-60	0.900586	3	0.3874

Nota: gl: Grados de libertad, sig.:significancia

Según la Tabla 43 se puede observar que los 6 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha = 0.05$ , por lo tanto, *no rechazamos la hipótesis nula*. Los datos tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza para todos los tratamientos.

#### 5.2.1.5. Análisis de normalidad del FBR para el Pb

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

Para lo cual:

$H_0$ : La distribución es normal

$H_1$ : La distribución no es normal

O de manera formal:

$$H_0: X \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$H_1: X \neq N(\mu, \sigma^2)$$

**Tabla 44.***Prueba de normalidad para el FBR para el Pb*

Factor	Tratamiento	Estadístico	Shapiro-Wilk	
			gl	Sig.
FBR	CR30	0.76763	3	0.0394
	CR60	0.956126	3	0.597
	T300CP-30	0.848021	3	0.2352
	T300CP-60	0.879997	3	0.3244
	T500CP-30	0.963374	3	0.6322
	T500CP-60	0.874951	3	0.3097

Nota: gl: Grados de libertad, sig.: significancia

Según la Tabla 44 se puede observar que 5 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha = 0.05$ , por lo tanto, *no rechazamos la hipótesis nula*. Los datos tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza para dichos tratamientos. Sin embargo, para el tratamiento CR30, se observa que sig. (P valor) es menor a  $\alpha = 0.05$ , entonces *se rechaza la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa*, los datos no poseen una distribución normal.

#### 5.2.1.6. Análisis de normalidad del FT para el Pb

Siendo el número de datos menor a 50, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, para verificar si los datos siguen una distribución normal.

Para lo cual:

$H_0$ : La distribución es normal

$H_1$ : La distribución no es normal

O de manera formal:

$H_0: X \sim N(\mu, \sigma^2)$

$H_1: X \neq N(\mu, \sigma^2)$

**Tabla 45.***Prueba de normalidad para el FT para el Pb*

Factor	Tratamiento	Estadístico	Shapiro-Wilk	
			gl	Sig.
FT	CR30	0.865297	3	0.2823
	CR60	0.99321	3	0.8424
	T300CP-30	0.8506	3	0.2421
	T300CP-60	0.972327	3	0.6808
	T500CP-30	0.78728	3	0.0845
	T500CP-60	0.771329	3	0.05

Nota: gl: Grados de libertad, sig.:significancia

Según la Tabla 45 se puede observar que 5 tratamientos presentan un sig. (P valor) mayor a  $\alpha = 0.05$ , por lo tanto, *no rechazamos la hipótesis nula*. Los datos tienen una distribución normal; por ende, se procede a realizar el análisis de varianza para dichos tratamientos. Sin embargo, para el tratamiento T500CP-60, se observa que sig. (P valor) es menor a  $\alpha = 0.05$ , entonces se *rechaza la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa*, los datos no poseen una distribución normal.

### **5.2.2. Análisis de la varianza (ANOVA) para FBA, FBR y FT en As y Pb**

En las siguientes tablas 46, 47 y 48 se muestran el análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales (factor temperatura de producción del biocarbón y factor dosificación del biocarbón-compost). En la tabla 46, 47 y 48 se muestra los grados de libertad, la suma de cuadrados y la razón F que mientras mayor es, mayor es el efecto de las interacciones.

Para los efectos principales (factor de temperatura de producción del biocarbón y factor de dosificación biocarbón-compost), en la Tabla 46, 47 y 48 se muestran los grados de libertad, la suma de cuadrados y la razón F que mientras mayor es, mayor es el efecto de las interacciones. Se muestra que para el efecto principal factor de temperatura de producción del biocarbón (Para FBA) la razón F, fue de 1.28, para FBR, la razón F fue de 11.0838, y para el FT, la razón F fue de 0.6624. Por lo que, FBR>FBA>FT. En cuanto al p-value solo para el FBR fue menor a  $p<0.05$  (Tabla 47). Se muestra que para el efecto principal factor dosificación de biocarbón-compost, para FBA la razón F fue de 6.1138, para FBR la razón F fue de 16.4162, para FT la razón F fue de 6.8489 (Tabla 48). Por lo que, FBR>FBA>FT. En cuanto al p-value, para el FBR, FBA, y FT los p-value fueron menores a  $p<0.05$

**Tabla 46.**

*Cuadro del análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales en la variación del FBA.*

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	p-value
Dosificación de biocarbón-compost	1	1	8.10E-07	6.1138	0.0225
Temperatura de producción del biocarbón	1	1	1.70E-07	1.28	0.2713

**Tabla 47.**

*Cuadro del análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales en la variación del FBR*

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	p-value
Dosificación de biocarbón-compost en % relave	1	1	0.0024125	16.4162	0.0006
Temperatura de producción del biocarbón	1	1	0.0016289	11.0838	0.0033

**Tabla 48.**

*Cuadro del análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales en la variación del FT*

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	p-value
Dosificación de biocarbón-compost	1	1	0.01385032	6.8489	0.0165
Temperatura de producción del biocarbón	1	1	0.00133953	0.6624	0.4253

### 5.3. Otros resultados

#### 5.3.1. Bioensayos preliminares de germinación

Se realizó la prueba de bioensayos de germinación con el fin de determinar la toxicidad del biocarbón-compost, para ello la prueba se realizó del lunes 28 de marzo del 2022 al jueves 07 de abril del 2022 La zona de pruebas de germinación se desarrolló a una temperatura promedio de 25°. En el desarrollo de la prueba se utilizaron las dosificaciones que se muestran en la Tabla 17, bajo la mezcla de biocarbón, compost y arena a diferentes proporciones, donde 10 semillas fueron sembradas (Figura 29) y además una muestra control (arena al 100%) y 10 semillas de *Lactuca sativa L.* una vez culminada la prueba, se procedió a retirar las plántulas para posteriormente a realizar las mediciones respectivas (Elongación de la radícula e hipocótilo). Además, se precisa que el biocarbón, compost y arena fueron tamizados previamente la aplicación, en un tamiz N° 20, según ASTM, para luego ser pesados en una balanza analítica (Figura 30). Las pruebas de germinación se colocaron en un ambiente oscuro en donde la luz no pueda alcanzar e interferir el proceso, las pruebas de germinación se clasificaron conforme a los bloques de producción de biocarbón, 2 bloques, el primero es a 300°C de temperatura de producción y el segundo es a 500°C, como se visualiza en la Figura 31.

Se agregó 25ml de agua destilada al inicio de las pruebas de germinación, se monitoreó que estuviera húmeda por lo que cada día se agregaba una dosis de 5ml de agua destilada a cada recipiente. Posteriormente a los 10 días de germinación, se visualiza en la Figura 32 el desarrollo de los brotes de las plántulas la *Lactuca sativa L.* Una vez culminada las pruebas de fitotoxicidad, cada plántula se procedió a lavar con agua destilada, para seguidamente calcular las mediciones a partir de estas, con el uso de un vernier digital insize modelo 1108-150 y se procedió a realizar las anotaciones de elongación radicular, elongación del hipocótilo, semillas germinadas, etc. Los datos se encuentran en Anexo 05.

## Figura 29

*Pruebas de biocarbón con compost y arena en Lactuca sativa L.*



Nota. a) y b) Siembra de semillas a las dosificaciones respectivas en la Universidad Nacional del Callao, c) Aplicación de 25 ml de agua destilada a cada tratamiento, d) agua destilada y semillas de *Lactuca sativa* L. en cada recipiente

## Figura 30

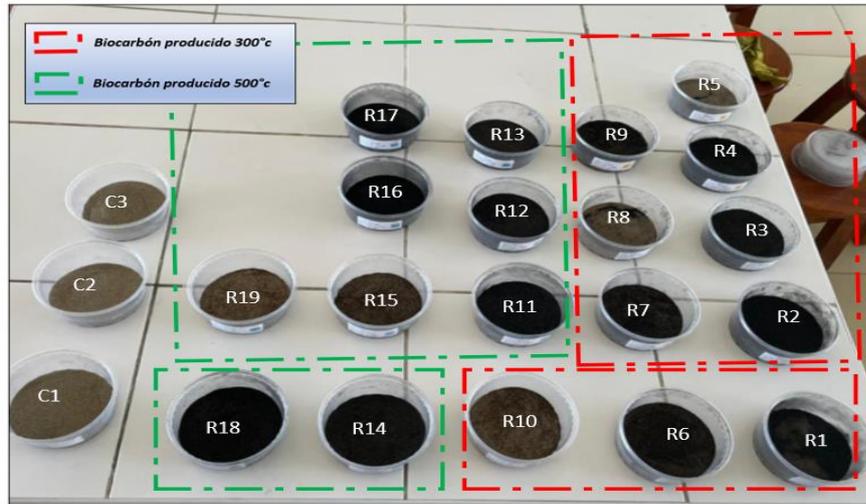
*Peso del biocarbón, arena y tamizado*



Nota. a) peso de arena, b) peso de compost, c) peso de biocarbón, d) tamizado de biocarbón malla # 20.

**Figura 31**

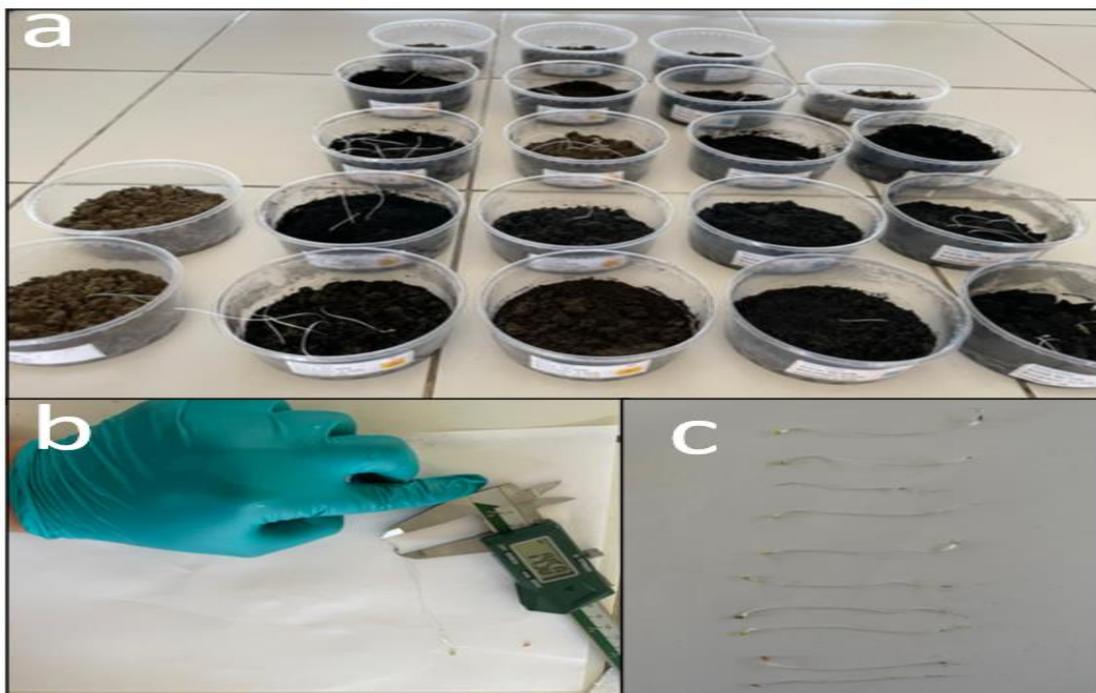
*Pruebas de germinación de Lactuca sativa L.*



Nota. Zona delimitada roja: producción de biocarbón de pino a 300°C. Zona delimitada de color verde, producción de biocarbón de pino a 500°C, C1, C2, C3: Controles.

**Figura 32**

*Bioensayos de germinación, desarrollo de semilla Lactuca sativa L.*



Nota. a) resultados de la germinación de la semilla de *Lactuca sativa L.* b) cálculo de la elongación y radícula, c) medición y comparación.

### 5.3.2. Dosificación estadística de los bioensayos de germinación

El modelo estadístico que se presenta a continuación fue un tipo de estudio mixto, tipo de diseño: I- optimal, modelo de diseño cubico especial, con 19 corridas (runs), y dos bloques (300°C y 500°C). De acuerdo con la Tabla 49 se ilustra que el modelo especial cúbico es significativo, con un valor de 0.0021 ( $p < 0.05$ ), así también para este caso B(Biocarbón), C (Arena), AB (Compost y Biocarbón), BC (Biocarbón y Arena), ABC (Compost, Biocarbón y Arena) son términos significativos del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que los términos del modelo no son significativos; sin embargo, se encontró también que AC (Biocarbón y Arena) no fueron significativos 0.252 ( $p > 0.05$ ). El valor F del modelo de 7,59 implica que el modelo es significativo. Solo hay una probabilidad del 0,21 % de que se produzca un valor F tan grande debido al ruido. El valor F de falta de ajuste de 1,08 implica que la falta de ajuste no es significativa en relación con el error puro. Hay un 47,80 % de posibilidades de que se produzca un valor F de falta de ajuste tan grande debido al ruido. La falta de ajuste no significativa es buena: queremos que el modelo se ajuste.

**Tabla 49.**

*ANOVA para el modelo cúbico especial*

Source	Suma de cuadrados	df	Mean Square	F-value	p-valor	
Bloque	3708.64	1	3708.64			
Modelo	1.37E+05	6	22819.63	7.59	0.0021	Significativo
<sup>(1)</sup> Mixto						
Lineal	95160.99	2	47580.5	15.83	0.0006	
AB	26319.39	1	26319.39	8.76	0.013	
AC	4393.62	1	4393.62	1.46	0.252	
BC	39153.87	1	39153.87	13.03	0.0041	
ABC	15802.85	1	15802.85	5.26	0.0426	
Residual	33065.57	11	3005.96			
Lack of Fit	18633.36	6	3105.56	1.08	0.478	No significativo
Error Puro	14432.2	5	2886.44			
Cor Total	1.74E+05	18				

Por otro lado, se ilustra en la Tabla 50, la tabla de coeficientes en términos de factores codificados, La estimación del coeficiente representa el cambio esperado en la respuesta por unidad de cambio en el valor del factor cuando todos los factores restantes se mantienen constantes. La intersección en un diseño ortogonal es la respuesta promedio general de todas las ejecuciones. Los coeficientes son ajustes en torno a ese promedio en función de la configuración de los factores. Cuando los factores son ortogonales, los VIF son 1; Los VIF superiores a 1 indican multicolinealidad, cuanto mayor sea el VIF, más severa será la correlación de factores. Como regla general, los VIF inferiores a 10 son tolerables.

**Tabla 50.**

*Coeficientes en términos de factores codificados*

Componente	Coeficiente estimado	df	Error estándar	95% CI Low	95% CI High	VIF
300°C	-20.12	1				
500°C	20.12					
A-Compost	145.81	1	254.96	-415.35	706.97	50.75
B-Biocarbon	2209.97	1	536.7	1028.7	3391.23	127.52
C-Arena	303.02	1	53.38	185.53	420.51	5.64
AB	-4243.71	1	1434.17	-7400.29	-1087.13	112.8
AC	-681.81	1	563.95	-1923.06	559.44	31.58
BC	-3478.71	1	963.88	-5600.2	-1357.23	72.56
ABC	5037.44	1	2197.02	201.83	9873.04	14.03

Nota: VIF: Factor de inflación de la varianza

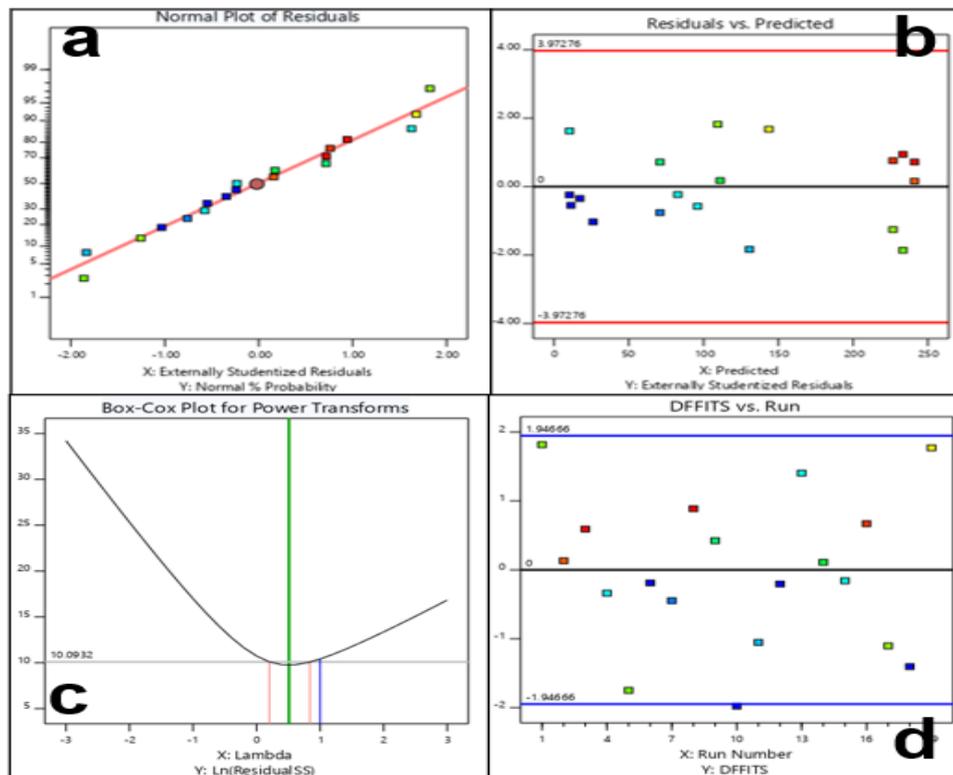
Por otro lado, estos factores brindan una ecuación de predicción, donde la ecuación en términos de factores codificados se puede usar para hacer predicciones sobre la respuesta para niveles dados de cada factor, ya que el diseño de mezcla i optimal es utilizado para minimizar la varianza máxima de predicción (Sinha et al. 2014) Se presenta en la Figura 33, análisis complementarios que muestran la normalidad de los residuos (a), residuales vs predichos (b), gráfico de Box-Cox para transformadas(c), la distancia de Cook´s (d).

Para el caso de los gráficos normales de residuales (a), este gráfico indica si los residuos siguen una distribución normal, en caso sigan la línea recta. La gráfica de residuales vs predichos es una gráfica de los residuales versus los

valores de respuesta pronosticados ascendentes. Pone a prueba el supuesto de varianza constante. La gráfica de Box-Cox proporciona una guía para seleccionar la transformación de ley de potencia correcta. Se enumera una transformación recomendada, basada en el mejor valor lambda, que se encuentra en el punto mínimo de la curva generada por el logaritmo natural de la suma de cuadrados de los residuos. Si el intervalo de confianza del 95 % en torno a esta lambda incluye 1, el software no recomienda una transformación específica. Finalmente, los valores de la distancia de Cook's deben encontrarse por debajo de la línea roja.

**Figura 33**

*Análisis complementarios del diseño i-optimal*

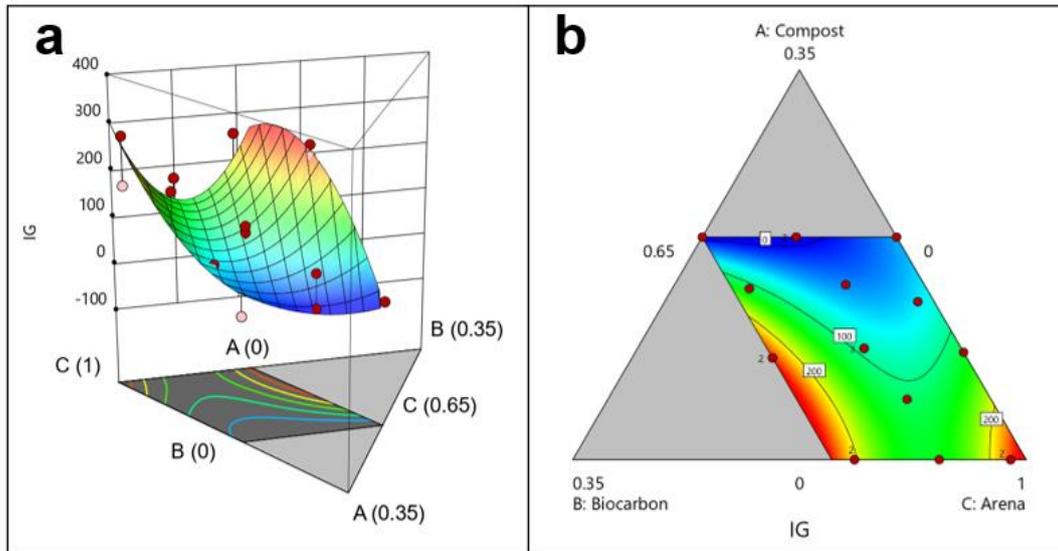


Nota. (a) normalidad de los residuos, (b) residuales vs predichos, (c) gráfico de Box-Cox para transformadas, (d) la distancia de Cook's. Realizado con el software Design Expert 11

En la figura 34, se ilustra la superficie 3D del modelo presentado (a) y las regiones las cuales otorgan un Índice de germinación de Zucconi mayor a 80, con un rango que va desde 0 (color azul) hasta un valor de 287 (color rojo).

**Figura 34**

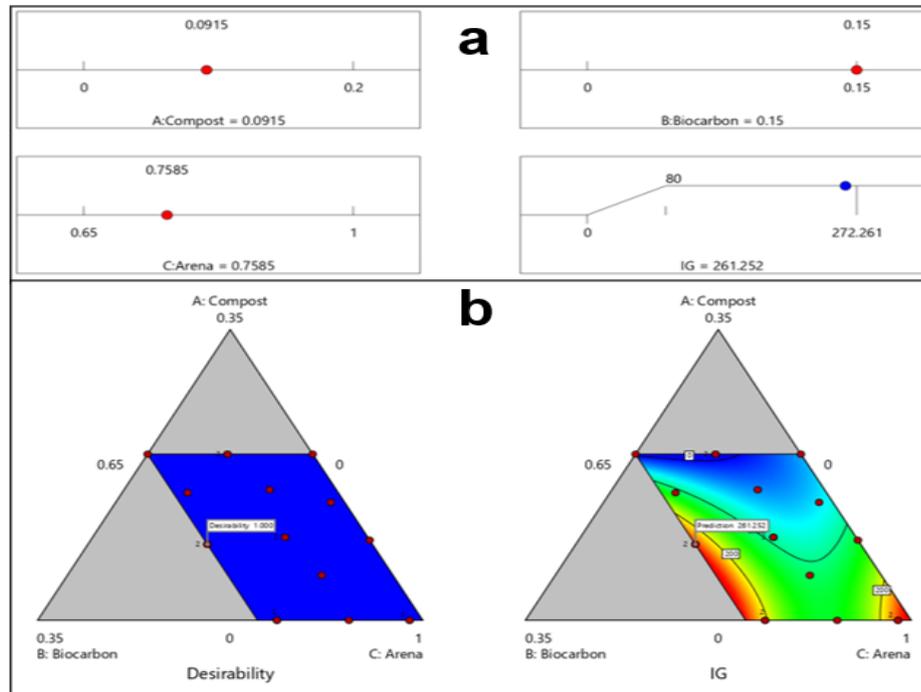
*Diseños complementarios en superficie 3D*



Nota. Realizado con el software Design Expert 11. a) vista tridimensional del modelo. b) vista superior del modelo.

**Figura 35**

*Diseños complementarios en superficie 3D*



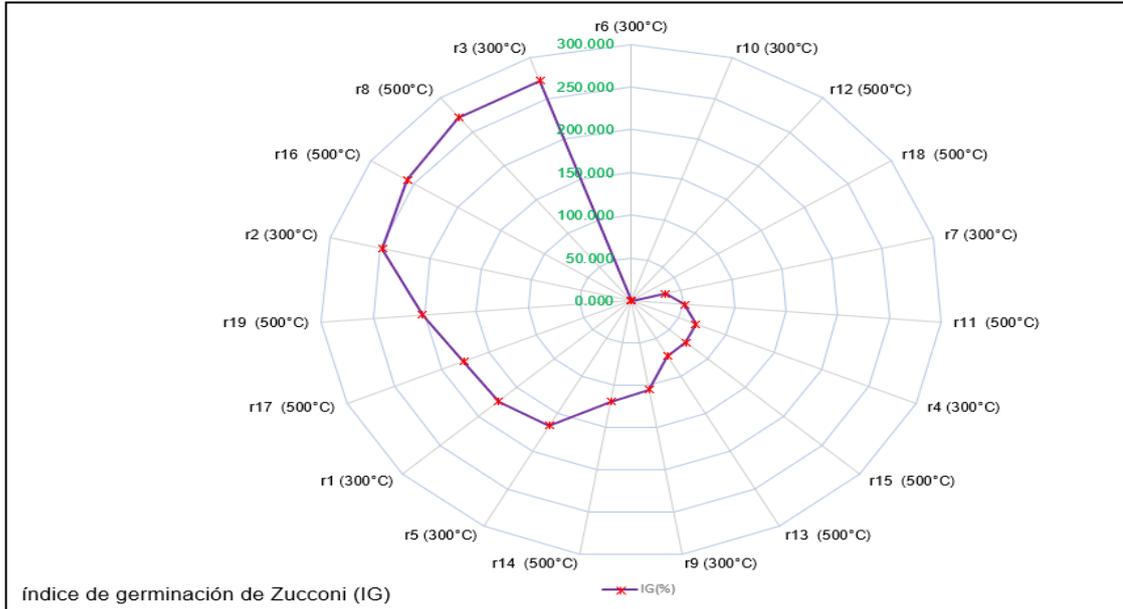
Nota. Realizado con el software Design Expert 11. a) Valores de predicción, b) Zona predicha en esquema.

### **5.3.2.1. Procesamiento de los datos de bioensayos de germinación**

Los valores a detalle, es decir los cálculos de la Germinación Relativa de la Semilla (GRS), Crecimiento Relativo de la Radícula (CRR), Índice de Germinación Normalizada (IGN) y el índice de Elongación radicular (IER), Índice de Germinación de Zucconi (IG) se encuentran en el anexo 05, Con el fin de determinar si el biocarbón y compost presentan fitotoxicidad se procedió a realizar las pruebas de germinación, se presenta en la Tabla 51, los valores para el número de tratamiento, en este caso etiquetado bajo el código “r” de r1 a r19. la segunda columna es la temperatura de producción de biocarbón del pino, la tercera, cuarta y quinta columna corresponde al porcentaje de aplicación en un total de 140g para cada recipiente, la sexta columna corresponde a la relación de biocarbón y compost, la séptima, octava y novena corresponden al Índice de Germinación de Zucconi (IG), Índice de Germinación Normalizada (IGN) e índice de Elongación radicular (IER), respectivamente. En dicha tabla, el color rojo representa un valor negativo y por debajo del valor 80, mientras que el verde significa por encima de 80. Se ilustra el índice de germinación de Zucconi (Figura 36), se resalta que en r3, r8, r16, r2, r19, r17, r1, r5, r14, r9 los índices de germinación corresponden a un mayor de 80%. En la Figura 37 se ilustra el comportamiento del índice de germinación normal (IGN) y el índice de germinación radicular (IER), donde los valores r6, r10, r12, r18, r7, r11, r15, r4, r13, r9 poseen un valor negativo en cuanto al IGN y para el IER, r6, r10, r12, r18 muestran valores negativos. El color de la Tabla 51 va de color rojo (para valores menores) y verde para colores con IG altos.

**Figura 36**

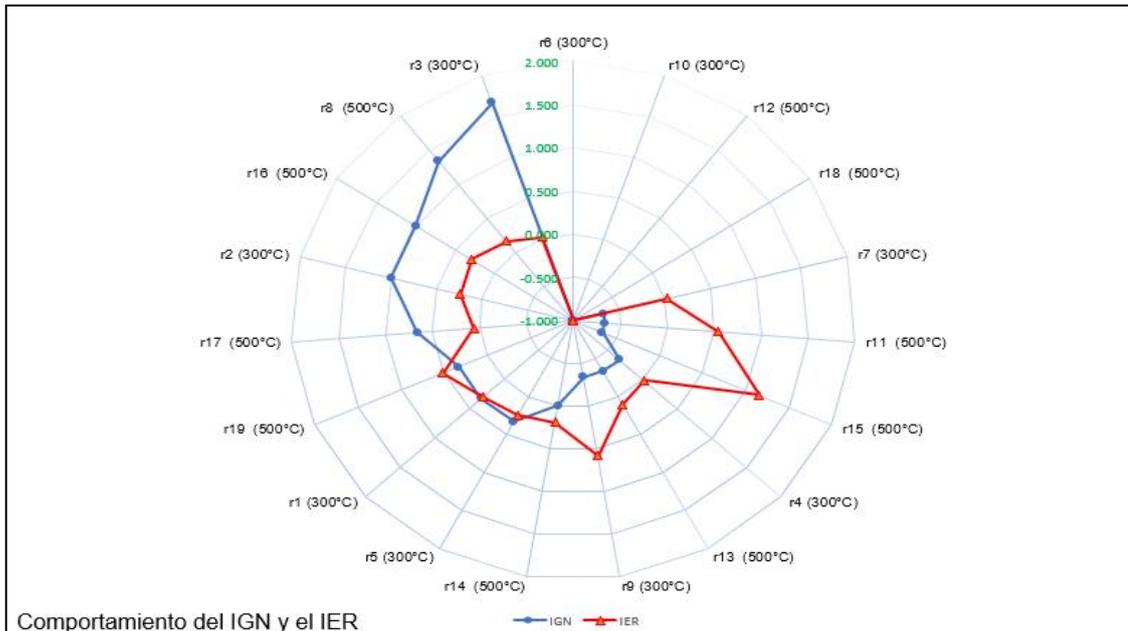
*Comportamiento del Índice de germinación de Zucchini (IG) para diferentes corridas*



Nota. Índice de Zucchini de rango de 0 a 300.

**Figura 37**

*Comportamiento del Índice de germinación normal (IGN) y el Índice de germinación Radicular (IER) para diferentes "r"*



Nota. Índice de germinación normal (IGN) e Índice de germinación Radicular (IER) de -1 a 2.

**Tabla 51.**

*Resultados de bioensayos de germinación*

T	TBC (°C)	BC (%)	CP (%)	Arena (%)	BC: CP	IG (%)	IGN	IER
r6 (300°C)	300	6.06%	15.72%	78.22%	1/2.59	0.000	-1.000	-1.000
r10 (300°C)	300	0.00%	20.00%	80.00%	N.A	0.000	-1.000	-1.000
r12 (500°C)	500	7.74%	20.00%	72.26%	1/2.58	0.000	-1.000	-1.000
r18 (500°C)	500	15.00%	20.00%	65.00%	1/1.33	0.000	-1.000	-1.000
r7 (300°C)	300	7.50%	10.00%	82.50%	1/1.33	34.290	-0.667	0.029
r11 (500°C)	500	6.47%	5.43%	88.10%	1/0.84	51.603	-0.667	0.548
r15 (500°C)	500	1.25%	14.19%	84.55%	1/11.352	71.871	-0.667	1.156
r4 (300°C)	300	13.69%	15.36%	70.95%	1/1.21	68.051	-0.333	0.021
r13 (500°C)	500	7.74%	20.00%	72.26%	1/2.58	73.404	-0.333	0.101
r9 (300°C)	300	7.50%	10.00%	82.50%	1/1.33	105.520	-0.333	0.583
r14 (500°C)	500	7.50%	10.00%	82.50%	1/1.33	119.654	0.000	0.197
r5 (300°C)	300	1.19%	0.00%	98.81%	N.A	166.156	0.333	0.246
r1 (300°C)	300	6.70%	0.00%	93.30%	N.A	173.794	0.333	0.303
r19 (500°C)	500	0.00%	9.65%	90.35%	N.A	202.286	0.333	0.517
r17 (500°C)	500	13.25%	0.00%	86.75%	N.A	176.303	0.667	0.058
r2 (300°C)	300	15.00%	9.15%	75.85%	<b>1/0.61</b>	248.202	1.000	0.241
r16 (500°C)	500	13.25%	0.00%	86.75%	N.A	258.628	1.000	0.293
r8 (500°C)	300	1.19%	0.00%	98.81%	N.A	271.257	1.333	0.163
r3 (300°C)	300	15.00%	9.15%	75.85%	<b>1/0.61</b>	272.261	1.667	0.021

Nota: T: tratamiento TBC: Temperatura de producción de biocarbón, BC: biocarbón, CP: Compost, BC:CP, relación de biocarbón y compost, IG: índice de germinación de Zucconi, IGN: Índice de germinación normalizado, IER: Índice de germinación radicular. N.A: No aplica relación. Escala de colores: Rojo- amarillo (Indica valores negativos o para el caso de índice de germinación de Zucconi < 80%).

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

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

#### 6.1.1. Contrastación de la hipótesis general

La hipótesis general corresponde a “La aplicación del biocarbón-compost influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros

En ese sentido, se tienen los siguientes postulados

*H<sub>0</sub>: La aplicación del biocarbón – compost no influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros*

*H<sub>1</sub>: La aplicación del biocarbón – compost influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros*

Debido a los resultados obtenidos en la tabla 46, 47 y 48 de las tres hipótesis específicas, una hipótesis se rechazó (hipótesis específica 1), mientras que la otra hipótesis específica fue aceptada (hipótesis específica 2). Por lo que, de acuerdo, al método hipotético-deductivo planteado, de acuerdo al razonamiento deductivo, la hipótesis general pudo ser validada, es decir, se acepta la hipótesis alternativa (H<sub>1</sub>) y se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>), es decir **“la aplicación del biocarbón-compost influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros”**.

## 6.1.2. Contrastación de hipótesis específicas

### 5.3.2.2. Hipótesis específica 1

La hipótesis específica 1 corresponde a “La temperatura de pirólisis del biocarbón influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros”.

En ese sentido, se tienen los siguientes postulados

*H<sub>0</sub>: La temperatura de pirolisis del biocarbón no influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminado con relaves mineros*

*H<sub>1</sub>: La temperatura de pirolisis del biocarbón influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminado con relaves mineros*

En la Tabla 46 se puede observar que el factor temperatura de producción del biocarbón presentó un p-valor mayor a 0.05 (0.2713), por lo que se rechaza la Hipótesis alterna, y se acepta la hipótesis nula. Se concluye que, el efecto de este factor es igual a cero, es decir, que la variación del FBA no depende de la temperatura de producción del biocarbón.

En la Tabla 47 se puede observar que el factor temperatura de producción del biocarbón presentó un p-valor menor a 0.05 (0.0033), por lo que se puede aceptar la hipótesis alterna, y se rechaza la hipótesis nula. Se concluye que, el efecto de este factor no es igual a cero, es decir que la variación del FBR, depende de la temperatura de producción del biocarbón.

En la Tabla 48 se puede observar que el factor temperatura de producción del biocarbón presentó un p-valor mayor a 0.05 (0.4253), por lo que, se rechaza la hipótesis alterna, y se acepta la hipótesis nula. Se concluye que, el efecto de este factor es igual a cero, es decir que la variación del FT no depende de la temperatura de producción del biocarbón.

Por lo que, de acuerdo a lo mencionado en párrafos anteriores, se rechaza la hipótesis alterna (H<sub>1</sub>) y se acepta la hipótesis nula (H<sub>0</sub>), “**La temperatura de**

***la pirolisis no influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros”.***

### **5.3.2.3. Hipótesis específica 2**

La hipótesis específica 2 corresponde a: “La aplicación de la dosificación biocarbón-compost influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros”.

En ese sentido, se tienen los siguientes postulados:

*H<sub>0</sub>: La dosificación biocarbón – compost no influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros*

*H<sub>1</sub>: La dosificación biocarbón – compost influye significativamente en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros*

En la Tabla 46 se puede observar que el factor dosificación biocarbón-compost presento un p-valor menor a 0.05 (0.0225), por lo que se acepta la hipótesis alterna, y se rechaza la hipótesis nula. Se concluye que, el efecto de este factor no es igual a cero, es decir, que la variación del FBA depende de la dosificación del biocarbón-compost.

En la Tabla 47 se puede observar que, el factor dosificación del biocarbón-compost presentó un p-valor menor a 0.05 (0.0006), por lo que, se puede aceptar la hipótesis alterna, y se rechaza la hipótesis nula. Se concluye que, el efecto de este factor no es igual a cero, es decir que la variación del FBR depende de la dosificación del biocarbón-compost.

En la Tabla 48 se puede observar que el factor dosificación del biocarbón-compost presentó un p-valor menor a 0.05 (0.0165), por lo que, se puede aceptar la hipótesis alterna, y se rechaza la hipótesis nula. Se concluye que, el efecto de este factor no es igual a cero, es decir que la variación del FT depende de la dosificación del biocarbón-compost.

Por lo que, de acuerdo a lo mencionado en párrafos anteriores, se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) y se acepta la hipótesis alternativa (H<sub>1</sub>), ***“La dosificación biocarbón-compost influye significativamente en la fitorremediación de***

***arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros”.***

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

### **6.2.1. Relaves mineros, producción del biocarbón y evaluación de las características fisicoquímicas.**

Los relaves mineros de la zona de Quiulacocha cubren un aproximado de 114 ha, y que comprenden 79 Mt de relaves, que contienen ~ 50 % en peso de pirita (Wade, Dold y Fontboté 2006), los elementos que predominan con una alta concentración son As (1020 ppm), Pb (3996 ppm), además de otros metales que no son objetivo del presente estudio, como Zn (9123.9 ppm), Mn (2432 ppm), Cu (286.9). Las lluvias granizadas extremas han colocado en riesgo de colapso la relavera Quiulacocha, a pesar de los esfuerzos de la empresa estatal AMSAC, que habría aumentado la capacidad en su control de aguas ácidas (ANDINA 2022b). Las altas concentraciones del material sólido del relave o el drenaje ácido impactarían de manera significativa en el ecosistema, por lo que la empresa AMSAC exigió al COER y al INDECI-PASCO se tomen medidas urgentes (El Peruano 2022).

Los residuos de la biomasa lignocelulósica de la agricultura, de los bosques forestales y de los productos forestales no son usados lo suficiente, a pesar de que la biomasa es la cuarta fuente de energía más grande del planeta (Küçük y Demirbaş 1997) , y proporciona alrededor del 14% de las necesidades de energía primaria (Şensöz 2003). La madera y otras formas de biomasa son fuentes de energía renovable que pueden proporcionar combustibles líquidos, gaseosos y sólidos renovables a través de varias rutas de conversión, como la de la pirólisis lenta cuyo rendimiento es variable y depende de factores de producción, mientras que, a un mayor tiempo de residencia y temperatura de producción, la eficiencia será menor. Virú Vásquez et al. (2020) quien produjo biocarbón a partir de ramas de pino en un horno de doble tambor a 2 horas con una temperatura promedio de 320°C obtuvo un 50%; mientras que (Chemerys y Baltrėnaitė 2017) obtuvo un rendimiento de 21.60% a una temperatura de 700°C y un tiempo de residencia de 45 minutos, de ahí que la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia son parámetros muy importantes referente a la

eficiencia del biocarbón (Titiladunayo, McDonald y Fapetu 2012). Para la presente investigación la producción del biocarbón se llevó a cabo de dos temperaturas a 300°C y 500°C, con una eficiencia promedio de 49.73 y 33.50 respectivamente (Ver Anexo 05), previa a la producción de biocarbón, se realizó un secado a temperatura de 105°C por 24 horas (Chen et al. 2020) , ya que el proceso de pirolisis y el tiempo de residencia se pueden prolongar sin que esto se realice como etapa inicial, y además conllevaría a elevar gastos energéticos, esto se debe a que la madera puede contener agua en la estructura de la celulosa/lignina (Biochar International 2020).

Aunque, los parámetros fisicoquímicos tienden a variar notablemente de acuerdo a la composición de la materia prima y el tipo de residuo, el incremento o disminución de ciertos parámetros tiende a predecirse mediante el factor temperatura de producción, tal es el caso de la investigación de Nkoh et al. (2022) que realizó un meta-análisis con una cantidad de documentos >100, y determino que cuando la temperatura de producción se incrementa, parámetros como el pH, contenido de ceniza (%) y área superficial ( $m^2/g$ ) tienden a aumentar, mientras que b es un indicador de del grado de aromatización, BP300 mostró un mayor valor, mientras que para el O/C que indica un grado de carbonización BP300 mostro también un mayor valor.

En cuanto a los metales pesados, de manera general la muestra de biocarbón de 500°C obtuvo concentraciones de metales mucho mayor que la de 300°C, es decir la temperatura es un factor determinante en la pirolisis en cuanto a los metales pesados, pero el incremento de metales pesados no determina que remueva menor cantidad de metales pesados. Por ejemplo X. Zhang et al. (2022) obtuvo dos tipos de biocarbón a partir de lodos residuales y aunque la pirolisis fue un factor determinante para el incremento de metales pesados, no lo fue en términos de riesgo ambiental para el estudio.

