

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS:

**Obtención de biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de
la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” de
Ayacucho**

Para optar el título profesional de:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTADO POR:

Bach. Leydi Yulissa QUISPE PEREZ

ASESOR:

M.Sc. Cipriano MENDOZA ROJAS

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mi madre Severina Perez Huashuayo, quien me ha impulsado hacer mejor cada día y que hoy me cuida y me guía desde el cielo. A mi padre Nicodemos Quispe Huauya, mis hermanos: Manuel, Darío, Mercedes, Margoth, Hubert y Elizabeth, quienes fueron fortaleza e impulso, desde el principio hasta el final de la elaboración de este presente trabajo.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma máter, a la cual expreso mi gratitud por brindarme la oportunidad de formarme académicamente, en especial a la Escuela profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia.

A la Compañía de Bomberos Voluntarios de Ayacucho, "Salvador San Juan N° 222", al cual tengo el honor de pertenecer y agradecer a mis compañeros Bomberos por su colaboración desinteresada en el desarrollo de esta investigación.

Así mismo, quiero agradecer al M.Sc. Cipriano Mendoza Rojas, quien con su dedicación y paciencia me guio a lo largo de este proceso. Su apoyo incondicional, sus enseñanzas y su compromiso fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Finalmente, a mis hermanas Mercedes, Margoth y Elizabeth quienes durante este último año me dieron valor y fortaleza y me brindaron su apoyo incondicional. Gracias a todos ellos por su paciencia, las palabras de aliento y por creer en mi incluso en los momentos en los que yo dudé. La compañía de cada uno fue fundamental para llegar hasta aquí.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	xiv
ABSTRAC	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.2.1. Problema general	6
1.2.2. Problemas específicos	6
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4.1. Hipótesis general.....	6
1.4.2. Hipótesis específicas.....	7
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.5.1. Justificación social.....	7
1.5.2. Justificación económica.....	7
1.5.3. Justificación ambiental	8
1.6. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	9
1.6.1. Espacial	9
1.6.2. Temporal.....	9
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	10
2.1.1. Internacional.....	10
2.1.2. Nacional	12
2.1.3. Local	14
2.2. BASES TEÓRICAS	15
2.2.1. Plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú	15
2.2.2. Biosólidos.....	17
2.2.3. Clasificación de biosólidos	18
2.2.4. Parámetros de estabilización.....	18
2.2.5. Parámetros de toxicidad química	19
2.2.6. Parámetros de higienización	19
2.2.7. Biosólidos del tratamiento primario en la PTAR “La Tatora”	20

2.2.8.	Parámetros fisicoquímicos de los biosólidos de la PTAR “La Totora” ...	22
2.2.9.	Aplicación de los biosólidos.....	25
2.2.10.	Proceso de pirólisis	26
2.2.11.	Fuentes de producción de biochar	27
2.2.12.	Características del biochar	28
2.2.13.	Propiedades de enmienda del biochar	28
2.2.14.	Impactos ambientales del biochar	29
2.2.15.	Rendimiento del biochar.....	29
2.2.16.	La economía del biochar	30
2.2.17.	Biochar a partir de biosólidos de la PTAR	30
2.2.18.	Aplicación de procesos de pirólisis para la obtención de biochar	32
2.2.18.1.	Pirólisis lenta	32
2.2.18.2.	Pirólisis rápida	32
2.2.19.	Factores que influyen en la calidad del biochar derivado de los biosólidos	33
2.2.20.	Características fisicoquímicas del biochar derivado de los biosólidos ..	35
2.2.21.	Aplicaciones del biochar.....	39
2.2.22.	Enmienda orgánica con biochar	39
2.2.23.	Necesidad nutricional de las plantas	40
2.2.24.	Problemas nutricionales en una planta.....	40
2.3.	MARCO CONCEPTUAL.....	41
2.3.1.	Pirólisis.....	41
2.3.2.	Biochar (biocarbón).....	43
2.3.3.	Macroelementos.....	44
2.3.4.	Microelementos	45
2.3.5.	Marco legal.....	46
2.3.6.	Registro nacional de producción y reaprovechamiento de biosólidos (RENAPROB)	47
2.3.7.	Dirección general de asuntos ambientales (DGAA).....	47
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS		48
3.1.	DISEÑO METODOLÓGICO	48
3.1.1.	Tipo de investigación.....	48
3.1.2.	Nivel de investigación.....	49
3.1.3.	Diseño de investigación.....	49
3.2.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	50
3.2.1.	Población	50
3.2.2.	Muestra	51

3.2.3.	Muestreo	51
3.2.4.	Variables e indicadores	52
3.2.4.1.	Variable independiente (x).....	52
3.2.4.2.	Variable dependiente (y).....	52
3.2.5.	Operacionalización de variables.....	52
3.2.6.	Materiales, instrumentos y equipos usados en la investigación	56
3.2.6.1.	Para la toma de muestra de los biosólido.....	56
3.2.6.2.	Para la producción de biochar.....	56
3.2.6.3.	Equipo e instrumentos.....	56
3.2.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	57
3.2.8.	Análisis y procesamiento de datos	59
3.2.9.	Método de obtención.....	60
3.2.9.1.	Ubicación y descripción del área.....	60
3.2.9.3.	Lugar de estudio y periodo de desarrollo.....	63
3.2.9.4.	Caracterización de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la PTAR “La Tatora”.....	63
3.2.9.5.	Preparación de la materia prima (biosólidos).....	63
3.2.9.6.	Obtención de biochar por pirólisis.....	63
3.2.10.	Determinación de la calidad del biochar obtenido a partir de los biosólidos provenientes del tratamiento primario.....	64
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		65
4.1.	RESULTADOS	65
4.1.1.	Características del biosólidos proveniente del tratamiento primario de la PTAR “La Tatora” de Ayacucho.....	65
4.1.2.	Calidad del biochar.....	66
4.1.2.1.	Proceso de pirólisis en cada tratamiento.....	66
4.1.2.2.	Rendimiento del biochar obtenidos a partir de los biosólidos primarios por el proceso de pirólisis lenta.....	77
4.1.2.3.	Características fisicoquímicas del biochar.....	79
4.1.2.4.	Concentración de nutrientes en el biochar.....	79
4.1.2.5.	Concentración de metales tóxicos.....	80
4.1.2.6.	Concentración de microorganismos patógenos.....	81
4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
4.2.1.	Caracterización de los biosólidos primarios de la PTAR “La Tatora”	81
4.2.2.	Calidad del biochar.....	84
4.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	103
4.3.1.	Prueba de Shapiro-Wilk.....	103

4.3.2.	Análisis de correlación de Pearson	105
4.3.3.	Análisis de superficie de respuesta	109
4.3.4.	Optimización del proceso con RSM.....	117
4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	118
4.4.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	118
4.4.2.	Contrastación de los resultados con estudios similares.....	120
	CONCLUSIONES	123
	RECOMENDACIONES.....	125
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
	ANEXOS.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Proceso de obtención de biosólidos en la PTAR “La Tatora”.....	21
Figura 2	Variación del porcentaje de masa en función de la temperatura.....	27
Figura 3	Resumen gráfico del proceso	31
Figura 4	Área aproximada de la zona de almacenamiento del tratamiento primario de la PTAR “La Tatora”.....	51
Figura 5	Ubicación geográfica de la PTAR “La Tatora”.....	61
Figura 6	Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP300-01).....	74
Figura 7	Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP300-04).....	75
Figura 8	Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP400-01).....	75
Figura 9	Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP400-04).....	76
Figura 10	Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP450-01).....	76
Figura 11	Variación de la temperatura durante el tiempo de calentamiento (TP500-01).....	77
Figura 12	Rendimiento con respecto a la pérdida de peso	78
Figura 13	Variación del pH en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	85
Figura 14	Variación de la materia orgánica (%MO) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	86
Figura 15	Variación de la conductividad eléctrica (CE) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	87
Figura 16	Variación del contenido de humedad (%) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	87
Figura 17	Variación del contenido de N _{total} en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	88
Figura 18	Variación de fósforo total (%) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	89
Figura 19	Variación de potasio total (%) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	90
Figura 20	Variación de la concentración de Cu (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	92

Figura 21	Variación de la concentración de Zn (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	92
Figura 22	Variación de la concentración de Pb (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	93
Figura 23	Variación de la concentración de Cr (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	93
Figura 24	Variación de la concentración de Ni (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	94
Figura 25	Variación de la concentración de As (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	94
Figura 26	Variación de la concentración de Cd (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	95
Figura 27	Variación del contenido de Coliformes Termotolerantes (NMP/g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta	96
Figura 28	Variación del contenido de Coliformes Totales (NMP/g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta.....	96
Figura 29	Variación del contenido de Escherichia coli (UFC/g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta.....	97
Figura 30	Variación del contenido de Huevos Helmintos (H.H./4g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta.....	97
Figura 31	Resumen de las características fisicoquímicas del biosólido primario	98
Figura 32	Resumen del contenido de nutrientes esenciales.....	98
Figura 33	Resumen del contenido de metales tóxicos.....	99
Figura 34	Gráficas de superficie de respuesta de las propiedades fisicoquímicas del biochar	113
Figura 35	Gráficas de superficie de respuesta del contenido de nutrientes del biochar.....115	
Figura 36	Gráficas de superficie de respuesta de las concentraciones de metales tóxicos del biochar	116
Figura 37	Análisis generales del efecto de la temperatura y el tiempo de residencia sobre las respuestas	117
Figura 38	Recolección de las 36 muestras puntuales de forma aleatoria	137
Figura 39	Mezclado de las muestras puntuales.....	142
Figura 40	Pesado de biosólidos primarios.....	142
Figura 41	Proceso de secado.....	143

Figura 42	Triturado de los biosólidos con mandarina de goma	144
Figura 43	Selección de materias granulares (piedras y hormigón)	144
Figura 44	Pesado de los biosólidos primarios ya triturados y seleccionados.....	145
Figura 45	Proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totorá”	147
Figura 46	Ensayo de densidad aparente en el laboratorio de Transferencia de masa de la FIQM-UNSCH	148
Figura 47	Plántulas de lechuga (55 % tierra de cultivo - 45 % biochar)	149
Figura 48	Plantación de semillas de rabanito (45 % de tierra grasa -55 % biochar)	150
Figura 49	Brote del rabanito de la maceta que contenía el TP500-01 (con 65 % de biochar) y el TP450-01 (con 55 % de biochar).....	150
Figura 50	Macetas de lechuga en el día 20	151
Figura 51	Germinación del rabanito al día 20	152
Figura 52	Muestras del biochar obtenido a diferentes tratamientos	171
Figura 53	Visualización de cristales y una capa de aceite en la superficie del recipiente.....	172
Figura 54	Determinación del tamaño de partícula por el laboratorio GRUPO KYS INGENIERO SA	172
Figura 55	Recolección de tierras de cultivo con lombricultura (Uchuypampa)	173
Figura 56	Recolección de tierra grasa del taller mecánico	173
Figura 57	Lecturas en el potenciómetro	174
Figura 58	Verificación de la temperatura del Horno-Mufla	174
Figura 59	Lecturas en el conductímetro	175
Figura 60	Equipo Kjeldahl del INIA.....	175
Figura 61	Método APHA9222, para E. Coli	176
Figura 62	Método APHA-AWWA-WEF-9221E, para coliformes totales	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Aspectos generales de plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú.....	16
Tabla 2	Característica fisicoquímica de los biosólidos.....	17
Tabla 3	Estabilización de biosólidos.....	18
Tabla 4	Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y de Clase B	19
Tabla 5	Parámetros de higienización de biosólidos.....	20
Tabla 6	Concentración de sólidos en los lodos de los tanques Imhoff y lechos de secado	23
Tabla 7	Concentración de metales pesados de los lodos en diferentes unidades de tratamiento.....	23
Tabla 8	Concentración de microorganismos patógenos de los lodos en diferentes unidades de tratamiento	24
Tabla 9	Concentración de nutrientes de los lodos en diferentes unidades de tratamiento	25
Tabla 10	Cantidad de productos obtenidos en función del proceso de pirólisis aplicado.....	33
Tabla 11	Características fisicoquímicas de los biochars producidos a diferentes temperaturas.....	36
Tabla 12	Características toxicológicas de los biochars producidos a diferentes temperaturas.....	37
Tabla 13	Concentración de elementos nutritivos.....	38
Tabla 14	Concentración de metales en los biosólidos y en los biochar a diferentes temperaturas.....	39
Tabla 15	Diseño de experimentos (DOE) sin réplica	50
Tabla 16	Operacionalización de las variables independientes y dependientes	53
Tabla 17	Técnicas e instrumentos para la recolección de información.....	57
Tabla 18	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información (propiedades fisicoquímicas, nutrientes y metales tóxicos)	58
Tabla 19	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información (Análisis microbiológico).....	59
Tabla 20	Registro insitu de pH, % H y T (°C)	62
Tabla 21	Característica fisicoquímica de los biosólidos primarios	65
Tabla 22	Concentración de metales pesados en los biosólidos primarios	66

Tabla 23	Concentración de microorganismos patógenos en los biosólidos primarios	66
Tabla 24	Ensayo experimental del tratamiento TP300-01	67
Tabla 25	Ensayo experimental del tratamiento TP300-04	68
Tabla 26	Ensayo experimental del tratamiento TP400-01	69
Tabla 27	Ensayo experimental del tratamiento TP400-04	70
Tabla 28	Ensayo experimental del tratamiento TP450-01	71
Tabla 29	Ensayo experimental del tratamiento TP500-01	72
Tabla 30	Rendimiento del proceso de pirólisis lenta a partir de los biosólidos primarios, en el laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2024	78
Tabla 31	Características físicas del biochar obtenido a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora”	79
Tabla 32	Contenido de nutrientes en el biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora”	80
Tabla 33	Concentración de metales tóxicos en el biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora”	80
Tabla 34	Contenido de microorganismos patógenos en el biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora”	81
Tabla 35	Evaluación de la concentración de sólidos en los biosólidos primarios	82
Tabla 36	Evaluación de las características fisicoquímicas y contenido de nutrientes en los biosólidos	83
Tabla 37	Evaluación de los parámetros de toxicidad química del biosólido primario	83
Tabla 38	Evaluación de los parámetros de higienización del DS N° 015-2017-Vivienda y RM N°0178-2023-MIDAGRI con el biosólido primario	84
Tabla 39	Tabla resumen de las principales propiedades del biosólido y el biochar	99
Tabla 40	Comparación de parámetros de calidad del biochar con normas nacionales e internacionales	101
Tabla 41	Resultados de probabilidad de cada respuesta	104
Tabla 42	Correlación de todas las variables	108
Tabla 43	Evaluación del ajuste del modelo	110
Tabla 44	Ecuaciones de regresión para cada respuesta	111
Tabla 45	Optimización de los parámetros del biochar	118
Tabla 46	Georeferenciación de los puntos de muestreo	140

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Diagrama de bloques del proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos de PTAR “La Totora”.....	133
Anexo 2	Diagrama de bloques cuantitativo del proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos de PTAR “La Totora” (TP300-01) .	134
Anexo 3	Diagrama de flujo del proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos de PTAR “La Totora”	135
Anexo 4	Obtención de la muestra (biosólidos primarios) en la PTAR “la Totora”	136
Anexo 5	Preparación de la materia prima (Biosólidos primarios)	143
Anexo 6	Obtención de biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora”.....	146
Anexo 7	Determinación de la densidad aparente.....	148
Anexo 8	Prueba preliminar de enmienda de suelos del biochar.....	149
Anexo 9	Correlación de Pearson (Valores de p)	153
Anexo 10	Diagrama de Pareto para el Pb, Co, Mo y Ni	162
Anexo 11	Análisis de varianza cada respuesta.....	164
Anexo 12	Propuesta de producción de biochar (TP300-01) por el proceso de pirólisis lenta a partir de los biosólidos primarios, para fines comerciales.....	170
Anexo 13	Panel fotográfico.....	171
Anexo 14	Visita al Instituto Nacional de Innovación Agraria.....	174
Anexo 15	Visita al Laboratorio DCP-LAB Yaku.....	176
Anexo 16	Resultados del INIA (biosólidos primarios y secundarios)	177
Anexo 17	Resultados del INIA (calidad del biochar)	178
Anexo 18	Resultados del análisis microbiológico del biosólido primario de la PTAR “La Totora”.....	179
Anexo 19	Resultados de los análisis fisicoquímicos del biosólido secundario de la PTAR “La Totora”	180
Anexo 20	Resultados del laboratorio CDP YAKU (análisis microbiológico del TP500-01).....	181
Anexo 21	Resultados del laboratorio CDP YAKU (análisis microbiológico del TP300-04).....	182
Anexo 22	Resultados del análisis granulométrico de todos los tratamientos....	183

RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado la tasa poblacional, pequeñas microempresas y la agricultura en la ciudad de Ayacucho, lo que trae consigo la dificultad del manejo de los biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales, debido a su alto contenido de microorganismos patógenos, metales pesados; pero además contiene nutrientes y materia orgánica que se pueden reaprovechar y disponer de forma sostenible y que no presente riesgos ambientales ni sanitarios, a través de procesos térmicos como la pirólisis. En esta investigación, el objetivo principal es obtener biochar a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) “La Totorá”, mediante el procedimiento de pirólisis lenta, evaluando el efecto de la temperatura y el tiempo de pirólisis, sobre sus características fisicoquímicas (pH, % H, CE, % MO y % CO_T), concentración de nutrientes (% N, % P, % K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Co, Zn y Mo) y con la concentración de metales pesados (Pb, As, Cd, Al, Cr, Ni, Ba y Sr) y por último la concentración de microorganismos patógenos (E. Coli, Coliformes totales y Coliformes termotolerantes, Huevos Helmintos y Salmonella) del biochar.

Se utilizó el Diseño de Experimentos (DoE), para relacionar las variables independientes, los cuales son la temperatura (300 °C, 400 °C y 500 °C) y tiempo de residencia (1 hora y 4 horas). Se realizaron seis tratamientos en total (TP300-01, TP300-04, TP400-01, TP400-04, TP450-01 y TP500-01). Así mismo para validar y dar confianza a los resultados, realizaron los análisis estadísticos mediante la prueba de Shapiro Wilk, Correlación de Pearson y la optimización mediante el Modelo de Superficie de Respuesta (RSM). Finalmente, el tratamiento TP300-01 fue el que presentó un rendimiento de 96,2 %, con un contenido de nutrientes considerables, concentración aceptable de metales tóxicos, sin presencia de arsénico ni cadmio, y el contenido de microorganismos patógenos se deduce que similares al del tratamiento TP300-04. Por lo tanto, se concluye que la obtención del biochar de calidad se puede obtener a temperatura y tiempo de residencia moderado, siendo este un reaprovechamiento estratégico el cual puede revalorizar al biosólido, sin riesgos de contaminación ambiental ni sanitarios.

Palabras clave: Biochar, biosólidos primarios, microorganismos patógenos, metales pesados, nutrientes.

ABSTRACT

In recent years, the population, small microenterprises, and agriculture in the city of Ayacucho have increased, making it difficult to manage the biosolids produced at the wastewater treatment plant due to their high content of pathogenic microorganisms and heavy metals. They also contain nutrients and organic matter that can be reused and disposed of sustainably and without posing environmental or health risks through thermal processes such as pyrolysis. The main objective of this research is to obtain biochar from biosolids at the "La Totorá" wastewater treatment plant (PTAR) using a slow pyrolysis process. The aim is to evaluate the effect of pyrolysis temperature and time on the biochar's physicochemical characteristics (pH, % H, CE, % MO, and % COT), nutrient concentrations (% N, % P, % K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Co, Zn, and Mo), heavy metal concentrations (Pb, As, Cd, Al, Cr, Ni, Ba, and Sr), and pathogenic microorganism concentrations (E. Coli, total coliforms, thermotolerant coliforms, helminth eggs, and Salmonella).

The Design of Experiments (DoE) was used to relate the independent variables, which are temperature (300 °C, 400 °C and 500 °C) and residence time (1 hour and 4 hours). Six treatments were carried out in total (TP300-01, TP300-04, TP400-01, TP400-04, TP450-01 and TP500-01). Likewise, to validate and give confidence to the results, statistical analyses were performed using the Shapiro Wilk test, Pearson Correlation and optimization using the Response Surface Model (RSM). Finally, treatment TP300-01 was the one that presented a yield of 96,2%, with considerable nutrient content, acceptable concentration of toxic metals, without the presence of arsenic or cadmium, and the content of pathogenic microorganisms is deduced to be similar to that of treatment TP300-04. Therefore, it is concluded that quality biochar can be obtained at a moderate temperature and residence time, this being a strategic reuse which can revalue the biosolid, without risks of environmental or health contamination.

Keywords: Biochar, primary biosolids, pathogenic microorganisms, heavy metals, nutrients

INTRODUCCIÓN

La administración de biosólidos en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales actualmente representa un reto ambiental que ha ido en aumento debido a la densidad de la población. Los biosólidos, al ser un subproducto que contiene unas mezclas de materia orgánica, nutrientes, patógenos y metales pesados, pueden tener efectos adversos en el medio ambiente, sobre todo si son desechados de manera inadecuada, provocando problemas en los suelos o fuentes de agua. También pueden representar riesgos para la salud humana debido a la existencia de patógenos. Tradicionalmente, los biosólidos se han depositado en vertederos o en muchos casos se han utilizado como enmiendas para la agricultura, pero este método ha ido perdiendo eficacia con el tiempo debido a las limitaciones impuestas por la contaminación y la escasa recuperación de nutrientes. Por lo tanto, es esencial hallar alternativas que sean seguras y sostenibles para que se pueda aprovechar los biosólidos de manera efectiva.

En los últimos años, el biochar ha surgido como una opción alentadora para el manejo de desechos orgánicos, especialmente en lo que respecta a los biosólidos, trayendo el interés de varios investigadores a nivel mundial. El biochar al ser un material orgánico con contenido alto de carbono, el cual se genera mediante el proceso de pirólisis, siendo este último un proceso termoquímico que la biomasa en este caso los biosólidos al ser calentados en ausencia o con poco oxígeno se transforma en materia orgánica rica en nutrientes, aptos para su aplicación agrícola. Al resaltar estos aspectos, se pone de manifiesto el doble papel de los biosólidos de la PTAR, tanto como una opción de gestión de residuos respetuosa con el ambiente, como una materia prima adaptable para la generación de biocarbón, diferenciándolos de otras fuentes de biomasa en lo que respecta a sostenibilidad, aprovechamiento de recursos y atributos funcionales (Krahn et al., 2023, como se citó en Sharma et al., 2024). Las metodologías para la elaboración de biochar están en constante avance y mejora para incrementar tanto el volumen de producción, como la calidad del producto final. Tradicionalmente, se han utilizado métodos más antiguos de pirólisis, como la lenta y la rápida, mientras que actualmente se están adoptando varias tecnologías innovadoras, tales como la carbonización hidrotermal, la torrefacción, la gasificación y la electromodificación (Gabhane et al., 2020, como se citó en Hansen et al., 2023). No obstante, el proceso de pirólisis sigue siendo el método más habitual

utilizado para la obtención de biochar, siendo considerada una de las técnicas más efectivas para la captura de carbono (Hansen et al., 2023). Además, existen estudios recientes en donde han demostrado que el biochar puede inmovilizar los metales pesados y reducir la carga microbiana, el cual se considera o lo convierte en una opción atractiva para la gestión de los biosólidos (Raj et al., 2021).

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), “La Totorá”, el cual está ubicada en la ciudad de Ayacucho-Perú; genera una gran cantidad de biosólidos en adelante denominado biosólidos primarios, debido a que provienen del tratamiento primario; el cual es un subproducto del tratamiento de aguas residuales, no obstante, esto a la vez genera desafíos importantes con respecto a su volumen y a la presencia de contaminantes. Actualmente, la gestión de biosólidos no ha sido optimizado, es decir no se logrado maximizar su valor potencial; lo que conlleva a realizar investigaciones de métodos que sean capaces de disminuir los impactos ambientales, además de convertir los biosólidos en recursos valiosos. La conversión de los biosólidos en biochar, no solo reduce el volumen de residuos, sino que también se genera un material útil para la enmienda de suelos agrícolas locales y la disminución de uso de fertilizantes minerales, contribuyendo de esta manera al desarrollo sostenible de la región.

Por lo tanto, el propósito de esta investigación fue obtener biochar a bajas temperaturas (300 °C - 500 °C) y por tiempos de residencia largos (1 hora y 4 horas), debido a la aplicación futura que se desea realizar en la agricultura, así como evaluar el impacto que tiene la temperatura y el tiempo de residencia de pirólisis, en las propiedades del biochar de calidad, como el contenido de nutrientes, contaminantes tóxicos y microbiológicos, y que sean una alternativa económicamente viable, siendo una forma eficaz de gestionar los biosólidos provenientes del tratamiento primario en la PTAR “La Totorá”. Así mismo esta investigación pretende minimizar el contenido de metales pesados, como el cadmio, arsénico y plomo, así como también la presencia de microorganismos patógenos, realizando un análisis y optimización mediante el diseño experimental, en base al Modelo de Superficie de Respuesta en adelante modelo RSM por sus siglas en inglés, el cual permite evaluar de forma simultánea los efectos de la temperatura y tiempo en las propiedades del biochar.

Por ende, este trabajo además de ser de interés científico en el campo de la gestión de residuos sólidos, mejora de suelos agrícolas y su aplicación práctica, ya que la

obtención del biochar de calidad, a partir de los biosólidos primarios, puede contribuir a la implementación de políticas ambientales sostenibles en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en donde la gestión de los biosólidos sea una problemática. Así mismo lo que conlleva el uso del biochar en suelos agrícolas locales, puede mejorar la productividad agrícola, lo que podría ser relevante en las zonas sobre todo con suelos degradados o contaminados, como las áreas de influencia de la PTAR “La Totorá”

La estructura de este trabajo consta de cuatro capítulos principales. El primer capítulo, de generalidades, en donde se plantea y formula el problema, se define los objetivos, hipótesis, justificaciones y delimitación de la investigación. El segundo capítulo, en donde se detalla en forma resumida los antecedentes de la investigación, las bases teóricas y el marco teórico, en donde se detalla la literatura científica relacionadas con la obtención del biochar, los cuales ayudan a formar bases sólidas que sustenten el presente trabajo de investigación. El tercer capítulo, de materiales y métodos, en donde se describe detalladamente el procedimiento experimental, métodos, materiales e instrumentos que fueron utilizados para la obtención del biochar y para el análisis de sus propiedades. Finalmente, el cuarto capítulo, resultados y conclusiones, en donde se presenta los resultados y los análisis de las propiedades del biochar, en base a los parámetros de operación (temperatura y tiempo de residencia) del proceso de pirólisis, comparándolas con la materia prima, del mismo modo también se discuten la influencia de estos hallazgos en la gestión de los biosólidos y de manera indirecta la mejora de los suelos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La densidad poblacional ha incrementado sustancialmente, lo que provoca también un aumento en el uso de recursos naturales y por ende se generen mayor cantidad de residuos. La población mundial ha crecido desde el 2015 con 7,3 mil millones, y se estima 8,5 mil millones para el 2030, lo que conlleva una alta tasa de generación de biosólidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Collivignarelli et al., 2019). La acumulación y disposición inadecuada de biosólidos en las PTAR, es un problema global significativo que genera serias consecuencias medioambientales. Debido a la alta industrialización y el desarrollo urbano, se están realizando esfuerzos para abordar este problema a través de la economía circular donde diversas investigaciones se centran en su reaprovechamiento agrícola, evaluando su toxicidad y su potencial como biofertilizantes y bioestimulantes, lo que resalta la importancia de encontrar soluciones económicamente eficientes, socialmente aceptables y medioambientalmente sostenibles para la gestión de estos residuos (Khan et al., 2023). En ese sentido la transformación pirolítica del biosólido a biochar hoy en día se está volviendo popular para la agricultura sustentable y el medio ambiente. (Figueiredo et al., 2028; Kończak et al., 2020; Singh et al., 2020, como se citó en Raj et al., 2021), lo que lo hace más competitivo en el mercado frente a otros productos.

En nuestro país, la producción de lodos es de aproximadamente 25 m³/día en plantas de tratamiento de aguas residuales; una producción considerada muy alta (Candela, 2020). De este modo resulta contraproducente e inadecuada la gestión y desconocimiento por parte de las plantas de tratamiento y otros productores de

biosólidos, sobre los atributos que los mismos poseen, optando solo por derivarlos en rellenos sanitarios (MINAN, 2019, como se citó en Candela, 2020).

A nivel local, las plantas de tratamiento, como “La Totorá”, enfrenta desafíos asociados con la gestión de éstos biosólidos, lo que trae consigo potenciales riesgos para el medio ambiente y la salud pública. En nuestro entorno local la producción aproximada de biosólidos 180 m³/mes (SEDA AYACUCHO, 2022), lo que refleja la magnitud del problema en la región, por lo que estos residuos requieren una disposición adecuada para minimizar las amenazas ambientales y evitar el contacto directo con la población. Si bien es cierto la planta realiza el proceso de estabilización de sus lodos generados, pero esto resulta ineficiente, ya que puede generar la acumulación de insectos, moscas, mosquitos, malos olores y contaminación del suelo en las zonas aledañas de la comunidad de la Totorá, causando una alerta relevante en la población. Los lodos estabilizados finalmente son llevados a las zonas de almacenamiento.

La planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”, comercializa estos lodos estabilizados (biosólidos) para plantas de tallo bajo, pese a que solo pueden ser distribuidos para usos de plantas de tallos alto. Esta resulta inadecuado debido a la liberación de patógenos, metales pesados y contaminantes orgánicos que afecta a los suelos agrícolas y a la población. Actualmente no se conoce el manejo adecuado de estos residuos sólidos y pueden ser considerados como una fuente de contaminación por la inadecuada eliminación de microorganismos patógenos que por lo general pueden causar riesgos de salud a la población ayacuchana, en especial a los niños y ancianos que consumen verduras y hortalizas contaminados.

En base a ello, este trabajo de investigación propone disponer los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” de manera más segura y sostenible a través del procedimiento de la pirólisis lenta, obteniendo un producto como el biochar y el cual además de reducir los riesgos ambientales y sanitarios concernientes al manejo de los biosólidos, puede aportar en la solución en los problemas de degradación del suelo y las sequías, el cual puede incrementar su valor debido al contenido de materia orgánica y nutrientes.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cómo obtener biochar a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” de Ayacucho?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es la caracterización de los biosólidos provenientes del tratamiento primario de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” de Ayacucho?
- b) ¿Cuál es la temperatura y tiempo de residencia óptimos para obtener biochar de calidad?
- c) ¿Cuál será la calidad del biochar obtenido a diferentes temperaturas y tiempos de residencia?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Obtener biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” de Ayacucho.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar las características de los biosólidos del tratamiento primario de la PTAR “La Totora” de Ayacucho.
- b) Determinar los parámetros de operación óptimos para la obtención del biochar por pirólisis.
- c) Determinar la calidad de biochar a diferentes condiciones de temperatura y tiempo de residencia.

1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Hipótesis general

Es posible obtener biochar a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” de Ayacucho a partir del proceso de pirólisis lenta.

1.4.2. Hipótesis específicas

- a) La característica de los biosólidos del tratamiento primario cumple con los parámetros establecidos en el DS N° 015-2017-Vivienda, excepto la concentración de los microorganismos patógenos, ya que excede los límites permitidos.
- b) Los parámetros de operación óptimos para la obtención de biochar, es a una temperatura de 500 °C y un tiempo de residencia de 1 hora.
- c) La calidad del biochar varía significativamente con la temperatura y el tiempo de residencia.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación se justifica en los siguientes ámbitos.

1.5.1. Justificación social

El almacenamiento de los biosólidos en los vertederos influye en la eliminación de malos olores y atracción de insectos (moscas e insectos), el cual afecta directamente la salud pública del entorno en el cual este ubicado geográficamente la PTAR. Así mismo el uso directo de estos biosólidos afecta negativamente a la salud pública.

Los biosólidos de la PTAR “La Totorá” están clasificados como clase B, según el Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos (RENAPROB), además se reincide con esta clasificación en la investigación de Candela (2020), por lo que de acuerdo al DS N° 015-2017-Vivienda (2017), este tipo de biosólidos están destinados únicamente a su reaprovechamiento para plantas de tallo alto, recuperación de áreas degradadas ubicadas como mínimo a 100 metros de distancia de pueblos y viviendas, reforestación de suelos con acceso restringido a la población y animales, etc., así mismo deben cumplir con todos los artículos 12,13,14 y 15 del DS N° 015-2017-Vivienda (2017), de lo contrario está prohibida su aplicación.

1.5.2. Justificación económica

La conversión de biochar hoy en día está ganando gran impulso a nivel mundial, sobre todo en Europa por su potencial aplicación en diversos campos. El biochar exhibe efectos positivos aumentando la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno,

fósforo y potasio para las plantas, lo que reduce el consumo de agentes químicos, siendo una alternativa más económica. Del mismo modo se realiza el reaprovechamiento de los biosólidos; ya que permite valorizarlos en el mercado como un producto comercializable, permitiendo a las PTAR's desarrollar una economía circular (Apeña y Castelo, 2022). En este sentido SEDA AYACUCHO, puede utilizar esta investigación como una base y mejorar las propiedades del biochar, con investigaciones más exhaustivas de tal forma que comercialice al mercado un producto aprovechable y económicamente viable, que sea aplicable al sector agrícola y que mejore en el sector energético.

1.5.3. Justificación ambiental

El aumento de cantidad de residuos (biosólidos), genera una degradación ambiental, sobre todo contaminación del suelo, agua y el aire, debido a que se están aplicando métodos insostenibles de eliminación y gestión de residuos (Zaman et al, 2016, como se citó en Goldan, 2022). Cuando los lodos estabilizados (biosólidos) se trasladan a un vertedero, y lo disponen vendiéndolos como abono orgánico; lo cual resulta una alternativa peligrosa, pues los biosólidos son una fuente alta de contaminantes para los suelos, ya que introducen patógenos, metales pesados y contaminantes orgánicos los cuales son nocivos en el medio ambiente generándose posibles efectos en el mismo tales como: emisiones atmosféricas de amoníaco, óxido nítrico, metano, sulfuro de hidrógeno, contaminación de las aguas superficiales por nitrógeno, fósforo, materia orgánica (afecta el nivel de oxígeno), agentes patógenos, acumulación de fósforo, cobre, zinc y sodio, así como la acumulación de metales pesados, (Ciéslik, 2015, como se citó en Goldan, 2022).

Por estas razones las ventajas que presenta el método utilizado como es el proceso de pirólisis, ya que no solo reduce el volumen de los biosólidos en un 80 % sino también elimina patógenos, se inmovilizan los metales, las fracciones orgánicas e inorgánicas dando como resultado el biochar con ausencia de agentes patógenos y rico en nutrientes.

1.6. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.6.1. Espacial

Nos centraremos en los biosólidos provenientes del tratamiento primario, que se comercializan con mayor frecuencia en la PTAR “La Totorá”. Considerando siempre el tema seguridad e integridad del investigador, se debe utilizar un EPP que permita evitar el contacto directo con los biosólidos, debido a su gran contenido de contaminantes y finalmente se deben obtener los permisos institucionales propios de la entidad pública.

1.6.2. Temporal

De acuerdo a las diferentes etapas de tratamiento que se realiza en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”, existe una etapa en donde los lodos son estabilizados y deshidratados, para ser comercializados como biosólidos de tipo B. Por lo que de acuerdo a ello la obtención de los biosólidos listos para su comercialización, en el caso del tratamiento primario duran de 7 a 8 meses. Considerando lo dicho anteriormente, la mayor acumulación de los biosólidos se obtendrá en los meses de julio-septiembre, debido a las intensas lluvias en la región de Ayacucho, por lo que, para la presente investigación, se limitaran en tomar los biosólidos en el mes de agosto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Internacional

Khan et al. (2023) en su artículo titulado, “*Sewage sludge derived biochar and its potential for sustainable environment in circular economy: Advantages and challenge*” (“Biochar derivado de lodos de depuradora y su potencial para un medio ambiente sostenible en la economía circular: ventajas y desafíos”), publicado en *Chemical Engineering Journal*, tuvieron como objetivo presentar una revisión avanzada e innovadora sobre la aplicación reciente del biochar (SSBD), derivado de lodos de depuradora (SS), en el tratamiento de agua y aguas residuales, mejora del suelo, control de la contaminación del aire y el secuestro de carbono, así como desafíos y sus respectivas estrategias, los cuales promueven futuras investigaciones facilitando el avance necesario para ampliar la tecnología en la gestión sostenible de los lodos de depuradora (SS). Conforme a ello se realizaron cuadros de comparación en donde se muestran estudios previos sobre la aplicación de SSDB, en diferentes contaminantes, su respectiva capacidad de adsorción y el tipo de biochar. Así mismo un cuadro resumen de la aplicación de SSBD en la adsorción de fosfato en las hojas de raigrás, eliminación de Pb, Cu y Zn, inmovilización del Cd, Pb y Zn, lixiviación de Cu y Zn, crecimiento del cáñamo industrial y la degradación del carbendazin (fungicida para el control de hongos) en el suelo. También un cuadro con estudios previos sobre la aplicación de SSDB en la captura de CO₂, adsorción de CO₂, eliminación del benceno en suspensión en el aire y la eliminación del H₂S. En resumen, el artículo menciona que el uso del biochar derivado de los lodos de

depuradora es una oportunidad donde se puede conseguir la reducción de los desechos y brindar soluciones rentables para la remediación ambiental.

Hansen et al. (2023), en el artículo titulado, "*Characterization of biochar produced from sewage sludge and its potential use as a substrate and plant growth improver*" ("Caracterización del biochar producido a partir de lodos de depuradora y su potencial uso como sustrato y mejorador del crecimiento vegetal"), publicado en *Journal of Environmental Management* tuvieron como objetivo, caracterizar fisicoquímicamente el biochar obtenido de los lodos de depuradora a diferentes temperaturas de pirólisis (590 °C, 665 °C y 765 °C). Del mismo modo evaluaron su efectividad futura en la gestión del agua en condiciones de estrés por sequía y como fuente de nutrientes que minimice la aplicación de fertilizante mineral. Obtuvieron un biochar con máximo rendimiento. El artículo pone énfasis en su técnica, condiciones de proceso (velocidad de calentamiento, temperatura, tiempo de residencia, etc.), los cuales hicieron óptimo su producción y lo aplicaron finalmente en un experimento bajo la norma DIN 16086-1, utilizando macetas con Col China (*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*); en donde investigaron el efecto de las diferentes temperaturas de producción del biochar, la cantidad de aplicación para su crecimiento y desarrollo, y por último las propiedades del suelo.

Goldán et al. (2022), en su artículo titulado, "*Evaluation of the Use of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment-A Review*" ("Evaluación del uso de biochar de lodos de depuradora como enmienda del suelo: una revisión"), publicado en *Sustainability* tuvieron como objetivo detallar los diferentes métodos que se utilizan en la gestión de lodos de depuradora para la agricultura y exponer los productos económicos y eficientes que permitan la reducción de residuos a gran escala, siendo respetuosos con el ambiente. El artículo menciona que el proceso de pirólisis tiene muchas ventajas porque, durante el proceso, el volumen de los lodos se reduce en un 80 %, se eliminan agentes patógenos y compuestos peligrosos, los metales se inmovilizan en los residuos sólidos y las fracciones orgánicas e inorgánicas se inmovilizan en forma estabilizada de residuos pirolíticos (biochar). Consideraron al proceso de pirólisis necesario, ya que el uso de residuos orgánicos que no se tratan en la agricultura puede causar aspectos negativos como: contaminación de aguas superficiales y subterráneas con N, P y patógenos; emisiones atmosféricas de amoníaco, CO₂, CH₄ y H₂S, la acumulación de P, Cu, Zn, Na y sales en el suelo.

2.1.2. Nacional

Apeña y Castelo (2022), en la tesis, “Biocarbón de lodos para la inmovilización del plomo en suelos del AA.HH. Virgen de Guadalupe, Mi Perú, 2022”, tuvieron como objetivo generar biocarbón de lodos de PTAR y lodos de piscicultura para contrarrestar a la problemática de contaminación del suelo con plomo reduciendo su movilidad y su biodisponibilidad, mediante el método de la pirólisis de 500 °C, dosificando el biocarbón en el suelo contaminado con plomo a una dosis de 10 % de biocarbón/suelo, donde se aplicó un diseño factorial a los factores relevantes de estudio: tipo de biocarbon (F1) y el tiempo de aplicación (F2). Obtuvieron resultados satisfactorios ya que demostraron que las características del biocarbón del lodo de la PTAR y piscicultura tiene alto contenido de fósforo obteniéndose una máxima inmovilización de plomo de 50,83 % con el lodo de PTAR en de 20 días a una dosis del 10 % biocarbón/suelo, siendo este producto muy potencial para la inmovilización de plomo en el suelo contaminado AA.HH. Virgen de Guadalupe, Mi Perú.

Díaz y Pérez (2021), en la tesis “Biochar de Lodos de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para Remediar Suelos Contaminados con Hidrocarburos en Huachipa, 2021”, tuvieron como objetivo, utilizar el biochar sobre muestras de suelo, utilizando como materia prima; los lodos de PTAR; el cual se sometió al proceso de pirólisis a 305 °C. Para las pruebas se utilizaron macetas de 2,0 kg de suelo contaminado con hidrocarburos, en donde se agregó biochar en los siguientes porcentajes: 5 %, 10 % y 20 % respectivamente por triplicado. Los primeros análisis arrojaron un exceso nivel de hidrocarburos en comparación con los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo en fracción ligera, mediana y pesada. El trabajo de investigación aplicó el biochar y después de 45 días, determinaron que con un tratamiento del 20 % de biochar redujo los hidrocarburos en un: 99,99 %, 54,59 % y 54,92 % de fracción ligera, mediana y pesada respectivamente, además de mejorar las propiedades fisicoquímicas como: MO (Materia orgánica), pH, CIC (Capacidad de intercambio catiónico), P, N y textura del suelo.

Candela (2020), en la tesis, “Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica”, tuvo como objetivo proponer alternativas de estabilización y aprovechamiento agrícola y/o energético de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y baños ecológicos secos (BES), donde

obtuvo muestras de ocho lodos de PTAR, procedentes de tecnologías como aireación convencional, aireación extendida, aireación extendida de ciclos intermitentes (ICEAS), laguna anaerobias, laguna aireada, tanque Imhoff y digestor anaerobio y finalmente de tres BES, los cuales eran baños secos con cámaras de almacenamiento semanal, mensual y anual. Al comparar los resultados de la caracterización con los parámetros y disposiciones del DS N°015-2017-Vivienda (2017), se determinaron que sólo seis lodos de PTAR, entre ellos “La Totorá”, podían ser aprovechados como biosólidos tipo B sin previa estabilización, y los demás incluyendo los tres BES no cumplían con la concentración de sólidos volátiles, requisito para clasificar a los lodos como biosólidos de tipo A o B. La clasificación A no fue alcanzada por ninguno de los lodos debido a que su concentración superior de E. Coli. Finalmente, este estudio dio como estabilización con fines agronómicos los siguientes métodos: compostaje, digestión anaerobia (biol y abono), alcalinización y secado térmico o solar (previo balance energético), además para los métodos de estabilización para fines energéticos y propone: digestión anaerobia (biogás), secado térmico o solar, incineración y pirólisis.

Huanqui (2018), en la tesis, “Aprovechamiento de biosólidos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual en una unidad operativa minera - 2018”, en donde vio que la unidad minera de Arequipa, generaban grandes cantidades de lodos residuales provenientes de su planta de tratamiento de agua residual doméstica (PTARD), el cual lo disponían como residuos peligrosos con el fin de evitar daños al ambiente, generando grandes costes a la compañía, a pesar de tener la capacidad para aprovechar en forma de biosólidos. Es por ello que la investigación tuvo como objetivo aplicar un tratamiento térmico que permita el reaprovechamiento de los lodos, mediante el diseño y construcción de un horno de secado con una capacidad de 300 kg lodo/día, en donde se realizó pruebas de tratamiento, encontrando que, a 200 °C por 1,5 horas, cumple con los requerimientos de la normativa R.M. N° 024-2017-Vivienda para ser considerado de clase A. Se realizó pruebas de eficiencia como suplemento para suelos mediante un Diseño Completamente Randomizado (DCR) y con la especie *Zea mays L.*, empleando: biosólido, compost y tierra de cultivo en diferentes concentraciones, concluyendo que con una concentración de B3 (25 % biosólido + 75 % de tierra de cultivo) se genera mayor crecimiento tanto de raíz y tallo, además de realizar un análisis de costo/beneficio del proyecto, tornando una viabilidad favorable.

2.1.3. Local

Ramírez (2023), en sus tesis “Influencia del biochar en suelos agrícolas degradados de la provincia de La Mar - Ayacucho, 2021”, menciona; que debido a las diversas actividades antropogénicas como la agricultura intensiva generan grandes cambios al ecosistema, siendo uno de ellos la pérdida de la calidad del suelo. Justamente en la provincia de La Mar, se tiene altos índices de degradación del suelo por las diversas actividades agrícolas, es por ello que necesitan medidas que ayuden a disminuirlo. La presente investigación fue desarrollada bajo condiciones de invernadero y tuvo como objetivo, determinar la influencia del biochar en los suelos agrícolas de la provincia de La Mar; mediante la medición de parámetros químicos. La metodología utilizada fue seleccionar el área para el muestreo del suelo en Puerto Naranjal, en el distrito de Anco, en la provincia de La Mar. El biochar aplicado se obtuvo de una comercializadora, en donde se aplicó diferentes tratamientos con dos repeticiones en un periodo de un mes. En conclusión, se encontró efectos significativos en los parámetros de pH, P y K, pero no se encontraron diferencias significativas en la CE (Conductividad eléctrica), MO (Materia orgánica), N y la capacidad de intercambio iónico (CIC).

Huallpa (2023), en la tesis, “Remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Tatora” Ayacucho, utilizando la alfalfa (medicago sativa)”, menciona; que se determinó la concentración inicial de metales pesados en los biosólidos por la técnica de (ICP - OES), saliendo para el cromo 320,7 mg/kg, para cadmio 7,3 mg/kg y plomo de 37,7 mg/kg, donde al aplicar el material de remoción utilizado estuvo conformado con 45 % de biosólido y 55 % de tierra, en donde se sembró alfalfa con tres densidades diferentes, y se utilizó agua potable para regar cada muestra hasta su cosecha. Para verificar el grado de remoción se determinó el contenido de metales pesados en el material de remoción dando para el cromo 257,7 mg/kg, cadmio 7,0 mg/kg y plomo 27,3 mg/kg, y una vez concluido el ensayo se logra reducir los niveles de contaminación de una de las especies, removiendo cromo en un 43 %, cadmio 76 % y plomo 71 %, quedando por debajo de LMP (Límites máximos permisibles) para uso agrícola. De esta manera se concluyó que la alfalfa sembrada en sistemas formulados con biosólidos permite remover metales pesados en la raíz y en el tallo y que puede ser aplicado en la PTAR “La Tatora”.

Mucha (2022), en la tesis, “Evaluación de la eficiencia del tratamiento de lodos residuales de la PTAR “La Titora”- Huamanga por vermiestabilización para la reducción de los parámetros de higienización” (Mucha, 2022), su objetivo fue brindar alternativas de solución a la creciente generación de lodos residuales producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Ayacucho, dando así a conocer que fueron eficientes sus tratamientos aplicando su método de vermiestabilización.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú

Según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) (2020), las PTAR son infraestructuras donde se descarta elementos contaminantes de las aguas de los desagües, mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Su principal objetivo es tratar el agua de tal manera que alcance una calidad adecuada para realizarla descarga en ríos y quebradas, para conseguir cuidar la salud de las personas que viven cerca de cuencas y cuidar el medio ambiente.

De acuerdo al registro de la SUNASS (2024), en el Perú figuran 206 plantas de tratamiento de aguas residuales, donde la PTAR “La Titora”. Se encuentra dentro de los diez primeros, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Aspectos generales de plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú

Nombre del PTAR	Disposición de aguas residuales	Disposición de lodos	Medidor de caudal	Rejas	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario	Desinfección	Capacidad de tratamiento	Caudal de diseño (L/s)
PTAR Totorá	Río Alameda	En la PTAR	Ultrasonido	Si	Si	Si	Si	Si	Orgánica	618,0
PTAR Azángaro	Río Ramis	En la PTAR	Vertedero	Si	No	Si	No	No	Orgánica	30,0
PTAR San Jerónimo	Río/Huatanay	Otro	Doppler	Si	Si	Si	No	Si	Orgánica/hidráulica	446,0
PTAR Quilmaná (Roldán)	Otro/Canal Río Seco	En la PTAR	Vertedero	Si	No	Si	Si	No	Orgánica	29,4
PTAR Quiulacocha					Paralizado					
PTAR Puca Puca	Río/Riachuelo Chiwa	En la PTAR	Vertedero	Si	No	Si	Si	Si	---	54,0
PTAR Ichpico (Huanta PTAR 2)	Dren/dren	En la PTAR	Vertedero	Si	No	Si	No	Si	Orgánica/hidráulica	7,0
PTAR Rosario de Asia	Quebrada/Río Seco	Otro	No tiene	Si	No	Si	No	No	Orgánica/hidráulica	6,5
PTAR Magollo	Drenaje/sin información	En la PTAR	Parshall	Si	No	Si	No	No	Orgánica/hidráulica	180,0
PTAR Ancon	Mar	Relleno sanitario o botadero	Magnético inductivo	Si	No	Si	No	Si	Orgánica/hidráulica	20,0

Nota. Lista de las diez primeras plantas de tratamiento de aguas residuales que se registraron en la SUNASS al año 2024. Adaptado de Lista de registro PTAR, por SUNASS, 2024.

2.2.2. Biosólidos

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (2019), define a los biosólidos como un lodo al cual se le ha sometido a uno o varios tratamientos como: digestión anaeróbica o aeróbica, estabilización alcalina, compostaje, etc. Además, se conoce a los biosólidos como lodos de la PTAR y sistemas de saneamiento in situ estabilizados, los cuales deben de poseer características fisicoquímicas y microbiológicas adecuadas para su aprovechamiento sin causar daño a la salud y el medio ambiente (Candela, 2020). Así mismo los biosólidos son una materia prima disponible en abundancia, que generalmente se estima como amenaza potencial para la salud humana y el medio ambiente, conforme a ello su uso en cualquier proceso sería de gran ayuda para la sostenibilidad medioambiental como lo afirma Raj et al. (2021).

Tabla 2

Característica fisicoquímica de los biosólidos

Parámetros	Lodos digeridos anaeróbicamente (biosólidos)
pH	6,5 - 7,5
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	2 500 - 3 500
Nitrógeno (% de ST)	1,6 - 6
Fósforo (% P de ST)	0,7 - 1,7
Potasio (% K de ST)	0 - 2,5
Aceite, grasas (% de ST)	5 - 20
Proteínas (% de ST)	15 - 20
Sólidos Totales	6 - 12
Sólidos Volátiles (% de ST)	30 - 60

Nota. Características presentadas en la tabla 1, son referenciales ya que dependen bastante de la fuente y la eficiencia de tratamiento. Adaptado de Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica, por Candela, 2020.

Por último Goldan et al. (2022), mencionan que los biosólidos de las PTAR contienen alto contenido de nutrientes (Tabla 2), pero a su vez contiene metales, toxinas y patógenos, lo que conforman una amenaza ambiental, en este sentido se requiere un tratamiento previo del lodo crudo y su conversión en biochar mediante el proceso

de pirólisis, ya que este proceso se considera aceptable para inmovilizar metales y eliminar patógenos y compuestos peligrosos.

2.2.3. Clasificación de biosólidos

Según el DS N° 015-2017-Vivienda (2017), en su artículo 11, los biosólidos que se producen en las plantas de tratamiento de aguas residuales se clasifican en dos tipos:

- Biosólido de clase A, los cuales son aplicables al suelo sin restricciones sanitarias.
- Biosólido de clase B, los cuales son aplicables al suelo con restricciones sanitarias, de acuerdo a su localización de los suelos y/o al tipo de cultivo.

Por lo que las PTAR, si desean el reaprovechamiento de los biosólidos de estas dos clases, deben cumplir de forma conjunta con los parámetros de estabilización, toxicidad química e higienización, según el reglamento para cada tipo de biosólido

2.2.4. Parámetros de estabilización

Proceso aplicado a los lodos de la PTAR, por el cual se reduce la fracción orgánica (sólidos volátiles) en relación con la materia seca (sólidos totales), para controlar la degradación biológica, los olores, atracción de vectores y de patógenos (DS N° 015-2017-Vivienda, artículo 3). Los lodos al ser estabilizados y calificados como clase A o B, deben cumplir con el siguiente parámetro de acuerdo a la tabla 3.

Tabla 3

Estabilización de biosólidos

Concentración de materia orgánica
Materia orgánica (SV) \leq 60 % de materia seca (ST)

Nota. Se reaprovecharán los lodos como biosólidos cuando éstos sean estabilizados, es decir cuando la relación de sólidos volátiles (SV) a los sólidos totales (ST) es menor o igual que sesenta por ciento (60 %). Adaptado del Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, DS N° 015-2017-Vivienda, 2017.

La tecnología que permite cumplir con este parámetro se realiza en los Tanques Imhoff de la PTAR “La Totorá”; este proceso de tratamiento de aguas residuales se realiza con tiempo prolongado de permanencia de los lodos en un ambiente anaeróbico. En condiciones de operación en base al diseño, se consideran como estabilizados por lo que estas tecnologías según el Anexo I del DS N°015-2017-Vivienda del 2017 no se necesitan comprobar la relación de sólidos volátiles (SV) a sólidos totales (ST).

2.2.5. Parámetros de toxicidad química

Tanto los biosólidos de clase A o B, deben cumplir con los siguientes parámetros de toxicidad, mostrados en la tabla 4.

Tabla 4

Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y de Clase B

mg/kg ST materia seca	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)	Mercurio (Hg)	Níquel (Ni)	Zinc (Zn)
Clase A y clase B	40	40	1200	1500	400	17	400	2400

Nota. Los biosólidos deben cumplir con este parámetro, en caso excedan con los valores no puede ser calificados como biosólidos de clase A ni de clase B. Adaptado de Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Decreto Supremo N° 015-2017-Vivienda, 2017.

2.2.6. Parámetros de higienización

Los biosólidos de clase A y de clase B deben cumplir con los siguientes parámetros de higienización, detallados en la tabla 5.

El artículo 14 del DS N°015-2017-Vivienda, establece que, si no se llega a cumplir los tres parámetros establecidos en la tabla 3, 4 y 5, el biosólidos de clase A o B, según corresponda no puede ser reaprovechado para las actividades establecidas en el mismo.

Tabla 5*Parámetros de higienización de biosólidos*

Indicador	Clase A	Clase B
Indicadores de contaminación fecal	Escherichia coli < 1000 NMP/ 1 g ST o Salmonella sp. < 1 NMP / 10 g ST	Aquellos que han llegado al nivel de higienización exigido en el Anexo I del DS N° 015-2017-Vivienda por procesos de estabilización o en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del Anexo II del DS N° 015-2017-Vivienda
Indicador de Huevos de Helmintos	Huevos viables de Helmintos < 1 / 4 g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización	

Nota. El nivel de higienización para la Clase B, también se puede demostrar alternativamente a través de una aprobación por la DGAA, de las condiciones de operación de alguno de los procesos señalados como es el secado al aire libre (proceso de secado sobre una cama de arena en lechos de poca profundidad, comprendido en un tiempo mínimo de tres meses de secado) y de mineralización (proceso de secado de lodo combinado con la fitodepuración que permite la permanencia de lodo por un tiempo de más de tres meses hasta años). Adaptado de Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Decreto Supremo N° 015-2017-Vivienda, 2017.

2.2.7. Biosólidos del tratamiento primario en la PTAR “La Totora”

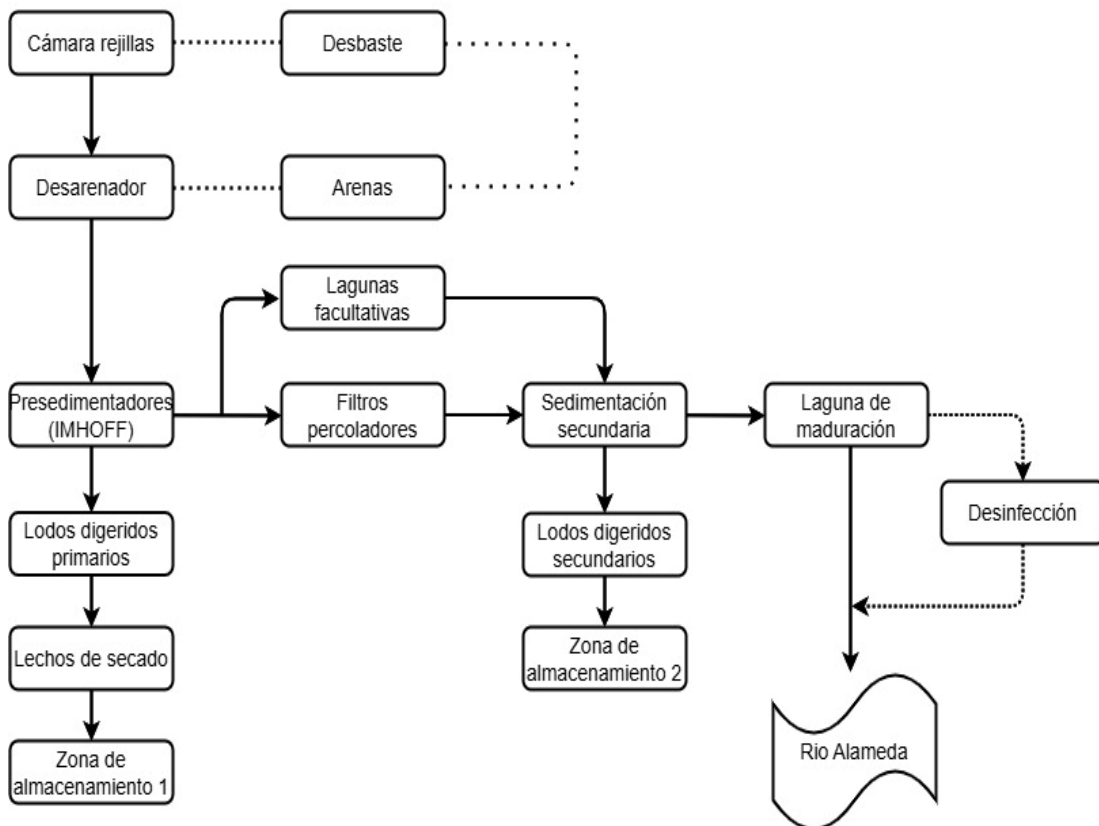
SEDA Ayacucho (2022), en su Manual de Operación y Mantenimiento, menciona que lodos provenientes después de un tratamiento primario en los Tanques Imhoff, que al ser sometidos a procesos de estabilización en los lechos de secado y deshidratados en la zona de almacenamiento son llamados biosólidos primarios, los cuales pueden ser aprovechables para la agricultura, recuperación de suelos, rellenos sanitarios, compostaje, etc. Conforme a ello la estabilización o deshidratación se realiza para reducir su nivel de patogenicidad, poder de fermentación y su capacidad para atraer vectores.

La producción promedio mensual de biosólidos del tratamiento primario en la PTAR “La Tatora” es de 320 m³, para un caudal de 355 L/s de agua residual tratada, debido a la tecnología anaerobia que se aplica. Conforme a ello la PTAR “La Tatora” se encuentra registrada en el RENOPROB (Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de biosólidos), así mismo los biosólidos de la “La Tatora” están clasificadas como clase B, de acuerdo a parámetros establecidos en el DS N°017 - 2017 - Vivienda (Candela, 2020), por lo que su comercialización es limitada debido a su aplicación solo en plantas de tallo alto. Actualmente estos biosólidos primarios, son comercializarlo a S/ 15,00 el metro cúbico (m³).

La PTAR “La Tatora” según el informe del monitoreo trimestral y semestral, almacena los biosólidos provenientes del tratamiento primario y secundario en dos zonas distintas, como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Proceso de obtención de biosólidos en la PTAR “La Tatora”



Nota. Adaptado de Manual de Vertimiento de Aguas Residuales Tratadas por SEDA Ayacucho, 2022.

Debido las diferentes propiedades que poseen estos biosólidos los cuales se almacenan por separado, ya que por informe del cuadro orgánico de la institución, en nuestra visita en agosto del 2024, a la planta de tratamiento de aguas residuales de Totorá, mencionaron que los lodos provenientes del tratamiento primario tienen mayor carga orgánica y los que provienen del tratamiento secundario tienen mayor concentración de metales, es así que de acuerdo a las necesidades del cliente se realiza la venta de los biosólidos, en donde se realizó un análisis de ambos biosólidos y los cuales pueden ser verificados en el anexo 16 de la presente investigación.

Como se ha mencionado antes; existen dos zonas de almacenamiento, la primera zona de almacenamiento corresponde a los biosólidos del tratamiento primario de un área aproximadamente 1000 m² que se encuentran entre la zona de los tanques Imhoff y las lagunas facultativas con agitadores solares y la zona de almacenamiento 2, para los lodos provenientes del tratamiento secundario de un área de 2200 m² aproximadamente, los cuales se encuentran entre los filtros percoladores y los sedimentadores.

2.2.8. Parámetros fisicoquímicos de los biosólidos de la PTAR “La Totorá”

Torres (2020), afirma que las tecnologías anaerobias en el tratamiento de aguas residuales generan lodos estabilizados, ya que se comprobó con los análisis de sólidos practicados a los lodos de la PTAR “La Totorá” como se citó en Candela (2020).

Candela (2020), menciona que en comparación con otras plantas de tratamiento de aguas residuales del Perú, en la PTAR “La Totorá” los del Tanque Imhoff son los que producen lodos con menor concentración de sólidos volátiles, esto se debe al largo periodo de permanencia en los lechos de secado (3 a 4 meses), lo que hace reducir su humedad y materia volátil, como se muestra en la tabla 6, sin embargo al someter a los lodos a procesos empíricos de compostaje con la finalidad de mejorar sus propiedades agronómicas, su humedad aumenta al igual que los sólidos volátiles.

Tabla 6

Concentración de sólidos en los lodos de los tanques Imhoff y lechos de secado

Procedencia	Unidad de tratamiento	Parámetros		
		%Humedad	%ST	%(SV/ST)
DS N°015- 2017- Vivienda				60
PTAR	Tanque Imhoff	90,9	9,1	44
“La Tatora”	Lecho de secado	18,9	81,2	21

Nota. Concentración promedio presente en los lodos en los de la PTAR “La Tatora”. Adaptado de Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica, Candela, 2020.

Los lodos estabilizados provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales que utilizan tecnologías aerobias y anaerobias contienen concentraciones de metales pesados menores a los valores establecidos en el DS N° 015-2017-Vivienda, afirmado por Candela (2020). En la tabla 7 se realiza la comparación de la toxicidad con el DS N° 015-2017-Vivienda y los lodos en diferentes unidades de tratamiento, en donde se observa que el arsénico es el que sobrepasa el valor permitido.

Tabla 7

Concentración de metales pesados de los lodos en diferentes unidades de tratamiento

Procedencia	Unidad de tratamiento	Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)								Fuente
		As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn	
DS N° 015- 2017- Vivienda		40	40	1200	1500	400	17	400	2400	
	Tanque Imhoff	4	0,7	55	73	36	0,6	33	369	Candela (2020)
PTAR “La Tatora”	Lecho de secado	7	1	36	70	37	0,8	24	447	Candela (2020)
	Zona de almacenamiento	52	7	321	112,6	38	--	39	653,2	Huallpa (2023)

Nota. Concentración promedio de metales pesados en los biosólidos provenientes de la PTAR “La Tatora”. Adaptado de Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica, por Candela, 2020.

Los biosólidos de acuerdo al DS N°015-217-Vivienda, solo se les pueden clasificar como clase A, cuando sus concentraciones de E. Coli y huevos helmintos son

menores de 1000 NMP/1 g ST y 1 HH/4 g ST respectivamente, y de clase B cuando proviene de las tecnologías como: lagunas facultativas, anaerobias y aerobias, tanques Imhoff, filtros percolador, RAFAML, lodos activados de aireación extendida, secado al aire y mineralización; en base a ello y de acuerdo a lo antes mencionado, se observa la tabla 8 en donde se puede observar la concentración de los microorganismos en los Tanques Imhoff y en los lechos de secado, en los cuales este último pasará a la primera zona de almacenamiento en donde se secará al aire libre los lodos, consiguiendo así los biosólidos primarios, y los cuales son dispuestos para su venta.

Así mismo se puede observar que en estos dos puntos no existe mucha diferencia en los valores de la concentración de microorganismos, por lo que se puede inferir sobre la posible ineficacia de los tratamientos en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”; es por ello que los biosólidos de esta planta se clasifican como clase B, siendo este un indicador de su limitación para su distribución en el mercado agrícola, ya que presenta un peligro potente si se le añade a los suelos agrícolas en nuestra región (Candela, 2020). No obstante, se puede reutilizar este tipo de biosólidos en otras áreas que no pongan en peligro a la salud, tal como se explica en el inciso 2.2.9.

Tabla 8

Concentración de microorganismos patógenos de los lodos en diferentes unidades de tratamiento

Unidad de tratamiento	Parámetros de higienización				
	Coliformes totales (UFC/g ST)	Escherichia Coli (UFC/g ST)	Coliformes termotolerantes (UFC/g ST)	H.H./4 g ST	
DS N° 015-2017-Vivienda	$<10^3$ NMP/1 g ST			<1 (viable)	
Biosólidos PTAR “La Totorá”	Tanque Imhoff	$1,23 \times 10^{10}$	$1,23 \times 10^{10}$	$1,23 \times 10^{10}$	11
	Lecho de secado	$2,16 \times 10^9$	$2,16 \times 10^9$	$2,16 \times 10^9$	7
	Semi composta	$6,10 \times 10^9$	$6,10 \times 10^9$	$6,10 \times 10^9$	18

Nota. Concentración promedio de microorganismos patógenos en los biosólidos provenientes de la PTAR “La Totorá”. Adaptado de Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica, por Candela, 2020.

Según el reaprovechamiento que realiza la PTAR “La Totora” con los biosólidos, y que en el DS N° 015-2017-Vivienda, no se especifica la concentración de nutrientes mínimas, se consideró realizar el contraste con la RM N° 0178-2023-MIDAGRI, en donde si bien es cierto no exige llegar a esos valores de la tabla 9, sin embargo, para fines de la presente investigación es necesario considerarlo.

Tabla 9

Concentración de nutrientes de los lodos en diferentes unidades de tratamiento

Unidad de tratamiento		Parámetros				
		C (%)	N (%)	C/N	P (%)	K (%)
RM N° 0178-2023-MIDAGRI		-	0,3 %-1,5 %	10 %-25 %	0,1 %-1,0 %	0,3 %-1,0 %
PTAR	Tanque Imhoff	24,3	2,1	11	0,9	0,4
“La Totora”	Lecho de secado	9,3	1,2	7	0,8	0,4
	Semi composta	18,5	2,1	8	0,8	0,5

Nota. Con respecto a los nutrientes, los lodos provenientes de tecnologías anaerobias la concentración de carbono (C) varía alrededor de 9 a 30 por ciento y el nitrógeno (N) varía de 1 a 3 por ciento. Respecto al fósforo (P) y al potasio (K), las concentraciones varían de 0,8 a 0,9 y 0,4 a 0,5 respectivamente. Por último, la relación de C/N varía de 7 a 11, adaptado de Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica por Candela, 2020.

2.2.9. Aplicación de los biosólidos

- **Clase A.** En el artículo 18 del DS N° 015-2017-Vivienda, este tipo de biosólido está destinado para el reaprovechamiento como acondicionador de los suelos en la agricultura, producción de almácigos, viveros, acondicionador para la agricultura, pastos y forrajes, mejorador de suelos y áreas verdes con acceso restringido a la población en un periodo no menor de siete días.
- **Clase B.** En el artículo 19 del DS N° 015-2017-Vivienda, en este clase de biosólidos es limitado, ya es destinado para al reaprovechamiento en suelos, pero se excluyen por el riesgo de contacto con la población y las actividades ganaderas, por lo que únicamente puede ser reaprovechado para plantas de tallo alto, recuperación de áreas degradadas situadas a menos de 100 metros alejados de pueblos y viviendas, reforestación de suelos con acceso

restringido a personas y animales por un periodo de al menos un mes, como cobertura de relleno sanitario, etc.

El artículo 20 del Decreto Supremo 015-2017-Vivienda, menciona que tanto los biosólidos de clase A o B si no cumplen con alguno de los parámetros de la tabla 3, 4 y 5, de manera automática, éstos no pueden ser utilizados para su aplicación, del mismo modo no se puede aplicar dentro de los 500 metros de distancia al punto de aguas arriba de captación para agua potable y su aplicación debe ser dentro de los 300 de distancia de captación de agua subterránea, entre los más relevantes.

2.2.10. Proceso de pirólisis

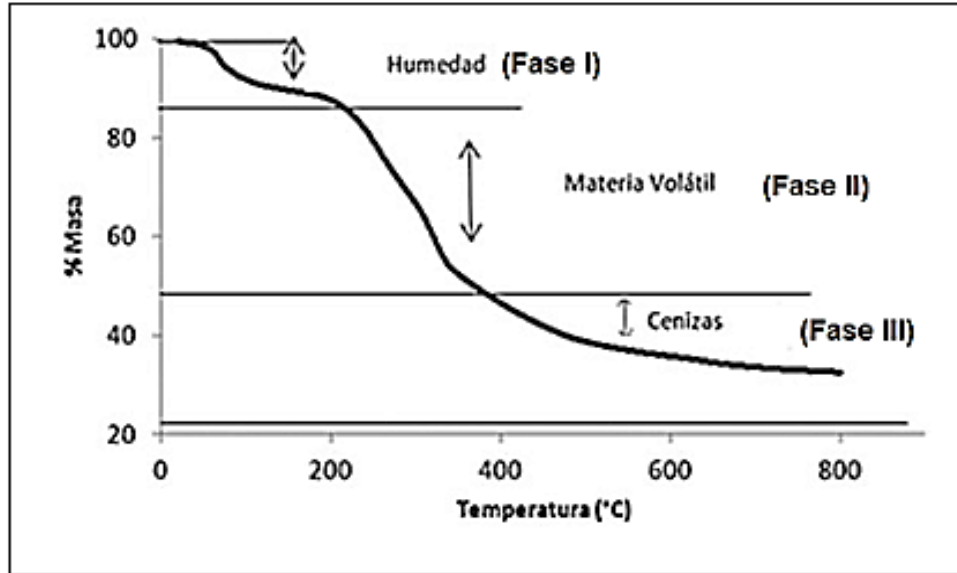
Existen tres etapas principales de descomposición de la biomasa durante el proceso de pirólisis, las cuales se detallan en la figura 2 (Collard y Blin, 2014, como se citó en Chuquiyaury, 2021).

- Etapa I, que consiste a la deshidratación y la transformación estructural de los compuestos inestables, debido a la fragmentación o redistribución.
- Etapa II, en esta etapa sucede la más alta pérdida de masa y la reducción molecular.
- Etapa III, que reordena e implica un proceso de carbonización sólida que reordena la estructura del benceno en otras estructuras policíclicas.

Así mismo se puede decir que la figura 2 muestra las tres pérdidas de masa considerables en cada fase, la primera sucede a los 100 °C, donde ocurre la pérdida de humedad del material, después sucede la descomposición por pirólisis del material aproximadamente desde los 300 °C y finalmente a la temperatura mayor a 600 °C en donde se observa la formación de cenizas (Rincón et al, 2014).

Figura 2

Variación del porcentaje de masa en función de la temperatura



Nota. Adaptado de Obtención de carbones activados a partir de semillas de eucalipto, por activación química con H_3PO_4 . Caracterización y evaluación de la capacidad de absorción de fenol desde solución acuosa, por Rincón et al., 2014.

2.2.11. Fuentes de producción de biochar

Actualmente la biomasa (residuos agrícolas, forestales, animales, orgánicos urbanos, etc.) es considerada una buena fuente renovable muy importante que ayuda a contribuir la economía, la sostenibilidad y seguridad energética de un país (Sukiran et al., 2011, como se citó en Guerra, 2015).

Sin embargo, según las directrices estandarizadas para la definición y ensayos de productos de biochar utilizados en el suelo, denominado la Iniciativa Internacional del Biochar (IBI) (2015), la fuente utilizada para la obtención de biochar debe tener ciertas características, ya que el material de origen es el que va determinar las propiedades del producto final.

En resumen, existen una variedad de materias primas potenciales para la obtención de biochar, es por ello que de acuerdo a las propiedades deseadas se encontrarán en función de la selección del mismo y el método de producción empleado (Guerra, 2015).

2.2.12. Características del biochar

Guerra (2015), menciona que las características del biochar, de manera general son:

- Alto contenido de carbono (75 % - 90 %)
- Bajo contenido de nitrógeno (N)
- pH alcalino
- Baja densidad
- Alta retención hídrica
- Material muy poroso
- Degradación lenta

Además, Guerra (2015), menciona que, conforme a la selección de la materia prima, la técnica de obtención, y las condiciones para producir biochar, estas características varían. Las características ya definidas nos permitirán definir las características a evaluar, los métodos estandarizados, pero en la actualidad no existe ninguno; sin embargo, la Iniciativa Internacional sobre el Biochar (IBI), plantea algunas directrices para la producción de biochar.

Lehmann (2007), afirma que el biochar se conforma por distintos tamaños, los cuales varían en función del origen y el tamaño de la materia prima como se citó en Chuquiyaury (2021). Tienen una densidad aparente considerablemente baja, que puede oscilar de $0,30 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,43 \text{ g.cm}^{-3}$, debido al tipo de materia prima y los equipos de pirólisis que se utilizan (Chuquiyaury, 2021).

En función a los macronutrientes, los cuales son los más esenciales para las plantas; el nitrógeno es el más susceptible al calor, y como tal se espera que su concentración disminuya con la temperatura (Shenbagavalli & Mahimairaja, como se citó en Guerra, 2015). Por otro lado, el carbono se volatiliza a los $100 \text{ }^\circ\text{C}$, el nitrógeno a unos $200 \text{ }^\circ\text{C}$, el azufre a $375 \text{ }^\circ\text{C}$, el fósforo y el potasio de $700 \text{ }^\circ\text{C}$ a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ (Chuquiyaury, 2021).

2.2.13. Propiedades de enmienda del biochar

Según la revista Agrología (2018), entre las más importantes tenemos:

- Fuente de carbono estable almacenada en el suelo
- Recupera la fertilidad del suelo y mejora el crecimiento de las plantas.

- Aumento de contenido de materia orgánica al suelo.
- Incrementa la capacidad de retención de agua
- Eleva la disponibilidad de nutrientes
- Absorbe pesticidas y metales pesados
- Incrementa el secuestro de carbono en el suelo y reduciendo que se emita a la atmósfera como CO₂.

2.2.14. Impactos ambientales del biochar

Chuquiyaury (2021), afirma que las principales ventajas de agregar biochar, son que mejora la retención e infiltración de agua del suelo, aumenta su capacidad de intercambio catiónico, retiene nutrientes, eleva el pH, aumenta la efectividad del uso del nitrógeno, estimula el crecimiento microbiano y, lo más importante, puede tener efectos duraderos en el suelo porque es una forma de carbono estable que es altamente resistente a la degradación microbiana.

Presenta capacidad de mantener nutrientes disponibles para el aprovechamiento de la planta, en comparación con estiércoles, compost y hojarasca. Por otro lado, el aspecto biológico, se ha visto que la biomasa microbiana incrementa con las adiciones de biochar (Lehmann et al., 2011, como se citó en Chuquiyaury, 2021). Con respecto a los nutrientes de la planta, el biochar es capaz de absorber compuestos químicos, metales pesados, herbicidas, hidrocarburos policíclicos, etc. (Chuquiyaury, 2021).

Conforme a ello, la adición de forma adecuada, es capaz de incrementar la productividad del suelo en un rango de 0 a 300 por ciento (Maia et al., 2011, como se citó en Chuquiyaury, 2021), no obstante, se recomienda utilizar el biochar con otra enmienda para asegurar el buen rendimiento de los cultivos.

2.2.15. Rendimiento del biochar

Tanto para la aplicación del proceso de pirólisis lenta o baja, la producción de biochar oscilan entre los 20 % y 50 % para diferentes biomásas, ya que el rendimiento depende de la composición química, humedad, la temperatura, el tiempo de residencia, la tasa de calentamiento, etc. (Edmunds, 2012, como se citó en Chuquiyaury, 2021). El rendimiento para la producción de biochar, es la relación de la masa de materia prima introducida al horno y la masa del producto final (biochar

en frío), expresada en porcentaje (Chuquiyaury, 2021). A continuación, se presenta la representación porcentual:

$$\%R = \frac{mb}{bb} \times 100$$

- Rendimiento (R)
- Masa de biochar (mb)
- Masa de biomasa o materia prima (bb)

2.2.16. La economía del biochar

Los residuos, que normalmente se dejan en el campo y no se destinan a su reutilización, son una solución rentable para los pequeños y medianos agricultores. Representan una inversión mínima en comparación con los costos de compra y transporte de fertilizantes y/o abonos. La producción de biochar para fines agronómicos podría representar una inversión económica significativa porque ya se refiere a la producción continua de biochar con equipos más sofisticados y un mayor control sobre las variables en lugar de la producción en lotes. Sin embargo, también se menciona el potencial del biochar para mejorar la producción de suelos degradables y mejorar la calidad del medio ambiente porque reduce la biodisponibilidad de contaminantes ambientales. También se menciona mejorar la calidad del medio ambiente porque reduce la biodisponibilidad de los contaminantes ambientales (Chuquiyaury, 2021).

2.2.17. Biochar a partir de biosólidos de la PTAR

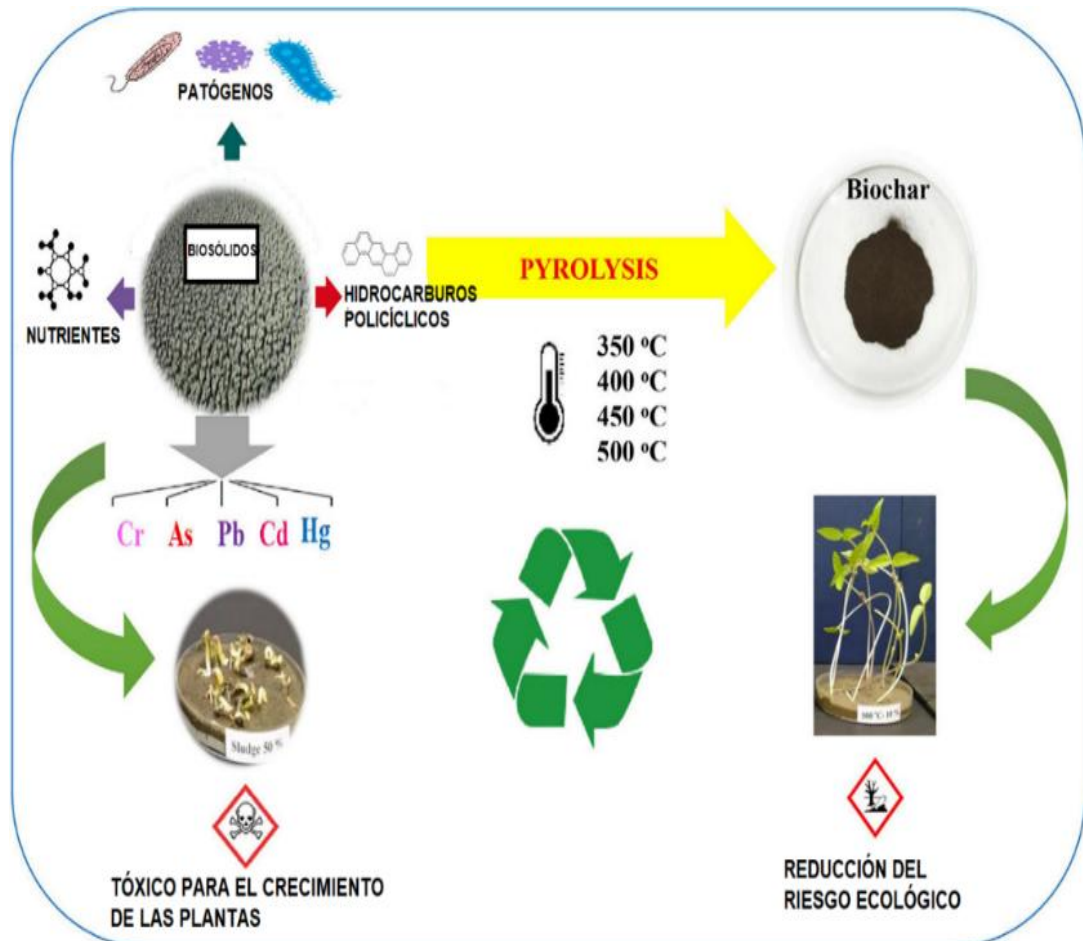
El biochar (biocarbón), es un producto que contiene abundante carbono y este puede ser derivado del proceso de pirólisis (Hansen et al., 2023). Además, posee propiedades fisicoquímicas únicas, ya que incluye una mezcla de diversos componentes orgánicos e inorgánicos que pueden mejorar su eficacia en diversas aplicaciones (Sharma et al., 2024). Hoy en día la producción de biochar se ha modernizado y optimizado continuamente para mejorar la calidad y conseguir su factibilidad en el tiempo (Hansen et al., 2023).

Debido a la legislación existente que establece para el almacenamiento de desechos y su aplicación en la superficie terrestre, muchos investigadores a nivel mundial buscaron otros métodos para reutilizar y reciclar los biosólidos (Gherghel et al. 2019,

como se citó en Goldán et al., 2022). En este contexto el proceso de pirólisis resulta ser una buena alternativa de gestión de los biosólidos, es por ello que en la figura 3, se muestra el contenido de metales tóxicos como Cr, As, Pb, Cd y Hg, nutrientes, patógenos e hidrocarburos policíclicos, que están presentes en los biosólidos y los cuales se pueden degradar por este proceso desde una temperatura de tratamiento de 350 °C a 500 °C. Su conversión en un producto como el biochar, reduce el riesgo ecológico.

Figura 3

Resumen gráfico del proceso



Nota. Adaptado del artículo *Characterization of biochar produced from sewage sludge and its potential use as a substrate and plant growth improver* (Caracterización del biocarbón producido a partir de lodos de depuradora y su potencial uso como sustrato y mejorador del crecimiento vegetal), por Hansen et al., 2023.

2.2.18. Aplicación de procesos de pirólisis para la obtención de biochar

Los procesos de pirólisis que se mencionarán a continuación se utilizan en la mayoría de los casos para producir un biochar que sea utilizado para la aplicación agrícola (enmienda de suelos) (Gul et al., 2015, como se citó en Goldán et al., 2022).

2.2.18.1. Pirólisis lenta

Como su nombre menciona, se trata de la aplicación de tiempos de residencia prolongados y las materias primas se someten a procesos de pirólisis más comúnmente en el rango de 350 °C y 550 °C, por lo que se ha investigado y descubierto que este tipo, beneficia y optimiza la formación de carbón, a tiempos que producen menores cantidades de subproductos como el bio-oil y el biogás (Khalifa et al. 2022).

Así mismo se menciona que es un proceso térmico que se da cuando se someten a temperaturas bajas (300 °C a 700 °C), altas presiones, velocidades de calentamiento lentas (0,01 a 2,0 °C/s) y largos tiempos de residencia, generándose cantidades en proporción similares de productos sólidos, gaseosos y líquidos ya que el biochar producido a temperaturas por debajo de los 500 °C, con buenas concentraciones de nutrientes es muy utilizado para aplicación agrícolas grandes (Gul et al., 2015; Qambrani et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022).

2.2.18.2. Pirólisis rápida

El proceso de pirólisis rápida, al igual que la anterior también es un proceso de conversión orgánica, el cual se caracteriza por el tiempo de residencia corto (< 2 h), altas temperaturas (500 °C a 1000 °C) y velocidades de calentamiento rápidas (> 2 °C/s) (Qambrani et al., 2017; como se citó en Goldán et al., 2022).

En la tabla 10 se puede observar la comparación entre el proceso de pirólisis lenta y rápida en función de los componentes como es el biochar, syngas (Gas) y bioaceite; los cuales se producen en diferentes proporciones, según el tipo de procedimiento que se dese aplicar.

Tabla 10*Cantidad de productos obtenidos en función del proceso de pirólisis aplicado*

Tipo	Componentes		
	Biochar	Syngas (Gas)	Bioaceite
Lento	30 %	35 %	35 %
Rápido	12 %	13 %	75 %

Nota. Adaptado de efectos del biochar de cascarilla de Oriza sativa (Arroz) sobre Daphnia magna (Pulga de agua) y Lactuca sativa (Lechuga), en fase de laboratorio, Lima - Perú, Chuquiyaury, 2021.

2.2.19. Factores que influyen en la calidad del biochar derivado de los biosólidos

Parámetros como el proceso de pirólisis, la temperatura, tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y el tamaño de partícula de la materia prima, pueden afectar las características cualitativas y cuantitativas del biochar y su interacción con el medio en el que se va aplicar (Cha et al., 2016, como se citó en Goldán et al., 2022), a continuación, se detalla cada parámetro:

- La materia prima, influyen en el contenido de metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos del biochar (Wang et al., 2018, como se citó en Goldán et al., 2022). Sin embargo, la materia prima se somete a bajas temperaturas, la composición del producto con la materia prima, son similares mientras que las propiedades del biochar obtenido a altas temperaturas son diferentes a la materia prima (Dahlawi et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022).
- La temperatura, es un parámetro importante ya que influye en las características estructurales y fisicoquímicas del biochar (Zhao et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022). Si el biochar que se obtiene a temperaturas de 500 °C a 1000 °C, éste ocupará un área y una microporosidad mayores que cuando se obtiene a temperaturas bajas, ésta última provoca una menor capacidad de adsorción del biochar (Qambrani et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022). Así mismo el aumento de temperatura conduce al mismo el aumento del pH, de la superficie y una mayor hidrofobicidad, sin embargo, a temperaturas bajas (< 500) facilita la

carbonización parcial lo cual genera biochar con poros de menor tamaño y superficie reducida y mayor contenido de O₂ (Oliveira et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022).

- Tiempo de retención, concierne a la duración del proceso de pirólisis; el proceso de pirólisis rápida tiene un efecto mínimo sobre la relación carbono - oxígenos (C:O) en el biochar en comparación con el proceso de pirólisis lenta (Dahlawi et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022).
- Velocidad de calentamiento, tienen un efecto importante en la estructura del biochar, la producción de bioaceite y biogas (Gul et al., 2015, como se citó en Goldán et al., 2022). Cuando la velocidad de calentamiento es rápida tiene un efecto positivo en la producción de bioaceite (75 %), gases no condensables (13 %) y biochar (12 %), entretanto que la velocidad de calentamiento lenta, crea condiciones favorables para la producción de biochar (Qambrani et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022).

Las características del biochar, como el pH, la CE, la superficie, los grupos funcionales, los elementos nutritivos e incluso los metales pesados, las concentraciones nutricionales e incluso la presencia de metales pesados, se ven afectados directamente por la temperatura de pirólisis (Tomczyk et al., 2020; Figueiredo et al., 2018, como se citó en Raj et al., 2021). Raj et al. (2021) además afirma que el rendimiento del biochar es inversamente proporcional al aumento de la temperatura y que en base a ello existe una reducción del rendimiento del 88,3 % al 64,7 % con respecto al incremento de la temperatura de 350 °C a 500 °C, es por ello que en su investigación y de acuerdo a la aplicación agrícola que le iba dar, produjo biochar a baja temperatura (350 °C a 500 °C) y evaluó el gran impacto que tuvo la temperatura de pirólisis en las características como nutrientes, contaminantes tóxicos (metales) e hidrocarburos aromáticos policíclicos de su biochar.

Así mismo las propiedades del biochar procedentes de la PTAR, se ven afectadas por diversos factores como es el tiempo de residencia, contenido de humedad, la temperatura de pirólisis, la velocidad de calentamiento, porosidad, área superficial, entre otros (Bretreger et al., 2021, Ghen et al., 2019, como se citó en Khan et al., 2023).

Del mismo modo Sharma (2024), afirma que la temperatura juega un papel importante en la elaboración biochar con buenas características, ya que los

biosólidos producidos a diferentes temperaturas presentan diferencias notables en sus propiedades fisicoquímicas, en base a ello, el biochar producido a temperaturas bajas presenta mayor concentración de nutrientes con una menor área superficie por lo que se considera más adecuado como fertilizante, por el contrario, el proceso de pirólisis a temperaturas altas da como resultado un biochar con áreas de superficie mayores y volumen de poros, lo que le hace ideal como adsorbente.

Por lo tanto, para esta investigación se tomará en consideración lo mencionado por Raj et al. (2021) y Khan et al., ya que ellos ponen más énfasis en los parámetros de operación como la temperatura y el tiempo del proceso de pirólisis y los consideran como los mayores influyentes en las propiedades del biochar.

2.2.20. Características fisicoquímicas del biochar derivado de los biosólidos

Hansen et al. (2023), para caracterizar su biochar, eligió seguir los requisitos de la Certificación Europea del Biochar (EBC) y realizar un contraste. Los biosólidos fueron sacados de la planta de tratamiento de aguas residuales de Dinamarca “Fårevejle”; además sobre sus resultados menciona que la temperatura de pirólisis afecta en la mayoría de las propiedades del biochar producido, tal como se muestra en la tabla 11, así mismo la formación de una gran cantidad de poros residuales donde la capilaridad retiene el agua, lo que mejora la capacidad de retención del agua del suelo, disminuye la movilidad del agua, reduciendo el estrés hídrico en las plantas.

Por otro lado, los resultados del análisis de los metales pesados que se muestran en la tabla 12, en donde se observa que éstos se recuperan en la matriz del biochar, ya que, en comparación con los lodos secos; en los tres tratamientos se incrementa la concentración de metales por kg de masa en función del aumento de la temperatura de pirólisis (Frandsen et al., 2018; Roberts et al., 2017, como se citó en Hansen et al., 2023).

Tabla 11*Características fisicoquímicas de los biochars producidos a diferentes temperaturas*

	Biosólidos	Temperatura de tratamiento		
		590 °C	665 °C	765°C
Contenido de cenizas (%)	27,11	68,82	67,89	67,99
Humedad (%)	20,24	2,27	2,34	1,91
pH	6,85	8,88	9,16	9,04
Conductividad eléctrica (CE)	676	103,00	109,00	85,00
Materia volátil (%)	43,82	6,34	5,89	1,63
Carbono fijo (%)	8,13	23,30	23,88	27,63
Materia orgánica (%)	33,06	70,35	71,15	69,63
Área Superficial (m ² g ⁻¹)	--	33,89	45,42	64,32
C (%)	33,00	25,05	25,77	29,05
N (%)	4,70	2,44	1,89	1,26
O (%)	30,97	3,40	3,87	0,23
S (%)	0,58	0,56	0,58	0,64
P (mg/ kg MS)	18,30	48,80	47,20	46,00
K (mg/ kg MS)	4740	8 480	8 180	7 860
Mn (mg/ kg MS)	203,00	632,00	632,00	608,00
Fe (mg/ kg MS)	15,40	36,60	38,20	34,90

Nota. Se puede observar que el pH del biosólido es ácido, pero a la temperatura de 665 °C, se registró el pH más alto, esto se debe a la formación de carbonatos como CaCO₃, MgCO₃ y álcalis inorgánicos (K, Na, Ca y Mg), así mismo la materia volátil disminuye del 43,82 % para el biosólido al 1,63 % para el biochar producido a 765 °C, su carbón fijo y el contenido de cenizas aumenta con la temperatura, la conductividad eléctrica es más alta a 665 °C, finalmente el área superficial aumenta con la temperatura, por lo que mientras más alta sea la temperatura de pirólisis se formará más nanoporos en el biochar. Adaptado de Caracterización del biocarbón producido a partir de lodos de depuradora y su potencial uso como sustrato y mejorador del crecimiento vegetal (Characterization of biochar produced from sewage sludge and its potential use as a substrate and plant growth improver) por Hansen et al., 2023.

Tabla 12*Características toxicológicas de los biochars producidos a diferentes temperaturas*

	Biosólidos	Temperatura de tratamiento		
		590 °C	665 °C	765 °C
As (mg/ kg MS)	13	<BDL	<BDL	<BDL
Cd (mg/ kg MS)	1,5	< BDL	<BDL	<BDL
Cr (mg/ kg MS)	90,0	126,0	163,0	188,0
Cu (mg/ kg MS)	100,0	545,0	540,0	534,0
Pb (mg/ kg MS)	120,0	32,8	34,5	24,4
Ni (mg/ kg MS)	50,0	54,1	78,9	83,0
Zn (mg/ kg MS)	400,0	1620	1610	1480

Nota. El incremento de la concentración de metales pesados en el biochar producido, impide que el biochar siga las limitaciones en Dinamarca, sin embargo, el biochar producido a 590 °C y 665 °C cumpliría las limitaciones en Alemania si se considera biosólido. Adaptado de Caracterización del biocarbón producido a partir de lodos de depuradora y su potencial uso como sustrato y mejorador del crecimiento vegetal (*Characterization of biochar produced from sewage sludge and its potential use as a substrate and plant growth improver*) por Hansen et al., (2023).

Por otro lado, Raj et al. (2021), caracterizó el biochar a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales en Daulat Ganj en India. Sus resultados revelaron que el biochar a 350 °C contenía mayores elementos nutritivos como N, P, K, Ca y Na, en cambio el N disminuyó en un 92,7 % con el aumento de la temperatura. La disminución de N a partir de los 450 °C a 500 °C, pudo haberse dado probablemente por la volatilización de grupos N (NH₄-N o NO₃-N) durante el proceso de pirólisis. Sin embargo, el P y K se enriquecen, dependiendo de la temperatura de tratamiento. A continuación, se presenta la tabla 13 en donde se puede observar todo lo mencionado anteriormente.

Tabla 13*Concentración de elementos nutritivos*

Elementos	Biosólidos	Biochar de 350 °C	Biochar de 400 °C	Biochar de 450 °C	Biochar de 500 °C
N (total)	9,40	14,56	9,17	4,20	1,06
P (total)	4,46	5,71	5,53	5,71	5,54
K (total)	35,14	41,10	39,44	39,02	38,99
Ca (total)	14,23	17,58	14,32	14,00	13,86
Na (total)	0,91	1,09	0,99	0,94	0,97

Nota. De todos los nutrientes el N ha disminuido significativamente, ya que es parte de muchas moléculas orgánicas las cuales comienzan a volatilizarse a 200 °C. Adaptado de Preparación, caracterización y aplicaciones agrícolas del biocarbón producido por pirólisis de lodos de depuradora a diferentes temperaturas (*Preparation, characterization and agricultural applications of biochar produced by pyrolysis of sewage sludge at different temperatures*) por Raj et al., (2021).

La concentración de metales en los biosólidos se encontraba en el siguiente orden Cr < Ni < Cd < Pb < Cu < Zn < Mn < Fe, no obstante, se encontraban dentro de los límites de la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (USEPA) (1993) para la aplicación terrestre. En este sentido, la concentración de los metales en el biochar dependiendo la temperatura de pirólisis fueron mayores con excepción del cobre a 350 °C y 450 °C, como se observa en la tabla 14, lo que indica enriquecimiento de metales pesados durante el proceso de pirólisis, sobre todo a los 450 °C (Raj et al., 2021). La causa del enriquecimiento suele estar relacionado a la volatilización de compuestos de carbono gaseosos (Brown et al., 2015, como se citó en Raj et al., 2021), además de mayor estabilización térmica de los metales en comparación de otras materias orgánicas (Yuan et al., 2015, como se citó en Raj et al., 2021). Sin embargo, las concentraciones de todos los metales pesados en el biochar a cada temperatura de pirólisis, estuvieron por debajo de los límites permisibles estipulados por la Iniciativa Internacional sobre biochar (IBI) (2015), esto sugiere que la acumulación de metales se bloquea con la aplicación temporal del biochar en los suelos (Raj et al., 2021).

Tabla 14*Concentración de metales en los biosólidos y en los biochar a diferentes temperaturas*

Elementos	Biosólidos	Biochar de 350 °C	Biochar de 400 °C	Biochar de 450 °C	Biochar de 500 °C
Ni	27,8	34,1	39,2	31,7	34,7
Pb	61,1	105,4	124,4	97,9	86,9
Cd	32,1	37,0	42,1	35,6	36,7
Cr	13,8	24,9	29,4	24,2	25,7
Fe	3310,5	3554,5	3638,5	3576,5	3580,5
Mn	283,6	332,4	372,8	310,0	334,6
Cu	98,8	81,3	112,0	93,9	100,7
Zn	272,4	303,6	323,0	281,6	293,2

Nota. Adaptado de Preparación, caracterización y aplicaciones agrícolas del biocarbón producido por pirólisis de lodos de depuradora a diferentes temperaturas (*Preparation, characterization and agri applications of biochar produced by pyrolysis of sewage sludge at different temperatures*) por Raj et al., (2021).

2.2.21. Aplicaciones del biochar

Además, se puede mencionar que este origen es respetuoso con el medio ambiente ya que coloca al biochar (biocarbón) como una opción ecológica frente a los adsorbentes tradicionales, en concordancia con las directrices de la química sostenible y la responsabilidad ambiental. Asimismo, la generación de biocarbón mediante el proceso de pirólisis favorece la captura y el almacenamiento de carbono, proporcionando un beneficio dual al enfrentar las inquietudes sobre la calidad del agua y reducir los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera (Sharma et al., 2024).

2.2.22. Enmienda orgánica con biochar

Al transformar los desechos vegetales, animales e industriales, tienen el potencial de mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, así como la productividad de los cultivos (Albarracín et al., 2018, como se citó en Murillo et al., 2019). Dentro de las principales enmiendas, están los lodos de depuración, biochar, abonos verdes, estiércol de diferentes animales y vermicompost (Murillo et al., 2019).

Como resultado de la adición de enmiendas orgánicas al suelo, no sólo mejoran las condiciones físicas, químicas y microbiológicas, sino que también aumentan la disponibilidad de macro y micronutrientes que las plantas necesitan, lo que reduce el estrés y aumenta la productividad agrícola (Cesarano et al., 2017, como se citó en Murillo et al., 2019). Presentaron buenos resultados en un estudio realizado por Islam et al., (2019) en el sureste asiático, donde se ha demostrado que las enmiendas orgánicas aplicadas en suelos donde se produce arroz, disminuyen el estrés hídrico y aumenta la producción en comparación con fertilizantes químicos. Por otro lado, Lepsch et al., 2019 hizo estudios en los suelos de Norteamérica, donde la adición de la enmienda aportó al suelo, la capacidad de retener el volumen de agua, incluso en épocas secas, esto se debe a los macroporos que se forman con la enmienda, lo cual ayudó la producción de almendras (Murillo et al., 2019).

Por lo que las enmiendas han demostrado ser una fuente de macro y micronutrientes del suelo, más estables y que se encuentran disponibles de manera permanente. Por lo que, de acuerdo a las investigaciones realizadas indican que las enmiendas mejoran la productividad agrícola, siendo una alternativa de desarrollo sostenible. (Murillo et al., 2019).

2.2.23. Necesidad nutricional de las plantas

Los nutrientes requeridos por una planta para su crecimiento se clasifican en dos categorías según su relevancia: elementos químicos esenciales y aquellos de menor importancia. Entre los elementos químicos esenciales se encuentran el nitrógeno (N), el fósforo (P), el potasio (K), el calcio (Ca), el azufre (S) y el magnesio (Mg), destacándose especialmente los tres primeros en términos de cantidad. Los elementos químicos de menor importancia están presentes en menor proporción e incluyen el cobre (Cu), el hierro (Fe), el zinc (Zn), el boro (B), el manganeso (Mn), entre otros (Eos Data Analytics, 2024).

2.2.24. Problemas nutricionales en una planta

Eos Data Analytics (2024), además detalla la carencia de nutrientes en las plantas generalmente ocurre cuando el suelo no cuenta con suficientes elementos esenciales. Sin embargo, existe otro factor que puede ocasionar esta falta de nutrientes: una alta salinidad en el suelo, que restringe a las plantas el acceso a los nutrientes, incluso si se encuentran en buenas proporciones en el sustrato.

La capacidad que tienen las plantas para absorber nutrientes depende en gran medida de su estado de salud, por lo que diversos inconvenientes pueden influir negativamente en la adquisición y transporte de nutrientes, tales como:

- Raíces dañadas o poco desarrolladas
- Riego inadecuado, ya sea escaso o excesivo
- Un drenaje ineficiente
- Niveles de pH inapropiados.

Es importante tener en cuenta que las plantas requieren de productos químicos específicos durante las diferentes etapas de su crecimiento. Por ejemplo, la falta de nitrógeno en las plántulas provoca que éstas adquieran un tono verde pálido durante el desarrollo activo, sin embargo, en las etapas de floración y fructificación, los cultivos requieren de nutrientes como fósforo y potasio para la adecuada formación de semillas y frutos. Por esta razón, los agricultores deben vigilar la cantidad adecuada de estos nutrientes en cada etapa de desarrollo.

Con respecto a los metales, las plantas absorben metales en distinto grado, dependiendo del tipo de vegetal, el contenido de metales en el suelo y sus características. Sin embargo, las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales, ya que algunas basan su resistencia a los metales, restringiendo su transporte a la parte aérea, siendo esta forma no tóxica para la planta. Por otro lado, existen algunas plantas que son capaces de acumular grandes cantidades de metales pesados, llamadas hiperacumuladoras, las cuales tienen poca biomasa, debido a que utilizan mayor cantidad de energía en los mecanismos para adaptarse a las altas concentraciones de metales, así mismo la capacidad de absorber metales, depende de la especie de la planta (Prieto et al., 2009).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. Pirólisis

Proceso de descomposición térmica, donde varios componentes se transforman en pequeñas estructuras y se volatilizan como resultado del calor aplicado. Como resultado de este proceso se obtiene tres productos principales, los cuales pueden ser reconocidos por su condición. La fase sólida denominada biochar, la fase gaseosa denominada Syngas y la fase líquida denominada bio-oil. Estos tres

productos varían significativamente según el proceso utilizado (Stauffer, 2013, como se citó en Chuquiyaui, 2021).

El proceso de pirólisis como tal, es donde se descomponen las sustancias orgánicas térmicamente, en condiciones de oxígeno limitado o con ausencia de oxígeno a temperaturas de 300 °C a 900 °C (Ciešlik et al., 2015, como se citó en Goldán et al., 2022). Durante el proceso de pirólisis, la celulosa, lignina, la grasa, almidón y la hemicelulosa entre otros componentes de la materia prima se dividen térmicamente, formando tres productos principales: biochar (biocarbón), biogás y bio-oil (Oliveira et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022), cabe resaltar que estas proporciones depende de la temperatura, el tiempo de retención y las características de la muestra (Frišták et al., 2018, como se citó en Goldán et al., 2022). Por último, el rendimiento del biochar, el bio-oil y el biogás va depender del proceso de pirólisis utilizado, como las condiciones de pirólisis (Cao et al., 2017, como se citó en Goldán et al., 2022).