Por otro lado, los resultados muestran que la caracterización de los metales pesados en los biocarbonos de pino producidos a 300 °C y 500 °C cumplen con las normativas internacionales (Meyer et al. 2017), a excepción del arsénico presente en la muestra de 500 °C con un valor de 23.66 mg/kg mientras

que la EBC menciona un valor límite de 13 mg/ kg. En cuanto a la concentración de metales pesados en una determinada muestra de pino, es determinante la zona a la cual se encuentra expuesta, y de echo su caracterización puede servir como bio-indicador de la calidad ambiental de una determinada zona de estudio (Tomczyk, Sokołowska y Boguta 2020). Fow esteves (2021), en su investigación titulada, “Evaluación de la capacidad fitorremediadora de tres especies vegetales altoandinas asistidas con biochar en suelos contaminados por drenaje ácido de roca en la microcuenca Quillcayhuanca, Ancash”, obtuvo biocarbón a partir de pino procedente de residuos forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, y los metales pesados que se encontraron en mayor cantidad fueron Hierro (1630 mg/ kg), Aluminio (764 mg/kg) y Cobre (356 mg/kg). Mientras que, los valores de metales pesados de la muestra de biocarbón del presente estudio fueron para el biocarbón de 300 °C, Fe (0.001 mg/ kg), Cu (0.0002 mg/kg), Pb (0.002 mg/ kg), Mn (32,1 mg/ kg), As (12.66 mg/kg), y para el biocarbón de 500°C, Fe (2487.98 mg/ kg). Cu (0. 89 mg/ kg), Pb (0.002 mg/kg), Mn (160.39 mg/kg), As (23.66 mg/kg). De lo mencionado anteriormente, las bajas concentraciones (a excepción del Fe) podrían deberse a la materia prima procedente de una zona no industrial y libre de tráfico (Węgiel, Bielinis y Polowy 2018), ya que la biomasa forestal para la presente investigación fue de Cutervo, Cajamarca, zona donde no existe tráfico vehicular en demasía y/o zonas industrializadas, ya que la principal actividad es la ganadera.

### **6.2.2. Aplicación del Biocarbón-Compost en la Fitorremediación del As y Pb usando Zea mays**

Se observó para la presente investigación que las características fisicoquímicas del suelo se modificaron tras la aplicación y la no aplicación de las enmiendas biocarbón-compost. En cuanto al parámetro pH, los tratamientos con dosis de biocarbón-compost mostraron tener un efecto en el suelo de un pH mucho mayor, tal como en el estudio de Novak et al. (2019), en su investigación titulada “Las mezclas de compost-biocarbón facilitan el crecimiento de pasto varilla en suelos de minas al reducir la biodisponibilidad de Cd y Zn”, tuvo como objetivo evaluar la capacidad del biocarbón producidos a partir de tres

materias primas diferentes junto con una mezcla de compost para mejorar las condiciones de crecimiento de la hierba varilla en un suelo impactado por una mina, en dicha investigación los tratamientos con biocarbón-compost aumentaron el pH frente al control, el biocarbón producido a 500°C tuvo un efecto mayor en el incremento del pH en el suelo frente a aquel biocarbón de 300°C, estudios similares, mencionan que el biocarbón-compost favorece el incremento del pH frente al control, como el de (Liu, Ling et al. 2018) y el de (Nie et al. 2018).

Para el caso de la C.E. se observó que para el relave de 30%, la conductividad eléctrica incremento tras la aplicación de las enmiendas, de manera concordante con el estudio de Zafar-ul-Hye et al. (2020) en su trabajo de investigación titulado “Papel potencial del biocarbón mezclado en compost con rizobacterias en la mitigación de la toxicidad del plomo en la espinaca, ya que la conductividad se ve influenciada por la aplicación del biocarbón-compost, la conductividad eléctrica en el suelo se refiere a la capacidad del suelo para transmitir la corriente eléctrica. Esta capacidad está relacionada con la presencia de iones en el suelo, que son portadores de carga eléctrica. Un suelo con una alta concentración de iones tendrá una mayor conductividad eléctrica que un suelo con una baja concentración de iones, por lo cual la aplicación de biocarbón-compost incrementó a una determinada dosis de relave minero. Sin embargo, lo contrario sucedió con el relave de 60% en el suelo, ya que su valor disminuyó tras la aplicación del biocarbón-compost, si bien la temperatura de producción del biocarbón puede afectar su capacidad para mejorar la conductividad eléctrica del suelo de diferentes maneras, la relación entre estas dos variables aún no está completamente entendida y puede depender de otros factores.

Para el caso de la C.I.C. se observó que la concentración de C.I.C. fue mayor en el control CR30, mientras que, para el caso de la temperatura de producción del biocarbón de 300°C fue mayor respecto a la de 500°C, la capacidad de intercambio catiónico (C.I.CI.) es una medida de la capacidad del suelo para retener y suministrar cationes como calcio, magnesio, potasio y sodio para las plantas. Una mayor cantidad de CIC indica que, el suelo puede retener una mayor cantidad de cationes, lo que puede mejorar la disponibilidad de

nutrientes para las plantas y disminuir la lixiviación de nutrientes hacia las capas más profundas del suelo, tal como en el estudio de Coelho et al. (2018) titulado “La combinación de compost o biocarbón con urea y NBPT puede mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno en el maíz”. Esto es especialmente importante en suelos arenosos o pobres en materia orgánica, donde la capacidad de retener nutrientes es baja. Por lo tanto, una mayor CIC del suelo generalmente se considera beneficiosa para el crecimiento de las plantas, tal como se muestra para T300CP-30, al igual que T300CP-60 frente a T500CP-60. Por otro lado, una menor CIC indica que el suelo retiene menos cationes y, por lo tanto, tiene una capacidad limitada para suministrar nutrientes a las plantas. Esto puede ser problemático para la productividad agrícola, ya que puede requerir una mayor aplicación de fertilizantes y otros nutrientes para mantener el crecimiento saludable de las plantas.

Para el caso de la O.M. se observó un incremento de este parámetro, pero para la producción del biocarbón de 300°C (T300CP-30 y T300CP-60), en el caso de 500°C hubo disminución tras su aplicación en la materia orgánica del suelo después de la fitorremediación. La materia orgánica es esencial para la salud y la fertilidad del suelo. Una mayor cantidad de materia orgánica en el suelo puede tener efectos beneficiosos diferentes como mejora de la estructura del suelo: La materia orgánica actúa como un aglutinante natural para las partículas del suelo, lo que puede mejorar la estructura del suelo y aumentar su porosidad. Esto permite que el suelo retenga más agua y nutrientes, lo que es esencial para el crecimiento de las plantas; aumento de la retención de agua: La materia orgánica puede retener más agua en el suelo, lo que puede ayudar a reducir la erosión del suelo y mejorar la resistencia del suelo a la sequía; mejora de la actividad biológica del suelo: La materia orgánica es un alimento para los microorganismos beneficiosos del suelo, como las bacterias, hongos y nematodos. Estos microorganismos descomponen la materia orgánica en nutrientes que las plantas pueden absorber; aportación de nutrientes: La materia orgánica puede aportar nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes son esenciales para el crecimiento de las plantas y pueden ser liberados lentamente por los microorganismos del suelo.

Se observó que el contenido de As (mg/kg) en el suelo para la concentración de 60% de relave y 30% de relave fue mayor para los tratamientos que tuvieron la aplicación de biocarbón producido a temperatura de 300°C. Esto puede deberse ya que, a mayor temperatura, ciertos parámetros se ven influenciados, como el número de grupos funcionales que contienen oxígeno, ya que disminuyen otros parámetros como el volumen de poros y el área superficial, según lo menciona Liao et al. (2022), en su investigación titulada “Efecto de diferentes especies de biomasa y temperaturas de pirólisis en la adsorción de metales pesados, estabilidad y economía de biocarbón”. Los grupos funcionales en el biocarbón a diferentes temperaturas son clave en la determinación de la adsorción o desorción de metales, una de estas características puede ser la superficie negativa del biocarbón, y estas son cargas superficiales asociadas con los grupos funcionales que contienen oxígeno (por ejemplo, R-COO-, R-O-) (Nkoh et al. 2022). Además, -OH, -COOH (Tan et al. 2017). Por otro lado, tal como lo indica Saqib Rashid et al. (2022), en su estudio de investigación titulado “Eficacia del biocarbón de cáscara de arroz y enmiendas de compost en la translocación, biodisponibilidad y especiación de metales pesados en suelos contaminados: papel de la producción de radicales libres en el maíz (*Zea mays*)”, el compost puede influenciar o brindar ciertos nutrientes al biocarbón, lo que ayudará en la formación de complejos.

Se observó que, el contenido de Pb (mg/kg) en el suelo para la concentración de 60% de relave y 30% de relave fue mayor para los tratamientos que tuvieron la aplicación de biocarbón producido a temperatura de 300°C. Al igual que, como lo detallado en el As, la formación de estructuras negativas, cationes influyen en la formación de complejos, haciendo que estos complejos precipiten y se inmovilicen, evitando la desorción de estos metales hacia la planta *Zea mays*. Como se observa todos los tratamientos en los cuales se aplicaron las dosis de biocarbón-compost poseen un mayor contenido de metales pesados en el suelo a diferencia de los controles (CR30 y CR60). En el caso del Pb, se pueden formar precipitados a raíz de los grupos funcionales que pueden haber en su superficie, estos complejos formados pueden variar y pueden ser:  $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ,  $Ca_2Pb_8(PO_4)_6(OH)_2$  debido al P-inorgánico que es desorbido

de los biocarbons o enmiendas ricas en P (Liang et al. 2014). En el caso de la producción del biocarbón de 300°C (39.4 meq/ 100g) el contenido CIC fue mayor que el de 500°C (25 meq/100g), este alto contenido de CIC es transferido al suelo (Zhang et al. 2017). Investigaciones anteriores han demostrado que las disminuciones en la concentración, solubilidad y lixiviación de los metales pesados en los suelos después de aumentar las tasas de aplicación de biocarbón se deben en parte a la gran cantidad de sitios de intercambio de cationes en las superficies de biocarbón. Por ejemplo, (Jiang et al. 2012) mostró que la CIC del suelo aumentó después de 30 días después de la enmienda con biocarbón, lo que indujo un aumento significativo en la adsorción de Pb (II) en los suelos. Ma et al. (2010) también atribuyeron la mayor adsorción de Cu (II) y Pb (II) por los suelos a la adición de biocarbón al aumentar la CIC del suelo. Por otro lado, como lo menciona el antecedente del estudio realizado por Liao et al. (2022), en su trabajo de investigación titulado “Efecto de diferentes especies de biomasa y temperaturas de pirólisis en la adsorción de metales pesados, estabilidad y economía de biocarbón” a mejor forma de determinar el contenido de precipitados y compuestos después de la fitorremediación es mediante difracción de rayos X en polvo (XRD). En su investigación, Liao et al. (2022) determinó que, la capacidad de adsorción del biocarbón a partir de diferentes materiales, fue significativamente diferente, el biocarbón producido a partir del fruto del *Zea mays* alcanzó una capacidad de adsorción máxima para el Pb<sup>2+</sup> de 61.07 mg/g debido a la mejor estructura porosa, y a los grupos funcionales que otros. Aunque el biocarbón-compost mejoran la fitoestabilidad del Pb, es importante resaltar que al aplicar solo *Zea mays* en suelos contaminados, el *Zea mays* también tiene su propia capacidad fitorremediadora, tal como el estudio realizado por Grandez (2017), titulado “Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus*) y maíz (*Zea mays*) usando enmiendas”, cuyos resultados fueron favorables en la fitoestabilización del Plomo, así también en la investigación de Ríos (2018), cuyo título fue “Aplicación de biocarbón de *Mespilus germanica* L. y *Mangifera indica* L. en suelos contaminados para reducir plomo en la zona de la Huaca - Huaral, 2018”

Se observó que el contenido de As (mg/kg) en la parte aérea, tuvo un contenido mínimo para todos los tratamientos (0.07 mg/kg), a excepción de T300CP-30 (0.223 mg/kg). En el caso del Pb (mg/kg) en la parte aérea, para el relave de 60%, el tratamiento que tuvo una mayor concentración de Pb fue, T500CP-60 (0.427 mg/kg). En comparación con el estudio de Munive et al. (2018), titulado “Fitorremediación con maíz (*Zea mays*) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados”, los resultados de la presente tesis presentaron concentración menor en las hojas, mientras que sus resultados mostraron valores en los rangos de 10,95 mg/kg – 26.23 mg/kg, en los tratamientos que fueron aplicados enmiendas orgánicas (compost, vermicompost), aunque su estudio fue para 120 días, en el caso de la presente investigación fue 60 días. En el caso de la concentración de relave al 30%, el tratamiento que tuvo una mayor concentración de Pb fue, T300CP-30 (0.42 mg/kg). Respecto a los controles, para ambos casos de relave (30%, 60%) el contenido de concentración de Pb en la parte aérea fue mayor debido a la aplicación del biocarbón-compost, dado que la estructura porosa del biocarbón, alto contenido de CIC y grupos funcionales del biocarbón permiten atraer y estabilizar el agua, varios elementos y contaminantes en el suelo (Yu et al. 2019). Mientras que el compost, por su contenido de materia orgánica, permite también mejorar la calidad del suelo, degradar contaminantes orgánicos y estimular actividad microbiana e introduciendo más microorganismos (Ducey et al. 2021), es así que la adición biocarbón-compost permite el desarrollo de la comunidad microbiana influyendo en los niveles de concentración de metales pesados, como en el estudio de M. Li et al. (2021), quien aplicó biocarbón-compost en suelos contaminados de China, determinando correlaciones no solo para la influencia de metales pesados y comunidades bacterianas, si no también parámetros enzimáticos.

Se observó que el contenido de As (mg/kg) en la raíz para la concentración de 30% de relave fue menor en los tratamientos que tuvieron aplicación de biocarbón-compost al igual que en cuyos tratamientos tuvieron una dosificación de relave del 60%. Se observó que el contenido promedio de Pb en la raíz, en el tratamiento de T500CP-30 (2.49 mg/kg) fue menor respecto al

control CR30 (8.29 mg/kg), mientras que para 60%, el contenido promedio de Pb en la raíz para T300CP-60 (7.95 mg/kg), también fue menor respecto al control CR60 (21.053 mg/kg), esto sugiere la posibilidad de que el biocarbón-compost no permite que los metales pesados se dirijan hacia la raíz y por ende se adhieran a estructuras del biocarbón, en el caso de la temperatura de 500°C, una explicación puede deberse a que, al incrementarse la temperatura, se incrementan los grupos funcionales (Sun et al. 2017); los que permiten que se generen complejos, que dependen de la proporción del biocarbón y el compost (Medyńska-Juraszek, Bednik y Chohura 2020) y motiven a que los metales precipiten y no se dirijan a la raíz-hojas. Sin embargo, esto no sucedió con la concentración del relave de 60% ya que el menor contenido de metal pesado, lo obtuvo aquella temperatura de 300°C, entonces, se podría inferir que los grupos funcionales no fueron la causa de esta absorción, sino más bien otros parámetros enzimáticos (Li et al., 2021), microbiológicos o incluso la presencia de metales pesados presentes en el relave minero de Quiulacocha, como el Ni (Korzeniowska y Stanislawska-Glubiak 2019).

Se observó en el desarrollo vegetativo de la planta de manera general que la aplicación del biocarbón-compost influye en la altura para todos los tratamientos en comparación con el control; sin embargo, para la temperatura de producción del biocarbón (300°C y 500°C) no existe un comportamiento definido de mayor o menor altura, al momento de analizar la dosificación del biocarbón-compost o el contenido de relaves. En comparación con los resultados de (Munive et al. 2018), su estudio solo determinó un momento para la altura, de hecho fue a los 120 días, en la presente investigación fue para los días 40, 50 y 60, por lo que se puede entender que para llegar a un determinado tiempo, el tamaño del maíz podría resultar homogéneo ya que durante su crecimiento este logra adaptarse a los metales pesados que se encuentran presente en el relave minero (T. Li et al., 2011). Por otro lado, algunos estudios como los de Jara-Peña et al. (2014) y Gama (2019), cuyo título de investigación es “La fitorremediación como alternativa en la recuperación de suelos afectados con desmontes de construcción – Cajabamba”, no analizaron el desarrollo vegetativo de la planta (altura).

En relación a los resultados FBA, FB, FT tanto como para el arsénico y el Pb, los resultados promedio, obtenidos a partir de mostraron valores muy bajos ( $<0.01$ ), lo cual indica que el *Zea mays* es una planta fitoestabilizadora y su clasificación tanto para la parte aérea como radicular corresponde a “exclusora”. Esto se debe a que de manera general el *Zea mays* no absorbió a sus raíces y/o tejidos aéreos grandes concentraciones de metales pesados (As y Pb), sino más bien logró estabilizarlas en el suelo. Para lo cual fueron utilizado los factores de bioconcentración y el factor de traslocación. En el caso del Factor de Traslocación, es importante ya que evalúa las actividades metabólicas y la salud de las plantas en crecimiento individual de un sitio contaminado (Chandra, Yadav y Yadav 2017). Para la presente investigación, para el FT (para el As) en la dosificación de 0.16 de biocarbón-compost/ kg de relave el orden fue el siguiente:  $FT_{T300CP-30} > FT_{T500CP-30} > FT_{CR30}$  ; para el caso de la dosificación 0.08 kg biocarbón-compost/ kg relave, el orden fue el siguiente  $FT_{T300cp-60} > FT_{CR60} > FT_{T500CP-60}$ . En general los FT mostraron valores menores a 0.099. En el caso del Pb, para la dosificación de 0.16 de biocarbón-compost/ kg de relave el orden en cuanto a su valor fue el siguiente:  $FT_{T500CP-30} > FT_{T300CP-30} > FT_{CR30}$ ; mientras que para la aplicación de 0.08 kg biocarbón-compost/ kg relave, el orden del factor de traslocación fue el siguiente:  $FT_{T300CP-60} > FT_{CR60} > FT_{T500CP-60}$ . Algunos estudios realizados tuvieron valores mucho mayores y similares referentes a FT (para el Pb) en el *Zea mays*, como en los siguientes estudios, 0.01 – 0.05 (Korentajer 1991), 0.07 (Máthé-Gáspar y Anton 2005), 0.12 (Wuana et al., 2010), 0.04-0.30 (Munive et al. 2018), mientras que, otros estudios evaluaron el FT, aplicando solo biocarbón, para lo que obtuvieron valores de: 0.04 (Liu et al., 2021), y con la aplicación de biocarbón-estiercol de pollo: 0.005 (Saqib Rashid et al. 2022), por lo que una posible teoría es que la aplicación de biocarbón-compost/estiercol lograría obtener valores de FT muy bajos. Dado que el FT es menor a 1, la planta *Zea mays* posee la denominación de planta fitoestabilizadora. La fitoestabilización evita que los metales del sitio contaminado se dirijan hacia la planta, evitando así su migración al ecosistema y reduciendo la probabilidad de que los metales entren a la cadena alimentaria (Wong, M. H. 2003). Es así que en un posible escenario de contaminación de

dichos relaves mineros en suelos agrícolas de Quiulacocha, la propuesta biocarbón-compost podría ser una alternativa eficiente y que permitiría que los metales pesados no migren hacia el cultivo, aunque esto dependería de las características de adaptabilidad del *Zea mays* en las condiciones del lugar (Medina-Hoyos et al. 2020).

Se observó que, para el caso del Factor de Bioconcentración Radicular (FBR) para el As, para el caso de la aplicación de 0.16 kg biocarbón-compost/ kg relave, el orden fue el siguiente  $FBR_{T500CP-30} > FBR_{T300CP-30} > FBR_{CR30}$ . Para la aplicación 0.08 kg biocarbón-compost/ kg relave, se observó el siguiente orden  $FBR_{CR60} > FBR_{T500CP-60} > FBR_{T300CP-60}$ . En el caso del FBR para el Pb, para el caso de la aplicación de 0.16 kg biocarbón-compost/ kg relave, el orden fue el siguiente  $FBR_{CR30} > FBR_{T500CP-30} > FBR_{T300CP-30}$ ; y para aplicación de 0.08 kg biocarbón-compost/ kg relave, se obtuvieron los siguientes valores:  $FBR_{CR60} > FBR_{T500CP-60} > FBR_{T300CP-60}$ . Por otro lado, para el Factor de Bioconcentración Aéreo (FBA), para el As, se obtuvieron los siguientes valores a 0.16 kg biocarbón-compost/ kg relave:  $FBA_{T300CP-30} > FBA_{CR30} > FBA_{T500CP-30}$ ; para 0.08 kg biocarbón-compost/ kg relave:  $FBA_{CR60} > FBA_{T500CP-60} > FBA_{T300CP-60}$ ; en el caso del Pb, para 0.16 kg biocarbón-compost/ kg relave, se obtuvieron:  $FBA_{T300CP-30} > FBA_{T500CP-30} > FBA_{CR30}$ ; mientras que para 0.08 kg biocarbón-compost/ kg relave, se obtuvieron:  $FBA_{T500CP-60} > FBA_{T300CP-60} > FBA_{CR60}$ . Otros estudios obtuvieron resultados similares en cuanto a FBA (<1), para el Pb, 0.01-0.05 (Máthé-Gáspar y Anton 2005), 0.05 (Cerrón et al. 2018) y en el estudio de Liu et al. (2021), se obtuvo un valor de 0.023, para el uso de biocarbón de cascarilla de arroz y estiércol de pollo, y en el estudio de Saqib Rashid et al. (2022), obtuvo un valor de 0.16 para la aplicación de biocarbón de cascarilla de arroz y compost de estiércol de pollo. A diferencia de los estudios mencionados anteriormente, los resultados de la presente investigación obtuvieron valores mucho menores en el FBA para el Pb, que van del rango de: 0.00069587- 0.000089571. Por otro lado, no se encontró reportes en cuanto al As para el FBA en *Zea mays*.

### **6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes**

La presente tesis titulada, **“Aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros, Cerro de Pasco, 2021”**, los tesisistas Franco Rodrigo Vega Guevara, Paul Hermes Virú Vásquez, señalan que se cumple fielmente con el código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por RDU N° 210-2017-CU, donde se destaca que la investigación es auténtica en su fondo y forma, con respecto a la autoría de otros estudios, así también otros aspectos importantes que señala dicho código.

## CONCLUSIONES

-Se logró evaluar la influencia de la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación de Arsénico y Plomo usando *Zea mays* en suelos contaminados con relaves mineros. De acuerdo a la demostración de las hipótesis específicas.

-Se concluye que, el factor temperatura de producción del biocarbón no influye significativamente en la fitorremediación de Arsénico (As) y Plomo (Pb), ya que para el Factor de Bioacumulación Aéreo (FBA), Factor de Bioacumulación Radicular (FBR) y Factor de Traslocación (FT) se tuvo p-valores de 0.2713 ( $p > 0.05$ ), 0.0033 ( $p < 0.05$ ) y 0.4253 ( $p > 0.05$ ), respectivamente.

-Se concluye que, el factor dosificación de biocarbón-compost influye significativamente en la fitorremediación de Arsénico (As) y Plomo (Pb), ya que para el Factor de Bioacumulación Aéreo (FBA), Factor de Bioacumulación Radicular (FBR) y Factor de Traslocación (FT) se tuvo p-valores de 0.0225 ( $p < 0.05$ ), 0.0006 ( $p < 0.05$ ) y 0.0165 ( $p < 0.05$ ), respectivamente.

-Se concluye que, tras la aplicación de la dosificación biocarbón-compost existe una variación considerable en cuanto a las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado con relaves mineros, respecto a los controles. En el caso del pH hubo un incremento de 2.58% tras la aplicación de 0.08 kg biocarbón-compost/ kg relave en T500CP-60; para la C.E. hubo un incremento de 10.26% tras la aplicación 0.16 kg biocarbón-compost/ kg relave en T500CP-30, y para el caso de la M.O. hubo un incremento del 20% tras la aplicación 0.16 kg biocarbón-compost/ kg relave en T300CP-30.

## RECOMENDACIONES

-Se recomienda que se pueda evaluar en futuras investigaciones el efecto solo del biocarbón, solo del compost, y la mezcla del biocarbón-compost a diferentes dosificaciones en proporciones de relave de 30% y 60% con el fin de determinar cuál de estos posee una mejor capacidad fitorremediadora del *Zea mays*.

-Se recomienda realizar el experimento, considerando análisis de superficie (Superficie morfológica- SEM, Área superficial específica-BET) y análisis moleculares (XRD y XPS, análisis de rayos X; Aromaticidad y condensación aromática - NMR; Compuestos orgánicos volátiles) a fin de determinar con mayor detalle los compuestos moleculares, complejos, y precipitados presentes en las muestras de biocarbón a diferentes temperaturas y compost.

- Se recomienda realizar el experimento, considerando parámetros microbiológicos, antes, durante y al finalizar la fitorremediación, ya que estos microorganismos pueden influenciar en el proceso de fitorremediación asistida del *Zea mays* con biocarbón-compost.

- Se recomienda evaluar la fitorremediación en diferentes periodos, considerando como etapa final la evaluación de análisis de metales pesados en el fruto del *Zea mays*.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGBLEVOR, F.A., BEIS, S., KIM, S.S., TARRANT, R. y MANTE, N.O., 2010. Biocrude oils from the fast pyrolysis of poultry litter and hardwood. *Waste Management*, vol. 30, no. 2, ISSN 0956053X. DOI 10.1016/j.wasman.2009.09.042.
- AHMED, M.B., ZHOU, J.L., NGO, H.H. y GUO, W., 2015. Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater: Progress and challenges. *Science of the Total Environment*, The, vol. 532, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2015.05.130.
- AI, Y., WANG, Y., SONG, L., HONG, W., ZHANG, Z., LI, X., ZHOU, S. y ZHOU, J., 2023. Effects of biochar on the physiology and heavy metal enrichment of *Vetiveria zizanioides* in contaminated soil in mining areas. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 448, ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/J.JHAZMAT.2023.130965.
- ALABOUDI, K.A., AHMED, B. y BRODIE, G., 2019. Effect of biochar on Pb, Cd and Cr availability and maize growth in artificial contaminated soil. *Annals of Agricultural Sciences*, vol. 64, no. 1, ISSN 0570-1783. DOI 10.1016/J.AOAS.2019.04.002.
- ALADESANMI, O.T., OROBOADE, J.G., OSISIOGU, C.P. y OSEWOLE, A.O., 2019. Bioaccumulation factor of selected heavy metals in *Zea mays*. *Journal of Health and Pollution*, vol. 9, no. 24, ISSN 21569614. DOI 10.5696/2156-9614-9.24.191207.
- ALIDOU-ARZIKA, I., LEBRUN, M., MIARD, F., NANDILLON, R., BAYCU, G., BOURGERIE, S. y MORABITO, D., 2021. Assessment of compost and three biochars associated with *Ailanthus altissima* (Miller) Swingle for lead and arsenic stabilization in a post-mining Technosol. *Pedosphere*, vol. 31, no. 6, ISSN 10020160. DOI 10.1016/S1002-0160(21)60025-5.
- ANDINA, 2022a. Aprueban norma técnica para elaborar compost con residuos sólidos orgánicos de municipios | Noticias | Agencia Peruana de Noticias Andina. [en línea]. [consulta: 20 agosto 2022]. Disponible en:

<https://andina.pe/agencia/noticia-aprueban-norma-tecnica-para-elaborar-compost-residuos-solidos-organicos-municipios-896011.aspx>.

ANDINA, 2022b. Pasco: luvias y granizadas extremas colocan en riesgo de colapso a relavera Quiulacocha | Noticias | Agencia Peruana de Noticias Andina. [en línea]. [consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-pasco-lluvias-y-granizadas-extremas-colocan-riesgo-colapso-a-relavera-quiulacocha-884569.aspx>.

ANGST, T.E., SIX, J., REAY, D.S. y SOHI, S.P., 2014. Impact of pine chip biochar on trace greenhouse gas emissions and soil nutrient dynamics in an annual ryegrass system in California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 191, ISSN 01678809. DOI 10.1016/j.agee.2014.03.009.

ANSARI, A.A., GILL, S.S., GILL, R., LANZA, G.R. y NEWMAN, L., 2015. *Phytoremediation*. S.I.: s.n. vol. 2. ISBN 9783319109688.

ANTONANGELO, J.A., SUN, X. y ZHANG, H., 2021. The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. *Journal of Environmental Management*, vol. 277, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2020.111443.

APPEL, C., MA, L.Q., RHUE, R.D. y REVE, W., 2008. Sequential sorption of lead and cadmium in three tropical soils. *Environmental Pollution*, vol. 155, no. 1, ISSN 02697491. DOI 10.1016/j.envpol.2007.10.026.

ARENDT, E.K. y ZANNINI, E., 2013. Maizes. *Cereal Grains for the Food and Beverage Industries*. S.I.: Woodhead Publishing, pp. 67-115e. ISBN 9780857098924.

ARIENZO, M., ADAMO, P. y COZZOLINO, V., 2004. The potential of Lolium perenne for revegetation of contaminated soil from a metallurgical site. *Science of the Total Environment*, vol. 319, no. 1-3, ISSN 00489697. DOI 10.1016/S0048-9697(03)00435-2.

ASGMI, 2010. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. . Barquisimeto:

- ASTETE, J., CÁCERES, W., GASTAÑAGA, M.C., LUCERO, M., SABASTIZAGAL, I., OBLITAS, T., PARI, J. y RODRÍGUEZ, F., 2009. Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* [en línea], vol. 26, no. 1, ISSN 17264634 17264634. Disponible en: <https://www.indeci.gob.pe/emergencias/reporte-de-peligro-inminente-n-055-25-2-2021-coen-indeci-1450-horas-reporte-n-1-por-desembalse-de-la-relavera-quiulacocha-en-el-districto-de-simon-bolivar-pasco/>.
- ATKINSON, C.J., FITZGERALD, J.D. y HIPPS, N.A., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*, vol. 337, no. 1, ISSN 0032079X. DOI 10.1007/s11104-010-0464-5.
- BAGUR-GONZÁLEZ, M.G., ESTEPA-MOLINA, C., MARTÍN-PEINADO, F. y MORALES-RUANO, S., 2011. Toxicity assessment using *Lactuca sativa* L. bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 11, no. 2, ISSN 14390108. DOI 10.1007/s11368-010-0285-4.
- BAKER, A.J.M. y WALKER, P.L., 1990. Baker: Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants - Google Scholar. [en línea]. [consulta: 13 marzo 2022]. Disponible en: [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Ecophysiology%20of%20metal%20uptake%20by%20tolerant%20plants%3A%20heavy%20metal%20uptake%20by%20tolerant%20plants&author=A.J.M.%20Baker&publication\\_year=1990](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Ecophysiology%20of%20metal%20uptake%20by%20tolerant%20plants%3A%20heavy%20metal%20uptake%20by%20tolerant%20plants&author=A.J.M.%20Baker&publication_year=1990).
- BALTRÉNAITÉ, E., BALTRÉNAS, P., BHATNAGAR, A., VILPPO, T., SELENIUS, M., KOISTINEN, A., DAHL, M. y PENTTINEN, O.P., 2017. A multicomponent approach to using waste-derived biochar in biofiltration: A case study based on dissimilar types of waste. *International Biodeterioration*

*and Biodegradation*, vol. 119, ISSN 09648305. DOI 10.1016/j.ibiod.2016.10.056.

BARAGAÑO, D., FORJÁN, R., FERNÁNDEZ, B., AYALA, J., AFIF, E. y GALLEGO, J.L.R., 2020. Application of biochar, compost and ZVI nanoparticles for the remediation of As, Cu, Pb and Zn polluted soil. *Environmental science and pollution research international* [en línea], vol. 27, no. 27, [consulta: 3 junio 2023]. ISSN 1614-7499. DOI 10.1007/S11356-020-09586-3. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32533482/>.

BARRETO-PIO, C., BRAVO-TOLEDO, L., VIRÚ-VÁSQUEZ, P., BORDA-CONTRERAS, A., ZARATE-SARAPURA, E. y PILCO, A., 2023. Optimization Applying Response Surface Methodology in the Co-treatment of Urban and Acid Wastewater from the Quiulacocha Lagoon, Pasco (Peru). *Environmental Research, Engineering and Management* [en línea], vol. 79, no. 1, [consulta: 17 mayo 2023]. ISSN 2029-2139. DOI 10.5755/J01.EREM.79.1.32576. Disponible en: <https://erem.ktu.lt/index.php/erem/article/view/32576>.

BARROW, C.J., 2012. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography*, vol. 34, ISSN 01436228. DOI 10.1016/j.apgeog.2011.09.008.

BASU, P., 2010. Pyrolysis and Torrefaction. *Biomass Gasification Design Handbook*. S.l.: Elsevier, pp. 65-96.

BAYLÓN CORITOMA, M., ROA CASTRO, K., LIBIO SÁNCHEZ, T., TAPIA UGAZ, L., JARA PENA, E., MACEDO PRADA, D., SALVATIERRA SEVILLANO, A. y DEXTRE RUBINA, A., 2018. Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología Aplicada* [en línea], vol. 17, no. 1, [consulta: 28 junio 2023]. ISSN 1726-2216. DOI 10.21704/REA.V17I1.1180. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-22162018000100013&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162018000100013&lng=es&nrm=iso&tlng=es).

- BIEDERMAN, L.A. y STANLEY HARPOLE, W., 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, vol. 5, no. 2, ISSN 17571707. DOI 10.1111/gcbb.12037.
- BIOCHAR INTERNATIONAL, 2020. Principios básicos de la producción de biocarbón: biocarbón para suelos sostenibles. [en línea]. [consulta: 24 abril 2022]. Disponible en: <https://biochar.international/guides/basic-principles-of-biochar-production/>.
- BIOCHAR PROJECT, 2018. Australia's first Adam retort Biochar Kiln. [en línea]. [consulta: 13 marzo 2022]. Disponible en: <http://biocharproject.org/charmasters-log/australias-adam-retort-biochar-kiln/>.
- BIOCOAL, 2014. Mobile adam retort . [en línea]. [consulta: 27 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.biocoal.org/mobile-adam-retort/>.
- BIOENERGY, 2018. BioEnergy Lists: Biochar Mailing Lists. [en línea]. [consulta: 27 agosto 2022]. Disponible en: [http://terrapreta.bioenergylists.org/Making\\_BioChar?page=2](http://terrapreta.bioenergylists.org/Making_BioChar?page=2).
- BRANTLEY, K., SAVIN, M., BRYE, K. y LONGER, D., 2015. Pine Woodchip Biochar Impact on Soil Nutrient Concentrations and Corn Yield in a Silt Loam in the Mid-Southern U.S. *Agriculture*, vol. 5, no. 1, DOI 10.3390/agriculture5010030.
- BRASSARD, P., GODBOUT, S., LÉVESQUE, V., PALACIOS, J.H., RAGHAVAN, V., AHMED, A., HOGUE, R., JEANNE, T. y VERMA, M., 2019. Biochar for soil amendment. *Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications*. S.l.: Elsevier, pp. 109-146. ISBN 9780128148945.
- CANABARRO, N., SOARES, J.F., ANCHIETA, C.G., KELLING, C.S. y MAZUTTI, M.A., 2013. Thermochemical processes for biofuels production from biomass. *Sustainable Chemical Processes*, vol. 1, no. 1, ISSN 2043-7129. DOI 10.1186/2043-7129-1-22.

- CENTA, 2018. Cultivo de maíz. . S.I.:
- CERRÓN, R.M., FIGUEROA, O.L., ANDRÉS, ;, LEYTON, A., GILBERTO, ; y SÁNCHEZ, G., 2018. Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Phytoremediation with corn (Zea mays L.) and Stevia compost on soils degraded by contamination with heavy metals.* , DOI 10.17268/sci.agropecu.2018.04.11.
- CHAMON, A.S., GERZABEK, M.H., MONDOL, M.N., ULLAH, S.M., RAHMAN, M. y BLUM, W.E.H., 2005. Influence of soil amendments on heavy metal accumulation in crops on polluted soils of Bangladesh. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 36, no. 7-8, ISSN 00103624. DOI 10.1081/CSS-200049472.
- CHANDRA, R., DUBEY, N.K. y KUMAR, V., 2018. *Phytoremediation of Environmental Pollutants*. S.I.: Taylor & Francis Group. ISBN 9781138062603.
- CHANDRA, R., YADAV, Sheelu y YADAV, Sangeeta, 2017. Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry. *Ecological Engineering*, vol. 98, ISSN 0925-8574. DOI 10.1016/J.ECOLENG.2016.10.017.
- CHAVEZ, A. y JARA, T., 2020. *Manual técnico del cultivo de Maiz amarillo duro*. S.I.: Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA. ISBN 978-9972-44-051-9.
- CHEHREGANI, A. y MALAYERI, B.E., 2007. Removal of Heavy Metals by Native Accumulator Plants. *INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURE & BIOLOGY*,
- CHEMERYYS, V. y BALTRÉNAITĖ, E., 2017. Pine-derived Biochar as Option for Adsorption of Cu, Zn, Cr, Pb, Ni and Decreasing of BOD5 in Landfill Leachate. *Mokslas - Lietuvos ateitis*, vol. 9, no. 4, ISSN 2029-2341. DOI 10.3846/mla.2017.1068.

- CHEN, X., ZHANG, R., ZHAO, B., FAN, G., LI, H., XU, X. y ZHANG, M., 2020. Preparation of Porous Biochars by the Co-Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge and Hazelnut Shells and the Mechanism of the Nano-Zinc Oxide Composite and Cu(II) Adsorption Kinetics. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 8668 [en línea], vol. 12, no. 20, [consulta: 31 octubre 2022]. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/SU12208668. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8668/htm>.
- CHO, W.M., RAVINDRAN, B., KIM, J.K., JEONG, K.H., LEE, D.J. y CHOI, D.Y., 2016. Nutrient status and phytotoxicity analysis of goat manure discharged from farms in South Korea. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2016.1239657> [en línea], vol. 38, no. 9, [consulta: 15 marzo 2022]. ISSN 1479487X. DOI 10.1080/09593330.2016.1239657. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2016.1239657>.
- CHUNG, J.Y., YU, S. Do y HONG, Y.S., 2014. Environmental source of arsenic exposure. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, vol. 47, no. 5, ISSN 19758375. DOI 10.3961/jpmph.14.036.
- CLARK, J.J. y KNUDSEN, A.C., 2013. Extent, Characterization, and Sources of Soil Lead Contamination in Small-Urban Residential Neighborhoods. *Journal of Environmental Quality*, vol. 42, no. 5, ISSN 00472425. DOI 10.2134/jeq2013.03.0100.
- CLEMENTS, D.P. y BIHN, E.A., 2019. The impact of food safety training on the adoption of good agricultural practices on farms. *Safety and Practice for Organic Food*. S.l.: Elsevier, pp. 321-344. ISBN 9780128120606.
- COELHO, M.A., FUSCONI, R., PINHEIRO, L., RAMOS, I.C. y FERREIRA, A. de S., 2018. The combination of compost or biochar with urea and NBPT can improve nitrogen-use efficiency in maize. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 90, no. 2, ISSN 16782690. DOI 10.1590/0001-3765201820170416.

- CRUZADO-TAFUR, E., TORRÓ, L., BIERLA, K., SZPUNAR, J. y TAULER, E., 2021. Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 106, ISSN 0895-9811. DOI 10.1016/J.JSAMES.2020.103107.
- CUESTA, M. y HERRERO, F., 2010. *Introducción al muestreo*. Universidad de Ovied. S.l.: s.n.
- DE LA CRUZ, L., 2018. *Eficiencia del biochar a partir de residuos de poda para inmovilizar plomo en el suelo a nivel laboratorio UCV, 2018*. S.l.: Universidad César Vallejo .
- DERAS FLORES, H., 2012. El cultivo del maíz. *Guía Técnica, El Cultivo Del Maíz*. S.l.:
- DÍAZ, L.F. y DE BERTOLDI, M., 2007. History of Composting. *Compost Science and Technology*,
- DOLD, B., WADE, C. y FONTBOTÉ, L., 2009. Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 100, no. 2-3, ISSN 0375-6742. DOI 10.1016/J.GEXPLO.2008.05.002.
- DUAN, Y., AWASTHI, S.K., LIU, T., VERMA, S., WANG, Q., CHEN, H., REN, X., ZHANG, Z. y AWASTHI, M.K., 2019. Positive impact of biochar alone and combined with bacterial consortium amendment on improvement of bacterial community during cow manure composting. *Bioresource Technology*, ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2019.02.026.
- DUCEY, T.F., NOVAK, J.M., SIGUA, G.C., IPPOLITO, J.A., RUSHMILLER, H.C., WATTS, D.W., TRIPPE, K.M., SPOKAS, K.A., STONE, K.C. y JOHNSON, M.G., 2021. Microbial response to designer biochar and compost treatments for mining impacted soils. *Biochar* [en línea], vol. 3, no. 3, [consulta: 31 marzo 2023]. ISSN 25247867. DOI 10.1007/S42773-021-00093-3. Disponible en: /pmc/articles/PMC8815453/.