De manera tradicional los métodos que se utilizaban eran la pirólisis lenta y rápida, mientras que, en los enfoques modernos, las tecnologías avanzadas como la carbonización hidrotermal (HTC), su objetivo es obtener líquido rico en compuestos orgánicos y gases, el proceso se da en medio acuoso y sometiendo a la muestra a altas presiones (10 atm a 40 atm) y temperaturas moderadas, (180 °C – 250 °C), la torrefacción, su objetivo es obtener un biochar con mayor poder calorífico que la biomasa original además de gases y líquidos volátiles en un ambiente inerte a una temperatura de 200 °C a 300 °C y una presión de 1 atm, gasificación, proceso termoquímico que se realiza a temperaturas altas (700 °C – 1000 °C), su objetivo principal es producir combustible (Syngas) convirtiendo principalmente el carbono del biochar en gases como CO, H₂ y CH₄ y la electromodificación en donde se consigue la modificación de la estructura y funcionalidad del biochar, mediante el calentamiento por microondas o plasma, acompañados con los métodos tradicionales (Hansen et al., 2023). Sin embargo, el proceso de pirólisis de los biosólidos provenientes de la PTAR, se considera un método aceptable desde perspectivas económicas y ecológicas para la reutilización beneficiosa de estos (Semblante et al., 2015, como se citó en Goldán et al., 2022). Así mismo, elimina los olores, reduce el volumen, destruye los patógenos, elimina una parte de los contaminantes presentes en los lodos y reduce la biodisponibilidad de los metales pesados (Goldán et al., 2022).

Existen dos procesos de pirólisis; la pirólisis lenta y rápida los cuales son los procesos más utilizados para producir biochar (Gul et al., como se citó en Goldán et al., 2022).

2.3.2. Biochar (biocarbón)

Desde el punto de vista de producción, el biochar es considerado un carbón vegetal estable, poroso, que se obtiene por la descomposición de la materia orgánica, en condiciones limitadas de oxígeno y a temperaturas menores a 700 °C (Lehman y Joseph, 2009, como se citó en Guerra, 2015). Por otro lado, desde el punto de vista químico, la definición del biochar es más complejo ya que pueden ser producidos por muchas fuentes de materia prima orgánica y bajo una gran variedad de condiciones del proceso de pirólisis (variación de temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo, etc) los cuales le otorgan propiedades diferentes, desde estructuras de tipo grafito hasta anillos aromáticos que pueden persistir por miles de años en el suelo (Sukiran et al., 2011, como se citó en Guerra, 2015). Bajo el punto de vista aplicativo, el biochar se define como enmienda del suelo debido a sus propiedades fisicoquímicas, biológicas e interacción con el suelo y la planta, el cual es capaz de incrementar el rendimiento en los cultivos, contribuir el reciclaje de nutrientes del suelo y capturar y fijar el carbono atmosférico en el suelo como carbono orgánico (Guerra, 2015).

El departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA) (s.f.), definen al biochar o biocarbón como un material sólido y estable, con alto contenido de carbono, que se obtiene a partir de residuos orgánicos o biomasa, que se incinera parcialmente en condiciones de oxígeno restringido. Las características del biochar dependen del tipo de materia prima utilizada (como restos de madera, tallos de maíz, estiércol, etc.) y de la temperatura a la que ocurre el proceso de combustión. Los diferentes insumos y técnicas para la elaboración de biochar provocan una gran diversidad en las propiedades químicas y físicas de los productos resultantes (USDA, s.f.).

Por otro lado, también se define el biochar o biocarbón como el sólido resultante del proceso de pirólisis de biomasa (residuos agrícolas, forestales, estiércol, residuos urbanos, biosólidos, etc.), siendo un material producido y empleado desde hace miles de años y ampliamente conocido como carbón vegetal cuando se origina de biomasa leñosa. Sus características se transforman ya que el producto se convierte en un material más carbonoso, haciéndolo más adecuado para ser utilizado como un

reemplazo en diferentes procesos técnicos. Las condiciones de la materia prima y del proceso de carbonización se seleccionan con base en las características deseadas del carbón. Aparte de sus aplicaciones técnicas en la generación de calor y energía, así como en la purificación de gas y agua y la metalurgia, el biochar también se ha utilizado como enmienda para el suelo, ayudando a mejorar su fertilidad y contribuyendo al secuestro de carbono (Weber y Quicker, 2018, como se citó en Apeña & Castelo, 2020)

Del mismo modo la organización de soluciones ambientales ClimateTrade (2023), define al biochar como un tipo de carbón que se genera al calentar materia orgánica, como desechos agrícolas, virutas de madera o residuos de cultivos, en condiciones de escaso oxígeno mediante un procedimiento denominado pirólisis. Este proceso de pirólisis se lleva a cabo a temperaturas elevadas, que suelen oscilar entre 350 °C a 700 °C, durante el cual se eliminan los compuestos volátiles, resultando en un producto estable y abundante en carbono conocido como biochar.

2.3.3. Macroelementos

Eos Data Analytics (2025), menciona que es necesario en cantidades grandes los siguientes macroelementos:

- **Nitrógeno (N).** El nitrógeno es el elemento responsable del color verde en las plantas, por lo cual los síntomas predominantes de su deficiencia se manifiestan en las hojas nuevas, que aparecen de un verde claro, y en las hojas adultas, que se tornan amarillas. Entre los síntomas adicionales que indican una falta de nitrógeno se encuentran las estrías púrpuras en los tallos, el adelgazamiento de las cosechas y el retraso en su crecimiento.
- **Fósforo (P).** El fósforo juega un papel clave en la formación de brotes, semillas y flores. Cuando hay una carencia de fósforo en las plantas, los signos incluyen tonos bronce, rojizos o violáceos en la parte interior de las hojas maduras, que pueden evolucionar hacia manchas marrones y necrosis en casos severos.
- **Potasio (K).** El potasio es vital para generar azúcares que son fundamentales en la síntesis de proteínas, el desarrollo de raíces y en la multiplicación celular, así como para aumentar la resistencia a enfermedades. La falta de

este nutriente en las plantas se manifiesta a través de amarillamiento en los bordes de las hojas, descomposición, quemaduras, arrugamiento, reducción de tamaño y necrosis en las nervaduras.

- **Azufre (S).** El azufre facilita el uso del nitrógeno y la formación de clorofila y proteínas en las plantas. La falta de azufre se observa cuando las hojas nuevas adquieren un color verde claro o amarillo oscuro; algunas especies, como la canola, pueden tornarse púrpuras y presentar enrollamiento.

Dada la similitud en los síntomas de deficiencia de nutrientes, como nitrógeno y azufre, es importante determinar si el problema se presenta principalmente en las hojas jóvenes o en las maduras.

- **Calcio (Ca).** El calcio es esencial para que las plantas generen nuevas células. Su deficiencia puede provocar quemaduras en las puntas de las hojas, deformaciones en los nuevos brotes, pudriciones en los extremos de las flores, así como la caída de flores y frutos pequeños.
- **Magnesio (Mg).** Las plantas requieren magnesio, además de otros elementos, para la producción de clorofila. Los signos de una deficiencia de magnesio se pueden identificar por los cambios en el color de los cultivos. Por ejemplo, en las plantas de tomate, esta deficiencia se evidencia por venas de color verde intenso en las hojas, áreas amarillentas que eventualmente se convierten en necrosis, y un decremento en el tamaño de las hojas inferiores, que tienden a caer.

2.3.4. Microelementos

Eos Data Analytics (2025), menciona que se requieren pequeñas cantidades como:

- **Cobre (Cu).** El cobre impulsa diversas funciones en las plantas, como la fotosíntesis. Una falta de cobre se manifiesta mediante el amarilleo y la necrosis del follaje, el marchitamiento de las hojas, la escasez de flores y el retraso en el crecimiento, entre otros síntomas. En ciertos tipos de cultivos, las hojas pueden volverse azuladas. Además, el cobre es esencial para la generación de semillas, y su escasez resultará en granos de menor tamaño.

- **Hierro (Fe).** El hierro es fundamental para la producción de enzimas y proteínas. Cuando las hojas presentan unos tonos verdes pálido, amarillentos o blanquecinos, con manchas necróticas, se indica una falta de hierro en las plantas. El blanqueamiento de las hojas superiores por falta de hierro es común en el cultivo del algodón.
- **Molibdeno (Mo).** El molibdeno se utiliza en el proceso de fijación del nitrógeno. La carencia de este nutriente en las plantas se reconoce por los bordes amarillos y el centro de las hojas maduras que se torna de un color verde pálido. Sin un tratamiento adecuado, los daños progresan hacia la necrosis.
- **Zinc (Zn).** El zinc favorece el desarrollo de las plantas, y su carencia resulta en un follaje más pequeño, clorótico, pálido o con manchas; además, se observa un crecimiento reducido y amarillamiento general.
- **Manganeso (Mn).** El manganeso desempeña un papel en la división celular, la formación de clorofila y la respiración. La falta de manganeso se evidencia a través de plantas de tamaño reducido, raíces y brotes deficientes, además de la aparición de áreas amarillentas entre las venas y manchas oscuras o necróticas.
- **Boro (B).** El boro, que se suministra comúnmente como borato, es crucial para la división celular, el manejo del agua por la planta y el transporte de azúcares. Entre las enfermedades por deficiencia de boro en las plantas, la más notable es la “escoba de la bruja”, que provoca brotes laterales inusuales en la alfalfa o la carinata. Otros indicios de falta de boro son hojas nuevas que se deforman, son diminutas y frágiles, a veces oxidadas, o un follaje maduro que adquiere un brillo intenso y un verde profundo.

2.3.5. Marco legal

Los siguientes documentos regulan el manejo, monitoreo y reaprovechamiento de los lodos:

- DS N°015-2017- Vivienda “Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”
- DS N° 011-2017.MINAN “Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo”
- RM N°128-2017-Vivienda “Aprueban Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final”
- RM N°093-2018- Vivienda “Protocolo de monitoreo de biosólidos”
- RM N°024-2017- Vivienda “Reglamento para el Reaprovechamiento de los Biosólidos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”
- RM N° 0178-2023-MIDAGRI “Reglamento de fertilizantes”
- NTP 339.089 “SUELOS. Obtención en laboratorio de muestras representativas (cuarteo)”

Además, la investigación se acoge a normas internacionales del uso de Biochar

- IBI (International Biochar Initiative)
- EBC (European Biochar Certificate)

2.3.6. Registro nacional de producción y reaprovechamiento de biosólidos (RENAPROB)

Según el DS N° 015-2017-Vivienda, es el sistema de información oficial y público que tiene por objeto registrar y mantener actualizada información general y relevante sobre los productores y comercializadores de biosólidos para fines de reaprovechamiento.

2.3.7. Dirección general de asuntos ambientales (DGAA)

Implementa acciones en el marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental para la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables de su competencia, así como promover la gestión eficiente del recurso suelo para uso agrario, de conformidad con la normativa vigente (DS N° 015-2017-Vivienda).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1.1. Tipo de investigación

Arispe et al., (2020), sostiene que una investigación aplicada tiene la finalidad de identificar el problema utilizando el conocimiento científico; después se dará una solución a esa necesidad, de forma práctica y específica. Además, desarrolla tecnologías, y su orientación se sitúa en problemas actuales. En consecuencia, los problemas que se describen son en contextos específicos por lo tanto las soluciones son limitadas al mismo.

Además, Gonzáles y Covinos (2021), refiere que una investigación aplicada se nutre del tipo puro o básico, puesto que, a través de la teoría, se ocupa de solucionar cuestiones prácticas, fundamentándose en las observaciones, hallazgos y respuestas que se propusieron en el propósito del análisis, usualmente este tipo de indagación se aplica en el campo de la medicina o las ingenierías. Los alcances o niveles que se pueden presentar en este caso son explicativos o de predicción.

La presente investigación será de tipo aplicada, porque su objetivo fundamental es abordar un problema concreto a través del uso de saberes científicos. En esta circunstancia, la transformación de biosólidos en biochar brinda respuestas a cuestiones ecológicas vinculadas con la administración de desechos y la optimización del suelo.

3.1.2. Nivel de investigación

Arispe et al. (2020), menciona que el nivel explicativo debido a su planteamiento causal, formula hipótesis explicativas, proponiendo una causa probable al problema, relacionando variables independientes sobre las variables dependientes, lo que permite ver como la variable independiente influye directamente en las dependientes y los cuales deben ser contrastadas científicamente (recoger datos, analizar estadístico, comparación de datos).

González y Covinos (2021), señalan que el nivel explicativo se distingue por la capacidad de determinar relaciones de causa y efecto entre sus variables, siendo más profundas y organizadas en comparación con los enfoques anteriores. Se identifican las variables independientes (causas) y las variables dependientes (efectos), permitiendo formular hipótesis que evidencian esta causalidad. En este contexto, la variable independiente puede ser utilizada de dos maneras: se puede observar y medir, o puede ser manipulada. Cuando se interviene en la variable independiente, esta no se evalúa; por consiguiente, se define así la operacionalización de las variables, tanto independientes como dependientes.

Por lo tanto, el nivel que presenta la investigación es explicativo, ya que se busca entender y explicar el proceso y las variables que intervienen en la obtención del biochar a partir de los biosólidos primarios de la planta de tratamiento de aguas residuales, para de esta manera ver los parámetros de causa y efecto.

3.1.3. Diseño de investigación

Privitera (2017), menciona que el diseño experimental, existe una manipulación de las variables independientes y poder ver su efecto en la variable dependiente, por lo que presentan las siguientes características como: Manipulación de una o más variables, se puede medir la variable independiente, existe un control en el desarrollo de la investigación y tiene validez, como se citó en Arispe et al. (2020).

Por lo tanto, el diseño que presenta esta investigación es experimental de enfoque cuantitativo, debido a que se mide el efecto de variables independientes: temperatura (°C) y el tiempo de residencia (horas) del proceso de pirólisis sobre las variables dependientes (Características fisicoquímicas, contenido de nutrientes, concentración de metales pesados y microorganismos patógenos). Se estableció un enfoque

cuantitativo de esta investigación, debido a que la finalidad de este trabajo es obtener biochar de calidad (datos cuantificables) que cumplan con estándares nacionales e internacionales que lo hacen aprovechables en el sector agrícola; y los cuales se pueden obtener a partir de los biosólidos del tratamiento primario de la planta de aguas residuales “La Totorá”.

Se utilizó el proceso de pirólisis lenta. Para comprobar la normalidad de los resultados se utilizó la prueba de Shapiro Wilk. Después se evaluó la significancia entre variables, utilizando la correlación de Pearson. En base a ello se empleó el Diseño Experimental (DOE) el cual sirvió para relacionar los factores (variables independientes) y las respuestas (variables dependientes) en 06 combinaciones como se muestra en la tabla 15; así mismo para encontrar las condiciones óptimas del proceso de obtención de biochar se utilizó el Modelo de Superficie de Respuesta (RSM), puesto que nos ayudó a ajustar modelos (lineales, cuadráticos completos y lineales más sus interacciones) los cuales permiten maximizar en caso de las propiedades fisicoquímicas o minimizar en caso de las concentración de metales.

Tabla 15

Diseño de experimentos (DOE) sin réplica

Corridas	Tratamiento del biosólido	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
1	TP300-01	300	1
2	TP300-04	300	4
3	TP400-01	400	1
4	TP400-04	400	4
5	TP450-01	450	1
6	TP500-01	500	1

3.2. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

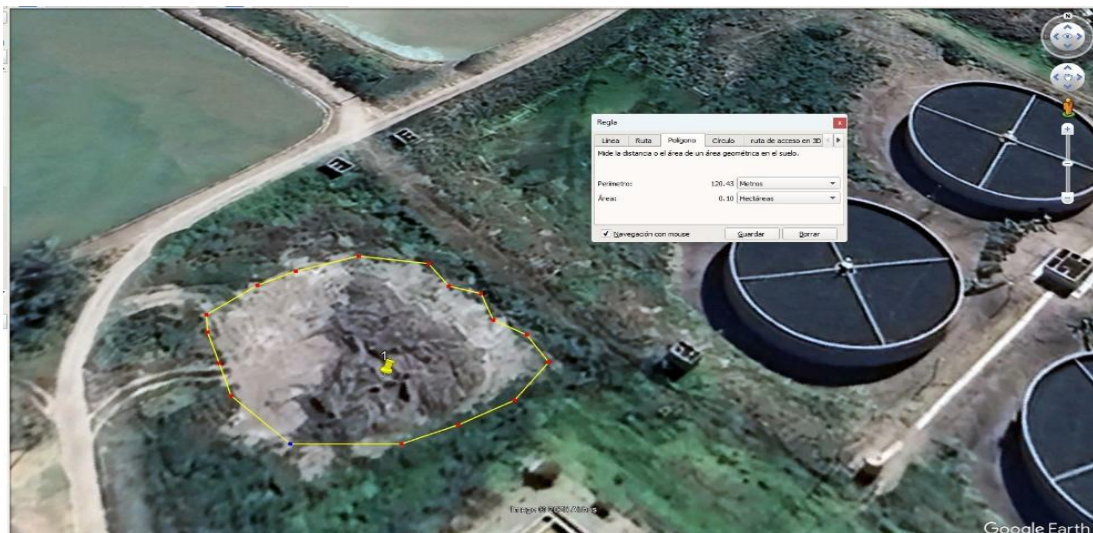
3.2.1. Población

La población en este trabajo de investigación son los biosólidos primarios generados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) “La Totorá”, en la localidad con el mismo nombre, en el distrito de Jesús Nazareno, Provincia de Huamanga,

departamento de Ayacucho. Estos biosólidos se consideraron tomar de las zonas de acumulación es decir de la primera zona de almacenamiento, donde se realiza su deshidratación solar por 4 meses aproximadamente y después es caracterizada para ser vendida por la empresa SEDA AYACUCHO; a S/ 15,00 soles el metro cúbico (m^3); para plantaciones de tallo alto. En la figura 4 se aprecia la ubicación de la población (biosólidos) los cuales se encuentran cerca de los tanques Imhoff y filtros percoladores.

Figura 4

Área aproximada de la zona de almacenamiento del tratamiento primario de la PTAR “La Tatora”



Nota. Localización de la zona de almacenamiento para el Tratamiento Primario, en la PTAR “La Tatora”, donde la producción mensual es de aproximadamente 270 kg en base seca. Adaptado de Google Eart.

3.2.2. Muestra

Para el proceso de pirólisis a diferentes temperaturas (300 °C, 400 °C, 450 °C y 500 °C) y tiempos de residencia (1 a 4 horas), se tomaron 500 gramos de muestra para cada tratamiento.

3.2.3. Muestreo

Debido a la delimitación de la zona de estudio, el cual es la zona de almacenamiento de los biosólidos primarios de la PTAR “La Tatora”, se tomó en consideración a la

RM N° 093-2018-Vivienda, en donde sugiere que se obtenga una muestra compuesta de varias muestras puntuales las cuales son tomadas al azar respecto a la ubicación en el cuerpo total del biosólido acumulado; en base en ello se identificaron múltiples puntos de muestreo y los cuales se seleccionaron al azar (la técnica de muestreo aleatorio simple), debido a la accesibilidad del área, asegurando que cada punto tenga la misma probabilidad de ser escogido, obteniendo así una muestra representativa.

3.2.4. Variables e indicadores

3.2.4.1. Variable independiente (x)

X_1 = Parámetros de operación del proceso de pirólisis

Indicadores

- Temperatura de pirólisis (°C)
- Tiempo de residencia (h)

3.2.4.2. Variable dependiente (y)

Y_1 = Calidad del biochar

Indicadores

- Características fisicoquímicas del biochar
- Concentración de nutrientes (% y mg/kg)
- Concentración de metales pesados (mg/kg)
- Concentración de microorganismo patógenos (NPM/g ST)

3.2.5. Operacionalización de variables

En la tabla 16 se identifica y describe las variables independientes y dependientes, en función de los objetivos planteados. La temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia, son los parámetros de operación que, al ser manipuladas se evaluó el impacto en la calidad del biochar obtenido a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totorá”.

Tabla 16

Operacionalización de las variables independientes y dependientes

Variables	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad
(x) Independiente	Se definen como las condiciones fijas al cual se lleva el proceso, los cuales influyen en el producto generado, además se puede decir que son esenciales para la gestión y optimización de cualquier proceso.	Son parámetros son medibles, en el caso de la temperatura se midió en grados Celsius, el cual fue registrado por el termopar del horno-mufla eléctrico. Para el tiempo de residencia, se midió en horas (h), utilizando un cronómetro del teléfono móvil (Honor Magic-5 lite) calibrado con el UTC (Tiempo Universal Coordinado).	Nivel de temperatura (300 °C, 350 °C, 400 °C y 500 °C)	Temperatura de pirólisis	Grados Celsius (°C)
			Tiempo de residencia (1 hora y 4 horas)	Tiempo de retención de pirólisis	horas (h)
	Se entiende como los componentes que van determinar la calidad del biochar, en donde se considerará las	Las propiedades fisicoquímicas del biochar se evaluaron a través de mediciones específicas, en un laboratorio certificado. Las propiedades que se incluyó fueron: %humedad donde se utilizó el horno, el tamaño de	Propiedades fisicoquímicas	Humedad Tamaño de partícula Conductividad eléctrica Materia orgánica CO _T pH	% mm dS/m % % pH

Dependiente (y)	propiedades fisicoquímicas, contenido de nutrientes, concentración de metales tóxicos y concentración de microorganismos patógenos.	partícula con el uso de tamiz vibratorio, conductividad eléctrica con un potenciómetro, la materia orgánica y el carbono orgánico total (%COT) con utilizó el horno y para el pH se usó el pH-metro digital. El contenido de nutrientes fue cuantificado mediante análisis químicos estandarizados del laboratorio, los cuales incluyeron: N con Kjeldahl, fósforo con un equipo colorimétrico, K, Ca, Co, Mg y Mo con Método 3050B-EPA y finalmente Fe, Cu, Zn y Mn con lectura MP-AES.		
			Concentración de nutrientes	N % P (P ₂ O ₅) % K (K ₂ O) % Ca % Mg mg/kg ST Fe mg/kg ST Mn mg/kg ST Cu mg/kg ST Co mg/kg ST Zn mg/kg ST Mo mg/kg ST
		La concentración de los metales tóxicos como Al, As, Cd, Pb, Cr, Ni, Ba y Sr, por el laboratorio acreditado se evaluaron con el Método 3050 que	Concentración de metales (tóxicos)	Al mg/kg ST As mg/kg ST Cd mg/kg ST Pb mg/kg ST

incluye la normativa de la EPA (Agencia de protección ambiental) en estudios de contaminación ambiental, monitoreo en suelos, agua, etc.		Cr	mg/kg ST
		Ni	mg/kg ST
		Ba	mg/kg ST
		Sr	mg/kg ST
Para el análisis microorganismos patógenos, se utilizaron método específico por el mismo laboratorio microbiológico.	Concentración de microorganismos patógenos	Coliformes termotolerantes	NMP/g ST
		Coliformes totales	NMP/g ST
		Escherichia Coli	UFC/g ST
		Huevos Helmintos	HH/4g ST
		Salmonella spp.	NPM/g ST
<i>%COT: Carbono orgánico total</i>			

3.2.6. Materiales, instrumentos y equipos usados en la investigación

A continuación, se presenta de forma breve los materiales y equipos que se utilizaron para la toma de muestra de los biosólidos y la producción de biochar en la presente investigación.

3.2.6.1. Para la toma de muestra de los biosólidos

- 01 Botín de seguridad
- 02 Guantes de jebe antideslizantes
- 02 Mascarillas
- 01 Mameluco
- 01 Cooler
- 01 Pala
- 02 Baldes de 20 L
- 02 Bolsas
- 04 Paquetes de hielo

3.2.6.2. Para la producción de biochar

- 01 Martillo de goma
- 02 Espátula
- 01 Libreta de apuntes
- 01 Recipiente de acero inoxidable de 12 cm x 12 cm
- 06 Recipientes de polietileno

3.2.6.3. Equipo e instrumentos

- 01 Balanza digital
- 01 Laptop HP 240 CORE i3
- 01 Horno-mufla eléctrica
- 01 Cámara (Honor Magic 5 life)
- 01 Medidor digital de pH, % H y T (°C)

3.2.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica que se utilizó para la presente investigación fue experimental y de observación, primero porque el diseño de la investigación es experimental y porque se tuvo la capacidad de manipular las variables independientes en los diferentes tratamientos para obtener un biochar de calidad, segundo porque se evaluaron los resultados obtenidos de los laboratorios acreditados, tal como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17

Técnicas e instrumentos para la recolección de información

Etapa	Técnicas	Instrumentos
Muestreo de los biosólidos del tratamiento primario de la PTAR “La Totorá”	Experimental (RM N° 093-2018-Vivienda)	Registro y recolección de datos en campo (Zona de almacenamiento N° 1).
Obtención del biochar a partir de los biosólidos de la PTAR “La Totorá”	Experimental	Horno-Mufla eléctrico, balanza analítica, recipiente cerrado de acero inoxidable, cronómetro, guantes, espátula, libreta de apuntes y recipientes de polietileno.
Análisis del biosólido del tratamiento primario	Observación	Informe de los ensayos de características físicas, químicas, concentración de metales pesados y concentración de microorganismos patógenos.
Análisis de la calidad del biochar	Observación	Informe de los ensayos de las propiedades fisicoquímicas, contenido de nutrientes (macronutrientes y micronutrientes), concentración de metales (tóxicos) y concentración de microorganismos patógenos.

Del mismo modo, la tabla 18 resume los métodos de análisis de los laboratorios en donde se realizaron los análisis de la materia prima y del producto (biochar a diferentes tratamientos).

Tabla 18

Técnicas e instrumentos para la recolección de la información (propiedades fisicoquímicas, nutrientes y metales tóxicos)

Indicadores	Unidades	Método
Tamaño de partícula	Mm	NTP 339.128 (2019)
CE	dS/m	ISO 11265:1994
pH	pH	EPA Method 9045
Humedad	%	Gravimétrico
Materia orgánica	%	Calcinación a 550 °C
C/N	%	Relación
CO _T	%	Calcinación
N	%	Método Kjeldahl
P (P ₂ O ₅)	%	Método colorimétrico
K (K ₂ O)	%	Digestión ácida y lectura por Absorción atómica
Cu, Fe, Mg, Zn, Mn	%	Digestión ácida y lectura por MP-AES
Al, Ba, Cd, Ca, Co, Cr, Sr, Ni, Pb, As, Mo	%	Método 3050B de la EPA

Para el análisis microbiológico, el laboratorio DCB-LAB Yaku utilizó métodos específicos para determinar los Coliformes termotolerantes y totales, E. Coli, Huevos Helmintos y Salmonella spp., como se aprecia en la tabla 19.

Tabla 19

Técnicas e instrumentos para la recolección de la información (Análisis microbiológico)

Indicadores	Unidades	Método
Coliformes termotolerantes	NMP/g ST	APHA-AWWA-WEF-9221E
Coliformes totales	NMP/g ST	APHA-AWWA-WEF-9221B
Escherichia coli	UFC/g ST	APHA9222
Huevos Helminfos	H.H/ 4g ST	OPS-CIPES
Salmonella spp.	NMP/g ST	NOM-004-SEMARNAT-2002

3.2.8. Análisis y procesamiento de datos

Los datos fueron recolectados de manera metódica para asegurar que los resultados fueran robustos y válidos. Este proceso se inició con las muestras de biochar obtenidas en el laboratorio a raíz del proceso de pirólisis, y se clasificaron según las variables independientes (tiempo de retención y temperatura) y después fueron llevadas para los análisis correspondientes (características fisicoquímicas, concentración de nutrientes, niveles de metales tóxicos y patogenicidad microbiológica). La recolección de los datos se realizó utilizando hojas de cálculo, en las cuales cada conjunto de información fue dispuesto de acuerdo con la fecha y el tipo de análisis realizado.

Posteriormente, se llevó a cabo el test de normalidad de Shapiro-Wilk (Tabla 41) para confirmar que la distribución de las variables dependientes fuera normal. Al cumplir con los criterios de esta prueba, los datos se consideraron aptos para el uso de análisis estadísticos paramétricos, por lo que los datos fueron estructurados y codificados para su análisis estadístico correlacional de Pearson (Tabla 42), para evaluar la relación de las variables continuas (variable dependiente-cuantitativas). Después se aplicó el modelo de superficie de respuesta (RSM) (Tabla 43), que busca evaluar el impacto de las variables independientes (factores), sobre múltiples respuestas de manera simultánea, además se generó gráficas tridimensionales, finalmente el RSM, nos permitió encontrar el punto óptimo para maximizar y minimizar las respuestas para obtener un biochar de buena calidad. Esta evaluación facilitó la investigación de las interacciones entre las variables independientes y las

propiedades fisicoquímicas, concentración de nutrientes, niveles de metales tóxicos y concentración de microorganismos patógenos. La evaluación de la información se llevó a cabo mediante herramientas estadísticas especializadas como Minitab, que produjo gráficos y tablas para facilitar la comprensión de los resultados y determinar las condiciones más apropiadas para la generación de biochar.

Por consiguiente, los resultados de los biosólidos fueron comparados con los parámetros del Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (DS N° 015-2017-Vivienda), con la finalidad de verificar si los biosólidos almacenados en la PTAR “La Totora” cumplían con el reglamento, de lo contrario abre paso a la aplicación de un tratamiento adecuado que mejora su gestión como es la aplicación del proceso de pirólisis lenta para la producción del biochar.

Finalmente para evaluar la calidad del biochar (Tabla 40), se comparó las características fisicoquímicas, concentración de nutrientes, concentración de metales tóxicos del biochar producido a diferentes temperaturas con el Reglamento de fertilizantes y sustancias afines (RM N° 0178-2023-MIDAGRI), Normas IBI y el Certificado Europeo de Biochar (EBC); no obstante para la evaluación microbiológica se tomó como referencia el DS N°015-2017-Vivienda, además para su aplicabilidad en suelos se evaluaron las propiedades del biochar con los Lineamientos del ECA para Suelo (DS N° 011-2017-MINAM-2017).

3.2.9. Método de obtención

3.2.9.1. Ubicación y descripción del área

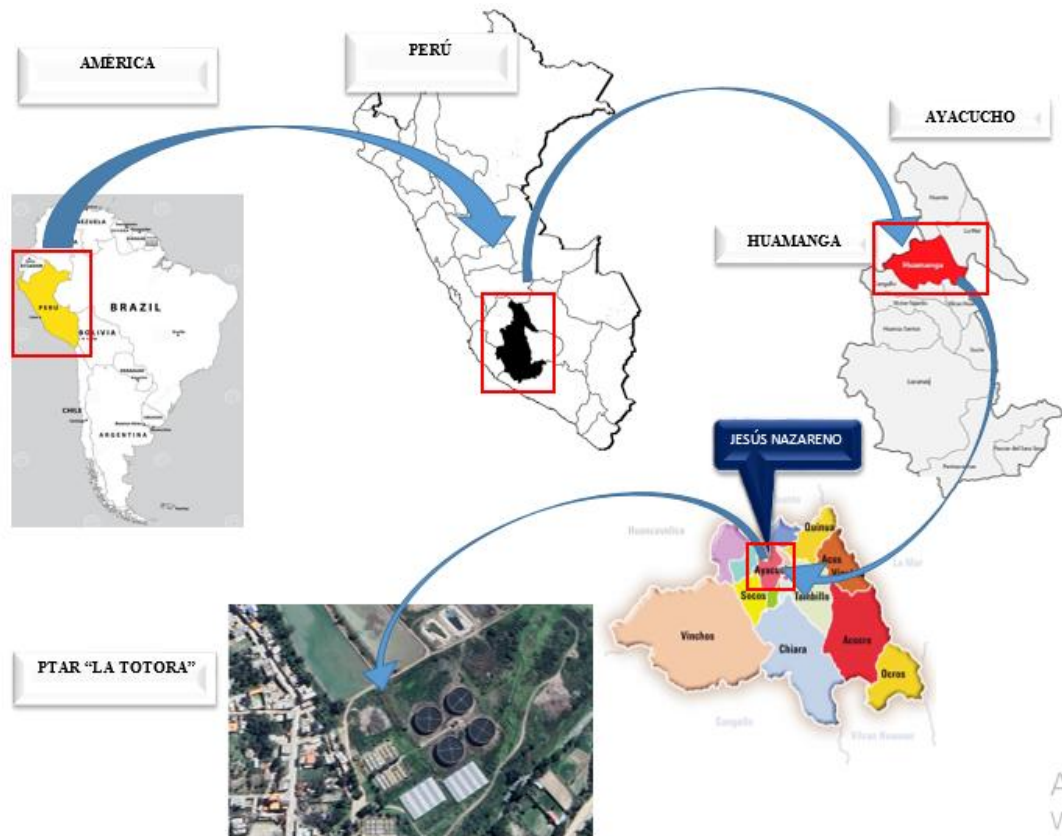
La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se ubica en la localidad de Totorá, en el distrito de Jesús Nazareno en la provincia de Huamanga en el departamento de Ayacucho, como se muestra en la figura 5. Planimétricamente la planta “La Totorá” se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas: Oeste 585,4E - 8,547.2N, Sur: 585.8E - 8,546.6 N, Este: 586.0E - 8,547.0N y Norte: 585.7E - 8,547.5N. Topográficamente el área se encuentra de 2,606 msnm a 2,617 msnm como lo afirma en su manual SEDA AYACUCHO (2015).

El área de la recopilación de las muestras fue la zona de almacenamiento en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”. La zona de almacenamiento N° 1 se

realiza la deshidratación con radiación solar de los lodos provenientes de los tanques Imhoff (tratamiento primario).

Figura 5

Ubicación geográfica de la PTAR “La Totora”



3.2.9.2. Recolección de biosólidos de la PTAR “La Totora”

La presente investigación se alineó al DS N°015-2017-Vivienda que aprueba el reglamento del reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, así mismo bajo el Protocolo de monitoreo de biosólidos (RM-N°093-2018-Vivienda), el cual sirvió para recolectar las biosólidos provenientes del tratamiento primario.

Se registraron de manera insitu el pH, % H y T (°C), tal como se describe en la tabla 20, y los puntos de muestreo se muestran en el anexo 4.

Tabla 20*Registro insitu de pH, % H y T (°C)*

N° de muestra puntual	pH	%H	T (°C)
1	5,7	67,0	23,0
2	6,6	68,0	24,0
3	7,1	73,0	24,0
4	5,5	81,0	31,0
5	8,0	37,0	35,0
6	7,2	34,0	28,0
7	6,2	48,0	24,0
8	7,0	11,0	24,0
9	8,6	33,0	26,0
10	6,3	82,0	34,0
11	6,3	82,0	38,0
12	6,5	78,0	33,0
13	5,8	79,0	35,0
14	6,7	74,0	32,0
15	7,2	72,0	29,0
16	6,5	73,0	27,0
17	6,7	77,0	28,0
18	6,5	72,0	28,0
19	6,5	77,0	30,0
20	6,4	63,0	30,0
21	6,9	82,0	28,0
22	6,9	84,0	27,0
23	6,9	74,0	25,0
24	6,6	78,0	24,0
25	5,8	87,0	25,0
26	5,8	80,0	29,0
27	7,5	89,0	29,0
28	6,8	88,0	29,0
29	5,1	82,0	28,0
30	7,5	20,0	29,0
31	8,3	51,0	27,0
32	7,4	46,0	27,0
33	7,5	60,0	30,0
34	7,9	25,0	34,0
35	6,8	88,0	33,0
36	6,3	87,0	33,0

3.2.9.3. Lugar de estudio y periodo de desarrollo

Los ensayos del proceso de pirólisis se realizaron en el laboratorio de Transferencia de Masa “Vidal Fernández Sulca” de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

La presente investigación se realizó desde abril del 2024 a enero del 2025.

3.2.9.4. Caracterización de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la PTAR “La Titora”

Se homogenizaron completamente la muestra compuesta siguiendo la NTP 339.089 (Obtención en laboratorio de muestras representativas (cuarteo)), para obtener 02 muestras representativas de 1 kg.

Debido a que los biosólidos contenían altas carga de microorganismos patógenos, se optó por realizar la caracterización en laboratorios especializados como el INIA y DCP-LAB Yaku.

3.2.9.5. Preparación de la materia prima (biosólidos)

Se realizó un previo tratamiento a la materia prima, ya que la calidad del biochar depende de manera significativa de las condiciones del mismo. En base a ello, se realizó un proceso de secado al aire libre por radiación solar, seguido de un proceso de triturado de los pequeños biosólidos compactos y finalmente una etapa de separación de materias no orgánicas, que consiste en retirar las vidrios, piedras y gravas que no aportan en la calidad del biochar. El proceso experimental se detalla en el anexo 5.

3.2.9.6. Obtención de biochar por pirólisis

En base al proceso de pirólisis aplicada (pirólisis lenta) se estableció un rango de temperaturas y tiempos de retención. La temperatura y el tiempo de residencia son factores importantes que determina significativamente las características físicas y químicas del biochar a base de los biosólidos. Por lo que de acuerdo a los resultados favorables que se muestran al aplicar el proceso de pirólisis lenta en estudios de Yuan et al. (2015), Raj et al. (2021), Goldan et al (2022), Khalifa et al. (2022) y Cao et al. (2024), se ha optado por aplicar 6 tratamientos como se describe en la tabla 15.

Para la producción del biochar se utilizó un reactor de acero inoxidable colocado en el Horno-Mufla eléctrico (46 cm de largo x 35 cm ancho x 35 cm de alto) del laboratorio de Transferencia de masa de la FIQM-UNSCH, el cual está equipado con un controlador de temperatura, con un rango de temperatura a 1200 °C y una precisión de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Se utilizaron 500 ± 5 g de la muestra de biosólido en cada ensayo experimental en el proceso de pirólisis lenta; los cuales se estudiaron a diferentes temperaturas (300 °C, 400 °C, 450 °C y 500 °C) y tiempos de residencia de 1 hora y 4 horas. El procedimiento experimental se describe en el anexo 6, así como también el diagrama de bloques se puede observar en el anexo 1, el diagrama de bloques cuantitativo en el anexo 2, diagrama de flujo en el anexo 3 y el panel fotográfico se muestra en el anexo 13.

3.2.10. Determinación de la calidad del biochar obtenido a partir de los biosólidos provenientes del tratamiento primario

El biochar obtenido a partir de los biosólidos de la PTAR “La Totorá”, se determinó su calidad en función de sus propiedades fisicoquímicas, concentración de nutrientes, concentración de metales pesados y concentración de microorganismos patógenos.

Los análisis (propiedades fisicoquímicas, concentración de nutrientes, concentración de metales pesados, análisis microbiológico y análisis granulométrico) se llevaron a cabo en diferentes laboratorios como: el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), al cual se realizó una visita tal como se muestra en el anexo 14, DCP-LAB Yaku donde se puede observar el panel fotográfico en el anexo 15 y en laboratorio del GRUPO KYS INGENIERO SA, donde se puede observar el panel fotográfico en el anexo 13. Por lo que se realizó un submuestreo para obtener 03 muestras representativas de 150 g, para el análisis fisicoquímico, microbiológico y granulométrico respectivamente. Para garantizar que todos los análisis (microbiológicos y fisicoquímicos) se ejecutaran en condiciones ideales y sin perturbaciones, la totalidad de biochar fue segmentada utilizando el método de cuarteo. Este método asegura que cada una de las partes refleje de manera precisa la muestra original. Dicho esto, se realizó la preparación de la muestra para el análisis de las propiedades fisicoquímicas (muestra triturada), microbiológica (almacenamiento a temperaturas de 4°C) y para el análisis granulométrico solo se utilizó el cuarteo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Características del biosólidos proveniente del tratamiento primario de la PTAR “La Totora” de Ayacucho

A continuación, se muestra la tabla 21, en donde se visualiza las características fisicoquímicas de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora” de Ayacucho, los cuales fueron reportados por el INIA en octubre del 2024 (Anexo 16), excepto de la densidad aparente, ya que se realizó el ensayo en el laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, el cual se detalla en el anexo 7.

Tabla 21

Característica fisicoquímica de los biosólidos primarios

Parámetros	Biosólidos primarios
pH	5,80
% Humedad	66,7
Densidad aparente (g/cm ³)	1,63
Conductividad eléctrica (dS/m)	6,10
Nitrógeno total (%)	1,63
Fósforo, P ₂ O ₅ (%)	1,87
Potasio, K ₂ O (%)	0,99
Sólidos totales (%)	97,41
Materia orgánica (%)	23,70

La tabla 22 se presenta la concentración de metales tóxicos presentes en los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora” de Ayacucho, reportados por el INIA en octubre del 2024 (Anexo 16).

Tabla 22

Concentración de metales pesados en los biosólidos primarios

Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)						
As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
13,00	7,75	8,75	10,5	2,25	0,00	44

La tabla 23, se presenta los resultados de la concentración de microorganismos patógenos, presentes en los biosólidos primarios de la PTAR “La Totora” de Ayacucho, reportados por el laboratorio DCP-LAB Yaku, en septiembre del 2024 (Anexo 18).

Tabla 23

Concentración de microorganismos patógenos en los biosólidos primarios

Parámetros de higienización			
Coliformes totales (NMP/g ST)	Escherichia Coli (UFC/g ST)	Coliformes termotolerantes (NMP/g ST)	H.H./4 g ST
6,21x10 ¹⁰	2,78x10 ⁹	4,61x10 ⁹	19 ^a

a: Conteo de huevo sin determinación de viabilidad

4.1.2. Calidad del biochar

4.1.2.1. Proceso de pirólisis en cada tratamiento

Como se había descrito anteriormente, se realizaron 06 tratamientos, en los cuales se registraron la temperatura y el tiempo de residencia den el horno horno-mufla eléctrico.

Como se observa en las tablas 24, 25, 26, 27, 28 y 29, el tiempo que demora el equipo en llegar a la temperatura programada aumenta sucesivamente en cada tratamiento; por lo que una vez que se llegue a la temperatura deseada se el horno-mufla eléctrico, se controló el tiempo de residencia de 1 hora y 4 horas. Así mismo ya que se controló el tiempo y la temperatura simultáneamente, se pudo calcular la el incremento de velocidad de temperatura ($^{\circ}\text{C/s}$), el cual varía de 0,2 a 0,4 $^{\circ}\text{C/s}$ siendo este rango aceptable que asegura la aplicación del proceso de pirólisis lenta.

Tabla 24

Ensayo experimental del tratamiento TP300-01

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de calentamiento (min)	Incremento de velocidad de temperatura ($^{\circ}\text{C/min}$)	Incremento de velocidad de temperatura ($^{\circ}\text{C/s}$)
0	0	0	0,00
40	1	40	0,67
80	2	40	0,67
103	3	23	0,38
132	4	29	0,48
165	5	33	0,55
179	6	14	0,23
201	7	22	0,37
222	8	21	0,35
243	9	21	0,35
261	10	18	0,30
278	11	17	0,28
294	12	16	0,27
300	13	6	0,10

Nota. El inicio del control de tiempo de residencia de 1 hora será cuando llegue a la temperatura programa de 300 $^{\circ}\text{C}$.

Tabla 25*Ensayo experimental del tratamiento TP300-04*

Temperatura (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/s)
0	0	0	0,00
45	1	45	0,75
71	2	26	0,43
96	3	25	0,42
122	4	26	0,43
147	5	25	0,42
170	6	23	0,38
194	7	24	0,40
212	8	18	0,30
232	9	20	0,33
249	10	17	0,28
265	11	16	0,27
280	12	15	0,25
297	13	17	0,28
300	14	3	0,05

Nota. El inicio del control de tiempo de residencia de 4 horas, será cuando llegue a la temperatura programa de 300 °C.

Tabla 26*Ensayo experimental del tratamiento TP400-01*

Temperatura (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/s)
0	0	0	0,00
80	1	80	1,33
156	2	76	1,27
173	3	17	0,28
197	4	24	0,40
218	5	21	0,35
235	6	17	0,28
255	7	20	0,33
275	8	20	0,33
296	9	21	0,35
316	10	20	0,33
333	11	17	0,28
345	12	12	0,20
363	13	18	0,30
372	14	9	0,15
390	15	18	0,30
400	16	10	0,17

Nota. El inicio del control de tiempo de residencia de 1 hora será cuando llegue a la temperatura programa de 400 °C.

Tabla 27*Ensayo experimental del tratamiento TP400-04*

Temperatura (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/s)
0	0	0	0,00
33	1	33	0,55
54	2	21	0,35
79	3	25	0,42
103	4	24	0,40
131	5	28	0,47
157	6	26	0,43
180	7	23	0,38
204	8	24	0,40
224	9	20	0,33
243	10	19	0,32
258	11	15	0,25
270	12	12	0,20
285	13	15	0,25
301	14	16	0,27
320	15	19	0,32
336	16	16	0,27
361	17	25	0,42
374	18	13	0,22
387	19	13	0,22
400	20	13	0,22

Nota. El inicio del control de tiempo de residencia de 4 horas será cuando llegue a la temperatura programa de 400 °C.

Tabla 28*Ensayo experimental del tratamiento TP450-01*

Temperatura (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/s)
0	0	0	0,00
39	1	39	0,65
80	2	41	0,68
155	3	75	1,25
177	4	22	0,37
198	5	21	0,35
220	6	22	0,37
242	7	22	0,37
259	8	17	0,28
277	9	18	0,30
294	10	17	0,28
313	11	19	0,32
332	12	19	0,32
351	13	19	0,32
357	14	6	0,10
362	15	5	0,08
381	16	19	0,32
407	17	26	0,43
412	18	5	0,08
418	19	6	0,10
431	20	13	0,22
444	21	13	0,22
450	22	6	0,10

Nota. El inicio del control de tiempo de residencia de 1 hora será cuando llegue a la temperatura programa de 450 °C.

Tabla 29*Ensayo experimental del tratamiento TP500-01*

Temperatura (°C)	Tiempo de calentamiento (min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/min)	Incremento de velocidad de temperatura (°C/s)
0	0	0	0,00
57	1	57	0,95
77	2	20	0,33
103	3	26	0,43
128	4	25	0,42
150	5	22	0,37
175	6	25	0,42
200	7	25	0,42
218	8	18	0,30
237	9	19	0,32
255	10	18	0,30
273	11	18	0,30
289	12	16	0,27
305	13	16	0,27
320	14	15	0,25
335	15	15	0,25
350	16	15	0,25
372	17	22	0,37
389	18	17	0,28
405	19	16	0,27
420	20	15	0,25
431	21	11	0,18
442	22	11	0,18
453	23	11	0,18
466	24	13	0,22
473	25	7	0,12
480	26	7	0,12
489	27	9	0,15
498	28	9	0,15
500	29	2	0,03

Nota. El inicio del control de tiempo de residencia de 1 hora será cuando llegue a la temperatura pro grama de 500 °C.

Así mismo las figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11, se presenta de forma general la etapa de descomposición del biosólido, en los cuales en el proceso experimental se percibieron pérdidas de materiales volátiles y materia orgánica debido a los olores que se percibían en el laboratorio a partir de los 400 °C, por lo que de acuerdo a revisiones bibliográficas se puede deber a las diferentes etapas que suceden en la formación de biochar y el cual lo explico en los siguientes párrafos.

Mendoza et al. (2016), describe modelos de cinética de reacción para la pirólisis de biomasa (biosólidos), en donde estudia la velocidad y el mecanismo por el cual una especie química se transforma en otra. Dentro de estos modelos describe a los modelos globales de reacción simple, modelos de reacciones múltiples y modelos semiglobales.

En los modelos globales de reacción simple, en donde según Ji et al. (2010), se determinó que el rango de temperatura de 800 °C, es en el que ocurre la mayor descomposición y en una sola etapa, sin embargo, este modelo solo describe de forma parcial la descomposición del biosólido, es decir menos del 60 % de la masa despuesta del biosólido, como se citó en Mendoza (2016).

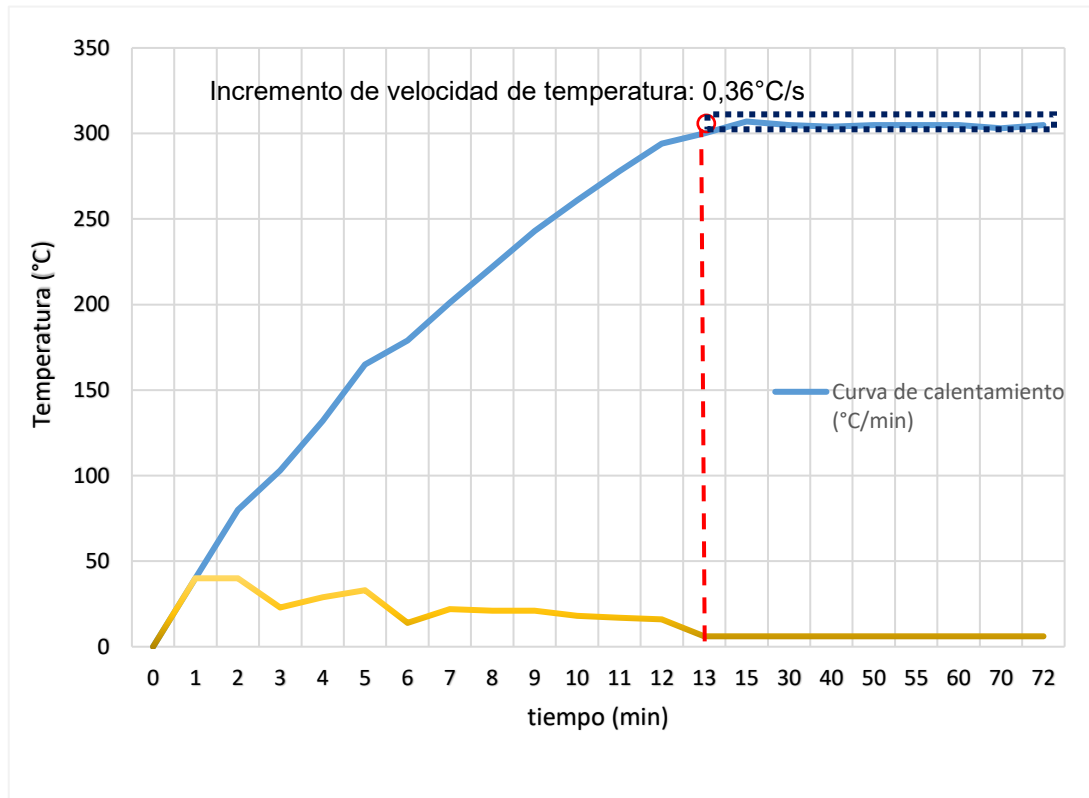
Dentro de los modelos de reacciones múltiples, según Shao et al. (2008) existen cinco etapas de descomposición del biosólido; donde la primera etapa es cuando el material se encuentra a una temperatura menor a 200 °C y sucede las reacciones de deshidratación, para la formación de gases livianos como CO₂ y CH₄; la segunda etapa donde el biosólido se encuentra entre 200 °C a 350 °C, y ocurre la mayor parte de la descomposición y se asocia a las reacciones de despolimerización es decir se observará el 70 % de variación total de la masa, disminuyendo significativamente el agua y carbono orgánico total, pero con un incremento de CO₂ y CH₄ en el biochar; la tercera etapa de 350 °C a 550 °C comprende una segunda descomposición en donde el agua y la materia orgánica sigue disminuyendo, mientras aumenta el contenido H₂, CO y CO₂, la cuarta etapa de 550 °C a 900 °C, donde continúa el incremento del H₂ y CO₂ con la disminución de otras componentes por las reacciones homogéneas en la fase volátil, como se citó en Mendoza (2016).

Por último, Font et al. (2009), plantea un modelo cinético de tres reacciones asociadas a tres zonas de descomposición, en donde la primera fracción sucede la descomposición de la hemicelulosa presente en los biosólidos, la segunda zona de

descomposición a la fracción de bacterias muertas y compuestos celulósicos, por último, la tercera fracción en donde se descompone a la descomposición de los compuestos biodegradables que se degradan a temperaturas mayores a 400 °C

Figura 6

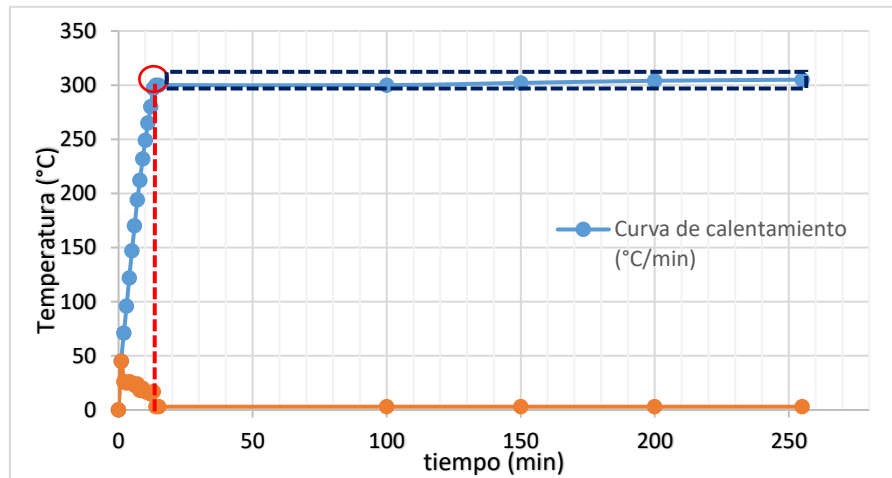
Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP300-01)



Nota. En la figura 6 se observa la curva de calentamiento, en donde se marca una línea vertical roja entrecortada en el tiempo de 13 minutos ya que es el tiempo que le tomó al horno-mufla en llegar a los 300 °C y desde el cual se inició el control del tiempo de residencia. Las líneas azules entrecortadas, representan el tiempo de residencia de 1 hora. Para este tratamiento el tiempo total fue de 1 hora y 12 minutos, con un incremento de velocidad de temperatura de 0,36 °C/s.

Figura 7

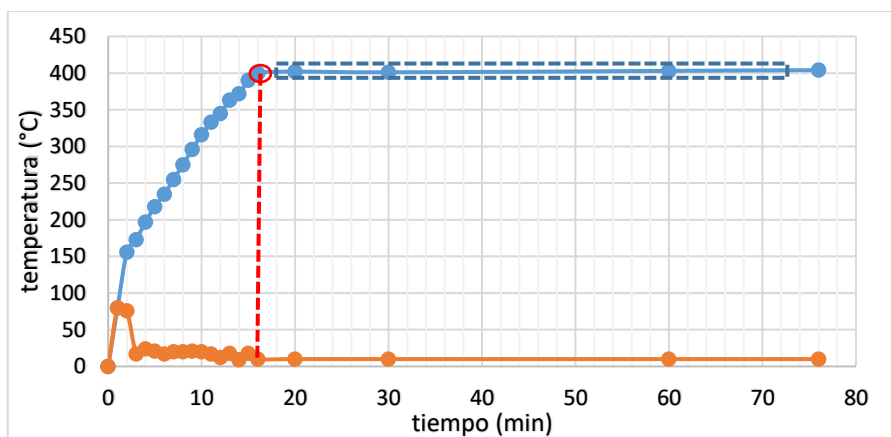
Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP300-04)



Nota. En la figura 7 se observa la curva de calentamiento, en donde se marca una línea vertical roja entrecortada en el tiempo de 15 minutos ya que es el tiempo que le tomó al horno-mufla en llegar a los 300 °C y desde el cual se inició el control del tiempo de residencia. Las líneas azules entrecortadas, representan el tiempo de residencia de 4 horas. Para este tratamiento el tiempo total fue de 4 horas y 15 minutos, con un incremento de velocidad de temperatura de 0,33 °C/s.

Figura 8

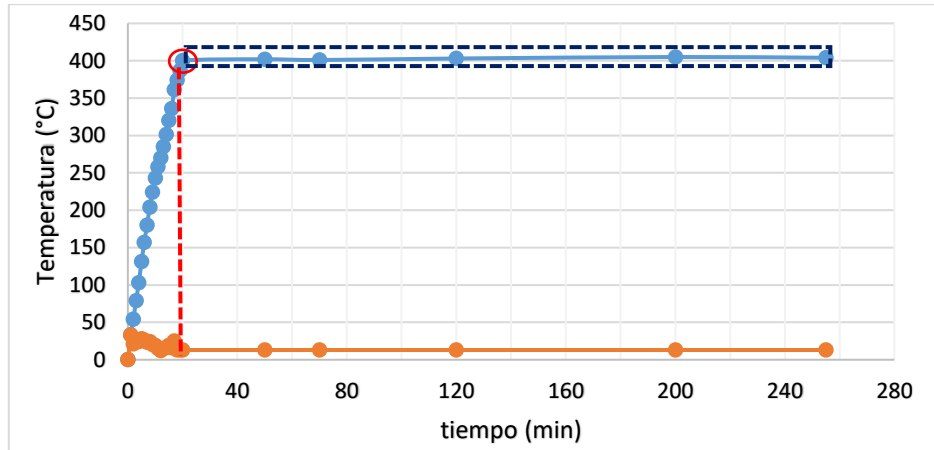
Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP400-01)



Nota. En la figura 8 se observa la curva de calentamiento, en donde se marca una línea vertical roja entrecortada en el tiempo de 16 minutos ya que es el tiempo que le tomó al horno-mufla en llegar a los 400 °C y desde el cual se inició el control del tiempo de residencia. Las líneas azules entrecortadas, representan el tiempo de residencia de 1 hora. Para este tratamiento el tiempo total fue de 1 hora y 16 minutos, con un incremento de velocidad de temperatura de 0,39 °C/s.

Figura 9

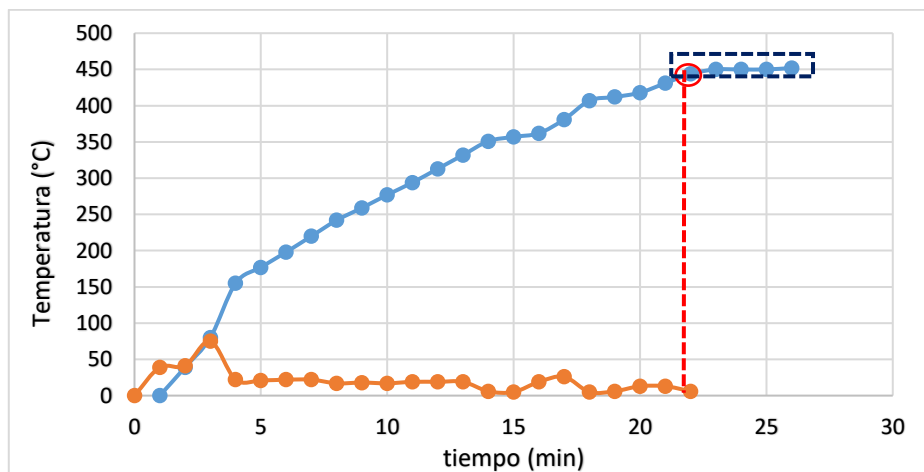
Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP400-04)



Nota. En la figura 9 se observa la curva de calentamiento, en donde se marca una línea vertical roja entrecortada en el tiempo de 20 minutos ya que es el tiempo que le tomó al horno-mufla en llegar a los 400 °C y desde el cual se inició el control del tiempo de residencia. Las líneas azules entrecortadas, representan el tiempo de residencia de 4 horas. Para este tratamiento el tiempo total fue de 4 horas y 20 minutos, con un incremento de velocidad de temperatura de 0,32 °C/s.

Figura 10

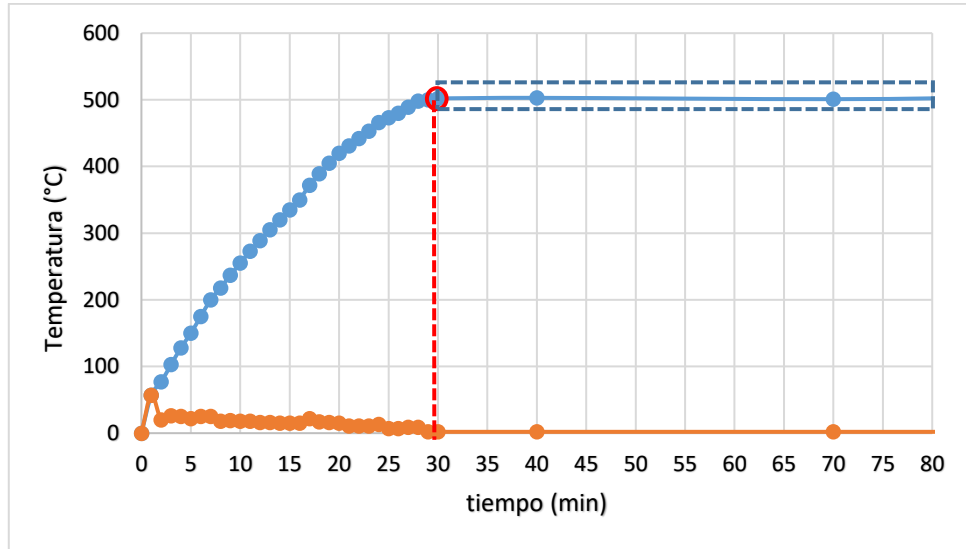
Variación de la temperatura durante el tiempo de pirólisis (TP450-01)



Nota. En la figura 10 se observa la curva de calentamiento, en donde se marca una línea vertical roja entrecortada en el tiempo de 22 minutos ya que es el tiempo que le tomó al horno-mufla en llegar a los 450 °C y desde el cual se inició el control del tiempo de residencia. Las líneas azules entrecortadas, representan el tiempo de residencia de 1 hora. Para este tratamiento el tiempo total fue de 1 hora y 22 minutos, con un incremento de velocidad de temperatura de 0,33 °C/s.

Figura 11

Variación de la temperatura durante el tiempo de calentamiento (TP500-01)



Nota. En la figura 11 se observa la curva de calentamiento, en donde se marca una línea vertical roja entrecortada en el tiempo de 29 minutos ya que es el tiempo que le tomó al horno-mufla en llegar a los 500 °C y desde el cual se inició el control del tiempo de residencia. Las líneas azules entrecortadas, representan el tiempo de residencia de 1 hora. Para este tratamiento el tiempo total fue de 1 hora y 29 minutos, con un incremento de velocidad de temperatura 0,28 °C/s.

4.1.2.2. Rendimiento del biochar obtenidos a partir de los biosólidos primarios por el proceso de pirólisis lenta

La tabla 30 muestra los resultados del rendimiento de cada biochar durante el proceso de pirólisis lenta. Por lo que de acuerdo a los diferentes tratamientos el que presenta un mayor rendimiento es el tratamiento TP300-01, es decir bajo las siguientes condiciones: temperatura 300 °C y un tiempo de residencia de 1 hora. En base a ello indica que la mayor obtención de biochar se da al trabajar a una temperatura y tiempo de residencia bajos.

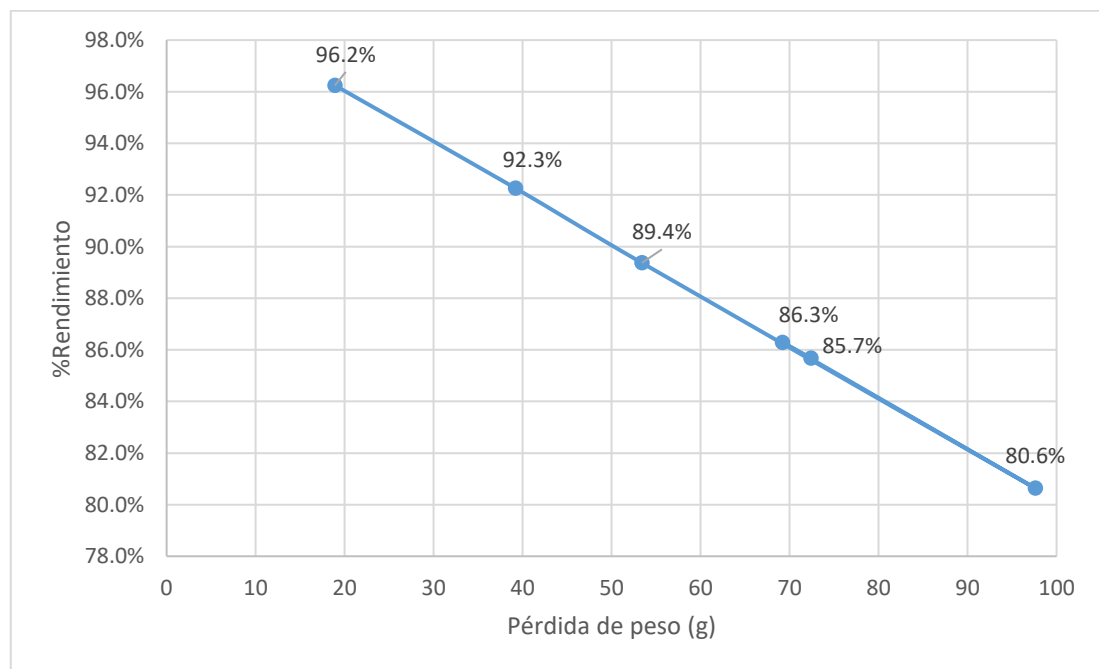
Tabla 30

Rendimiento del proceso de pirólisis lenta a partir de los biosólidos primarios, en el laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2024

Tratamiento	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Rendimiento
TP300-01	503,4	484,5	96,2 %
TP300-04	506,6	467,4	92,3 %
TP400-01	502,3	448,9	89,4 %
TP400-04	504,1	406,5	80,6 %
TP450-01	504,6	435,4	86,3 %
TP500-01	505,3	432,9	85,7 %

Figura 12

Rendimiento con respecto a la pérdida de peso



4.1.2.3. Características fisicoquímicas del biochar

En la tabla 31 se muestran los resultados de los 06 tratamientos, en donde se reportaron sus humedades, pH, CE, materia orgánica (% MO), carbono orgánico total (% CO_T) y la relación C/N reportados por la INIA (Anexo 17) y el tamaño de partícula por el laboratorio Grupo KyS Ingeniero SA (Anexo 22), en el mes de enero del 2025.

Tabla 31

Características físicas del biochar obtenido a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totorá”

Tratamiento	Tamaño de partícula (mm)	% H	pH	CE (dS/m)	% MO	% CO _T	Relación C/N
TP300-01	< 6,35	1,64	6,8	2,4	20,9	11,59	7,70
TP300-04	< 6,35	1,18	7,2	1,5	17,5	7,97	6,46
TP400-01	< 6,35	1,06	7,4	3,3	14,3	6,53	6,32
TP400-04	< 6,35	5,20	7,6	1,7	13,4	9,74	6,95
TP450-01	< 6,35	1,09	8,1	4,0	11,8	7,44	6,66
TP500-01	< 6,35	0,97	8,3	2,9	11,4	6,35	6,30

Nota. El tamaño de partícula también equivale al pasante a la malla N° 4.

4.1.2.4. Concentración de nutrientes en el biochar

La tabla 32 muestra el contenido de nutrientes presentes en el biochar en los 06 diferentes tratamientos. Estos resultados fueron reportados por el INIA (Anexo 17), en el mes de enero del 2025. Los resultados se clasificaron en micronutrientes y macronutrientes, debido al interés de su aplicación en el campo agrícola.

Tabla 32

Contenido de nutrientes en el biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Tatora”

Tratamiento	Macronutrientes					Micronutrientes					
	% N	% P	% K	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Co (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mo (mg/kg)
TP300-01	1,5	2,24	0,13	63.136,00	9.360,00	21.114,60	501,60	176,20	9,60	990,80	16,60
TP300-04	1,4	1,16	0,13	62.478,00	9.088,00	25.796,20	546,20	215,40	10,80	1.031,2	17,40
TP400-01	1,23	0,82	0,14	57.084,00	8.202,00	26.593,20	521,20	198,20	11,40	965,4	18,40
TP400-04	1,12	1,47	0,15	60.690,00	8.818,00	26.749,00	562,60	219,00	10,40	1.047,4	18,00
TP450-01	1,03	1,13	0,14	54.744,00	7.994,00	25.003,00	500,20	185,40	9,60	929,8	16,20
TP500-01	1,02	1,56	0,13	58.054,00	9.028,00	26.211,20	525,40	223,40	10,60	1.134,0	17,20

4.1.2.5. Concentración de metales tóxicos

En la tabla 33 se muestra la concentración de metales tóxicos presentes en cada tratamiento que se obtuvieron a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Tatora”; estos resultados fueron reportados por el INIA (Anexo 17), en el mes de enero del 2025.

Tabla 33

Concentración de metales tóxicos en el biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Tatora”

Tratamiento	Al	Pb	Cr	Ni	Ba	Sr	As	Cd
TP300-01	19.856,00	44,8	57,6	28,2	269,60	140,80	0,00	0,00
TP300-04	20.7030,00	48,8	59,2	31,6	310,60	162,20	0,00	0,00
TP400-01	21.000,00	47,8	63,4	31,6	304,40	155,60	0,00	0,00
TP400-04	22.867,00	47,2	70,6	32,6	322,00	165,40	0,00	0,00
TP450-01	18.966,00	42,2	61,0	28,4	290,80	152,00	0,00	0,00
TP500-01	21.376,00	44,4	62,8	30,8	312,10	171,80	0,00	0,00

4.1.2.6. Concentración de microorganismos patógenos

El contenido de microorganismos patógenos mostrados en la tabla 34, fueron reportados por el laboratorio especializado DCP-Lab Yaku (Anexo 20 y Anexo 21), en el mes de enero del 2025. Para este caso no se realizaron los análisis de todos los tratamientos debido al costo.

Tabla 34

Contenido de microorganismos patógenos en el biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totorá”

Tratamiento	E. Coli (UFC/g ST)	Coliformes termotolerantes (NMP/ g ST)	Coliformes totales (NMP/ g ST)	H.H./ 4 g ST	Salmonella spp. (NMP/ g ST)
TP300-04	0	< 3	< 3	1 ^a	< 3
TP500-01	0	< 3	< 3	2 ^a	< 3

a: Conteo de huevos sin determinación de viabilidad

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.2.1. Caracterización de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totorá”

La tabla 35, en donde se muestra una comparación de los resultados con el DS N° 015-2017-Vivienda y la RM N°0178-2023-MIDAGRI, con respecto al porcentaje de humedad (% H), sólidos totales y el contenido de materia orgánica (% SV/ST). En base a ello lo importante de este análisis y su comparación con el DS N° 015-2017-Vivienda, tiene sustento en que los biosólidos para su comercialización deben de contener materia orgánica menor al 60 %, ya que de esto depende la eficiencia del tratamiento primario realizado en los Tanques Imhoff, lechos de secado y zona de almacenamiento en la PTAR “La Totorá”, en donde se consigue una buena descomposición de la materia orgánica, es decir baja probabilidad de generar malos olores o gases como el metano; no obstante; no reduce de manera eficiente la concentración de patógenos hasta los límites permisibles según las normativas peruanas no obstante como se muestra en la tabla 35, se puede verificar que cumple con este parámetro. Además, se puede mencionar que el bajo porcentaje de materia orgánica, es indicador de que hay mayor presencia de materiales inorgánicos como

minerales y poca cantidad de materia orgánica; esto se puede verificar observando la tabla 31.

Por otro lado, de acuerdo a la RM N° 0178-2023-MIDAGRI, los biosólidos son clasificados como acondicionadores, y los cuales deben cumplir con diferentes requisitos entre ellos el contenido de materia orgánica para poder ser comercializados como tal; y de acuerdo a la tabla 35 presentada se cumplió con este primer requisito importante considerada en esta resolución ya que el contenido de materia orgánica se encuentra por encima del 20 %.

Tabla 35

Evaluación de la concentración de sólidos en los biosólidos primarios

	Procedencia	Parámetros		
		%Humedad	% ST	% (SV/ST)
DS N° 015- 2017-				60
Vivienda				
RM N° 0178-2023-				>20
MIDAGRI				
Biosólidos	Tratamiento primario	66,7	97,41	23,7

Si bien es cierto en el DS N° 015-2017-Vivienda, no se establecen valores para los parámetros mostrados en la tabla 36, sin embargo para la RM N° 0178-2023-MIDAGRI, si se menciona los requisitos que el biosólido debe cumplir para ser comercializado, a excepción del pH, no obstante también se puede observar la densidad aparente el cual está dentro de los límites y el cual es importante debido a los costes de su manejo, almacenamiento y comercialización, por otro lado los parámetros como la conductividad eléctrica sobrepasa el límites establecidos; el nitrógeno total solo logra llegar a 1,87 %, por ello en este caso no llegaría a cumplir con este parámetro importante, por lo que para esta resolución, el biosólido estaría excluido de su comercialización como acondicionador de suelos; ya que al no cumplir con la concentración mínima de nitrógeno(N_{total}) no se podría lograr un desarrollo del cultivo; con respecto a la conductividad eléctrica (CE), el cual es un indicador de salinidad, por lo que afectaría la capacidad de absorber el agua, debido a la alta presencia de sales que ocasiona un estrés hídrico; finalmente el porcentaje de fosforo

y potasio a pesar de contener un valor relativamente alto, sería conveniente, porque promueve el crecimiento de las plantas.

Tabla 36

Evaluación de las características fisicoquímicas y contenido de nutrientes en los biosólidos

Parámetros	RM N° 0178-2023-MIDAGRI	Biosólidos primarios (PTAR “La Titora”)
pH	--	5,8
Densidad aparente (g/cm ³)	≤ 7	1,63
Conductividad eléctrica (dS/m)	5	6,1
Nitrógeno total (%)	3	1,63
Fósforo, P ₂ O ₅ (%)	0,1-1,0	1,87
Potasio, K ₂ O (%)	0,3-1,0	0,99

Nota. La evaluación de los resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas y contenido de nutrientes del biosólido con respecto a la RM N°0178-2023-MIDAGRI.

Con respecto a la tabla 37, los resultados presentados demuestran que de acuerdo a los parámetros establecidos en el DS N°015-2017-Vivienda, los biosólidos de la PTAR “La Titora”, se encuentran por debajo del rango establecido cumpliendo con el segundo requisito para su comercialización. No obstante, pese a que la mayoría de los parámetros cumplieran con la RM N° 0178-2023-MIDAGRI, el biosólido primario no puede ser comercializado como acondicionar de plantas, porque el cadmio (Cd), sobrepasa la concentración requerida.

Tabla 37

Evaluación de los parámetros de toxicidad química del biosólido primario

Muestra	Procedencia	Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)						
		As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
DS N° 015- 2017- Vivienda		40	40	1200	1500	400	400	2400
RM N° 0178-2023-MIDAGRI		20	1	100	--	150	60	--
Biosólidos	Tratamiento primario	13,0	7,75	8,75	1,75	2,25	0,00	44,00

Nota. La evaluación de toxicidad química con respecto al DS N° 015-2017-Vivienda y la RM N° 0178-2023-MIDAGRI.

Finalmente, los resultados presentados en la tabla 38, se puede observar la concentración excesiva de microorganismos patógenos, siendo esto uno de los principales problemas para la comercialización de los biosólidos, ya que no cumple con los valores establecidos en el DS N° 015-2017-Vivienda ni con la RM N° 0178-2023-MIDAGRI. Conforme a ello se puede afirmar que no se puede comercializar ni como abono ni como acondicionador, porque en ambos reglamentos, debieron cumplir con todos los parámetros sin excepción, de lo contrario no puede ser comercializado por la planta productora. Por lo tanto, la PTAR “La Titora”, a pesar de comercializar sus biosólidos como tipo B, no lo puede realizar debido a que no cumplen estrictamente con el reglamento establecido.

Tabla 38

Evaluación de los parámetros de higienización del DS N° 015-2017-Vivienda y RM N°0178-2023-MIDAGRI con el biosólido primario

Muestra	Procedencia	Parámetros de higienización			
		Coliformes totales (NMP/g ST)	Escherichia Coli (UFC/g ST)	Coliformes termotolerantes (NMP/g ST)	HH/4 g ST
DS N° 015-2017- Vivienda		<10 ³	<10 ³	<10 ³	<1 (viable)
RM N° 0178- 2023-MIDAGRI		< 10 ³	--	--	1
Biosólidos	Tratamiento primario	6,21x10 ¹⁰	2,78x10 ⁹	4,61x10 ⁹	19 ^a

4.2.2. Calidad del biochar

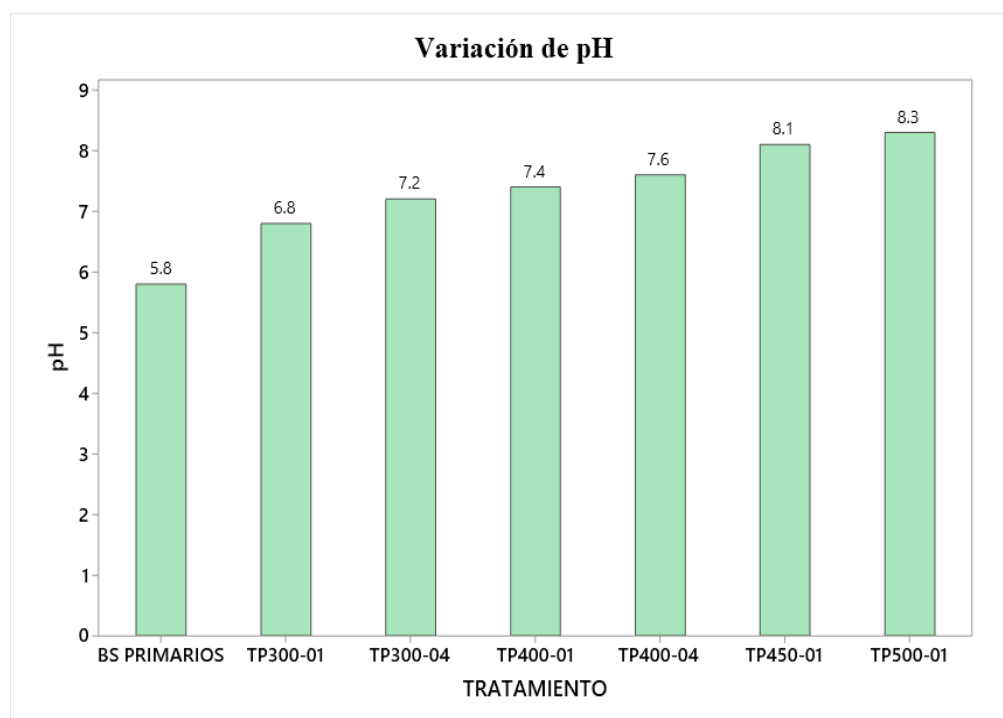
El análisis con respecto a la calidad del biochar se realizó en base a otro de los objetivos específicos establecidos, los cuales fueron reportados de los diferentes laboratorios y se realizó un análisis en función de su reducción o incremento con respecto a la materia prima (biosólidos primarios); así mismo se realizó una comparación con normas nacionales e internacionales, concernientes con la calidad del biochar.

Como se observa en la figura 13, el aumento del pH fue significativamente afectado por el tiempo de residencia que, con la temperatura, obteniendo una variación de pH

de 6,8 a 8,3 este último del tratamiento TP500-01, por lo que sería adecuado para corregir suelos ácidos, ya que el pH promueve el desarrollo de microorganismos buenos y la absorción de nutrientes esenciales para los cultivos. Por otro lado, se puede observar también que el tratamiento TP300-01, tiene un pH ácido, el cual sería ideal para suelos muy alcalinos; en base a ello, este aumento de pH se debió a la formación de carbonatos y álcalis inorgánicos (K, Na, Ca y Mg); valores similares a la investigación de Hansen et al. (2023).

Figura 13

Variación del pH en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta

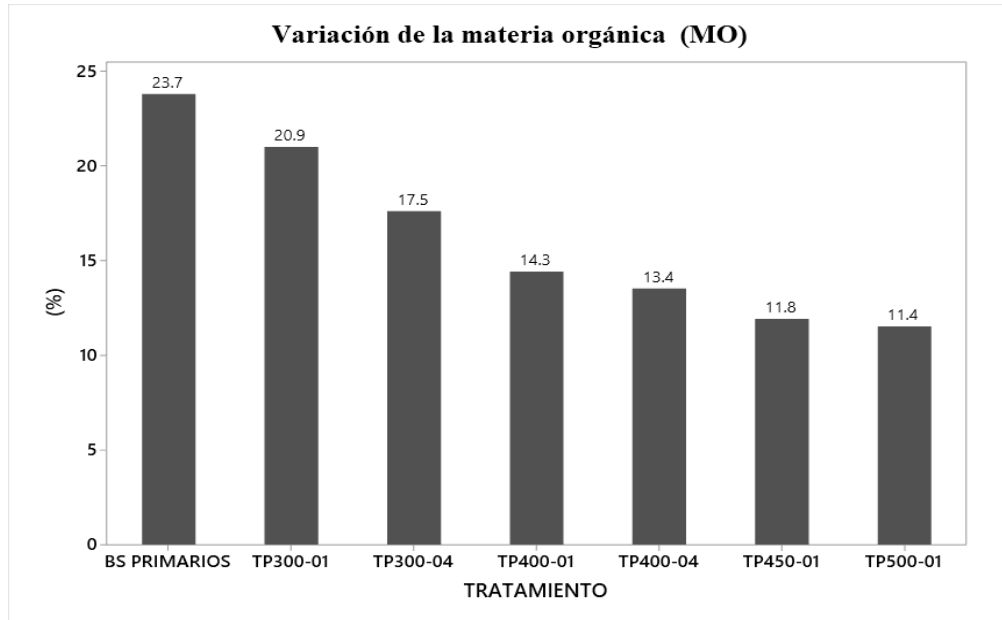


Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

El contenido de materia orgánica mostrado en la figura 14, disminuyó de 20,9 % a 11,4 % con el incremento de la temperatura, siendo también esta variable afectada directamente por la temperatura en comparación del tiempo de residencia, siendo el tratamiento TP500-01 el que presentó el menor porcentaje de materia orgánica. Su importancia radica en que ayuda en la retención de nutrientes, siendo el más conveniente el tratamiento TP300-01, debido a que presentó un 20,9 %.

Figura 14

Variación de la materia orgánica (%MO) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



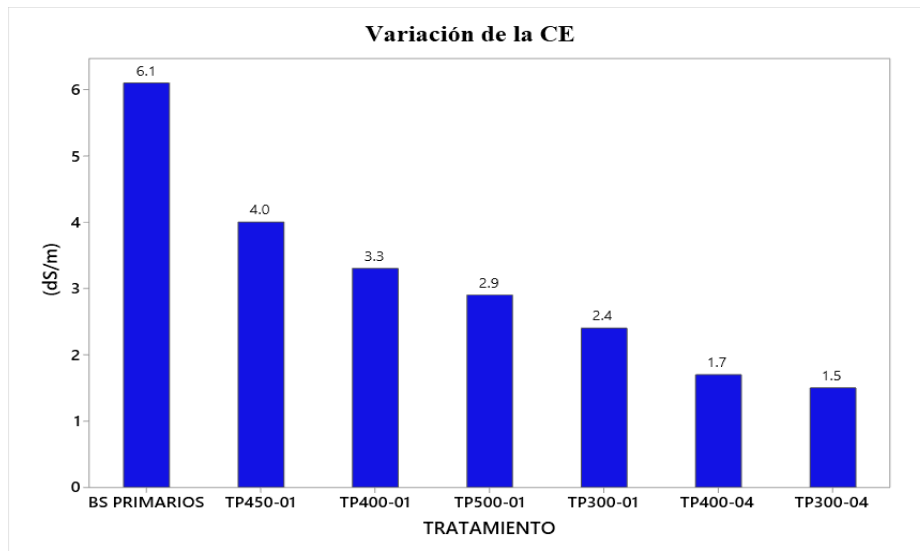
Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

En caso de la conductividad eléctrica (CE) como se puede observar en la figura 15, varió de 1,5 dS/m a 4,0 dS/m, y el cual se vio afectado principalmente por el tiempo de residencia, obteniéndose el valor más bajo en el tratamiento TP300-04.

La figura 16, muestra el contenido de humedad, como se esperaba, ha disminuido en función de la temperatura principalmente. Esta variable es relevante debido ya que, al contener un nivel muy bajo de humedad, es ideal para su almacenamiento, evitando la propagación de microorganismos y por ende su degradación, sin embargo, al ser muy seco, se dificulta su uso ya que podría provocar polvo y su dispersión rápida en el ambiente; de acuerdo a lo mencionado el tratamiento más adecuado para esta variable fue el TP400-04.

Figura 15

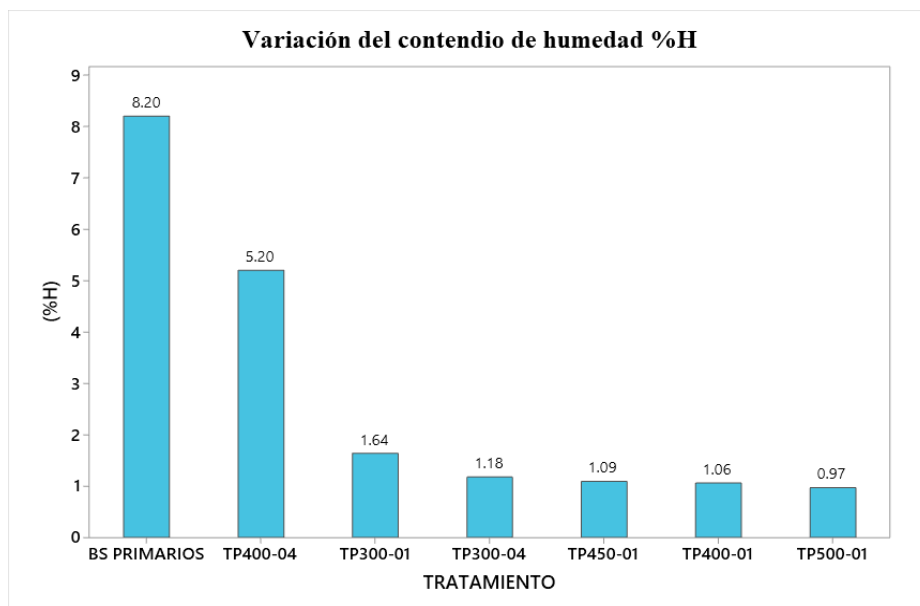
Variación de la conductividad eléctrica (CE) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 16

Variación del contenido de humedad (%) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta

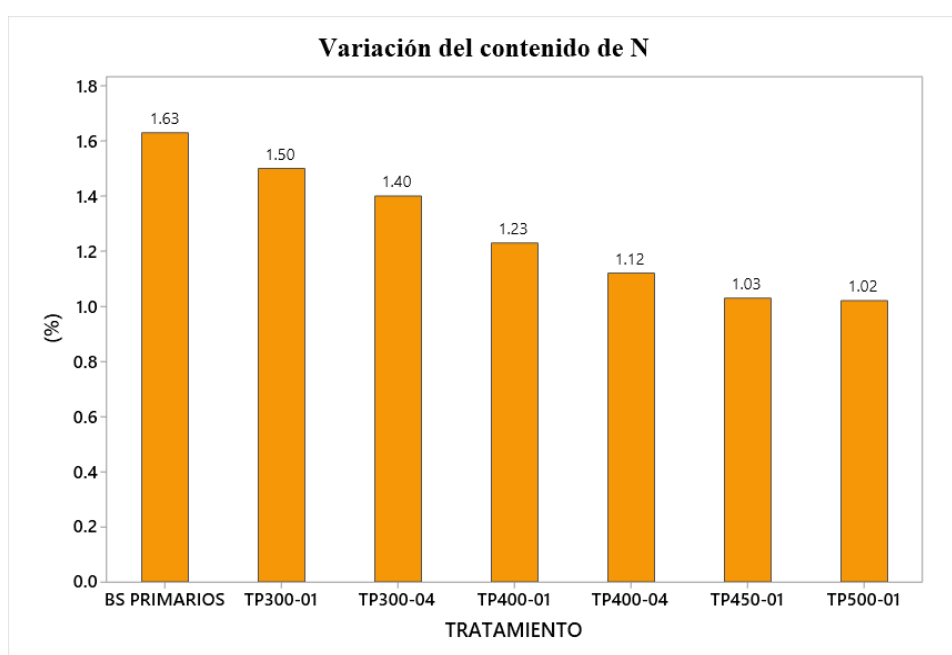


Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Con respecto al contenido de los nutrientes esenciales como el nitrógeno (% N), fósforo (% P_5O_2) y el potasio (% K_2O), expresiones utilizadas comúnmente en el sector agrícola, se buscó el tratamiento que posea el mayor porcentaje. Por lo que en base a ello como el % N fue afectado principalmente por la temperatura de pirólisis, el tratamiento adecuado fue el tratamiento TP300-01, obteniéndose en este tratamiento el valor más alto, tal como se muestra en la figura 17. Con respecto al fósforo mostrados en la figura 18, se observó una variación significativa, ya que se vio afectado por la temperatura y el tiempo de residencia, siendo el más apto el tratamiento TP300-01. Finalmente, para el potasio mostrados en la figura 19, se puede observó su disminución en todos los tratamientos, lo que sugiere que es afectado por la temperatura y el tiempo de residencia.

Figura 17

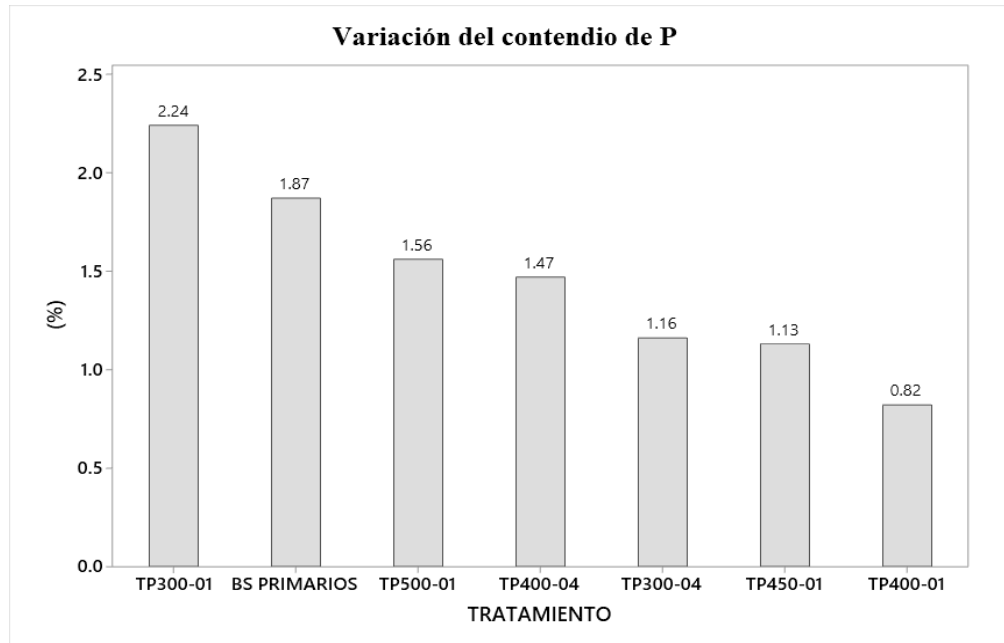
Variación del contenido de N_{total} en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 18

Variación de fósforo total (%) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



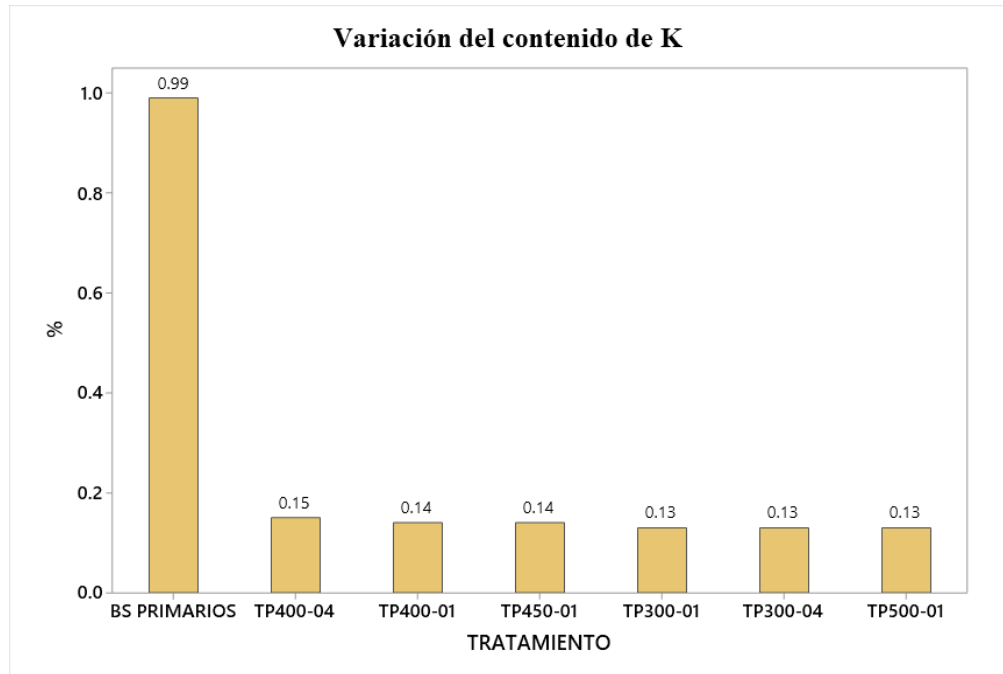
Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Tatora"

Yuan et al. (2015), menciona que la causa de la reducción del contenido de nitrógeno es porque los compuestos de nitrógeno como el nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) y sal de amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), presentes en los biosólidos se descomponen y se volatilizan con el incremento de la temperatura. Con respecto al incremento del fósforo, Zheng et al. (2013) menciona que posiblemente sea el mismo que está presente en los biosólidos y que están asociados con minerales de fosfato termoestables, que son difíciles de descomponerse y se cristalizan con el aumento de la temperatura, como se citó en Yuan et al. (2015).

Por último, con respecto a la disminución del % K Yuan et al. (2015), menciona que se debe posiblemente a la formación de cenizas finas que pudieron ser llevadas por las partículas volátiles, reduciendo finalmente el contenido del mismo en el biochar. Esta teoría se afirma, ya que al observar el recipiente después del proceso de pirólisis, se vieron acumuladas cenizas cristalinas en la parte superficial del recipiente, el cual se recuperó, mediante la limpieza con una brocha; debido a ello se recomienda tener mucho cuidado para evitar estas posibles pérdidas.

Figura 19

Variación de potasio total (%) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios. Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

La concentración de los metales como Cu (Figura 20), Zn (Figura 21), Pb (Figura 22), Cr (Figura 23) y Ni (Figura 24), aumentaron de manera significativa en los diferentes tratamientos, por lo que de acuerdo a Goldan et al. (2022), esto se debió a su estabilidad y a sus altos puntos de ebullición.

Li et al. (2022), afirman que existen dos etapas en el proceso de pirólisis, la primera dada de 180 °C a 390 °C, en donde se da la reorganización molecular interna del biosólido primario pretatado, el cual principalmente provoca la pérdida de agua, rotura de enlaces, aumento de radicales libres y generación de un biochar primario. En la siguiente etapa en donde la materia orgánica residual se convierte en biogás, bioaceite y biochar secundario, mediante la deshidratación y polimerización con el aumento de la temperatura (> 500 °C); así mismo a esta última temperatura el biochar sufre una pequeña desvolatilización debido a la rotura del límite terminal de C-C y las moléculas de cadena larga se rompen en pequeñas fracciones de gas. Así mismo en concordancia con el anterior autor, se menciona que la biodisponibilidad de estos metales tóxicos presentes en el biochar tienen que ver bastante con la especiación química, es decir que las vías de migración de los diferentes metales pesados

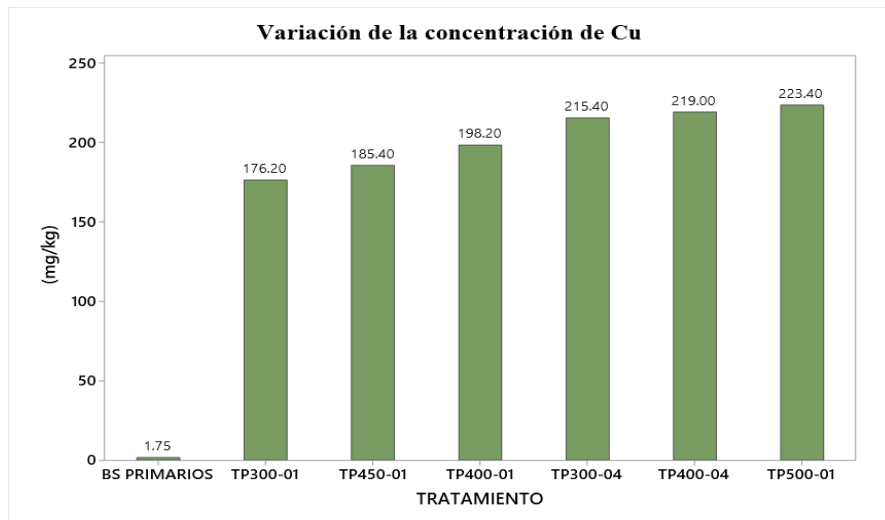
volátiles como Ba, Cr, Co, Cuy Ni se mantienen en el biochar, mientras que los metales pesados moderadamente volátiles como Pb, Zn, Sn, As y Cd se enriquecen en el bioaceite formado a través de la volatilización y condensación. Con esta última mención se puede confirmar que la ausencia de As y Cd en el biochar sea debido a la formación de bioaceite y gas, ya que se vio la formación de una capa de bioaceite depositado en la superficie del recipiente de acero inoxidable, el cual se puede observar en la figura 53 del panel fotográfico, ubicado en el anexo 13. Así mismo como mencionó Chuquiyauri (2021), la pirólisis lenta produce tres productos (biogás, bioaceite y biochar) lo que en grandes industrias se llega a aprovechar al máximo y se recuperan, siendo una alternativa sostenible.

Por otro lado, la ausencia del contenido de As y Cd, lo explica Cao et al. (2023), el cual formula una teoría basada en que los metales pesados se eliminan con la volatilización de la materia orgánica, es decir que la migración de los metales durante el proceso de la pirólisis se relaciona con sus propia naturaleza y la forma en la cual existe en este; un ejemplo claro que menciona es que el Cd tiende a reaccionar con carbonato cuando la temperatura y tiempo de residencia aumenta y por ende a volatilizarse.

Pese a aumentar la concentración de estos metales pesados, autores como Oliveira et al. (2017) y Qambrani et al. (2017), observaron que en general la disponibilidad de estos metales disminuye después del proceso de pirólisis tal como se observa en las figuras 25 y 26, ya que el biochar tiene la propiedad única de conectarse con grupos funcionales de carga superficial de compuestos polares, que le ayudan a la inmovilización de metales pesados y agroquímicos en la superficie del biochar por lo que limitan su movilidad en las plantas, como se citó en Goldan et al., (2022).