- EL PERUANO, 2022. Pasco: exigen al Coer e Indeci acciones urgentes ante inminente desborde de relavera Quiulacocho. [en línea]. [consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: <https://elperuano.pe/noticia/139754-pasco-exigen-al-coer-e-indeci-acciones-urgentes-ante-inminente-desborde-de-relavera-quiulacocho>.
- ELAD, Y., DAVID, D.R., HAREL, Y.M., BORENSHTEIN, M., KALIFA, H. Ben, SILBER, A. y GRABER, E.R., 2010. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology*, vol. 100, no. 9, ISSN 0031949X. DOI 10.1094/PHYTO-100-9-0913.
- EPA, 1992. Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization. . S.I.:
- EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE, 2015. European Biochar Certificate (EBC) - guidelines version 6.1. [en línea]. [consulta: 15 marzo 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/278727508\\_European\\_Biochar\\_Certificate\\_EBC\\_-\\_guidelines\\_version\\_61?channel=doi&linkId=5584728c08ae71f6ba8c4cdf&showFulltext=true](https://www.researchgate.net/publication/278727508_European_Biochar_Certificate_EBC_-_guidelines_version_61?channel=doi&linkId=5584728c08ae71f6ba8c4cdf&showFulltext=true).
- FANGUEIRO, D., KIDD, P.S., ALVARENGA, P., BEESLEY, L. y DE VARENNES, A., 2017. Strategies for soil protection and remediation. *Soil Pollution: From Monitoring to Remediation*. S.I.: Elsevier, pp. 251-281. ISBN 9780128498736.
- FERNÁNDEZ-MACÍAS, J.C., GONZÁLEZ-MILLE, D.J., GARCÍA-ARREOLA, M.E., CRUZ-SANTIAGO, O., RIVERO-PÉREZ, N.E., PÉREZ-VÁZQUEZ, F. y ILIZALITURRI-HERNÁNDEZ, C.A., 2020. Integrated probabilistic risk assessment in sites contaminated with arsenic and lead by long-term mining liabilities in San Luis Potosi, Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 197, ISSN 0147-6513. DOI 10.1016/J.ECOENV.2020.110568.
- FLORES, M., MOIZES, D., SALAZAR ALIAGA, K.P. y BRAVO TOLEDO, L.A., 2016. Fitorremediación acuática con *Myriophyllum aquaticum* para el

tratamiento de efluentes generados por pasivos ambientales mineros de Hualagayoc-Cajamarca. ,

FOW ESTEVES, A.J., 2021. *Evaluación de la capacidad fitorremediadora de tres especies vegetales altoandinas asistidas con biochar en suelos contaminados por drenaje ácido de roca en la microcuenca Quillcayhuanca, Ancash*. S.I.: Universidad Nacional del Callao.

FOWLER, B.A., CHOU, C.H.S.J., JONES, R.L., SULLIVAN, D.W. y CHEN, C.J., 2015. Arsenic. *Handbook on the Toxicology of Metals: Fourth Edition*. S.I.: Elsevier Inc., pp. 581-624. vol. 1. ISBN 9780123973399.

FU, F. y WANG, Q., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 3, ISSN 03014797. DOI 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.

GAMA RETAMOZO, Y.O., 2019. *La fitorremediación como alternativa en la recuperación de suelos afectados con desmontes de construcción - Cajabamba*. Cajamarca: s.n.

GELARDI, D.L., LI, C. y PARIKH, S.J., 2019. *An emerging environmental concern: Biochar-induced dust emissions and their potentially toxic properties*. 15 agosto 2019. S.I.: Elsevier B.V.

GLASER, B., HAUMAIER, L., GUGGENBERGER, G. y ZECH, W., 2001. The «Terra Preta» phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, vol. 88, no. 1, ISSN 00281042. DOI 10.1007/s001140000193.

GOBIERNO DEL PERÚ, 2021. Reglamento de Calificación, Clasificación y Registro de los investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica – Reglamento RENACYT. [en línea]. [consulta: 18 febrero 2023]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/concytec/informes-publicaciones/2131042-reglamento-de-calificacion-clasificacion-y-registro-de-los-investigadores-del-sistema-nacional-de-ciencia-tecnologia-e-innovacion-tecnologica-reglamento-renacyt>.

- GRANDEZ ARGOMEDA, M.G.A., 2017. *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junin, mediante Fitorremediación con girasol (Helianthus annuus) y maíz (Zea mays) usando enmiendas*. Lima: s.n.
- GUNATILAKE SK, 2015. Methods of Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, vol. 1, no. 1,
- GUO, Y., TANG, H., LI, G. y XIE, D., 2014. Effects of cow dung biochar amendment on adsorption and leaching of nutrient from an acid yellow soil irrigated with biogas slurry. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 225, no. 1, ISSN 00496979. DOI 10.1007/s11270-013-1820-x.
- HE, Z., SHENTU, YANG, X., BALIGAR, ZHANG, T. y STOFFELLA, &, 2015. Heavy Metal Contamination of Soils: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*, vol. 9,
- HERATH, I., KUMARATHILAKA, P., NAVARATNE, A., RAJAKARUNA, N. y VITHANAGE, M., 2014. Immobilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in serpentine soil using biochar. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 15, no. 1, ISSN 16147480. DOI 10.1007/s11368-014-0967-4.
- HERDIA-SALGADO, M.A. y TARELHO, L.A.C., 2018. Biochar production as an alternative for energetic valorization or residual biomass generated in the Ecuadorian agroindustrial sector : a participative approach Producción de biochar como alternativa para la valorización energética de la biomasa residual . , no. September,
- HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y MENDOZA, C., 2018. *Metodología de la investigación - Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. S.l.: s.n. ISBN 978-1-4562-6096-5.
- HERZIG, R., NEHNEVAJOVA, E., PFISTNER, C., SCHWITZGUEBEL, J.P., RICCI, A. y KELLER, C., 2014. Feasibility of labile Zn phytoextraction using enhanced tobacco and sunflower: results of five- and one-year field-scale experiments in Switzerland. *International journal of phytoremediation* [en línea], vol. 16, no. 7-12, [consulta: 10 marzo 2022]. ISSN 1522-6514. DOI

10.1080/15226514.2013.856846. Disponible en:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24933882/>.

HUSSAIN, M., FAROOQ, M., NAWAZ, A., AL-SADI, A.M., SOLAIMAN, Z.M., ALGHAMDI, S.S., AMMARA, U., OK, Y.S. y SIDDIQUE, K.H.M., 2017. Biochar for crop production: potential benefits and risks. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 17, no. 3, ISSN 16147480. DOI 10.1007/s11368-016-1360-2.

IBI, 2015. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil (aka IBI Biochar Standards). [en línea], [consulta: 15 marzo 2022]. Disponible en: <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>.

IBI, 2019. Biochar Production Technologies - biochar-international. [en línea]. [consulta: 13 marzo 2022]. Disponible en: <https://biochar-international.org/biochar-production-technologies/>.

IBRAHIMI, M.M. y SAYYADI, A.S., 2015. Application of natural and modified Zeolites in removing heavy metal cations from aqueous media : an overview of including parameters affecting the process. *Ijgaes*, vol. 3, no. 2, ISSN 2348-0254.

IGALAVITHANA, A.D., LEE, S.E., LEE, Y.H., TSANG, D.C.W., RINKLEBE, J., KWON, E.E. y OK, Y.S., 2017. Heavy metal immobilization and microbial community abundance by vegetable waste and pine cone biochar of agricultural soils. *Chemosphere*, vol. 174, ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.01.148.

IGLESIAS ABAD, S.F., 2018. *Aplicación de Biochar a partir de biomasa residual de Eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano* [en línea]. S.I.: Universidad Nacional Agraria La Molina. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3394>.

IHOBE, 1998. Manual práctico para la investigación de la contaminación del suelo. . España:

INACAL, 2021. Fertilizantes. Compost a partir de residuos sólidos orgánicos municipales. Requisitos. . S.l.:

INDECI, 2021. Reporte de peligro inminente N° 115 - 14/5/2021 / COEN - INDECI / 23:00 HORAS (Reporte N° 5) POR DESEMBALSE DE LA RELAVERA QUIULACOCHA EN EL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR- PASCO - INDECI Tarea de Todos. [en línea]. [consulta: 23 marzo 2023]. Disponible en: <https://portal.indeci.gob.pe/emergencias/reporte-de-peligro-inminente-n-055-25-2-2021-coen-indeci-1450-horas-reporte-n-1-por-desembalse-de-la-relavera-quiulacocha-en-el-distrito-de-simon-bolivar-pasco/>.

INDECI, 2023. Reporte complementario N° 2130 - 28/2/2023 / COEN - INDECI / 16:30 HORAS (Reporte N° 2) LLUVIAS INTENSAS EN EL DISTRITO DE PAUCARTAMBO - PASCO - INDECI Tarea de Todos. [en línea]. [consulta: 23 marzo 2023]. Disponible en: <https://portal.indeci.gob.pe/emergencias/reporte-complementario-no-1957-24-2-2023-coen-indeci-1830-horas-reporte-n1-lluvias-intensas-en-el-distrito-de-paucartambo-pasco/>.

INYANG, M., GAO, B., DING, W., PULLAMMANAPPALLIL, P., ZIMMERMAN, A.R. y CAO, X., 2011. Enhanced lead sorption by biochar derived from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Separation Science and Technology*, vol. 46, no. 12, ISSN 01496395. DOI 10.1080/01496395.2011.584604.

INYANG, M., GAO, B., PULLAMMANAPPALLIL, P., DING, W. y ZIMMERMAN, A.R., 2010. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 22, ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2010.06.088.

IQBAL, N., HAYAT, M.T., ZEB, B.S., ABBAS, Z. y AHMED, T., 2018. *Phytoremediation of Cd-Contaminated Soil and Water*. S.l.: Elsevier Inc. ISBN 9780128148655.

IRFAN, M., MUDASSIR, M., KHAN, M.J., DAWAR, K.M., MUHAMMAD, D., MIAN, I.A., ALI, W., FAHAD, S., SAUD, S., HAYAT, Z., NAWAZ, T., KHAN,

- S.A., ALAM, S., ALI, B., BANOUT, J., AHMED, S., MUBEEN, S., DANISH, S., DATTA, R., ELGORBAN, A.M. y DEWIL, R., 2021. Heavy metals immobilization and improvement in maize (*Zea mays* L.) growth amended with biochar and compost. *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, ISSN 20452322. DOI 10.1038/S41598-021-97525-8.
- ITHAKA INSTITUTE, 2019. Ithaka Institute - Biochar Production. [en línea]. [consulta: 13 marzo 2022]. Disponible en: <http://www.ithaka-institut.org/en/ct/101-Kon-Tiki-flame-curtain-pyrolysis>.
- JAIN, M.K. y DAS, A., 2017. Impact of Mine Waste Leachates on Aquatic Environment: A Review. *Current Pollution Reports* [en línea], vol. 3, no. 1, [consulta: 24 junio 2023]. ISSN 21986592. DOI 10.1007/S40726-017-0050-Z/METRICS. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40726-017-0050-z>.
- JARA-PEÑA, E., GOMEZ, J., MONTOYA, H., CHANCO, M., MARIANO, M. y NOEMA, C., 2014. Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas en suelos contaminados con metales pesados. *Revista peruana de biología*, vol. 21, no. October,
- JÄRUP, L., 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, vol. 68, ISSN 00071420. DOI 10.1093/BMB/LDG032.
- JIANG, L. lin, HAN, G. ming, LAN, Y., LIU, S. nan, GAO, J. ping, YANG, X., MENG, J. y CHEN, W. fu, 2017. Corn cob biochar increases soil culturable bacterial abundance without enhancing their capacities in utilizing carbon sources in Biolog Eco-plates. *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 16, no. 3, ISSN 20953119. DOI 10.1016/S2095-3119(16)61338-2.
- JIANG, T.Y., JIANG, J., XU, R.K. y LI, Z., 2012. Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar. *Chemosphere*, vol. 89, no. 3, ISSN 0045-6535. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2012.04.028.
- JORQUERA ALISTE, M., 2019. *Pasivos Ambientales Mineros - Conflictos ambientales y percepción de la contaminación y de la salud de la población*. Santiago: s.n.

- KAFLE, A., TIMILSINA, A., GAUTAM, A., ADHIKARI, K., BHATTARAI, A. y ARYAL, N., 2022. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, vol. 8, ISSN 2666-7657. DOI 10.1016/J.ENVADV.2022.100203.
- KARACA, A., 2004. Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil. *Geoderma*, vol. 122, no. 2- 4 SPEC. IIS., ISSN 00167061. DOI 10.1016/j.geoderma.2004.01.016.
- KARHU, K., MATTILA, T., BERGSTRÖM, I. y REGINA, K., 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 140, no. 1-2, ISSN 01678809. DOI 10.1016/j.agee.2010.12.005.
- KHAN, K., LU, Y., KHAN, H., ZAKIR, S., IHSANULLAH, KHAN, S., KHAN, A.A., WEI, L. y WANG, T., 2013. Health risks associated with heavy metals in the drinking water of Swat, northern Pakistan. *Journal of Environmental Sciences*, vol. 25, no. 10, ISSN 1001-0742. DOI 10.1016/S1001-0742(12)60275-7.
- KIM, K.H., KIM, J.Y., CHO, T.S. y CHOI, J.W., 2012. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource Technology*, vol. 118, ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2012.04.094.
- KORENTAJER, L., 1991. A review of the agricultural use of sewage sludge : benefits and potential hazards. *Water SA*,
- KORZENIOWSKA, J. y STANISLAWSKA-GLUBIAK, E., 2019. Phytoremediation potential of *Phalaris arundinacea*, *Salix viminalis* and *Zea mays* for nickel-contaminated soils. *International Journal of Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 16, no. 4, [consulta: 31 marzo 2023]. ISSN 17352630. DOI 10.1007/S13762-018-1823-7/TABLES/9. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-018-1823-7>.

- KOŠNÁŘ, Z., MERCL, F. y TLUSTOŠ, P., 2018. Ability of natural attenuation and phytoremediation using maize (*Zea mays* L.) to decrease soil contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) derived from biomass fly ash in comparison with PAHs–spiked soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 153, no. September 2017, ISSN 10902414. DOI 10.1016/j.ecoenv.2018.01.049.
- KRUSE, A., FUNKE, A. y TITIRICI, M.M., 2013. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 17, no. 3, ISSN 13675931. DOI 10.1016/j.cbpa.2013.05.004.
- KÜÇÜK, M.M. y DEMIRBAŞ, A., 1997. Biomass conversion processes. *Energy Conversion and Management*, vol. 38, no. 2, ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/0196-8904(96)00031-3.
- KWAPINSKI, W., BYRNE, C.M.P., KRYACHKO, E., WOLFRAM, P., ADLEY, C., LEAHY, J.J., NOVOTNY, E.H. y HAYES, M.H.B., 2010. Biochar from biomass and waste. *Waste and Biomass Valorization*, vol. 1, no. 2, ISSN 18772641. DOI 10.1007/s12649-010-9024-8.
- LAKHERWAL, D., 2014. Adsorption of Heavy Metals: A Review. *International Journal of Environmental Research and Development*, vol. 4, no. 1, ISSN 2249-3131.
- LAM, E.J., CÁNOVAS, M., GÁLVEZ, M.E., MONTOFRÉ, Í.L., KEITH, B.F. y FAZ, Á., 2017. Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 182, ISSN 0375-6742. DOI 10.1016/J.GEXPLO.2017.06.015.
- LEE, J., SARMAH, A.K. y KWON, E.E., 2018. Production and formation of biochar. *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*. S.I.: Elsevier, pp. 3-18. ISBN 9780128117293.
- LEHMANN, J., 2007. A handful of carbon. *Nature*, vol. 447, no. 7141, ISSN 14764687. DOI 10.1038/447143a.

- LEHMANN, J., 2009. *Biochar for Environmental Management* [en línea]. S.l.: s.n. [consulta: 29 octubre 2022]. Disponible en: <http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/First%20proof%2013-01-09.pdf>.
- LEHMANN, J., GAUNT, J. y RONDON, M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11, no. 2, ISSN 13812386. DOI 10.1007/s11027-005-9006-5.
- LEHMANN, J. y JOSEPH, S., 2009. *Biochar for Environmental Management*. S.l.: s.n. ISBN 9781844076581.
- LEHMANN, J., RILLIG, M.C., THIES, J., MASIELLO, C.A., HOCKADAY, W.C. y CROWLEY, D., 2011. Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 43, no. 9, ISSN 00380717. DOI 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.
- LENG, L. y HUANG, H., 2018. An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresource Technology*, vol. 270, no. September, ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2018.09.030.
- LI, M., ZHANG, J., YANG, X., ZHOU, Y., ZHANG, L., YANG, Y., LUO, L. y YAN, Q., 2021. Responses of ammonia-oxidizing microorganisms to biochar and compost amendments of heavy metals-polluted soil. *Journal of Environmental Sciences (China)*, vol. 102, ISSN 18787320. DOI 10.1016/j.jes.2020.09.029.
- LI, T., LIU, M.J., ZHANG, X.T., ZHANG, H.B., SHA, T. y ZHAO, Z.W., 2011. Improved tolerance of maize (*Zea mays* L.) to heavy metals by colonization of a dark septate endophyte (DSE) *Exophiala pisciphila*. *Science of The Total Environment*, vol. 409, no. 6, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2010.12.012.
- LI, X., ZHAO, C. y ZHANG, M., 2018. *Biochar for Anionic Contaminants Removal From Water*. S.l.: Elsevier Inc. ISBN 9780128117293.

- LI, Y., ZHU, Q., TANG, X., WANG, C. y ZHAI, S., 2022. Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland in the South of Zhangbei County, Hebei Province, China. *Applied Sciences (Switzerland)* [en línea], vol. 12, no. 23, [consulta: 29 julio 2023]. ISSN 20763417. DOI 10.3390/APP122312425/S1. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/23/12425/htm>.
- LI, Yongfu, HU, S., CHEN, J., MÜLLER, K., LI, Yongchun, FU, W., LIN, Z. y WANG, H., 2018. Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, no. 2, ISSN 16147480. DOI 10.1007/s11368-017-1906-y.
- LIANG, Y., CAO, X., ZHAO, L. y ARELLANO, E., 2014. Biochar- and phosphate-induced immobilization of heavy metals in contaminated soil and water: Implication on simultaneous remediation of contaminated soil and groundwater. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea], vol. 21, no. 6, [consulta: 24 marzo 2023]. ISSN 16147499. DOI 10.1007/S11356-013-2423-1/METRICS. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-013-2423-1>.
- LIAO, W., ZHANG, X., KE, S., SHAO, J., YANG, H., ZHANG, S. y CHEN, H., 2022. Effect of different biomass species and pyrolysis temperatures on heavy metal adsorption, stability and economy of biochar. *Industrial Crops and Products*, vol. 186, ISSN 0926-6690. DOI 10.1016/J.INDCROP.2022.115238.
- LIN, Z., LIU, Q., LIU, G., COWIE, A.L., BEI, Q., LIU, B., WANG, X., MA, J., ZHU, J. y XIE, Z., 2017. Effects of Different Biochars on *Pinus elliottii* Growth, N Use Efficiency, Soil N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> Emissions and C Storage in a Subtropical Area of China. *Pedosphere*, vol. 27, no. 2, ISSN 10020160. DOI 10.1016/S1002-0160(17)60314-X.
- LIU, J., SHEN, J., LI, Y., SU, Y., GE, T., JONES, D.L. y WU, J., 2014. Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse

- gas intensity in a Chinese double rice cropping system. *European Journal of Soil Biology*, vol. 65, no. November, ISSN 11645563. DOI 10.1016/j.ejsobi.2014.09.001.
- LIU, L., LI, J., WU, G., SHEN, H., FU, G. y WANG, Y., 2021. Combined effects of biochar and chicken manure on maize (*Zea mays* L.) growth, lead uptake and soil enzyme activities under lead stress. *PeerJ*, vol. 9, ISSN 21678359. DOI 10.7717/peerj.11754.
- LIU, Ling, LI, J., YUE, F., YAN, X., WANG, F., BLOSZIES, S. y WANG, Y., 2018. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil. *Chemosphere*, vol. 194, ISSN 0045-6535. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.12.025.
- LIU, Yingzu, HE, Y., WANG, Z., WAN, K., XIA, J., LIU, J. y CEN, K., 2018. Multi-point LIBS measurement and kinetics modeling of sodium release from a burning Zhundong coal particle. *Combustion and Flame*, vol. 189, ISSN 0010-2180. DOI 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2017.10.026.
- LIU, Z., ZHANG, F.S. y WU, J., 2010. Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment. *Fuel*, vol. 89, no. 2, ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2009.08.042.
- LOBO, M.G. y DORTA, E., 2019. Utilization and management of horticultural waste. *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. S.I.: Elsevier, pp. 639-666. ISBN 9780128132760.
- LÓPEZ-ROLDÁN, P. y FACHELLI, S., 2015. Metodología de la investigación social cuantitativa. ,
- MA, L., XU, R. y JIANG, J., 2010. Adsorption and desorption of Cu(II) and Pb(II) in paddy soils cultivated for various years in the subtropical China. *Journal of Environmental Sciences*, vol. 22, no. 5, ISSN 1001-0742. DOI 10.1016/S1001-0742(09)60164-9.

- MAESTRI, E., MARMIROLI, M., VISIOLI, G. y MARMIROLI, N., 2010. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental and Experimental Botany*, vol. 68, no. 1, ISSN 0098-8472. DOI 10.1016/J.ENVEXPBOT.2009.10.011.
- MAJOR, J., 2011. Boletín Técnico de IBI #101. *IBI*,
- MAJOR, J., RONDON, M., MOLINA, D., RIHA, S.J. y LEHMANN, J., 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, vol. 333, no. 1, ISSN 0032079X. DOI 10.1007/s11104-010-0327-0.
- MAQUEDA GÁLVEZ, A.P., 2003. *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados*. S.l.: s.n.
- MASAGUER, A. y BENITO, M., 2008. *Evaluación de la calidad del compost*. Madrid : Ediciones Mundi Prensa.
- MASINDI, V. y MUEDI, K.L., 2018. Environmental Contamination by Heavy Metals. *Heavy Metals*, DOI 10.5772/intechopen.76082.
- MÁTHÉ-GÁSPAR, G. y ANTON, A., 2005. Phytoremediation study: Factors influencing heavy metal uptake of plants. *Acta Biologica Szegediensis* [en línea], [consulta: 11 marzo 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/288447305\\_Phytoremediation\\_study\\_Factors\\_influencing\\_heavy\\_metal\\_uptake\\_of\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/288447305_Phytoremediation_study_Factors_influencing_heavy_metal_uptake_of_plants).
- MEDINA-HOYOS, A., NARRO-LEÓN, L.A., CHÁVEZ-CABRERA, A., MEDINA-HOYOS, A., NARRO-LEÓN, L.A. y CHÁVEZ-CABRERA, A., 2020. Cultivo de maíz morado (*Zea mays* L.) en zona altoandina de Perú: Adaptación e identificación de cultivares de alto rendimiento y contenido de antocianina. *Scientia Agropecuaria* [en línea], vol. 11, no. 3, [consulta: 1 abril 2023]. ISSN 2077-9917. DOI 10.17268/SCI.AGROPECU.2020.03.01. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2077-99172020000300291&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172020000300291&lng=es&nrm=iso&tlng=es).

- MEDYŃSKA-JURASZEK, A., BEDNIK, M. y CHOHURA, P., 2020. Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and uptake of heavy metals by green leafy vegetables. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 21, ISSN 16604601. DOI 10.3390/ijerph17217861.
- MEIER, S., CURAQUEO, G., KHAN, N., BOLAN, N., CEA, M., EUGENIA, G.M., CORNEJO, P., OK, Y.S. y BORIE, F., 2015. Chicken-manure-derived biochar reduced bioavailability of copper in a contaminated soil. , DOI 10.1007/s11368-015-1256-6.
- MENÉNDEZ, J. y MUÑOZ, S., 2021. Water and soil contamination from mining tailings. *Paideia* [en línea], vol. 11, no. 1, DOI 10.31381/paideia.v11i1.3622. Disponible en: <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Paideia/article/view/3622>.
- MEYER, S., GENESIO, L., VOGEL, I., SCHMIDT, H.P., SOJA, G., SOMEUS, E., SHACKLEY, S., VERHEIJEN, F.G.A. y GLASER, B., 2017. Biochar standardization and legislation harmonization. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 25, no. 2, ISSN 18224199. DOI 10.3846/16486897.2016.1254640.
- MEYER, S., GLASER, B. y QUICKER, P., 2011. Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: A literature review. *Environmental Science and Technology*, vol. 45, no. 22, ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es201792c.
- MILON, A.R., CHANG, S.W. y RAVINDRAN, B., 2022. Biochar amended compost maturity evaluation using commercial vegetable crops seedlings through phytotoxicity germination bioassay. *Journal of King Saud University - Science*, vol. 34, no. 2, ISSN 10183647. DOI 10.1016/j.jksus.2021.101770.
- MINAM, 2014a. Guía para el muestreo de suelos . . S.I.:
- MINAM, 2014b. Guía para Muestreo de Suelos. [en línea]. S.I.: [consulta: 8 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp->

content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf.

MINAM, 2017a. Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM .- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. [en línea]. [consulta: 8 febrero 2022]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>.

MINAM, 2017b. Ley 28271 - Ley que regula los pasivos ambientales de la Actividad Minera. . S.I.:

MINEM, 2015. Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros. . S.I.:

MINEM, 2019. Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros. [en línea]. S.I.: Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relaveminero.pdf>.

MINEM, 2021. Anexo: Inventario de pasivos ambientales mineros. ,

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO, 2020. *Manual técnico del cultivo de Maíz amarillo duro*. Lima: s.n. ISBN 9789972440519.

MOHAMMED, N.A.S., ABU-ZURAYK, R.A., HAMADNEH, I. y AL-DUJAILI, A.H., 2018. Phenol adsorption on biochar prepared from the pine fruit shells: Equilibrium, kinetic and thermodynamics studies. *Journal of Environmental Management*, vol. 226, no. July, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2018.08.033.

MUNIVE CERRÓN, R.V., 2018. *Recuperación de suelos degradados por contaminación con metales pesados en el valle del Mantaro mediante compost de Stevia y fitorremediación* [en línea]. S.I.: Universidad Nacional Agraria La Molina . [consulta: 3 marzo 2021]. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3770>.

MUNIVE, R., LOLI, O., AZABACHE, A. y GAMARRA, G., 2018. Phytoremediation with corn (*Zea mays* L.) and Stevia compost on soils degraded by contamination with heavy metals. *Scientia Agropecuaria* [en línea], vol. 9,

- no. 4, [consulta: 3 marzo 2021]. ISSN 2077-9917. DOI 10.17268/sci.agropecu.2018.04.11. Disponible en: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>.
- NATHAN, O., PHYLIS NJERI, K., RANG, E. y JOSEPH SARIMA, C., 2012. The potential of *Zea mays*, *Commelina bengelensis*, *Helianthus annuus* and *Amaranthus hybridus* for phytoremediation of waste water. *An Interdisciplinary Journal of Applied Science* [en línea], vol. 7, no. 3, [consulta: 13 marzo 2022]. DOI 10.4136/1980-993X. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92824947014>[www.ambi-agua.net](http://www.ambi-agua.net)[www.ambi-agua.net](http://www.ambi-agua.net)Tel.:
- NEYRA, P., 2017. *Reactividad del compost de residuos de parque y jardines del distrito de La Molina-Lima*. S.l.: Universidad Agraria de la Selva .
- NGOLE-JEME, V.M. y FANTKE, P., 2017. Ecological and human health risks associated with abandoned gold mine tailings contaminated soil. *PLOS ONE* [en línea], vol. 12, no. 2, [consulta: 28 junio 2023]. ISSN 1932-6203. DOI 10.1371/JOURNAL.PONE.0172517. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0172517>.
- NIE, C., YANG, X., NIAZI, N.K., XU, X., WEN, Y., RINKLEBE, J., OK, Y.S., XU, S. y WANG, H., 2018. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study. *Chemosphere*, vol. 200, ISSN 0045-6535. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.02.134.
- NKOH, J.N., AJIBADE, F.O., ATAKPA, E.O., BAQUY, M.A.-A., MIA, S., ODII, E.C. y XU, R., 2022. Reduction of heavy metal uptake from polluted soils and associated health risks through biochar amendment: A critical synthesis. *Journal of Hazardous Materials Advances* [en línea], vol. 6, no. May, ISSN 27724166. DOI 10.1016/j.hazadv.2022.100086. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100086>.
- NORDBERG, G.F. y FOWLER, B.A., 2015. Risk Assessment. *Handbook on the Toxicology of Metals: Fourth Edition*. S.l.: Elsevier Inc., pp. 461-486. vol. 1. ISBN 9780123973399.

- NORMA CHILENA OFICIAL, 2004. NCh 2880 Clasificación y requisitos. . S.l.:
- NOVAK, J.M., IPPOLITO, J.A., WATTS, D.W., SIGUA, G.C., DUCEY, T.F. y JOHNSON, M.G., 2019. Biochar compost blends facilitate switchgrass growth in mine soils by reducing Cd and Zn bioavailability. *Biochar*, vol. 1, no. 1, ISSN 2524-7972. DOI 10.1007/s42773-019-00004-7.
- NUR, S., ABAS, A., HALIM, M., ISMAIL, S., KAMAL, L. y IZHAR, S., 2013. Adsorption Process of Heavy Metals by Low-Cost Adsorbent: A Review. *World Applied Sciences Journal*, vol. 28, no. 11, ISSN 1818-4952. DOI 10.5829/idosi.wasj.2013.28.11.1874.
- ÑAUPAS, H., VALDIVIA, M., PALACIOS, J. y ROMERO, H., 2013. *Metodología de la investigación cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis* [en línea]. S.l.: s.n. [consulta: 8 abril 2022]. Disponible en: <https://corladancash.com/wp-content/uploads/2020/01/Metodologia-de-la-inv-cuanti-y-cuali-Humberto-Naupas-Paitan.pdf>.
- OBLASSER, A. y CHAPARRO, E., 2008. Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. *Serie de Recursos Naturales e Infraestructura*. Santiago de Chile:
- OGUNDIRAN, M., LAWAL, O. y ADEJUMO, S.A., 2015. Stabilization of Pb in Pb Smelting Slag-Contaminated Soil by Compostmodified Bio Chars and their Effects on Maize Plant Growth. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, vol. 06, no. 04, DOI 10.4172/2155-6199.1000297.
- OGUNDIRAN, M.B., MEKWUNYEI, N.S. y ADEJUMO, S.A., 2018. Compost and biochar assisted phytoremediation potentials of Moringa oleifera for remediation of lead contaminated soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2018.03.025.
- OJEDA-PEREIRA, I. y CAMPOS-MEDINA, F., 2021. International trends in mining tailings publications: A descriptive bibliometric study. *Resources Policy*, vol. 74, ISSN 0301-4207. DOI 10.1016/J.RESOURPOL.2021.102272.

- OLADOYE, P.O., OLOWE, O.M. y ASEMOLOYE, M.D., 2022. Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature. *Chemosphere* [en línea], vol. 288, [consulta: 10 marzo 2022]. ISSN 18791298. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132555. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/chemospherehttps://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132555](https://www.elsevier.com/locate/chemospherehttps://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132555).
- OLDFIELD, T.L., SIKIRICA, N., MONDINI, C., LÓPEZ, G., KUIKMAN, P.J. y HOLDEN, N.M., 2018. Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. *Journal of Environmental Management*, vol. 218, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2018.04.061.
- PAIVA PRADO, G.M., 2015. *Fitorremediación de suelos contaminados con plomo utilizando Amaranthus spinosus - Amaranthaceae en el Cusco del 2012*. S.l.: s.n.
- PANDEY, J., SARKAR, S. y PANDEY, V.C., 2022. Compost-assisted phytoremediation. *Assisted Phytoremediation*, DOI 10.1016/B978-0-12-822893-7.00001-X.
- PANDEY, V.C. y SINGH, V., 2018. Exploring the Potential and Opportunities of Current Tools for Removal of Hazardous Materials From Environments. *Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation*. S.l.: Elsevier, pp. 501-516. ISBN 9780128139134.
- PARDO, T., CLEMENTE, R. y BERNAL, M.P., 2011. Effects of compost, pig slurry and lime on trace element solubility and toxicity in two soils differently affected by mining activities. *Chemosphere*, vol. 84, no. 5, ISSN 00456535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2011.03.037.
- PARK, J.H., WANG, J.J., ZHOU, B., MIKHAEL, J.E.R. y DELAUNE, R.D., 2019. Removing mercury from aqueous solution using sulfurized biochar and associated mechanisms. *Environmental Pollution*, vol. 244, ISSN 18736424. DOI 10.1016/j.envpol.2018.10.069.

- PEČIULYTĖ, D., REPEČKIENĖ, J. y LEVINSKAITĖ, L., 2006. Growth and metal accumulation ability of plants in soil polluted with Cu, Zn and Pb. [en línea], [consulta: 13 marzo 2022]. Disponible en: [http://www.elibrary.lt/resursai/LMA/Ekologija/Eko\\_048\\_052.pdf](http://www.elibrary.lt/resursai/LMA/Ekologija/Eko_048_052.pdf).
- PEIRIS, C., GUNATILAKE, S.R., WEWALWELA, J.J. y VITHANAGE, M., 2018. *Biochar for Sustainable Agriculture*. S.I.: Elsevier Inc. ISBN 9780128117293.
- PEÑNA D., 2014. *Fundamentos de Estadística*. S.I.: Alianza Editorial.
- PIEDRAHÍTA, O., 2009. Acidez Del Suelo (Magnesios Heliconia S:A). *Magnesio Heliconia S.A*, vol. 14, no. cuadro 1,
- PIRES, J.C.M., 2019. Negative emissions technologies: A complementary solution for climate change mitigation. *Science of the Total Environment*, vol. 672, ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.04.004.
- POERSCHMANN, J., BASKYR, I., WEINER, B., KOEHLER, R., WEDWITSCHKA, H. y KOPINKE, F.D., 2013. Hydrothermal carbonization of olive mill wastewater. *Bioresource Technology*, vol. 133, ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2013.01.154.
- POMA JIMENEZ, A. y QUIÑONES ROJAS, C.E., 2022. Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación con Zea mays l. en un suelo contaminado con cadmio. Leonor Ordoñez, Jauja - 2021. *Universidad Continental* [en línea], [consulta: 28 julio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11108>.
- PRABURAMAN, L., PARK, J.H., PARK, Y.J., HE, Z., KAMALA-KANNAN, S. y OH, B.T., 2020. Effect of panchakavya (organic formulation) on phytoremediation of lead and zinc using Zea mays. *Chemosphere*, vol. 246, ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.125810.
- QIAN, K., KUMAR, A., ZHANG, H., BELLMER, D. y HUHNKE, R., 2015. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2014.10.074.

- QUIROZ VALENCIA, B., 2021. *Optimización de planta de valoración de residuos orgánicos en Pueblo Libre, Lima* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional Agraria La Molina . [consulta: 15 marzo 2022]. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5202>.
- RADZIEMSKA, M., DARIA, M. y ZBIGNIEW, V., 2019. Pilot Scale Use of Compost Combined with Sorbents to Phytostabilize Ni-Contaminated Soil Using *Lolium perenne* L . *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 6, ISSN 1877-265X. DOI 10.1007/s12649-017-0166-9.
- RAMÍREZ-ZAMORA, J., MUSSALI-GALANTE, P., RODRÍGUEZ, A., CASTREJÓN-GODÍNEZ, M.L., VALENCIA-CUEVAS, L. y TOVAR-SÁNCHEZ, E., 2022. Assisted Phytostabilization of Mine-Tailings with *Prosopis laevigata* (Fabaceae) and Biochar. *Plants* [en línea], vol. 11, no. 24, [consulta: 29 abril 2023]. ISSN 22237747. DOI 10.3390/PLANTS11243441/S1. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/24/3441/htm>.
- RASCIO, N. y NAVARI-IZZO, F., 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, vol. 180, no. 2, ISSN 0168-9452. DOI 10.1016/J.PLANTSCI.2010.08.016.
- RAVINDRAN, B., MUPAMBWA, H.A., SILWANA, S. y MNKENI, P.N.S., 2017. Assessment of nutrient quality, heavy metals and phytotoxic properties of chicken manure on selected commercial vegetable crops. *Heliyon* [en línea], vol. 3, no. 12, [consulta: 23 marzo 2022]. ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/J.HELİYON.2017.E00493. Disponible en: <http://www.cell.com/article/S2405844017314019/fulltext>.
- RECHARTE TELLO, F.A., MEJÍA RODRÍGUEZ, R.A. y FAJARDO CUEVAS, V.I., 2018. *Fitorremediación con *Ricinus communis* para el tratamiento de suelos contaminados con plomo*. Callao: s.n.

- REHMAN HAKEEM, K., SABIR, M., ÖZTÜRK, M. y RUHI MERMUT, A., 2015. *Soil Remediation and Plants: Prospects and Challenges*. S.I.: Elsevier B.V. ISBN 9780127999371.
- RIFFO ESTAY, C.A., 2016. *Transferencia de metales pesados Cu , Pb , Zn , Ni , Co y Cr desde un suelo de la comuna de Talcahuano a las plantas Salicornia y Lolium Perenne . (Tesis de titulación)*. Concepción: s.n.
- RÍOS TELLO, C., 2018. "Aplicación de biochar de Mespilus germanica L. y Mangifera indica L. en suelos contaminados para reducir plomo en la zona de La Huaca - Huaral, 2018". *Universidad César Vallejo*,
- RODRÍGUEZ HEREDIA, D., 2017. Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, vol. 21, no. 12, ISSN 1029-3019.
- RODRÍGUEZ-ZAPATA, M.A. y RUIZ-AGUDELO, C.A., 2021. Environmental liabilities in Colombia: A critical review of current status and challenges for a megadiverse country. *Environmental Challenges*, vol. 5, ISSN 2667-0100. DOI 10.1016/J.ENVC.2021.100377.
- ROGELJ, J., SHINDELL, D., JIANG, K., FIFITA, S., FORSTER, P., GINZBURG, V., HANDA, C., KHESHGI, H., KOBAYASHI, S., KRIEGLER, E., MUNDACA, L., SEFERIAN, R. y VILARINO, M.V., 2018. Mitigation Pathways Compatible With 1.5°C in the Context of Sustainable Development. *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report [...]*,
- ROMÁN, P., MARTINEZ, M.M. y PANTOJA, A., 2015. *Manual de compostaje del agricultor* [en línea]. S.I.: s.n. ISBN 9789253078448. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>.
- RUBIN, R. y STRAYER, D.S., 2008. *Rubin's Pathology: Clinicopathologic Foundations of Medicine*. 5. S.I.: s.n.
- RYNK, R., 1992. *On-Farm Composting Handbook*. Estados Unidos: s.n.
- SAHA, J.C., DIKSHIT, A.K., BANDYOPADHYAY, M. y SAHA, K.C., 1999. A Review of Arsenic Poisoning and its Effects on Human Health. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 293, no.

293, Disponible en:  
<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=best20%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1080/10643389991259227>.

SALGADO-ALMEIDA, B., FALQUEZ-TORRES, D.A., ROMERO-CRESPO, P.L., VALVERDE-ARMAS, P.E., GUZMÁN-MARTÍNEZ, F. y JIMÉNEZ-OYOLA, S., 2022a. Risk Assessment of Mining Environmental Liabilities for Their Categorization and Prioritization in Gold-Mining Areas of Ecuador. *Sustainability* [en línea], vol. 14, no. 10, [consulta: 28 junio 2023]. ISSN 20711050. DOI 10.3390/SU14106089/S1. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/6089/htm>.

SALGADO-ALMEIDA, B., FALQUEZ-TORRES, D.A., ROMERO-CRESPO, P.L., VALVERDE-ARMAS, P.E., GUZMÁN-MARTÍNEZ, F. y JIMÉNEZ-OYOLA, S., 2022b. Risk Assessment of Mining Environmental Liabilities for Their Categorization and Prioritization in Gold-Mining Areas of Ecuador. *Sustainability (Switzerland)* [en línea], vol. 14, no. 10, [consulta: 23 junio 2023]. ISSN 20711050. DOI 10.3390/SU14106089/S1. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/6089/htm>.

SÁNCHEZ FLORES, F.A., 2019. Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria* [en línea], vol. 13, no. 1, [consulta: 29 julio 2023]. ISSN 2223-2516. DOI 10.19083/RIDU.2019.644. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-25162019000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-25162019000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es).

SAQIB RASHID, M., LIU, G., YOUSAF, B., SONG, Y., AHMED, R., REHMAN, A., ARIF, M., IRSHAD, S. y CHEEMA, A.I., 2022. Efficacy of rice husk biochar and compost amendments on the translocation, bioavailability, and heavy metals speciation in contaminated soil: Role of free radical production in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 330, [consulta: 11 marzo 2022]. ISSN 09596526. DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129805. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129805>.