Figura 20

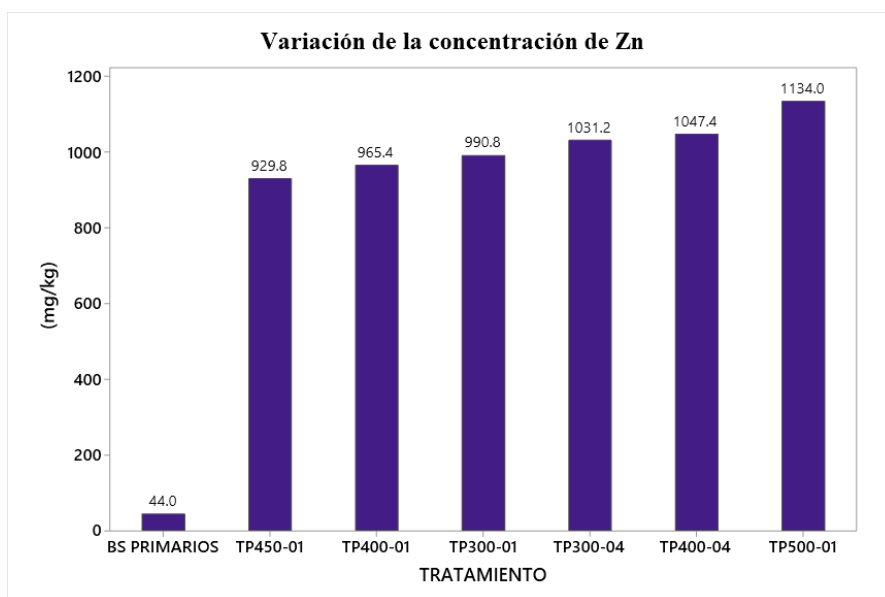
Variación de la concentración de Cu (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 21

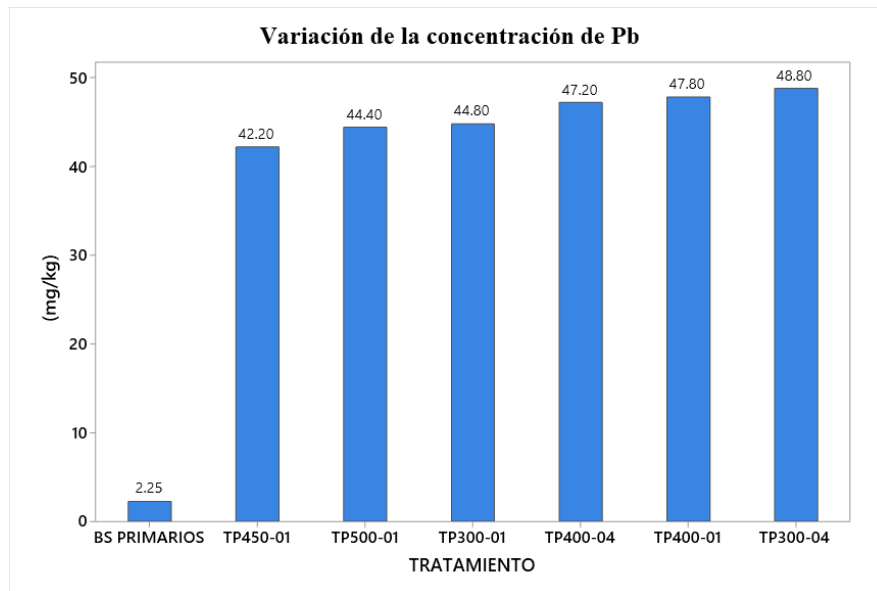
Variación de la concentración de Zn (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios: Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 22

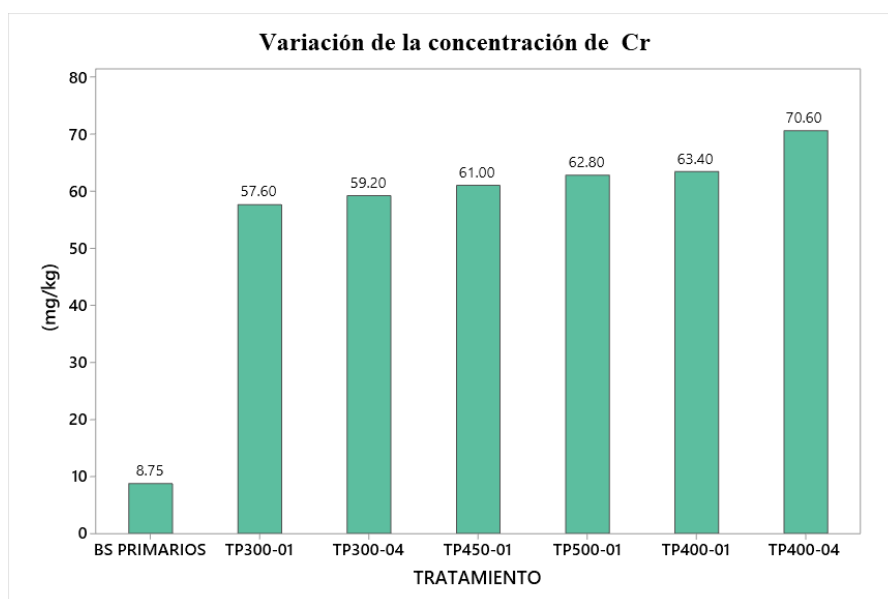
Variación de la concentración de Pb (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios. Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 23

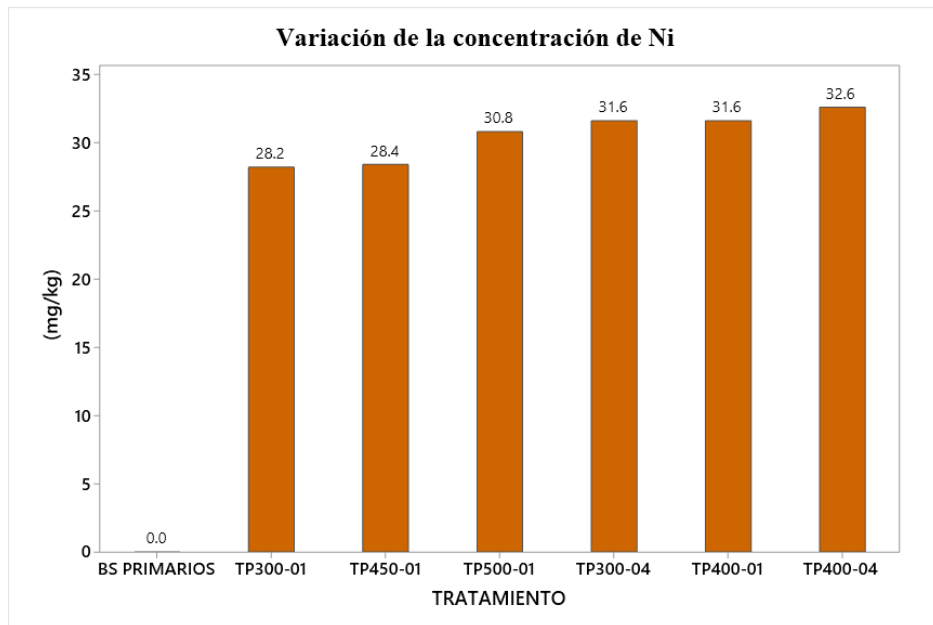
Variación de la concentración de Cr (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios. Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 24

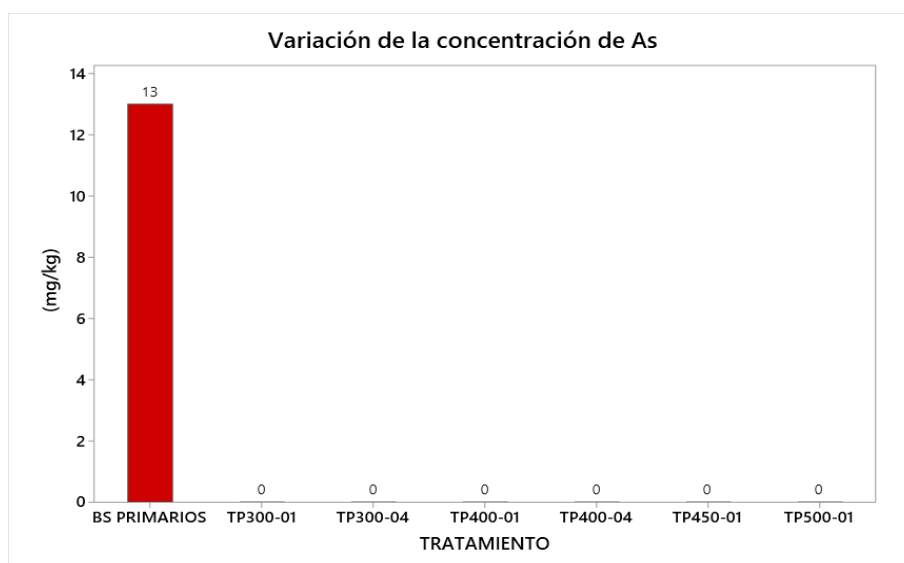
Variación de la concentración de Ni (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios. Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 25

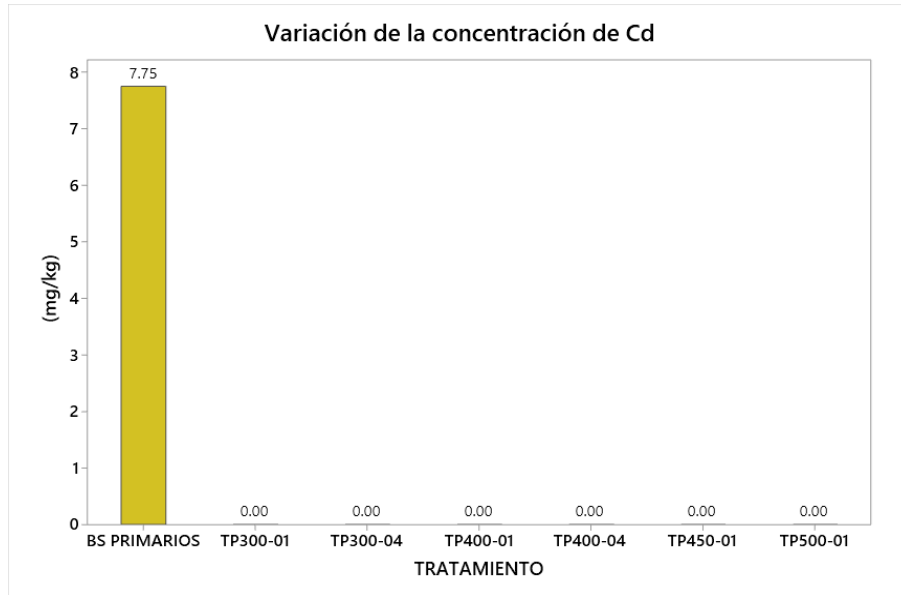
Variación de la concentración de As (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios. Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Figura 26

Variación de la concentración de Cd (mg/kg) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta



Bs primarios. Biosólidos primarios de la PTAR "La Totorá"

Para el caso de los resultados del contenido de microorganismos patógenos, solo se evaluaron de dos tratamientos (TP300-04 y TP500-01), debido a las restricciones presupuestarias no fue posible analizar los demás tratamientos, sin embargo se analizaron los tratamientos claves, ya que se escogió el TP300-04, debido a que es la temperatura más baja pero con un tiempo de residencia largo (4 horas), así mismo se tomó el tratamiento TP500-01, con la más alta temperatura de pirólisis pero con tiempo de residencia de 1 hora, esto con el fin de evaluar si la temperatura y el tiempo de residencia influyen simultáneamente en el contenido de microorganismos patógenos o si solo uno de estos factores influye de manera directa en la presencia de los mismos. Conforme a ello como se puede observar en las figuras 27, 28, 29 y 30, de Coliformes Termotolerantes, Coliformes Totales, E. Coli y Huevos Helmintos respectivamente que el tiempo de residencia es lo que más influye en la desaparición de estos microorganismos, por lo que el tratamiento en donde se obtuvieron mejores resultados con un contenido de microorganismos más bajos fue tratamiento TP300-04.

Figura 27

Variación del contenido de Coliformes Termotolerantes (NMP/g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta

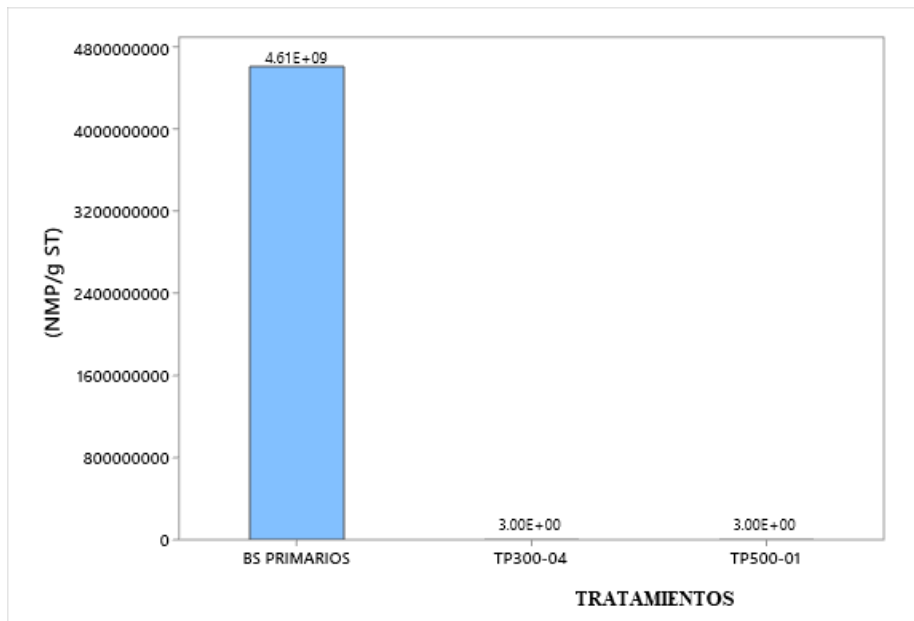


Figura 28

Variación del contenido de Coliformes Totales (NPM/g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta

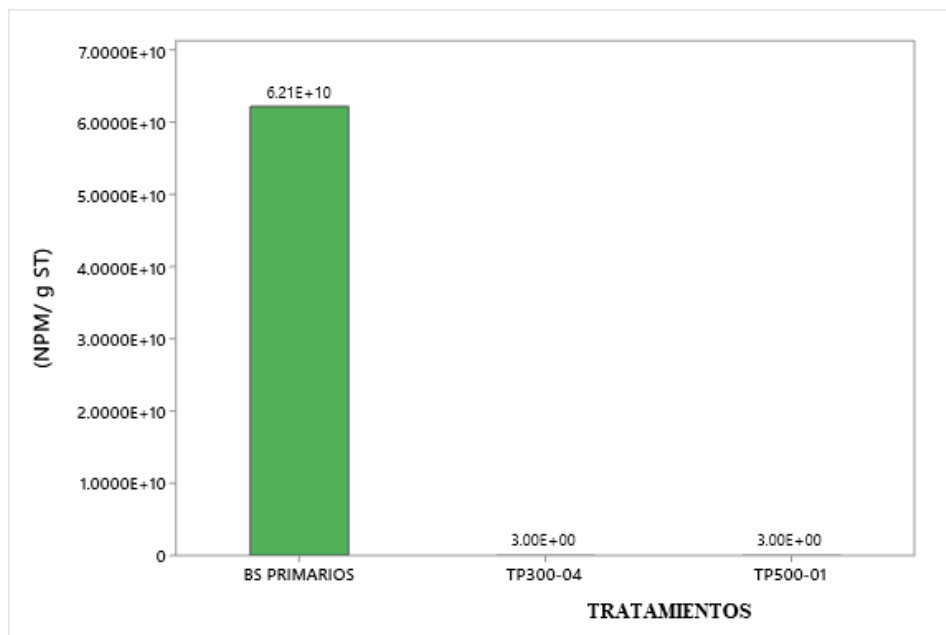


Figura 29

Variación del contenido de Escherichia coli (UFC/g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta

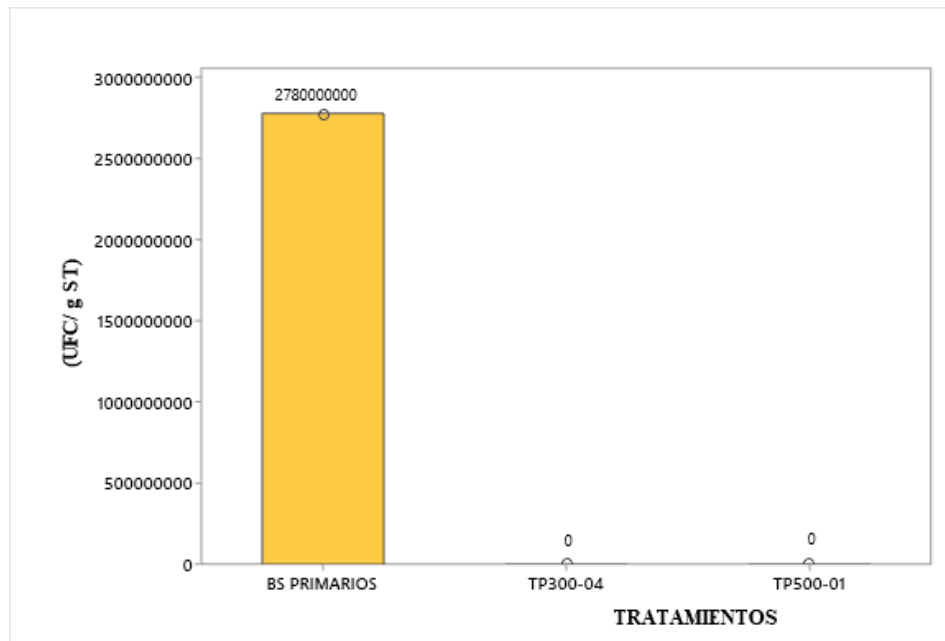


Figura 30

Variación del contenido de Huevos Helminthos (H.H./4g ST) en los diferentes tratamientos de pirólisis lenta

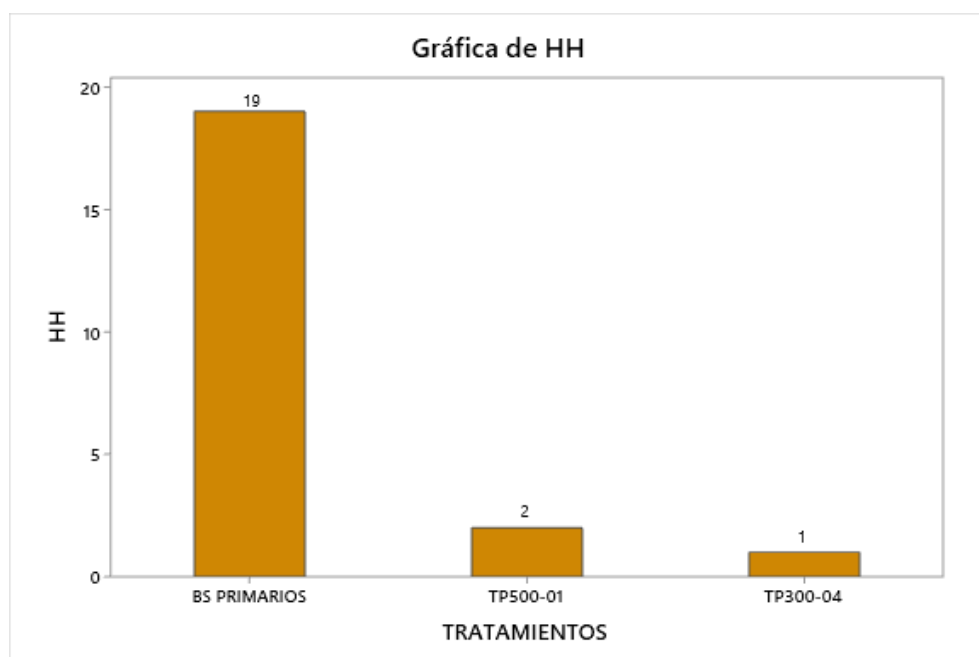
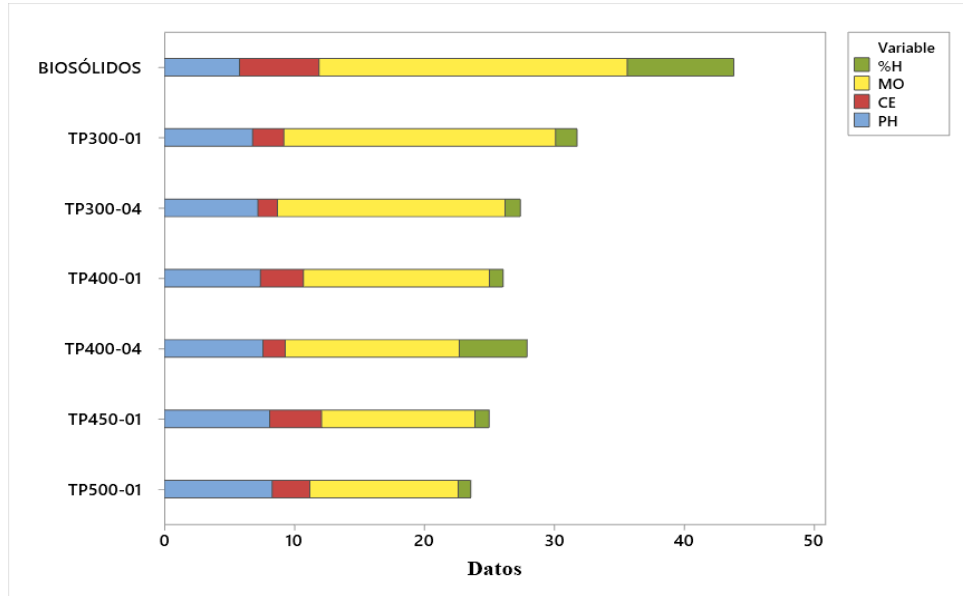


Figura 31

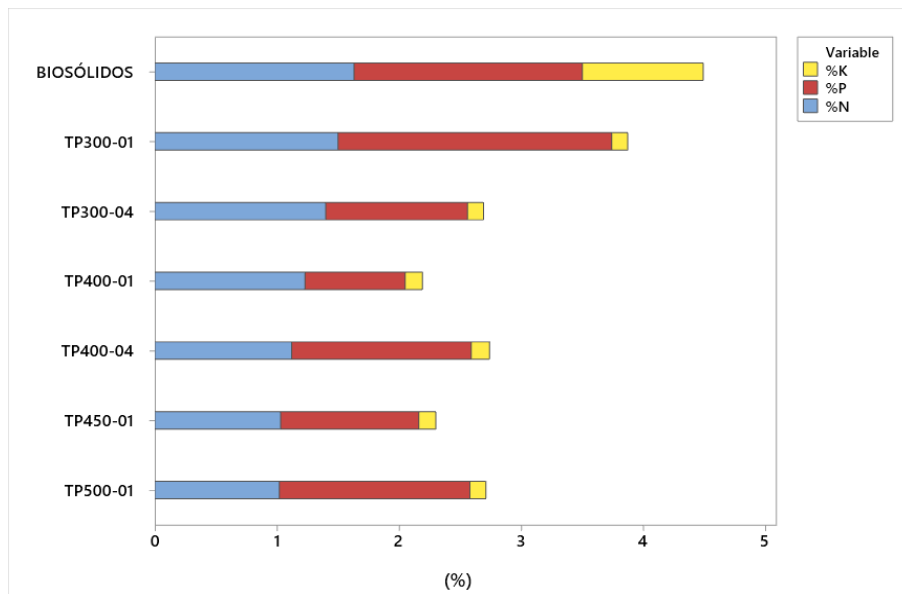
Resumen de las características fisicoquímicas del biosólido primario



Nota. Se presenta la variación de las características fisicoquímicas del biosólido primario de la PTAR “La Totorá” en función de los diferentes tratamientos de pirólisis lenta.

Figura 32

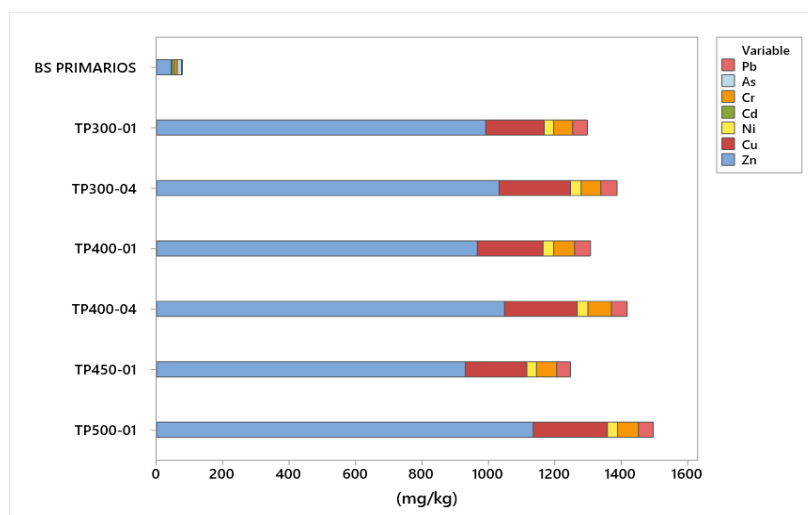
Resumen del contenido de nutrientes esenciales



Nota. Se presenta la variación del contenido los nutrientes esenciales (N-P-K) del biosólido primario de la PTAR “La Totorá” en función de los diferentes tratamientos de pirólisis lenta.

Figura 33

Resumen del contenido de metales tóxicos



Nota. Se presenta la variación del contenido de metales tóxicos del biosólido primario de la PTAR “La Totorá” en función de los diferentes tratamientos de pirólisis lenta

Tabla 39

Tabla resumen de las principales propiedades del biosólido y el biochar

Parámetros	Tratamientos						
	Biosólidos primarios	TP300-01	TP300-04	TP400-01	TP400-04	TP450-01	TP500-01
pH	5,80	6,80	7,20	7,40	7,60	8,10	8,30
CE (dS/m)	6,10	2,40	1,50	3,30	1,70	4,00	2,90
MO (%)	23,70	20,9	17,50	14,30	13,40	11,80	11,40
%H	60,0	1,64	1,18	1,06	5,20	1,09	0,97
N (%)	1,63	1,50	1,40	1,23	1,12	1,03	1,02
P (%)	1,87	2,24	1,16	0,82	1,47	1,13	1,56
K (%)	0,99	0,13	0,13	0,14	0,15	0,14	0,13
Cu (mg/kg)	1,75	176,20	215,40	198,20	219,00	185,40	223,40
Zn (mg/kg)	44,00	990,80	1031,20	965,40	1.047,4	929,80	1.134,00
As (mg/kg)	13,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cd (mg/kg)	7,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pb (mg/kg)	2,25	44,8	48,80	47,80	47,20	42,20	44,40
Cr (mg/kg)	8,75	57,6	59,20	63,40	70,60	61,00	62,80
Ni (mg/kg)	0,00	28,20	31,60	31,60	32,60	28,4	30,8

La tabla 40, se muestran los diferentes tratamientos, en donde las características fisicoquímicas que mostraron buenos fueron el pH, CE y tamaño de partícula; ya que el pH que se obtuvo fue alcalino, se redujo la conductividad eléctrica (CE) y se consiguió un buen tamaño de partícula. Con respecto al contenido de los principales elementos nutritivos como el % P y % K se obtuvieron buenos resultados en el tratamiento TP300-01, a excepción del %N, ya que se redujo en un 32 % al aumentar la temperatura de 300 °C a 500 °C, sin embargo, las características fisicoquímicas y contenido de nutrientes en el biochar, cumplen sólo con la RM N° 0178-2023-MIDAGRI, debido a que en el DS N° 011-2017-MINAN-ECA, no aplican como estándares de calidad para uso en suelos agrícolas.

En caso de la concentración de metales pesados, se consideró añadir normas internacionales (IBI y EBC) que se deben de cumplir para la producción del biochar a partir de los biosólidos. Por lo que, en base a lo reglamentado en normas nacionales e internacionales, el biochar en los diferentes tratamientos cumplió con estos parámetros mínimos de concentración de metales. Así mismo se logró la eliminación del Arsénico (As) y el Cadmio (Cd) en todos los tratamientos.

Por último, el contenido de microorganismos patógenos, como se observa en la tabla 40 dependió básicamente del tiempo de retención, ya que tanto el tratamiento TP300-04 y el tratamiento TP500-01, presentaron las mismas características, excepto por el tiempo de residencia, ya que el tratamiento TP300-04, logró disminuir aún más el contenido de Salmonella, cumpliendo con las normas nacionales de referencia (DS N° 015-2017-Vivienda).

Por lo tanto, el mejor tratamiento en donde se consiguió las mejores propiedades fisicoquímicas y contenido de nutrientes, con bajo contenido de metales tóxicos, fue el tratamiento TP300-01.

Tabla 40

Comparación de parámetros de calidad del biochar con normas nacionales e internacionales

Parámetros	Normas Nacionales		Normas Internacionales		Tratamientos del Biochar					
	DS N° 011-2017-MINAN-ECA	RM N°0178-2023-MIDAGRI	Límites Permisibles IBI -2015	Límite Permissible del EBC	TP300-01	TP300-04	TP400-01	TP400-04	TP450-01	TP500-01
pH	NA	NA	NA	NA	6,80	7,2	7,4	7,6	8,1	8,3
CE (dS/m)	NA	5	NA	NA	2,4	1,5	3,3	1,7	4,0	2,9
MO (%)	NA	> 20	NA	NA	20,9	17,5	14,3	13,4	11,8	11,4
%H	NA	15 - 35	NA	NA	1,64	1,18	1,06	5,2	1,09	0,97
CO _T (%)	NA	NA	NA	NA	11,59	9,74	7,97	7,44	6,53	6,35
Relación C/N	NA	10 - 25	NA	NA	7,7	6,95	6,46	6,66	6,32	6,3
Tamaño de partícula (mm)	NA	< 16	NA	NA	< 6,35	< 6,35	< 6,35	< 6,35	< 6,35	< 6,35
N (%)	NA	3	NA	NA	1,5	1,4	1,23	1,12	1,03	1,02
P (%)	NA	0,1 - 1,0	NA	NA	2,24	1,16	0,82	1,47	1,13	1,56
K (%)	NA	0,3 - 1,0	NA	NA	0,13	0,13	0,14	0,15	0,14	0,13
Ca (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	63136,0	62478,0	57084,0	60690,0	54744,0	58054,0
Mg (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	9360,0	9088,0	8202,0	8818,0	7994,0	9028,0
Fe (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	21114,6	25796,2	26593,2	26749,0	25003,0	26211,2
Mn(mg/kg)	NA	NA	NA	NA	501,6	546,2	521,2	562,6	500,2	525,4
Cu (mg/kg)	NA	NA	143 - 6000	< 100	176,2	215,4	198,2	219	185,4	223,4
Co (mg/kg)	NA	NA	34 - 100	NA	9,6	10,8	11,4	10,4	9,6	10,6

Zn (mg/kg)	NA	NA	416 - 7400	< 400	990,8	1031,2	965,4	1047,4	929,8	1134,0
Mo (mg/kg)	NA	NA	5 - 75	NA	16,6	17,4	18,4	18,0	16,2	17,2
Al (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	19856,2	207030,0	21000,0	22867,0	18965,8	21376,0
As (mg/kg)	50	20	13 - 100	NA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cd (mg/kg)	1,4	1,0	1,4 - 39	< 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pb (mg/kg)	70	150	121 - 300	< 120	44,8	48,8	47,8	47,2	42,2	44,4
Cr (mg/kg)	NA	100	93 - 1200	< 80	57,6	59,2	63,4	70,6	61,0	62,8
Ni (mg/kg)	NA	60	47 - 420	< 30	28,2	31,6	31,6	32,6	28,4	30,8
Ba (mg/kg)	750	NA	NA	NA	269,6	310,6	304,4	322,0	290,8	312,1
Sr (mg/kg)	NA	NA	NA	NA	140,8	162,2	155,6	165,4	152,0	171,8
Escherichia Coli (UFC/ g ST)	NA	NA	NA	NA	NSR	0,00	NSR	NSR	NSR	0,00
Coliformes totales (NMP/g ST)	NA	< 1000	NA	NA	NSR	3,0	NSR	NSR	NSR	3,0
Coliformes termotolerantes (NMP/g ST)	NA	NA	NA	NA	NSR	3,0	NSR	NSR	NSR	3,0
HH (H.H/4g ST)	NA	1,0	NA	NA	NSR	1,0	NSR	NSR	NSR	2,0
Salmonella (NMP/g ST)	NA	3,0	NA	NA	NSR	3,0	NSR	NSR	NSR	3,0

NA: No aplica NSR: No se realizó

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.3.1. Prueba de Shapiro-Wilk

La importancia de la aplicación de esta prueba, es primero por el tamaño de muestras ($n < 50$) y segundo porque el diseño de la presente investigación es experimental, por lo que esta investigación se ejecuta de manera ordenada y sistemática, manipulando las variables independientes, para luego responder los objetivos de la investigación, es decir probar la hipótesis. Así mismo, permitió la evaluación distribución normal de los diferentes análisis, lo que garantizó la aplicación correcta del Modelo de Superficie de Respuesta (RSM), mediante el Diseño de experimentos (DOE por sus siglas en inglés *Design of Experiments*).

Además, se eligió esta prueba para obtener resultados robustos y adecuados, que permitieron una mejor evaluación de la calidad del biochar, es decir de sus propiedades fisicoquímicas, contenido de nutrientes y la concentración de metales tóxicos. Es por ello que es crucial determinar el tipo de distribución y como se muestra en la tabla 41, todos los parámetros evaluados siguen una distribución normal, ya que los resultados muestran un valor de $p > 0,05$ a excepción del Al y Fe porque obtuvieron valores de p iguales a $< 0,1$ y $0,025$ respectivamente.

Por lo tanto, de acuerdo a estos resultados se aplicó modelos paramétricos respectivamente con el 95 % de confianza, los cuales todos fueron válidos para la aplicación del Modelo de Superficie de Respuesta (RSM).

Tabla 41*Resultados de probabilidad de cada respuesta*

Parámetros	Media	Desviación estándar	N	RJ	Valor p
pH	7,56	0,561	6	0,989	>0,100
CE	2,633	0,9585	6	0,987	>0,100
% MO	14,88	3,667	6	0,954	>0,100
% H	14,88	3,667	6	0,954	>0,100
% N	1,217	0,1985	6	0,963	>0,100
% P	1,397	0,4905	6	0,961	>0,100
% K	0,1367	0,0082	6	0,998	>0,100
Cu	202,9	19,37	6	0,965	>0,100
Zn	1016,0	71,79	6	0,981	>0,100
Pb	45,87	2,484	6	0,978	>0,100
Cr	62,43	4,553	6	0,946	>0,100
Ni	30,53	1,823	6	0,952	>0,100
% CO _T	8,27	2,034	6	0,954	>0,100
C/N	6,732	0,5329	6	0,918	>0,100
Ca	59364	3285	6	0,981	>0,100
Mg	8748	536,7	6	0,962	>0,100
Fe	25245	2118	6	0,858	0,025
Mn	526,2	24,62	6	0,971	>0,100
Co	10,4	0,7043	6	0,990	>0,100
Mo	17,3	0,827	6	0,993	>0,100
Al	51849	76034	6	0,698	<0,010
Ba	301,6	18,74	6	0,957	>0,100
Sr	158	10,96	6	0,990	>0,100

RJ: Dato que permite evaluar si el comportamiento sigue un comportamiento normal

4.3.2. Análisis de correlación de Pearson

Se aplicó la correlación de Pearson, para la medición de la relación lineal entre dos variables, y porque al tener varias respuestas cuantitativas, se pudo analizar la relación proporcional entre ellos de manera simultánea.

La interpretación fue en base a los valores de la correlación (r), el cual varía desde -1 a 1. Por lo que, si estuvieran alrededor de 1, se refiere a que las variables guardan fuerte correlación positiva, es decir a medida que una variable aumenta la otra también aumentará. Por otro lado, si el valor de $r < 0$ y alrededor de -1, significa que las variables guardan una correlación fuerte negativa, lo que significa que si una variable aumenta la otra disminuye. Con respecto al valor de p , el cual es un indicador de significancia en la correlación de Pearson, donde si $p \leq 0,05$ indica una correlación estadísticamente significativa con una relación lineal confiable y si $p \geq 0,05$, la correlación no es estadísticamente significativo, lo que indica que probablemente no exista relación lineal entre las variables. Los valores de p se pueden visualizar en el anexo 9.

De acuerdo a la tabla 42 que se muestra a continuación, se logra ver que la correlación entre la temperatura y el tiempo de residencia fue baja, con un valor de p no significativo; así mismo correlación de la temperatura (T °C) con el pH fue fuerte positiva, estadísticamente significativa con un $p \leq 0,05$; no obstante, con la conductividad eléctrica (CE) posee una correlación positiva, pero no significativa; por otro lado con la % MO, C/N, % COT y % N guardan una correlación negativa fuerte, con un valor $p \leq 0,05$, finalmente con el Ca y Pb tienen una correlación negativa moderada, pero no significativa. Con respecto a los demás parámetros, la temperatura tuvo una correlación débil negativa no significativos.

El tiempo de residencia (t_i) tuvo una correlación fuerte positiva con el Mn con un valor p significante, con el Ca, Pb, Ni y Ba, la correlación fue positiva moderada pero no significativo.

Con respecto a la correlación de las demás respuestas como es el caso del pH, el cual guarda una correlación fuerte negativa con la % MO, % COT, C/N y % N, con un valor de p significativo, por otro lado, con el Ca y Pb también tuvieron una

correlación moderada negativa, pero no significativa y con las demás respuestas, el pH tuvo una correlación baja o nula en algunos casos con valores de $p \geq 0,05$.

En caso de la conductividad eléctrica (CE), tuvo una correlación negativa fuerte con el Ni, Pb, Mn y Mg, pero con un valor $p \geq 0,05$; con el Ca y % N tuvo una correlación fuerte y moderada negativa respectivamente con un valor de p significativo, con las demás respuestas guarda correlaciones bajas negativas y con valores de $p \geq 0,05$.

El % MO tuvo una correlación fuerte positiva con % COT, C/N, Ca y % N con un valor de p significativo; la correlación con el % P y Mg fue moderada positiva, pero con un valor de $p \geq 0,05$. Con las demás respuestas el % MO, tuvo correlaciones bajas negativas, con Ba, Sr y Cr, con un valor de $p \geq 0,05$.

El % CO_T tuvo una correlación fuerte positiva con C/N, % N, Ca % P con un valor de p significativo; en caso del Mg también tuvo una correlación fuerte positiva pero el valor con el $p \geq 0,05$. Con las demás respuestas hubo una correlación baja negativa con valores de $p \geq 0,05$.

La relación C/N, tuvo una correlación fuerte positiva con % N, Ca % P con un valor significativo de p y la correlación positiva moderada con el Mg, pero no significativo. Las correlaciones con las demás respuestas fueron bajas negativas, con un valor de $p \geq 0,05$.

El % N tuvo una correlación moderada positiva con % P, Ca, Mg y Pb, pero no significativos. Con las demás respuestas tuvo una correlación moderada y débil ambas negativas con valores de $p \geq 0,05$.

El %P tuvo correlación moderada positiva con Ca y Mg, pero no significativas. Con las demás respuestas tuvo una correlación baja negativa con valor de $p \geq 0,05$.

El % K tuvo una correlación fuerte positiva solo con Cr, con un valor de p significativo; con el Mn, Cu, Co, Mo, Ni, Ba y Sr, tuvo una correlación baja positiva, con un valor de $p \geq 0,05$.

El Ca tuvo una correlación positiva solo con Mg con un valor de p significativos, pero con el Cu, Mn, Zn, Pb, Ni, tuvo una correlación positiva baja, con valores de $p \geq 0,05$.

El Mg tuvo una correlación baja negativas con las respuestas Co, Mo, Cr Ba y positivas con Cu, Mn, Zn, Pb, Ni y Sr, pero en ambos con valores de $p \geq 0,05$.

El Cu tuvo una correlación fuerte positiva con el Mn, Ni, Ba y Sr con un p significativo y con el Co, Zn, Mo, Pb y Cr, tuvo una correlación positiva moderada, pero con un $p \geq 0,05$.

El Mn tuvo una correlación fuerte positiva con el Ni y Ba con un valor significativo, y con el Co, Zn, Pb, Cr y Sr tuvo una correlación moderada positiva, pero con un valor de $p \geq 0,05$.

El Co tuvo una relación fuerte positiva con el Mo con un valor significativo de p y con el Ni Pb, y Ba la correlación fue moderada positiva, pero con un valor de $p \geq 0,05$.

El Zn tuvo una correlación baja positiva con el Mo, Pb, Cr, Ni, Ba y Sr con un valor de $p \geq 0,05$.

El Mo tuvo una correlación fuerte positiva con el Ni, con un valor significativos de p y con el Pb, Cr, Ba y Sr hubo una correlación baja positiva con un valor de $p \geq 0,05$.

El Pb tuvo una correlación débil positiva con el Cr, Ni, Ba y Sr, con un valor de p no significativo ya que el valor de p fue $\geq 0,05$.

El Cr tuvo una correlación moderada positiva con el Ni, Ba y Sr, con un valor de $p \geq 0,05$. El Ni tuvo una correlación fuerte positiva con el Ba y Sr con un valor significativos de p para el primero y no significativo para el Sr. Finalmente, la correlación del Sr con el Ba fue fuerte positivo con un valor significativo de p.

Por lo tanto, al reconocer o identificar la relación entre las variables dependientes e independientes, se pudo deducir que la temperatura y el tiempo de residencia guardan una correlación significativa con las propiedades fisicoquímicas y el contenido de nutrientes. En caso de la concentración de metales tóxicos, existe una relación indirecta ya que como se observa en la tabla 42, la dependencia fue más con las propiedades fisicoquímicas y los nutrientes del biochar.

Tabla 42

Correlación de todas las variables

	T	ti	pH	CE	MO	%H	%COT	CN	%N	%P	%K	Ca	Mg	Mn	Cu	Co	Zn	Mo	Pb	Cr	Ni	Ba	
ti	-0,403																						
pH	0,950	-0,23																					
CE	0,603	-0,835	0,512																				
MO	-0,93	0,12	-0,945	-0,485																			
%H	-0,057	0,624	-0,086	-0,519	-0,070																		
%CO _T	-0,931	0,122	-0,946	-0,488	1	-0,070																	
CN	-0,855	0,107	-0,88	-0,495	0,966	0,072	0,964																
%N	-0,952	0,169	-0,959	-0,507	0,984	-0,123	0,986	0,907															
%P	-0,294	-0,129	-0,352	-0,299	0,549	0,183	0,544	0,731	0,408														
%K	0,255	0,316	0,189	0,043	-0,443	0,758	-0,446	-0,38	-0,453	-0,348													
Ca	-0,799	0,523	-0,764	-0,879	0,814	0,295	0,816	0,837	0,798	0,605	-0,317												
Mg	-0,488	0,295	-0,463	-0,744	0,624	0,143	0,625	0,699	0,577	0,762	-0,53	0,887											
Mn	-0,093	0,887	-0,013	-0,762	-0,141	0,678	-0,137	-0,147	-0,077	-0,217	0,416	0,372	0,248										
Cu	0,335	0,57	0,422	-0,48	-0,469	0,313	-0,463	-0,477	-0,398	-0,286	0,125	0,076	0,203	0,820									
Co	0,071	0,22	0,01	-0,19	-0,2	-0,079	-0,19	-0,382	-0,043	-0,637	0,07	-0,053	-0,127	0,500	0,583								
Zn	0,296	0,247	0,317	-0,467	-0,208	0,172	-0,204	-0,131	-0,213	0,278	-0,258	0,299	0,611	0,505	0,796	0,27							
Mo	-0,015	0,375	-0,138	-0,353	-0,125	0,362	-0,117	-0,231	-0,01	-0,454	0,415	0,096	-0,065	0,667	0,54	0,879	0,231						
Pb	-0,519	0,665	-0,512	-0,708	0,32	0,755	0,328	0,171	0,448	-0,307	0,092	0,523	0,26	0,72	0,464	0,755	0,178	0,806					
Cr	0,423	0,42	0,353	-0,185	-0,564	0,811	-0,563	-0,478	-0,563	-0,253	0,854	-0,181	-0,232	0,684	0,563	0,297	0,274	0,604	0,232				
Ni	0,064	0,666	0,068	-0,541	-0,278	0,480	-0,271	-0,35	-0,169	-0,463	0,412	0,145	0,037	0,908	0,831	0,798	0,461	0,886	0,798	0,696			
Ba	0,374	0,608	0,445	-0,355	-0,594	0,424	-0,589	-0,627	-0,506	-0,536	0,43	-0,117	-0,11	0,853	0,929	0,648	0,537	0,664	0,504	0,737	0,909		
Sr	0,542	0,412	0,625	-0,262	-0,655	0,219	-0,65	-0,654	-0,593	-0,362	0,146	-0,149	0,038	0,692	0,97	0,534	0,762	0,446	0,277	0,567	0,739	0,918	

4.3.3. Análisis de superficie de respuesta

La presente investigación se alineó al modelo de superficie de respuesta (RSM), ya que analiza el impacto simultáneo de las variables independientes (parámetros de operación) sobre la variable dependiente (calidad del biochar). Es decir, permitió ver el impacto que tiene los parámetros de operación (Temperatura y tiempo de residencia) sobre la calidad del biochar (propiedades fisicoquímicas, contenido de nutrientes, concentración de metales tóxicos y el contenido de microorganismos patógenos).

Es por ello como se aprecia en la tabla 43, una visión general de la calidad del ajuste del modelo utilizado para cada respuesta. En donde se obtuvieron valores de los coeficientes de determinación (R^2) para cada respuesta en un rango de 80,14 % hasta un 99,99 %; este valor indica el grado de concordancia y confiabilidad que existe entre los valores predichos. Por otro lado, los ajustes del Pb, Ni, Co y Mo, no lograban ajustarse a ningún modelo del RSM, por lo que de acuerdo al diagrama de Pareto (Anexo 10) se puede afirmar que los parámetros de temperatura (T) y el tiempo de residencia (ti), no influyen simultáneamente, ni de manera individual; no obstante, se realizaron ajustes con el modelo de ANOVA (modelos lineales generales), en donde presentaron un mejor ajuste (R^2) tal como se puede observar en la tabla 43; Sin embargo, estas respuestas (Ni, Pb, Mo y Co) no se incluyeron en la optimización de la investigación, ya que no se pueden utilizar dos modelos diferentes en la optimización por RSM.

Por lo tanto, el modelo RSM al permitirnos ajustar cada variable dependiente a una ecuación polinómica, fue evaluado principalmente con el valor del coeficiente de determinación R^2 . Por lo que de acuerdo a ello el % MO, % H, % CO_T , C/N, % P, % K, Ca, Mg, Fe, Zn, Al, Cr fueron ajustados a modelo de Cuadrado Completo, el % N y Cu se ajustó a un Modelo Lineal + Cuadrados, el pH y la CE, se ajustaron a un Modelo Lineal + Interacciones y finalmente el Mn y Ba se ajustaron a un modelo lineal.

Por otro lado, el Modelo RSM, nos dio un análisis de varianza de cada parámetro, los cuales pueden ser vistos en el anexo 11, esto con fin de análisis de manera general la influencia variable independientes sobre las variables dependientes. En base a lo mencionado, se concluyó que las variables independientes (parámetros de

operación) fueron significativos para los siguientes parámetros: pH, % H, % N, Mn y Al; es decir la interacción de la temperatura y el tiempo de residencia, solo afectan de manera significativa a estas 5 respuestas, pero para las demás respuestas, no son significativos su interacción.

Tabla 43

Evaluación del ajuste del modelo

Parámetros	S	R²
pH	0,157661	96,84 %
CE	0,566499	93,11 %
% MO	0,448127	99,70 %
% H	0,103927	99,92 %
% N	0,0489402	97,57 %
% P	0,160182	97,87 %
% K	0,0019069	98,91 %
Cu	13,6508	80,14 %
Zn	72,959	79,34 %
Pb	2,3	82,85 %
Cr	2,21203	95,28 %
Ni	1,2	91,33 %
% CO _T	0,289853	99,59 %
C/N	0,057208	99,77 %
Ca	1485,3	95,91 %
Mg	284,513	94,38 %
Fe	1626,05	88,22 %
Mn	11,4533	87,02 %
Co	1,1	51,21 %
Mo	0,6	89,47 %
Al	1768,1	99,99 %
Ba	10,0336	82,80 %
Sr	6,57746	85,59 %

A continuación, en la tabla 44 se presenta las ecuaciones para cada respuesta en función de la temperatura y el tiempo de residencia. En el caso de las respuestas que están bajo el modelo cuadrático completo, el cual permitió simular las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de residencia, ya que este modelo permite explorar de manera amplia un rango de combinaciones de los factores sin necesidad de realizar experimentos, lo cual ahorra tiempo y recursos.

Tabla 44

Ecuaciones de regresión para cada respuesta

Parámetro	Ecuación de regresión
pH	$4,629 + 0,00716 T + 0,0659 ti$
CE	$-15,0 + 0,000873 T + 0,538 ti - 0,000024 T*ti$
MO	$70,35 - 0,2228 T - 3,95 ti + 0,000206 T^2 + 0,00933 T*ti$
% H	$10,19 - 0,03389 T - 4,681 ti + 0,000020 T^2 + 0,015102 T*ti$
% CO _T	$38,86 - 0,1229 T - 2,139 ti + 0,000114 T^2 + 0,00504 T*ti$
C/N	$18,61 - 0,05095 T - 1,160 ti + 0,000051 T^2 + 0,003039 T*ti$
% N	$3,029 - 0,00652 T - 0,0292 ti + 0,000005 T^2$
% P	$20,19 - 0,0888 T - 1,978 ti + 0,000100 T^2 + 0,00541 T*ti$
% K	$-0,0262 + 0,000847 T - 0,00867 ti - 0,000001 T^2 + 0,000029 T*ti$
Ca	$140559 - 383 T - 5522 ti + 0,422 T^2 + 17,52 T*ti$
Mg	$28140 - 96,0 T - 1178 ti + 0,1128 T^2 + 3,59 T*ti$
Fe	$-22721 + 206 T + 4949 ti - 0,216 T^2 - 11,5 T*ti$
Mn	$456,0 + 16,12 ti + 0,0969 T$
Cu	$299 - 0,812 T + 11,43 ti + 0,00126 T^2$
Zn	$2881 - 10,27 T - 79 ti + 0,01318 T^2 + 0,301 T*ti$
Al	$-220822 + 581 T + 246462 ti + 0,046 T^2 - 613,8 T*ti$
Cr	$25,7 + 0,170 T - 6,61 ti - 0,000215 T^2 + 0,0236 T*ti$
Ba	$211,9 + 10,96 ti + 0,1730 T$
Sr	$199,6 - 0,412 T + 5,81 ti + 0,000680 T^2$

El moldeo RSM, al ser un modelo completo, arroja un análisis de varianza, en donde se representa la interacción de los factores con las respuestas (calidad del biochar). De acuerdo al anexo 11, se obtuvieron valores de p variables, como por ejemplo los

que presentaron valores de $p \leq 0,05$, pero en otras respuestas se observa valores de $p \geq 0,05$ el cual indica que la interacción de la temperatura y el tiempo de residencia no ejercen efectos significativos sobre esa respuesta, por lo que se termina concluyendo que no se puede rechazar la hipótesis nula

En resumen, se tiene que los factores (temperatura y el tiempo de residencia) son significativos, pero no sus interacciones, es decir que, para algunas respuestas, de acuerdo al objetivo de estudio, solo se debe considerar uno de estos factores, depende del objetivo del estudio.

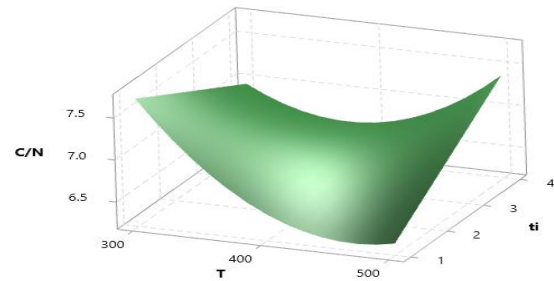
A continuación, se presentan los gráficos de superficie de respuesta, en donde se podrá visualizar de una mejor manera el comportamiento de cada respuesta en función de la temperatura y tiempo de residencia.

En la figura 34, en donde se muestran las 6 propiedades fisicoquímicas del biochar, en donde el % H y el pH, de acuerdo al ajuste del modelo lineal + interacciones, presentan comportamientos en donde el % H presenta un nivel máximo a una temperatura de 400°C y un tiempo de residencia de 4 horas y el pH presenta un nivel alto a la temperatura de 500 °C y tiempo de residencia de 1 hora. Con respecto a la relación C/N, % CO_T, y el % MO, en donde se observan la formación de superficies de cresta descendente, es decir presentan un punto mínimo, fuera de la región experimental. Con respecto a la CE, presenta una superficie tipo silla en donde la respuesta aumenta a partir del centro de la superficie, según la dirección tomada.

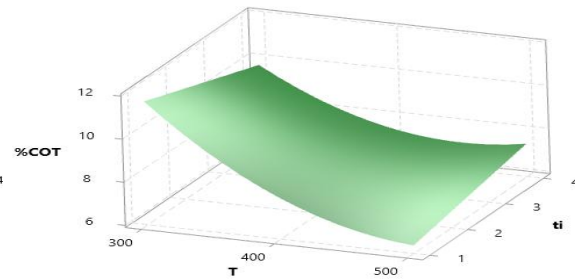
Figura 34

Gráficas de superficie de respuesta de las propiedades fisicoquímicas del biochar

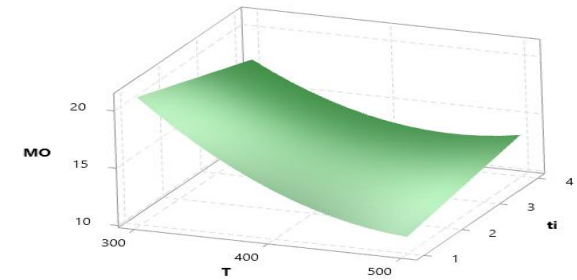
Gráfica de superficie de C/N vs. t_i ; T



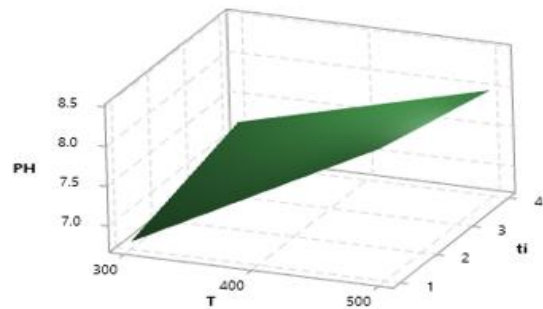
Gráfica de superficie de %COT vs. t_i ; T



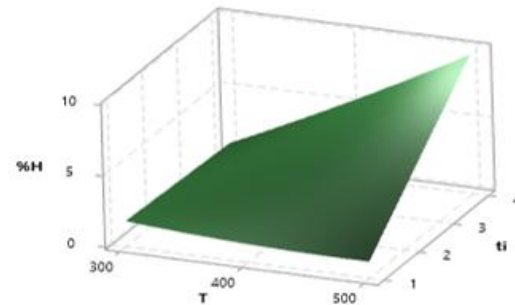
Gráfica de superficie de MO vs. t_i ; T



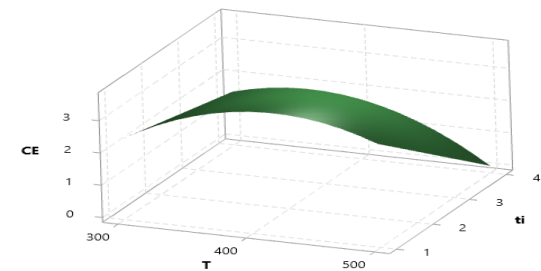
Gráfica de superficie de PH vs. t_i ; T



Gráfica de superficie de %H vs. t_i ; T



Gráfica de superficie de CE vs. t_i ; T



Con respecto a la figura 35, se muestra una pendiente descendente con respecto al % N, ya que disminuye con la temperatura y el tiempo de residencia. En los gráficos del % P, Ca, Zn, Cu y Mg, en donde se observaron una superficie de cresta descendente con una tonalidad blanca, el cual indica el punto mínimo de la respuesta. Por otro lado, la superficie formada para el Mn, describe un modelo lineal, en donde la respuesta aumenta con el tiempo de residencia. Finalmente, con el % K y Fe, los cuales presentaron una superficie tipo silla en donde la respuesta aumenta a partir del centro de la superficie, según la dirección tomada.

La figura 36, se muestra cuatro metales tóxicos, en donde se observó un modelo lineal con una superficie de cresta ascendente formada por los valores del Sr; la respuesta presenta un mínimo fuera de la región experimental, lo que indica que a medida que el color oscurece la concentración Sr aumenta. Por otro lado, la superficie que se ha formado para el Ba es de un modelo lineal, lo que indica que la respuesta aumenta con la temperatura y el tiempo de residencia. Con respecto al Al, presentó una superficie de tipo silla, el cual aumenta a partir del centro de la superficie. Finalmente, el Cr presentó una superficie de tipo cresta descendente, en donde la respuesta presenta un nivel mínimo fuera de la región experimental.

El diseño de experimentos (DOE), además de permitir la aplicación del modelo de RSM, permite también generar un análisis general de los factores (T° y t_i) sobre las respuestas (propiedades fisicoquímicas, contenido de nutrientes y concentración de metales tóxicos), mediante el análisis de medias. Por lo que de acuerdo a la figura 37, se observaron que todas las medias (promedio) de los parámetros individuales no varían de manera significativa, pero para el caso del Ca, Fe y Al, si se presentan picos ascendentes que significan que la media (promedio) de las variables independientes aumenta significativamente en el tratamiento TP300-04, siendo este tratamiento el que más alto contenido de Ca, Fe y Al presenta.

Figura 35

Gráficas de superficie de respuesta del contenido de nutrientes del biochar

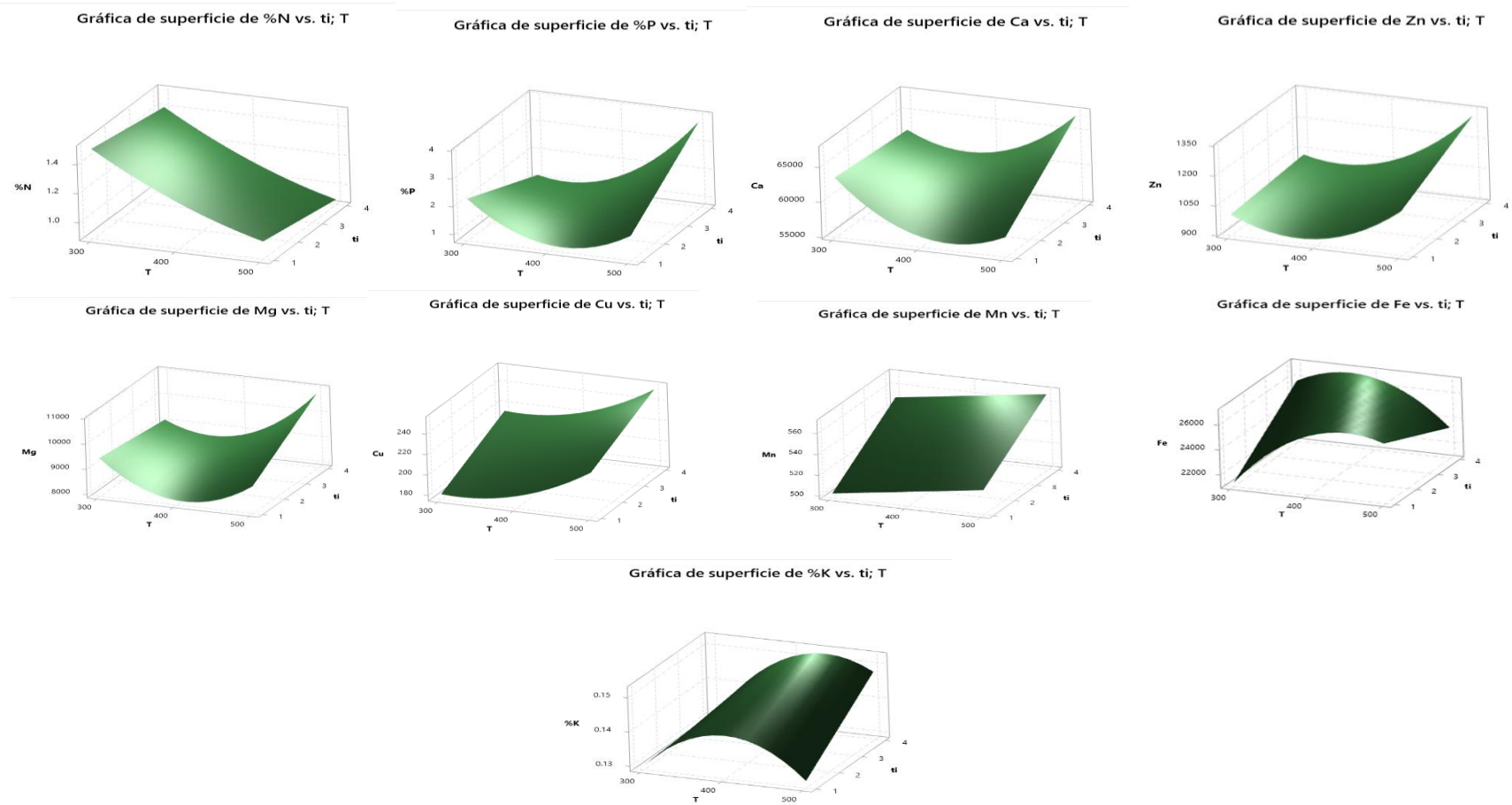
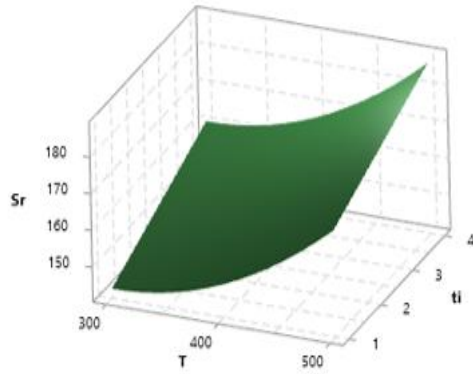


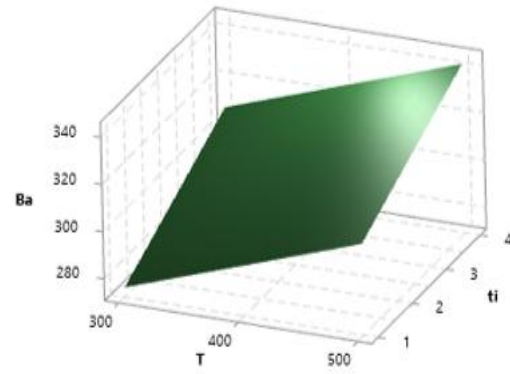
Figura 36

Gráficas de superficie de respuesta de las concentraciones de metales tóxicos del biochar

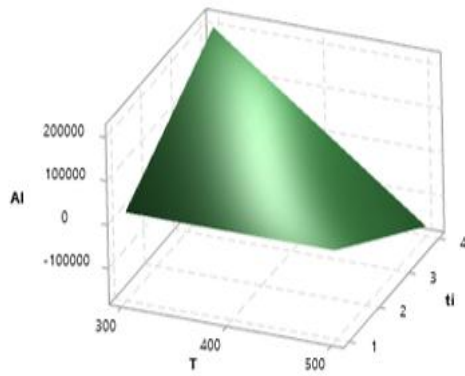
Gráfica de superficie de Sr vs. t_i ; T



Gráfica de superficie de Ba vs. t_i ; T



Gráfica de superficie de Al vs. t_i ; T



Gráfica de superficie de Cr vs. t_i ; T

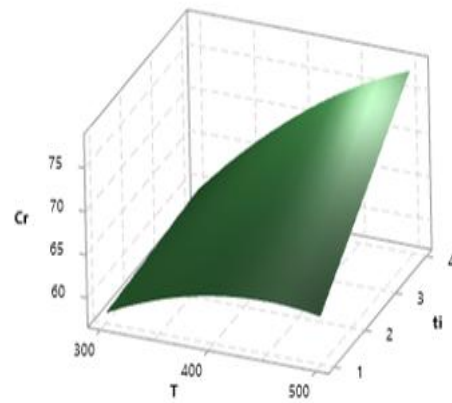
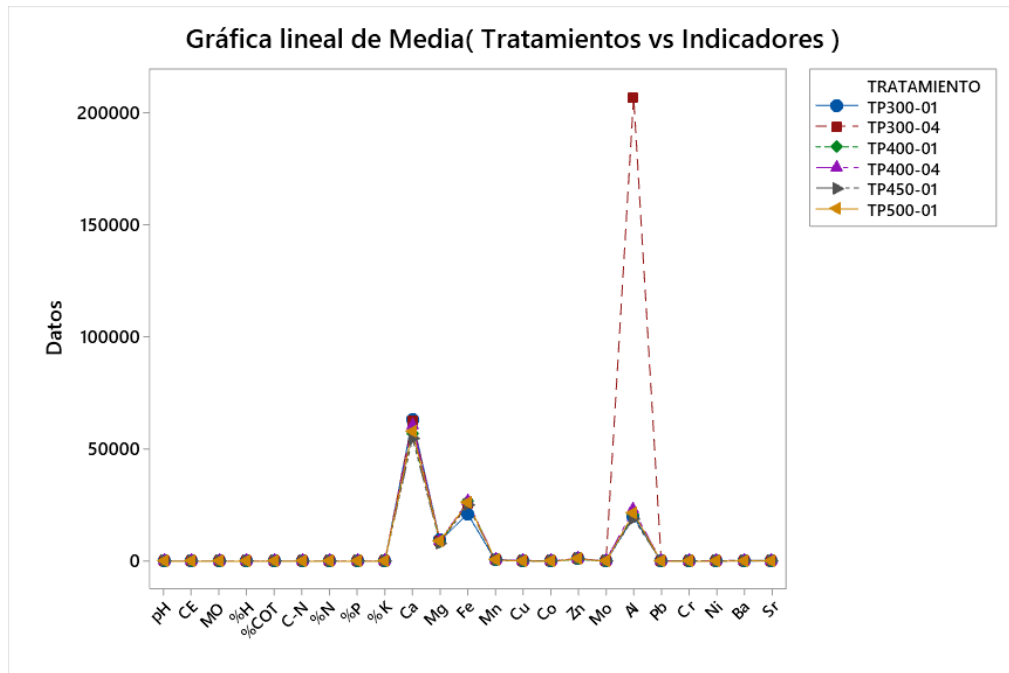


Figura 37

Análisis generales del efecto de la temperatura y el tiempo de residencia sobre las respuestas



Nota. Se puede observar que, en los diferentes tratamientos, los valores de las medias o promedios no varían significativamente en casi todas las respuestas (pH, % H, % MO, etc.), sin embargo, se logra ver que el contenido de Ca, Fe y Al, son los que mayor concentración presentan en el tratamiento TP300-04, siendo este un indicador de descarte de este tratamiento ya que se busca obtener un biochar de calidad, con las cantidades necesarias de nutrientes.

4.3.4. Optimización del proceso con RSM

La propuesta de optimización del proceso se muestra en la tabla 45, en donde se buscó maximizar las propiedades fisicoquímicas, contenido de nutrientes y minimizar las concentraciones de los metales tóxicos; de acuerdo a las condiciones presentadas, el modelo RSM nos proporcionó datos óptimos de los parámetros de operación (temperatura y tiempo de residencia) para la obtención de un biochar de calidad a:

Una temperatura de 333 °C y un tiempo de residencia de 1 hora

Tabla 45*Optimización de los parámetros del biochar*

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Sr	Mínimo		140,8	172,0	1	1
Ba	Mínimo		269,6	322,0	1	1
Cr	Mínimo		57,6	71,0	1	1
Al	Mínimo		18966,0	207030,0	1	1
Zn	Mínimo		929,8	1134,0	1	1
Cu	Mínimo		176,2	223,0	1	1
Mn	Mínimo		500,2	563,0	1	1
Fe	Mínimo		21114,6	26749,0	1	1
Mg	Mínimo		7994,0	9360,0	1	1
Ca	Mínimo		54744,0	63136,0	1	1
% K	Máximo	0,13	0,1		1	1
% P	Máximo	0,82	2,2		1	1
% N	Máximo	1,02	1,5		1	1
C/N	Máximo	6,30	7,7		1	1
% COT	Máximo	6,35	11,6		1	1
% H	Máximo	0,97	5,2		1	1
MO	Máximo	11,40	20,9		1	1
CE	Máximo	1,50	4,0		1	1
pH	Objetivo	6,80	9,0	10	1	1

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**4.4.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados**

En esta investigación se tuvo como primera hipótesis específica, afirmar que las características los biosólidos del tratamiento primario cumplen con el DS N° 015-Debido a 2017-Vivienda, excepto los parámetros de higienización. Por lo tanto, para realizar una prueba estadística con un nivel de confiabilidad del 95 %, se debe trabajar con un tamaño de muestra de por lo menos 5 muestras. No obstante, sólo se realizó un análisis de éstos biosólidos primarios, debido a que existen también biosólidos provenientes del tratamiento secundario, al cual se realizó su análisis (Anexo 16) para poder escoger el biosólido que cumpla con la estabilidad (% SV/ST

≤ 60) y con la menor cantidad de metales tóxicos, ya que afectan directamente a la calidad del biochar; así mismo se tuvieron restricciones económicas, los cuales son comunes en estudios a escala de laboratorio. Sin embargo, el contraste con el DS N° 015-2017-Vivienda, no necesita un tamaño de muestra amplio, debido que el objetivo no es predecir parámetros poblacionales (estadísticas poblacionales), por el contrario, sólo es verificar el cumplimiento de esta normativa específica, específicamente para los parámetros de higienización los cuales efectivamente se incumplían y se excedían. Es por ello que se dio énfasis en tomar una muestra representativa de la población, mediante el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos (RM N° 093-208-Vivienda).

Se formuló la segunda hipótesis específica, el dónde se afirmó que los parámetros de operación óptimos para la obtención de biochar, serían a la temperatura de 500 °C y un tiempo de residencia de 1 hora (TP500 – 01). Previamente se hizo una prueba normalidad de Shapiro Wilk con un valor de $p > 0,05$ en todos los parámetros a excepción del Aluminio y el Hierro, con un 95 % de confianza. Además, se realizó un análisis de Correlación de Pearson (prueba paramétrica), el cual permitió ver la relación lineal entre todas las respuestas, presentadas en la tabla 42 de resumen y de manera más detallada de par en par en el anexo 9, en donde se observa además el valor de significancia (valor de p), para cada par de variables a excepción de los dos componentes ya mencionados. Sin embargo, debido a que el modelo RSM es flexible, no es indispensable que las variables sean estrictamente paramétricas, lo cual no hubo problema al aplicar este modelo. Por lo que en base a los resultados presentados en la tabla 45, en donde se realizó la optimización del proceso de pirólisis lenta, mediante el Modelo de Superficie de Respuesta (RSM), a través del ajuste de modelos lineales, interacciones, cuadráticos completos, con coeficientes de determinación (R^2) concordantes y confiables desde un 80,14 % a 99,92 %. No obstante, también se realizó un ajuste de modelo ANOVA, adicional en los siguientes parámetros como Ni, Pb, Mo y Co, ya que no se ajustaban a ningún modelo estadísticos del Modelo de Superficie de Respuesta (RSM) y nos daban valores de R^2 significativamente menores al 50 %. Es por ello que la optimización se dio sobre 19 parámetros, los cuales se observan en la tabla 45, en donde se programó para obtener los máximos datos de las características fisicoquímicas y contenido de nutrientes a excepción del Ca, Fe, Mn, Cu y Zn, los cuales se concentraron en mayor proporción en cada tratamiento, por otro lado, puso como meta la minimización del contenido de todos los metales como Sr, Ba, Cr y Al, dándonos con un intervalo de

confianza (CI) del 95 %, que el tratamiento óptimo para conseguir lo solicitado al programa, es a una temperatura de 333 °C por un tiempo de residencia de 1 hora.

La tercera hipótesis específica planteada fue afirmar que la calidad del biochar varía significativamente con las temperaturas altas y el tiempo de residencia cortos. De acuerdo a los resultados mostrados en el anexo 11 en donde se halla una tabla de análisis de varianza de cada respuesta, en donde de forma resumida explica el efecto significativo del modelo ajustado y el efecto significativo que tienen los parámetros de operación, es decir la temperatura y el tiempo de residencia de forma individual o su interacción sobre las variables dependientes. Primero se analizó la temperatura a la cual se obtuvieron mejores resultados y como ya se mencionó, se lograron obtener con el primer tratamiento TP300 - 01 y además tomando de referencia la optimización es decir a una temperatura baja y un tiempo de residencia bajo. Segundo para saber si los parámetros de operación influyen sobre las variables independientes, se analizó la tabla de Análisis de varianza, en donde se muestra que la mayoría presentó un valor de $p > 0,05$ lo que significa que ambos parámetros de operación no intervienen significativamente sobre la calidad del biochar, excepto en el %H y Al ya que presentaron valores de $p < 0,05$ y de algunas otras variables como pH y el %N que son afectados por la temperatura y para el caso del Ba y Mn que son más afectados por el tiempo de residencia. En el anexo 10, se muestra algunos Diagramas de Pareto el cual explica de manera gráfica que los parámetros de operación no influyen en las variables dependientes, con un nivel de significancia del 95 %.

Por último, la hipótesis general planteada que afirma que se puede obtener biochar a partir de los biosólidos de la PTAR “La Totorá”, a través del proceso de pirólisis lenta, en donde de acuerdo a las hipótesis específicas planteadas, es correcto aceptar la hipótesis general ya que se ha logrado obtener biochar a partir de los biosólidos de la PTAR “La Totorá”, ya que cumple con las características deseadas.

4.4.2. Contrastación de los resultados con estudios similares

Referente a las propiedades fisicoquímicas del biochar presentadas en la tabla 31, dependen fundamentalmente de la composición de la materia prima es decir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totorá”, en donde el pH del biosólido fue ácido (5,8) mientras que en el biochar se obtuvieron pH alcalinos (7,2 - 8,3), con referente a la conductividad eléctrica en el biosólido fue de 6,1 dS/m y se redujo a 1,7 dS/m,

así mismo la humedad como se espera disminuye de un 66,3 % a 0,97 %, finalmente la disminución de la materia orgánica , depende básicamente del aumento de la temperatura, por lo que en concordancia con los resultados de Raj et al. (2021) y Hansen et al. (2023).

Referente al contenido de nutrientes (macroelementos y microelementos), presentados en la tabla 34, pero debido a que en los biosólidos solo se tienen el resultado de los nutrientes esenciales como es el % N, ya que como se explicó anteriormente se debe al incremento de la temperatura y con ello a la volatilización de sales amoniacales, concordando con los resultados de estudios de Hansen et al. (2023), sin embargo también se consideró al Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Co, Zn y Mo, debido al gran aporte e importancia que tienen sobre los suelos agrícolas, los cuales si bien cierto en su mayoría cumplen con las normas nacionales e internacionales, a excepción del Cu y el Zn, sin embargo concuerda con los resultados en la investigación de Yuan et al. (2015) y Hansen et al. (2023), en donde este último se menciona que ni los biosólidos producidos en ese lugar no podían cumplir con los mismos requisitos pero fueron aprobados para su uso agrícola en países como Dinamarca y Alemania.

En referente a la concentración de metales pesados o tóxicos, considerados este último término en el sector agrícola, en donde como se muestra en la tabla 35, se observa que en todos los tratamientos el incremento de estos metales, siguiendo el siguiente orden Ba > Sr > Cr > Pb > Ni, pero además se observa la eliminación del As y el Cd, los cuales se consideran los más tóxicos para los suelos agrícolas, además como se puede observar en la tabla 40, todos estos metales están dentro de los lineamientos nacionales e internacionales, concuerdan con las investigaciones preliminares de Goldan et al. (2022) y Khalifa et al. (2022).

Lo concerniente al contenido de estos microorganismos patógenos presentes en los biosólidos sobrepasan los límites del DS N° 015-2017-Vivienda, por lo que, de los 06 tratamientos realizados, solo se analizaron dos tratamientos, debido a que se asegura una completa eliminación al someterlos a temperaturas mayores a 300 °C. La E. Coli se elimina a 70 °C pero a temperatura de 300 °C a 400 °C, se espera su total eliminación, los coliformes totales y termotolerantes se eliminan completamente a temperaturas de 300 °C a 500 °C por ende se comparó los tratamientos TP300-04 y TP500-01, en donde como se esperaba se redujo de manera satisfactoria el

contenido de E. Coli (0,0 UFC/g ST), Coliformes totales y termotolerantes (< 3 NPM/g ST), Huevos Helmintos (< 2 H.H./ 4 g ST) y se añadió un análisis más de Salmonella el cual dio un resultado de < 3 NMP/g ST, deduciendo por lo tanto que la concentración de microorganismos patógenos de los demás tratamientos estén alrededor de esos resultados.

En base al rendimiento, consistentes con estudio previos de Khalifa et al. (2022) y Yuan et al., (2015) en donde concluyeron que el tiempo de residencia, es un factor crucial y que en su aplicación en condiciones del proceso de pirólisis lenta son las que mayores rendimientos trae y que con la temperatura de pirólisis el rendimiento disminuye a media que esta aumenta, por lo que en el anexo 12 se presenta una propuesta de producción de biochar para fines comerciales.

CONCLUSIONES

1. Las características del biosólido primario de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”, mostró una densidad aparente $\leq 7 \text{ g/cm}^3$, una CE $> 5 \text{ dS/m}$, $\% \text{ N} < 3 \%$, $\% \text{ P} > 1 \%$ y $\% \text{ K} < 1 \%$, por lo que conforme al Reglamento de fertilizantes (RM N° 178-2023-MIDAGRI), la CE y el $\% \text{ N}$ no cumplen, ya que el primero se excede y el segundo no llega a la cantidad mínima. Por otro lado, con respecto al contenido de metales (parámetros toxicológicos), están el Arsénico con 13 mg/kg ST , Cadmio con $7,75 \text{ mg/kg ST}$, Cromo con $8,75 \text{ mg/kg ST}$, Cobre con $1,75 \text{ mg/kg ST}$, Plomo con $2,25 \text{ mg/kg ST}$, Zinc con 44 mg/kg ST y sin presencia de Níquel; estos valores fueron comparados con el del DS N°015-2017-Vivienda y con la RM N°0178-2023 MIDAGRI, en donde el Arsénico, no cumple con la concentración mínima de la RM N°0178-2023 MIDAGRI. Finalmente, con respecto al contenido de microorganismos patógenos (parámetros de higienización), en donde los biosólidos contenían $6,21 \times 10^{10} \text{ NMP/g ST}$ de Coliformes totales; $2,78 \times 10^9 \text{ UFC/g ST}$ de E. Coli, $4,61 \times 10^9 \text{ NMP/g ST}$ de Coliformes termotolerantes y 19 HH/4 g ST de Huevos Helmintos, los cuales como se muestra en la tabla 38, se compararon con el del DS N° 015-2017-Vivienda y con la RM N° 0178-2023 MIDAGRI, incumpliendo en ambos casos con la concentración mínima. En base a estos análisis se pudo comprobar que los biosólidos de la PTAR “La Totorá”, al no cumplir con la concentración mínima de As y microorganismos patógenos, no pueden ser aprovechados como fertilizantes ni enmendadores orgánicos, tal como lo detalla el DS N° 015-2017-Vivienda y la RM N° 0178-2023 MIDAGRI.
2. De acuerdo a la aplicación del método de pirólisis lenta, se realizaron seis tratamientos, en donde el rango de trabajo de temperatura fue de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a $500 \text{ }^\circ\text{C}$ y los tiempos de residencia fueron de 1 hora y 4 horas, tal como se detalla en la tabla 15; es por ello que en base a los rendimientos mostrados en la tabla 30, se define que los parámetros de operación óptimos es del tratamiento TP300-01, es decir a un temperatura de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ y un tiempo de residencia de 1 hora, ya que se obtuvo un rendimiento del $96,2 \%$, lo que lo hace económicamente factible debido al tiempo que se demora en obtener el biochar en este tratamiento. Así mismo de acuerdo al proceso de optimización con el Modelo de Superficie de Respuesta (RSM), la temperatura óptima de producción nos dio a una temperatura de $333 \text{ }^\circ\text{C}$ y un tiempo de residencia de 1 h.

3. La determinación de la calidad del biochar, se realizaron en base a las propiedades fisicoquímicas, contenido de nutrientes, concentración de metales tóxicos y contenido de microorganismos patógenos, alineándonos a las normas nacionales e internacionales del biochar que se tomaron en consideración tales como; DS N° 011-2017-MINAM-ECA, RM N° 0178-2023-MIDAGRI, IBI 2015 y la normas del EBC. En donde el trabajo de investigación presentado cumplió con lo señalado en el objetivo principal ya que se obtuvo de manera satisfactoria el biochar de calidad, de tipo alcalino ($\text{pH} > 7$), bioestimulante por el contenido del %MO, resistente a la descomposición y mayor vida útil por el %H y con un alto contenido de macronutrientes (%P, Ca y Mg) y micronutrientes (Cu, Fe, Mo, Zn y Mn), que lo hace aplicable en el sector agrícola como enmendador de suelo y fertilizante de tipo mineral.
4. Con vista al objetivo general, el trabajo de investigación presentado cumplió con lo señalado, ya que se obtuvo de manera satisfactoria el biochar a partir de los biosólidos primarios de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” mediante el procedimiento de pirolisis lenta, variando la temperatura y el tiempo de residencia. El biochar obtenido, se logró evaluar con las normativas nacionales e internacionales. Los resultados presentados indicaron que se puede obtener un biochar de calidad a una temperatura y tiempo de residencia bajos ya que las características fisicoquímicas, concentración de nutrientes, metales tóxicos y microorganismos patógenos resultaron favorables para el reaprovechamiento como enmendador y fertilizante del suelo, demostrando que los biosólidos pueden ser valorizados mediante su transformación en biochar de manera sostenible.

RECOMENDACIONES

1. Para la determinación de las características del biosólidos del tratamiento primario de la PTAR “La Totorá”, utilizar los implementos de seguridad necesarios para su manipulación, de lo contrario puede ser perjudicial para la salud, debido a la alta carga de microorganismos, así mismo se recomienda aislar el biosólido de los niños y adultos mayores, por lo que se debe almacenar en recipientes cerrados y solo se debe abrir para su manipulación.
2. Para la determinación de los parámetros de operación, se puede tomar un rango más amplio de temperatura y tiempo de retención ya que esto podría obtener resultados más precisos, que nos puede ayudar a tener un mejor biochar. En base a ellos, se recomienda realizar ensayos a temperaturas más elevadas, ya que como menciona Hansen et al. (2023), en su investigación, posibilita la inmovilización de los metales pesados, lo cual es importante si se dese aprovechar el biochar en el sector agrícola. Así mismo se recomienda realizar un estudio en donde se evalúen otros parámetros de operación como la materia prima, la velocidad de calentamiento, procedimiento de pirólisis rápida, entre otros.
3. En la determinación de la calidad del biochar, se recomienda compararlo con otro producto similar, ya que con esto se puede mejorar la presentación del producto y ser competitivo en el mercado.
4. Finalmente el biochar obtenido, se recomienda utilizarlo como enmendador de suelo y solo como complemento de los fertilizantes debido al alto contenido de micronutrientes y macronutrientes, ya que de acuerdo al Anexo 08, en donde se realizó un prueba en plántulas de lechuga y con semillas se betarraga, se observaron un crecimiento buenos dentro de los 30 días con respecto a las plántulas, sin embargo estas fueron muriendo por el exceso de nutrientes, sin embargo para el crecimiento de las semillas, en tierra con grasa, se pudo observar el rápido crecimiento y desarrollo del mismo. Además, para futuros trabajos de investigación se recomienda realizar la aplicación del biochar en plantas de tallo corto, en donde se pueda evaluar si los metales se llegan a movilizar en las plantas o como se menciona en su investigación Castelo y Apeña (2022), Khan et al. (2023) y Hansen et al. (2023).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrología (2018). *Biochar*. <https://agrologia.wordpress.com/2018/08/12/biochar-biocarbon/>

Apeña, D. & Castelo, J. (2022). *Biocarbon de lodos para la inmovilización del plomo en suelos del AA.HH. Virgen de Guadalupe, Mi Perú, 2022*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio UNAC. <https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7722/TESIS%20-%20APE%C3%91A%20-%20CASTELO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Arispe, C., Yangali, J., Guerrero, M., Lozada, O., Acuña, L. y Arellano, C. (2020). *La Investigación Científica*. Departamento de Investigación y Postgrados Universidad Internacional de Ecuador Guayaquil – Ecuador. (1ª ed.). <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4310/1/LA%20INVESTIGACI%C3%93N%20CIENT%C3%8DFICA.pdf>

Bell et al. (2020). *La Gestión del suelo y los servicios ecosistémicos: Guía de gestión para Perú*. EO4cultivar. UK Space Agency International Partnership Programme. <https://data.jncc.gov.uk/data/1999d9a6-d3ca-4b80-aac2-8dfc6d7b13b3/eo4c-peru-gestion-del-suelo-es.pdf>

Candela Lévano, G. (2020). *Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4422/candelalevano-gianella-milagros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cao, J., Jiang, Y., Tanc, X., Li, L. Cao, S., Dou, J., Chen, R., Huc, X., Qiu, Z., Li, M., Chen, Z. & Zhu, H. (2024). *Sludge-based biochar preparation: pyrolysis and co-pyrolysis methods, improvements, and environmental applications [Preparación de biocarbón a partir de lodos: métodos de pirólisis y copirólisis, mejoras y aplicaciones ambientales]*.373.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236124014133#:~:text=La%20carbonizaci%C3%B3n%20en%20seco%20de,determinar%20el%20enfoque%20m%C3%A1s%20%C3%B3ptimo.>

Castelo, S y Apeña, D. (2022). *“Biocarbon de lodos para la inmovilización del plomo en suelos del AA.HH. Virgen de Guadalupe, mi Perú, 2022.* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio UNAC. <https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7722/TESIS%20-%20APE%C3%91A%20-%20CASTELO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chuquiyauri Solano, M. (2021). *Efectos del biochar de cascarilla de oriza sativa (arroz) sobre Daphnia magna (Pulga de agua) y Lactuca sativa (Lechuga), en fase de laboratorio, Lima – Perú.* [Tesis de título profesional de la Universidad Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6c52a5d3-50c5-4f69-8b2a-01ae90e67936/content>

ClimateTrade (2023) *¿Qué es el Biochar, el Oro Negro de la Naturaleza, ¿y por qué la gente está tan emocionada por su potencial?* <https://climatetrade.com/es/que-es-el-biochar-y-por-que-la-gente-esta-entusiasmada-con-su-potencial/>

Collivignarelli, C., Canato, M. Abba, A. & Miino, M.C. (2019). *Biosólidos: Biosolids: What are the different types of reuse? [¿Cuáles son los diferentes tipos de reutilización?].* Journal of cleaner production. 238. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619327106?via%3Dihub>

Decreto Supremo N° 015-2017-Vivienda. (2017). *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.* Presidente de la República. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-015-2017-VIVIENDA.pdf>

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (s.f.). *Biochar.* <https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northwest/topic/biochar>

Díaz, A. & Pérez, M. (2021). *Biochar de Lodos de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para Remediar Suelos Contaminados con Hidrocarburos en Huachipa, 2021.* [Tesis de título profesional, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/72584/Diaz_AJA-P%C3%A9rez_PMA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

FLOWEN. (09 de diciembre, 2022). *Tratamiento anaeróbico de aguas residuales*. [https://flower.com.pe/tratamiento-anaerobio-de-aguas-residuales/#:~:text=Un%20sistema%20de%20tratamiento%20anaerobio,nutrientes%20\(N%20y%20P\).](https://flower.com.pe/tratamiento-anaerobio-de-aguas-residuales/#:~:text=Un%20sistema%20de%20tratamiento%20anaerobio,nutrientes%20(N%20y%20P).)

Goldán, E., Nedeff, V., Barsan, N., Culea, M., Tomozei, C., Lehadus, M. & Monsegutu, E. (2022). *Evaluation of the Use of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment-A Review [Evaluación del uso de biochar de lodos de depuradora como enmienda del suelo: una revisión]*. *Revista Sostenibilidad*. 14(9), 5309. <https://doi.org/10.3390/su14095309>

González, J. y Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. (1ª ed.) (Enfoque Consulting EIRL Ed.). https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf

Guerra Laura, P. (2015). *Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana*. [Tesis de título profesional de la Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a4196dd0-c44f-428c-82a1-af40363dada7/content>

Hansen, D.S., Turcios, A. E., Klamt, A., Wieth, C., Reitzel, K., Thomsen, H. & Papenbrock, J. (2023). *Characterization of biochar produced from sewage sludge and its potential use as a substrate and plant growth improver [Caracterización del biocarbón producido a partir de lodos de depuradora y su potencial uso como sustrato y mejorador del crecimiento vegetal]*. *Journal of environmental management*. 348, 119-271. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479723020595>

Hernández, R. Fernández, C. & Bautista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6ª edición). <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Bautista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

Huallpa, H. (2023). *Remoción de metales pesados de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” Ayacucho, utilizando la alfalfa (medicago sativa)*. [Tesis de título de maestría, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio UNSCH. https://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/5945/1/TM%20Q18_Hua.pdf

Huanqui, A. (2018). *Aprovechamiento de biosólidos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual en una unidad operativa minera – 2018*. [Tesis de título profesional, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b5e52583-e55d-404c-b9dd-c96966d9d3d1/content>

International Biochar Initiative (BI) (2015). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil*. [Archivo PDF]. http://www.biocharinternational.org/sites/default/files/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf

Khalifa, S., Mackey, H., Ansari, T & McKay, G. (2022). *Pyrolysis of Biosolids to Produce Biochars: A Review* [Pirólisis de biosólidos para producir biocarbones: una revisión]. *Sustainability*, 14(15), 9696. <https://doi.org/10.3390/su14159626>

Khan, R., Shukla, S., Kumar, M., Zorro, A. & Pandey, A. (2023). *Sewage sludge derived biochar and its potential for sustainable environment in circular economy: Advantages and challenges* [Biochar derivado de lodos de depuradora y su potencial para un medio ambiente sostenible en la economía circular: ventajas y desafíos]. *Chemical engineering journal*. 471,144-495. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894723032266>

Li, D., Shan, R., Jiang, L., Gu, J., Zhang, Y., Yuan, H. & Chen, Y. (2022). A review on the migration and transformation of heavy metals in the process of sludge pyrolysis [Una revisión sobre la migración y transformación de metales pesados en el proceso de pirólisis de lodos]. 185. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922002956?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=94dd2c3318c1b508

Mendoza Geney, L. (2016). *Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio*. [Tesis de doctorado]. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58938/91511684.2017.pdf?sequence=1>

Ministerio de Vivienda, construcción y saneamiento. (2020, 7 de octubre). Conozca las PTAR que se plantea ejecutar en el país mediante asociaciones público privadas [Nota de prensa]. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/noticias/306162-conozca-las-ptar-que-se-planea-ejecutar-en-el-pais-mediante-asociaciones-publico-privadas>

Mossa et al. (2020). *El impacto de la aplicación de biosólidos a largo plazo (>100 años) en la dinámica de los metales del suelo*. Revista de Ciencia del Medio Ambiente Total. 720. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720309517>

Mucha, M. (2022). Evaluación de la eficiencia del tratamiento de lodos residuales de la PTARD “La Totorá”- Huamanga por vermiestabilización para la reducción de los parámetros de higienización. [Tesis de título profesional, Universidad San Ignacio de Loyola]. Repositorio USIL. <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/2175bdb3-1728-4d21-a9e6-23f7916b9870/content>

Raj, A., Yadav, A., Arya, S., Sirohi, R. Kumar, S., Rawat, A.P., Thakur, R.S., Patel, L.B., & Pandey, A. (2021). *Preparation, characterization and agri applications of biochar produced by pyrolysis of sewage sludge at different temperatures [Preparación, caracterización y aplicaciones agrícolas del biocarbón producido por pirólisis de lodos de depuradora a diferentes temperaturas]*. Science of the total environment. 795. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721037943#bb0310>

Ramírez, J. (2023). *Influencia del biochar en suelos agrícolas degradados de la provincia de La Mar – Ayacucho, 2021*. [Tesis de título profesional, Universidad Continental]. Repositorio Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13147/1/IV_FIN_107_TE_Ramirez_Palomino_2023.pdf

Rincón, N., Ramirez, W., Mojica, L., Blanco, D., Giraldo, L., y Moreno, J. (2014). *Obtención de carbones activados a partir de semillas de eucalipto, por activación química con H₃PO₄. Caracterización y evaluación de la capacidad de absorción de fenol desde solución acuosa*. Ingeniería y competitividad. 16. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332014000100018

SEDA AYACUCHO. (2022). *Manual de operación y mantenimiento*. [Archivo PDF]. <https://es.scribd.com/document/691993862/6-MANUAL-DE-O-M>

Sharma, A. K., Ghodke, P. K. & Chen, W. (2024). *Progress in green adsorbent technologies from sewage sludge for wastewater remediation and carbon capture: A sustainable approach towards clean environment [Progreso en tecnologías de adsorbentes verdes a partir de lodos de depuradora para la remediación de aguas*

residuales y la captura de carbono: un enfoque sostenible hacia un medio ambiente limpio]. *Current opinión in Green and sustainable chemisty*. 46. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245222362400004X>

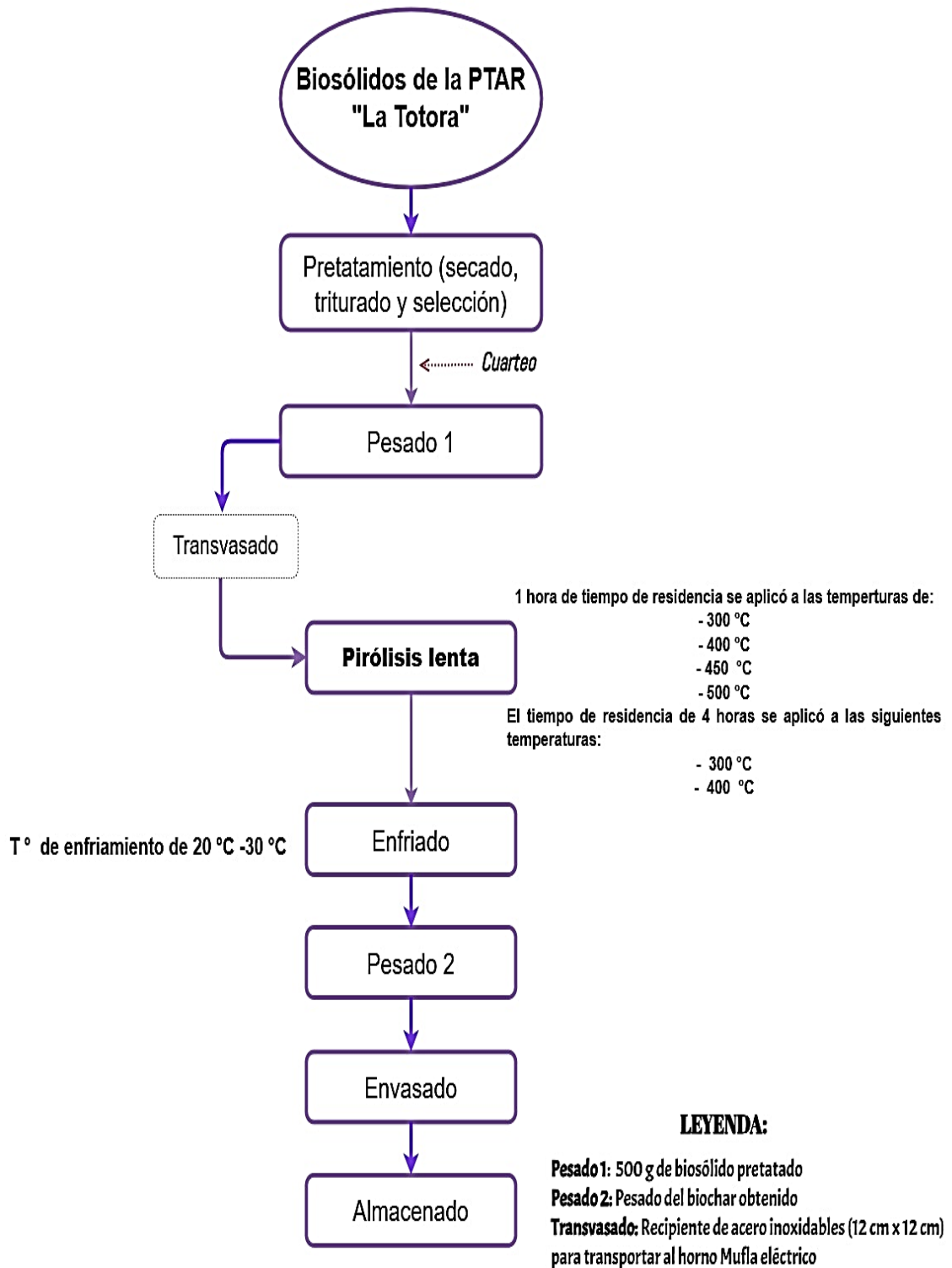
SUNASS. (2024). Lista de registro de PTAR. <https://aplicaciones.sunass.gob.pe/adm-ptar/ptar/listado-avanzado>

Yuan, H., Lu, T., Huang, H., Zhao, D., Kobayashi, N. & Chen, Y. (2015). *Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge [Influencia de la temperatura de pirólisis en las propiedades físicas y químicas del biocarbón elaborado a partir de lodos de depuradora]*. 112, 284-289. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016523701500>

ANEXOS

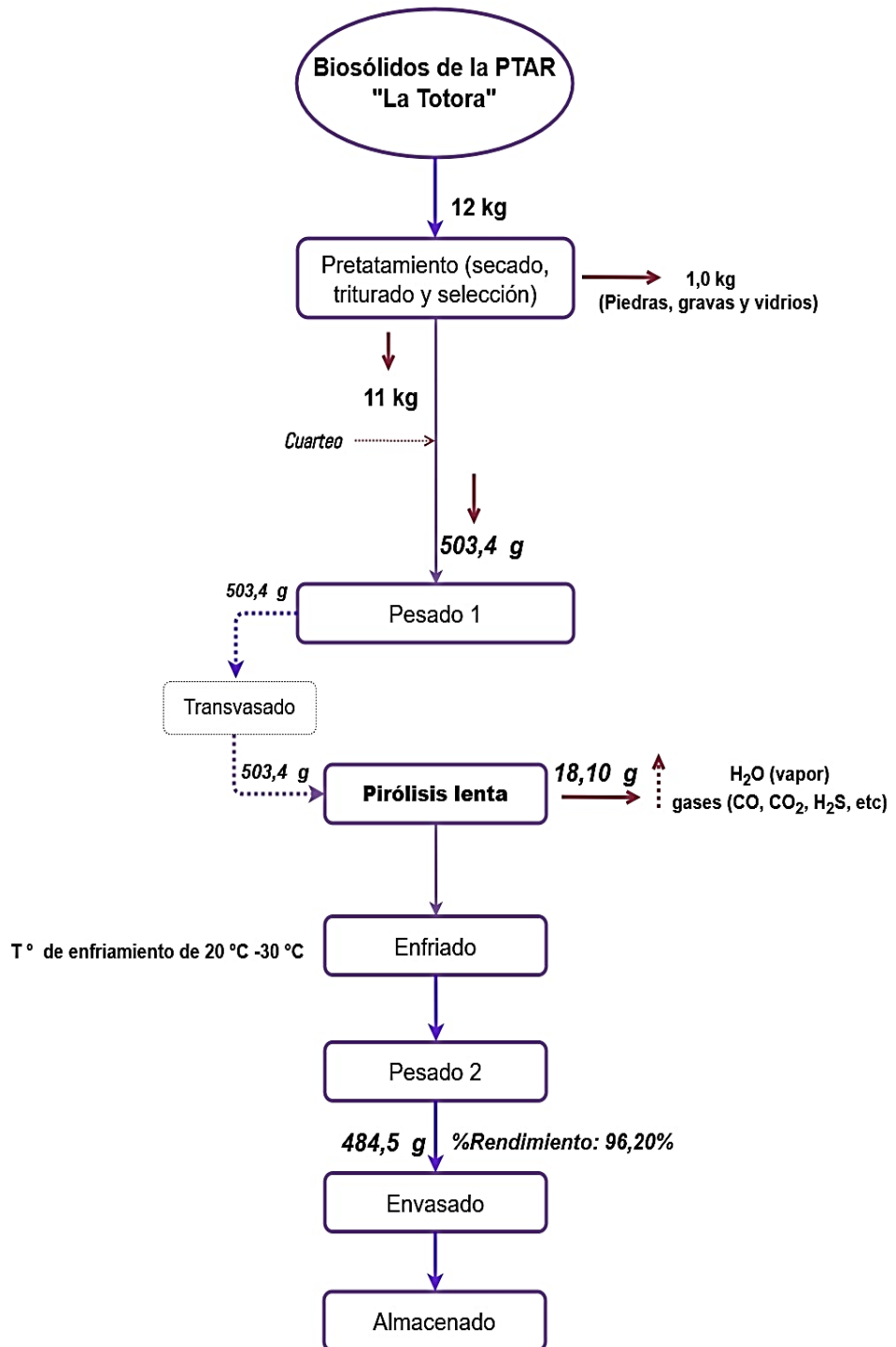
Anexo 1

Diagrama de bloques del proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos de PTAR "La Totorá"



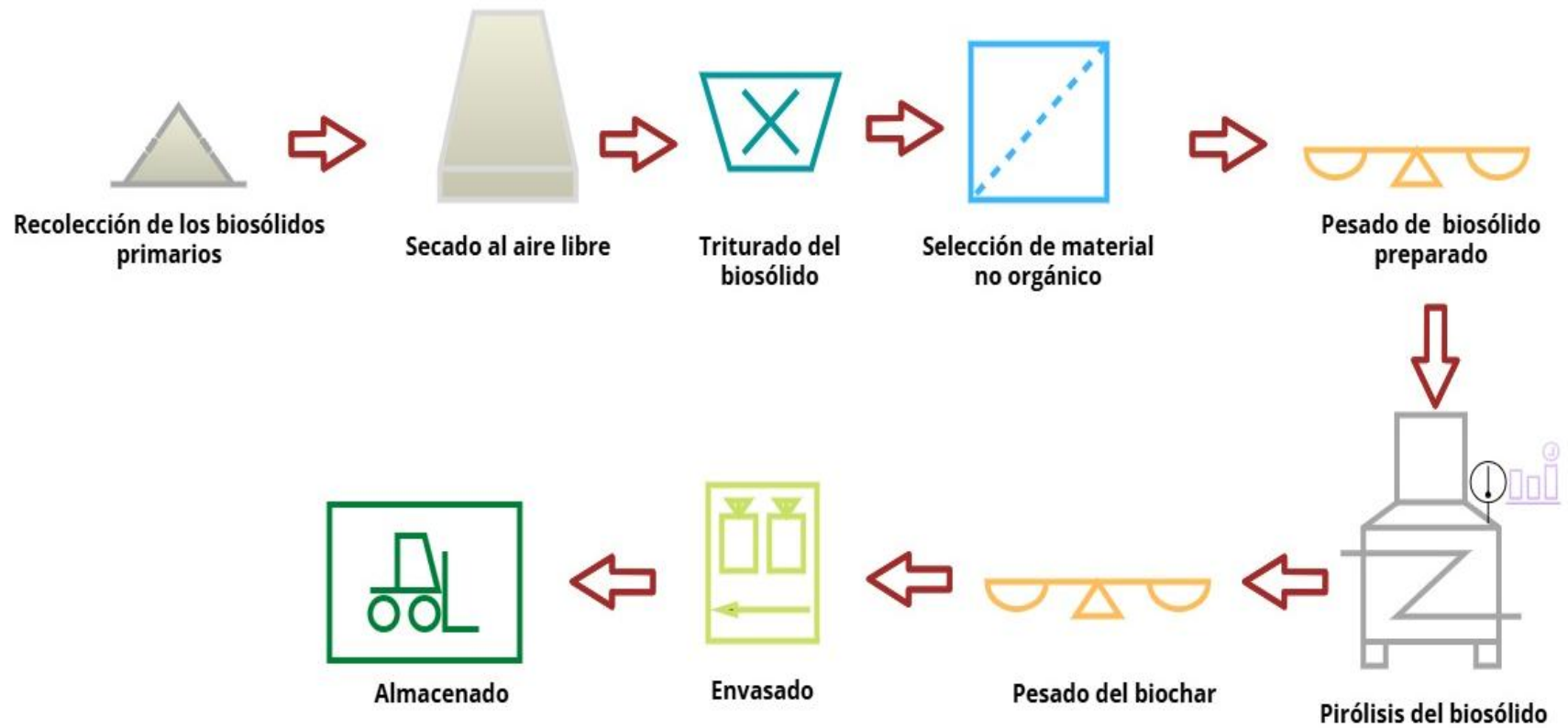
Anexo 2

Diagrama de bloques cuantitativo del proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos de PTAR "La Tatora" (TP300-01)



Anexo 3

Diagrama de flujo del proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos de PTAR “La Totora”



Anexo 4

Obtención de la muestra (biosólidos primarios) en la PTAR “la Totorá”

- **Recolección de los biosólidos primarios**

Se tomó 36 muestras puntuales con la técnica aleatorio simple de aproximadamente 0,3 kg de la zona de acumulación de biosólidos, siguiendo los pasos del Protocolo de Monitoreo de Biosólidos, para la Toma de Muestras, Preservación, Transporte, Almacenamiento y Recepción de los Biosólidos (RM N° 093-2018-VIVIENDA), midiendo insitu en cada punto la temperatura (°C), humedad (%H) y el pH con un medidor de suelo multifuncional (OEM-SGS07). La RM N° 093-2018-Vivienda, sugiere analizar muestras compuestas preparadas de varias muestras puntuales, cuando se desea analizar los parámetros fisicoquímicos y de higienización, por lo que en base a ello nos enfocamos en el punto 6.1.2.2.1. del protocolo en donde menciona que la cantidad de muestras a tomar depende del caudal de ingreso a la PTAR, por lo que de acuerdo al caudal de entrada de diseño de la PTAR “La Totorá” de 618 L/s (Tabla 1) se debe tomó 36 muestras puntuales como se muestras en la figura 37 y las coordenadas de georeferenciación en la tabla

Figura 38

Recolección de las 36 muestras puntuales de forma aleatoria



Punto 13



Punto 14



Punto 15



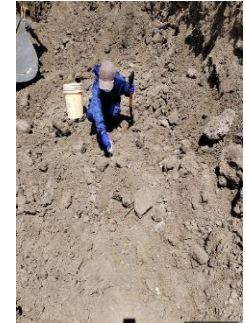
Punto 16



Punto 17



Punto 18



Punto 19



Punto 20



Punto 21



Punto 22



Punto 23



Punto 24



Punto 25



Punto 26



Punto 27



Punto 28



Punto 29



Punto 30



Punto 31



Punto 32



Punto 33



Punto 34



Punto 35



Punto 36

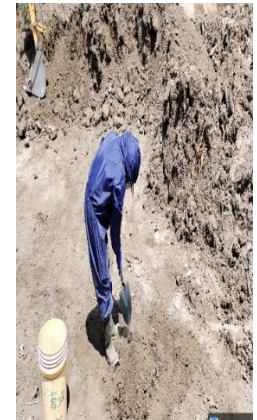


Tabla 46*Georeferenciación de los puntos de muestreo*

N° Punto	Latitud	Longitud
1	-13.143050721146672	-74.20939987030478
2	-13.143052929183580	-74.20941222620134
3	-13.143053433955641	-74.2093999538801
4	-13.143065511969914	-74.20941698348472
5	-13.143077992423148	-74.20941786613626
6	-13.143083495691927	-74.20941388129583
7	-13.143060183776871	-74.20938969130445
8	-13.143061318065767	-74.20937630983596
9	-13.143081720450258	-74.20939525026738
10	-13.143076478700246	-74.20936666615587
11	-13.143108211162811	-74.20942404313199
12	-13.143088354886654	-74.20937686909593
13	-13.14308575368456	-74.20935427349123
14	-13.143104878680791	-74.20939886655923
15	-13.143112248373493	-74.20938435799239
16	-13.143105011478685	-74.2093538427858
17	-13.143124623742617	-74.20940987465703

18	-13.143095448410222	-74.20933136173275
19	-13.143133429051204	-74.20939176331495
20	-13.143121141544295	-74.20936541602042
21	-13.143107707547706	-74.20934848301756
22	-13.143144082515198	-74.20941599384143
23	-13.143121646313906	-74.20935314369584
24	-13.143118917332473	-74.20934780129787
25	-13.14315586082082	-74.20939436706212
26	-13.143143849673562	-74.20936967957779
27	-13.14313733895421	-74.2093400846524
28	-13.14313029083387	-74.20931215214699
29	-13.143177523942697	-74.20941164276763
30	-13.14315978292451	-74.20934665557792
31	-13.143165121435581	-74.20931849888505
32	-13.14320039588399	-74.20941037014573
33	-13.14320567462574	-74.20939217782824
34	-13.143202545389185	-74.20937428921413
35	-13.143233678889167	-74.2094133081966
36	-13.143221156833803	-74.2093400930521

Nota. En las coordenadas de latitud y longitud se utiliza el punto en lugar de la coma, por convención internacional utilizados sobre todo por sistemas de información geográfica como GPS, Google Maps, Google Earth, etc

- **Mezcla y homogenización**

Las muestras puntuales se mezclaron y homogenizaron hasta formar 01 muestra compuesta de aproximadamente 12 kg, el cual se transportaron inmediatamente en un recipiente cerrado debidamente conservados a 4 ° C, para su análisis (parámetros fisicoquímicos y de higienización) por laboratorios externos y otro para el proceso de pirólisis lenta en el Laboratorios de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH.