- SAUM, L., JIMÉNEZ, M.B. y CROWLEY, D., 2018. Influence of biochar and compost on phytoremediation of oil-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, vol. 20, no. 1, ISSN 15497879. DOI 10.1080/15226514.2017.1337063.
- SAUVÉ, S., HENDERSHOT, W. y ALLEN, H.E., 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environmental Science and Technology*, vol. 34, no. 7, ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es9907764.
- SCHNELL, R.W., VIETOR, D.M., PROVIN, T.L., MUNSTER, C.L. y CAPAREDA, S., 2012. Capacity of Biochar Application to Maintain Energy Crop Productivity: Soil Chemistry, Sorghum Growth, and Runoff Water Quality Effects. *Journal of Environmental Quality*, vol. 41, no. 4, ISSN 00472425. DOI 10.2134/jeq2011.0077.
- SCOTT, M.P. y EMERY, M., 2016. Maize: Overview. *Reference Module in Food Science*, DOI 10.1016/B978-0-08-100596-5.00022-6.
- SENBAYRAM, M., SAYGAN, E.P., CHEN, R., AYDEMIR, S., KAYA, C., WU, D. y BLADOGATSKAYA, E., 2019. Effect of biochar origin and soil type on the greenhouse gas emission and the bacterial community structure in N fertilised acidic sandy and alkaline clay soil. *Science of the Total Environment*, vol. 660, ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.12.300.
- ŞENSÖZ, S., 2003. Slow pyrolysis of wood barks from *Pinus brutia* Ten. and product compositions. *Bioresource Technology*, vol. 89, no. 3, ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/S0960-8524(03)00059-2.
- SHEN, Z., ZHANG, J., HOU, D., TSANG, D.C.W., OK, Y.S. y ALESSI, D.S., 2019. Synthesis of MgO-coated corncob biochar and its application in lead stabilization in a soil washing residue. *Environment International*, vol. 122, no. September, ISSN 18736750. DOI 10.1016/j.envint.2018.11.045.
- SHENG, X., SUN, L., HUANG, Z., HE, L., ZHANG, W. y CHEN, Z., 2012. Promotion of growth and Cu accumulation of bio-energy crop (*Zea mays*) by

- bacteria: Implications for energy plant biomass production and phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, vol. 103, ISSN 03014797. DOI 10.1016/j.jenvman.2012.02.030.
- SHI, Y., ZANG, Y., YANG, H., ZHANG, X., SHI, J., ZHANG, J. y LIU, B., 2022. Biochar enhanced phytostabilization of heavy metal contaminated mine tailings: A review. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, ISSN 2296665X. DOI 10.3389/FENVS.2022.1044921/BIBTEX.
- SIGUA, G.C., NOVAK, J.M., WATTS, D.W., IPPOLITO, J.A., DUCEY, T.F., JOHNSON, M.G. y SPOKAS, K.A., 2019. Phytostabilization of Zn and Cd in mine soil using corn in combination with biochars and manure-based compost. *Environments - MDPI*, vol. 6, no. 6, ISSN 20763298. DOI 10.3390/environments6060069.
- SILVANA, F. y ROMERO, A., 2010. Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, vol. 13,
- SINHA, B.K., MANDAL, N.K., PAL, M. y DAS, P., 2014. Optimal Mixture Designs for Estimation of Natural Parameters in Scheffé's Models. *Lecture Notes in Statistics* [en línea], vol. 1028, [consulta: 22 abril 2022]. ISSN 21977186. DOI 10.1007/978-81-322-1786-2\_4. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-1786-2\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-1786-2_4).
- SNMPE, 2022. Lluvias y granizadas extreman ponen en riesgo de colapso a relavera Quiulacocha en Pasco - Desde Adentro. [en línea]. [consulta: 23 marzo 2023]. Disponible en: <https://www.desdeadentro.pe/2022/03/lluvias-y-granizadas-extreman-ponen-en-riesgo-de-colapso-a-relavera-quiulacocha-en-pasco/>.
- SOBRERO, M. y RONCO, A., 2004. Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L . ,
- SOZUBEK, B., BELLITURK, K. y SAGLAM, M.T., 2015. Effect of Zinc Application on Cadmium Uptake of Maize Grown in Alkaline Soil. *Communications in*

- Soil Science and Plant Analysis*, vol. 46, no. 10, ISSN 15322416. DOI 10.1080/00103624.2015.1033534.
- STEINER, C., BAYODE, A.O. y RALEBITSO-SENIOR, T.K., 2016. *Feedstock and Production Parameters: Effects on Biochar Properties and Microbial Communities*. S.I.: Elsevier Inc. ISBN 9780128034361.
- STEINER, C., GLASER, B., TEIXEIRA, W.G., LEHMANN, J., BLUM, W.E.H. y ZECH, W., 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 171, no. 6, ISSN 14368730. DOI 10.1002/JPLN.200625199.
- SUN, J., HE, F., PAN, Y. y ZHANG, Z., 2017. Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* [en línea], vol. 67, no. 1, ISSN 16511913. DOI 10.1080/09064710.2016.1214745. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1214745>.
- SUN, R., GAO, Y. y YANG, Y., 2022. Leaching of heavy metals from lead-zinc mine tailings and the subsequent migration and transformation characteristics in paddy soil. *Chemosphere*, vol. 291, ISSN 0045-6535. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132792.
- SUN, W., ZHANG, S. y SU, C., 2018. Impact of Biochar on the Bioremediation and Phytoremediation of Heavy Metal(loid)s in Soil and Phytoremediation of Heavy Metal(loid)s in Soil. , ISSN 00664804. DOI 10.5772/intechopen.70349 Abstract.
- SUPO, J., 2012. *Seminarios de Investigación Científica*. S.I.: Bioestadístico.
- TAN, Z., WANG, Y., ZHANG, L. y HUANG, Q., 2017. Study of the mechanism of remediation of Cd-contaminated soil by novel biochars. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea], vol. 24, no. 32, [consulta: 24 marzo 2023]. ISSN 16147499. DOI 10.1007/S11356-017-0109-9/METRICS. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-0109-9>.

- TASHARROFI, S., SADEGH HASSANI, S., TAGHDISIAN, H. y SOBAT, Z., 2018. Environmentally friendly stabilized nZVI-composite for removal of heavy metals. *New Polymer Nanocomposites for Environmental Remediation*. S.l.: Elsevier Inc., pp. 623-642. ISBN 9780128110348.
- TELLO PERAMÁS, L., 2018. “Eficiencia del *Amaranthus caudatus* como fitoextractor del plomo en suelos contaminados de los grandes parques de Lima Metropolitana”. S.l.: s.n.
- TITILADUNAYO, I.F., MCDONALD, A.G. y FAPETU, O.P., 2012. Effect of temperature on biochar product yield from selected lignocellulosic biomass in a pyrolysis process. *Waste and Biomass Valorization*, vol. 3, no. 3, ISSN 18772641. DOI 10.1007/S12649-012-9118-6.
- TOMCZYK, A., SOKOŁOWSKA, Z. y BOGUTA, P., 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* [en línea], vol. 19, no. 1, ISSN 15729826. DOI 10.1007/s11157-020-09523-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.
- TORTI, M., BUTTI, M. y FAIN, V., 2019. *Evolución de los indicadores de madurez y estabilidad biológica en compost de residuos de incubación* [en línea]. S.l.: s.n. [consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: [https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADig\\_9a1579ea3ec68d0e7b27fdd127365592](https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADig_9a1579ea3ec68d0e7b27fdd127365592).
- USMAN, A.R.A., AHMAD, M., EL-MAHROUKY, M., AL-OMRAN, A., OK, Y.S., SALLAM, A.S., EL-NAGGAR, A.H. y AL-WABEL, M.I., 2016. Chemically modified biochar produced from conocarpus waste increases NO<sub>3</sub> removal from aqueous solutions. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 38, no. 2, ISSN 15732983. DOI 10.1007/s10653-015-9736-6.
- UUGWANGA, M.N. y KGABI, N.A., 2020. Assessment of metals pollution in sediments and tailings of Klein Aub and Oamites mine sites, Namibia. *Environmental Advances*, vol. 2, ISSN 2666-7657. DOI 10.1016/J.ENVADV.2020.100006.

- VAN AKEN, B., 2011. Transgenic Plants and Associated Bacteria for Phytoremediation of Organic Pollutants. *Comprehensive Biotechnology, Second Edition*. S.I.: Elsevier Inc., pp. 223-237. vol. 6. ISBN 9780080885049.
- VAREDA, J.P., VALENTE, A.J.M. y DURÃES, L., 2019. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of Environmental Management*, vol. 246, ISSN 0301-4797. DOI 10.1016/J.JENVMAN.2019.05.126.
- VASUKI, Y., YU, L., HOLDEN, E.J., KOVESI, P., WEDGE, D. y GRIGG, A.H., 2019. The spatial-temporal patterns of land cover changes due to mining activities in the Darling Range, Western Australia: A Visual Analytics Approach. *Ore Geology Reviews*, vol. 108, ISSN 0169-1368. DOI 10.1016/J.OREGEOREV.2018.07.001.
- VELÁSQUEZ RAMÍREZ, M.G., BARRANTES, J.A.G., THOMAS, E., GAMARRA MIRANDA, L.A., PILLACA, M., TELLO PERAMAS, L.D. y BAZÁN TAPIA, L.R., 2020. Heavy metals in alluvial gold mine spoils in the peruvian amazon. *CATENA*, vol. 189, ISSN 0341-8162. DOI 10.1016/J.CATENA.2020.104454.
- VELÁSQUEZ RAMÍREZ, M.G., VEGA RUIZ, C.M., GOMRINGER, R.C., PILLACA, M., THOMAS, E., STEWART, P.M., GAMARRA MIRANDA, L.A., DAÑOBEYTIA, F.R., GUERRERO BARRANTES, J.A., GUSHIKEN, M.C., BARDALES, J.V., SILMAN, M., FERNANDEZ, L., ASCORRA, C. y TORRES, D. del C., 2021. Mercury in soils impacted by alluvial gold mining in the Peruvian Amazon. *Journal of Environmental Management*, vol. 288, ISSN 0301-4797. DOI 10.1016/J.JENVMAN.2021.112364.
- VIRÚ VÁSQUEZ, P.H., FOW ESTEVES, A. jeanpier, ALATA LÓPEZ, F.E., BRAVO TOLEDO, L. y VIRÚ DÍAZ, P.R., 2020. Valorización de la biomasa agropecuaria y forestal mediante la producción de biochar como una potencial tecnología sostenible. *XVI Congreso Internacional sobre Sostenibilidad Medioambiental, Cultural, Económica y Social*. S.I.: Common Ground Research Networks, pp. 129.

- VIRÚ-VÁSQUEZ, P., HUAPAYA PARDAVÉ, R., BRAVO-TOLEDO, L., FLOR, M., CORAL, C. y CURAQUEO, G., 2022. Biochar and Compost in the Soil: A Bibliometric Analysis of Scientific Research. *Environmental Research, Engineering and Management* [en línea], vol. 78, no. 3, [consulta: 7 octubre 2022]. ISSN 2029-2139. DOI 10.5755/J01.EREM.78.3.30948. Disponible en: <https://erem.ktu.lt/index.php/erem/article/view/30948>.
- VU, T.M., TRINH, V.T., DOAN, D.P., VAN, H.T., NGUYEN, T.V., VIGNESWARAN, S. y NGO, H.H., 2017. Removing ammonium from water using modified corncob-biochar. *Science of the Total Environment*, vol. 579, ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.11.050.
- WADE, C., DOLD, B. y FONTBOTÉ, L., 2006. Geochemistry and mineralogy of the Quiulacocha tailings impoundment from the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru. *International Mine Water Association* [en línea], [consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: [https://www.imwa.info/docs/imwa\\_2006/2198-Wade-CH.pdf](https://www.imwa.info/docs/imwa_2006/2198-Wade-CH.pdf).
- WALKER, D.J., CLEMENTE, R. y BERNAL, M.P., 2004. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. *Chemosphere*, vol. 57, no. 3, ISSN 00456535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2004.05.020.
- WAN, D., WU, L., LIU, Y., ZHAO, H., FU, J. y XIAO, S., 2018. Adsorption of low concentration perchlorate from aqueous solution onto modified cow dung biochar: Effective utilization of cow dung, an agricultural waste. *Science of the Total Environment*, vol. 636, no. February 2011, ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.04.431.
- WANG, B., GAO, B. y FANG, J., 2017. Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 47, no. 22, ISSN 15476537. DOI 10.1080/10643389.2017.1418580.

- WANG, J. y WANG, S., 2019. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 227, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.04.282.
- WEĞIEL, A., BIELINIS, E. y POLOWY, K., 2018. Heavy metals accumulation in Scots pine stands of different densities growing on not contaminated forest area (northwestern Poland). , vol. 3,
- WHO, 2020. Plomo. .
- WONG, M., 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, vol. 6,
- WONG, M. H., 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, vol. 50, no. 6, ISSN 0045-6535. DOI 10.1016/S0045-6535(02)00232-1.
- WU LOLI, D.A., 2020. *Evaluación de la biodegradación de la gallinaza a través del compostaje con ayuda de complejo microbiano ACF-SR (Aqua Clean) con sistema automático y monitorizado* [en línea]. S.I.: Universidad Nacional Agraria La Molina . [consulta: 15 marzo 2022]. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4516/wu-loli-diego-antonio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- WUANA, R. y OKIEIMEN, F., 2010. Phytoremediation Potential of Maize (*Zea mays* L.). A Review Production of biomethane from agricultural wastes View project. [en línea]. S.I.: Disponible en: <http://www.asopah.org>.
- WUANA, R.A. y OKIEIMEN, F.E., 2011. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Notices* , vol. 2011, ISSN 2090-4614. DOI 10.5402/2011/402647.
- WUANA, R.A., OKIEIMEN, F.E. y IMBORVUNGU, J.A., 2010. Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. *International Journal of Environmental Science and Technology* [en línea], vol. 7, no. 3, [consulta: 31 marzo 2023]. ISSN 17352630. DOI

- 10.1007/BF03326158/METRICS. Disponible en:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03326158>.
- XU, D.M., ZHAN, C.L., LIU, H.X. y LIN, H.Z., 2019. A critical review on environmental implications, recycling strategies, and ecological remediation for mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 35, ISSN 16147499. DOI 10.1007/S11356-019-06555-3.
- YAN, T., XUE, J., ZHOU, Z. y WU, Y., 2021. Impacts of biochar-based fertilization on soil arbuscular mycorrhizal fungal community structure in a karst mountainous area. *Environmental Science and Pollution Research 2021 28:46* [en línea], vol. 28, no. 46, [consulta: 8 julio 2022]. ISSN 1614-7499. DOI 10.1007/S11356-021-15499-6. Disponible en:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-15499-6>.
- YANG, C., LI, R., ZHANG, B., QIU, Q., WANG, B., YANG, H., DING, Y. y WANG, C., 2019. Pyrolysis of microalgae: A critical review. *Fuel Processing Technology*, vol. 186, no. September 2018, ISSN 03783820. DOI 10.1016/j.fuproc.2018.12.012.
- YANG, S.X., LIAO, B., YANG, Z.H., CHAI, L.Y. y LI, J.T., 2016. Revegetation of extremely acid mine soils based on aided phytostabilization: A case study from southern China. *Science of the Total Environment*, vol. 562, ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.03.208.
- YU, H., ZOU, W., CHEN, J., CHEN, H., YU, Z., HUANG, J., TANG, H., WEI, X. y GAO, B., 2019. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management*, vol. 232, ISSN 0301-4797. DOI 10.1016/J.JENVMAN.2018.10.117.
- ZAFAR-UL-HYE, M., TAHZEEB-UL-HASSAN, M., ABID, M., FAHAD, S., BRTNICKY, M., DOKULILOVA, T., DATTA, R. y DANISH, S., 2020. potential role of compost mixed biochar with rhizobacteria in mitigating lead toxicity in spinach. *Scientific RepoRtS* |, vol. 10, DOI 10.1038/s41598-020-69183-9.
- ZALEWSKA, T. y DANOWSKA, B., 2017. Marine environment status assessment based on macrophytobenthic plants as bio-indicators of heavy metals

- pollution. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 118, no. 1-2, ISSN 0025-326X. DOI 10.1016/J.MARPOLBUL.2017.02.075.
- ZHANG, H., DANG, Z., ZHENG, L.C. y YI, X.Y., 2009. Remediation of soil co-contaminated with pyrene and cadmium by growing maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Environmental Science & Technology* 2009 6:2 [en línea], vol. 6, no. 2, [consulta: 13 marzo 2022]. ISSN 1735-2630. DOI 10.1007/BF03327629. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03327629>.
- ZHANG, R.H., LI, Z.G., LIU, X.D., WANG, B. cai, ZHOU, G.L., HUANG, X.X., LIN, C.F., WANG, A. hua y BROOKS, M., 2017. Immobilization and bioavailability of heavy metals in greenhouse soils amended with rice straw-derived biochar. *Ecological Engineering*, vol. 98, ISSN 0925-8574. DOI 10.1016/J.ECOLENG.2016.10.057.
- ZHANG, W., MAO, S., CHEN, H., HUANG, L. y QIU, R., 2013. Pb(II) and Cr(VI) sorption by biochars pyrolyzed from the municipal wastewater sludge under different heating conditions. *Bioresource Technology*, vol. 147, no. 41371315, ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2013.08.082.
- ZHANG, X., ZHAO, B., LIU, H., ZHAO, Y. y LI, L., 2022. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology and Innovation* [en línea], vol. 26, ISSN 23521864. DOI 10.1016/j.eti.2022.102288. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>.
- ZHAO, B. y FILONCHYK, M., 2019. Characterization of biochars derived from maize straw and corn cob and effects of their amendment on maize growth and loess soil properties. , no. February 2018,
- ZHAOXIANG, W., HUIHU, L., QIAOLI, L., CHANGYAN, Y. y FAXIN, Y., 2020. Application of bio-organic fertilizer, not biochar, in degraded red soil improves soil nutrients and plant growth. *Rhizosphere*, vol. 16, ISSN 24522198. DOI 10.1016/j.rhisph.2020.100264.

ZHOU, L.X. y WONG, J.W.C., 2001. Effect of Dissolved Organic Matter from Sludge and Sludge Compost on Soil Copper Sorption. *Journal of Environmental Quality*, vol. 30, no. 3, DOI 10.2134/jeq2001.303878x.

ZORNOZA, R., ACOSTA, J.A., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S., FAZ, A. y BÅÅTH, E., 2015. Main factors controlling microbial community structure and function after reclamation of a tailing pond with aided phytostabilization. *Geoderma*, vol. 245-246, ISSN 00167061. DOI 10.1016/j.geoderma.2015.01.007.

**Anexo 01. Matriz de consistencia**

<b>“APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN-COMPOST EN LA FITORREMIEDIACIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO USANDO <i>Zea mays</i> EN SUELOS CONTAMINADOS CON RELAVES MINEROS, CERRO DE PASCO, 2021”</b>											
Problema general	Objetivo General	Hipótesis general	Variable independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Método	Técnica	Población y Muestra
¿En qué medida la aplicación del biocarbón-compost influye en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros?	Evaluar la influencia de la aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros.	La aplicación del biocarbón-compost influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros.	Aplicación del biocarbón-compost	La aplicación del biocarbón-compost hace referencia al propósito de utilizar deliberadamente biocarbón y compost en el suelo (Oldfield et al. 2018) . Esto puede realizarse mediante la mezcla directa de estos materiales en el suelo, en proporciones o porcentaje en el suelo (Novak et al. 2019)	La aplicación biocarbón-compost en el suelo con relave se medirá en función de la dosis teniendo en cuenta el tiempo de pirólisis del biocarbón	Temperatura biocarbón	Temperatura de pirólisis	300°C 500°C	Método: cuantitativo- deductivo	La observación	Población: Suelos contaminados con relaves mineros en Cerros de Pasco.
						Dosificación de biocarbón-compost	(kg)de biocarbón-compost kg/ (kg) de relave	0.16 kg biocarbón - compost/ kg relave  0.08 kg biocarbón - compost/ kg relave			
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices			
¿En qué medida la temperatura de pirólisis del biocarbón influye en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros?	Determinar la influencia de la temperatura de pirólisis del biocarbón en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros.	La temperatura de la pirólisis del biocarbón influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros.	Fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i>	La fitorremediación es una técnica que consiste en el uso de plantas para remediar sitios contaminados, pudiendo estos ser relaves mineros (Gama Retamozo 2019). La fitorremediación de arsénico y plomo utilizando <i>Zea mays</i> es un procedimiento mediante el cual se cultiva la planta de maíz en suelos que están contaminados con niveles elevados de arsénico y plomo (Ansari et al. 2015; Fowler et al. 2015)	La fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros es medida a través de las características fisicoquímicas del suelo contaminado con relaves mineros	Características fisicoquímicas del suelo	pH	0-14	Método: cuantitativo- deductivo	La observación	Muestra: 24,3 Kg de Relave Minero Seco.
							Conductividad Eléctrica	uS/cm			
¿En qué medida la dosificación biocarbón-compost influye en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros?	Determinar la influencia de la dosificación biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros.	La dosificación biocarbón-compost influye de manera significativa en la fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros.	Fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i>	La fitorremediación de arsénico y plomo utilizando <i>Zea mays</i> es un procedimiento mediante el cual se cultiva la planta de maíz en suelos que están contaminados con niveles elevados de arsénico y plomo (Ansari et al. 2015; Fowler et al. 2015)	La fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros es medida a través de las características fisicoquímicas del suelo contaminado mediante los indicadores: pH, conductividad N, P, K, entre otros; así también, con la capacidad fitorremediadora de la planta <i>Zea mays</i> , y también del desarrollo vegetativo de la planta.	Características fisicoquímicas del suelo	N, P, K	%	Método: cuantitativo- deductivo	La observación	Muestra: 24,3 Kg de Relave Minero Seco.
							Acidez cambiante	cmol/L			
							Textura	-			
							Estructura	-			
							Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g			
			Fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i>	La fitorremediación de arsénico y plomo utilizando <i>Zea mays</i> es un procedimiento mediante el cual se cultiva la planta de maíz en suelos que están contaminados con niveles elevados de arsénico y plomo (Ansari et al. 2015; Fowler et al. 2015)	La fitorremediación de arsénico y plomo usando <i>Zea mays</i> en suelos contaminados con relaves mineros es medida a través de las características fisicoquímicas del suelo contaminado mediante los indicadores: pH, conductividad N, P, K, entre otros; así también, con la capacidad fitorremediadora de la planta <i>Zea mays</i> , y también del desarrollo vegetativo de la planta.	Capacidad fitorremediadora de <i>Zea mays</i>	Concentración de arsénico y plomo en el suelo	mg/kg	Método: cuantitativo- deductivo	La observación	Muestra: 24,3 Kg de Relave Minero Seco.
							Concentración de arsénico y plomo en la parte aérea de la planta (hojas)	mg/kg			
							Concentración de arsénico y plomo en la raíz de la planta	mg/kg			
	Factor de bioacumulación aéreo (FBA)	Adimensional									Tipo de muestreo: No probabilístico

Factor de  
bioacumulación  
Radicular (FBR) Adimensional

Factor de Traslocación  
(FT) Adimensional

Desarrollo vegetativo  
de la planta Altura de la planta cm

---

## Anexo 02. Validación de los Instrumentos

### ANEXO N°3.

#### CARTA DE PRESENTACIÓN.

Señor: Dr. Gustavo Curaqueo

Presente.

Asunto: **Validación de instrumento a través de juicio de experto**

Nos es grato comunicarnos con usted para expresarle nuestra estima y saludos, así mismo para hacer de su conocimiento, que siendo Bachilleres de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, requerimos validar los instrumentos con los cuales recogeremos información para desarrollar nuestra investigación y con la cual optaremos el grado de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales. El nombre de nuestra investigación titula **"APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN-COMPOST EN LA FITORREMEDIAÇÃO DE ARSÉNICO Y PLOMO USANDO ZEA MAYS EN SUELOS CONTAMINADOS CON RELAVES MINEROS, CERRO DE PASCO, 2021"**.

Siendo importante contar con expertos en la materia, hemos considerado apropiado recurrir a usted, ante su extensa experiencia en temas biocarbón y fitorremediación de metales pesados.

El expediente de validación, que le hacemos llegar contiene lo siguiente:

1. *Criterios para validar el instrumento.*
2. *Matriz de operacionalización*
3. *Definición conceptual de las variables.*
4. *Instrumentos.*

Expresando nuestro sentimiento de gratitud, respeto y consideración nos despedimos de usted, no sin antes agradecerle por la atención brindada.

**Atentamente,**

	
Bach. Paul Hermes Virú Vásquez	Bach. Franco Rodrigo Vega Guevara
DNI: 72881590	DNI: 70808550

### 1. Ficha de criterio para validar el instrumento

#### I. Datos generales:

- 1.1. Apellidos y Nombres del validador: Ing. / Ms.Sc. / Dr. Dr. GUSTAVO CURAQUEO FUENTES
- 1.2. Cargo donde labora: Profesor Asistente. Departamento de Ciencias Agropecuarias y Acuícolas. Facultad de Recursos Naturales.
- 1.3. Institución donde labora: Universidad Católica de Temuco
- 1.4. Especialidad del validador Especialista en Agricultura, Ciencias Ambientales, Procesos de fitorremediación de ambientes contaminados con metales pesados, Enmiendas mejoradoras del suelo.
- 1.5. Años de experiencia: 13 años

#### II. Aspectos de validación:

Colocar un valor específico términos de porcentaje para cada ítem.

Criterios	Indicadores	Deficiente (0-20%)	Regular (21 -40%)	Bueno (41 -60%)	Muy bueno (61 -80%)	Excelente ( 81 - 100%)
1. Claridad	Esta formulado con lenguaje apropiado y específico					100%
2. Objetividad	Esta expresado en conductas observables					100%
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y tecnología					95%
4. Organización	Existe una organización lógca					100%
5. Suficiencia	Comprende los aspectos teóricos-científicos					100%
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de las estrategias					100%
7. Consistencia	Basados en aspectos teóricos-científicos					100%
8. Coherencia	Entre los índices, indicadores y dimensiones					95%
9. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnóstico					100%
10. Pertinencia	El instrumento es funcional para el propósito de la investigación					100%
Promedio de validación						99%

#### III. Pertinencia de los ítems o reactivos del instrumento.

Colocar check o (X) donde corresponda.

Variable	Dimensión	Suficiente	Medianamente suficiente	Insuficiente
Variable Independiente: Aplicación del biocarbón-compost	Dosificación de biocarbón-compost	x		
	temperatura de pirolisis del biocarbón			x
Variable dependiente: Fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros	Características fisicoquímicas del suelo contaminado con relaves mineros	x		
	Capacidad fitorremediadora de Zea mays	x		

	Desarrollo vegetativo de la planta	x		
--	------------------------------------	---	--	--

**IV. Promedio de valoración: 99%**

( x ) El instrumento puede ser aplicado, tal como esta elaborado.

( ) El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado.

*Nota. En general me parece que la estructura del instrumento está muy bien diseñado. Indiqué algunas correcciones menores que en ningún caso no le quitan validez a la investigación propuesta. El único ítem que a mi juicio está deficitario es establecer el tiempo de pirólisis del material con el cual se elaborará el biocarbón o biochar. Recomiendo utilizar un tiempo de residencia de la biomasa en el pirolizador de al menos 2 horas. Sugeriría si es posible poder obtener los índices O/C y H/C ratio en el biochar para constatar un índice de degradación (O/C ratio), así como la posibilidad de facilitar los procesos de adsorción de los contaminantes (H/C ratio).*

*En síntesis es una muy buena propuesta de investigación que espero llegue a interesantes resultados.*



Firma del experto

Nombre y Apellido: Dr. Gustavo Curaqueo Fuentes

Correo electrónico: gcuraqueo@uct.cl

ANEXO N°3.  
CARTA DE PRESENTACIÓN.

Señor (a): Ing. Anthony Jeanpier Fow Esteves

Presente.

Asunto: Validación de instrumento a través de juicio de experto

Nos es grato comunicarnos con usted para expresarle nuestra estima y saludos, así mismo para hacer de su conocimiento, que siendo Bachilleres de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, requerimos validar los instrumentos con los cuales recogeremos información para desarrollar nuestra investigación y con la cual optaremos el grado de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales. El nombre de nuestra investigación titula "APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN-COMPOST EN LA FITORREMIEDIACIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO USANDO ZEA MAYS EN SUELOS CONTAMINADOS CON RELAVES MINEROS, CERRO DE PASCO, 2021".

Siendo importante contar con expertos en la materia, hemos considerado apropiado recurrir a usted, ante su extensa experiencia en temas biocarbón y fitorremediación de metales pesados.

El expediente de validación, que le hacemos llegar contiene lo siguiente:

1. Criterios para validar el instrumento.
2. Matriz de operacionalización
3. Definición conceptual de las variables.
4. Instrumentos.

Expresando nuestro sentimiento de gratitud, respeto y consideración nos despedimos de usted, no sin antes agradecerle por la atención brindada.

Atentamente,

	
Bach. Paul Hermes Virú Vásquez DNI: 72881590	Bach. Franco Rodrigo Vega Guevara DNI: 70808550

### 1. Ficha de criterio para validar el instrumento

#### I. Datos generales:

- 1.1. Apellidos y Nombres del validador: Ing. / Ms.Sc. / Dr. JOW ESTEVES ANTHONY J.  
 1.2. Cargo donde labora: CONSULTOR  
 1.3. Institución donde labora: INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION EN GUAYARÉ Y EC. MONTAÑA  
 1.4. Especialidad del validador: INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES  
 1.5. Años de experiencia: 3

#### II. Aspectos de validación:

Colocar un valor específico términos de porcentaje para cada ítem.

Criterios	Indicadores	Deficiente (0-20%)	Regular (21-40%)	Bueno (41-60%)	Muy bueno (61-80%)	Excelente (81-100%)
1. Claridad	Esta formulado con lenguaje apropiado y específico					100%
2. Objetividad	Esta expresado en conductas observables					100%
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y tecnología					85%
4. Organización	Existe una organización lógica					100%
5. Suficiencia	Comprende los aspectos teóricos-científicos					90%
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de las estrategias					90%
7. Consistencia	Basados en aspectos teóricos-científicos					85%
8. Coherencia	Entre los índices, indicadores y dimensiones					100%
9. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnóstico					100%
10. Pertinencia	El instrumento es funcional para el propósito de la investigación					100%
Promedio de validación		-	-	-	-	95%

#### III. Pertinencia de los ítems o reactivos del instrumento.

Colocar check donde corresponda.

Variable	Dimensión	Suficiente	Medianamente suficiente	Insuficiente
Variable Independiente: Aplicación del biocarbón-compost	Dosificación de biocarbón-compost	✓		
	Tiempo de pirolisis del biocarbón	✓		
Variable dependiente: Fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros	Características fisicoquímicas del suelo contaminado con relaves mineros	✓		
	Capacidad fitorremediadora de Zea mays	✓		
	Desarrollo vegetativo de la planta	✓		

IV. Promedio de valoración: 95 %

El instrumento puede ser aplicado, tal como esta elaborado.

El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado.



Firma del experto

Nombre y Apellido: ANTHONY JEANPIER FOW ESTEVES

Correo electrónico: [ajfe081@gmail.com](mailto:ajfe081@gmail.com)

**ANEXO N°3.**  
**CARTA DE PRESENTACIÓN.**

Señor (a): Ph.D. Mary Flor Cesaré Coral

Presente.

**Asunto: *Validación de instrumento a través de juicio de experto***

Nos es grato comunicarnos con usted para expresarle nuestra estima y saludos, así mismo para hacer de su conocimiento, que siendo Bachilleres de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, requerimos validar los tres instrumentos con los cuales recogeremos información para desarrollar nuestra investigación y con la cual optaremos el grado de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales. El nombre de nuestro proyecto de investigación titula "APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN-COMPOST EN LA FITORREMEDIACIÓN DE ARSÉNICO Y PLOMO USANDO ZEA MAYS EN SUELOS CONTAMINADOS CON RELAVES MINEROS, CERRO DE PASCO, 2021".

Siendo importante contar con expertos en la materia, hemos considerado apropiado recurrir a usted, ante su extensa experiencia en temas biocarbón, compost y fitorremediación de metales pesados.

El expediente de validación, que le hacemos llegar contiene lo siguiente:

1. *Criterios para validar el instrumento.*
2. *Matriz de operacionalización*
3. *Definición conceptual de las variables.*
4. *Instrumentos.*

Expresando nuestro sentimiento de gratitud, respeto y consideración nos despedimos de usted, no sin antes agradecerle por la atención brindada.

**Atentamente,**

	
Bach. Paul Hermes Virú Vásquez	Bach. Franco Rodrigo Vega Guevara
DNI: 72881590	DNI: 70808550

### 1. Ficha de criterio para validar el instrumento

#### I. Datos generales:

- 1.1. Apellidos y Nombres del validador: Dr. Césare Coral, Mary Flor
- 1.2. Cargo donde labora: Profesor Principal
- 1.3. Institución donde labora: Universidad Nacional Agraria La Molina- Dpto. Química- Facultad de Ciencias
- 1.4. Especialidad del validador: Ciencias e Ingeniería Ambiental
- 1.5. Años de experiencia: 20 años

#### II. Aspectos de validación:

Colocar un valor específico términos de porcentaje para cada ítem.

Criterios	Indicadores	Deficiente (0-20%)	Regular 21 -40%)	Bueno (41 -60%)	Muy bueno (61 -80%)	Excelente ( 81 - 100%)
1. Claridad	Esta formulado con lenguaje apropiado y específico					81
2. Objetividad	Esta expresado en conductas   observables					81
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y tecnología					90
4. Organización	Existe una organización lógica					85
5. Suficiencia	Comprende los aspectos teóricos-científicos					90
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de las estrategias					90
7. Consistencia	Basados en aspectos teóricos-científicos					100
8. Coherencia	Entre los índices, indicadores y dimensiones					81
9. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnóstico					90
10. Pertinencia	El instrumento es funcional para el propósito de la investigación					95
Promedio de validación						81

#### III. Pertinencia de los ítems o reactivos del instrumento.

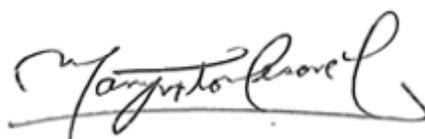
Colocar check donde corresponda.

Variable	Dimensión	Suficiente	Medianamente suficiente	Insuficiente
Variable Independiente: Aplicación del biocarbón-compost	Dosificación de biocarbón-compost en relaves	✓		
	Tiempo de pirolisis del biocarbón	✓		
Variable dependiente: Fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros	Características fisicoquímicas del suelo contaminado con relaves mineros	✓		
	Capacidad fitorremediadora de Zea mays	✓		
	Desarrollo vegetativo de la planta	✓		

**IV. Promedio de valoración: 81 %**

( X) El instrumento puede ser aplicado, tal como esta elaborado.

( ) El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado.



---

*Firma del experto:*

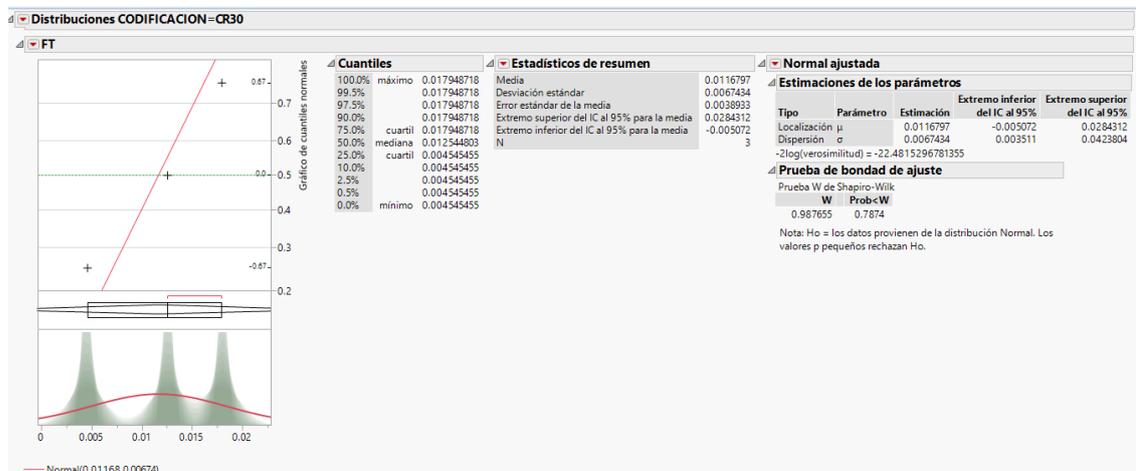
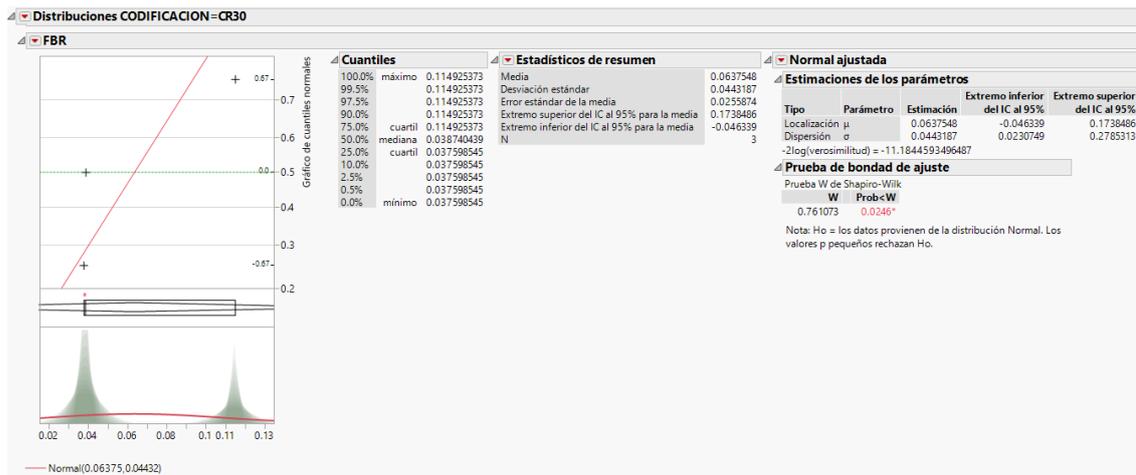
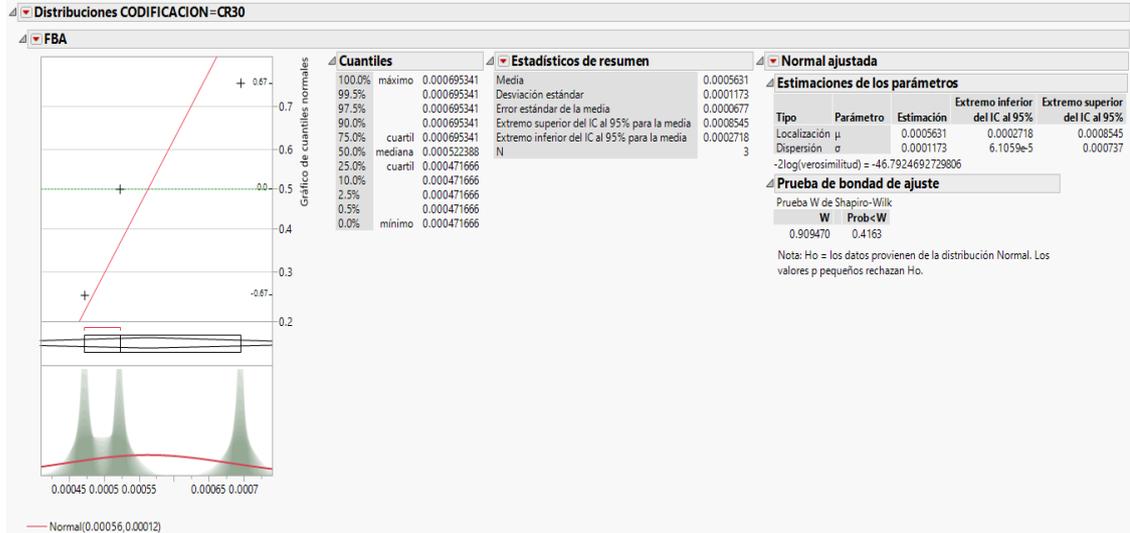
*Nombre y Apellido: Dr. Mary Flor Cesaré Coral*

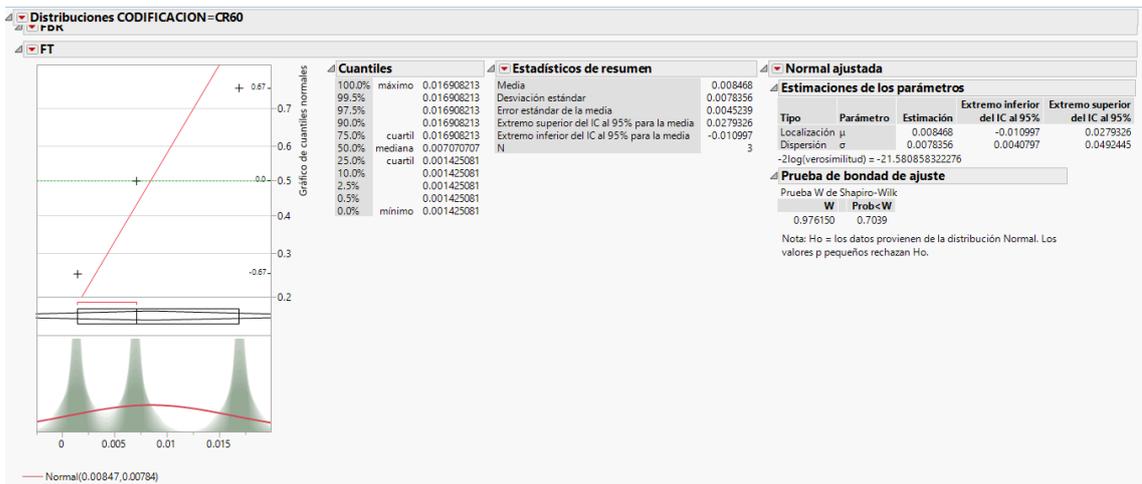
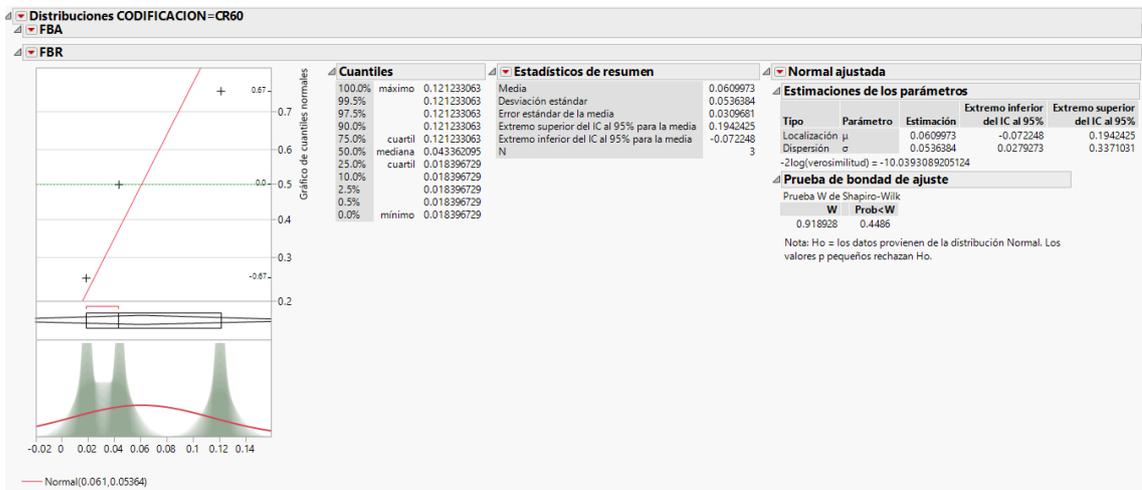
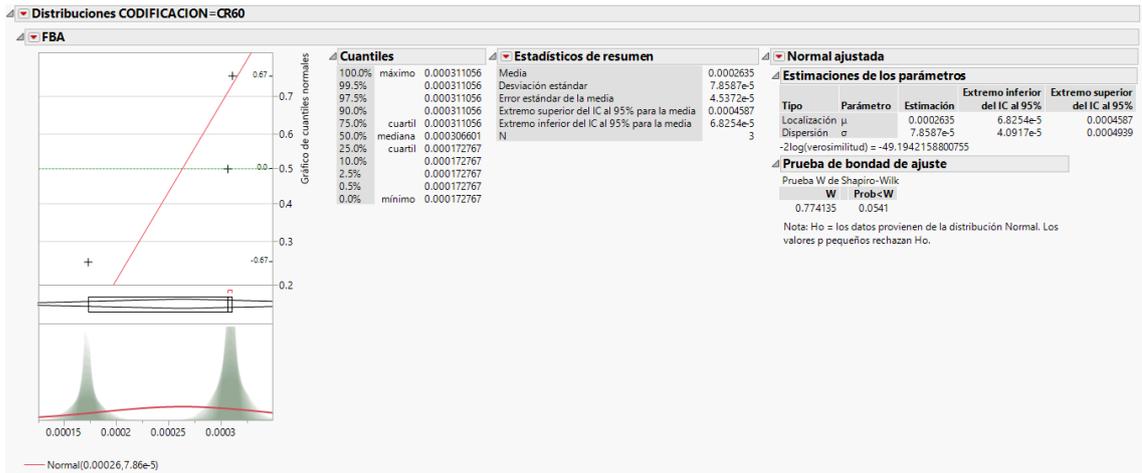
*Correo electrónico: [mcesare@lamolina.edu.pe](mailto:mcesare@lamolina.edu.pe)*

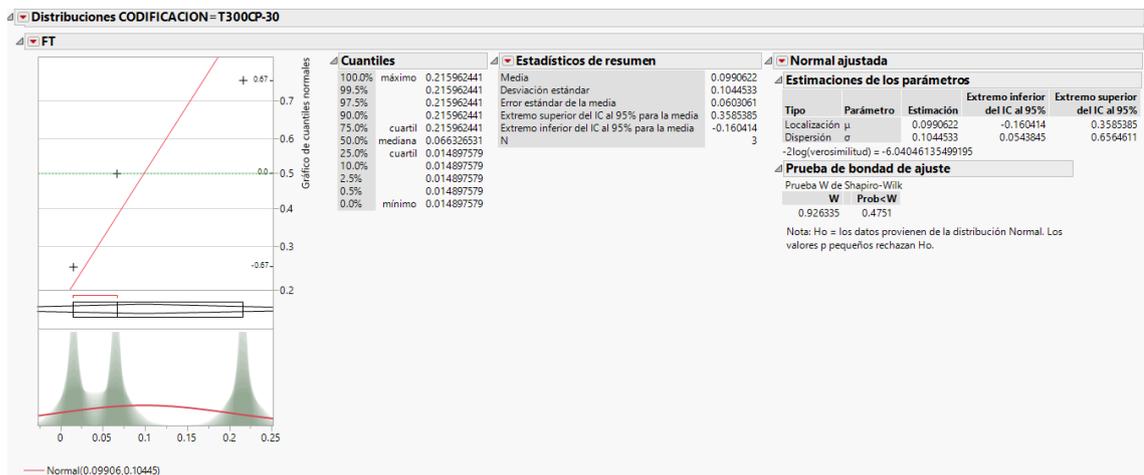
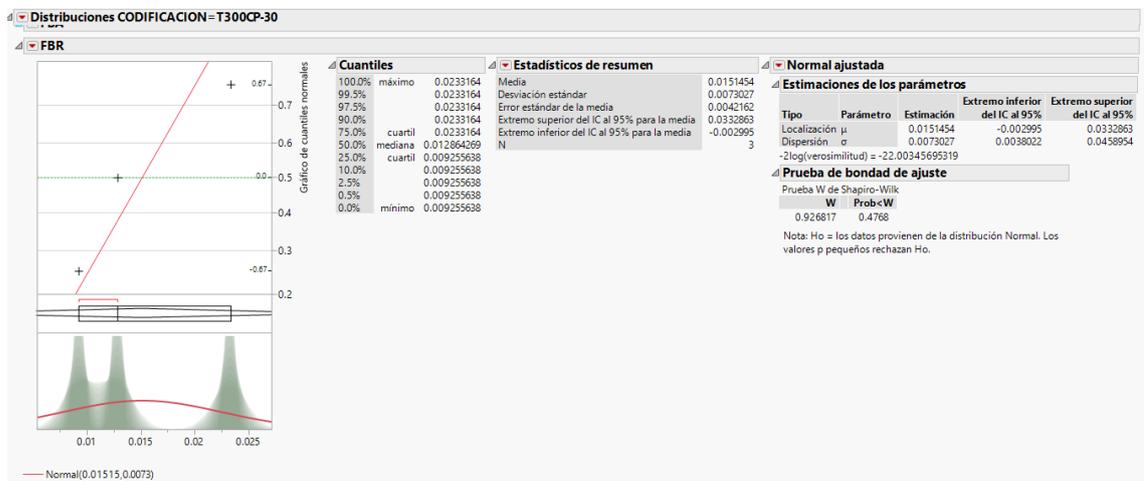
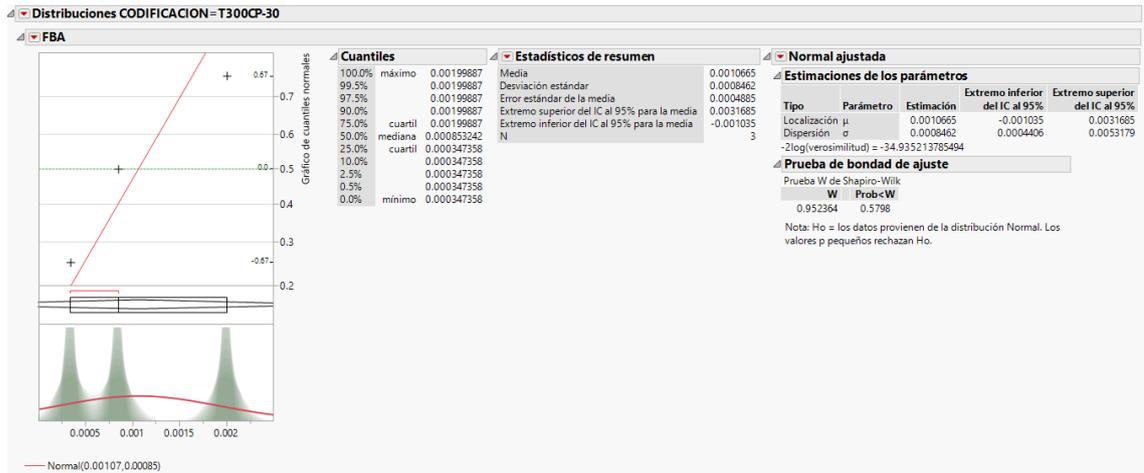
*DNI: 25731842*

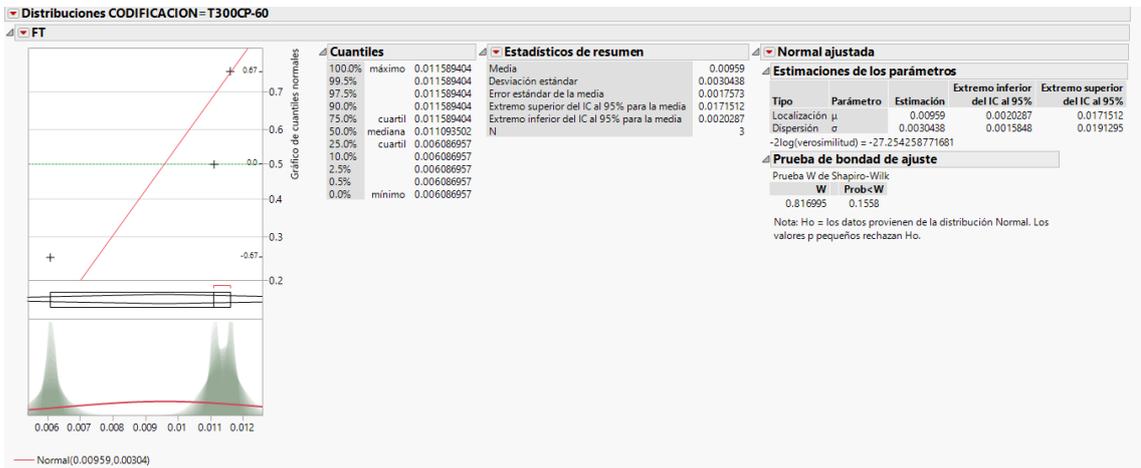
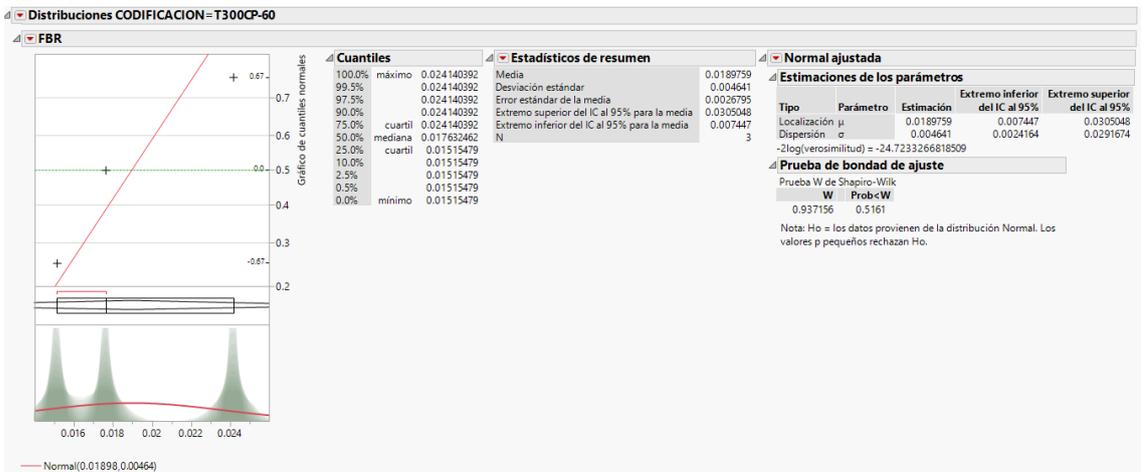
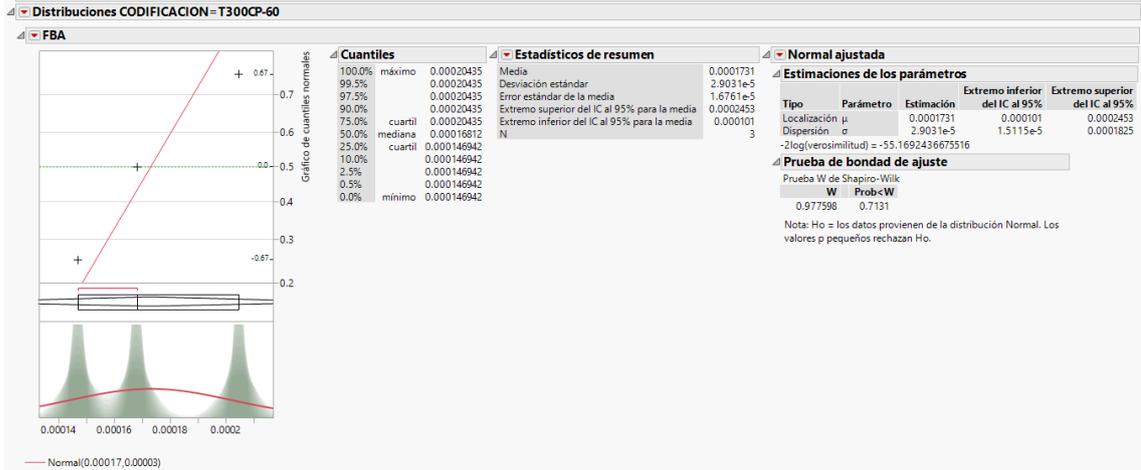
## Anexo 03. Resultados de Normalidad

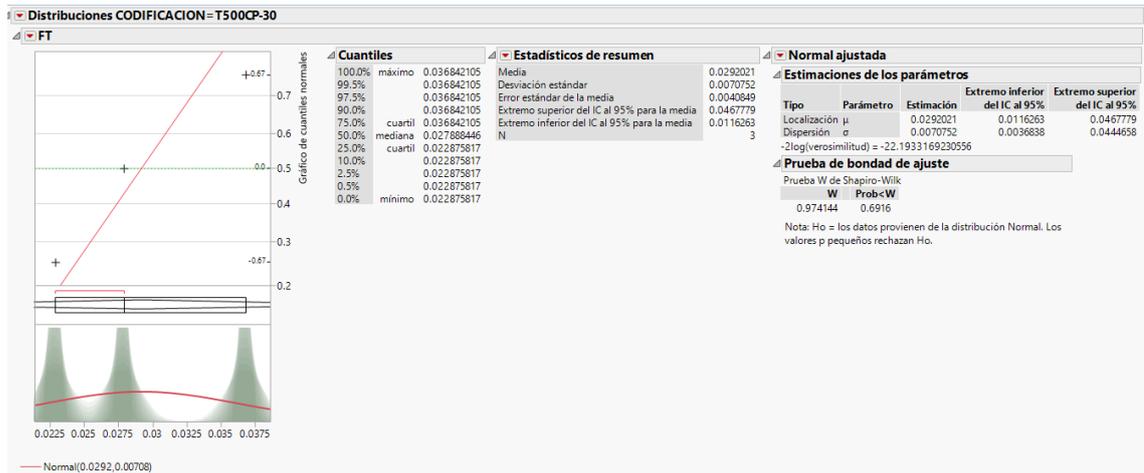
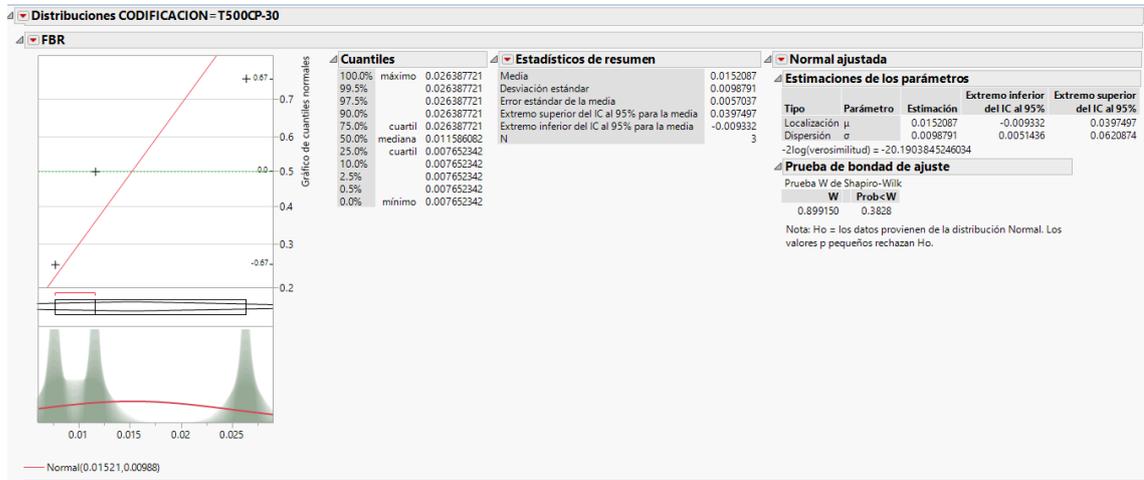
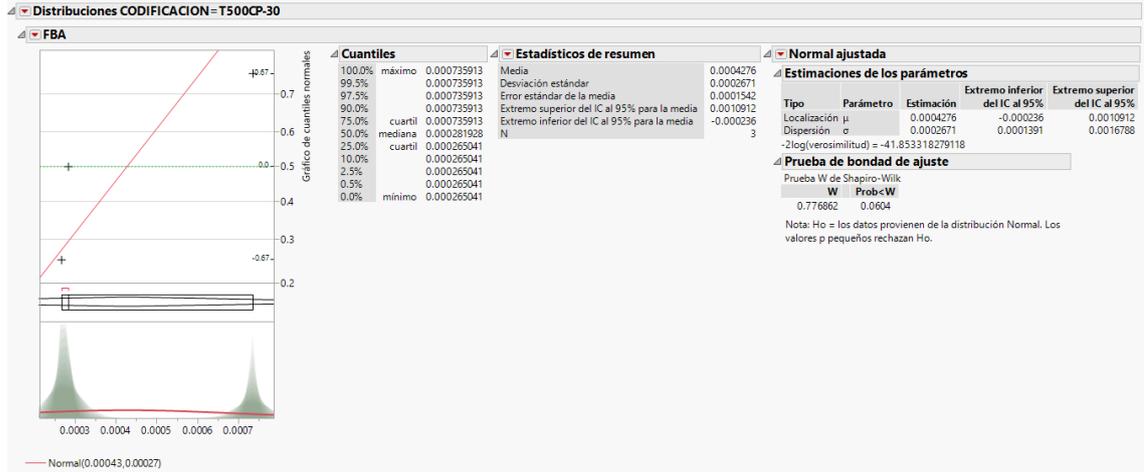
### 3.1. Prueba de normalidad para el As, usando el Software JMP.

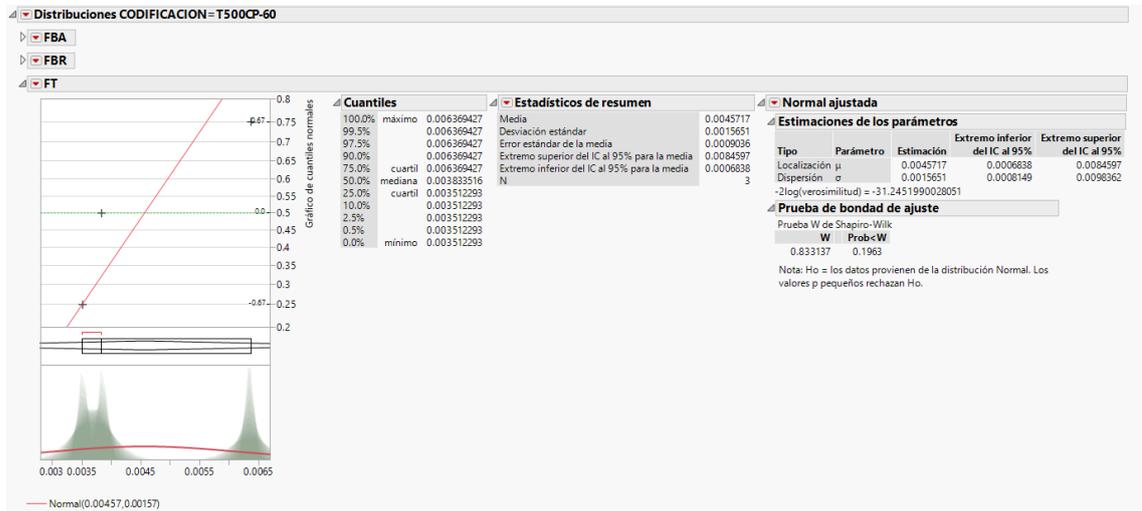
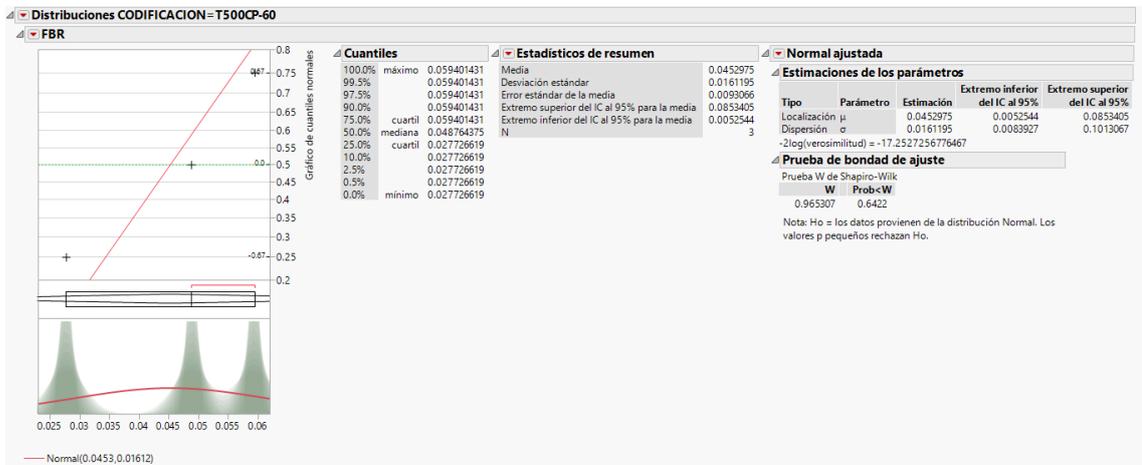




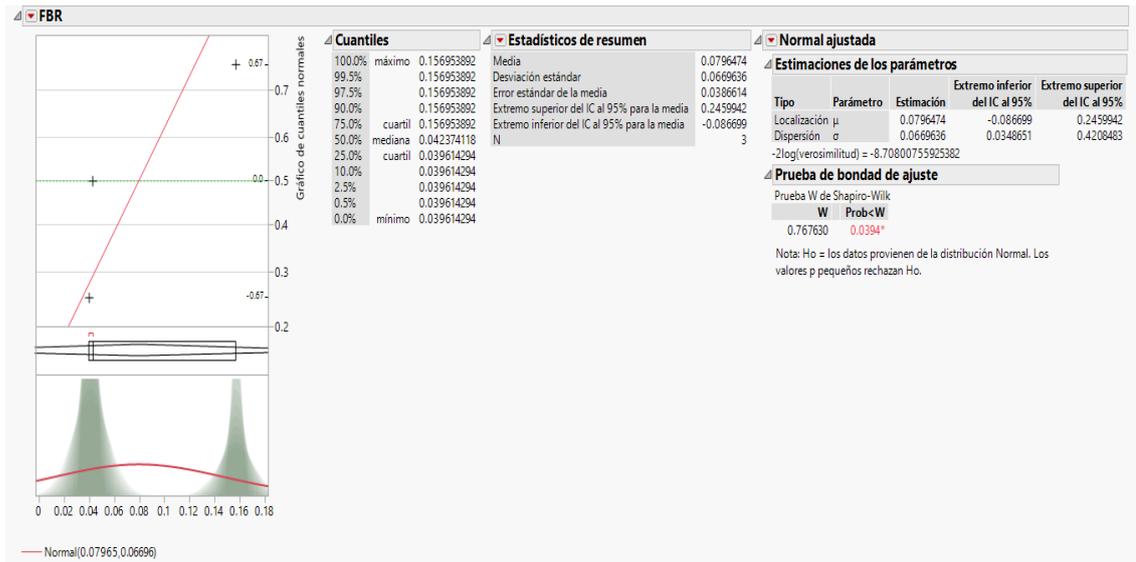
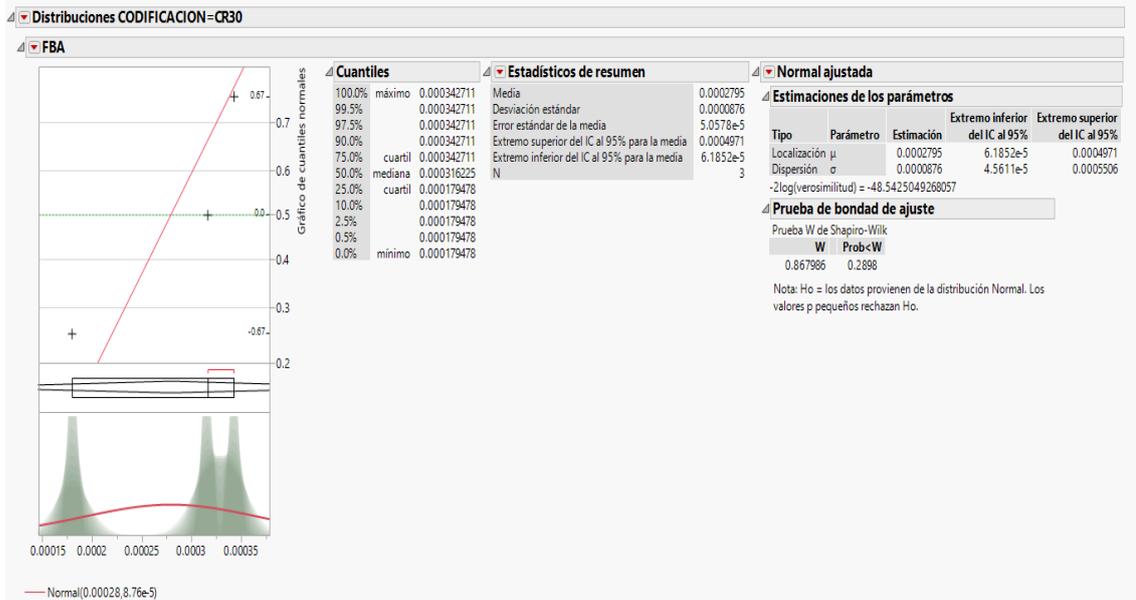


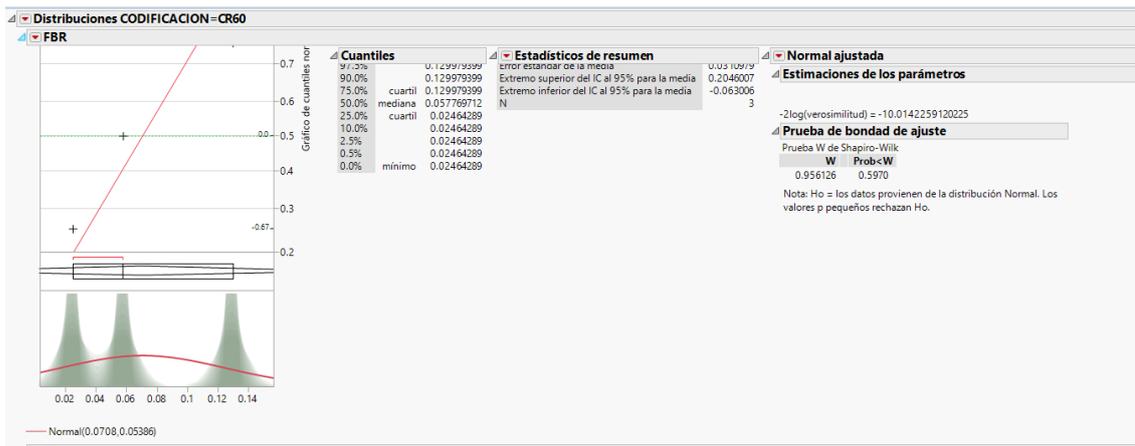
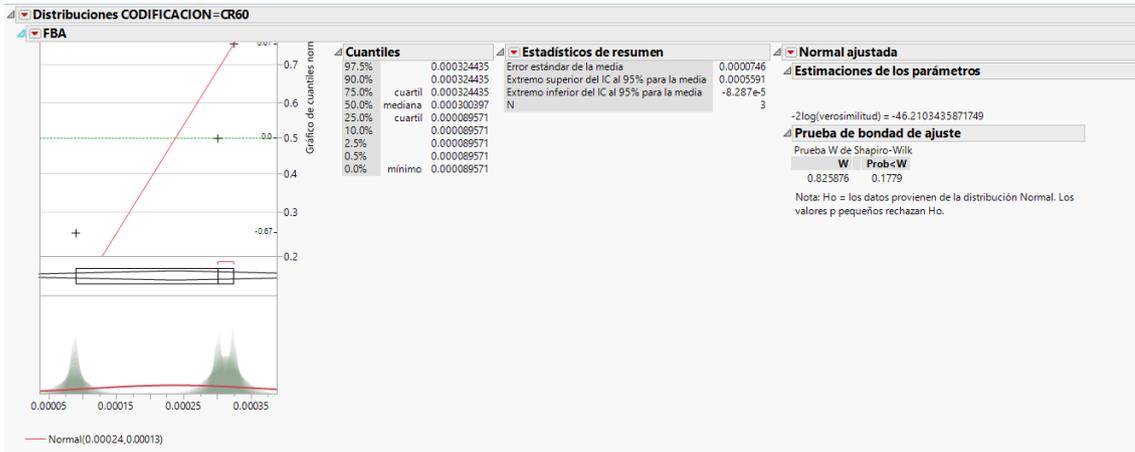
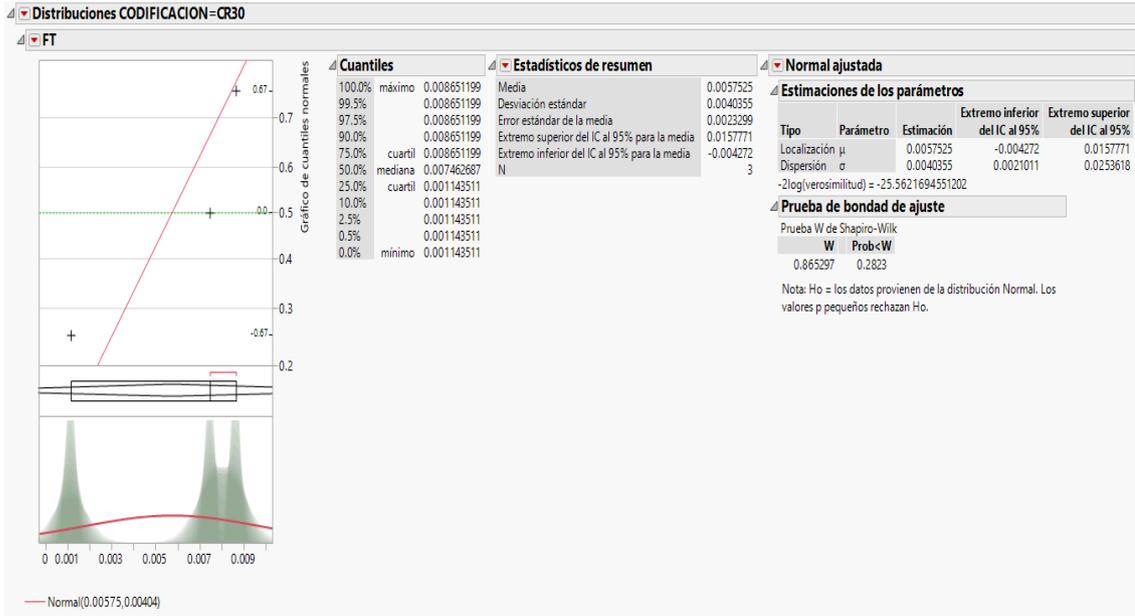


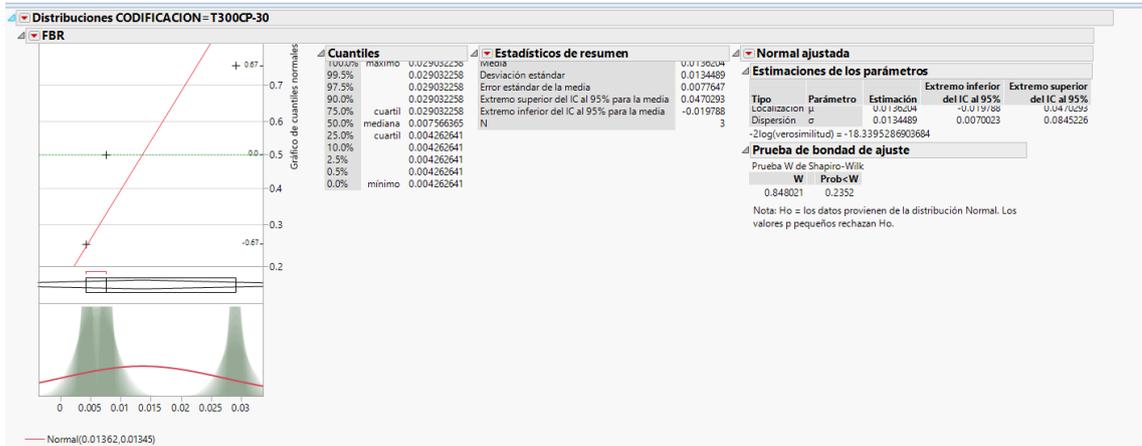
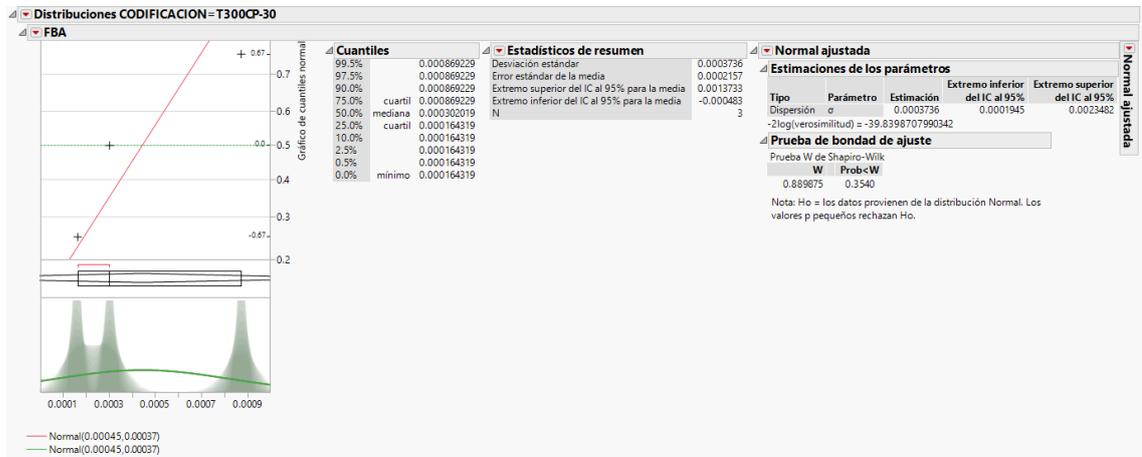
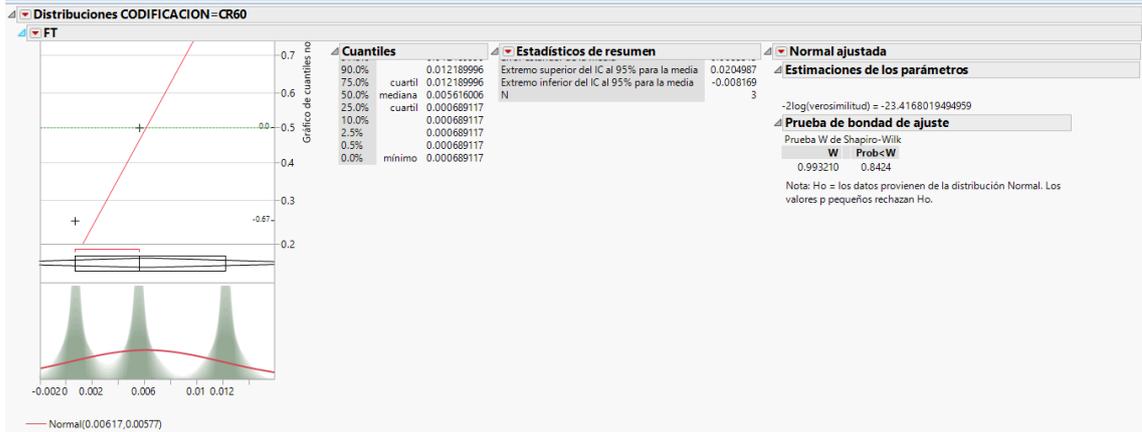


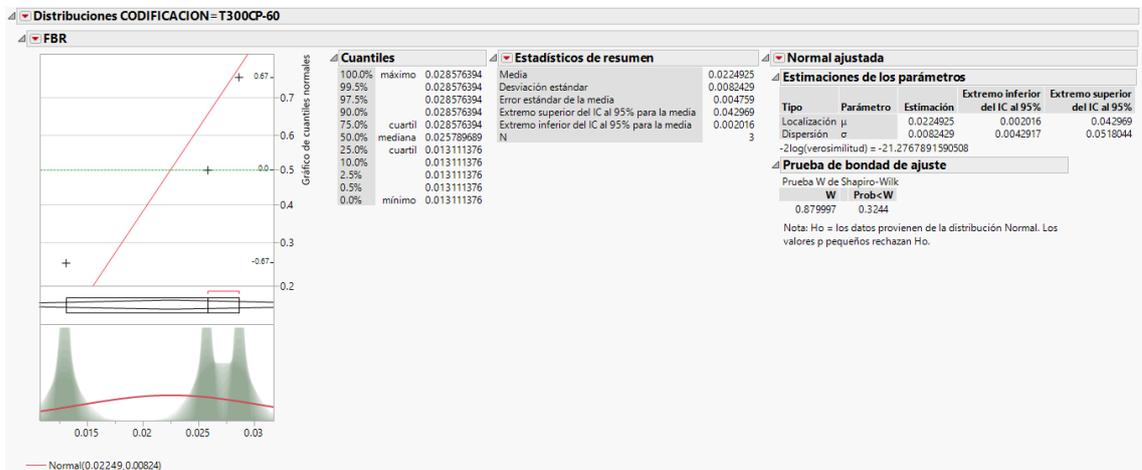
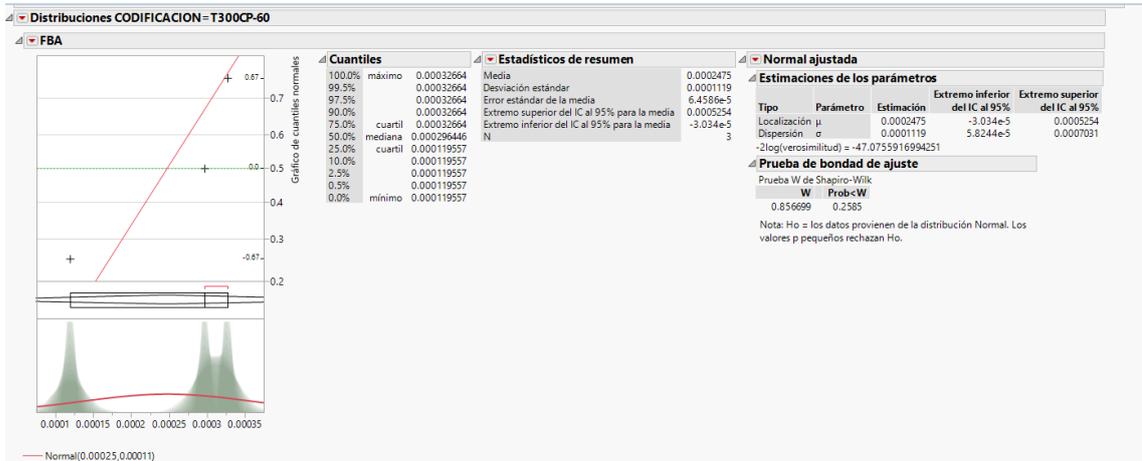
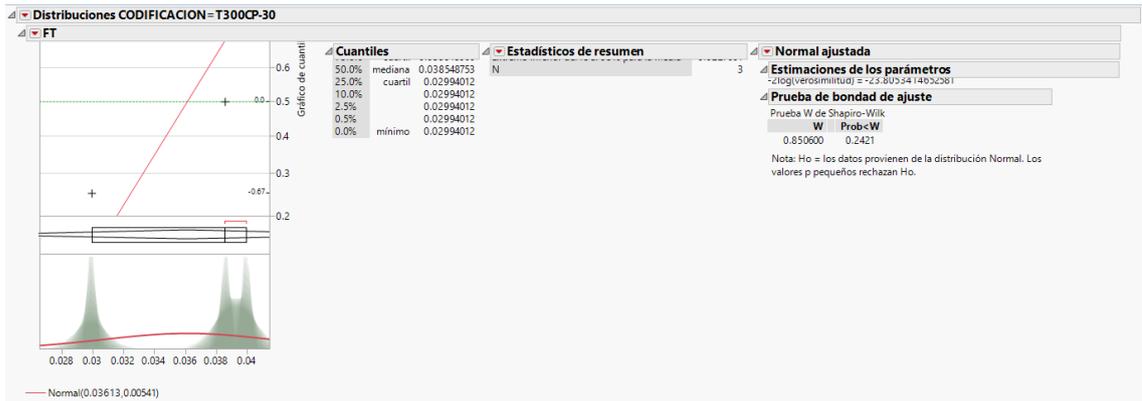


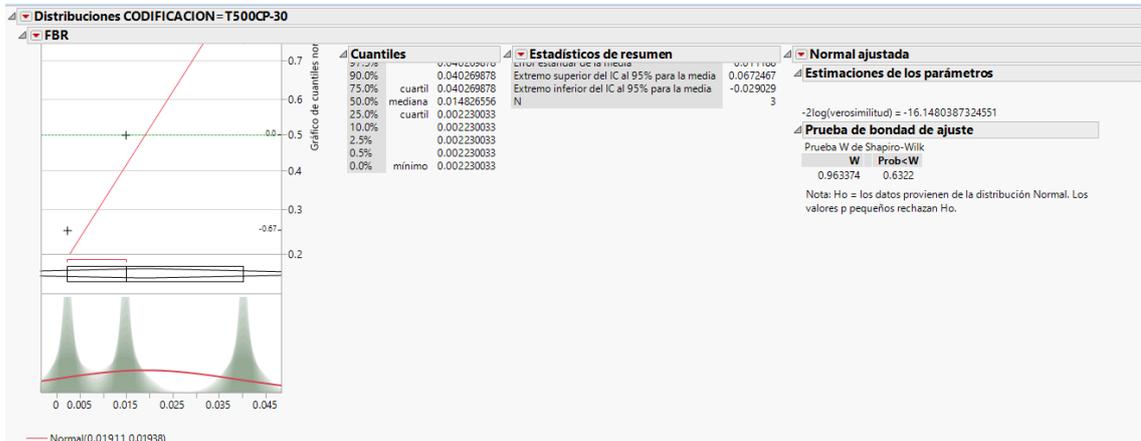
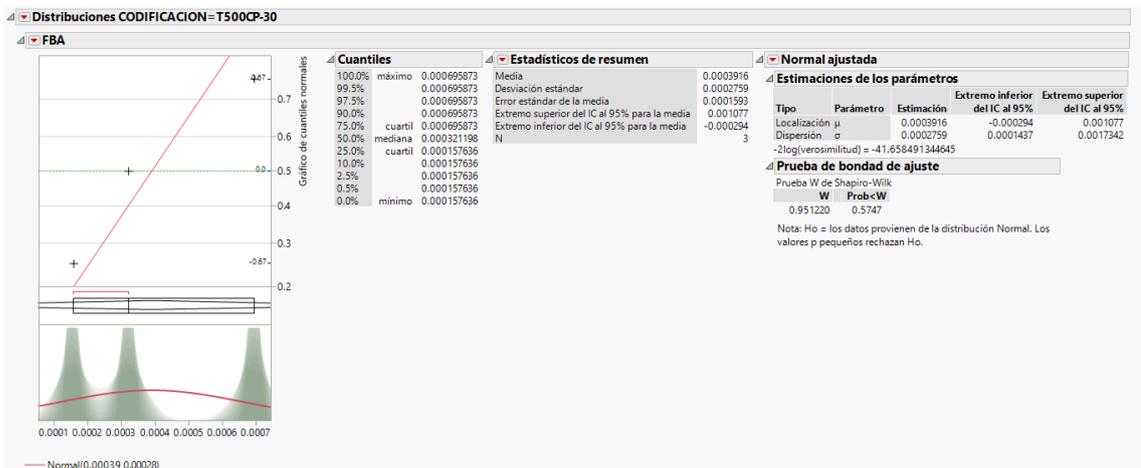
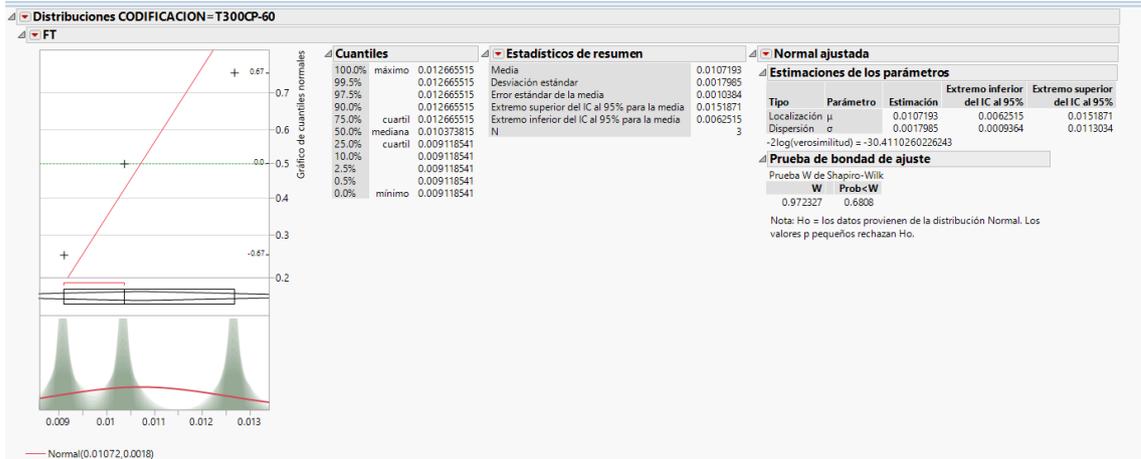
### 3.2. Prueba de normalidad para el Pb, usando el Software JMP.

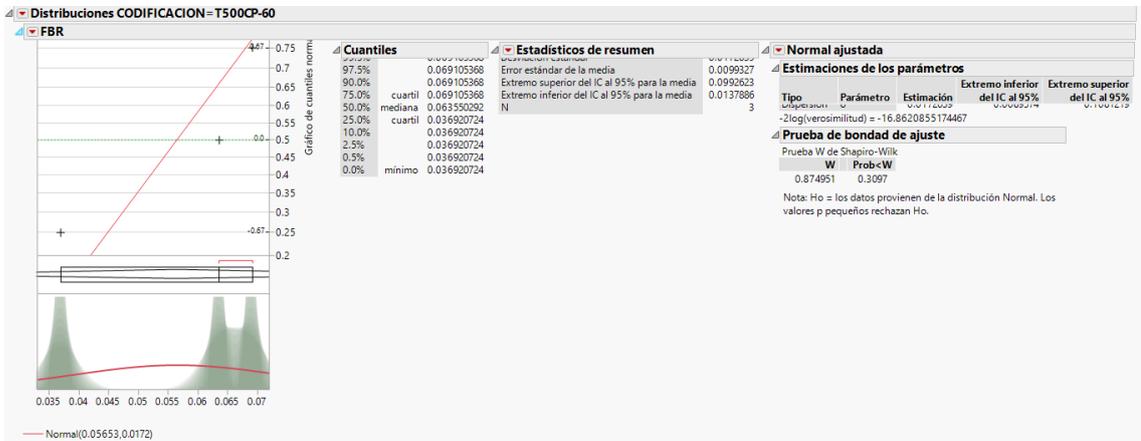
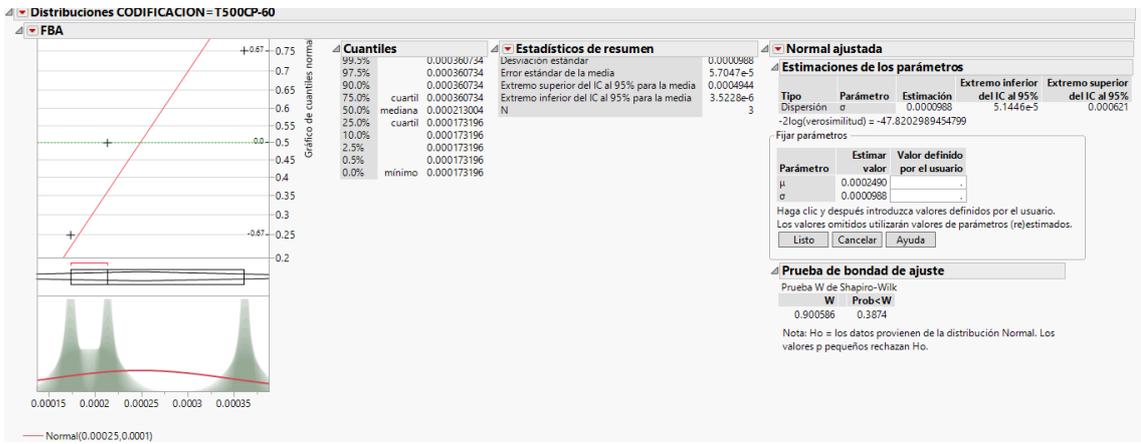
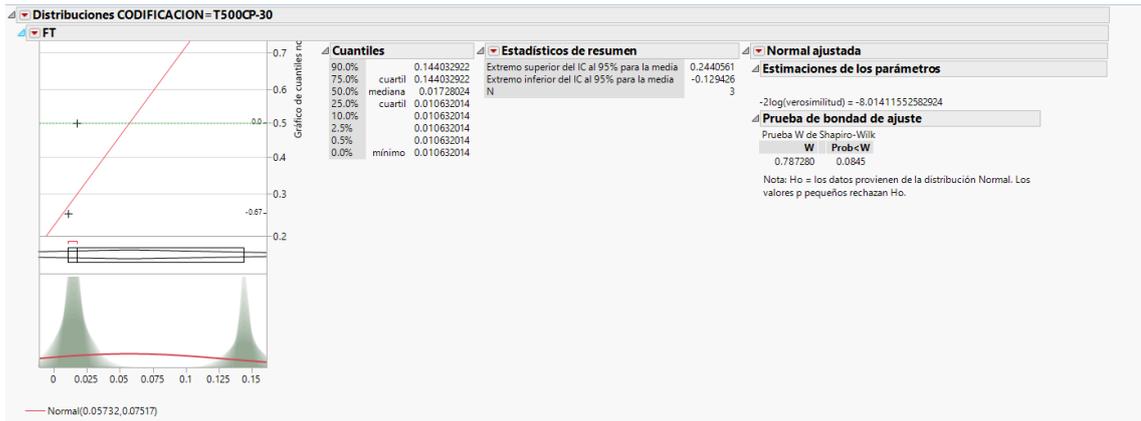


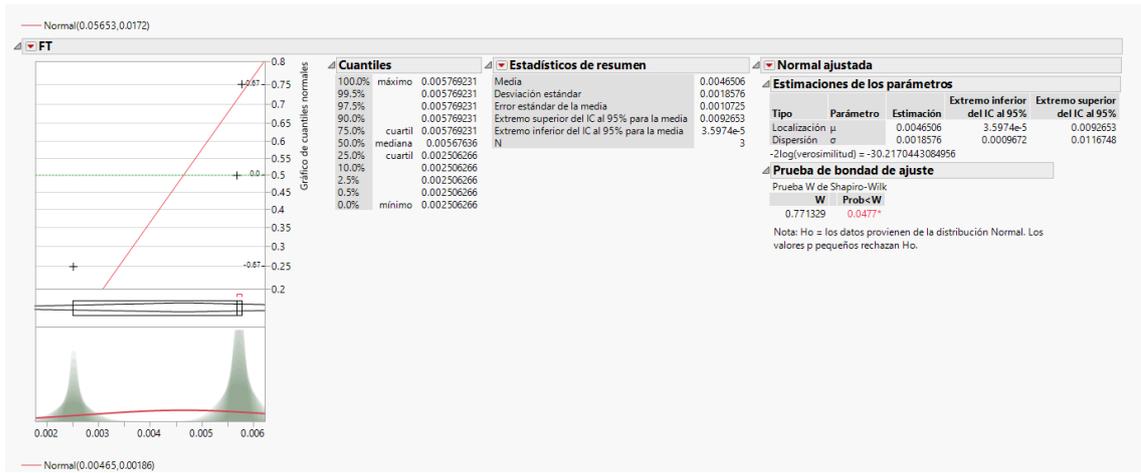












## Anexo 04. Análisis Físicoquímicos

### 4.1. Caracterización de metales pesados en los relaves mineros

INFORME DE ENSAYO N° GQ21029											
<b>CLIENTE:</b>						<b>Franco Vega</b>					
<b>Nro de Orden:</b>						<b>GQ21029</b>					
<b>Atención:</b>						<b>Franco Vega</b>					
<b>Referencia:</b>						<b>Orden de trabajo N° 0300 / Cotización ML-101.21</b>					
<b>Fecha de Recepción:</b>						<b>26 de Julio del 2021</b>					
<b>Fecha de Reporte de Resultados:</b>						<b>09 de agosto del 2021</b>					
<b>N° de Muestras Recibidas:</b>						<b>1</b>					
<b>Tipo de Muestra:</b>						<b>Roca</b>					
<b>Características y Condiciones:</b>						<b>Muestra codificada por el cliente</b>					
ITEM	Código MINLAB	Código del Cliente	Elemento Unidad Método Limite Detec. Limite Superior	Ag ppm ICPREG 0.2 100	Aj % ICPREG 0.01 15	As ppm ICPREG 3 10000	Ba ppm ICPREG 5 10000	Be ppm ICPREG 0.5 10000	Bi ppm ICPREG 5 10000	Ca % ICPREG 0.01 15	Cd ppm ICPREG 1 10000
1	GQ21029/001	M-01		42.8	0.42	1020	17	<0.5	64	2.68	18
ELEMENTO			METODO								
34			ICP Digestión Regia (ICP_REG)								
 											
<p>Los ensayos se han realizado en los laboratorios de MINLAB S.R.L. Sito en el Jr España N°931 - La Perla - Callao. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, mientras que de los rechazos gruesos será de 1 mes. Posterior a dicho lapso de tiempo, serán desechados.</p> <p><b>Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de Minlab S.R.L.</b></p>											

INFORME DE ENSAYO N° GQ21029												
<b>CLIENTE:</b>						<b>Franco Vega</b>						
<b>Nro de Orden:</b>						<b>GQ21029</b>						
<b>Atención:</b>						<b>Franco Vega</b>						
<b>Referencia:</b>						<b>Orden de trabajo N° 0300 / Cotización ML-101.21</b>						
<b>Fecha de Recepción:</b>						<b>26 de Julio del 2021</b>						
<b>Fecha de Reporte de Resultados:</b>						<b>09 de agosto del 2021</b>						
<b>N° de Muestras Recibidas:</b>						<b>1</b>						
<b>Tipo de Muestra:</b>						<b>Roca</b>						
<b>Características y Condiciones:</b>						<b>Muestra codificada por el cliente</b>						
ITEM	Código MINLAB	Código del Cliente	Elemento Unidad Método Limite Detec. Limite Superior	Co ppm ICPREG 1 10000	Cr ppm ICPREG 1 10000	Cu ppm ICPREG 0.5 10000	Fe % ICPREG 0.01 15	Ga ppm ICPREG 10 10000	Hg ppm ICPREG 1 10000	K % ICPREG 0.01 15	La ppm ICPREG 0.5 10000	Mg % ICPREG 0.01 15
1	GQ21029/001	M-01		5	41	286.9	14.25	12	36	0.13	2.8	0.42
ELEMENTO			METODO									
34			ICP Digestión Regia (ICP_REG)									
 												
<p>Los ensayos se han realizado en los laboratorios de MINLAB S.R.L. Sito en el Jr España N°931 - La Perla - Callao. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, mientras que de los rechazos gruesos será de 1 mes. Posterior a dicho lapso de tiempo, serán desechados.</p> <p><b>Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de Minlab S.R.L.</b></p>												

## INFORME DE ENSAYO N° GQ21029

<b>CLIENTE:</b> <b>Nro de Orden:</b> <b>Atención:</b> <b>Referencia:</b> <b>Fecha de Recepción:</b> <b>Fecha de Reporte de Resultados:</b> <b>N° de Muestras Recibidas:</b> <b>Tipo de Muestra:</b> <b>Características y Condiciones:</b>	Franco Vega GQ21029 Franco Vega Orden de trabajo N° 0300 / Cotización ML-101.21 26 de Julio del 2021 09 de agosto del 2021 1 Roca Muestra codificada por el cliente
---	---

ITEM	Código MINLAB	Código del Cliente	Elemento Unidad Metodo Limite Detec. Limite Superior	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Sb	Sc
				ppm ICPREG 10000	ppm ICPREG 10000	% ICPREG 0.01 15	ppm ICPREG 1 10000	% ICPREG 0.01 15	ppm ICPREG 2 10000	% ICPREG 0.01 10	ppm ICPREG 5 10000	ppm ICPREG 1 10000
1	GQ21029/001	M-01		2432	3	0.03	10	0.09	3996	4	98	2

ELEMENTO      METODO  
 34              ICP Digestión Regia (ICP\_REG)



Ing. Martín Rivadeneira Asanza  
 Jefe de laboratorio-MINLAB

Los ensayos se han realizado en los laboratorios de MINLAB S.R.L. Sitio en el Jr España N°931 - La Perla -Callao. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, mientras que de los rechazos gruesos será de 1 mes. Posterior a dicho lapso de tiempo, serán desechados.  
**Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de Minlab S.R.L.**

## INFORME DE ENSAYO N° GQ21029

<b>CLIENTE:</b> <b>Nro de Orden:</b> <b>Atención:</b> <b>Referencia:</b> <b>Fecha de Recepción:</b> <b>Fecha de Reporte de Resultados:</b> <b>N° de Muestras Recibidas:</b> <b>Tipo de Muestra:</b> <b>Características y Condiciones:</b>	Franco Vega GQ21029 Franco Vega Orden de trabajo N° 0300 / Cotización ML-101.21 26 de Julio del 2021 09 de agosto del 2021 1 Roca Muestra codificada por el cliente
---	---

ITEM	Código MINLAB	Código del Cliente	Elemento Unidad Metodo Limite Detec. Limite Superior	Se	Sn	Sr	Te	Ti	Tl	V	Zn
				ppm ICPREG 10000	ppm ICPREG 10000	ppm ICPREG 0.5 5000	ppm ICPREG 10 10000	% ICPREG 0.01 15	ppm ICPREG 2 10000	ppm ICPREG 2 10000	ppm ICPREG 0.5 10000
1	GQ21029/001	M-01		<10	39	83.6	15.14	<0.01	9	33	9123.90

ELEMENTO      METODO  
 34              ICP Digestión Regia (ICP\_REG)



Ing. Martín Rivadeneira Asanza  
 Jefe de laboratorio-MINLAB

Los ensayos se han realizado en los laboratorios de MINLAB S.R.L. Sitio en el Jr España N°931 - La Perla -Callao. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, mientras que de los rechazos gruesos será de 1 mes. Posterior a dicho lapso de tiempo, serán desechados.  
**Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de Minlab S.R.L.**

## 4.2. Caracterización fisicoquímica de los relaves mineros y de tratamientos tras la aplicación de biocarbón-compost en el Suelo



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : FRANCO RODRIGO VEGA GUEVARA

Departamento : PASCO Provincia : PASCO  
 Distrito : SIMON BOLIVAR Predio : QUIULACCOCHA  
 Referencia : H.R. 79256-038C-23 Bolt.: 5669 Fecha : 10/04/2023

Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup>			
2193	T300CP-60	7.49	7.61	0.36	6.02	53.0	2090	47	37	16	Fr.	10.40	7.49	1.91	0.98	0.04	0.00	10.40	10.40	100
2194	Relave	5.63	7.12	0.36	2.01	0.8	97	51	31	18	Fr.	4.32	2.04	1.05	0.08	0.01	0.50	3.68	3.18	74
2195	CR-60	7.35	9.59	0.27	5.21	26.3	2010	51	33	16	Fr.	13.28	9.19	2.65	1.41	0.03	0.00	13.28	13.28	100
2196	T500-CP60	7.54	7.17	0.36	3.88	46.5	1920	49	35	16	Fr.	10.08	7.36	1.76	0.95	0.01	0.00	10.08	10.08	100
2197	T300CP-30	7.54	7.44	0.63	6.42	76.9	2450	49	37	14	Fr.	12.16	8.17	2.17	1.71	0.10	0.00	12.16	12.16	100
2198	T500-CP30	7.58	7.63	0.63	5.08	73.8	2430	47	39	14	Fr.	10.08	6.37	2.14	1.51	0.05	0.00	10.08	10.08	100
2199	CR-30	7.49	6.92	0.45	5.35	53.0	2660	53	29	18	Fr.A.	12.48	7.35	3.03	1.98	0.12	0.00	12.48	12.48	100
2200	CONTROL	7.81	6.78	0.80	6.68	195.4	2770	57	25	18	Fr.A.	15.84	7.66	4.44	3.12	0.62	0.00	15.84	15.84	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



Constantino Calderón Mendoza  
Jefe del Laboratorio

---

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 Celular: 946-505-254  
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

### 4.3. Caracterización del biocarbón producido a 300°C (FTIR)



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

## INFORME DE ENSAYO IE-090522-01-05

#### 1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : LUIGUI BRAVO TOLEDO  
1.2 RUC/DNI : 74183456

#### 2. FECHAS

2.1 Inicio : 10 de mayo de 2022  
2.2 Fin : 18 de mayo de 2022  
2.3 Emisión de informe : 18 de mayo de 2022

#### 3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

3.1 Temperatura : 20.2 °C  
3.2 Humedad Relativa : 53 %

#### 4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

4.1 Ensayo solicitado/ Técnica utilizada : Espectroscopía Infrarroja FTIR

#### 5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA

5.1 Código de Muestra : S-3870  
5.2 Tipo de Muestra : Biocarbón  
5.3 Descripción : BIOCARBON PINO 300°C  
5.4 Lote : No Precisa  
5.5 Fecha de Fabricación : No Precisa  
5.6 Muestreo : Muestreado por el Cliente

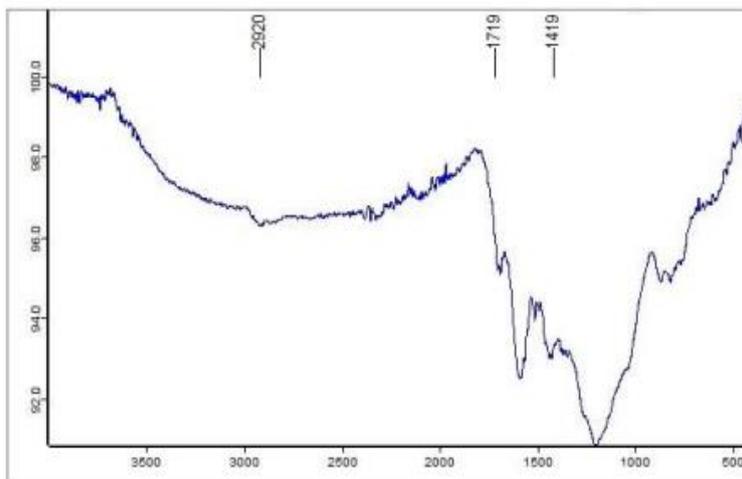
- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio.
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

  
DIEGO ROMANO VERGARAY DARRIAGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

## 6. RESULTADOS

### 6.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

- Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo - Perkin Elmer
- Software: Perkin Elmer Spectrum 10
- Rango de Prueba: Intervalo de número de onda 380  $\text{cm}^{-1}$  a 4000  $\text{cm}^{-1}$



*Nota: Lado Horizontal (Número de Onda  $\text{cm}^{-1}$ )-Lado Vertical (Transmitancia %)*

**Figura N°1:** Espectro Infrarrojo de la muestra

**Tabla N°1: IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES**

GRUPO	GRUPOS ALCANOS	Experimental
Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Zona de absorción "Torsión C-H". 2800-2950 $\text{cm}^{-1}$	2920.0 $\text{cm}^{-1}$
GRUPO	GRUPOS CARBOXILICOS	Experimental
Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Zona de absorción "Estiramiento C=O". 1700 $\text{cm}^{-1}$	1718.9 $\text{cm}^{-1}$
	Zona de absorción "Flexión C-O-H en el plano". 1430 $\text{cm}^{-1}$	1419.1 $\text{cm}^{-1}$

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

"FIN DEL DOCUMENTO"



\_\_\_\_\_  
DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

#### 4.4, Caracterización del biocarbón producido a 500°C (FTIR)



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

### INFORME DE ENSAYO IE-090522-01-06

#### 1. DATOS DEL CLIENTE

- 1.1 Cliente : LUIGUI BRAVO TOLEDO  
1.2 RUC/DNI : 74183456

#### 2. FECHAS

- 2.1 Inicio : 10 de mayo de 2022  
2.2 Fin : 18 de mayo de 2022  
2.3 Emisión de informe : 18 de mayo de 2022

#### 3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

- 3.1 Temperatura : 20.2 °C  
3.2 Humedad Relativa : 53 %

#### 4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

- 4.1 Ensayo solicitado/ Técnica utilizada : Espectroscopía Infrarroja FTIR

#### 5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA

- 5.1 Código de Muestra : S-3870  
5.2 Tipo de Muestra : Biocarbón  
5.3 Descripción : BIOCARBON PINO 500°C  
5.4 Lote : No Precisa  
5.5 Fecha de Fabricación : No Precisa  
5.6 Muestreo : Muestreado por el Cliente

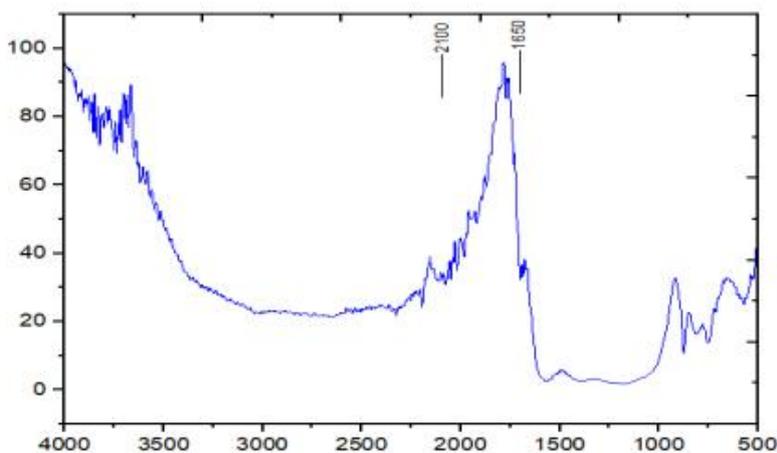
- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio.
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

## 6. RESULTADOS

### 6.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

- Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo - Perkin Elmer
- Software: Perkin Elmer Spectrum 10
- Rango de Prueba: Intervalo de número de onda  $380\text{ cm}^{-1}$  a  $4000\text{ cm}^{-1}$



Nota: Lado Horizontal (Número de Onda  $\text{cm}^{-1}$ )-Lado Vertical (Transmitancia %)

Figura N°1: Espectro Infrarrojo de la muestra

Tabla N°1: IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES

GRUPO	<b>GRUPOS ALQUINOS</b>	Experimental
Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Zona de absorción "Torsión $\text{C}\equiv\text{C}$ ". $2150\text{ cm}^{-1}$	$2100.0\text{ cm}^{-1}$
GRUPO	<b>GRUPOS ALQUENOS</b>	Experimental
Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Zona de absorción "Torsión $\text{C}=\text{C}$ ". $1690\text{-}1630\text{ cm}^{-1}$	$1650.0\text{ cm}^{-1}$

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

"FIN DEL DOCUMENTO"



DIEGO ROMÁN VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

4.5. Caracterización del biocarbón producido a 300°C (CHON, Metales totales y fisicoquímicos)



**INFORME DE ENSAYO**  
**IE-230722-01-02**

**1. DATOS DEL CLIENTE**

1.1 Cliente : VEGA GUEVARA FRANCO RODRIGO  
1.2 RUC/DNI : 70808550  
1.3 Dirección : No Precisa

**2. FECHAS**

2.1 Inicio : 23 de Julio de 2022  
2.2 Fin : 05 de Agosto de 2022  
2.3 Emisión de informe : 09 de Agosto de 2022

**3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO**

3.1 Temperatura : 20.2 °C  
3.2 Humedad Relativa : 52 %

**4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA**

**4.1. ENSAYO FISICOQUÍMICOS Y ANÁLISIS ELEMENTAL**

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA
C, H, O, N, S	Analizador Elemental
pH en agua	Relación 1:5 Agua-Biocarbón (Potenciometría)
Conductividad Eléctrica CE 25°C	Relación 1:5 Agua-Biocarbón (Electrométrico)
Materia Orgánica	Volumetría Redox
Fósforo, P2O5	Absorción Atómica
Potasio, K2O	Absorción Atómica
Calcio, CaO	Absorción Atómica
Magnesio, MgO	Absorción Atómica
Sodio, Na	Absorción Atómica
Capacidad de Intercambio Catiónico C.I.C.	Acetato de Amonio 1N (Absorción Atómica)

**4.2. ENSAYO DE METALES TOTALES**

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA
METALES TOTALES (Plata, Aluminio, Bario, Berilio, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Potasio, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Sodio, Niquel, Plomo, Antimonio, Talio, Vanadio, Zinc, Boro, Silicio, Arsénico, Bismuto, Cerio, Litio, Fósforo, Selenio, Estaño, Estroncio, Titanio, Uranio)	EPA METHOD 3050 B, Rev. 2 ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

**5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA**
**Tabla N°1: Datos de la Muestra Analizada**

Código Interno de Muestra	Tipo de Muestra	Descripción
S-4469	Biocarbón	BC-T 300-001 BIOCARBON

**6. RESULTADOS**
**6.1. Resultados Obtenidos**
**Tabla N°2: RESULTADOS DE ANÁLISIS ELEMENTAL**

Código Interno de Muestra	PARÁMETRO	Unidad	Resultados
S-4469	Carbono	%	71.11
	Hidrógeno	%	4.16
	Oxígeno	%	24.26
	Nitrógeno	%	0.45
	Azufre	%	0.02

\*Nota: Datos reportados en base seca

**Tabla N°3: RESULTADOS FISICOQUÍMICOS**

Código Interno de Muestra	PARÁMETRO	Unidad	Resultados
S-4469	pH en agua	U. pH	7.07
	Conductividad Eléctrica CE 25°C	uS/cm	164.80
	Materia Orgánica	%p/p	54.39
	Fósforo, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.02
	Potasio, K <sub>2</sub> O	%	0.04
	Calcio, CaO	%	0.14
	Magnesio, MgO	%	0.04
	Sodio, Na	mg/Kg	<0.004
	Capacidad de Intercambio Catiónico C.I.C.	meq/100g	39.40

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.



DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
 QUÍMICO  
 CQP. 1337

**6.2. Resultados de Metales**

**Tabla N°4: RESULTADOS DE METALES**

Parámetro	Unidad	Método de ensayo	Resultados
Plata, Ag	mg/Kg		<0.005
Aluminio, Al	mg/Kg		<0.005
Arsénico, As	mg/Kg		12.66
Boro, B	mg/Kg		<0.002
Bario, Ba	mg/Kg		<0.0002
Berilio, Be	mg/Kg		<0.0003
Bismuto, Bi	mg/Kg		<0.009
Calcio, Ca	mg/Kg		992.57
Cadmio, Cd	mg/Kg		<0.0001
Cerio, Ce	mg/Kg		<0.02
Cobalto, Co	mg/Kg		5.72
Cromo, Cr	mg/Kg		<0.0003
Cobre, Cu	mg/Kg		<0.0002
Hierro, Fe	mg/Kg		<0.001
Mercurio, Hg	mg/Kg		<0.001
Potasio, K	mg/Kg		301.98
Litio, Li	mg/Kg		<0.0003
Magnesio, Mg	mg/Kg		228.23
Manganeso, Mn	mg/Kg		32.10
Molibdeno, Mo	mg/Kg		<0.0006
Sodio, Na	mg/Kg		<0.004
Níquel, Ni	mg/Kg		<0.0003
Fósforo, P	mg/Kg		82.23
Plomo, Pb	mg/Kg		<0.002
Antimonio, Sb	mg/Kg		<0.002
Selenio, Se	mg/Kg		<0.001
Silicio, Si	mg/Kg		<0.001
Estaño, Sn	mg/Kg		<0.001
Estroncio, Sr	mg/Kg		<0.0004
Titanio, Ti	mg/Kg		<0.0007
Talio, Tl	mg/Kg		<0.0007
Uranio, U	mg/Kg		<0.005
Vanadio, V	mg/Kg		<0.0002
Zinc, Zn	mg/Kg		<0.0001

EPA METHOD 3050 B, Rev. 2 ACID  
DIGESTION OF SEDIMENTS,  
SLUDGES, AND SOILS

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

**FIN DE DOCUMENTO**



.....  
DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

## 4.6. Caracterización del biocarbón producido a 300°C (CHON, Metales totales y fisicoquímicos)



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

### INFORME DE ENSAYO IE-230722-01-03

#### 1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : VEGA GUEVARA FRANCO RODRIGO  
1.2 RUC/DNI : 70808550  
1.3 Dirección : No Precisa

#### 2. FECHAS

2.1 Inicio : 23 de Julio de 2022  
2.2 Fin : 05 de Agosto de 2022  
2.3 Emisión de informe : 09 de Agosto de 2022

#### 3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

3.1 Temperatura : 20.2 °C  
3.2 Humedad Relativa : 52 %

#### 4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

##### 4.1. ENSAYO FISICOQUÍMICOS Y ANÁLISIS ELEMENTAL

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA
C, H, O, N, S	Analizador Elemental
pH en agua	Relación 1:5 Agua-Biocarbón (Potenciometría)
Conductividad Eléctrica CE 25°C	Relación 1:5 Agua-Biocarbón (Electrométrico)
Materia Orgánica	Volumetría Redox
Fósforo, P2O5	Absorción Atómica
Potasio, K2O	Absorción Atómica
Calcio, CaO	Absorción Atómica
Magnesio, MgO	Absorción Atómica
Sodio, Na	Absorción Atómica
Capacidad de Intercambio Catiónico C.I.C.	Acetato de Amonio 1N (Absorción Atómica)

##### 4.2. ENSAYO DE METALES TOTALES

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA
METALES TOTALES (Plata, Aluminio, Bario, Berilio, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Potasio, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Sodio, Níquel, Plomo, Antimonio, Talio, Vanadio, Zinc, Boro, Silicio, Arsénico, Bismuto, Cerio, Litio, Fósforo, Selenio, Estaño, Estroncio, Titanio, Uranio)	EPA METHOD 3050 B, Rev. 2 ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

DIEGO ROMANO VERGARAY O'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Tabla N°1: Datos de la Muestra Analizada

Código Interno de Muestra	Tipo de Muestra	Descripción
S-4470	Biocarbón	BC-T 500-001 BIOCARBON

6. RESULTADOS

6.1. Resultados Obtenidos

Tabla N°2: RESULTADOS DE ANÁLISIS ELEMENTAL

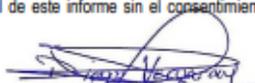
Código Interno de Muestra	PARÁMETRO	Unidad	Resultados
S-4470	Carbono	%	79.11
	Hidrógeno	%	3.29
	Oxígeno	%	16.96
	Nitrógeno	%	0.60
	Azufre	%	0.04

\*Nota: Datos reportados en base seca

Tabla N°3: RESULTADOS FISICOQUÍMICOS

Código Interno de Muestra	PARÁMETRO	Unidad	Resultados
S-4470	pH en agua	U. pH	7.94
	Conductividad Eléctrica CE 25°C	uS/cm	249.80
	Materia Orgánica	%p/p	38.04
	Fósforo, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.10
	Potasio, K <sub>2</sub> O	%	0.32
	Calcio, CaO	%	0.43
	Magnesio, MgO	%	0.11
	Sodio, Na	mg/Kg	<0.004
	Capacidad de Intercambio Catiónico C.I.C.	meq/100g	25.00

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.



DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

**6.2. Resultados de Metales**

**Tabla N°4: RESULTADOS DE METALES**

Parámetro	Unidad	Método de ensayo	Resultados
Plata, Ag	mg/Kg		<0.005
Aluminio, Al	mg/Kg		<0.005
Arsénico, As	mg/Kg		23.66
Boro, B	mg/Kg		<0.002
Bario, Ba	mg/Kg		<0.0002
Berilio, Be	mg/Kg		<0.0003
Bismuto, Bi	mg/Kg		<0.009
Calcio, Ca	mg/Kg		3090.99
Cadmio, Cd	mg/Kg		<0.0001
Cerio, Ce	mg/Kg		<0.02
Cobalto, Co	mg/Kg		5.42
Cromo, Cr	mg/Kg		<0.0003
Cobre, Cu	mg/Kg		0.89
Hierro, Fe	mg/Kg		2487.98
Mercurio, Hg	mg/Kg		<0.001
Potasio, K	mg/Kg		2650.42
Litio, Li	mg/Kg	EPA METHOD 3050 B, Rev. 2 ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS	<0.0003
Magnesio, Mg	mg/Kg		682.74
Manganeso, Mn	mg/Kg		160.39
Molibdeno, Mo	mg/Kg		<0.0006
Sodio, Na	mg/Kg		<0.004
Niquel, Ni	mg/Kg		<0.0003
Fósforo, P	mg/Kg		423.02
Plomo, Pb	mg/Kg		<0.002
Antimonio, Sb	mg/Kg		<0.002
Selenio, Se	mg/Kg		<0.001
Silicio, Si	mg/Kg		<0.001
Estaño, Sn	mg/Kg		<0.001
Estroncio, Sr	mg/Kg		0.11
Titanio, Ti	mg/Kg		<0.0007
Talio, Tl	mg/Kg		<0.0007
Uranio, U	mg/Kg		<0.005
Vanadio, V	mg/Kg		<0.0002
Zinc, Zn	mg/Kg		20.06

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

**FIN DE DOCUMENTO**



DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

## 4.7. Caracterización del compost (Fisicoquímica y metales pesados)



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

### INFORME DE ENSAYO IE-230722-01-04

#### 1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : VEGA GUEVARA FRANCO RODRIGO  
1.2 RUC/DNI : 70808550  
1.3 Dirección : No Precisa

#### 2. FECHAS

2.1 Inicio : 23 de Julio de 2022  
2.2 Fin : 05 de Agosto de 2022  
2.3 Emisión de informe : 09 de Agosto de 2022

#### 3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

3.1 Temperatura : 20.2 °C  
3.2 Humedad Relativa : 52 %

#### 4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

##### 4.1. ENSAYOS FISICOQUÍMICOS

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA
pH en agua	Relación 1:5 Agua-Suelo (Potenciometría)
Conductividad Eléctrica CE 25°C	Relación 1:5 Agua-Suelo (Electrométrico)
Humedad	Gravimetría
Carbono	Walkley Black (Volumetría Redox)
Materia Orgánica (MO)	Walkley Black (Volumetría Redox)
Nitrógeno Total (N)	Kjeldahl
Nitrógeno Amoniacal	UV Visible
Nitrógeno Nítrico	UV Visible
Relación C/N	Cálculo
Fósforo, P2O5	Absorción Atómica
Potasio, K2O	Absorción Atómica
Calcio, CaO	Absorción Atómica
Magnesio, MgO	Absorción Atómica
Sodio	Absorción Atómica

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

  
DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

#### 4.2. ENSAYO DE METALES TOTALES

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA
METALES TOTALES (Plata, Aluminio, Bario, Berilio, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Potasio, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Sodio, Níquel, Plomo, Antimonio, Talio, Vanadio, Zinc; Boro, Silicio, Arsénico, Bismuto, Cerio, Litio, Fósforo, Selenio, Estaño, Estroncio, Titanio, Uranio)	EPA METHOD 3050 B, Rev. 2

#### 5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Tabla N°1: Datos de la Muestra Analizada

Código Interno de Muestra	Tipo de Muestra	Descripción
S-4471	Compost	CP-001 COMPOST

#### 6. RESULTADOS

##### 6.1. Resultados Obtenidos

Tabla N°2: RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS

Código Interno de Muestra	PARÁMETRO	Unidad	Resultados
S-4471	pH en agua	U. pH	8.30
	Conductividad Eléctrica CE 25°C	mS/cm	10.19
	Humedad	%	17.15
	Materia Orgánica	%	34.06
	Carbono	%	19.76
	Nitrógeno Total	%	1.70
	Relación C/N	Sin Unid.	11.62
	Nitrógeno Amoniacal	mg/Kg	12.23
	Nitrógeno Nítrico	%	1.29
	Fósforo, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.63
	Potasio, K <sub>2</sub> O	%	2.04
	Calcio, CaO	%	3.13
	Magnesio, MgO	%	0.69
	Sodio, Na	mg/Kg	505.63

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

*Diego Romano Vergaray D'Arrigo*  
DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

**6.2. Resultados de Metales**

**Tabla N°3: RESULTADOS DE METALES**

Parámetro	Unidad	Método de ensayo	Resultados
Plata, Ag	mg/Kg		<0.005
Aluminio, Al	mg/Kg		3930.54
Arsénico, As	mg/Kg		14.72
Boro, B	mg/Kg		<0.002
Bario, Ba	mg/Kg		<0.0002
Berilio, Be	mg/Kg		0.32
Bismuto, Bi	mg/Kg		7.05
Calcio, Ca	mg/Kg		22377.37
Cadmio, Cd	mg/Kg		1.99
Cerio, Ce	mg/Kg		1.04
Cobalto, Co	mg/Kg		14.87
Cromo, Cr	mg/Kg		<0.0003
Cobre, Cu	mg/Kg		57.11
Hierro, Fe	mg/Kg		8813.25
Mercurio, Hg	mg/Kg		<0.001
Potasio, K	mg/Kg		16966.25
Litio, Li	mg/Kg		14.87
Magnesio, Mg	mg/Kg		4156.51
Manganeso, Mn	mg/Kg		142.53
Molibdeno, Mo	mg/Kg		<0.0006
Sodio, Na	mg/Kg		505.63
Niquel, Ni	mg/Kg		<0.0003
Fósforo, P	mg/Kg		2731.04
Plomo, Pb	mg/Kg		28.42
Antimonio, Sb	mg/Kg		<0.002
Selenio, Se	mg/Kg		<0.001
Silicio, Si	mg/Kg		<0.001
Estaño, Sn	mg/Kg		<0.001
Estroncio, Sr	mg/Kg		99.20
Titanio, Ti	mg/Kg		129.46
Talio, Tl	mg/Kg		15.41
Uranio, U	mg/Kg		<0.005
Vanadio, V	mg/Kg		18.76
Zinc, Zn	mg/Kg		176.89

EPA METHOD 200.7  
(Determination of Metals and Trace  
Elements in Water and Wastes by  
Inductively Coupled Plasma-Atomic  
Emission Spectrometry)

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

**FIN DE DOCUMENTO**



DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

4.8. Caracterización de suelo antes de aplicar al relave minero (físicoquímica)



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

INFORME DE ENSAYO  
IE-230722-01

1. DATOS DEL CLIENTE
  - 1.1 Cliente : VEGA GUEVARA FRANCO RODRIGO
  - 1.2 RUC/DNI : 70808550
  - 1.3 Dirección : No Precisa
2. FECHAS
  - 2.1 Inicio : 23 de Julio de 2022
  - 2.2 Fin : 05 de Agosto de 2022
  - 2.3 Emisión de informe : 06 de Agosto de 2022
3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO
  - 3.1 Temperatura : 20.2 °C
  - 3.2 Humedad Relativa : 52 %

4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA  
4.1. ENSAYOS

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA
pH en agua	Relación 1:1 Agua-Suelo (Potenciometría)
Conductividad Eléctrica CE 25°C	Relación 1:1 Agua-Suelo (Electrométrico)
Carbonatos CaCO <sub>3</sub>	Volumetría de Neutralización
Fósforo Disponible (P)	Olsen modificado (UV Visible)
Potasio Disponible (K)	Acetato de Amonio 1N (Absorción Atómica)
Capacidad de Intercambio Catiónico C.I.C.	Acetato de Amonio 1N (Absorción Atómica)
Textura, Arena, Limo, Arcilla	Hidrométrico-Bouyoucos
Cationes Cambiables	Acetato de Amonio 1N (Absorción Atómica)
Suma de Cationes	Cálculo

5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Tabla N°1: Datos de la Muestra Analizada

Código Interno de Muestra	Tipo de Muestra	Descripción
S-4468	Suelo	S-L-001 SUELO

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

**6. RESULTADOS**

**6.1. Resultados Físicoquímicos**

**Tabla N°2: RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS**

Código Interno de Muestra	PARÁMETRO	Unidad	Resultados
S-4468	pH en agua	U. pH	7.55
	Conductividad Eléctrica CE 25°C	uS/cm	3.88
	Carbonatos CaCO <sub>3</sub>	% p/p	1.34
	Fósforo Disponible (P)	mg/Kg	89.96
	Potasio Disponible (K)	mg/Kg	1400.12
	Calcio	meq/100g	13.91
	Magnesio	meq/100g	3.30
	Potasio	meq/100g	3.90
	Sodio	meq/100g	2.27
	Suma de cationes	meq/100g	23.38
	Capacidad de Intercambio Catiónico, CIC	meq/100g	23.60
	Arena	%	50.00
	Arcilla	%	25.00
	Limo	%	25.00
	Textura	Sin Unid.	Franco Arcillo Arenoso

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

**FIN DE DOCUMENTO**



**DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO**  
QUÍMICO  
CQP. 1337

## 4.9. Resultados de metales totales en el suelo después de la fitorremediación



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA CON REGISTRO N° LE - 047



### INFORME DE ENSAYO N° 170841-2023 CON VALOR OFICIAL

#### II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	11:55	11:57	12:00	12:22		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	T500CP-60-1	T500CP-60-2	T500CP-60-3	CR60-1		
Código del Laboratorio	23020852	23020853	23020854	23020855		
ENSAYO ACREDITADO ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales</b>						
Plata (Ag)	0.06	mg/kg	22.38	23.61	18.53	17.31
Aluminio (Al)	1.4	mg/kg	8432.3	10316.8	11820.3	14774.6
Arsénico (As)	0.17	mg/kg	396.37	408.70	307.40	405.17
Boro (B)	0.2	mg/kg	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Bario (Ba)	0.23	mg/kg	85.38	85.87	89.17	98.90
Berilio (Be)	0.021	mg/kg	0.041	0.105	0.099	0.036
Calcio (Ca)	2.4	mg/kg	19153.3	19795.2	18494.3	17632.9
Cadmio (Cd)	0.03	mg/kg	17.01	17.09	13.65	15.42
Cerio (Ce)	0.3	mg/kg	21.2	23.9	25.3	25.4
Cobalto (Co)	0.05	mg/kg	4.25	4.89	5.33	6.13
Cromo (Cr)	0.05	mg/kg	4.51	4.89	4.63	6.06
Cobre (Cu)	0.07	mg/kg	139.58	150.11	117.82	124.87
Hierro (Fe)	0.24	mg/kg	>40000	>40000	>40000	>40000
Mercurio (Hg)	0.10	mg/kg	14.27	15.33	11.65	10.20
Potasio (K)	3.5	mg/kg	2633.7	2690.0	3388.7	4268.3
Litio (Li)	0.3	mg/kg	10.4	12.7	15.8	12.1
Magnesio (Mg)	3.7	mg/kg	5178.4	5756.9	6088.0	6236.7
Manganeso (Mn)	0.08	mg/kg	1529.87	1489.40	1320.82	1173.95
Molibdeno (Mo)	0.14	mg/kg	0.49	0.55	0.50	0.68
Sodio (Na)	3.9	mg/kg	628.4	664.0	777.6	1011.4
Níquel (Ni)	0.06	mg/kg	4.86	5.44	5.06	5.61
Fósforo (P)	0.3	mg/kg	1161.1	1290.7	1264.3	1158.7
Plomo (Pb)	0.08	mg/kg	1830.95	1801.88	1385.71	1674.65
Antimonio (Sb)	0.22	mg/kg	24.43	23.06	15.93	19.53
Selenio (Se)	0.4	mg/kg	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Estaño (Sn)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Estroncio (Sr)	0.07	mg/kg	63.35	66.88	67.46	75.56
Titanio (Ti)	0.03	mg/kg	165.25	185.14	219.57	344.03
Talio (Tl)	0.4	mg/kg	3.3	3.1	2.3	2.9
Vanadio (V)	0.05	mg/kg	19.25	21.78	22.90	36.58
Zinc (Zn)	0.23	mg/kg	2915.02	2964.42	2286.53	2135.48

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.



INFORME DE ENSAYO N° 170841-2023  
CON VALOR OFICIAL

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	12:20	12:20	12:40	12:58		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	CR60-2	CR60-3	T300CP-60-1	T300CP-60-2		
Código del Laboratorio	23020856	23020857	23020858	23020859		
ENSAYO ACREDITADO ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales</b>						
Plata (Ag)	0,06	mg/kg	11.71	12.59	20.20	23.04
Aluminio (Al)	1,4	mg/kg	13670.2	14633.3	9408.8	9334.9
Arsénico (As)	0.17	mg/kg	228.31	225.04	416.37	476.38
Boro (B)	0.2	mg/kg	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Bario (Ba)	0.23	mg/kg	84.36	89.87	87.79	92.68
Berilio (Be)	0.021	mg/kg	<0.021	<0.021	0.056	0.242
Calcio (Ca)	2.4	mg/kg	14229.3	17035.2	18427.7	20392.7
Cadmio (Cd)	0.03	mg/kg	10.90	10.85	16.54	18.29
Cerio (Ce)	0.3	mg/kg	21.7	23.6	23.4	24.2
Cobalto (Co)	0.05	mg/kg	5.93	6.00	4.49	4.49
Cromo (Cr)	0.05	mg/kg	5.39	5.62	4.59	5.12
Cobre (Cu)	0.07	mg/kg	95.05	97.11	131.18	146.89
Hierro (Fe)	0.24	mg/kg	>40000	>40000	>40000	>40000
Mercurio (Hg)	0.10	mg/kg	7.84	8.81	12.28	13.95
Potasio (K)	3.5	mg/kg	3908.4	4867.9	3140.2	3252.7
Litio (Li)	0.3	mg/kg	11.3	12.7	12.4	12.3
Magnesio (Mg)	3.7	mg/kg	5759.3	6328.3	5217.9	5274.4
Manganeso (Mn)	0.08	mg/kg	937.26	868.13	1355.87	1433.92
Molibdeno (Mo)	0.14	mg/kg	0.55	0.59	0.46	0.69
Sodio (Na)	3.9	mg/kg	910.9	1287.2	723.6	748.4
Níquel (Ni)	0.06	mg/kg	4.96	4.86	4.74	5.02
Fósforo (P)	0.3	mg/kg	1040.3	1169.2	1183.0	1264.8
Plomo (Pb)	0.08	mg/kg	986.33	965.39	1756.49	1956.51
Antimonio (Sb)	0.22	mg/kg	11.28	11.67	22.79	25.00
Selenio (Se)	0.4	mg/kg	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Estaño (Sn)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Estroncio (Sr)	0.07	mg/kg	63.65	77.76	63.34	69.16
Titanio (Ti)	0.03	mg/kg	343.03	364.24	201.84	197.13
Talio (Tl)	0.4	mg/kg	1.1	1.2	3.1	3.6
Vanadio (V)	0.05	mg/kg	32.92	34.88	21.17	22.60
Zinc (Zn)	0.23	mg/kg	1591.45	1569.66	2636.80	2829.89

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.



INFORME DE ENSAYO N° 170841-2023  
CON VALOR OFICIAL

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	12:55	01:05	01:10	01:10		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	T300CP-60-3	T300CP-30-1	T300CP-30-2	T300CP-30-3		
Código del Laboratorio	23020860	23020861	23020862	23020863		
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales</b>						
Plata (Ag)	0.06	mg/kg	16.24	8.15	12.22	12.23
Aluminio (Al)	1.4	mg/kg	10972.3	12376.1	11437.9	11447.0
Arsénico (As)	0.17	mg/kg	342.55	152.36	230.13	230.31
Boro (B)	0.2	mg/kg	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Bario (Ba)	0.23	mg/kg	89.61	80.76	85.15	85.22
Berilio (Be)	0.021	mg/kg	0.093	0.060	0.051	0.051
Calcio (Ca)	2.4	mg/kg	16815.3	11877.5	13995.4	14006.6
Cadmio (Cd)	0.03	mg/kg	13.57	7.26	10.30	10.30
Cerio (Ce)	0.3	mg/kg	24.7	24.1	23.6	23.6
Cobalto (Co)	0.05	mg/kg	5.06	5.37	5.16	5.16
Cromo (Cr)	0.05	mg/kg	4.51	4.87	4.43	4.43
Cobre (Cu)	0.07	mg/kg	105.83	63.24	86.32	86.39
Hierro (Fe)	0.24	mg/kg	>40000	>40000	>40000	>40000
Mercurio (Hg)	0.10	mg/kg	10.20	4.53	7.55	7.56
Potasio (K)	3.5	mg/kg	3578.4	3665.4	3434.5	3437.3
Litio (Li)	0.3	mg/kg	15.0	15.7	15.4	15.4
Magnesio (Mg)	3.7	mg/kg	5484.7	5300.9	5264.2	5268.4
Manganeso (Mn)	0.08	mg/kg	1124.94	785.04	995.99	996.78
Molibdeno (Mo)	0.14	mg/kg	0.60	0.42	0.37	0.37
Sodio (Na)	3.9	mg/kg	808.3	832.4	756.5	757.1
Níquel (Ni)	0.06	mg/kg	4.48	3.96	4.23	4.23
Fósforo (P)	0.3	mg/kg	1239.3	1237.4	1218.7	1219.7
Plomo (Pb)	0.08	mg/kg	1347.05	629.10	1034.57	1035.40
Antimonio (Sb)	0.22	mg/kg	17.37	7.62	13.17	13.18
Selenio (Se)	0.4	mg/kg	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Estaño (Sn)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Estroncio (Sr)	0.07	mg/kg	63.74	56.75	59.01	59.06
Titanio (Ti)	0.03	mg/kg	240.19	291.54	239.86	240.06
Talio (Tl)	0.4	mg/kg	2.1	0.5	1.6	1.6
Vanadio (V)	0.05	mg/kg	22.33	22.72	21.48	21.49
Zinc (Zn)	0.23	mg/kg	2021.08	1031.66	1574.76	1576.02

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.



**INFORME DE ENSAYO N° 170841-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12
Hora de inicio de muestreo (h)	01:25	01:30	01:35	02:14
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente	CR30-1	CR30-2	CR30-3	TS00CP-30-1
Código del Laboratorio	23020864	23020865	23020866	23020867
ENSAYO ACREDITADO ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)				
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados	
<b>Metales</b>				
Plata (Ag)	0.06	mg/kg	6.93	4.68
Aluminio (Al)	1.4	mg/kg	16452.8	17240.5
Arsénico (As)	0.17	mg/kg	134.00	100.67
Boro (B)	0.2	mg/kg	1.4	2.5
Bario (Ba)	0.23	mg/kg	91.26	88.75
Berilio (Be)	0.021	mg/kg	<0.021	0.021
Calcio (Ca)	2.4	mg/kg	14501.9	14572.8
Cadmio (Cd)	0.03	mg/kg	7.12	6.10
Cerio (Ce)	0.3	mg/kg	23.7	24.8
Cobalto (Co)	0.05	mg/kg	6.83	6.81
Cromo (Cr)	0.05	mg/kg	5.59	5.83
Cobre (Cu)	0.07	mg/kg	68.74	59.86
Hierro (Fe)	0.24	mg/kg	>40000	>40000
Mercurio (Hg)	0.10	mg/kg	4.40	3.17
Potasio (K)	3.5	mg/kg	5417.7	5935.1
Litio (Li)	0.3	mg/kg	14.2	15.3
Magnesio (Mg)	3.7	mg/kg	6240.1	6394.4
Manganeso (Mn)	0.08	mg/kg	698.64	668.27
Molibdeno (Mo)	0.14	mg/kg	0.44	0.44
Sodio (Na)	3.9	mg/kg	1336.9	1547.7
Níquel (Ni)	0.06	mg/kg	4.81	4.65
Fósforo (P)	0.3	mg/kg	1212.0	1298.5
Plomo (Pb)	0.08	mg/kg	557.17	411.10
Antimonio (Sb)	0.22	mg/kg	6.38	4.20
Selenio (Se)	0.4	mg/kg	<0.4	<0.4
Estadio (Sn)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10
Estroncio (Sr)	0.07	mg/kg	80.99	82.20
Titanio (Ti)	0.03	mg/kg	414.73	429.01
Talio (Tl)	0.4	mg/kg	<0.4	<0.4
Vanadio (V)	0.05	mg/kg	35.94	36.04
Zinc (Zn)	0.23	mg/kg	907.79	716.81

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.

**INFORME DE ENSAYO N° 170841-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Suelo	Suelo	
Matriz analizada	Suelo	Suelo	
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	
Hora de inicio de muestreo (h)	02:23	02:30	
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	
Código del Cliente	T500CP-30-2	T500CP-30-3	
Código del Laboratorio	23020868	23020869	
ENSAYO ACREDITADO ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)			
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados
<b>Metales</b>			
Plata (Ag)	0.06	mg/kg	12.21 2.56
Aluminio (Al)	1.4	mg/kg	12334.9 14952.3
Arsénico (As)	0.17	mg/kg	248.29 95.12
Boro (B)	0.2	mg/kg	<0.2 <0.2
Bario (Ba)	0.23	mg/kg	87.36 86.76
Berilio (Be)	0.021	mg/kg	0.060 0.145
Calcio (Ca)	2.4	mg/kg	14081.2 9660.7
Cadmio (Cd)	0.03	mg/kg	10.51 5.00
Cerio (Ce)	0.3	mg/kg	25.2 28.7
Cobalto (Co)	0.05	mg/kg	5.40 6.58
Cromo (Cr)	0.05	mg/kg	4.62 4.57
Cobre (Cu)	0.07	mg/kg	88.56 44.12
Hierro (Fe)	0.24	mg/kg	>40000 36049.33
Mercurio (Hg)	0.10	mg/kg	7.15 1.56
Potasio (K)	3.5	mg/kg	4197.6 3944.7
Litio (Li)	0.3	mg/kg	16.2 20.7
Magnesio (Mg)	3.7	mg/kg	5342.2 5759.9
Manganeso (Mn)	0.08	mg/kg	1045.78 645.45
Molibdeno (Mo)	0.14	mg/kg	0.59 0.72
Sodio (Na)	3.9	mg/kg	839.4 793.4
Níquel (Ni)	0.06	mg/kg	3.98 4.18
Fósforo (P)	0.3	mg/kg	1339.5 1286.5
Plomo (Pb)	0.08	mg/kg	1089.67 330.52
Antimonio (Sb)	0.22	mg/kg	12.66 4.67
Selenio (Se)	0.4	mg/kg	<0.4 <0.4
Estañio (Sn)	0.10	mg/kg	<0.10 <0.10
Estroncio (Sr)	0.07	mg/kg	62.24 53.60
Titanio (Ti)	0.03	mg/kg	266.87 364.86
Talio (Tl)	0.4	mg/kg	1.6 <0.4
Vanadio (V)	0.05	mg/kg	24.10 26.03
Zinc (Zn)	0.23	mg/kg	1626.76 555.78

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.

Lima, 20 de Febrero del 2023.

#### 4.10. Resultados de metales totales en el Zea mays



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO  
INTERNATIONAL ACCREDITATION SERVICE, INC. - IAS  
CON REGISTRO TL - 829



### INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023 CON VALOR OFICIAL

#### II. RESULTADOS:

Producto declarado	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal		
Matriz analizada	Tejido	Tejido	Tejido	Tejido		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	11:49	11:55	11:58	11:49		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	T500CP-60-1	T500CP-60-2	T500CP-60-3	T500CP-60-1(1)		
Código del Laboratorio	23020870	23020871	23020872	23020873		
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales totales</b>						
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	1.03
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	1.8	1.3	1.2	285.3
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	<0.07	<0.07	<0.07	10.99
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.28	0.13	<0.10	0.41
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	<0.09	<0.09	<0.09	5.19
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	214.3	153.3	206.3	766.3
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	0.05	0.04	<0.04	0.81
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	<0.14	<0.14	<0.14	1.07
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	0.31
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.10	0.21	0.22	0.45
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	0.71	0.31	0.40	11.02
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	13.45	8.30	8.74	1850.91
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	0.36
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	10720.5	10829.1	11007.0	3772.4
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	0.30	<0.14	0.50	1.16
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	542.3	165.7	317.9	819.1
Manganese / Manganese (Mn)	0.04	mg/kg	4.65	5.81	4.34	115.84
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	<0.07	<0.07	0.07	0.14
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	860.9	46.2	250.0	4074.8
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	<0.05	0.10	0.10	0.34
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	286.22	124.65	115.71	332.09
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	0.39	0.65	0.24	67.60
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10	<0.10	0.87
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	0.21	<0.16	0.18	<0.16
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.73	1.71	1.04	0.69
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	2.29	1.58	2.04	6.86
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	0.16	0.15	0.14	10.26
Tellurium / Teluro (Te)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	0.20
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	1.01
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	34.85	4.68	16.65	144.89
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15

L.D.M.: Límite de detección del método



**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado			Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal
Matriz analizada			Tejido	Tejido	Tejido	Tejido
Fecha de muestreo			2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12
Hora de inicio de muestreo (h)			11:55	11:58	12:10	12:20
Condiciones de la muestra			Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente			TS00CP-60-2(1)	TS00CP-60-3(1)	TS00CP-30-1	TS00CP-30-2
Código del Laboratorio			23020874	23020875	23020876	23020877
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales totales</b>						
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	1.82	1.39	<0.05	<0.05
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	505.8	473.0	0.7	3.7
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	19.93	18.26	<0.07	<0.07
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.52	0.44	0.41	0.16
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	9.09	7.16	<0.09	0.10
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	1308.0	1197.6	267.8	231.5
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	1.32	1.15	<0.04	0.06
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	1.97	1.64	<0.14	<0.14
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	0.61	0.52	<0.04	<0.04
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.66	0.55	0.11	0.09
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	18.66	16.61	0.39	0.31
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	3029.42	2519.14	6.77	14.00
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	0.87	0.59	<0.05	<0.05
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	3895.9	3114.9	7134.7	8680.6
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	1.34	1.78	<0.14	<0.14
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	716.3	641.1	355.8	351.6
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	190.69	155.93	2.24	2.06
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	0.28	0.25	<0.07	0.08
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	2789.1	4527.2	29.3	45.6
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.61	0.50	<0.05	0.06
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	381.12	373.20	290.36	195.95
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	114.51	95.76	0.18	0.35
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	1.28	1.21	<0.10	<0.10
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	<0.16	<0.16	<0.16	0.17
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.72	1.48	1.74	1.60
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	10.11	9.32	2.37	2.12
Titanium / Titio (Ti)	0.04	mg/kg	17.58	16.84	0.11	0.27
Talium / Talio (Tl)	0.15	mg/kg	0.33	0.21	<0.15	<0.15
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	1.86	1.64	<0.05	<0.05
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	176.06	155.52	18.81	17.84
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15

L.D.M.: Limite de detección del método

**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal
Matriz analizada	Tejido	Tejido	Tejido	Tejido
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12
Hora de inicio de muestreo (h)	12:30	12:10	12:20	12:30
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente	T500CP-30-3	T500CP-30-1(1)	T500CP-30-2(1)	T500CP-30-3(1)
Código del Laboratorio	23020878	23020879	23020880	23020881
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>				
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados	
<b>Metales totales</b>				
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	<0.05	0.17
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	1.4	253.6
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	<0.07	3.06
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.26	1.19
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	<0.09	2.29
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	302.57	667.6
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	<0.04	0.22
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	<0.14	0.76
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	<0.04	0.22
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.11	0.53
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	0.92	3.51
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	9.34	654.92
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	9667.4	3330.8
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	0.65	1.79
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	441.6	698.3
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	1.67	19.94
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	0.20	0.31
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	147.9	2730.3
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.06	0.23
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	234.52	202.39
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	0.23	16.93
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	<0.16	<0.16
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.88	1.43
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	2.71	5.03
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	0.16	13.49
Tellurium / Teluro (Te)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	<0.05	0.90
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	59.93	55.03
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15

L.D.M.: Limite de detección del método



**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal		
Matriz analizada	Tejido	Tejido	Tejido	Tejido		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	12:35	12:40	12:44	12:35		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	T300CP-60-1	T300CP-60-2	T300CP-60-3	T300CP-60-1(1)		
Código del Laboratorio	23020882	23020883	23020884	23020885		
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales totales</b>						
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	0.34
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	1.2	3.2	2.1	338.1
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	<0.07	<0.07	<0.07	6.31
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.34	<0.10	0.11	2.01
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	<0.09	0.13	<0.09	6.77
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	246.7	164.8	172.1	1691.8
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	0.06	0.08	0.34	0.39
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	<0.14	<0.14	<0.14	1.20
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	0.54
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.13	0.11	0.10	0.50
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	0.68	0.97	0.39	6.68
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	8.60	19.92	10.80	1121.60
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	0.07
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	9384.4	9417.9	10739.4	3395.3
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	0.26	<0.14	<0.14	2.24
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	451.8	354.8	412.3	884.9
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	10.95	6.41	6.96	84.07
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	<0.07	<0.07	<0.07	0.77
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	56.2	45.7	48.6	2525.9
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.06	0.06	0.05	0.35
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	337.93	238.55	206.22	551.11
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	0.21	0.58	0.44	23.03
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10	<0.10	0.20
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	<0.16	0.19	<0.16	<0.16
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.76	1.17	1.57	<0.05
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	2.46	1.67	1.71	15.01
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	0.15	0.24	0.16	13.90
Talium / Talio (Tl)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	1.38
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	4.44	25.12	6.61	49.21
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15

L.D.M.: Limite de detección del método



**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Matriz analizada	Fecha de muestreo	Hora de inicio de muestreo (h)	Condiciones de la muestra	Código del Cliente	Código del Laboratorio	Raíz - Tejido Vegetal	Raíz - Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal
							Tejido	Tejido	Tejido	Tejido
							2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12
							12:40	12:44	01:00	01:09
							Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
							T300CP-60-2(1)	T300CP-60-3(1)	T300CP-30-1	T300CP-30-2
							23020886	23020887	23020888	23020889
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>										
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados							
<b>Metales totales</b>										
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	0.86	0.51	<0.05	<0.05				
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	368.0	155.9	1.2	1.01				
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	11.50	6.04	<0.07	<0.07				
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.90	0.28	0.13	0.46				
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	5.72	2.77	<0.09	<0.09				
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	0.05				
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	1168.4	594.8	219.9	204.6				
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	0.69	0.33	<0.04	<0.04				
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	1.36	0.52	<0.14	<0.14				
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	0.48	0.16	<0.04	<0.04				
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.46	0.26	0.10	0.12				
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	9.65	5.59	<0.05	0.37				
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	1709.67	994.98	8.21	6.30				
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	0.29	0.15	<0.05	<0.05				
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	3656.3	4097.1	8967.2	9796.3				
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	1.94	1.36	0.16	0.15				
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	1103.5	764.8	187.8	176.5				
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	98.11	44.58	1.32	2.67				
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	0.55	0.37	<0.07	0.08				
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	3439.9	3085.3	110.3	34.3				
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.36	0.17	<0.05	0.08				
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	386.64	204.97	86.47	237.22				
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	55.91	34.74	0.19	0.17				
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	0.66	0.38	<0.10	<0.10				
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	<0.16	<0.16	<0.16	0.21				
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.48	0.41	1.95	1.51				
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	9.66	5.07	1.85	1.93				
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	15.88	6.40	0.14	0.18				
Tellurium / Talio (Tl)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15				
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	1.51	0.55	<0.05	<0.05				
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	117.84	59.35	0.78	2.20				
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15				

L.D.M.: Límite de detección del método



**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal		
Matriz analizada	Tejido	Tejido	Tejido	Tejido		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	01:15	01:00	01:09	01:15		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	T300CP-30-3	T300CP-30-1(1)	T300CP-30-2(1)	T300CP-30-3(1)		
Código del Laboratorio	23020890	23020891	23020892	23020893		
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales totales</b>						
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	0.47
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	12.4	216.3	290.8	236.9
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	0.08	1.96	2.13	5.37
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.10	0.54	1.00	1.07
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	<0.09	1.66	2.69	3.46
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	197.2	560.8	1058.7	1052.2
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	<0.04	0.11	0.13	0.47
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	<0.14	0.78	1.01	0.79
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	<0.04	0.21	0.33	0.32
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.21	0.32	1.11	0.43
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	0.63	1.24	1.65	9.04
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	26.03	466.37	628.69	916.89
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	0.10
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	10737.8	5077.8	5617.6	4589.0
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	<0.14	1.55	2.64	2.19
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	264.0	465.3	516.3	503.3
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	1.75	13.54	22.72	58.98
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	<0.07	0.15	0.24	0.36
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	129.5	1447.3	2231.4	3920.2
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.12	0.20	0.60	0.30
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	133.05	197.06	291.31	392.40
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	0.90	4.76	4.41	30.06
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10	<0.10	0.23
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.63	0.56	1.25	1.36
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	2.08	4.84	8.58	8.22
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	0.25	13.26	17.52	10.52
Talium / Talio (Tl)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	<0.05	0.85	1.16	0.81
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	6.66	9.43	10.90	62.25
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15

L.D.M.: Limite de detección del método

**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal		
Matriz analizada	Tejido	Tejido	Tejido	Tejido		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	01:19	01:23	01:30	01:19		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	CR60-1	CR60-2	CR60-3	CR60-1(1)		
Código del Laboratorio	23020894	23020895	23020896	23020897		
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales totales</b>						
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	1.42
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	2.1	3.7	2.6	1265.1
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	<0.07	<0.07	<0.07	49.12
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.43	0.40	0.22	0.72
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	<0.09	0.10	<0.09	13.50
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	0.09
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	148.2	239.5	209.8	1759.2
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	<0.04	0.06	0.06	1.35
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	<0.14	<0.14	<0.14	2.99
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	<0.04	0.04	<0.04	0.96
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.12	0.13	0.14	1.07
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	<0.05	0.49	0.67	14.34
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	8.95	14.44	12.32	5412.04
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	<0.05	0.05	<0.05	0.55
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	10139.2	8596.3	8300.9	2825.8
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	<0.14	<0.14	<0.14	2.04
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	217.6	469.9	484.2	1025.7
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	11.80	16.59	9.30	116.60
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	<0.07	0.09	<0.07	0.32
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	60.7	102.1	88.2	1997.6
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.06	0.09	0.06	0.60
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	183.90	544.47	381.75	331.14
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	0.15	0.32	0.29	217.67
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	<0.10	<0.10	<0.10	2.73
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	0.27	0.23	<0.16	<0.16
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.57	1.06	0.56	1.98
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	1.51	2.24	1.98	13.74
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	0.21	0.30	0.18	47.07
Talium / Talio (Tl)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	0.76
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	4.77
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	1.42	12.13	40.35	160.36
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15

L.D.M.: Límite de detección del método

**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**
**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal		
Matriz analizada	Tejido	Tejido	Tejido	Tejido		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	01:23	01:30	01:35	01:38		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	CR60-2(1)	CR60-3(1)	CR30-1	CR30-2		
Código del Laboratorio	23020898	23020899	23020900	23020901		
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales totales</b>						
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	0.82	0.52	<0.05	<0.05
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	337.6	248.7	0.9	1.6
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	9.90	4.14	<0.07	<0.07
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.59	0.71	0.17	0.23
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	4.01	2.54	0.09	<0.09
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	0.05	<0.04	<0.04
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	749.7	492.9	282.4	258.2
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	0.62	0.40	<0.04	<0.04
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	1.02	0.70	<0.14	<0.14
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	0.39	0.23	<0.04	<0.04
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.45	0.33	0.08	0.08
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	7.34	5.22	0.32	0.53
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	1819.31	913.93	14.04	19.66
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	0.32	0.19	<0.05	<0.05
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	3288.4	3572.5	8228.3	8340.0
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	0.72	1.12	<0.14	0.19
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	664.3	695.6	274.6	228.3
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	84.48	37.61	6.55	6.72
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	0.17	0.22	<0.07	0.10
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	1555.0	2789.2	116.5	193.1
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.26	0.21	<0.05	0.06
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	295.55	340.05	246.78	122.46
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	56.98	23.79	0.10	0.13
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	0.58	0.32	<0.10	<0.10
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	<0.16	<0.16	0.19	0.20
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	1.09	0.97	0.77	2.01
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	6.17	4.29	2.79	2.08
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	14.14	11.60	0.14	0.14
Talium / Talio (Tl)	0.15	mg/kg	1.68	0.44	<0.15	<0.15
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	1.46	0.95	<0.05	<0.05
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	62.73	93.27	6.58	6.56
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15

L.D.M.: Límite de detección del método



**INFORME DE ENSAYO N° 170842-2023  
CON VALOR OFICIAL**

**II. RESULTADOS:**

Producto declarado	Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal	Raiz - Tejido Vegetal		
Matriz analizada	Tejido	Tejido	Tejido	Tejido		
Fecha de muestreo	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12	2023-02-12		
Hora de inicio de muestreo (h)	01:42	01:35	01:38	01:42		
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código del Cliente	CR30-3	CR30-1(1)	CR30-2(1)	CR30-3(1)		
Código del Laboratorio	23020902	23020903	23020904	23020905		
<b>ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829</b>						
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados			
<b>Metales totales</b>						
Silver / Plata (Ag)	0.05	mg/kg	<0.05	1.15	0.47	0.38
Aluminium / Aluminio (Al)	0.7	mg/kg	3.6	402.1	312.9	521.7
Arsenic / Arsénico (As)	0.07	mg/kg	<0.07	15.40	3.90	5.58
Boron / Boro (B)	0.10	mg/kg	0.42	0.48	0.63	0.87
Barium / Bario (Ba)	0.09	mg/kg	<0.09	5.72	3.24	5.27
Beryllium / Berilio (Be)	0.04	mg/kg	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Calcium / Calcio (Ca)	1.4	mg/kg	227.6	822.9	562.3	950.9
Cadmium / Cadmio (Cd)	0.04	mg/kg	<0.04	1.18	0.27	0.42
Cerium / Cerio (Ce)	0.14	mg/kg	<0.14	1.39	0.76	1.40
Cobalt / Cobalto (Co)	0.04	mg/kg	<0.04	0.51	0.32	0.49
Chromium / Cromo (Cr)	0.04	mg/kg	0.18	0.51	0.44	0.54
Copper / Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	0.55	11.54	4.21	5.29
Iron / Hierro (Fe)	0.12	mg/kg	15.83	3133.03	906.95	1509.94
Mercury / Mercurio (Hg)	0.05	mg/kg	<0.05	1.61	0.12	0.20
Potassium / Potasio (K)	1.8	mg/kg	7970.8	2818.7	3553.6	2835.4
Lithium / Litio (Li)	0.14	mg/kg	0.46	0.98	1.18	1.31
Magnesium / Magnesio (Mg)	1.9	mg/kg	454.0	484.9	365.4	518.7
Manganese / Manganeso (Mn)	0.04	mg/kg	8.49	76.44	31.40	46.18
Molybdenum / Molibdeno (Mo)	0.07	mg/kg	<0.07	0.29	0.24	0.39
Sodium / Sodio (Na)	1.6	mg/kg	2283.9	1965.3	2215.6	2580.1
Nickel / Niquel (Ni)	0.05	mg/kg	0.06	0.28	0.21	0.30
Phosphorus / Fósforo (P)	0.15	mg/kg	276.73	265.76	201.78	261.81
Lead / Plomo (Pb)	0.04	mg/kg	0.22	87.45	17.42	25.43
Antimony / Antimonio (Sb)	0.10	mg/kg	<0.10	0.80	0.11	0.16
Selenium / Selenio (Se)	0.16	mg/kg	0.20	<0.16	<0.16	<0.16
Tin / Estaño (Sn)	0.05	mg/kg	2.00	1.29	1.31	1.44
Strontium / Estroncio (Sr)	0.04	mg/kg	1.80	7.12	4.65	7.59
Titanium / Titanio (Ti)	0.04	mg/kg	0.29	16.68	16.17	26.25
Tellurium / Teluro (Te)	0.15	mg/kg	<0.15	1.11	0.38	0.20
Vanadium / Vanadio (V)	0.05	mg/kg	<0.05	2.13	1.41	2.17
Zinc (Zn)	0.14	mg/kg	13.73	89.56	29.89	39.12
Uranium / Uranio (U)	0.15	mg/kg	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15

L.D.M.: Límite de detección del método

## Anexo 05. Otros Anexos

### 5.1. Producción del biocarbón

Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:02/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 11/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g) Ingreso / Salida				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P1	300°C	2:00 p. m.	3:30 p. m.	300	140	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	98
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:02/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 11/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P2	300°C	4:30 p.m.	6:00 p. m.	300	128	P1	500°C	5:30 p. m.	7:00 p. m.	300	95
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:03/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 12/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P3	300°C	2:00 p. m.	3:30 p. m.	300	130	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	102
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:03/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 12/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P4	300°C	4:30 p.m	6:00 p. m.	300	129	P1	500°C	5:30 p. m.	7:00 p. m.	300	100
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:04/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 13/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P5	300°C	2:00 p. m.	3:30 p. m.	300	130	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	103
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:04/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 13/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P6	300°C	4:30 p.m	6:00 p. m.	300	128	P1	500°C	5:30 p. m.	7:00 p. m.	300	103
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:05/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 14/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P7	300°C	2:00 p. m.	3:30 p. m.	300	135	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	100
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:05/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 14/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P8	300°C	4:30 p.m	6:00 p. m.	300	129	P1	500°C	5:30 p. m.	7:00 p. m.	300	100
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:06/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 15/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P9	300°C	2:00 p. m.	3:30 p. m.	300	130	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	99
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:06/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 15/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P10	300°C	4:30 p.m	6:00 p. m.	300	132	P1	500°C	5:30 p. m.	7:00 p. m.	300	98
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:08/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 16/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P11	300°C	2:00 p. m.	3:30 p. m.	300	130	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	98
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:08/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 16/04/2022</i>	
		Hora		Peso				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P12	300°C	4:30 p.m	6:00 p. m.	300	135	P1	500°C	5:30 p. m.	7:00 p. m.	300	102
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha:08/04/2022</i>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<i>Fecha: 17/04/2022</i>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	

P13	300°C	8:00 p.m	10:00 p.m	300	132	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	102
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<b>Fecha:09/04/2022</b>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<b>Fecha: 17/04/2022</b>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P14	300°C	2:00 p. m.	3:30 p. m.	300	130	P1	500°C	5:30 p. m.	7:00 p. m.	300	100
Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<b>Fecha:09/04/2022</b>		Nombre	Temperatura	Entrada	Salida	<b>Fecha: 18/04/2022</b>	
		Hora		Peso (g)				Hora		Peso (g) Ingreso / Salida	
P15	300°C	4:30 p.m	6:00 p. m.	300	130	P1	500°C	3:00 p. m.	4:30 p. m.	300	101
				4500	2238					4500	1501
Rendimiento (%)				49.73333333		Rendimiento (%)				33.35555556	

5.2. Resultados de los bioensayos de germinación

	c - R1	DOSIFICACIÓN	Control		
Control	Control	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS		
			3		
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA	
		SEMILLA 1		32.39	12.55
		SEMILLA 2		62.27	16.37
		SEMILLA 3		18.16	6.95
		SEMILLA 4		-	-
		SEMILLA 5		-	-
		SEMILLA 6		-	-
		SEMILLA 7		-	-
		SEMILLA 8		-	-
		SEMILLA 9		-	-
		SEMILLA 10		-	-
		PROMEDIO	37.60666667	11.95666667	
	R1	DOSIFICACIÓN			
P1	R1	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS		
			4		
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA	
		SEMILLA 1		93.19	14.89
		SEMILLA 2		68.98	14.73
		SEMILLA 3		19.91	17.22
		SEMILLA 4		67.76	15.5
		SEMILLA 5			
		SEMILLA 6		-	-
		SEMILLA 7		-	-
		SEMILLA 8		-	-
		SEMILLA 9		-	-
		SEMILLA 10		-	-
		PROMEDIO	62.46	15.585	
	R2	DOSIFICACIÓN			
P2	R2	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS		
			6		
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA	
		SEMILLA 1		59.25	15.7
		SEMILLA 2		69.76	17.18
		SEMILLA 3		31.54	11.4
		SEMILLA 4		50.28	12.4
		SEMILLA 5		52.1	13.15
		SEMILLA 6		60.8	19.2
SEMILLA 7		-	-		

		SEMILLA 8	-	-
		SEMILLA 9	-	-
		SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO	53.955	14.83833333
	R3	DOSIFICACIÓN		
P3	R3	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS	
			8	
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA
		SEMILLA 1	65.92	13.23
		SEMILLA 2	67.85	12.97
		SEMILLA 3	64.73	13.93
		SEMILLA 4	64.22	6.08
		SEMILLA 5	62.94	15.83
		SEMILLA 6	46.09	15.05
		SEMILLA 7	69.39	9.96
		SEMILLA 8	75.33	10.61
		SEMILLA 9	-	-
		SEMILLA 10	-	-
				PROMEDIO
	R4	DOSIFICACIÓN		
P4	R4	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS	
			2	
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA
		SEMILLA 1	56.72	16.26
		SEMILLA 2	63.19	8.15
		SEMILLA 3	-	-
		SEMILLA 4	-	-
		SEMILLA 5	-	-
		SEMILLA 6	-	-
		SEMILLA 7	-	-
		SEMILLA 8	-	-
		SEMILLA 9	-	-
		SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO	59.955	12.205
	R5	DOSIFICACIÓN		
P5	R5	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS	
			4	
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA
		SEMILLA 1	40.2	10.4
		SEMILLA 2	25.2	20.2
		SEMILLA 3	26.3	13.8
		SEMILLA 4	40.1	15.2
		SEMILLA 5	-	-
SEMILLA 6	-	-		

		SEMILLA 7	-	-		
		SEMILLA 8	-	-		
		SEMILLA 9	-	-		
		SEMILLA 10	-	-		
		PROMEDIO	32.95	14.9		
	R6	DOSIFICACIÓN				
P6	R6	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			0			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		
				SEMILLA 1	-	-
				SEMILLA 2	-	-
				SEMILLA 3	-	-
				SEMILLA 4	-	-
				SEMILLA 5	-	-
				SEMILLA 6	-	-
				SEMILLA 7	-	-
				SEMILLA 8	-	-
				SEMILLA 9	-	-
				SEMILLA 10	-	-
				PROMEDIO		
	R7	DOSIFICACIÓN				
P7	R7	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			1			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		
				SEMILLA 1	35.21	12.3
				SEMILLA 2	-	-
				SEMILLA 3	-	-
				SEMILLA 4	-	-
				SEMILLA 5	-	-
				SEMILLA 6	-	-
				SEMILLA 7	-	-
				SEMILLA 8	-	-
				SEMILLA 9	-	-
				SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO	35.21	12.3		
	R8	DOSIFICACIÓN				
P8	R8	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			7			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		
				SEMILLA 1	22.99	22.36
				SEMILLA 2	90.03	9.38
		SEMILLA 3	37.17	7.96		
		SEMILLA 4	36.47	15.23		

		SEMILLA 5	69.73	12.28
		SEMILLA 6	71.2	15.63
		SEMILLA 7	39.92	14.46
		SEMILLA 8	-	-
		SEMILLA 9	-	-
		SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO	52.50142857	13.9
	R9	DOSIFICACIÓN		
P9	R9	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS	
			2	
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA
		SEMILLA 1	73.55	20.24
		SEMILLA 2	70.53	17.61
		SEMILLA 3	-	-
		SEMILLA 4	-	-
		SEMILLA 5	-	-
		SEMILLA 6	-	-
		SEMILLA 7	-	-
		SEMILLA 8	-	-
		SEMILLA 9	-	-
		SEMILLA 10	-	-
				PROMEDIO
	R10	DOSIFICACIÓN		
P10	R10	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS	
			0	
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA
		SEMILLA 1	-	-
		SEMILLA 2	-	-
		SEMILLA 3	-	-
		SEMILLA 4	-	-
		SEMILLA 5	-	-
		SEMILLA 6	-	-
		SEMILLA 7	-	-
		SEMILLA 8	-	-
		SEMILLA 9	-	-
		SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO		

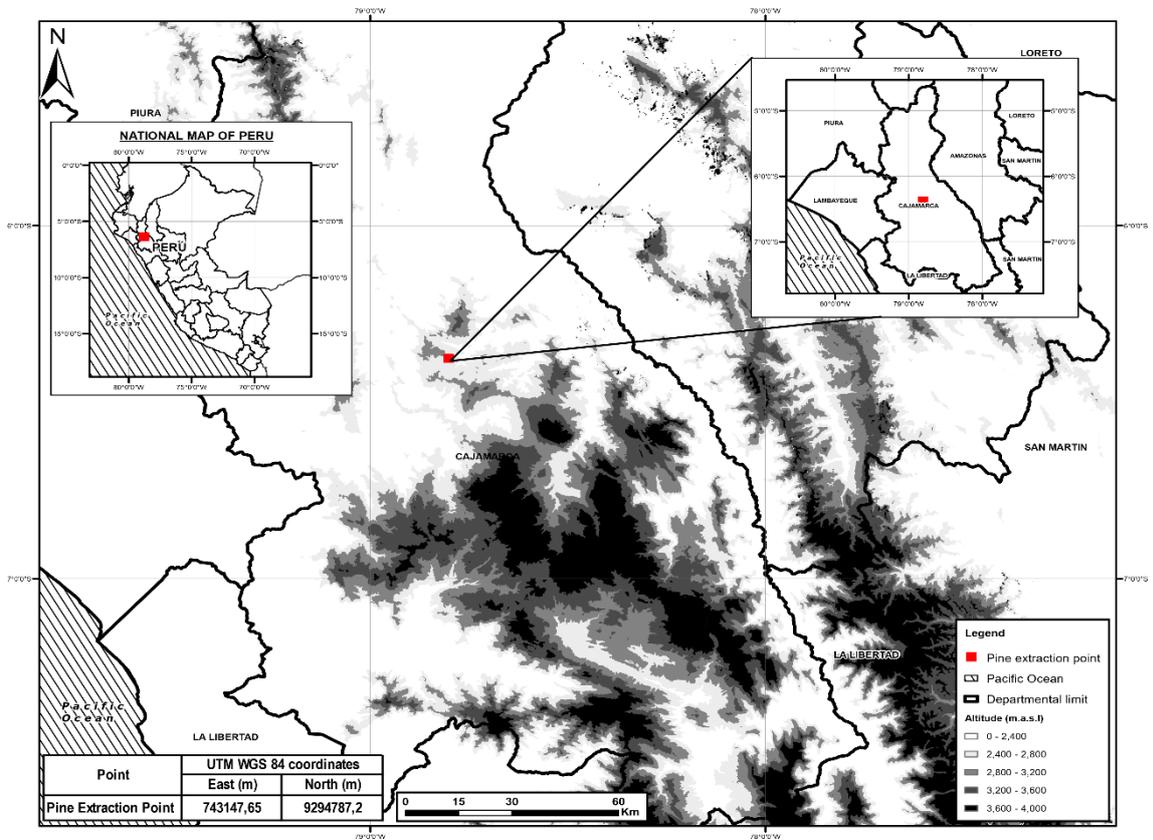
	R11	DOSIFICACIÓN		
P11	R11	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS	
			1	
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA
		SEMILLA 1	32.18	18.51

		SEMILLA 2	-	-		
		SEMILLA 3	-	-		
		SEMILLA 4	-	-		
		SEMILLA 5	-	-		
		SEMILLA 6	-	-		
		SEMILLA 7	-	-		
		SEMILLA 8	-	-		
		SEMILLA 9	-	-		
		SEMILLA 10	-	-		
		PROMEDIO	32.18	18.51		
	R12	DOSIFICACIÓN				
P12	R12	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			0			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		
				SEMILLA 1	-	-
				SEMILLA 2	-	-
				SEMILLA 3	-	-
				SEMILLA 4	-	-
				SEMILLA 5	-	-
				SEMILLA 6	-	-
				SEMILLA 7	-	-
				SEMILLA 8	-	-
				SEMILLA 9	-	-
				SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO				
	R13	DOSIFICACIÓN				
P14	R13	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			2			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		
				SEMILLA 1	57.04	14.96
				SEMILLA 2	48.16	11.37
				SEMILLA 3	-	-
				SEMILLA 4	-	-
				SEMILLA 5	-	-
				SEMILLA 6	-	-
				SEMILLA 7	-	-
				SEMILLA 8	-	-
				SEMILLA 9	-	-
				SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO	52.6	13.165		
	R14	DOSIFICACIÓN				
P14	R14	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			3			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		

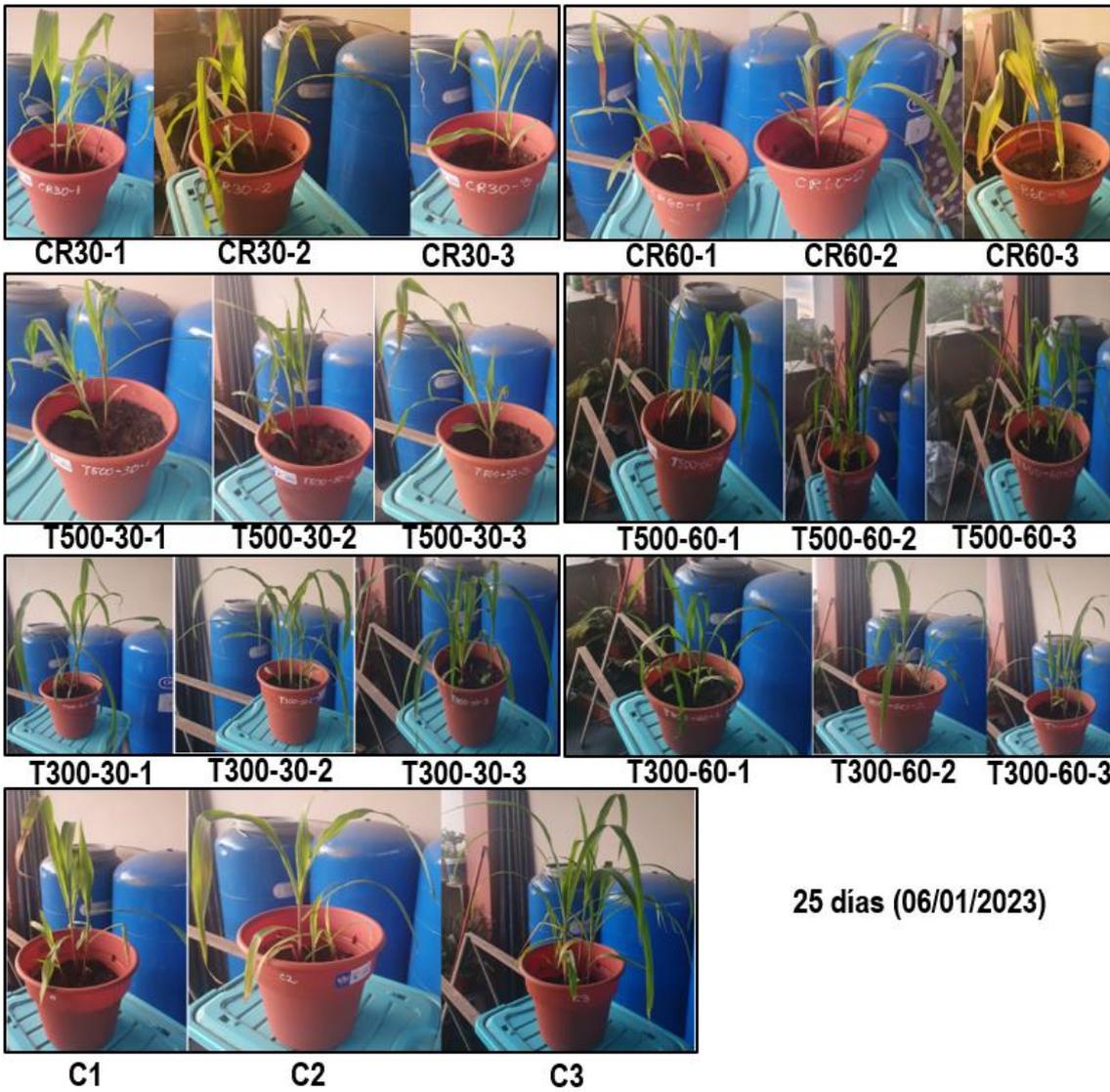
		SEMILLA 1	58.26	13.7		
		SEMILLA 2	59.55	17.29		
		SEMILLA 3	19.1	11.93		
		SEMILLA 4	-	-		
		SEMILLA 5	-	-		
		SEMILLA 6	-	-		
		SEMILLA 7	-	-		
		SEMILLA 8	-	-		
		SEMILLA 9	-	-		
		SEMILLA 10	-	-		
		PROMEDIO	45.63666667	14.30666667		
	R15	DOSIFICACIÓN				
P15	R15	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			1			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		
				SEMILLA 1	53.14	25.78
				SEMILLA 2	-	-
				SEMILLA 3	-	-
				SEMILLA 4	-	-
				SEMILLA 5	-	-
				SEMILLA 6	-	-
				SEMILLA 7	-	-
				SEMILLA 8	-	-
				SEMILLA 9	-	-
				SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO	53.14	25.78		
	R16	DOSIFICACIÓN				
P16	R16	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			6			
			LONGITUD HIPOCÓTILO	LONGITUD RADÍCULA		
				SEMILLA 1	15.29	15.3
				SEMILLA 2	84.83	21.02
				SEMILLA 3	64.07	14.26
				SEMILLA 4	80.99	24.96
				SEMILLA 5	10.86	9.97
				SEMILLA 6	12.39	7.26
				SEMILLA 7	-	-
				SEMILLA 8	-	-
				SEMILLA 9	-	-
				SEMILLA 10	-	-
		PROMEDIO	44.73833333	15.46166667		
		DOSIFICACIÓN				
P17	R17	REPETICIÓN 1	NRO. SEMILLAS GERMINADAS			
			5			

			<b>LONGITUD HIPOCÓTILO</b>	<b>LONGITUD RADÍCULA</b>		
		<b>SEMILLA 1</b>	74.27	10.72		
		<b>SEMILLA 2</b>	64.94	13.64		
		<b>SEMILLA 3</b>	75.56	12.62		
		<b>SEMILLA 4</b>	63.98	11.55		
		<b>SEMILLA 5</b>	74.33	14.71		
		<b>SEMILLA 6</b>	-	-		
		<b>SEMILLA 7</b>	-	-		
		<b>SEMILLA 8</b>	-	-		
		<b>SEMILLA 9</b>	-	-		
		<b>SEMILLA 10</b>	-	-		
		<b>PROMEDIO</b>	70.616	12.648		
	<b>R18</b>	<b>DOSIFICACIÓN</b>				
<b>P18</b>	<b>R18</b>	<b>REPETICIÓN 1</b>	<b>NRO. SEMILLAS GERMINADAS</b>			
			0			
			<b>LONGITUD HIPOCÓTILO</b>	<b>LONGITUD RADÍCULA</b>		
				<b>SEMILLA 1</b>	-	-
				<b>SEMILLA 2</b>	-	-
				<b>SEMILLA 3</b>	-	-
				<b>SEMILLA 4</b>	-	-
				<b>SEMILLA 5</b>	-	-
				<b>SEMILLA 6</b>	-	-
				<b>SEMILLA 7</b>	-	-
				<b>SEMILLA 8</b>	-	-
				<b>SEMILLA 9</b>	-	-
		<b>SEMILLA 10</b>	-	-		
		<b>PROMEDIO</b>				
	<b>R19</b>	<b>DOSIFICACIÓN</b>				
<b>P19</b>	<b>R19</b>	<b>REPETICIÓN 1</b>	<b>NRO. SEMILLAS GERMINADAS</b>			
			4			
			<b>LONGITUD HIPOCÓTILO</b>	<b>LONGITUD RADÍCULA</b>		
				<b>SEMILLA 1</b>	46.32	18.5
				<b>SEMILLA 2</b>	42.37	19.9
				<b>SEMILLA 3</b>	35.25	15.1
				<b>SEMILLA 4</b>	13.33	19.06
				<b>SEMILLA 5</b>	-	-
				<b>SEMILLA 6</b>	-	-
				<b>SEMILLA 7</b>	-	-
				<b>SEMILLA 8</b>	-	-
				<b>SEMILLA 9</b>	-	-
		<b>SEMILLA 10</b>	-	-		
		<b>PROMEDIO</b>	34.3175	18.14		

5.3. Mapa temático de la obtención de las ramas de Pino de Cutervo – Cajamarca, para la producción del biocarbón



5.4. Resultados observables de la altura durante la fitorremediación (días)





T500-30-1

T500-30-2

T500-30-3

T500-60-1

T500-60-2

T500-60-3



T300-30-1

T300-30-2

T300-30-3

T300-60-1

T300-60-2

T300-60-3



CR30-1

CR30-2

CR30-3

CR60-1

CR60-2

CR60-3

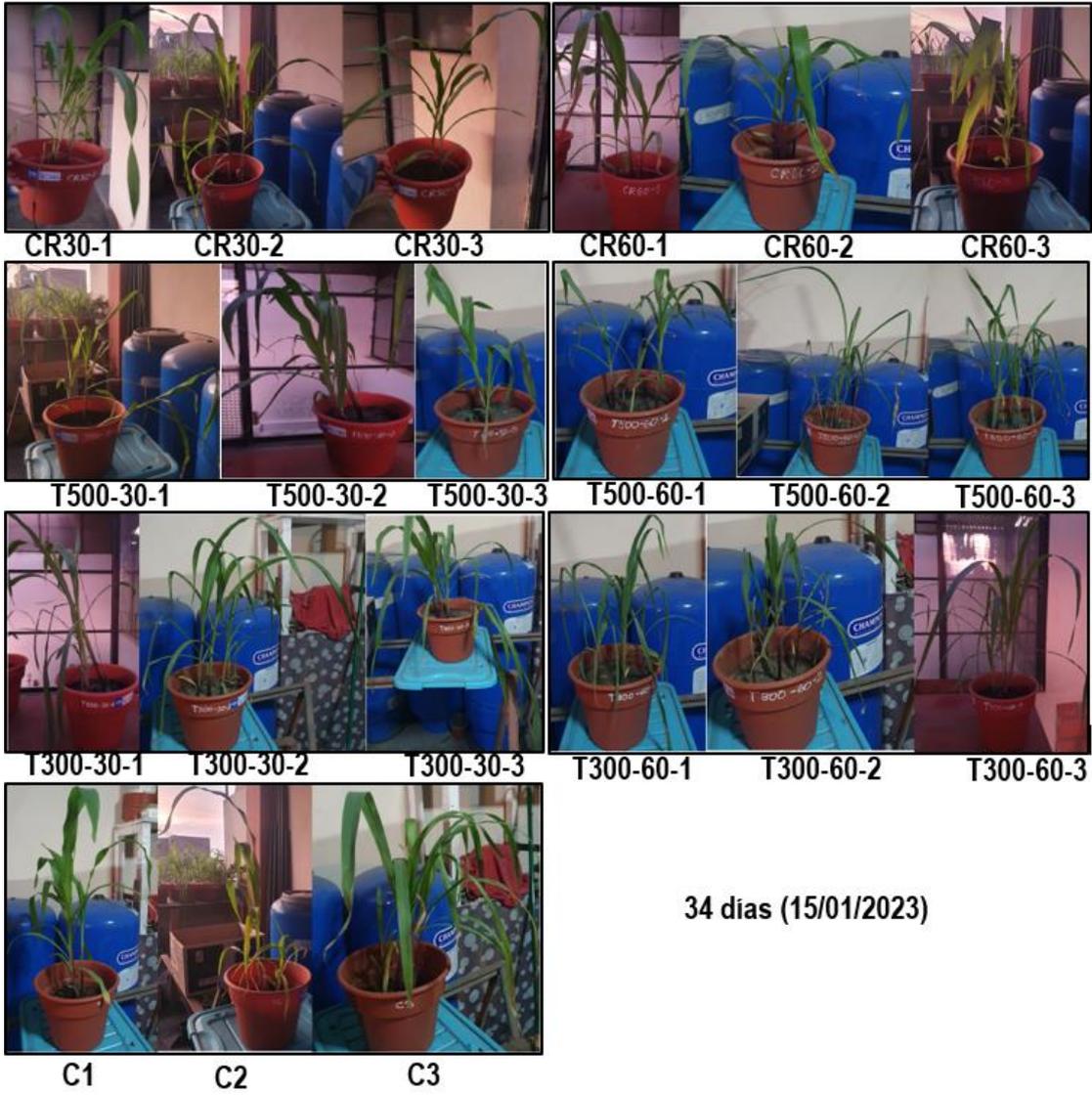


C1

C2

C3

30 días (11/01/2023)





**CR30-1 CR30-2 CR30-3**

**CR60-1 CR60-2 CR60-3**



**T300-30-1 T300-30-2 T300-30-3**



**T300-60-1 T300-60-2 T300-60-3**



**T500-30-1 T500-30-2 T500-30-3**



**T500-60-1 T500-60-2 T500-60-3**



**C1**

**C2**

**C3**

**39 dias (20/01/2023)**



T500-30-1 T500-30-2 T500-30-3



T500-60-1 T500-60-2 T500-60-3



T300-30-1 T300-30-2 T300-30-3



T300-60-1 T300-60-2 T300-60-3



CR30-1 CR30-2 CR30-3



CR60-1 CR60-2 CR60-3



C1 C2 C3

40 días (21/01/2023)



T300-30-1 T300-30-2 T300-30-3 T300-60-1 T300-60-2 T300-60-3



T500-30-1 T500-30-2 T500-30-3 T500-60-1 T500-60-2 T500-60-3



CR30-1 CR30-2 CR30-3 CR60-1 CR60-2 CR60-3



C1 C2 C3

43 días (24/01/2023)



## 5.5. Prueba ANOVA una vía, usando software JMP. (FBA)

Procesamiento de datos 25.02.2023 - JMP

Archivo Editar Tablas Filtros Cols Diseño de experimentos Análisis Gráficos Herramientas Vista Ventana Ayuda

	CODIFICACION	Metal pesado	Dosificación de biocarbón...	Temperatura de producción del ...	Concentración de metal en la ...	Concentración de metal pesado ...	Concentración del metal pesado en ...	FBA	FBR	FT
1	T300CP-30	As	30	300	0.13	1.96	152.36	0.000853242	0.012864269	0.066326531
2	T300CP-30	As	30	300	0.46	2.13	230.13	0.00199887	0.009255638	0.215962441
3	T300CP-30	As	30	300	0.08	5.37	230.31	0.000347358	0.0233164	0.014897579
4	T300CP-60	As	60	300	0.07	6.31	416.37	0.00016812	0.01515479	0.011093502
5	T300CP-60	As	60	300	0.07	11.5	476.38	0.000146942	0.024140392	0.006086957
6	T300CP-60	As	60	300	0.07	6.04	342.55	0.00020435	0.017632462	0.011589404
7	T500CP-30	As	30	500	0.07	3.06	264.11	0.000265041	0.011586082	0.022875817
8	T500CP-30	As	30	500	0.07	1.9	248.29	0.000281928	0.007652342	0.036842105
9	T500CP-30	As	30	500	0.07	2.51	95.12	0.000735913	0.026387721	0.027888446
10	T500CP-60	As	60	500	0.07	10.99	396.37	0.000176603	0.027726619	0.006369427
11	T500CP-60	As	60	500	0.07	19.93	408.7	0.000171275	0.048764375	0.003512293
12	T500CP-60	As	60	500	0.07	18.26	307.4	0.000227716	0.059401431	0.00383516
13	T300CP-30	Pb	30	300	0.19	4.76	62.91	0.000302019	0.007566365	0.039915966
14	T300CP-30	Pb	30	300	0.17	4.41	1034.57	0.000164319	0.004262641	0.038548753
15	T300CP-30	Pb	30	300	0.9	30.06	1035.4	0.000869229	0.029032258	0.02994012
16	T300CP-60	Pb	60	300	0.21	23.03	1756.49	0.000119557	0.013111376	0.009118541
17	T300CP-60	Pb	60	300	0.58	55.91	1956.51	0.000296446	0.028576394	0.010373815
18	T300CP-60	Pb	60	300	0.44	34.74	1347.05	0.00032664	0.025789689	0.012665515
19	T500CP-30	Pb	30	500	0.18	16.93	1141.87	0.000157636	0.014826556	0.010632014
20	T500CP-30	Pb	30	500	0.35	2.43	1089.67	0.000321198	0.002230033	0.144032922
21	T500CP-30	Pb	30	500	0.23	13.31	330.52	0.000695873	0.040269878	0.01728024
22	T500CP-60	Pb	60	500	0.39	67.6	1830.95	0.000213004	0.036920724	0.005769231
23	T500CP-60	Pb	60	500	0.65	114.51	1801.88	0.000360734	0.063550292	0.00567636
24	T500CP-60	Pb	60	500	0.24	95.76	1385.71	0.000173196	0.069105368	0.002506266

### Ajuste por mínimos cuadrados

#### Resumen de efectos

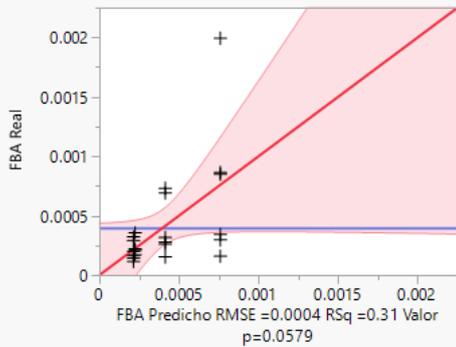
Fuente	Log Utilidad	Valor p
Dosificación de biocarbón-compost en relave	3.205	0.00062
Temperatura de producción del biocarbón	2.476	0.00334
Dosificación de biocarbón-compost en relave*Temperatura de producción del biocarbón	1.926	0.01186

[Quitar](#) [Agregar](#) [Editar](#)  FDR

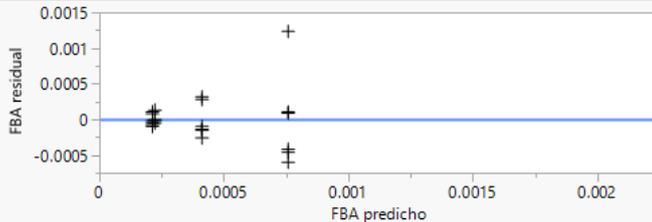
### Respuesta FBA

#### Modelo completo

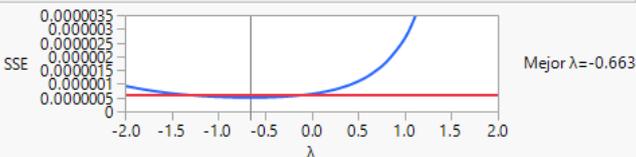
##### Gráfico Observados frente a predichos

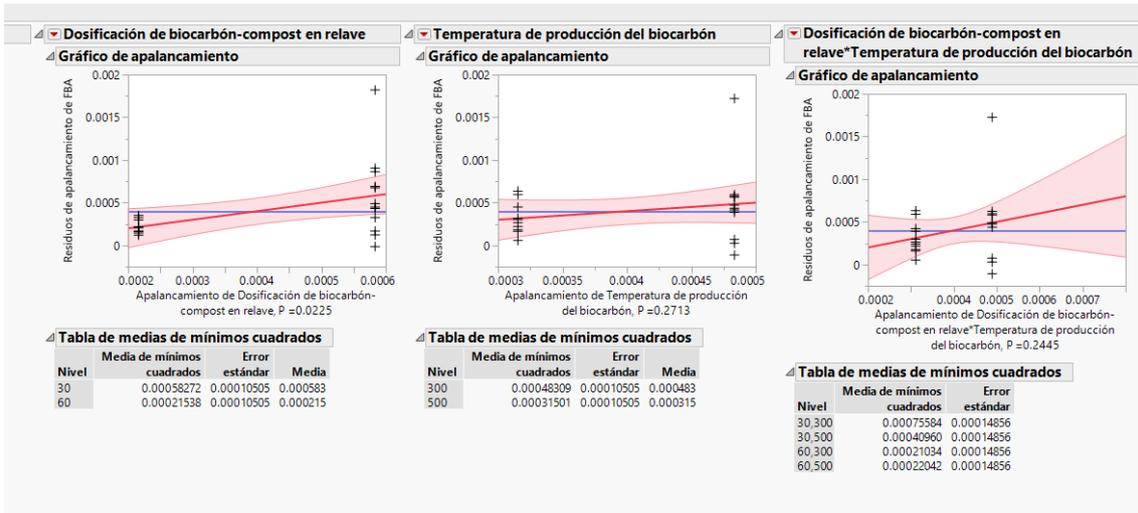


##### Gráfico de residuos frente a valores predichos



##### Transformaciones de Box-Cox





**▷ Resumen del ajuste**

▷ Análisis de varianza

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F
Modelo	3	1.16957e-6	3.8986e-7	2.9440
Error	20	2.64849e-6	1.3242e-7	<b>Prob &gt; F</b>
C. Total	23	3.81806e-6		0.0579

▷ Estimaciones de los parámetros

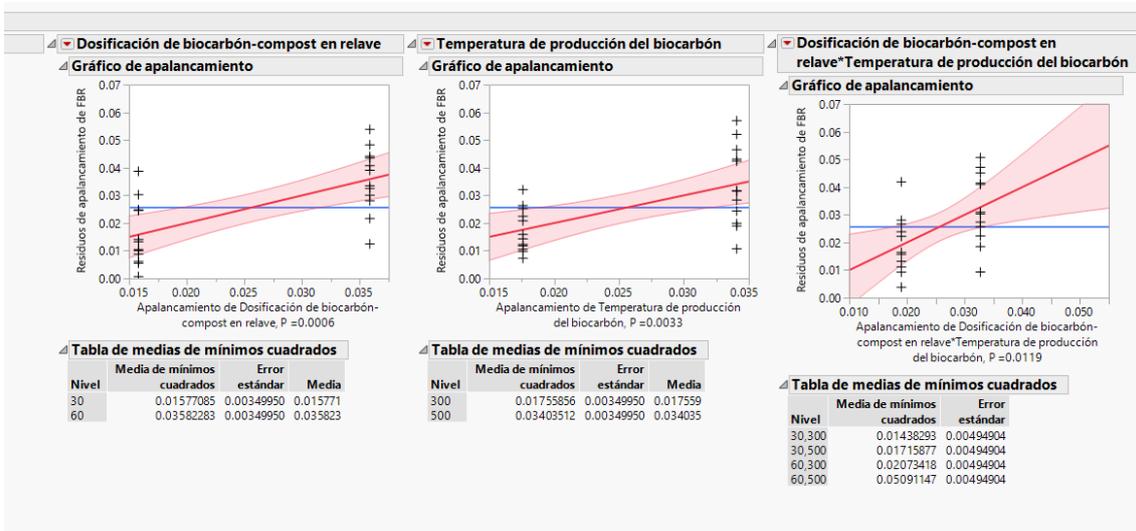
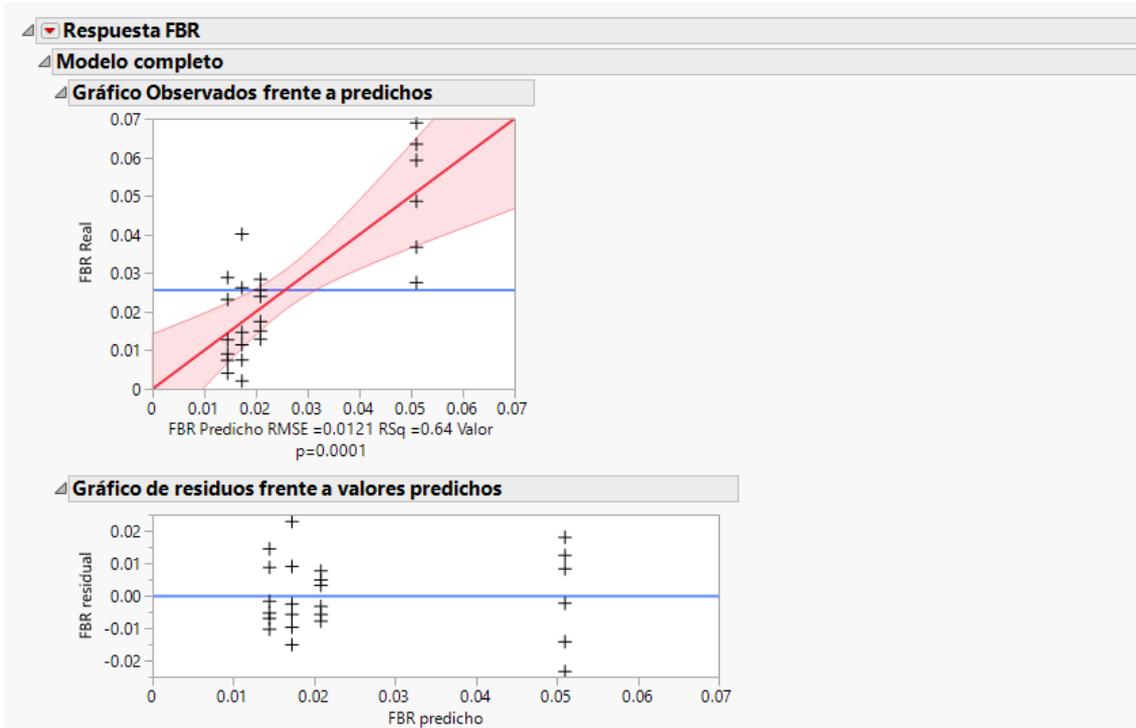
Término	Error		Razón t	Prob >  t
	Estimación	estándar		
Constante del modelo	0.0003991	7.428e-5	5.37	<.0001*
Dosificación de biocarbón-compost en relave[30]	0.0001837	7.428e-5	2.47	0.0225*
Temperatura de producción del biocarbón[300]	8.4041e-5	7.428e-5	1.13	0.2713
Dosificación de biocarbón-compost en relave[30]*Temperatura de producción del biocarbón[300]	8.908e-5	7.428e-5	1.20	0.2445

▷ Pruebas de los efectos

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
Dosificación de biocarbón-compost en relave	1	1	8.09618e-7	6.1138	0.0225*
Temperatura de producción del biocarbón	1	1	1.69508e-7	1.2800	0.2713
Dosificación de biocarbón-compost en relave*Temperatura de producción del biocarbón	1	1	1.90446e-7	1.4381	0.2445

▷ Perfiles de interacciones

## 5.6. Prueba ANOVA una VIA, usando software JMP. (FBR)



**Resumen del ajuste**

R cuadrado	0.637443
R cuadrado ajustado	0.58306
Raíz del error cuadrático medio	0.012123
Media de respuesta	0.025797
Observaciones (o suma de pesos)	24

**Análisis de varianza**

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F
Modelo	3	0.00516761	0.001723	11.7213
Error	20	0.00293916	0.000147	<b>Prob &gt; F</b>
C. Total	23	0.00810678		<b>0.0001*</b>

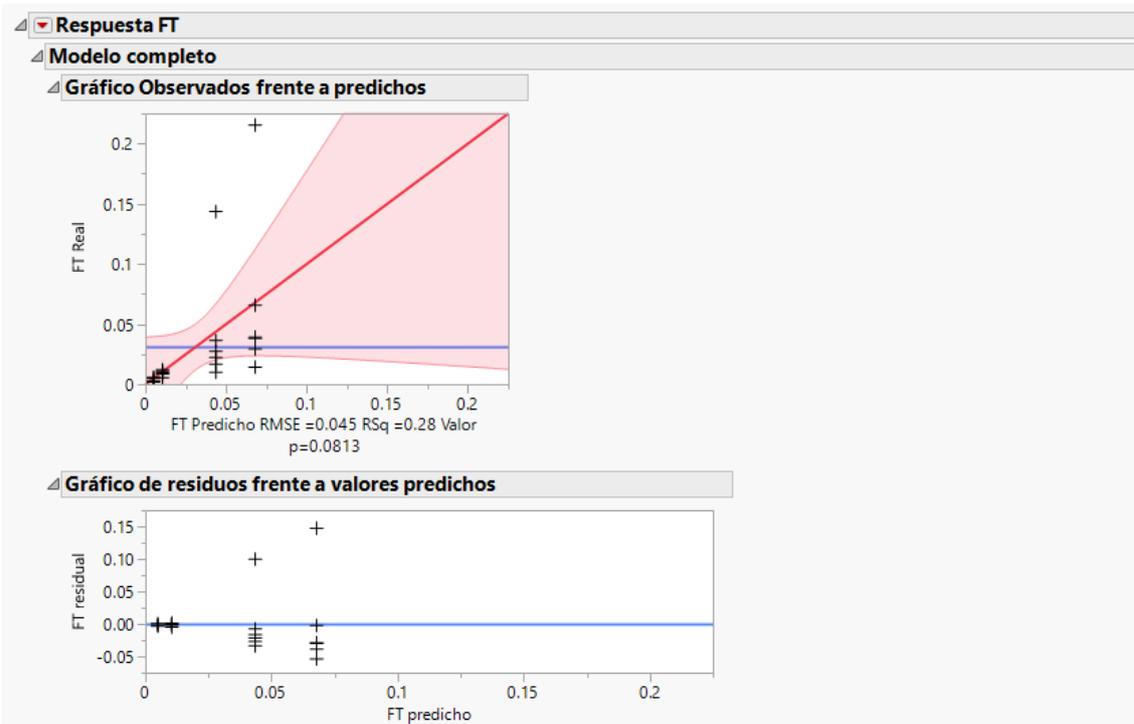
**Estimaciones de los parámetros**

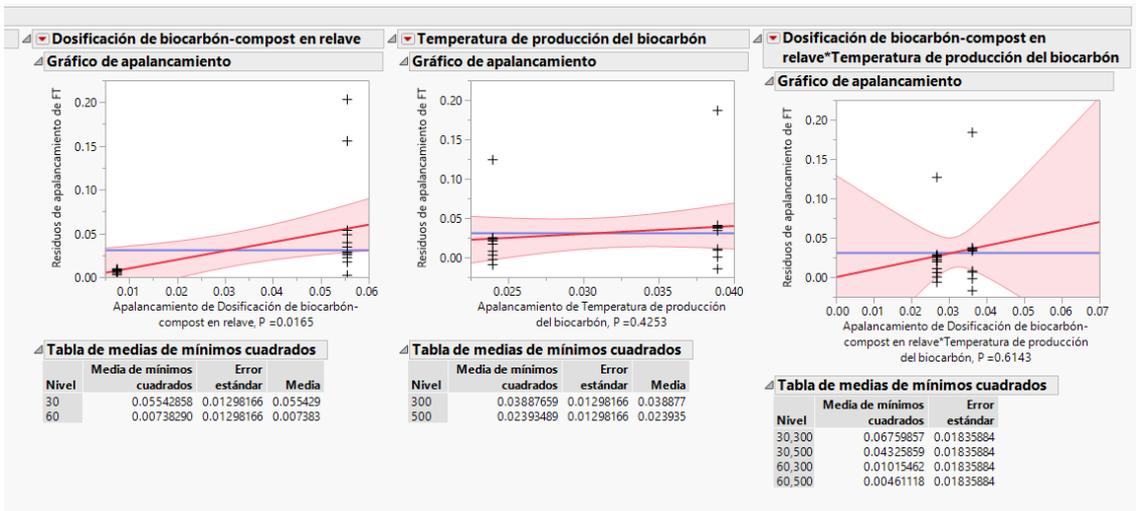
Término	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob >  t
Constante del modelo	0.0257968	0.002475	10.42	<.0001*
Dosificación de biocarbón-compost en relave[30]	-0.010026	0.002475	-4.05	<b>0.0006*</b>
Temperatura de producción del biocarbón[300]	-0.008238	0.002475	-3.33	<b>0.0033*</b>
Dosificación de biocarbón-compost en relave[30]*Temperatura de producción del biocarbón[300]	0.0068504	0.002475	2.77	<b>0.0119*</b>

**Pruebas de los efectos**

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
Dosificación de biocarbón-compost en relave	1	1	0.00241249	16.4162	<b>0.0006*</b>
Temperatura de producción del biocarbón	1	1	0.00162886	11.0838	<b>0.0033*</b>
Dosificación de biocarbón-compost en relave*Temperatura de producción del biocarbón	1	1	0.00112626	7.6638	<b>0.0119*</b>

### 5.7. Prueba ANOVA una VIA, usando software JMP. (FT)





**Resumen del ajuste**

**Análisis de varianza**

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F
Modelo	3	0.01571981	0.005240	2.5911
Error	20	0.04044565	0.002022	<b>Prob &gt; F</b>
C. Total	23	0.05616547		0.0813

**Estimaciones de los parámetros**

Término	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob >  t
Constante del modelo	0.0314057	0.009179	3.42	<b>0.0027*</b>
Dosificación de biocarbón-compost en relave[30]	0.0240228	0.009179	2.62	<b>0.0165*</b>
Temperatura de producción del biocarbón[300]	0.0074709	0.009179	0.81	0.4253
Dosificación de biocarbón-compost en relave[30]*Temperatura de producción del biocarbón[300]	0.0046991	0.009179	0.51	0.6143

**Pruebas de los efectos**

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
Dosificación de biocarbón-compost en relave	1	1	0.01385032	6.8489	<b>0.0165*</b>
Temperatura de producción del biocarbón	1	1	0.00133953	0.6624	0.4253
Dosificación de biocarbón-compost en relave*Temperatura de producción del biocarbón	1	1	0.00052996	0.2621	0.6143