Figura 39

Mezclado de las muestras puntuales



- **Pesado**

Finalmente se realizó el proceso de pesado del biosólido, inmediatamente en el laboratorio de transferencia de masa de la FIQM-UNSCH, obteniendo una masa de 12 kg.

Figura 40

Pesado de biosólidos primarios



Anexo 5

Preparación de la materia prima (Biosólidos primarios)

Secado por radiación solar

Se realizó su reducción de la humedad del biosólidos primario de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” por los siguientes motivos:

- Reduce el consumo de energía para descomponer la materia orgánica, lo hace más eficiente el proceso.
- Evitar la interferencia del vapor de agua en la descomposición térmica controlada, lo que aumenta sus características aprovechables.
- Disminución de emisiones de gases indeseados (compuestos orgánicos volátiles, amoníaco, aldehídos, etc.)

Por ende, este proceso se realizó con radiación solar, por 3 días consecutivos, ya que se realizó hasta obtener una masa constante.

Figura 41

Proceso de secado



Triturado

Lo realizamos de forma manual con una mandarina de goma, ya que los biosólidos secos acumulados fueron parcialmente suaves el cual no necesitaba mucha fuerza para su trituración completa.

Figura 42

Triturado de los biosólidos con mandarina de goma



Separación

La separación se realiza de forma manual ya que se desea provechar al máximo todos los componentes del biosólido. Este proceso de selección consiste en separar únicamente las piedras u hormigones ya que son los únicos componentes que no contribuyen en la calidad del biochar.

Figura 43

Selección de materias granulares (piedras y hormigón)



Pesado

Para finalizar se realizó el proceso de pesado del biosólidos seleccionado y triturado, obteniendo una masa 11,0 kg, perdiendo aproximadamente un total de 1,0 kg en los procesos de secado y selección.

Almacenado

Se almacenaron en recipientes cerrados debido a la alta carga microbiana, hasta el proceso de pirólisis.

Figura 44

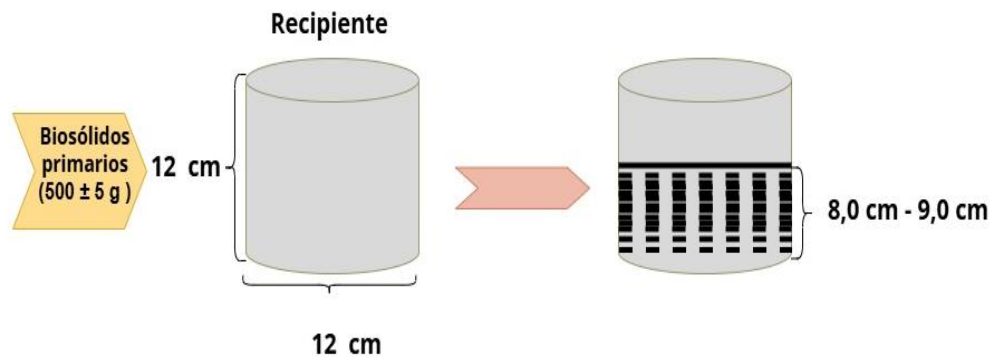
Pesado de los biosólidos primarios ya triturados y seleccionados



Anexo 6

Obtención de biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Titora”

1. Se pesaron 500 ± 5 g de biosólidos primarios en una balanza analítica, previamente de un cuarteo (NTP 339.089).
2. Se trasvasó a un recipiente de acero inoxidable de 12 cm de alto y 12 cm de ancho y además se consideró la altura de los biosólidos primarios, el cual varía aproximadamente de 8,0 cm a 9,0 de alto.



3. Llevar al horno mufla y asegurar que el recipiente esté semiabierto.
4. Se encendió y se programó el horno mufla a una primera temperatura de 300 °C de pirólisis.
5. Cuando la temperatura a la programada, inmediatamente se controló el tiempo de residencia con el cronómetro calibrado en UTC, por 1 hora y 4 horas, para completar el proceso de pirólisis lenta (bajas temperaturas y largos tiempos de residencia).
6. Se apagó el horno mufla y se esperó a que el horno-mufla se enfríe, para retirar la muestra.
7. Se abrió el equipo y se retiró el recipiente de acero inoxidable del horno.
8. Se llevó a pesar la muestra obtenida en un recipiente de polietileno cerrado para su almacenamiento.

El rendimiento del biochar fue obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$\%Rendimiento = \frac{\text{peso de biochar (g)}}{\text{peso de la materia prima (g)}} \times 100 \quad (1)$$

Figura 45

Proceso de obtención de biochar a partir de los biosólidos primarios de la PTAR “La Totorá”



Anexo 7

Determinación de la densidad aparente

Este parámetro se le denomina de esa manera ya que incluye poros y los espacios vacíos, es decir, este parámetro mide el peso del suelo seco dividido por el volumen total del suelo (volumen combinado de sólidos y poros que pueden contener aire o agua o ambos). Se realizó en base al método descrito en Godoy (2022) en donde se siguieron los siguientes pasos.

1. Se utilizó una probeta graduada de 10 mL y se vertió el biosólido hasta un volumen conocido.
2. Se pesó la probeta anotando el resultado.
3. Se realizó la prueba por triplicado.

La densidad aparente del carbón activado se calculó con la siguiente relación:

$$\text{Densidad aparente} \left(\frac{g}{mL} \right) = \frac{\text{masa del biochar (g)}}{\text{volumen del biochar (mL)}} \quad (2)$$

Figura 46

Ensayo de densidad aparente en el laboratorio de Transferencia de masa de la FIQM-UNSCH



Anexo 8

Prueba preliminar de enmienda de suelos del biochar

Para esta prueba preliminar se plantaron 07 macetas con plántulas de lechuga seda. En las 06 macetas se plantaron lechuga seda en combinaciones de 45 % y 55 % de biochar y tierra respectivamente, debido a que la tierra tiene contenido de nutrientes, ya que se sacaron de la zona de Uchuypampa.

Por otro lado, para realizar la prueba de enmienda por medio de la observación se utilizaron 09 macetas con semillas de rabanito. Para esta prueba se utilizó tierra proveniente talleres mecánicos. La combinación fue de 55 % y 45 % de biochar y tierra respectivamente. El tratamiento TP300-01 y TP500-01 se volvieron a plantar, pero con proporciones de 65 % de biochar y 35 % de tierra. Por último, se plantó semillas de rabanito con el 100 % de tierra de taller mecánico.

Esta prueba se realizó por un periodo de 20 días, en donde se analizaron la efectividad del biochar.

Figura 47

Plántulas de lechuga (55 % tierra de cultivo - 45 % biochar)



Figura 48

Plantación de semillas de rabanito (45 % de tierra grasa -55 % biochar)



Se realizaron los controles diarios de pH, temperatura y humedad, obteniendo valores promedios en las macetas de lechuga valores de 7, 20 °C y 70 % respectivamente y en las macetas de rabanito un promedio de 7,5; 19 °C y 80 %.

En el día 7, se mostraron los primeros brotes de rabanito en las macetas del tratamiento TP500-01 y TP450-01 y las macetas de lechuga seguían saludables.

Figura 49

Brote del rabanito de la maceta que contenía el TP500-01 (con 65 % de biochar) y el TP450-01 (con 55 % de biochar)



Finalmente, para el día 20, se observaron que algunas macetas estaban en buenas condiciones, pero las macetas como del tratamiento TP300-01 y TP500-01, estaban empezando a secarse lo cual indica que posiblemente se deba al exceso de riego (posibilita la pudrición), plagas o la exposición excesiva de calor. Sin embargo, además de haber plantado los 6 tratamientos, se realizó una plantación con 100% de tierra de cultivo con lombricultura, traídos de Uchuypampa, lo cual al compararlo con los diferentes tratamientos se observaba características similares, por lo que se puede decir que el biochar es efectivo como ese tipo de tierras, aptas para las plantaciones de hortalizas.

Figura 50

Macetas de lechuga en el día 20



Por otra parte, otra de las aplicaciones principales que es del biochar, es sobre las enmienda de suelos, por ello se escogió una tierra de taller mecánico contaminada con grasa y otros compuestos orgánicos que imposibilitan el crecimiento de plantas, pero de acuerdo al ensayo preliminar se pudo observar que la germinación de los rabanitos fue de manera rápida y que los tratamientos como TP400-01, TP400-04, TP450-01, TP500-01, son los que presentan una buena germinación es decir que el

biochar en el corto tiempo de prueba aporta los nutrientes esenciales para que este proceso ocurra, siendo un material apto para la enmienda de suelos contaminados.

Figura 51

Germinación del rabanito al día 20



Anexo 9

Correlación de Pearson (Valores de p)

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	IC de 95% para p	Valor p
T	Ti	-0,403	(-0,915; 0,607)	0,428
pH	Ti	-0,230	(-0,878; 0,715)	0,661
CE	Ti	-0,835	(-0,981; -0,073)	0,039
MO	Ti	0,120	(-0,766; 0,849)	0,821
%H	Ti	0,624	(-0,380; 0,953)	0,185
%COT	Ti	0,122	(-0,765; 0,849)	0,818
CN	Ti	0,107	(-0,772; 0,845)	0,841
%N	Ti	0,169	(-0,745; 0,862)	0,749
%P	Ti	-0,129	(-0,851; 0,762)	0,808
%K	Ti	0,316	(-0,666; 0,897)	0,541
Ca	Ti	0,523	(-0,501; 0,937)	0,287
Mg	Ti	0,295	(-0,679; 0,893)	0,570
Fe	Ti	0,376	(-0,627; 0,910)	0,463
Mn	Ti	0,887	(0,270; 0,988)	0,018
Cu	Ti	0,570	(-0,449; 0,945)	0,237
Co	Ti	0,220	(-0,720; 0,875)	0,675
Zn	Ti	0,247	(-0,706; 0,882)	0,637
Mo	Ti	0,375	(-0,628; 0,910)	0,464
Al	Ti	0,643	(-0,353; 0,956)	0,169
Pb	Ti	0,665	(-0,318; 0,959)	0,149
Cr	Ti	0,420	(-0,594; 0,918)	0,407
Ni	ti	0,666	(-0,317; 0,959)	0,149
Ba	ti	0,608	(-0,401; 0,951)	0,200
Sr	ti	0,412	(-0,600; 0,917)	0,417
PH	T	0,950	(0,601; 0,995)	0,004
CE	T	0,603	(-0,408; 0,950)	0,205
MO	T	-0,930	(-0,992; -0,483)	0,007
%H	T	-0,057	(-0,830; 0,791)	0,915
%COT	T	-0,931	(-0,993; -0,487)	0,007

CN	T	-0,855	(-0,984; -0,140)	0,030
%N	T	-0,952	(-0,995; -0,617)	0,003
%P	T	-0,294	(-0,892; 0,680)	0,572
%K	T	0,255	(-0,702; 0,884)	0,626
Ca	T	-0,799	(-0,977; 0,037)	0,057
Mg	T	-0,488	(-0,931; 0,536)	0,326
Fe	T	0,521	(-0,503; 0,937)	0,289
Mn	T	-0,093	(-0,841; 0,777)	0,860
Cu	T	0,335	(-0,655; 0,901)	0,517
Co	T	0,071	(-0,786; 0,834)	0,894
Zn	T	0,296	(-0,679; 0,893)	0,569
Mo	T	-0,015	(-0,817; 0,806)	0,977
Al	T	-0,559	(-0,943; 0,463)	0,249
Pb	T	-0,519	(-0,936; 0,505)	0,291
Cr	T	0,423	(-0,592; 0,919)	0,403
Ni	T	0,064	(-0,789; 0,832)	0,904
Ba	T	0,374	(-0,628; 0,910)	0,465
Sr	T	0,542	(-0,481; 0,940)	0,267
CE	pH	0,512	(-0,512; 0,935)	0,299
MO	pH	-0,945	(-0,994; -0,575)	0,004
%H	pH	-0,086	(-0,839; 0,780)	0,871
%COT	pH	-0,946	(-0,994; -0,582)	0,004
CN	pH	-0,880	(-0,987; -0,240)	0,021
%N	pH	-0,959	(-0,996; -0,663)	0,003
%P	pH	-0,352	(-0,905; 0,644)	0,494
%K	pH	0,189	(-0,735; 0,868)	0,720
Ca	pH	-0,764	(-0,972; 0,126)	0,077
Mg	pH	-0,463	(-0,926; 0,558)	0,355
Fe	pH	0,567	(-0,453; 0,944)	0,241
Mn	pH	-0,013	(-0,816; 0,807)	0,981
Cu	pH	0,422	(-0,593; 0,919)	0,405
Co	pH	0,010	(-0,808; 0,815)	0,985
Zn	pH	0,317	(-0,666; 0,898)	0,541

Mo	pH	-0,138	(-0,854; 0,759)	0,794
Al	pH	-0,319	(-0,898; 0,664)	0,537
Pb	pH	-0,512	(-0,935; 0,513)	0,299
Cr	pH	0,353	(-0,643; 0,905)	0,493
Ni	pH	0,068	(-0,787; 0,834)	0,898
Ba	pH	0,445	(-0,574; 0,923)	0,377
Sr	pH	0,625	(-0,378; 0,953)	0,184
MO	CE	-0,485	(-0,930; 0,539)	0,330
%H	CE	-0,519	(-0,936; 0,505)	0,291
%COT	CE	-0,488	(-0,931; 0,536)	0,326
CN	CE	-0,495	(-0,932; 0,529)	0,318
%N	CE	-0,507	(-0,934; 0,517)	0,305
%P	CE	-0,299	(-0,894; 0,677)	0,565
%K	CE	0,043	(-0,797; 0,826)	0,936
Ca	CE	-0,879	(-0,987; -0,234)	0,021
Mg	CE	-0,744	(-0,970; 0,171)	0,090
Fe	CE	-0,024	(-0,819; 0,803)	0,965
Mn	CE	-0,762	(-0,972; 0,129)	0,078
Cu	CE	-0,480	(-0,929; 0,543)	0,336
Co	CE	-0,190	(-0,868; 0,735)	0,719
Zn	CE	-0,467	(-0,927; 0,555)	0,350
Mo	CE	-0,353	(-0,905; 0,643)	0,492
Al	CE	-0,590	(-0,948; 0,425)	0,218
Pb	CE	-0,708	(-0,965; 0,243)	0,115
Cr	CE	-0,185	(-0,867; 0,737)	0,725
Ni	CE	-0,541	(-0,940; 0,482)	0,268
Ba	CE	-0,355	(-0,906; 0,641)	0,490
Sr	CE	-0,262	(-0,885; 0,698)	0,616
%H	MO	-0,070	(-0,834; 0,786)	0,896
%COT	MO	1,000	(0,999; 1,000)	0,000
CN	MO	0,966	(0,712; 0,996)	0,002
%N	MO	0,984	(0,857; 0,998)	0,000
%P	MO	0,549	(-0,474; 0,941)	0,259

%K	MO	-0,443	(-0,923; 0,575)	0,379
Ca	MO	0,814	(0,007; 0,979)	0,049
Mg	MO	0,624	(-0,381; 0,953)	0,186
Fe	MO	-0,748	(-0,970; 0,162)	0,087
Mn	MO	-0,141	(-0,855; 0,757)	0,789
Cu	MO	-0,469	(-0,927; 0,553)	0,348
Co	MO	-0,200	(-0,870; 0,730)	0,704
Zn	MO	-0,208	(-0,872; 0,726)	0,692
Mo	MO	-0,125	(-0,850; 0,764)	0,814
Al	MO	0,346	(-0,647; 0,904)	0,502
Pb	MO	0,320	(-0,664; 0,898)	0,537
Cr	MO	-0,564	(-0,944; 0,457)	0,244
Ni	MO	-0,278	(-0,889; 0,689)	0,594
Ba	MO	-0,594	(-0,948; 0,420)	0,214
Sr	MO	-0,655	(-0,958; 0,334)	0,158
%COT	%H	-0,072	(-0,835; 0,785)	0,892
CN	%H	0,072	(-0,785; 0,835)	0,892
%N	%H	-0,123	(-0,850; 0,765)	0,817
%P	%H	0,183	(-0,738; 0,866)	0,729
%K	%H	0,758	(-0,138; 0,972)	0,081
Ca	%H	0,295	(-0,679; 0,893)	0,570
Mg	%H	0,143	(-0,756; 0,855)	0,787
Fe	%H	0,217	(-0,722; 0,875)	0,679
Mn	%H	0,678	(-0,297; 0,961)	0,139
Cu	%H	0,313	(-0,668; 0,897)	0,546
Co	%H	-0,079	(-0,837; 0,783)	0,882
Zn	%H	0,172	(-0,743; 0,863)	0,745
Mo	%H	0,362	(-0,636; 0,907)	0,480
Al	%H	-0,188	(-0,867; 0,736)	0,722
Pb	%H	0,257	(-0,701; 0,884)	0,623
Cr	%H	0,811	(-0,002; 0,979)	0,050
Ni	%H	0,480	(-0,543; 0,930)	0,335
Ba	%H	0,424	(-0,591; 0,919)	0,402

Sr	%H	0,219	(-0,720; 0,875)	0,676
CN	%COT	0,964	(0,698; 0,996)	0,002
%N	%COT	0,986	(0,870; 0,998)	0,000
%P	%COT	0,544	(-0,479; 0,940)	0,264
%K	%COT	-0,446	(-0,923; 0,573)	0,376
Ca	%COT	0,816	(0,012; 0,979)	0,048
Mg	%COT	0,625	(-0,378; 0,953)	0,184
Fe	%COT	-0,742	(-0,970; 0,174)	0,091
Mn	%COT	-0,137	(-0,854; 0,759)	0,796
Cu	%COT	-0,463	(-0,926; 0,559)	0,356
Co	%COT	-0,190	(-0,868; 0,735)	0,719
Zn	%COT	-0,204	(-0,871; 0,728)	0,698
Mo	%COT	-0,117	(-0,848; 0,768)	0,826
Al	%COT	0,350	(-0,644; 0,905)	0,496
Pb	%COT	0,328	(-0,659; 0,900)	0,526
Cr	%COT	-0,563	(-0,944; 0,457)	0,244
Ni	%COT	-0,271	(-0,887; 0,693)	0,604
Ba	%COT	-0,589	(-0,948; 0,427)	0,219
Sr	%COT	-0,650	(-0,957; 0,342)	0,162
%N	CN	0,907	(0,360; 0,990)	0,013
%P	CN	0,731	(-0,198; 0,968)	0,099
%K	CN	-0,380	(-0,911; 0,624)	0,457
Ca	CN	0,837	(0,079; 0,982)	0,038
Mg	CN	0,699	(-0,260; 0,964)	0,122
Fe	CN	-0,827	(-0,981; -0,048)	0,042
Mn	CN	-0,147	(-0,856; 0,755)	0,781
Cu	CN	-0,477	(-0,929; 0,546)	0,338
Co	CN	-0,382	(-0,911; 0,623)	0,455
Zn	CN	-0,131	(-0,852; 0,762)	0,805
Mo	CN	-0,231	(-0,878; 0,715)	0,660
Al	CN	0,198	(-0,731; 0,870)	0,707
Pb	CN	0,171	(-0,744; 0,863)	0,747
Cr	CN	-0,478	(-0,929; 0,545)	0,337

Ni	CN	-0,350	(-0,905; 0,644)	0,496
Ba	CN	-0,627	(-0,953; 0,375)	0,182
Sr	CN	-0,654	(-0,957; 0,335)	0,159
%P	%N	0,408	(-0,604; 0,916)	0,422
%K	%N	-0,453	(-0,925; 0,567)	0,368
Ca	%N	0,798	(-0,038; 0,977)	0,057
Mg	%N	0,577	(-0,441; 0,946)	0,230
Fe	%N	-0,638	(-0,955; 0,360)	0,173
Mn	%N	-0,077	(-0,836; 0,784)	0,885
Cu	%N	-0,398	(-0,914; 0,611)	0,434
Co	%N	-0,043	(-0,826; 0,796)	0,936
Zn	%N	-0,213	(-0,874; 0,724)	0,685
Mo	%N	-0,010	(-0,815; 0,808)	0,985
Al	%N	0,449	(-0,570; 0,924)	0,371
Pb	%N	0,448	(-0,571; 0,924)	0,372
Cr	%N	-0,563	(-0,943; 0,458)	0,245
Ni	%N	-0,169	(-0,862; 0,745)	0,749
Ba	%N	-0,506	(-0,934; 0,519)	0,306
Sr	%N	-0,593	(-0,948; 0,422)	0,215
%K	%P	-0,348	(-0,904; 0,646)	0,499
Ca	%P	0,605	(-0,406; 0,950)	0,203
Mg	%P	0,762	(-0,131; 0,972)	0,078
Fe	%P	-0,781	(-0,975; 0,083)	0,067
Mn	%P	-0,217	(-0,875; 0,721)	0,679
Cu	%P	-0,286	(-0,891; 0,685)	0,583
Co	%P	-0,637	(-0,955; 0,362)	0,174
Zn	%P	0,278	(-0,689; 0,889)	0,594
Mo	%P	-0,454	(-0,925; 0,567)	0,366
Al	%P	-0,237	(-0,879; 0,711)	0,651
Pb	%P	-0,307	(-0,896; 0,672)	0,553
Cr	%P	-0,253	(-0,883; 0,703)	0,628
Ni	%P	-0,463	(-0,927; 0,558)	0,355
Ba	%P	-0,536	(-0,939; 0,488)	0,273

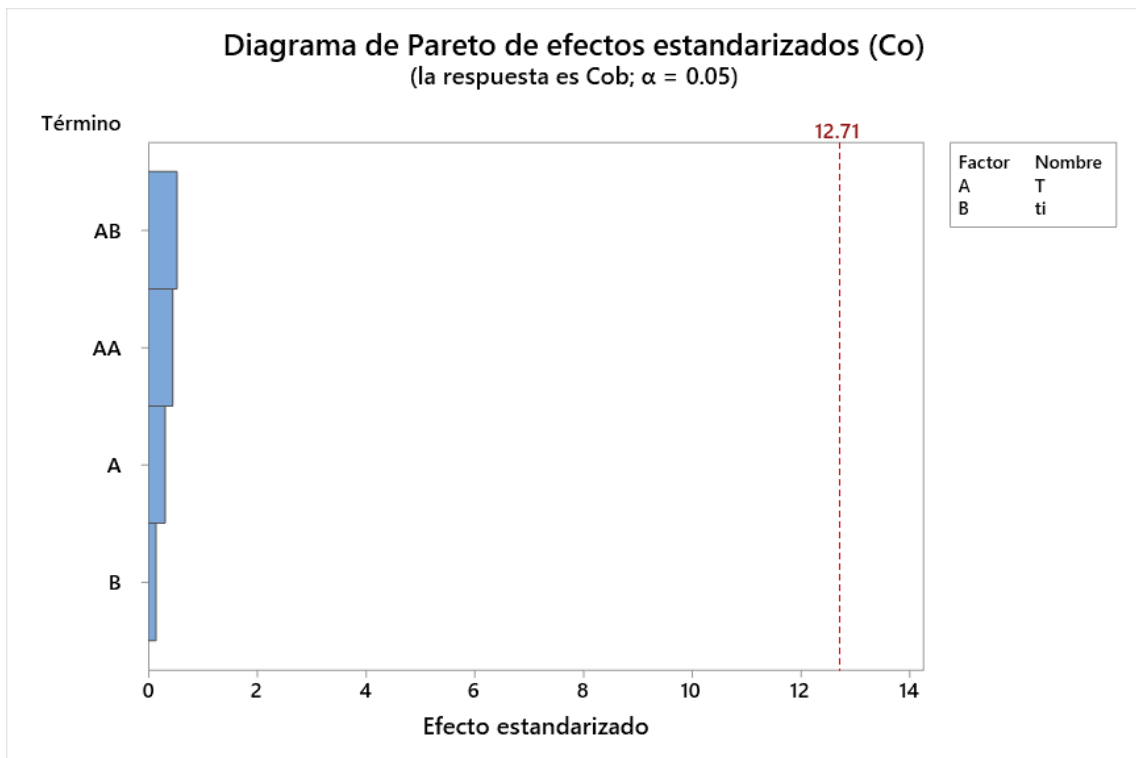
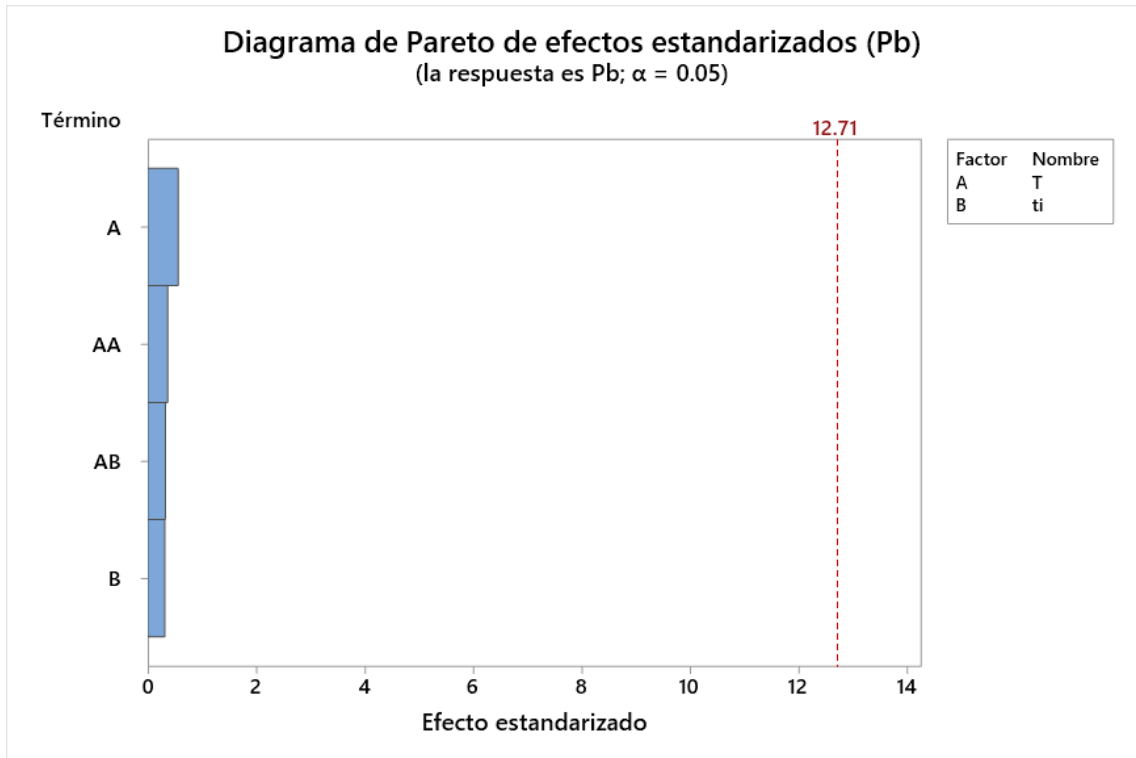
Sr	%P	-0,362	(-0,907; 0,637)	0,481
Ca	%K	-0,317	(-0,898; 0,666)	0,541
Mg	%K	-0,530	(-0,938; 0,494)	0,279
Fe	%K	0,476	(-0,547; 0,929)	0,340
Mn	%K	0,416	(-0,597; 0,918)	0,412
Cu	%K	0,125	(-0,764; 0,850)	0,814
Co	%K	0,070	(-0,786; 0,834)	0,896
Zn	%K	-0,258	(-0,884; 0,700)	0,621
Mo	%K	0,415	(-0,598; 0,917)	0,414
Al	%K	-0,392	(-0,913; 0,615)	0,442
Pb	%K	0,092	(-0,778; 0,841)	0,862
Cr	%K	0,854	(0,137; 0,984)	0,031
Ni	%K	0,412	(-0,600; 0,917)	0,417
Ba	%K	0,430	(-0,586; 0,920)	0,395
Sr	%K	0,146	(-0,755; 0,856)	0,783
Mg	Ca	0,887	(0,271; 0,988)	0,018
Fe	Ca	-0,434	(-0,921; 0,583)	0,390
Mn	Ca	0,372	(-0,630; 0,909)	0,468
Cu	Ca	0,076	(-0,784; 0,836)	0,886
Co	Ca	-0,053	(-0,829; 0,792)	0,920
Zn	Ca	0,299	(-0,677; 0,894)	0,564
Mo	Ca	0,096	(-0,776; 0,842)	0,856
Al	Ca	0,470	(-0,553; 0,928)	0,347
Pb	Ca	0,523	(-0,501; 0,937)	0,287
Cr	Ca	-0,181	(-0,865; 0,739)	0,731
Ni	Ca	0,145	(-0,756; 0,856)	0,784
Ba	Ca	-0,117	(-0,848; 0,768)	0,826
Sr	Ca	-0,149	(-0,857; 0,754)	0,778
Fe	Mg	-0,443	(-0,923; 0,575)	0,379
Mn	Mg	0,248	(-0,705; 0,882)	0,635
Cu	Mg	0,203	(-0,729; 0,871)	0,700
Co	Mg	-0,127	(-0,851; 0,763)	0,810
Zn	Mg	0,611	(-0,398; 0,951)	0,198

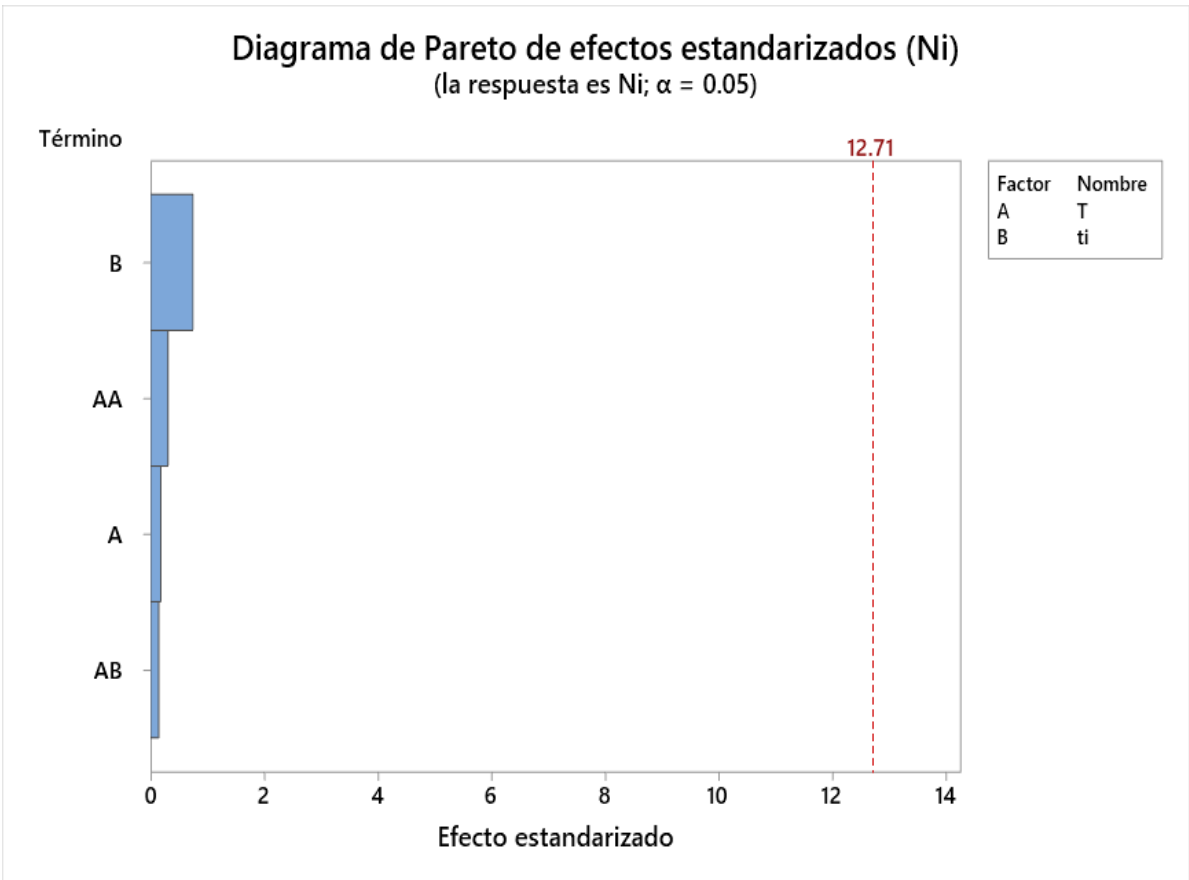
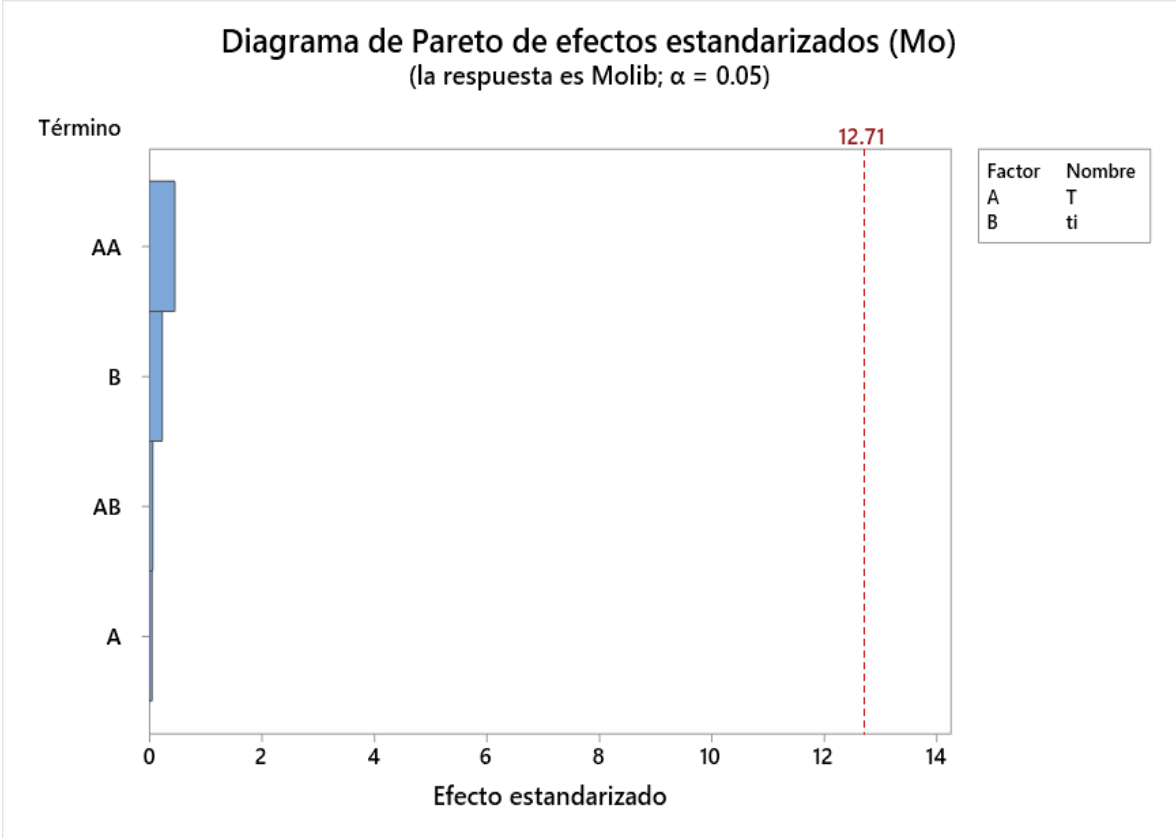
Mo	Mg	-0,065	(-0,833; 0,788)	0,902
Al	Mg	0,315	(-0,667; 0,897)	0,543
Pb	Mg	0,260	(-0,699; 0,885)	0,618
Cr	Mg	-0,232	(-0,878; 0,714)	0,659
Ni	Mg	0,037	(-0,799; 0,824)	0,945
Ba	Mg	-0,110	(-0,846; 0,770)	0,835
Sr	Mg	0,038	(-0,798; 0,824)	0,943
Cu	Mn	0,820	(0,024; 0,980)	0,046
Co	Mn	0,500	(-0,525; 0,933)	0,313
Zn	Mn	0,505	(-0,519; 0,934)	0,306
Mo	Mn	0,667	(-0,316; 0,959)	0,148
Al	Mn	0,413	(-0,599; 0,917)	0,415
Pb	Mn	0,720	(-0,220; 0,967)	0,106
Cr	Mn	0,684	(-0,286; 0,962)	0,134
Ni	Mn	0,908	(0,369; 0,990)	0,012
Ba	Mn	0,853	(0,135; 0,984)	0,031
Sr	Mn	0,692	(-0,273; 0,963)	0,128
Co	Cu	0,583	(-0,434; 0,947)	0,225
Zn	Cu	0,796	(-0,045; 0,977)	0,058
Mo	Cu	0,540	(-0,484; 0,940)	0,269
Al	Cu	0,329	(-0,658; 0,900)	0,524
Pb	Cu	0,464	(-0,558; 0,927)	0,354
Cr	Cu	0,563	(-0,458; 0,943)	0,245
Ni	Cu	0,831	(0,059; 0,981)	0,041
Ba	Cu	0,929	(0,477; 0,992)	0,007
Sr	Cu	0,970	(0,747; 0,997)	0,001
Zn	Co	0,270	(-0,694; 0,887)	0,605
Mo	Co	0,879	(0,235; 0,987)	0,021
Al	Co	0,288	(-0,683; 0,891)	0,580
Pb	Co	0,755	(-0,147; 0,971)	0,083
Cr	Co	0,297	(-0,678; 0,893)	0,568
Ni	Co	0,798	(-0,039; 0,977)	0,057
Ba	Co	0,648	(-0,345; 0,956)	0,164

Sr	Co	0,534	(-0,490; 0,939)	0,275
Mo	Zn	0,231	(-0,715; 0,878)	0,660
Al	Zn	0,112	(-0,770; 0,847)	0,833
Pb	Zn	0,178	(-0,741; 0,865)	0,736
Cr	Zn	0,274	(-0,692; 0,888)	0,600
Ni	Zn	0,461	(-0,561; 0,926)	0,358
Ba	Zn	0,537	(-0,487; 0,939)	0,272
Sr	Zn	0,762	(-0,130; 0,972)	0,078
Al	Mo	0,073	(-0,785; 0,835)	0,891
Pb	Mo	0,806	(-0,016; 0,978)	0,053
Cr	Mo	0,604	(-0,407; 0,950)	0,204
Ni	Mo	0,886	(0,266; 0,988)	0,019
Ba	Mo	0,664	(-0,319; 0,959)	0,150
Sr	Mo	0,446	(-0,573; 0,923)	0,375
Cr	Pb	0,232	(-0,714; 0,878)	0,658
Ni	Pb	0,789	(-0,062; 0,976)	0,062
Ba	Pb	0,504	(-0,520; 0,934)	0,308
Sr	Pb	0,277	(-0,690; 0,889)	0,596
Ni	Cr	0,696	(-0,265; 0,963)	0,124
Ba	Cr	0,737	(-0,186; 0,969)	0,095
Sr	Cr	0,567	(-0,454; 0,944)	0,241
Ba	Ni	0,909	(0,371; 0,990)	0,012
Sr	Ni	0,739	(-0,181; 0,969)	0,093
Sr	Ba	0,918	(0,415; 0,991)	0,010

Anexo 10

Diagrama de Pareto para el Pb, Co, Mo y Ni





Anexo 11

Análisis de varianza de cada respuesta

pH					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	1,52362	0,507873	20,43	0,047
Lineal	2	0,84188	0,42094	16,93	0,056
T	1	0,57494	0,574937	23,13	0,041
Ti	100.00%	0,00188	0,001877	0,08	0,809
Interacción de 2 factores	1	0,06145	0,061449	2,47	0,257
T*ti	1	0,06145	0,061449	2,47	0,257
Error	2	0,04971	0,024857		
Total	5	1,57333			
%MO					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	67,0275	16,7569	83,44	0,082
Lineal	2	20,23	10,115	50,37	0,099
T	1	12,052	12,052	60,01	0,082
ti	1	0,2477	0,2477	1,23	0,467
Cuadrado	1	3,346	3,346	16,66	0,153
T*T	1	3,346	3,346	16,66	0,153
Interacción de 2 factores	1	2,2042	2,2042	10,98	0,187
T*ti	1	2,2042	2,2042	10,98	0,187
Error	1	0,2008	0,2008		
Total	5	67,2283			
%H					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	13,6805	3,42013	316,65	0,042
Lineal	2	10,1308	5,06542	468,98	0,033
T	1	3,8824	3,88245	359,46	0,034
ti	1	9,9543	9,95431	921,62	0,021
Cuadrado	1	0,03	0,03002	2,78	0,344
T*T	1	0,03	0,03002	2,78	0,344
Interacción de 2 factores	1	5,7748	5,77477	534,66	0,028
T*ti	1	5,7748	5,77477	534,66	0,028
Error	1	0,0108	0,0108		
Total	5	13,6913			
%COT					

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	20,5922	5,14805	61,28	0,095
Lineal	2	6,2906	3,14528	37,44	0,115
T	1	3,7577	3,75768	44,73	0,094
ti	1	0,0793	0,07929	0,94	0,509
Cuadrado	1	1,0179	1,01786	12,12	0,178
T*T	1	1,0179	1,01786	12,12	0,178
Interacción de 2 factores	1	0,6444	0,6444	7,67	0,221
T*ti	1	0,6444	0,6444	7,67	0,221
Error	1	0,084	0,08401		
Total	5	20,6762			

C-N

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	1,41681	0,354203	108,23	0,072
Lineal	2	0,23884	0,119421	36,49	0,116
T	1	0,05551	0,055509	16,96	0,152
ti	1	0,01673	0,016727	5,11	0,265
Cuadrado	1	0,20656	0,206556	63,11	0,08
T*T	1	0,20656	0,206556	63,11	0,08
Interacción de 2 factores	1	0,2339	0,233901	71,47	0,075
T*ti	1	0,2339	0,233901	71,47	0,075
Error	1	0,00327	0,003273		
Total	5	1,42008			

%N

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	0,192143	0,064048	26,74	0,036
Lineal	2	0,153837	0,076918	32,11	0,03
T	1	0,146162	0,146162	61,02	0,016
ti	1	0,008188	0,008188	3,42	0,206
Cuadrado	1	0,002879	0,002879	1,2	0,387
T*T	1	0,002879	0,002879	1,2	0,387
Error	2	0,00479	0,002395		
Total	5	0,196933			

%P

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	1,17728	0,29432	11,47	0,218
Lineal	2	0,26684	0,13342	5,2	0,296
T	1	0,25736	0,25736	10,03	0,195

ti	1	0,18638	0,18638	7,26	0,226
Cuadrado	1	0,79144	0,79144	30,85	0,113
T*T	1	0,79144	0,79144	30,85	0,113
Interacción de 2 factores	1	0,74114	0,74114	28,89	0,117
T*ti	1	0,74114	0,74114	28,89	0,117
Error	1	0,02566	0,02566		
Total	5	1,20293			

%K

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	0,00033	0,000082	22,67	0,156
Lineal	2	0,000048	0,000024	6,53	0,267
T	1	0,000023	0,000023	6,27	0,242
ti	1	0,000047	0,000047	13,05	0,172
Cuadrado	1	0,000094	0,000094	25,71	0,124
T*T	1	0,000094	0,000094	25,71	0,124
Interacción de 2 factores	1	0,000021	0,000021	5,89	0,249
T*ti	1	0,000021	0,000021	5,89	0,249
Error	1	0,000004	0,000004		
Total	5	0,000333			

Ca

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	51736027	12934007	5,86	0,299
Lineal	2	26551241	13275621	6,02	0,277
T	1	39448	39448	0,02	0,915
ti	1	11868847	11868847	5,38	0,259
Cuadrado	1	13986286	13986286	6,34	0,241
T*T	1	13986286	13986286	6,34	0,241
Interacción de 2 factores	1	7769901	7769901	3,52	0,312
T*ti	1	7769901	7769901	3,52	0,312
Error	1	2206128	2206128		
Total	5	53942155			

Mg

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	1359128	339782	4,2	0,349
Lineal	2	387450	193725	2,39	0,416
T	1	103685	103685	1,28	0,461
ti	1	362565	362565	4,48	0,281
Cuadrado	1	999086	999086	12,34	0,177

T*T	1	999086	999086	12,34	0,177
Interacción de 2 factores	1	326863	326863	4,04	0,294
T*ti	1	326863	326863	4,04	0,294
Error	1	80948	80948		
Total	5	1440075			

Fe

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	19791738	4947934	1,87	0,495
Lineal	2	717964	358982	0,14	0,887
T	1	273882	273882	0,1	0,802
ti	1	705111	705111	0,27	0,697
Cuadrado	1	3649246	3649246	1,38	0,449
T*T	1	3649246	3649246	1,38	0,449
Interacción de 2 factores	1	3330177	3330177	1,26	0,463
T*ti	1	3330177	3330177	1,26	0,463
Error	1	2644052	2644052		
Total	5	22435790			

Mn

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	2638,2	1319,1	10,06	0,047
Lineal	2	2638,2	1319,1	10,06	0,047
T	1	252,5	252,5	1,92	0,259
ti	1	2611,8	2611,8	19,91	0,021
Error	3	393,5	131,2		
Total	5	3031,8			

Cu

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	1504,2	501,4	2,69	0,283
Lineal	2	1501,7	750,9	4,03	0,199
T	1	883,6	883,6	4,74	0,161
ti	1	1256,2	1256,2	6,74	0,122
Cuadrado	1	179,8	179,8	0,96	0,43
T*T	1	179,8	179,8	0,96	0,43
Error	2	372,7	186,3		
Total	5	1876,9			

Co

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
ti	1	4,840	4,840	3,36	0,318

T	3	7,810	2,603	1,81	0,489
Error	1	1,440	1,440		
Total	5	16,613			

Zn

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	20443	5111	0,96	0,635
Lineal	2	11717	5858	1,1	0,559
T	1	10796	10796	2,03	0,39
ti	1	9153	9153	1,72	0,415
Cuadrado	1	13645	13645	2,56	0,355
T*T	1	13645	13645	2,56	0,355
Interacción de 2 factores	1	2294	2294	0,43	0,63
T*ti	1	2294	2294	0,43	0,63
Error	1	5323	5323		
Total	5	25766			

Mo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Ti	3	2,58	0,86	2,39	0,436
T	1	0,04	0,04	0,11	0,795
Error	1	0,36	0,36		
Total	5	3,42			

Al

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	2.8903E+10	7225770293	2311,37	0,016
Lineal	2	1.8279E+10	9139488808	2923,53	0,013
T	1	8573368931	8573368931	2742,44	0,012
ti	1	4953414	4953414	1,58	0,427
Cuadrado	1	165470	165470	0,05	0,856
T*T	1	165470	165470	0,05	0,856
Interacción de 2 factores	1	9537851121	9537851121	3050,96	0,012
T*ti	1	9537851121	9537851121	3050,96	0,012
Error	1	3126181	3126181		
Total	5	2.8906E+10			

Pb

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
T	3	11,91	3,97	0,75	0,668
ti	1	2,89	2,89	0,55	0,595

Error	1	5,29	5,29		
Total	5	30,853			
Cr					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	98,74	24,685	5,04	0,321
Lineal	2	45,248	22,624	4,62	0,312
T	1	33,359	33,359	6,82	0,233
ti	1	42,843	42,843	8,76	0,207
Cuadrado	1	3,617	3,617	0,74	0,548
T*T	1	3,617	3,617	0,74	0,548
Interacción de 2 factores	1	14,088	14,088	2,88	0,339
T*ti	1	14,088	14,088	2,88	0,339
Error	1	4,893	4,893		
Total	5	103,633			
Ni					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
T	3	7,81	2,603	1,81	0,489
ti	1	4,84	4,84	3,36	0,318
Error	1	1,44	1,44		
Total	5	16,613			
Ba					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	1453,9	726,9	7,22	0,071
Lineal	2	1453,9	726,9	7,22	0,071
T	1	804,1	804,1	7,99	0,066
ti	1	1207,9	1207,9	12	0,041
Error	3	302	100,7		
Total	5	1755,9			
Sr					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	513,91	171,3	3,96	0,208
Lineal	2	513,64	256,82	5,94	0,144
T	1	411,81	411,81	9,52	0,091
ti	1	324,89	324,89	7,51	0,111
Cuadrado	1	52,51	52,51	1,21	0,385
T*T	1	52,51	52,51	1,21	0,385
Error	2	86,53	43,26		
Total	5	600,43			

Anexo 12

Propuesta de producción de biochar (TP300-01) por el proceso de pirólisis lenta a partir de los biosólidos primarios, para fines comerciales

Tabla 45

Costo estimado de la producción para obtener 1000 g de biochar

		Cantidad	Unidad	Precio por unidad (S/)	Total (S/)
Insumos	Biosólidos primarios	1500	g	0,0195	0,282
	Energía	9	kW/h	0,85	7,650
Costo total de producción					7,932

El costo de producción es relativamente alto, debido a que estamos en una etapa de investigación, pero de acuerdo a los antecedentes y revisiones bibliográficas, estos costos se pueden reducir cuando la producción es de mayor escala (toneladas), ya que el m³ del biosólido primario es comercializado a S/ 15,00 por la PTAR "La Totora", además de acuerdo a la tecnología implementada en Brasil, de realizar un propio horno de manera casera, en donde se pueda utilizar residuos de orgánicos y pirolizarlos, sin generar muchos costos de producción.

Anexo 13

Panel fotográfico

Figura 52

Muestras del biochar obtenido a diferentes tratamientos

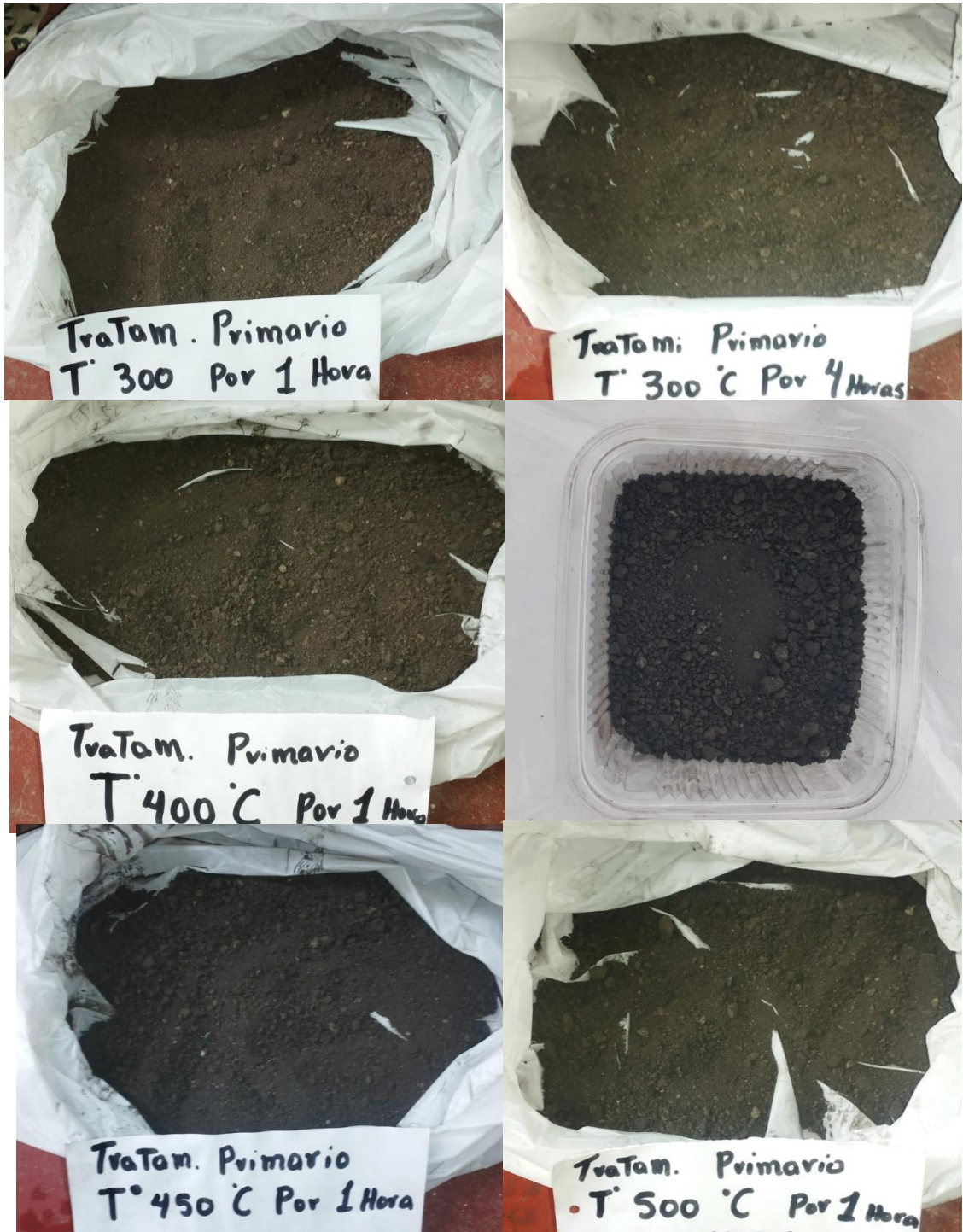


Figura 53

Visualización de cristales y una capa de aceite en la superficie del recipiente



Figura 54

Determinación del tamaño de partícula por el laboratorio GRUPO KYS INGENIERO SA

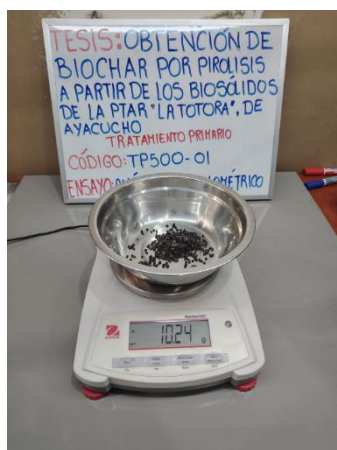
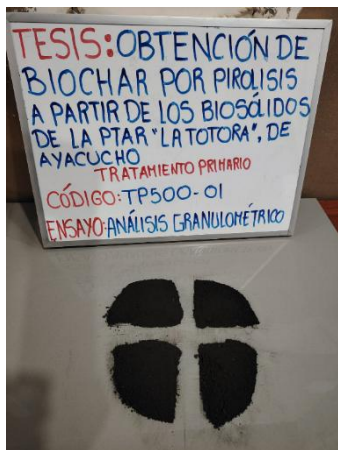


Figura 55

Recolección de tierras de cultivo con lombricultura (Uchuypampa)



Figura 56

Recolección de tierra grasa del taller mecánico



Anexo 14

Visita al Instituto Nacional de Innovación Agraria

Figura 57

Lecturas en el potenciómetro

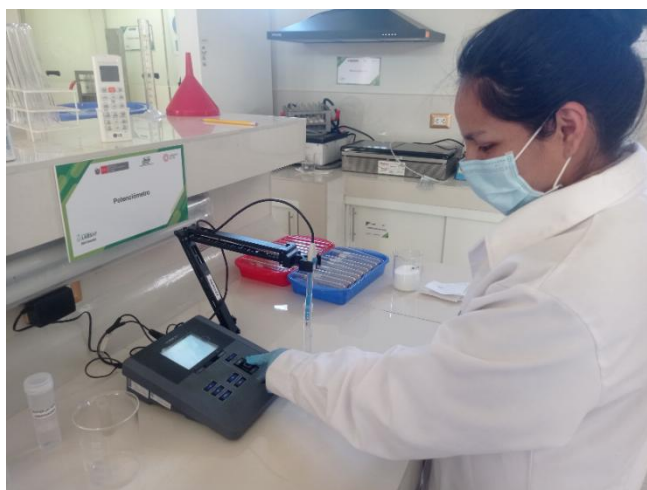


Figura 58

Verificación de la temperatura del Horno-Mufla



Figura 59

Lecturas en el conductímetro



Figura 60

Equipo Kjeldahl del INIA



Anexo 15

Visita al Laboratorio DCP-LAB Yaku

Figura 61

Método APHA9222, para E. Coli

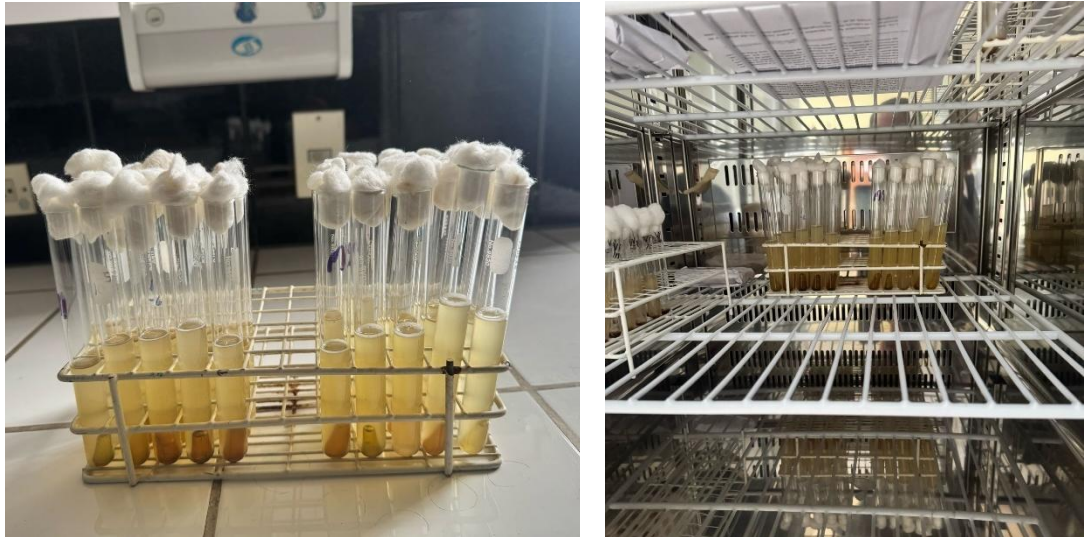


Figura 62

Método APHA-AWWA-WEF-9221E, para coliformes totales



Anexo 16

Resultados del INIA (biosólidos primarios y secundarios)



Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO N° 100089 / AB / LABSAF - CANAAN



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: Leydi Yulissa Quispe Pérez
Propietario / Productor	: Leydi Yulissa Quispe Pérez
Dirección del cliente	: Jr. Huaraz N° 105 - Carmen Alto
Solicitado por	: Leydi Yulissa Quispe Pérez
Muestreado por	: Cliente
Número de muestra(s)	: 2
Producto declarado	: Abonos
Presentación de las muestras(s)	: Frasco de Plástico
Referencia del muestreo	: Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	: PTAR - La Totorá - Ayacucho
Fecha(s) de muestreo (***)	: 20/08/2024, 21/08/2024
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2024-08-20, 2024-08-22
Lugar de ensayo	: LABSAF CANAAN
Fecha(s) de análisis	: Del 2024-08-26 al 2024-10-10
Cotización del servicio Fecha de emisión	: 107-24-CA : 2024-10-10

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	AB032-CA24	AB033-CA24	-	-	-	-
Matriz Analizada	Abonos	Abonos	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)	20/08/2024,	2024-08-21	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	11:35	16:20	-	-	-	-
Condición de la muestra	Conservada	Conservada	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	Muestra 01	Muestra 02	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
pH (*)	unid. pH	-	5,8	5,7	-	-
Conductividad Eléctrica (*)	dS/m	-	6,1	5,6	-	-
Materia Orgánica (*)	%	-	23,7	20,8	-	-
Nitrógeno Total (*)	%	-	1,63	1,54	-	-
Fósforo (P2O5) (*)	%	-	1,87	1,04	-	-
Potasio (K2O) (*)	%	-	0,99	3,09	-	-
Sólidos Totales (*)	%	-	97,41	95,35	-	-
Metales Totales	-	-	-	-	-	-
Arsénico (As) (*)	mg/Kg	-	13,00	14,75	-	-
Cadmio (Cd) (*)	mg/Kg	-	7,75	9,50	-	-
Plomo (Pb) (*)	mg/Kg	-	2,25	2,25	-	-
Cromo (Cr) (*)	mg/Kg	-	8,75	9,75	-	-
Níquel (Ni) (*)	mg/Kg	-	0,00	0,00	-	-
Zinc (Zn) (*)	mg/Kg	-	44,00	40,00	-	-
Cobre (Cu) (*)	mg/Kg	-	10,75	11,5	-	-

Anexo 17

Resultados del INIA (calidad del biochar)



Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO

N° 020003-25 / AB / LABSAF - CANAAN



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: Leydi Yulissa Quispe Pérez
Propietario / Productor	: Leydi Yulissa Quispe Pérez
Dirección del cliente	: Jr. Huaraz N° 105 - Carmen Alto
Solicitado por	: Leydi Yulissa Quispe Pérez
Muestreado por	: Cliente
Número de muestra(s)	: 1
Producto declarado	: Abonos
Presentación de las muestras(s)	: Envase de Plástico
Referencia del muestreo	: Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	: Ayacucho-Huamanga-Ayacucho
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2024-12-17
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-01-03
Lugar de ensayo	: LABSAF CANAAN
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-01-09 al 2025-02-17
Cotización del servicio Fecha de emisión	: 002-25-CA : 2025-02-18

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6		
Código de Laboratorio	AB001-CA25	AB047-CA24	AB047-CA24	AB047-CA24	AB047-CA24	AB047-CA24		
Matriz Analizada	Abonos	Abonos	Abonos	Abonos	Abonos	Abonos		
Fecha de Muestreo (***)	2024-12-17	2024-09-30	2024-09-30	2024-09-30	2024-09-30	2024-09-30		
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	9:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00		
Condición de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	TP300-01	TP400-01	TP450-01	TP300-04	TP400-04	TP500-01		
Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
pH (*)	unid. pH	-	6.8	7.4	8.1	7.2	7.6	8.3
Conductividad Eléctrica (*)	dS/m	-	2.4	3.3	4.0	1.5	1.7	2.9
Materia Orgánica (*)	%	-	20.9	14.3	11.8	17.5	13.4	11.4
Nitrógeno Total (*)	%	-	1.50	1.23	1.03	1.40	1.12	1.02
Fósforo (P2O5) (*)	%	-	2.24	0.82	1.13	1.16	1.47	1.56
Potasio (K2O) (*)	%	-	0.13	0.14	0.14	0.13	0.15	0.13
Humedad (*)	%	-	1.64	1.06	1.09	1.18	5.20	0.97
%COT	%	-	11.59	7.97	6.53	9.74	7.44	6.35
Relación C/N		-	7.70	6.46	6.32	6.95	6.66	6.30
Metales Totales		-	-	-	-	-	-	-
Aluminio (Al) (*)	mg/Kg	-	19856.2	21000.0	18965.8	207030.0	22867.0	21376.0
Arsénico (As) (*)	mg/Kg	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cadmio (Cd) (*)	mg/Kg	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Plomo (Pb) (*)	mg/Kg	-	44.8	47.8	42.2	48.8	47.2	44.4
Cromo (Cr) (*)	mg/Kg	-	57.6	63.4	61.0	59.2	70.6	62.8
Níquel (Ni) (*)	mg/Kg	-	28.2	31.6	28.4	31.6	32.6	30.8
Cobalto (Co) (*)	mg/Kg	-	9.6	11.4	9.6	10.8	10.4	10.6
Zinc (Zn) (*)	mg/Kg	-	990.8	965.4	929.8	1031.2	1047.4	1134.0
Cobre (Cu) (*)	mg/Kg	-	176.2	198.2	185.4	215.4	219.0	223.4
Bario (Ba) (*)	mg/Kg	-	269.6	304.4	290.8	310.6	322.0	312.1
Molibdeno (Mo) (*)	mg/Kg	-	16.6	18.4	16.2	17.4	18.0	17.2
Estroncio (Sr) (*)	mg/Kg	-	140.8	155.6	152.0	162.2	165.4	171.8
Hierro (Fe) (*)	mg/Kg	-	21114.6	26593.2	25003.0	25796.2	26749.0	26211.2
Magnesio (Mg) (*)	mg/Kg	-	9360.0	8602.0	7994.0	9088.0	8818.0	9028.0
Manganeso (Mn) (*)	mg/Kg	-	501.6	521.2	500.2	546.2	562.6	525.4
Calcio (Ca) (*)	mg/Kg	-	63136.0	57084.0	54744.0	62478.0	60690.0	58054.0

Anexo 18

Resultados del análisis microbiológico del biosólido primario de la PTAR “La Titora”

DCP YAKU LABORATORY SERVICES



INFORMACIÓN GENERAL

Matriz	Biosólido-Primario		
Forma de Presentación	Frasco de polietileno		
Fecha de muestreo	20/08/2024	Hora de muestreo	10:31:00
Fecha de Recepción	20/08/2024	Fecha de Término	30/08/24
Procedencia	Planta de tratamiento de aguas residuales "La Titora"		
Lugar de muestreo	B1/Tratamiento Primario		
Coordenadas	Este: 585691.00ME / 8546896.00MS		
Altitud	2610 m.s.n.m.		
N° ID	AGO062024.1		
Proyecto	Obtención de Biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Titora" de Ayacucho.		

ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO
AGO062024.1		
MICROBIOLÓGICO		
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	UFC/g ST	4.61E+09
COLIFORMES TOTALES	UFC/g ST	6.21E+10
<i>Escherichia coli</i>	UFC/g ST	2.78E+09
HUEVOS HELMINTOS	H.H./4g ST	19 ^a

N.C.: Significa que el resultado es No Cuantificable y es menor al Límite de Cuantificación Indicado en el paréntesis.

a: Conteo de huevos sin determinación de viabilidad.

*EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE.

Anexo 19

Resultados de los análisis fisicoquímicos del biosólido secundario de la PTAR "La Tatora"

DCP YAKU LABORATORY SERVICES



INFORMACIÓN GENERAL

Matriz	Biosólido-Secundario		
Forma de Presentación	Frasco de polietileno		
Fecha de muestreo	21/08/2024	Hora de muestreo	15:35:00
Fecha de Recepción	21/08/2024	Fecha de Terminó	31/08/24
Procedencia	Planta de tratamiento de aguas residuales "La Tatora"		
Lugar de muestreo	B2/Tratamiento Secundario		
Coordenadas	Este: 585691.00ME / 8546896.00MS		
Altitud	2610 m.s.n.m.		
N° ID	AGO062024.1		
Proyecto	Obtención de Biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Tatora" de Ayacucho.		

ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO
MICROBIOLÓGICO		
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	UFC/g ST	1.38E+09
COLIFORMES TOTALES	UFC/g ST	2.12E+09
<i>Escherichia coli</i>	UFC/g ST	9.72E+08
HUEVOS HELMINTOS	H.H./4g ST	g ^a

N.C.: Significa que el resultado es No Cuantificable y es menor al Límite de Cuantificación Indicado en el paréntesis.

a: Cuento de huevos sin determinación de viabilidad.

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE.

Anexo 20

Resultados del laboratorio CDP YAKU (análisis microbiológico del TP500-01)

DCP YAKU LABORATORY SERVICES



INFORMACIÓN GENERAL

Matriz	Tratamineto-Primario		
Forma de Presentación	Frasco de polietileno		
Fecha de muestreo	22/12/2024	Hora de muestreo	09:10:00
Fecha de Recepción	8/01/2025	Fecha de Terminó	30/01/25
Procedencia	Producto del proceso de pirólisis a 500 °C por una hora		
Lugar de muestreo	Tratamiento Primario		
Coordenadas	-----		
Altitud	-----		
N° ID	ENE0252025.1		
Especificaciones			

ANÁLISIS	METODO	UNIDAD	RESULTADO
			ENE0252025.1
MICROBIOLÓGICO			
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	APHA-AWWA-WEF-9221E	NMP/g ST	<3
COLIFORMES TOTALES	APHA-AWWA-WEF-9221B	NMP/g ST	<3
<i>Escherichia coli</i>	APHA9222	UFC/g ST	0.00E+00
HUEVOS HELMINTOS	OPS-CIPES	H.H./4g ST	2 ^a
<i>Salmonella spp.</i>	NOM-004-SEMARNAT-2002	NMP/g ST	<3

N.C.: Significa que el resultado es No Cuantificable y es menor al Limite de Cuantificación Indicado en el paréntesis.

a: Conteo de huevos sin determinación de viabilidad.

Anexo 21

Resultados del laboratorio CDP YAKU (análisis microbiológico del TP300-04)

DCP YAKU LABORATORY SERVICES



INFORMACIÓN GENERAL

Matriz	Tratamineto-Primario		
Forma de Presentación	Frasco de polietileno		
Fecha de muestreo	17/12/2024	Hora de muestreo	08:15:00
Fecha de Recepción	8/01/2025	Fecha de Terminó	30/01/25
Procedencia	Producto del preceso de pirólisis a 300 °C por cuatro horas		
Lugar de muestreo	Tratamiento Primario		
Coordenadas	----		
Altitud	----		
N° ID	ENE0252025.2		
Especificaciones			

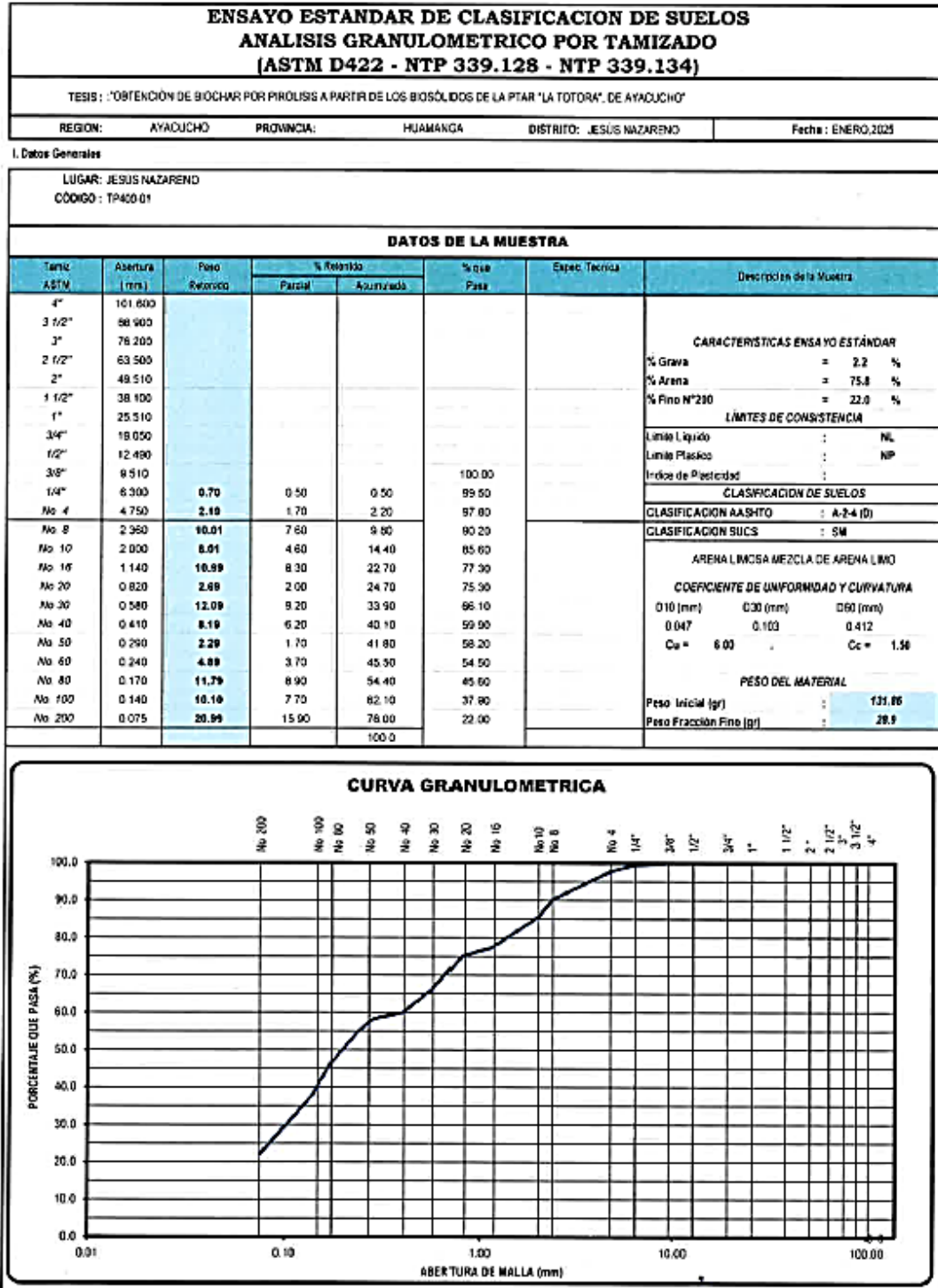
ANÁLISIS	METODO	UNIDAD	RESULTADO
MICROBIOLÓGICO			
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	APHA-AWWA-WEF-9221E	NMP/g ST	<3
COLIFORMES TOTALES	APHA-AWWA-WEF-9221B	NMP/g ST	<3
<i>Escherichia coli</i>	APHA9222	UFC/g ST	0.00E+00
HUEVOS HELMINTOS	OPS-CIPES	H.H./4g ST	1*
<i>Salmonella spp.</i>	NOM-004-SEMARNAT-2002	NMP/g ST	<3

N.C.: Significa que el resultado es No Cuantificable y es menor al Límite de Cuantificación Indicado en el paréntesis.

a: Conteo de huevos sin determinación de viabilidad.

Anexo 22

Resultados del análisis granulométrico de todos los tratamientos



**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO
(ASTM D422 - NTP 339.128 - NTP 339.134)**

TESIS : "OBTENCIÓN DE BIOCHAR POR PROCESOS A PARTIR DE LOS BIOSÓLIDOS DE LA PTAR "LA TOTORA", DE AYACUCHO"

REGION: AYACUCHO PROVINCIA: HUAMANGA DISTRITO: JESUS NAZARENO Fecha: ENERO 2025

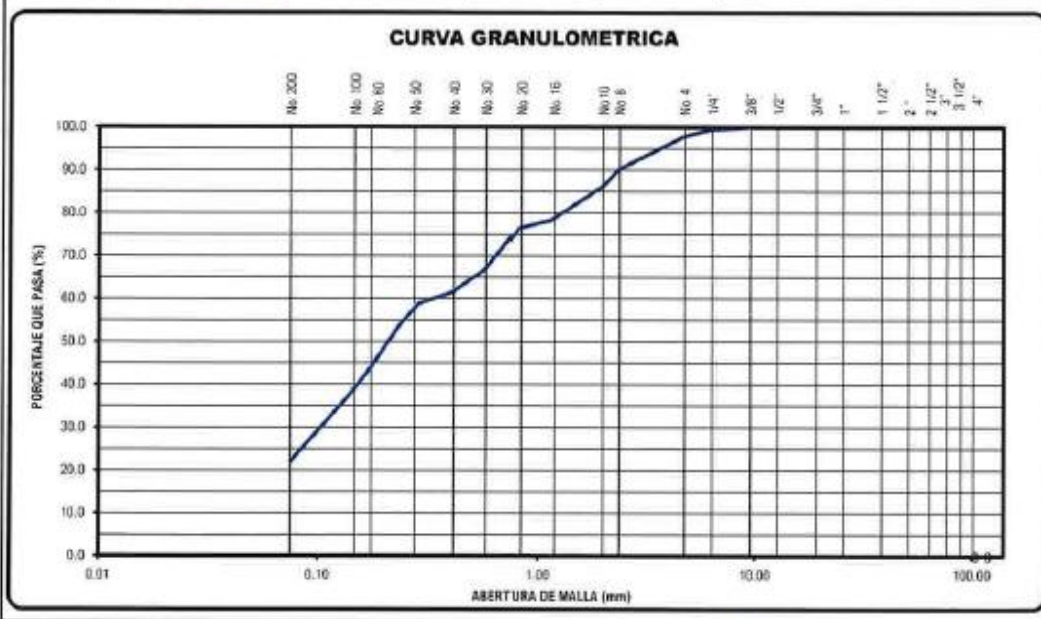
I. Datos Generales

LUGAR: JESUS NAZARENO
CÓDIGO: TP400-04

DATOS DE LA MUESTRA

Tamaño ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	% Retenido		% que Pasa	Espec. Técnica	Descripción de la Muestra
			Parcial	Acumulado			
4"	101.600						CARACTERÍSTICAS ENSAYO ESTÁNDAR % Grava = 2.2 % % Arena = 75.8 % % Fino N°200 = 22.0 % LÍMITES DE CONSISTENCIA Límite Líquido : NL Límite Plástico : NP Índice de Plasticidad : CLASIFICACION DE SUELOS CLASIFICACION AASHTO : A-2-4 (S) CLASIFICACION SUCS : SM ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA D ₁₀ (mm) : 0.046 D ₃₀ (mm) : 0.104 D ₆₀ (mm) : 0.340 C _u = 6.00 C _c = 1.50 PESO DEL MATERIAL Peso Inicial (gr) : 131.86 Peso Fracción Fino (gr) : 29.0
3 1/2"	88.900						
3"	76.200						
2 1/2"	63.500						
2"	49.510						
1 1/2"	38.100						
1"	25.510						
3/4"	19.050						
1/2"	12.490						
3/8"	9.510				100.00		
1/4"	6.300	0.99	0.90	0.90	99.50		
No. 4	4.750	2.19	1.70	2.20	97.80		
No. 8	2.360	10.19	7.70	9.90	90.10		
No. 10	2.000	6.20	3.90	13.80	86.20		
No. 15	1.140	10.60	8.00	21.80	78.20		
No. 20	0.820	2.38	1.80	23.60	76.40		
No. 30	0.580	12.75	9.70	33.30	66.70		
No. 40	0.410	6.95	5.30	38.60	61.40		
No. 50	0.290	3.47	2.60	41.20	58.80		
No. 60	0.240	6.20	4.70	45.90	54.10		
No. 80	0.170	14.89	11.30	57.20	42.80		
No. 100	0.140	7.04	5.30	62.50	37.50		
No. 200	0.075	20.40	15.50	78.00	22.00		
				100.0			

CURVA GRANULOMETRICA



OBSERVACIONES: ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO


GRUPO KY S INGENIEROS SAC
 Ing. Víctor C. Lizana Palomino
 CIP. 240564

**ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO
(ASTM D422 - NTP 339.128 - NTP 339.134)**

TESIS : "OBTENCION DE BIOCHAR POR PIROLISIS A PARTIR DE LOS BIOSOLIDOS DE LA PTAR "LA TOTORA", DE AYACUCHO"

REGION: AYACUCHO PROVINCIA: HUAMANGA DISTRITO: JESUS NAZARENO Fecha: ENERO, 2025

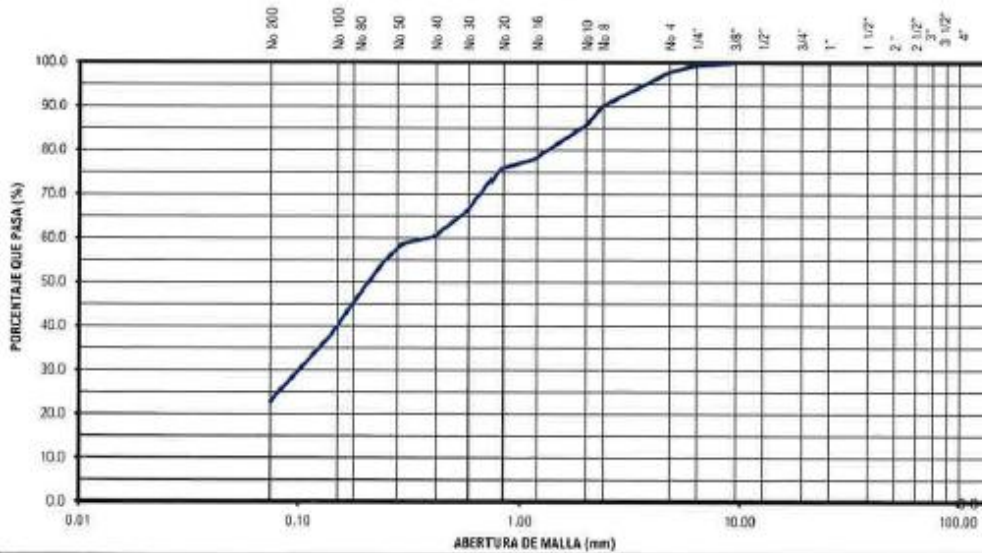
I. Datos Generales

LUGAR: JESUS NAZARENO
CÓDIGO: TP450-01

DATOS DE LA MUESTRA

Tamaño ASTM	Abertura (mm)	Peso Resaca	% Retenido		% que Pasa	Espec. Técnica	Descripción de la Muestra
			Fración	Acurvado			
4"	101.600						CARACTERISTICAS ENSAYO ESTANDAR % Grava = 2.2 % % Arena = 74.9 % % Fino N°200 = 22.9 % LÍMITES DE CONSISTENCIA Límite Líquido : NL Límite Plástico : NP Índice de Plasticidad : CLASIFICACION DE SUELOS CLASIFICACION AASHTO : A-2-4 (II) CLASIFICACION SUCS : SM ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA D ₁₀ (mm) : 0.044 D ₃₀ (mm) : 0.100 D ₆₀ (mm) : 0.380 C _u = 8.00 C _s = 1.50 PESO DEL MATERIAL Peso Inicial (gr) : 131.86 Peso Fracción Fino (gr) : 30.0
3 1/2"	88.900						
3"	76.200						
2 1/2"	63.500						
2"	49.510						
1 1/2"	38.100						
1"	25.510						
3/4"	19.050						
1/2"	12.490						
3/8"	9.510				100.00		
1/4"	6.300	0.71	0.50	0.50	99.50		
No. 4	4.750	2.18	1.70	2.20	97.80		
No. 8	2.360	18.13	7.70	9.90	90.10		
No. 10	2.000	6.78	4.30	14.20	85.80		
No. 16	1.140	19.46	7.90	22.10	77.90		
No. 20	0.820	2.69	2.00	24.10	75.90		
No. 30	0.580	12.86	9.70	33.80	66.20		
No. 40	0.410	7.85	5.80	39.80	60.40		
No. 50	0.290	2.38	1.80	41.40	58.60		
No. 60	0.240	5.29	4.00	45.40	54.60		
No. 80	0.170	13.58	10.30	55.70	44.30		
No. 100	0.140	8.21	6.20	81.90	38.10		
No. 200	0.075	20.10	15.20	77.10	22.90		
				100.0			

CURVA GRANULOMETRICA



OBSERVACIONES: ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO



**ENSAYO ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO
(ASTM D422 - NTP 339.128 - NTP 339.134)**

TESIS : 'OBTENCIÓN DE BIOCHAR POR PIROLISIS A PARTIR DE LOS BIOSÓLIDOS DE LA PTAR 'LA TOTORÁ', DE AYACUCHO'

REGION: AYACUCHO PROVINCIA: HUAMANGA DISTRITO: JESUS NAZARENO Fecha: ENERO 2025

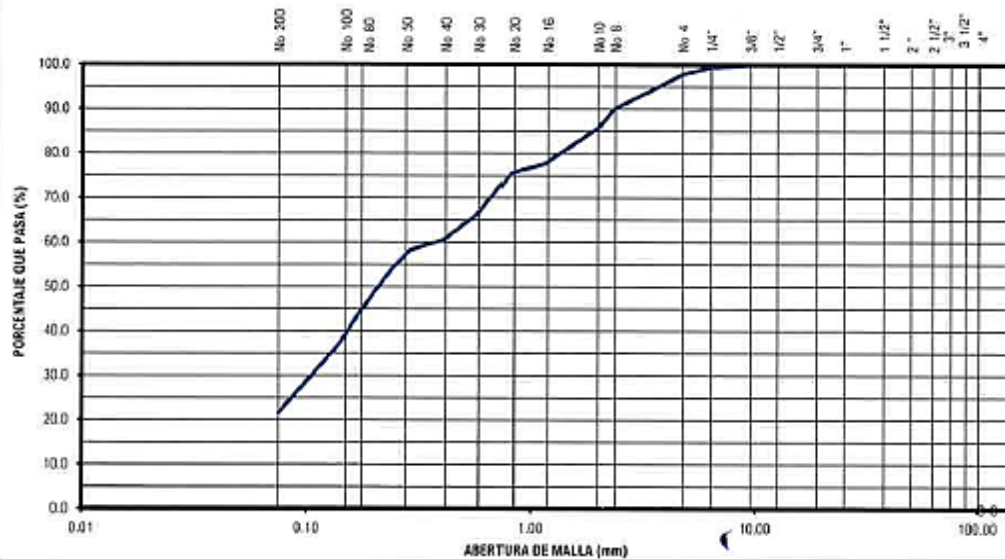
I. Datos Generales

LUGAR: JESUS NAZARENO
CÓDIGO: TP303-04

DATOS DE LA MUESTRA

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso Resenido	% Resenido		% que Pasa	Espec. Técnica	Descripción de la Muestra
			Parcial	Acumulado			
4"	101.600						CARACTERÍSTICAS ENSAYO ESTÁNDAR % Grava = 2.2 % % Arena = 76.3 % % Fino N°200 = 21.5 % LÍMITES DE CONSISTENCIA Límite Líquido : NL Límite Plástico : NP Índice de Plasticidad : CLASIFICACION DE SUELOS CLASIFICACION AASHTO : A-2-4 (0) CLASIFICACION SUCS : SM ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA D10 (mm) D30 (mm) D60 (mm) 0.047 0.105 0.300 Cu = 6.90 Cc = 1.90 PESO DEL MATERIAL Peso Inicial (gr) : 131.86 Peso Fracción Fino (gr) : 28.6
3 1/2"	89.900						
3"	76.200						
2 1/2"	63.500						
2"	49.510						
1 1/2"	38.100						
1"	25.510						
3/4"	19.050						
1/2"	12.490						
3/8"	9.510				100.00		
1/4"	6.300	0.70	0.50	0.50	99.50		
No 4	4.750	2.20	1.70	2.20	97.80		
No 8	2.360	10.18	7.70	9.90	90.10		
No 10	2.000	5.83	4.30	14.20	85.80		
No 16	1.140	10.81	8.20	22.40	77.60		
No 20	0.820	2.64	1.90	24.30	75.70		
No 30	0.590	12.43	8.40	33.70	66.30		
No 40	0.410	7.59	5.80	39.50	60.50		
No 50	0.290	2.99	2.30	41.80	58.20		
No 60	0.240	5.69	4.30	45.10	54.90		
No 80	0.170	13.40	10.20	55.30	44.70		
No 100	0.140	8.64	8.60	62.90	37.10		
No 200	0.075	20.51	15.90	78.50	21.50		
				100.0			

CURVA GRANULOMETRICA



OBSERVACIONES: ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO

GRUPO KYS INGENIEROS SAC
 Ing. Victor C. Lizana Palomino
 D.S. 74166.4

**ENSAYO ESTANDAR DE CLASIFICACION DE SUELOS
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO
(ASTM D422 - NTP 339.128 - NTP 339.134)**

TESIS : "OBTENCIÓN DE BIOCHAR POR PIROLISIS A PARTIR DE LOS BIOSÓLIDOS DE LA PTAR "LA TOTORA", DE AYACUCHO"

REGION: AYACUCHO PROVINCIA: HUAMANGA DISTRITO: JESÚS NAZARENO Fecha: ENERO, 2025

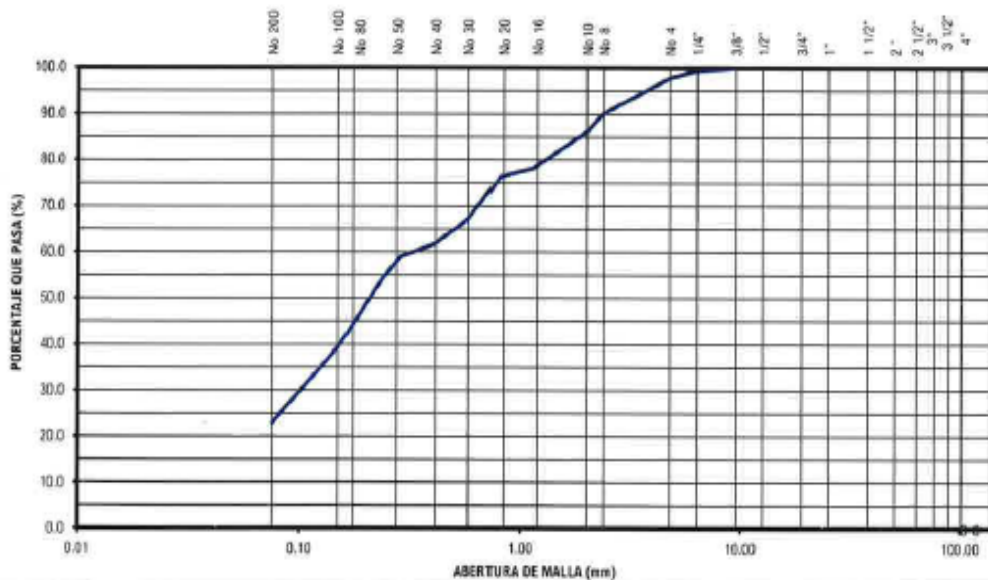
I. Datos Generales

LUGAR: JESÚS NAZARENO
CÓDIGO: TP300-01

DATOS DE LA MUESTRA

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	% Retenido		% que Pasa	Espec. Técnica	Descripción de la Muestra
			Parcial	Acumulado			
4"	101.600						CARACTERÍSTICAS ENSAYO ESTÁNDAR % Grava = 2.2 % % Arena = 74.9 % % Fino N°200 = 22.9 % LIMITES DE CONSISTENCIA Límite Líquido : NL Límite Plástico : NP Índice de Plasticidad : CLASIFICACION DE SUELOS CLASIFICACION AASHTO : A-2-4 (P) CLASIFICACION SUCS : SM ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA D10 (mm) D30 (mm) D60 (mm) 0.044 0.101 0.331 Cu = 6.00 Cc = 1.50 PESO DEL MATERIAL Peso Inicial (gr) : 131.86 Peso Fracción Fino (gr) : 30.1
3 1/2"	88.900						
3"	76.200						
2 1/2"	63.500						
2"	49.510						
1 1/2"	38.100						
1"	25.510						
3/4"	19.050						
1/2"	12.490						
3/8"	9.510				100.00		
1/4"	6.300	0.69	0.50	0.50	99.50		
No. 4	4.750	2.18	1.70	2.20	97.80		
No. 8	2.360	10.89	7.70	9.90	90.10		
No. 10	2.000	6.18	3.90	13.80	86.20		
No. 16	1.140	10.58	8.00	21.80	78.20		
No. 20	0.820	2.36	1.80	23.60	76.40		
No. 30	0.580	12.71	9.60	33.20	66.80		
No. 40	0.410	6.31	5.20	38.40	61.60		
No. 50	0.290	3.48	2.60	41.00	59.00		
No. 60	0.240	6.14	4.70	45.70	54.30		
No. 80	0.170	14.91	11.30	57.00	43.00		
No. 100	0.140	7.03	5.30	62.30	37.70		
No. 200	0.075	18.47	14.80	77.10	22.90		
				100.0			

CURVA GRANULOMETRICA



OBSERVACIONES: ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO


GRUPO KYS INGENIEROS SAC
 Ing. Victor C. Lizapa Palomino
 CIP. 240564

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO (ASTM D422 - NTP 339.128 - NTP 339.134)

TESS : 'OBTENCIÓN DE BIOCHAR POR PIRÓLISIS A PARTIR DE LOS BIOSÓLIDOS DE LA PTAR "LA TOTORA", DE AYACUCHO'

REGION: AYACUCHO PROVINCIA: HUAMANGA DISTRITO: JESUS NAZARENO Fecha : ENERO,2026

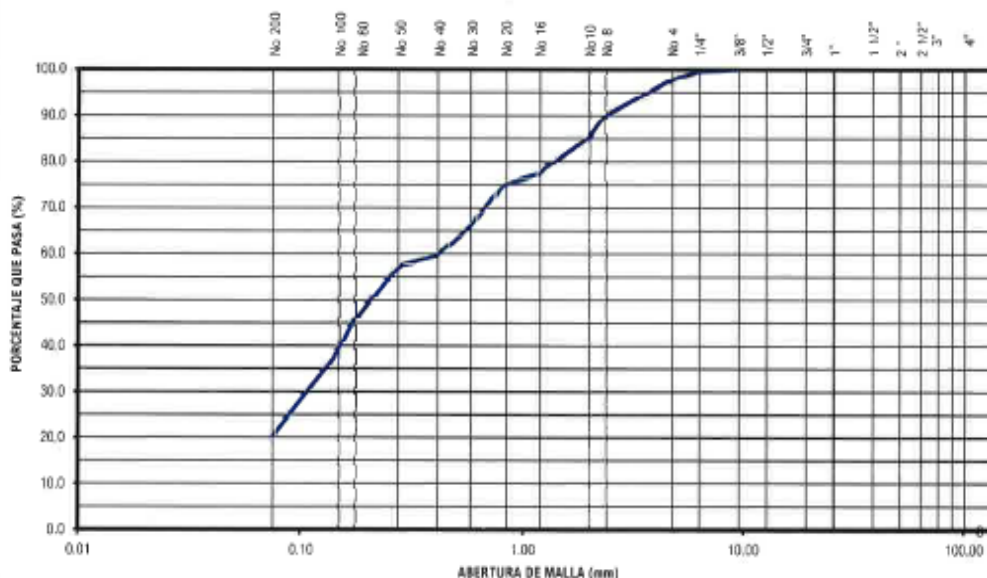
I. Datos Generales

LUGAR: JESUS NAZARENO
CÓDIGO : TP500-01

DATOS DE LA MUESTRA

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	% Retenido		% que Pasa	Espec. Técnica	Descripción de la Muestra
			Parcial	Acumulado			
4"	101.600						CARACTERISTICAS ENSAYO ESTÁNDAR % Grava = 2.2 % % Arena = 77.2 % % Fino N°200 = 20.6 % LÍMITES DE CONSISTENCIA Límite Líquido : NL Límite Plástico : NP Índice de Plasticidad : CLASIFICACION DE SUELOS CLASIFICACION AASHTO : A-2-4 (0) CLASIFICACION SUCS : SM ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA D10 (mm) D30 (mm) D60 (mm) 0.050 0.107 0.424 Cu = 6.00 Cc = 1.50 PESO DEL MATERIAL Peso Inicial (gr) : 131.86 Peso Fracción Fino (gr) : 27.3
3 1/2"	88.900						
3"	76.200						
2 1/2"	63.500						
2"	49.510						
1 1/2"	38.100						
1"	25.510						
3/4"	19.050						
1/2"	12.490						
3/8"	9.510				100.00		
1/4"	6.300	0.70	0.50	0.50	99.50		
No. 4	4.750	2.22	1.70	2.20	97.80		
No. 8	2.360	10.24	7.80	10.00	89.00		
No. 10	2.000	6.97	4.60	14.60	85.40		
No. 16	1.140	11.04	8.40	23.00	77.00		
No. 20	0.820	2.73	2.10	25.10	74.90		
No. 30	0.580	12.16	9.20	34.30	65.70		
No. 40	0.410	8.27	6.30	40.60	59.40		
No. 50	0.290	2.39	1.80	42.40	57.60		
No. 60	0.240	4.99	3.80	46.20	53.80		
No. 80	0.170	11.69	9.00	55.20	44.80		
No. 100	0.140	10.26	7.80	63.00	37.00		
No. 200	0.075	21.54	16.40	79.40	20.60		
				100.0			

CURVA GRANULOMETRICA



OBSERVACIONES: ARENA LIMOSA MEZCLA DE ARENA LIMO


GRUPO KYS INGENIEROS SAC
 Ing. Victor C. Lizana Palomino
 C.P. 240564
 ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO

**ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:****Obtención de biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Totorá" de Ayacucho****Expositora: Leydi Yulissa Quispe Perez
Bachiller en Ingeniería Química****Expediente N° 2517839 Resolución Decanal N° 052-2025-UNSCH-FIQM/D****Fecha: 27-05-2025**

En la Sala de Conferencia "Pedro Villena Hidalgo" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las ocho de la mañana con treinta minutos del día jueves veintinueve de mayo del año dos mil veinticinco, se reunieron la Bachiller en Ingeniería Química **Leydi Yulissa Quispe Perez**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Mg. Edgar Gregorio ARONES MEDINA, Mg. Abrahán Fernando TREJO ESPINOZA y Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU, bajo la Presidencia del Mg. Edgar Gregorio ARONES MEDINA (Encargado la presidencia con Memorando N° 263-2025-UNSCH-FIQM/D), Mg. Cipriano MENDOZA ROJAS (Docente Asesor de la Tesis), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente).

Acto seguido, el Presidente (e) del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **Obtención de biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Totorá" de Ayacucho**, presentado por la Bachiller **Leydi Yulissa Quispe Perez**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 052-2025-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente (e) del Jurado invitó a la Bachiller **Leydi Yulissa Quispe Perez**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de treinta y cinco minutos.

Finalizado la exposición de la Bachiller, el presidente (e) invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU, Mg. Abrahán Fernando TREJO ESPINOZA y Mg. Edgar Gregorio ARONES MEDINA. Luego el Presidente (e) informó que el asesor Mg. Cipriano MENDOZA ROJAS se encuentra en otra actividad.

A continuación, el presidente (e) del jurado invito a la sustentante y al público para que se sirva abandonar la sala de conferencia con la finalidad de permitir al jurado de sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADA POR UNANIMIDAD PROMEDIO DIECISEIS (16)**.



UNSCH

FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA

ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:

Obtención de biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Totora" de Ayacucho

Expositora: Leydi Yulissa Quispe Perez
Bachiller en Ingeniería Química

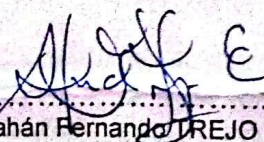
Expediente N° 2517839 Resolución Decanal N° 052-2025-UNSCH-FIQM/D

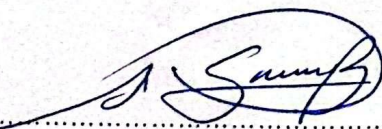
Fecha: 27-05-2025

Finalmente, el Presidente (e) del Jurado dispuso que se invite a la Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la sala de conferencias y anunció que, la Bachiller **Leydi Yulissa Quispe Perez**, ha resultado **APROBADA POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con una flamante **INGENIERA QUIMICA** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo las diez de la mañana con treinta minutos se dio por finalizado este acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:


Mg. Edgar Gregorio ARONES MEDINA
Presidente (e)


Mg. Abraham Fernando TREJO ESPINOZA
Miembro


Mg. Anibal Pablo GARCIA BENDEZU
Miembro


Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE
(Secretario Docente)

FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y METALURGIA
Av. Independencia s/n
Ciudad Universitaria



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 007-2025-UNSCH-FIQM/EPIQ

El que suscribe, Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Que, habiendo recibido el requerimiento de Constancia de Originalidad por parte de la Bach. **Leydi Yulissa QUISPE PEREZ**, se procedió a la evaluación y regularización de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU; cuyos resultados son:

Obtención de biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” de Ayacucho

Autor Bach. : Leydi Yulissa QUISPE PEREZ
Identificado : 2708688023
Fecha : 30 de junio de 2025
Archivo : Tesis

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del **13 (trece) % de ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

Ayacucho, 01 de julio de 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Escuela de Formación Profesional
de Ingeniería Química

Dr. Guido Antonino Hernández
DIRECTOR

Adjunto Reporte de Índice de Similitud
c.c: archivo

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
QUÍMICA Av. Independencia S/N –
Ayacucho Telf. 066-312510 Anexo. 152 Correo:**

Obtención de biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” de Ayacucho

por Leydi Yulissa QUISPE PEREZ

Fecha de entrega: 30-jun-2025 10:30p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2708688023

Nombre del archivo: TESIS_Quispe_Leydi.pdf (9.26M)

Total de palabras: 36762

Total de caracteres: 191732

Obtención de biochar por pirólisis a partir de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales "La Totorá" de Ayacucho

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1 repositorio.lamolina.edu.pe 2%
Fuente de Internet

2 hdl.handle.net 2%
Fuente de Internet

3 repositorio.unsch.edu.pe 1%
Fuente de Internet

4 Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga 1%
Trabajo del estudiante

5 eos.com 1%
Fuente de Internet

6 repositorio.unac.edu.pe 1%
Fuente de Internet

7 repositorio.unsa.edu.pe <1%
Fuente de Internet

8 revistas.sena.edu.co <1%
Fuente de Internet

9 www.elperulegal.com <1%
Fuente de Internet

10 repositorio.unasam.edu.pe <1%
Fuente de Internet

11 repositorio.ucv.edu.pe <1%
Fuente de Internet

12 busquedas.elperuano.pe <1%
Fuente de Internet

13 es.scribd.com <1%
Fuente de Internet

14 tesis.ucsm.edu.pe <1%
Fuente de Internet

15	cict.umcc.cu Fuente de Internet	<1 %
16	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
17	portal.findresearcher.sdu.dk Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	Abhay Raj, Ashutosh Yadav, Shashi Arya, Ranjna Sirohi et al. "Preparation, characterization and agri applications of biochar produced by pyrolysis of sewage sludge at different temperatures", Science of The Total Environment, 2021 Publicación	<1 %
21	max.book118.com Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad del Pacifico Trabajo del estudiante	<1 %
23	www.tdx.cat Fuente de Internet	<1 %
24	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
25	xdoc.mx Fuente de Internet	<1 %
26	www.sunass.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
27	www.freewebs.com Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.unaj.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to Unidades Tecnológicas de Santander Trabajo del estudiante	<1 %

30	Fuente de Internet	<1 %
31	www3.vivienda.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
32	agrologia.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %
33	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	<1 %
34	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	<1 %
36	Lei Guo, Wencheng Zhu, Fuquan Xu, Ming Liu, Yu Xie, Jingmin Zhang. " Optimized ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from and evaluation of antioxidant activities in vitro ", CyTA - Journal of Food, 2013 Publicación	<1 %
37	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	<1 %
38	Claudia Isabel Bas Bellver. "Desarrollo del proceso de obtención de polvos funcionales de uso alimentario a partir de residuos de las líneas de confección de hortalizas, caracterización funcional y evaluación de su respuesta a la digestión simulada in vitro", Universitat Politecnica de Valencia, 2023 Publicación	<1 %
39	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo