

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



T E S I S

**“INFLUENCIA DEL TIEMPO Y TEMPERATURA EN LA CALIDAD DEL
CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CELENDÍN”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR LA BACHILLER:

ROCYCELA SILVA CABELLOS

ASESOR

Ing. M. Cs. GIOVANA ERNESTINA CHÁVEZ HORNA

CELENDÍN - PERÚ

2026

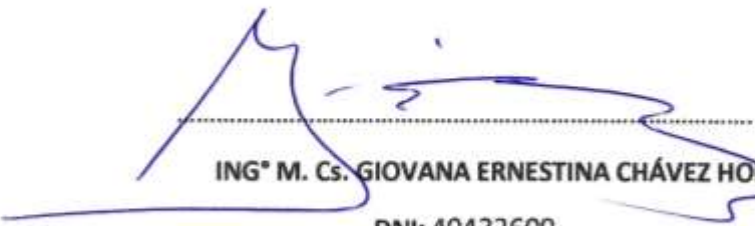


CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
ROCYCELA SILVA CABELLOS
DNI N° 73267885
Escuela Profesional/Unidad UNC:
DE INGENIERÍA AMBIENTAL
2. Asesor:
ING° M. Cs. GIOVANA ERNESTINA CHÁVEZ HORNA
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado Académico o título profesional:
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título del trabajo de investigación:
"INFLUENCIA DEL TIEMPO Y TEMPERATURA EN LA CALIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CELENDÍN"
6. Fecha de evaluación: 06/11/2025
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 1%
9. Código documento:
10. Resultado de la evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha de Emisión: 12/03/2026

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*



ING° M. Cs. GIOVANA ERNESTINA CHÁVEZ HORNA
DNI: 40432609

*En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Celendín, a los once días del mes de marzo del año dos mil veintiséis, se reunieron en el aula 102 de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - Sede Celendín, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 055-2026-FCA-UNC, de fecha 12 de enero del 2026**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la TESIS titulada: "INFLUENCIA DEL TIEMPO Y TEMPERATURA EN LA CALIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CELENDÍN", realizada por la Bachiller ROCYCELA SILVA CABELLOS para optar por el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las **DIEZ** horas con **DIECIOCHO** minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el presidente del Jurado anunció la **APROBACIÓN** por **UNANIMIDAD** con calificativo de **DIECISÉIS (16)** por tanto, el Bachiller queda expedido para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las **ONCE** horas y **VEINTE** minutos del mismo día, el presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Ing° M. Cs. Edgar Darwin Díaz Mori
PRESIDENTE

Ph.D. Manuel Roberto Roncal Rabanal
SECRETARIO

Ing. M. Cs. Adolfo Máximo López Aylas
VOCAL

Ing° M. Cs. Giovana Ernestina Chávez Horna
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios por brindarme la salud y presentarme los motivos para seguir y cumplir mis sueños.

A mis queridos padres Samuel Silva Torres y Silvia Cabellos Salazar quienes siempre con su amor paciencia y confianza en mí, me han motivado a cumplir este sueño, a mi hermano Lenin Silva Cabellos por siempre decirme hermana no te rindas si el camino es duro el resultado será maravilloso.

A mi querido esposo Lennin Vera Silva y a mi querida hijita Daniela Daranní Vera Silva, que son los responsables de poder lograr esta meta.

AGRADECIMIENTO

A Dios por presentarme personas maravillosas que me han motivado a seguir este sueño.

A todos los integrantes de la familia Silva Torres y Cabellos Salazar sin ellos no podría haber sido realidad este sueño.

A Don Orlando Pereyra por siempre brindarme sus conocimientos y motivarme a que crezca de manera profesional.

A mi prima Mariela por siempre acompañarme las madrugadas solitarias cuando hubo muchos trabajos.

A mi asesora Ing.MCs. Giovana Ernestina Chávez Horna por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación, asimismo al Ing. Efraín Quintanilla, Ing.Adolfo López y a todos los amigos partícipes.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Bases Teóricas	7
2.2.1. Tratamiento de aguas residuales municipales.....	7
2.2.2. Lodos residuales en una PTAR	9
2.2.3. Carbón activado	13
2.2.4. Influencia del tiempo y temperatura	23
2.2.5 Operaciones unitarias del carbón activado en las aplicaciones.....	24
2.2.6 Azul de metileno.....	25
2.3. Definición de Términos Básicos	27
2.3.1. Lodo residual	27
2.3.2. Carbón activado	27

2.3.3 Pirólisis	27
2.3.4 Adsorción.....	27
CAPÍTULO III	28
MARCO METODOLÓGICO	28
3.1. Localización del Estudio.....	28
3.2. Materiales.....	30
3.2.1. <i>Materiales de campo</i>	30
3.2.2. <i>Materiales y equipos de laboratorio</i>	30
3.2.3. <i>Reactivo</i>	31
3.3. <i>Diseño experimental</i>	31
3.4. Croquis del Experimento	32
3.5. Procedimiento	33
3.5.1. <i>Recolección de materia prima y preparación UE</i>	33
3.5.2. <i>Activación química</i>	33
3.5.3. <i>Pirólisis</i>	34
3.5.4. <i>Determinación de la remoción de azul de metileno</i>	34
3.5.6. <i>Análisis de datos</i>	37
CAPÍTULO IV	39
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1 Influencia del Tiempo y Temperatura en la Calidad del Carbón Activado.....	39
4.1.1 <i>Análisis estadístico ANOVA</i>	41
4.1.2 <i>Prueba de Tukey</i>	43
4.2. Influencia del Tiempo en la Capacidad de Adsorción del Carbón Activado	46
4.3 Influencia de la Temperatura en la Capacidad de Remoción de Azul de Metileno.	48
4.4. Rendimiento del Lodo en la Producción del Carbón Activado (CA).....	50

CAPÍTULO V.....	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1. Conclusiones.....	52
5.2. Recomendaciones.....	54
CAPÍTULO VI	55
REFERENCIAS	55
CAPÍTULO VII.....	69
ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición y caracterización de lodos.....	13
Tabla 2 Tipo y tamaño de poros del carón activado.....	15
Tabla 3 Tipos de carbón activado, características y aplicaciones ambientales.....	18
Tabla 4 Comparación de los tipos de carbón activado	22
Tabla 5 Tratamientos y combinaciones del estudio	32
Tabla 6 Concentraciones de azul de metileno de acuerdo a la curva de calibración	35
Tabla 7 Tabla de varianza	38
Tabla 8 Promedio de adsorción del azul de metileno en las UE.....	39
Tabla 9 Estadísticos descriptivos generales.....	41
Tabla 10 ANOVA para los resultados de remoción de azul de metileno	41
Tabla 11 Prueba de Tukey para los efectos de la interacción sobre el porcentaje de remoción.....	43
Tabla 12 Porcentaje de remoción de metileno en relación al tiempo de calcinación del carbón.....	46
Tabla 13 Porcentaje de remoción de azul de metileno en cuanto a temperatura	48
Tabla 14 Porcentaje de rendimiento de la producción del CA	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de tratamiento de aguas residuales de una PTAR.....	9
Figura 2 Gránulos de carbón activado (CA)	15
Figura 3 Procesos de obtención del carbón activado	22
Figura 4 Estructura química del azul de metileno	29
Figura 5 Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Celendín	29
Figura 6 Croquis del experimento	32
Figura 7 Curva de calibración	36
Figura 8 Gráficas de remoción de azul de metileno	44
Figura 9 Gráfica de intersección de tratamientos en remoción de azul de metileno	44
Figura 10 Porcentaje promedio de remoción en relación al tiempo	47
Figura 11 Porcentaje promedio de remoción en relación a la temperatura	49

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Lodos obtenidos de la PTAR Celendín.....	69
Anexo 2 Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Celendín.....	70
Anexo 3 Lechos de secado de la PTAR Celendín	70
Anexo 4 Secado de lodo previa activación	71
Anexo 5 Lodo seco listo para tamizar	71
Anexo 6 Lodo triturado y tamizado.....	72
Anexo 7 Peso de lodo tamizado para su activación.....	73
Anexo 8 Activador ácido fosfórico	74
Anexo 9 Activación de lodo seco con ácido fosfórico	74
Anexo 10 Lodo seco activado listo para pirólisis.....	75
Anexo 11 Lodo activado en la mufla.....	76
Anexo 12 Lodo carbonizado listo para lavado con agua destilada hervida	76
Anexo 13 Lavado de resto de activante del lodo seco pirolizado	77
Anexo 14 Peso de carbón activado para determinar su calidad mediante remoción de azul de metileno	78
Anexo 15 Determinación de azul de metileno aplicando carbón activado	79
Anexo 16 Medición de color en el espectrofotómetro	79
Anexo 17 Primer informe de laboratorio – marzo del 2025	80
Anexo 18 Segundo informe de laboratorio – abril del 2025	81
Anexo 19 Documento de calibración de horno de laboratorio.....	83
Anexo 20 Documento de calibración de balanza de funcionamiento no automático.....	84
Anexo 21 Tercer informe de laboratorio- mayo 2025	85

RESUMEN

Se desarrolló un material adsorbente (carbón activado) a partir de residuos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Celendín, con el propósito de evaluar su calidad mediante la remoción de azul de metileno. El estudio fue de tipo experimental y se aplicó un diseño factorial de dos por tres completamente al azar, desarrollando seis tratamientos (T1 a T6) y tres repeticiones cada una (R1, R2 y R3), considerando 100 gramos de lodo seco por cada unidad experimental (UE). El proceso de activación química se realizó con ácido fosfórico (H_3PO_4) al 30% en proporción de 1:1. Posteriormente, se efectuó la pirólisis a tres tiempos (30, 45 y 60 minutos) y dos temperaturas (600 °C y 650 °C). La calidad del carbón activado se determinó mediante la adsorción de azul de metileno, elaborando una curva de calibración que permitió calcular el porcentaje de remoción y evaluación del desempeño del material obtenido. Los resultados evidenciaron que el tratamiento T1R2 alcanzó el mayor porcentaje de remoción (96.45 %), mientras que el T5R1 presentó el menor valor (88.87 %). Se concluye que la temperatura de 600°C y el tiempo de 45 minutos constituyen las condiciones óptimas para obtener un carbón activado con elevada capacidad adsorbente. El estudio evidencia la posibilidad de valorizar lodos residuales mediante su transformación en un material con capacidad adsorbente, promoviendo su aprovechamiento y fortaleciendo un enfoque de economía circular.

Palabras clave: Lodo residual; activación química; pirólisis; carbón activado.

ABSTRACT

An adsorbent material (activated carbon) was developed from wastewater from the Celendín wastewater treatment plant (WWTP) to evaluate its quality by measuring methylene blue removal. The study was experimental and employed a completely randomized two-by-three factorial design, with six treatments (T1 to T6) and three replicates each (R1, R2, and R3), using 100 grams of dry sludge per experimental unit (EU). The chemical activation process was carried out using 30% phosphoric acid (H₃PO₄) in a 1:1 ratio. Pyrolysis was then performed at three time points (30, 45, and 60 minutes) and two temperatures (600 °C and 650 °C). The quality of the activated carbon was determined by measuring methylene blue adsorption, and a calibration curve was generated to calculate the removal percentage and evaluate the performance of the resulting material. The results showed that treatment T1R2 achieved the highest removal percentage (96.45%), while T5R1 had the lowest (88.87%). It was concluded that a temperature of 600°C and a treatment time of 45 minutes constitute the optimal conditions for obtaining activated carbon with high adsorption capacity. This study demonstrates the potential for valorizing waste sludge by transforming it into an adsorbent material, promoting its reuse and strengthening a circular economy approach.

Keywords: residual sludge; chemical activation; pyrolysis; activated carbon

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional en el Perú a generado una creciente demanda en el sistema de saneamiento asegurando una adecuada gestión del recurso hídrico (Morales, 2005). Las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR) cumplen un rol esencial depurando las aguas residuales; sin embargo, su operación genera grandes cantidades de lodos que requieren un manejo técnico adecuado (Espinoza & Santos, 2021).

El tratamiento de los lodos busca disminuir su volumen, patogenicidad y potencial contaminante mediante digestión, secado o almacenamiento, antes de la disposición final (Morales, 2005). No obstante, en la práctica, los lodos son aplicados directamente al suelo sin un análisis previo, generando contaminación de suelo, agua y aire (Espinoza & Santos, 2021).

A nivel nacional, la normativa ambiental peruana reconoce la necesidad de una disposición segura de los lodos residuales (MINAM, 2017). Según el Decreto Supremo N° 003-2013- MINAM, establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para las descargas de aguas residuales, y el Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA regula su aprovechamiento (MINAM, 2017). Asimismo, la Ley N° 1278 -Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, promueve la valorización de subproductos y fomenta la economía circular (MINAM, 2017).

Entre las alternativas de aprovechamiento de los lodos se incluyen el uso agronómico, la remediación, la estabilización microbiológica, la valoración energética y la producción de materiales carbonosos (Li et al.,2011). En este marco el aprovechamiento de los lodos de PTAR como materia prima para la obtención de carbón activado representa una alternativa tecnológica viable y ambientalmente sostenible (He et al., 2014).

Este residuo al poseer alto contenido de materia orgánica y compuestos carbonosos, es una fuente viable para la obtención de materiales adsorbentes de bajo costo (He et al., 2014). A través de procesos unitarios como la carbonización y activación física con vapor o CO_2 y químicas con agentes como H_3PO_4 , KOH o ZnCl_2 , mejoran su capacidad de adsorción (Li et al.,2011).

A nivel nacional, esta estrategia es alternativa sostenible frente al limitado uso de los lodos en actividades agrícolas debido a restricciones microbiológicas para biosólidos tipo A (Hernández et al., 2020). En el ámbito local, la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Celendín enfrenta una situación de riesgo ambiental al donar los lodos como abono sin contar con evaluaciones técnicas previas que determinen su composición o su posible toxicidad. Esta práctica, aunque bien intencionada, puede generar impactos negativos en el entorno.

Se optó por la valorización de los lodos residuales mediante su transformación en carbón activado, con el propósito de evaluar su potencial como material adsorbente en condiciones experimentales, siendo el tiempo y temperatura las variables independientes que influyen durante su producción. Esta calidad fue evaluada mediante la remoción de azul de metileno, un indicador técnico confiable para determinar el desempeño del carbón activado.

El objetivo general de la tesis fue determinar la influencia del tiempo y la temperatura en la calidad del carbón activado producido a partir de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín. Como objetivos específicos se analizó la influencia del tiempo en la capacidad de adsorción del material, se evaluó la influencia de la temperatura en la remoción de azul de metileno y se determinó el rendimiento del lodo en la producción del carbón activado.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes

Moreno et al. (2006) desarrollaron un estudio sobre la obtención de carbón activado a partir de lodos generados en una planta de tratamiento de aguas servidas. Secaron el lodo a 105 °C y aplicaron activación química con cloruro de zinc ($ZnCl_2$), en proporción de 2 mL de solución 3M por gramo de muestra. Posteriormente las muestras se sometieron a pirólisis en una mufla a 550, 600 y 650 °C durante 30, 45 y 60 min. Luego fueron lavadas con ácido clorhídrico al 37 % y secadas nuevamente a 105 °C. Los resultados indicaron que la mayor capacidad de adsorción se logró a 650 °C y 45 minutos, siendo la isoterma lineal la que mejor describió el proceso, ya que las constantes de adsorción dependieron de la temperatura y no del tiempo.

Rojas et al. (2016) evaluaron la obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de una planta avícola. Los lodos tras ser secados a 105 °C, fueron activados químicamente con ácido fosfórico (H_3PO_4) en concentraciones de 15, 20, 25, 30 y 35 %, para luego someterse a pirólisis a 450 °C durante dos horas. La eficiencia del carbón se determinó mediante la remoción de azul de

metileno, alcanzando un 88.44 % con la muestra activada al 35 %, confirmando que un mayor porcentaje de impregnación incrementa la capacidad de adsorción.

Guo et al. (2017) analizaron las propiedades del carbón activado obtenido de lodos municipales, encontrando estructuras porosas bien desarrolladas y una alta eficiencia de adsorción frente a contaminantes como el cobre (II) y azul de metileno (MB). Determinaron que la remoción de Cu^{2+} fue óptimo a pH débilmente ácido (4-6), mientras que el azul de metileno alcanzó hasta un 98 % de remoción en un rango de pH de 2 -12, demostrando su potencial como contaminante modelo en pruebas de adsorción.

Ordóñez (2019) estudió el proceso de pirólisis de lodos residuales para determinar las condiciones óptimas que maximicen el rendimiento del producto sólido. Las muestras fueron tratadas con una solución de 3M de ZnCl_2 y sometidas a temperaturas de 200, 250, 290 °C, presiones de 20, 30, 40 psi, y tiempos de 90, 120, 150 minutos. Los resultados indicaron que la temperatura de 230 °C y el tiempo de 90 minutos proporcionaron el mejor rendimiento, evidenciando la importancia de ambas variables en la eficiencia del proceso pirolítico.

Cayo et al. (2019) evaluaron la adsorción de iones arsenicales (As^{3+}) utilizando carbón activado con nanoporos, obtenido mediante activación química con cloruro de zinc a una temperatura de 650°C. Las pruebas mostraron que a una dosis de 16 g/L y con un tiempo óptimo de 24 horas, se logró una eficiencia de adsorción del 98.4%, reduciendo la concentración As^{3+} a 0,04 mg/L por debajo de los límites establecidos por la OMS, lo que confirma su eficacia como material adsorbente.

Según Mayta (2017) analizó la producción de carbón activado a partir de lodos residuales, caracterizando su contenido de humedad, carbono y estructura porosa. Las muestras se activaron con ZnCl_2 a 3M y se pirolizaron a 550 °C durante 30 minutos. Se evaluó su capacidad de remoción de colorantes como cristal violeta, alcanzando eficiencia entre 64 % y 84 %, demostrando el potencial de estos materiales para la adsorción de contaminantes orgánicos.

Herrera (2018) investigó la producción de carbón activado por pirólisis a partir de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Carapongo. Las muestras activadas con ácido fosfórico a distintas concentraciones (3M, 4M y 5M) y tratadas a temperaturas de 400 °C, 450 °C y 500 °C, mostraron una alta eficiencia en la remoción de azul de metileno, destacando la muestra con 5M de ácido fosfórico a 450 °C, con una remoción del 99.93 %, mientras que el de menor valor fue de 99.51 %.

Torres (2018) elaboró carbones activados a partir de lodos del reactor UASB para la adsorción de sulfuro de hidrógeno (H_2S). Las muestras se activaron con hidróxido de potasio (KOH) a diferentes concentraciones y temperaturas (700 °C/1M; 600 °C/2,5 M; 500 °C /4M), obteniendo una eficiencia máxima del 94 % a 700 °C y 1M de KOH, lo que demostró que a mayores temperaturas y menores concentraciones de agente activante optimizan la adsorción.

Finalmente, Granados (2024) evaluó la producción de carbón activado mediante activación química con cloruro de aluminio hexahidratado ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a 3M. Tras la pirólisis a 450 °C, se observó una estructura con mesoporos y macroporos, y una eficiencia de adsorción del cristal violeta entre 28,1% y 40,3%. Aunque el material obtenido no alcanzó los estándares comerciales, el estudio

evidenció el potencial de los lodos como precursores en la elaboración de carbón activado.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Tratamiento de aguas residuales municipales*

El tratamiento de aguas residuales municipales constituye una necesidad prioritaria en la gestión ambiental urbana, dado que estas aguas provienen de la combinación de descargas domésticas, comerciales, institucionales y en algunos casos de pequeñas actividades industriales. Su composición es heterogénea, pero se caracteriza por contener altos niveles de materia orgánica, sólidos suspendidos, grasas, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y microorganismos patógenos que representan un riesgo para la salud pública y el ambiente (Metcalf & Eddy, 2016). El tratamiento de las aguas residuales municipales busca reducir la carga contaminante hasta cumplir con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la normativa peruana, lo que permite su disposición segura en cuerpos receptores o su posible reúso en actividades como riego agrícola, forestal o usos urbanos no potables (Ministerio del Ambiente, 2010; Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

El tratamiento de aguas residuales pasa por varias fases o etapas, que a continuación se detallan:

Pretratamiento: en este tratamiento se realiza la remoción de sólidos grandes y arenas mediante rejillas, desarenadores y desengrasadores. Esta etapa evita obstrucciones y daños en equipos posteriores.

Tratamiento primario: se da el proceso de sedimentación de sólidos suspendidos en decantadores primarios, logrando una reducción parcial de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos totales. En esta fase se generan lodos primarios, constituidos por partículas orgánicas y minerales sedimentadas (Rodríguez-Miranda, García, & Pardo, 2015).

Tratamiento secundario: se aplican procesos biológicos aeróbicos o anaeróbicos, siendo los sistemas de lodos activados, biodiscos o filtros percoladores los más utilizados. En esta etapa, los microorganismos degradan la materia orgánica soluble y coloidal, reduciendo de forma significativa la DBO y DQO. Los lodos generados en este nivel se denominan lodos secundarios (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2014).

Tratamiento terciario o avanzado: comprende la remoción de nutrientes, desinfección y filtración. En el contexto municipal, esta etapa es clave cuando el efluente será vertido a cuerpos sensibles o reutilizado en agricultura. Se emplean métodos como la cloración, radiación ultravioleta o filtración con membranas, garantizando un agua depurada de mejor calidad (Granados, 2022).

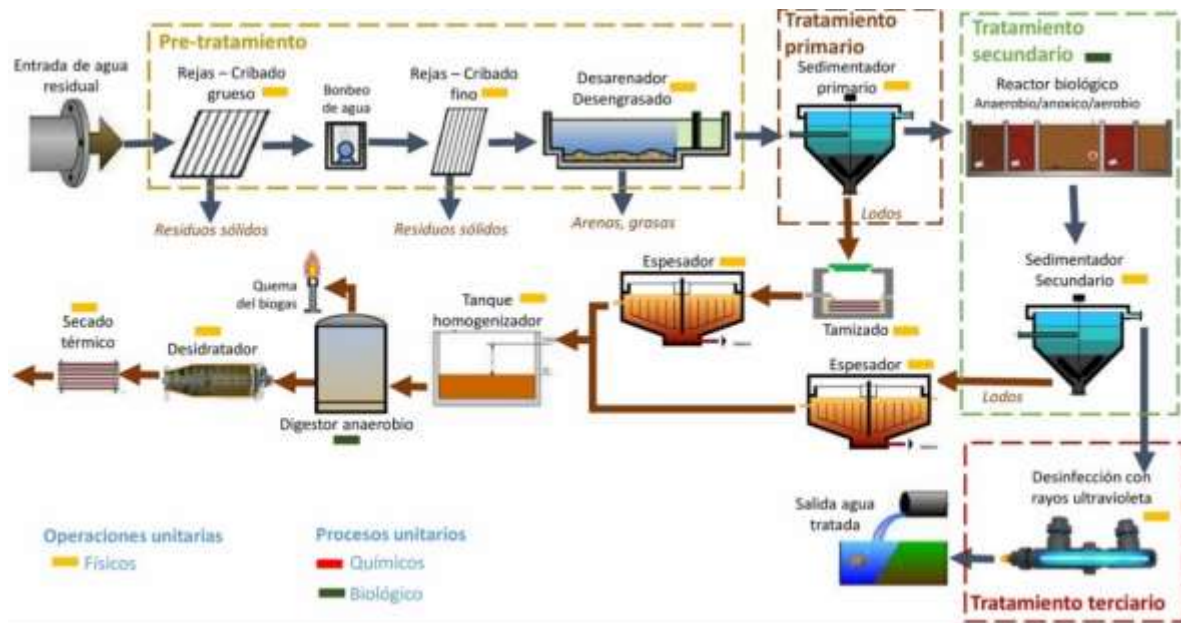
Manejo de lodos: tanto los lodos primarios como los secundarios requieren estabilización y disposición adecuada. Generalmente, se aplican procesos de digestión anaerobia o compostaje, con el fin de reducir su volumen, eliminar patógenos y facilitar su aprovechamiento como enmienda orgánica (MVCS, 2017).

En el Perú, la normativa ambiental establece que los titulares de las PTAR municipales deben reportar periódicamente los resultados de monitoreo

de parámetros clave como aceites y grasas, coliformes termotolerantes, DBO y DQO, los cuales deben encontrarse dentro de los LMP (MINAM, 2010).

Figura 1

Etapas de tratamiento de aguas residuales de una PTAR



Fuente: PTAR Lugo (s.f)

2.2.2. Lodos residuales en una PTAR

La generación de lodos residuales es un aspecto inevitable en el funcionamiento de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), ya que constituye el subproducto principal de los procesos de depuración. Estos lodos se originan en diferentes etapas del tratamiento, principalmente en los sedimentadores primarios, los clarificadores secundarios y en los procesos de espesamiento y digestión. Según Metcalf y Eddy (2015), los lodos representan entre el 1 % y el 2 % del volumen total de las aguas residuales tratadas, pero concentran la mayor parte de la carga contaminante,

especialmente sólidos suspendidos, materia orgánica y microorganismos patógenos.

A. Tipos de lodos.

En el proceso de tratamiento de aguas residuales, se generan distintos tipos de lodos, cuya clasificación depende de la etapa del tratamiento de la que provienen y de sus características físicas, químicas y biológicas. Según Metcalf y Eddy (2015)

Los lodos pueden agruparse en primarios, secundarios y terciarios.

Lodos primarios. Son generados en la primera fase del tratamiento, donde se separan los sólidos sedimentables y materiales flotantes. Estos lodos contienen elevado porcentaje de materia orgánica y compuestos fácilmente degradables (Metcalf & Eddy, 2015).

Lodos secundarios. Son originados en los procesos donde intervienen macroorganismos que degradan la materia orgánica disuelta; contiene sólidos en suspensión con mayor humedad y menor estabilidad que los lodos primarios (Tchobanoglous et al., 2014).

Lodos terciarios. Estos se forman en tratamientos avanzados como coagulación o eliminación de nutrientes. Suelen presentar una composición compleja con presencia de sales metálicas o compuestos inorgánicos, dificultando su estabilización y manejo final (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2021).

La producción de lodos en una PTAR depende de factores como la carga contaminante del afluente, el caudal tratado, la eficiencia del sistema de tratamiento y el tipo de proceso empleado. Por ejemplo, sistemas de lodos activados generan una mayor producción de lodos secundarios en comparación con los procesos anaerobios, aunque permiten obtener un efluente de mejor calidad (Chen et al., 2019).

El manejo inadecuado de los lodos puede ocasionar impactos negativos en el medio ambiente, como la contaminación del suelo y los cuerpos de agua, además de riesgos sanitarios por la presencia de agentes patógenos. Por ello, las PTAR deben implementar procesos complementarios de espesamiento, estabilización, deshidratación y disposición final, con el objetivo de reducir su volumen, mejorar sus características sanitarias y facilitar su disposición o posible aprovechamiento (Rodríguez-Miranda, García, & Pardo, 2015).

En el contexto peruano, la normativa ambiental establece que los titulares de las PTAR deben garantizar la adecuada gestión de lodos y reportar periódicamente los resultados de monitoreo de los parámetros regulados. Asimismo, se promueve la valorización de los lodos tratados, fomentando su uso en la producción de compost, mejoramiento de suelos agrícolas o generación de energía, siempre y cuando cumplan con los límites establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2021).

B. Características de los Lodos.

Los lodos crudos son lodos residuales sin estabilizar que se generan en las etapas primarias y secundarias de una planta de tratamiento de aguas

residuales municipales. Según Porras y Vizcaíno (2020), la caracterización de los lodos residuales permite identificar si se presentan condiciones peligrosas, de esta manera se selecciona el método de manejo más apropiado. Se considera aspectos físicos, químicos y biológicos, ya que las propiedades varían según el origen y los procesos empleados en la planta de tratamiento.

Características físicas. Los lodos poseen una humedad muy elevada, cercana al 90-98 %, lo que los convierte en materiales de consistencia pastosa a líquida, afectando su transporte, manejo y compactación (Ganji et al.,2023).

Características químicas. Poseen materia orgánica, se ha reportado que estos lodos contienen nutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P) y también metales pesados en concentraciones variables (Wijesekara et al., 2025).

Características biológicas. Los lodos crudos presentan alta carga de microorganismos patógenos (coliformes fecales, huevos de helmintos), es así que requieren tratamientos de higienización antes de su valorización (Zhang et al., 2024).

En la siguiente tabla se resumen los principales parámetros empleados para describir la composición y caracterización de los lodos:

Tabla 1*Composición y caracterización de lodos*

Parámetros	Lodos		
	primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos
Ph	5.5 - 6.5	6.5 – 7.5	6.8 – 7.6
Contenido de agua (%)	92 – 96	97.5 – 98	94 – 97
Sólidos suspendidos			
volátiles (% SSV)	70 – 80	80 – 90	55 – 65
Grasas (%)	12 – 14	3 – 5	4 – 12
Proteínas (%)	4 – 14	20 – 30	10 – 20
Carbohidratos (%)	8 – 10	6 – 8	5 – 8
Nitrógeno (%)	2 – 5	1 – 6	3 – 7
Fósforo (%)	0.5 - 1.5	1.5 – 2.5	0.5 – 1.5
Bacterias patógenas			
(NMP/100 ml)	10 ³ - 10 ⁶	100 – 1000	10 – 100
Metales pesados (%)			
Zn,Cu,Pb)	0.2-2	0.2 – 2	0.2 – 2

Nota. NMP: número más probable. Fuente: Elaboración a partir de Castro et al. (2007) y MVCS (2017).

2.2.3. Carbón activado

El carbón activado es un material carbonoso altamente poroso, con una gran área superficial interna, lo que le confiere una capacidad excepcional de adsorción de contaminantes presentes en líquidos y gases. Se obtiene a partir de materias primas orgánicas como madera, cáscaras de coco, residuos agrícolas, lodos residuales o carbón mineral, que son sometidas a procesos de carbonización y activación. De acuerdo con Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006), el carbón activado puede alcanzar áreas

superficiales superiores a $1000 \text{ m}^2/\text{g}$, lo que le convierte en uno de los adsorbentes más eficaces conocidos. En el ámbito peruano, investigaciones recientes han demostrado la viabilidad de obtener carbones activados a partir de residuos agroindustriales (Cabrera & Ramos, 2021) y de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (Granados, 2024), evidenciando su potencial como una alternativa sostenible.

A. Propiedades del carbón activado.

Propiedades físicas

Las propiedades físicas del carbón activado están estrechamente vinculadas con su capacidad de adsorción. Entre las más relevantes destacan:

- **Área superficial específica (BET)**

Determina la superficie interna disponible para la adsorción. Generalmente se encuentra en el rango de 500 a $1500 \text{ m}^2/\text{g}$, aunque carbones activados de lodos peruanos han mostrado valores entre 540 y $710 \text{ m}^2/\text{g}$ (Granados, 2024).

- **Porosidad**

La eficacia del carbón activado depende directamente de su estructura porosa, la cual se clasifica en función del radio de los poros según la IUPAC:

Microporos (< 2 nm), representan hasta el 90% del área superficial. Son los más importantes para la adsorción de moléculas pequeñas como colorantes y compuestos orgánicos (Rodríguez-Reinoso, 2018).

Mesoporos (2 – 50 nm), facilitan la difusión hacia los microporos y son útiles en la eliminación de moléculas de tamaño intermedio (Valencia & Torres, 2018).

Macroporos (> 50 nm), cumplen la función de “puentes” o canales que permiten el acceso de los fluidos hacia meso y microporos.

Tabla 2

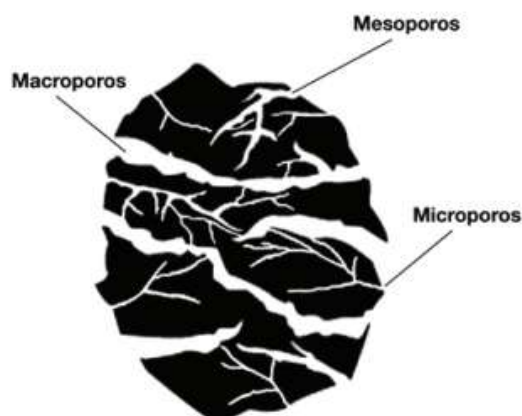
Tipo y tamaño de poros del carón activado

Tipo de poros	Tamaño de poros	Función principal
Microporos	< 2 nm	Adsorción de moléculas pequeñas
Mesoporos	2 - 50 nm	Difusión de solutos hacia microporos
Macroporos	> 50	Transporte y acceso a la estructura interna

Fuente: Rodríguez-Reinoso (2018); Valencia & Torres (2018).

Figura 2

Gránulos de carbón activado (CA)



Nota. Se presenta el carbón activado con su clasificación de poros. Fuente: Agudelo (2017).

- **Densidad aparente:** varía entre 0.25 y 0.65 g/cm³, dependiendo de la materia prima y el método de activación (Metcalf & Eddy, 2016). En Perú,

Cabrera & Ramos (2021) reportaron valores de 0.48 g/cm^3 en carbones obtenidos de residuos agroindustriales.

- **Dureza y resistencia mecánica:** se refiere a la capacidad de soportar abrasión y presión. Una buena dureza asegura mayor durabilidad en sistemas de filtración y tratamiento de aguas (Bansal & Goyal, 2005).

Propiedades químicas

Además de sus características físicas, el carbón activado posee propiedades químicas que determinan su afinidad por distintos contaminantes:

- **Grupos funcionales oxigenados:** tales como hidroxilos (-OH), carboxilos (-COOH), lactonas y carbonilos (-C=O), que influyen en el carácter ácido o básico de la superficie y en la capacidad de interacción con contaminantes polares (Moreno-Castilla, 2004).
- **Composición elemental:** los carbones activados suelen estar formados principalmente por carbono (60-90 %), oxígeno (2-30 %), hidrógeno (1-5 %), y en menor medida nitrógeno y azufre. En carbones obtenidos de lodos municipales en Perú, se reportaron proporciones de C ~ 65 %, H ~5 %, O ~30 % (Granados, 2024).
- **pH superficial y capacidad de intercambio iónico:** el carbón activado puede presentar superficies ácidas o básicas, dependiendo de los grupos funcionales predominantes, lo que incide en su selectividad de adsorción (Diaz et al., 2007).

B. Tipos de carbón activado.

El carbón activado puede presentarse en diferentes formas físicas según el proceso de producción y el uso final. Entre los más empleados se encuentran:

Carbón activado en polvo (CAP): presenta partículas muy finas (< 0.18 mm), lo que le confiere una alta superficie específica y rápida cinética de adsorción. Se utiliza comúnmente en tratamiento de agua potable y en procesos de purificación de líquidos (Crittenden et al., 2012).

Carbón activado granular (CAG): conformado por partículas más grandes (0.2 – 5 mm), con alta resistencia mecánica. Es adecuado para columnas de adsorción en tratamiento de aguas residuales y potabilización, ya que permite regeneración y reutilización (Valencia & Torres, 2018).

Carbón activado en pellets: obtenido mediante extrusión de polvo de carbón y aglutinantes. Presenta forma cilíndrica (diámetro 0.8 – 5 mm), alta dureza y baja pérdida de presión en sistemas gaseosos, por lo que se emplea en tratamiento de aire y gases industriales (Rodríguez-Reinoso, 2018).

Carbón activado en fibras: se obtiene a partir de fibras sintéticas o naturales carbonizadas. Posee una estructura microporos con elevada área superficial (> 2000 m²/g) y alta velocidad de adsorción, lo que lo hace útil en aplicaciones médicas y en filtros de precisión (Li et al., 2020).

A continuación, se resumen los usos comunes de los distintos tipos de carbón activado con sus respectivas aplicaciones en remediación ambiental.

Tabla 3*Tipos de carbón activado, características y aplicaciones ambientales*

Tipos de carbón activado	Tamaño de partícula	Ventajas	Usos comunes	Aplicaciones en remediaciones ambientales
Polvo	C < 0.18 mm	Alta superficie específica, rápida adsorción, fácil dosificación	Tratamiento de aguas residuales, eliminación de colorantes y compuestos orgánicos.	Adsorción de contaminantes emergentes y metales pesados en efluentes líquidos
Granular	C 0.2 - 5 mm	Regenerable, baja pérdida de material, buena permeabilidad	Purificación de agua potable y gases, filtros domésticos e industriales.	Descontaminación de aguas residuales y aire contaminado con compuestos orgánicos volátiles (COV s).
Pellets	Cilíndrico mm 08 - 5	Alta densidad, baja pérdida de polvo, resistencia mecánica.	Tratamiento de gases, aire y emisiones industriales.	Remoción de gases tóxicos, olores y compuestos de azufre en sistemas de ventilación y chimeneas.
Fibras	Diámetro de fibra: 10 -30 µm	Alta velocidad de adsorción, bajo peso, regeneración rápida.	Filtración de aire y purificación de solventes.	Remediación de aire interior, control de emisiones gaseosas y recuperación de disolventes industriales.

Nota. Elaboración a partir de Martínez et al. (2020) y Gómez y Rivera (2021).

C. Procesos de activación del carbón.

El carbón activado se obtiene a partir de materiales ricos en carbono, como residuos lignocelulósicos o lodos residuales, a través de dos procesos principales: activación física y activación química, los cuales difieren en las condiciones de operación, agentes activantes y características del producto obtenido (González et al., 2016).

a. Activación Física. Consiste en dos etapas:

Carbonización: La materia precursora como el lodo residual seco se calienta en ausencia de oxígeno a temperaturas que varían entre 400 y 800 °C, con el fin de eliminar los compuestos volátiles, dejando una matriz carbonosa estable compuesta principalmente por carbono fijo. Este proceso favorece la formación inicial de una red de poros y la remoción de materia orgánica inestable, de esta manera es preparado el material para su activación (Serrano et al., 2020).

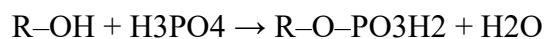
Gasificación. La estructura carbonizada se expone a agentes oxidantes suaves como vapor de agua o dióxido de carbono (CO₂) a temperaturas entre 800 – 1000 °C. Como resultado se obtiene un carbón activado con alta estabilidad térmica, donde predominan los microporos, y una amplia superficie específica, ideal para la adsorción de contaminantes en fase líquida o gaseosa (González et al., 2016; Serrano et al., 2020).

b. Activación Química. Se realiza mediante la impregnación de agentes como ácido fosfórico (H₃PO₄), cloruro de zinc (ZnCl₂) o hidróxido de

potasio (KOH). Es ejecutado a temperaturas moderadas, que oscilan entre 400 y 700 °C, en atmósfera inerte (Gupta & Suhas, 2009).

Ácido fosfórico (H₃PO₄). Actúa como catalizador y deshidratante, facilitando las rupturas de enlaces C-O-C y C-H. Durante la activación se generan ésteres fosfatos con grupos hidroxilo del precursor; al descomponerse estos liberan agua y dejan una red de microporos estables, aumentando significativamente la superficie específica y por lo tanto el rendimiento del carbón final (Yahya et al., 2015)

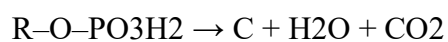
Reacción de formación de éster fosfato con grupos hidroxilo del precursor:



Donde:

- R-OH = Grupos hidroxilos del material precursor
- Se forma éster fosfato
- Se libera agua

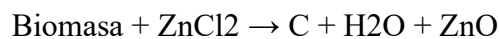
Durante la pirólisis, el material se descompone generando carbono y liberación de gases:



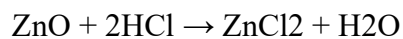
Esto provoca la formación de poros en el carbón

Cloruro de zinc (ZnCl₂). Actúa mediante un proceso de pirólisis catalítica. Durante el calentamiento, el ZnCl₂ fundido penetra los poros del precursor y, al enfriarse se retira mediante lavado ácido, dejando una red tridimensional de microporos y mesoporos interconectados. Dando lugar a carbones activados con gran capacidad de adsorción de compuestos orgánicos volátiles y colorantes (Loannidou & Zabaniotou,2007).

El cloruro de zinc actúa como agente deshidratante durante el calentamiento:



Luego, durante el lavado ácido:

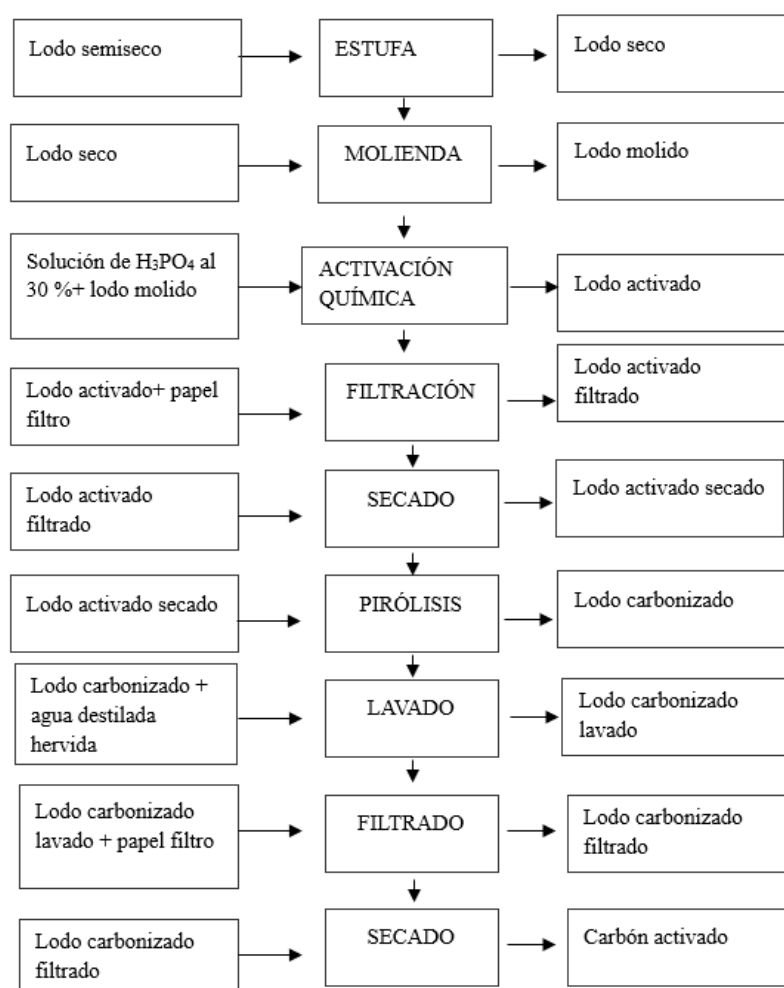


Esto elimina el zinc y deja la estructura porosa del carbón.

Hidróxido de potasio (KOH). Se descompone térmicamente en K₂CO₃ y H₂, reaccionando con el carbono del precursor y generando gases reductores como CO y H₂, los cuales erosionan la superficie interna del carbón. Este proceso produce microporos finos y altamente uniformes, de esta manera este tipo de activación es ideal en la generación de carbones utilizados en remediación ambiental, especialmente en la adsorción de metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes (Chen et al., 2020).

Tabla 4*Comparación de los tipos de carbón activado*

Tipos de activación	Temperatura °C	Agentes usados	Ventajas	Desventajas
Física	800 – 1000	CO ₂ , vapor de agua	Ecológica	Alta energía, menor rendimiento
Química	400 – 700	H ₃ PO ₄ , ZnCl ₂ , KOH	Mayor rendimiento y mayor microporosidad	Requiere lavado, residuos químicos

Figura 3*Procesos de obtención del carbón activado*

Nota. Adaptado de Mayta (2017).

2.2.4. Influencia del tiempo y temperatura

La temperatura durante pirólisis es un factor crucial. Estudios han demostrado que a mayor temperatura mejora las propiedades adsorbentes del carbón activado.

Moreno et al. (2006), en su estudio de producción de carbón activado utilizaron lodos activados para la producción de carbón activado, trabajó pirólisis con temperaturas de 550 °C, 600 °C y 650 °C durante 30, 45 y 60 minutos. Aplicando cloruro de Zinc. Obteniendo como resultado que a 650 °C tuvo la mayor capacidad de adsorción de cristal de violeta. Esto sugiere que a mayor temperatura hay mayor capacidad de adsorción

Mayta (2017) llevó lodo a pirólisis a una temperatura de 550 °C durante 30 minutos, teniendo eficiencia de remoción de colorantes entre 64 % y 84 %. se aplicó 3M de Cloruro de Zinc.

Segura (2017) en la obtención de carbón activado a partir de lodos residuales, realizó el proceso de activación con Cloruro de Zinc a temperatura de 600 °C durante 3 horas. Obteniendo alta eficiencia de remoción de azul de metileno removiendo hasta el 100 %.

Por lo tanto, se puede decir que el factor temperatura cumple un rol importante y determinante en la calidad del carbón activado dándole mayor eficiencia de remoción en colorantes; por otro lado se ve que el factor tiempo no muestra un impacto significativo en dichos estudios.

2.2.5 Operaciones unitarias del carbón activado en las aplicaciones

A. Adsorción.

Este proceso se da cuando las moléculas presentes en el medio se adhieren a la superficie interna del carbón, debido a sus microporos y a su elevada área superficial (Bautista- Toledo et al., 2020).

Permite eliminar colorantes, compuestos orgánicos persistentes, pesticidas y metales pesados, siendo una tecnología eficaz, económica y ambientalmente sostenible (Montaña et al., 2019).

B. Filtración adsorbente.

En este proceso se combina la filtración física con la adsorción química, maximizando la eficiencia en la purificación del agua. Este proceso mejora la calidad del efluente, reduciendo la turbidez, el color y los compuestos orgánicos volátiles sin requerir aditivos químicos (Gómez & Rodríguez, 2018).

C. Catálisis heterogénea.

Los reactivos se adsorben en los sitios activos del carbón, donde ocurren reacciones químicas que transforman contaminantes orgánicos en compuestos más simples, como CO_2 y H_2O . Este proceso es útil en la degradación de colorantes y compuestos orgánicos volátiles (COV) mediante la activación de peróxido de hidrógeno u ozono (Castañeda & Valdés, 2020).

D. Oxidación avanzada.

Estas tecnologías con carbón activado combinan su capacidad adsorbente con agentes oxidantes, como el ozono, el peróxido de hidrógeno o la radiación ultravioleta. En este proceso el carbón actúa como superficie catalítica que favorece la generación de radicales hidroxilos(-OH) (Jiménez & Vargas, 2021).

Permitiendo ser aplicadas ampliamente en la eliminación de fármacos, pesticidas, y contaminantes emergentes en aguas residuales urbanas e industriales (Cruz et al., 2020).

E. Regeneración o desorción.

Permite restaurar la capacidad de adsorbente del carbón activado al eliminar los contaminantes retenidos en sus poros. Este proceso puede realizarse térmica, química y biológicamente. En la regeneración térmica, el carbón agotado se calienta entre 600 y 900 °C en atmósfera inerte, lo que volatiliza los compuestos orgánicos adsorbidos (Torres et al., 2020).

En la regeneración química, se emplean soluciones ácidas o alcalinas que rompen los enlaces adsorbato- superficie, mientras que la regeneración biológica utiliza microorganismos capaces de degradar los contaminantes dentro de los poros (Quispe & Cabrera. 2019).

2.2.6 Azul de metileno

Es un colorante orgánico catiónico ampliamente utilizado como compuesto modelo para evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado.

Fórmula molecular:



La molécula presenta una estructura aromática basada en un núcleo de fenotiazina. Está compuesta por anillos aromáticos (bencénicos), heteroátomos como nitrógeno (N) y azufre (S), y grupos dimetilamina (-N(CH₃)₂) que contienen cadenas metilo (CH₃). Estas estructuras le otorgan estabilidad química y una carga positiva en solución acuosa.

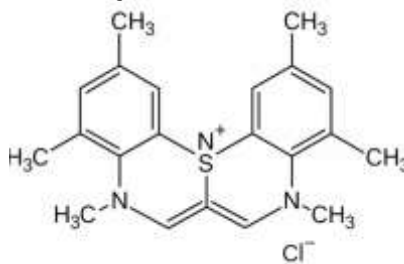
Cadenas presentes en el azul de metileno

El azul de metileno contiene diferentes tipos de estructuras o cadenas dentro de su molécula:

- Anillos aromáticos (bencénicos).
- Grupos dimetilamino (-N(CH₃)₂).
- Cadenas metilo (CH₃).
- Núcleo heterocíclico que contiene nitrógeno y azufre.

Figura 4

Estructura química del azul de metileno



Interacción con el carbón activado

Cuando el azul de metileno entra en contacto con carbón activado, sus moléculas son adsorbidas sobre la superficie y dentro de los poros del material. Esto ocurre debido a la alta área superficial del carbón activado, la porosidad del material y las interacciones electrostáticas entre la carga positiva del colorante y los sitios activos de la superficie del carbón.

2.3. Definición de Términos Básicos

2.3.1. Lodo residual

Son compuestos orgánicos sólidos y semisólidos o líquidos, producido mediante el tratamiento mecánico, biológico y/o químico de purificación de las aguas residuales, que por el proceso al que fueron sometidas, contienen una alta cantidad de contaminantes agregados a ellos. (Medina, 2023).

2.3.2. Carbón activado

Es un sólido carbonoso derivado del carbón o la biomasa a través de procesos térmicos o termoquímicos, los carbones activados se caracterizan por su morfología de poro bien desarrollada, su área de superficie notablemente alta, sus tendencias anfóteras conductoras de electrones y su alta capacidad de adsorción. (Maita,2022)

2.3.3 Pirólisis

Proceso de descomposición química que ocurre como resultado de una elevada temperatura. (Mayta ,2017)

2.3.4. Adsorción

Es un proceso físico químico donde las moléculas o iones se adhieren a la superficie de un sólido por fuerzas intermoleculares (Gupta y Suhas, 2020)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Localización del Estudio

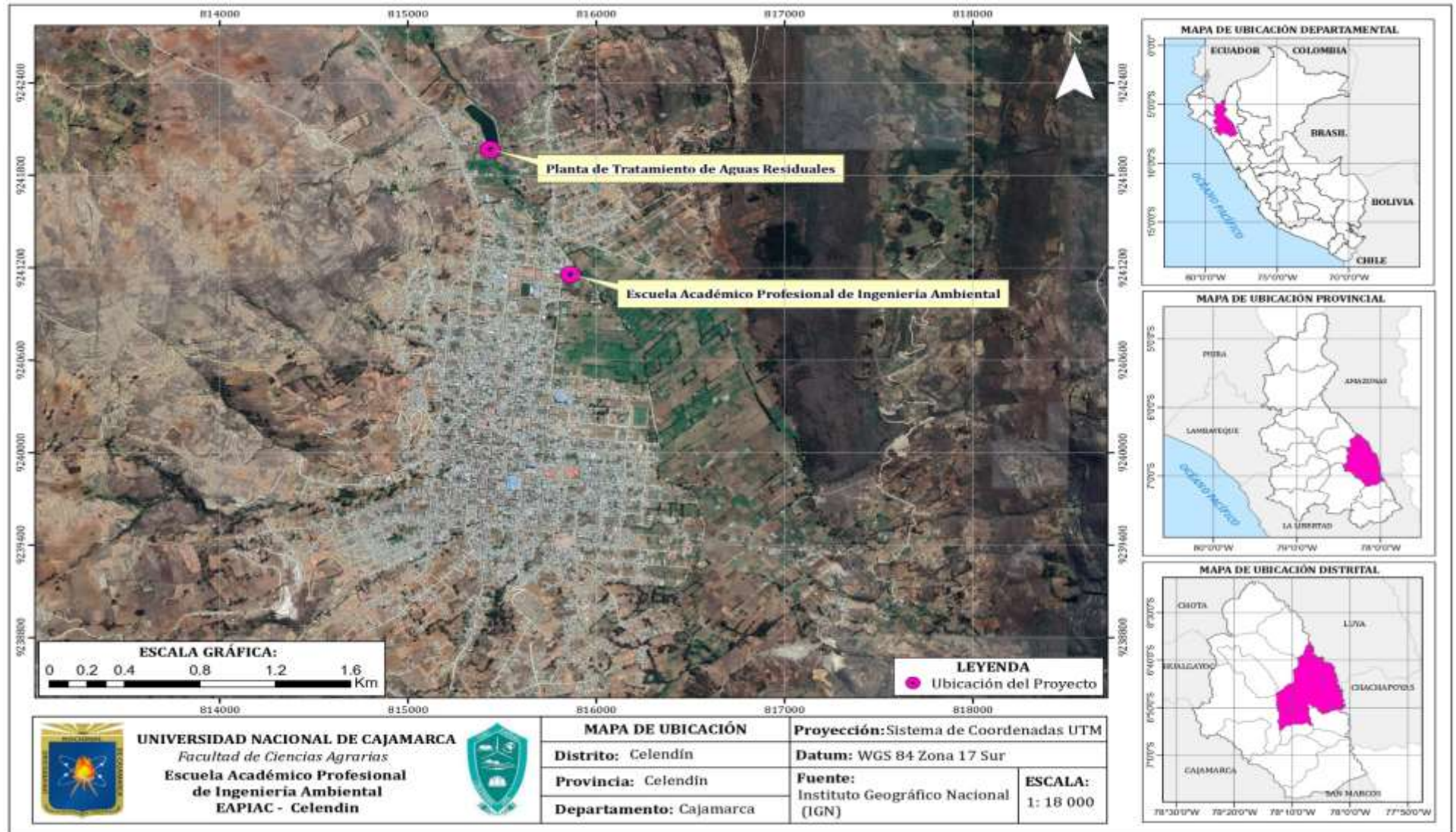
El trabajo de investigación parte de los lechos de secado de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín (PTAR), ubicada al norte de la ciudad con una altitud de 2604 m s. n. m., distrito de Celendín, provincia de Celendín, departamento de Cajamarca.

En cuanto a su localización geográfica, la planta se encuentra en la zona norte de la ciudad de Celendín y presenta las siguientes coordenadas en el sistema UTM: Este: 815435 m; Norte; 9241975 m, correspondiente a la zona 17 L.

Las muestras de lodo residual recolectadas fueron acondicionadas en el Laboratorio de Química de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Cajamarca sede Celendín. Los procesos experimentales como la pirólisis y remoción de azul de metileno fueron elaborados en el laboratorio Oikoslab en la ciudad de Jaén.

Figura 5

Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Celendín



3.2. Materiales

3.2.1. Materiales de campo

- Balde de plástico
- Guantes quirúrgicos
- Gorro quirúrgico
- Mascarilla
- Libreta
- Bolsas de ziplock
- Bata blanca

3.2.2. Materiales y equipos de laboratorio

- Horno eléctrico
- Mortero
- Balanza analítica
- Agua destilada
- Vasos beackear
- Probeta
- Pipeta
- Tubos de ensayo
- Papel filtro
- Embudos
- Tamiz malla 40
- Espectrofotómetro de luz Visible (marca UNICO modelo 1200)

3.2.3. Reactivo

- Ácido fosfórico
- Azul de metileno

3.3. Diseño experimental

La investigación fue de tipo aplicada, ya que propone una alternativa de valorización de los lodos residuales de PTAR Celendín mediante su transformación en carbón activado y de tipo experimental, debido a que se evaluó de forma controlada el efecto de dos variables independientes (tiempo y temperatura) en la calidad del carbón activado, determinada a través de su desempeño en la remoción de azul de metileno.

Para facilitar la interpretación de los tratamientos y combinaciones del estudio, se estableció la siguiente codificación:

A= Temperatura

a₁ = 600 °C

a₂ = 650 °C

B= Tiempo de pirólisis

b₁ = 30 minutos

b₂ = 45 minutos

b₃ = 60 minutos

Tabla 5*Tratamientos y combinaciones del estudio*



















Tratamientos	Combinaciones	Descripción
T1	a1- b1	600 °C y 30 min
T2	a1- b2	600 °C y 45 min
T3	a1- b3	600 °C y 60 min
T4	a2- b1	650 °C y 30 min
T5	a2- b2	650 °C y 45 min
T6	a2- b3	650 °C y 60 min

Nota. T1-T6 corresponden a un diseño factorial de 2x3. En todos los tratamientos se utilizó el ácido fosfórico (H₃PO₄) al 30%.

3.4. Croquis del Experimento

Para el experimento se utilizó lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales. A partir de este material, se trabajó 6 tratamientos y 3 repeticiones (18 unidades experimentales), considerando 2 temperaturas y 3 tiempos de pirólisis, como se muestra a continuación:

Figura 6*Croquis del experimento*

	Tratamientos					
Repetición 1						
Repetición 2						
Repetición 3						

Nota. El esquema muestra la distribución de los tratamientos (T₁-T₆) en sentido horizontal y las repeticiones (R1 – R3) en sentido vertical, conforme al diseño factorial de 2x3.

3.5. Procedimiento

3.5.1. *Recolección de materia prima y preparación UE*

- La materia prima utilizada fue lodo residual extraído del lecho de secado de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, con aproximadamente 1 mes de antigüedad, se recolectó 5kg de lodo húmedo y se procedió a evaporación a 105 °C durante 3 días, luego se procedió a trituración y tamizado (tamiz malla N°40), obteniendo 1800 gramos de lodo seco y tamizado.

3.5.2. *Activación química*

- Se utilizó 100 g de lodos seco para cada UE (18 UE) siendo un total de 6 tratamientos y 3 repeticiones y se agregó ácido fosfórico (H_3PO_4) al 30% en un valor de 1/1, es decir 100 ml de solución a 100 g de muestra y dejando reposar por 24 horas para una impregnación completa
- Se filtró las UE utilizando papel filtro, dicho proceso se realizó a todas las UE, eliminando el ácido fosfórico excedente.
- El residuo del filtro (18 UE) se llevó a evaporación durante 12 horas a 105 °C para su secado.
- Las UE fueron pesadas y colocadas en bolsas ziploc respectivamente rotuladas y se envió para el proceso de pirólisis en el laboratorio Oikoslab en la ciudad de Jaén.

3.5.3. Pirólisis

- Se taró los crisoles (18) y a cada crisol se colocó 25 g del material activado de cada UE y se procedió a la calcinación en la mufla siguiendo con pirólisis en la mufla siguiendo las combinaciones de temperatura (600 °C y 650 °C) y tiempo (30, 45 y 60 minutos); según el diseño experimental propuesto.
- Se dejó enfriar las UE por 24 horas.
- Al obtener el producto de la calcinación se procedió al lavado con agua destilada hervida aproximadamente 30 veces cada muestra; posteriormente se filtra y seca a 105 °C.
- Finalmente se dejó secando durante 4 horas y se obtuvo el producto final.

3.5.4. Determinación de la remoción de azul de metileno

A. Descripción de la muestra

- Se preparó 18 vasos de precipitación con 20 mL de azul de metileno, con una concentración de 100 ppm (para los 18 UE)
- Se colocó a cada vaso de precipitado 5g de carbón activado obtenido de las 18 UE, dejando en agitador magnético durante 4 horas, para su posterior evaluación de desempeño de calidad del carbón activado.
- Se determinó la concentración final del azul de metileno en cada UE a través de la medición en el espectrofotómetro de luz violeta a 664 nm.

B. Preparación de la curva de calibración.

Se preparó una solución de azul de metileno de 100 ppm, para ello se pesó en la balanza analítica, se disolvieron 0.025 gramos en 250

mL de agua destilada. A partir de esta solución se prepararon soluciones de 2ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8ppm de concentración. A continuación, se presenta los datos.

Tabla 6

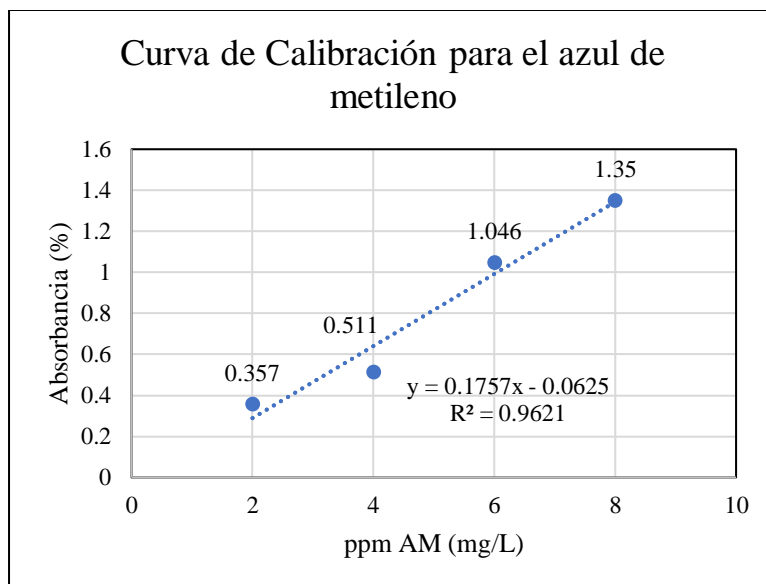
Concentraciones de azul de metileno de acuerdo a la curva de calibración

Concentración de AM (ppm)	Absorbancia (%)
2	0.357
4	0.511
6	1.046
8	1.35

Nota. Se muestran los porcentajes de absorción a partir de la curva de calibración.

Fuente: Laboratorio Oikoslab.

Estos datos se reflejan en la curva y a partir de ella se siguió los siguientes pasos que determinaron como influye el tiempo y temperatura en la calidad del carbón activado.

Figura 7*Curva de calibración*

Nota. los puntos azules son los puntos experimentales y la recta es de ajuste lineal entre las concentraciones de azul de metileno (2,4,6,8 ppm) y la Absorbancia medida a 664 nm, obteniendo la ecuación de $y = 0.1757x - 0.0625$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9621$. Fuente: Laboratorio Oikoslab

C. Determinación de la concentración de las muestras tratadas con carbón activado

Con la ecuación de la curva de calibración del azul de metileno (AM)

$$y = 0.1757x - 0.0625$$

Donde:

y= absorbancia

x= concentración(ppm)

Despejamos el valor de x, que en la curva será las partes por millón de azul de metileno (ppm AM)

$$x = \frac{y + 0.0625}{0.1757}$$

D. Determinación de la remoción de azul de metileno (AM)

Al tener la solución inicial de 100 ppm y con la lectura de ppm AM (mg/L) se obtuvo el porcentaje de remoción (Azul de metileno adsorbido en unidades de porcentaje), con la siguiente fórmula:

$$\text{Remoción (\%)} = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100$$

Donde:

C_i = concentración inicial de azul de metileno (mg/L o ppm)

C_f = concentración final de azul de metileno (mg/L o ppm)

3.5.6. Análisis de datos

Los datos se organizaron en tablas y gráficos, de esta manera se aplicó el análisis de varianza de dos factores (ANOVA), se evaluó el efecto individual, combinado de las variables temperatura y tiempo sobre la calidad del carbón activado. Luego se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey, para determinar las diferencias significativas entre tratamientos para establecer cuál tratamiento produjo mejor rendimiento en la remoción de azul de metileno y determinar el tiempo y temperatura óptima de dicho estudio.

Tabla 7*Tabla de varianza*

Fuentes de variación	Suma de cuadrados (SC)	Gl	Media cuadrática (MC)	F	P
Tratamientos	SC_ trat	gl-trat	MC-trat	F-trat	p-trat
Tiempo (A)	SC_ tiem	gl-tiem	MC-tiem	F-tiem	P-tiem
Temperatura (B)	SC_ temp	gl-temp	MC-temp	F- temp	P- temp
Interacción AxB	SC_ inter	gl-inter	MC-inter	F-inter	P-inter
Error Experimental	SC-error	gl-error	MC-error		
Total	SC- total	gl-total			

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Influencia del Tiempo y Temperatura en la Calidad del Carbón Activado

Se evaluó el porcentaje (%) de adsorción con azul de metileno, donde se consideró como variables independientes a tiempo y temperatura. En la siguiente tabla se presenta los valores de la evaluación:

Tabla 8

Promedio de adsorción del azul de metileno en las UE

UE	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Remoción de azul de metileno (%)
T ₁	600	30	96.38
T ₂	600	45	96.43
T ₃	600	60	93
T ₄	650	30	92.44
T ₅	650	45	88.88
T ₆	650	60	92.51

Los resultados en la tabla 8, reflejan que todos los tratamientos fueron buenos, sin embargo la mayor capacidad de adsorción de azul de metileno se alcanzó a 600 °C en 45 minutos, con un porcentaje de remoción del 96.43 %; mientras que al aumentar la temperatura a 650 °C , la remoción de azul de metileno disminuyó llegando al 88.88%, estos resultados reflejan que al exceso de temperatura reduce la capacidad de adsorción; siendo los valores favorables comparados con otros autores como: Moreno et al. (2006), quienes obtuvieron la mejor remoción de azul de metileno 650 °C y 45 minutos. Sin embargo, se asemeja con Mayta (2017) y Ordoñez (2019), quienes destacaron que temperaturas intermedias (550 – 600 °C) generan carbones con mayor área superficial y mejor equilibrio entre microporos y mesoporos, optimizando así la capacidad de adsorción.

Este fenómeno sucedió debido a que en la carbonización el lodo se deshidrata y compuestos orgánicos se descomponen, dando lugar a la formación de gases y a una matriz porosa. Al ser activado el lodo con ácido fosfórico, favorece la ruptura de enlaces C-H y C-O, permitiendo la formación de microporos y mesoporos que aumentan el área superficial (Moreno et al., 2019).

Sin embargo, tanto el tiempo y la temperatura al ser excesivos, pueden hacer colapsar los poros, reduciendo la superficie activa (Rojas, 2020). Este proceso unitario explica por qué a 600 °C y 45 min se obtuvo la condición óptima para una mejor adsorción.

4.1.1 Análisis estadístico ANOVA

Tabla 9

Estadísticos descriptivos generales

	Estadígrafo	Resultado
Media		93.27 %
Mediana		92.78 %
Desviación estándar		± 2.67
Varianza		7.10
Mínimo		88.87 %
Máximo		96.45 %

Nota: Los resultados indican en promedio que el colorante removido del azul de metileno al aplicar los tratamientos fue del 93.27 ± 2.67 %, los valores fluctuaron entre 88.87 y 96.45 %. Fuente: Software IBM SPSS

Tabla 10

ANOVA para los resultados de remoción de azul de metileno

Fuentes de variación	Suma de cuadrados (SC)	Gl	Media cuadrática (MC)	F	P
Tratamientos	120.751	5	24.150	41402.366	0.000*
Tiempo (A)	11.646	2	5.823	9982.856	0.000*
Temperatura (B)	71.680	1	71.680	122887.022	0.000*
Interacción A x B	37.425	2	18.712	32079.547	0.000*
Error Experimental	0.007	12	0.001		
Total	120.758	17			
CV = 0.034 %		R ² = 1.000		R ² ajustado = 1.000	

Los resultados del ANVA indican que existe efecto significativo del tiempo, la temperatura y de su interacción ($p < 0.05$) en la variación del colorante del azul de metileno. El modelo tiene excelente ajuste (error experimental y CV muy pequeños;

R^2 ajustado muy alto) porque explica toda la variabilidad con altísima precisión. El efecto del tiempo sobre la variable dependiente es altamente significativo. Esto indica que cambiar el tiempo (30, 45, 60 min) produce diferencias estadísticamente significativas en el resultado medido. El efecto de la temperatura también es altamente significativo. Cambiar de 600 °C a 650 °C genera diferencias importantes en la variable dependiente. Hay una interacción significativa entre tiempo y temperatura. Esto significa que el efecto del tiempo depende de la temperatura, y viceversa.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) mostraron que tanto el tiempo, la temperatura como su interacción influyen de manera estadísticamente significativa ($p < 0.05$) en la remoción del azul de metileno. Esto demuestra que no se puede evaluar el efecto de estas variables de manera aislada, ya que una depende de la otra.

4.1.2 Prueba de Tukey

Tabla 11

Prueba de Tukey para los efectos de la interacción sobre el porcentaje de remoción

Tratamientos (Interacción)	Media (%)	Grupo Tukey
T2 (600 °C x 45 min)	96.46	A
T1 (600 °C x 30 min)	96.38	A
T3 (600 °C x 60 min)	93.00	B
T6 (650 °C x 60 min)	92.51	C
T4 (650 °C x 30 min)	92.44	D
T5 (650 °C x 45 min)	88.88	E

Nota. Los tratamientos que comparten el mismo grupo no son significativamente diferentes entre sí para la variable dependiente como el caso del T2 y T1. Los tratamientos que aparecen en grupos distintos sí son significativamente diferentes entre sí, por ejemplo, T3, T6, T4 y T5. El T2 y T1 se destacan como los mejores tratamientos en la remoción del colorante azul de metileno, utilizando carbón activado producido a 600 °C y por 45 min y 30 min, respectivamente; en comparación con los otros tratamientos (95 % de confiabilidad).

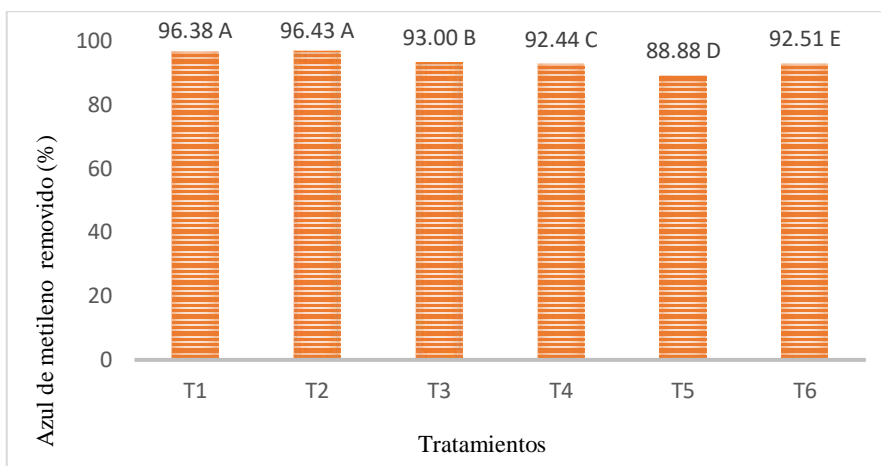
La prueba de Tukey indica que los tratamientos T1 y T2 conforman el grupo A, lo que significa que no presentan diferencias significativas entre sí y son estadísticamente los más eficientes, indicando que ambos tiempos producen un desempeño similar a dicha temperatura.

Los resultados son comparables con los estudios de Herrera (2018) y Rojas et al. (2016), quienes encontraron altos porcentajes de remoción (>88 %) al emplear ácido fosfórico como activador y temperaturas moderadas de pirólisis. Por otro

lado, difieren de los trabajos de Moreno et al. (2006) y Segura (2017) que indican mayores eficiencias a temperaturas más elevadas, aunque bajo diferentes condiciones experimentales (otro agente activante y tiempo de contacto).

Figura 8

Gráficas de remoción de azul de metileno

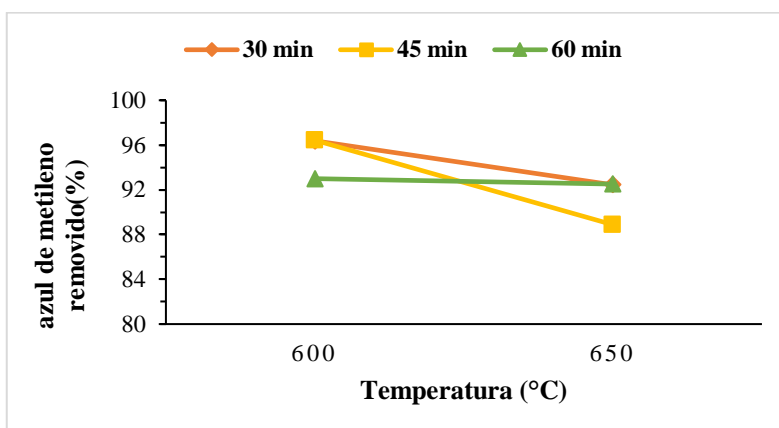


Nota. En las gráficas se muestra los promedios de remoción de azul de metileno y las letras a lado de los promedios representan los grupos a que pertenecen, en este caso el T1 y T2 pertenecen al mismo grupo, los demás difieren uno del otro.

Fuente: Elaboración propia

Figura 9

Gráfica de intersección de tratamientos en remoción de azul de metileno



Nota. En esta figura se muestra la interacción de los tratamientos que pertenecen al mismo grupo y los que difieren como en la figura 8. Fuente: Elaboración propia.

Los tratamientos que usaron carbón activado pirolizado a 600 °C presentaron los mayores porcentajes de remoción de azul de metileno, con valores promedio superiores al 96 %. El mejor tratamiento fue T2 (600 °C por 45 minutos) con 96.46 %, seguido por T1 (600 °C por 30 minutos) con 96.38 %. En contraste, el tratamiento T5 (650 °C por 45 minutos) obtuvo la menor remoción, con un promedio de 88.88 %.

Estos resultados contradicen parcialmente a lo reportado por Moreno et al. (2006), donde la mayor remoción se logró a temperaturas más altas (650 °C). Esta diferencia podría deberse al tipo de agente activante usado, ya que Moreno empleó $ZnCl_2$, mientras que esta investigación utilizó ácido fosfórico al 30 %, cuya eficiencia óptima se observa en condiciones más moderadas de temperatura, según lo evidenciado también en los estudios de Rojas et al. (2016).

Además, el hecho de que T3 (600 °C por 60 minutos) haya tenido una menor remoción (93.00 %) que T1 y T2 sugiere que un tiempo de exposición excesivo podría deteriorar o colapsar la porosidad generada, reduciendo así su capacidad adsorbente. Este comportamiento es respaldado por lo mencionado por Mayta (2017), quien señala que tiempos y temperaturas prolongadas pueden disminuir el área superficial activa del carbón.

Este estudio señaló la importancia de controlar ambos parámetros para optimizar la calidad del carbón activado. Sin embargo, también se reconoce que los resultados pueden variar según el tipo de lodo, el agente activante utilizado y las condiciones específicas de activación. Por lo tanto, es importante seguir

investigando con diferentes escenarios y ajustes para adaptar esta tecnología a otras fuentes de materia prima.

En conjunto, los hallazgos de esta investigación no solo permiten validar la viabilidad técnica del uso de lodos residuales como insumo para carbón activado, sino que además evidencian el potencial de esta alternativa como una solución ambientalmente responsable para el manejo de residuos. El enfoque utilizado representa una contribución importante a la valorización de desechos dentro del marco de la sostenibilidad y la economía circular.

4.2. Influencia del Tiempo en la Capacidad de Adsorción del Carbón Activado

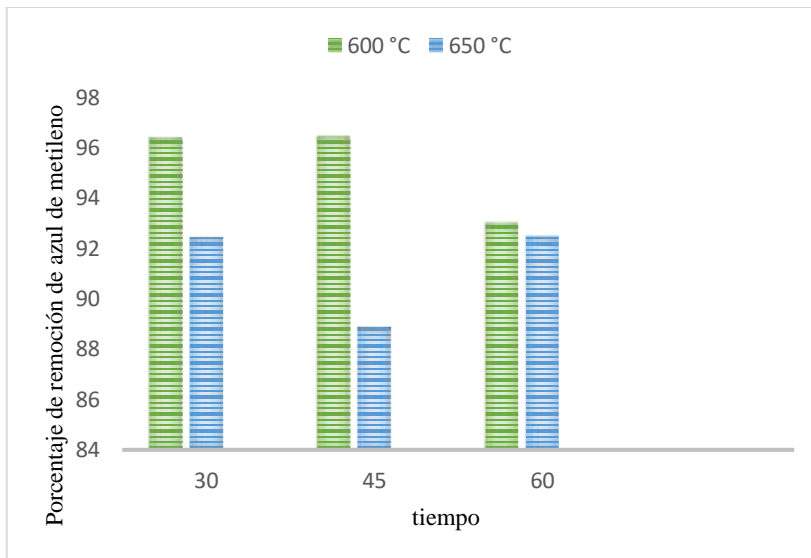
Tabla 12

Porcentaje de remoción de azul de metileno en relación al tiempo de calcinación del carbón

Tiempo (min)	Remoción de azul de metileno (%)
30	96.38
	96.38
	96.37
45	96.45
	96.43
	96.41
60	93.00
	93.00
	92.99
30	92.46
	92.44
	92.42
45	88.87
	88.88
	88.89
60	92.56
	92.51
	92.46

Figura 10

Porcentaje promedio de remoción en relación al tiempo



En la tabla 9 y figura 7, se observa que a 600 °C en 30 min se tiene un porcentaje de remoción del 96.38 %, 96.43 % (45 min) y 93% (60 min). Estos resultados evidencian que a un tiempo excesivo de pirólisis pueden colapsar los poros y disminuir su porcentaje de adsorción.

Herrera (2018), reportó que al haber tiempos prolongados de pirólisis provoca una reducción de la capacidad adsorbente debido a la pérdida de oxígeno y a la aparición de cenizas.

Este fenómeno producido se relaciona con las etapas unitarias del carbón activado. En los primeros minutos de activación, el ácido fosfórico se introduce en la matriz carbonosa formando la reacción de deshidratación, generando una red inicial de microporos (Moreno et al., 2019). A los 45 min se alcanza un punto de equilibrio liberando gases y eliminación de compuestos volátiles, incrementando la superficie activa para una mejor adsorción de AM. Continuando el proceso a los 60 min el material sufre reacciones de condensación secundaria provocando la contracción de las estructuras y el colapso de poros (Rojas, 2020).

Por lo tanto, el tiempo óptimo fue 45 min, permitiendo una activación controlada manteniendo el equilibrio entre la apertura de poros y la estructura del carbón.

4.3 Influencia de la Temperatura en la Capacidad de Remoción de Azul de Metileno.

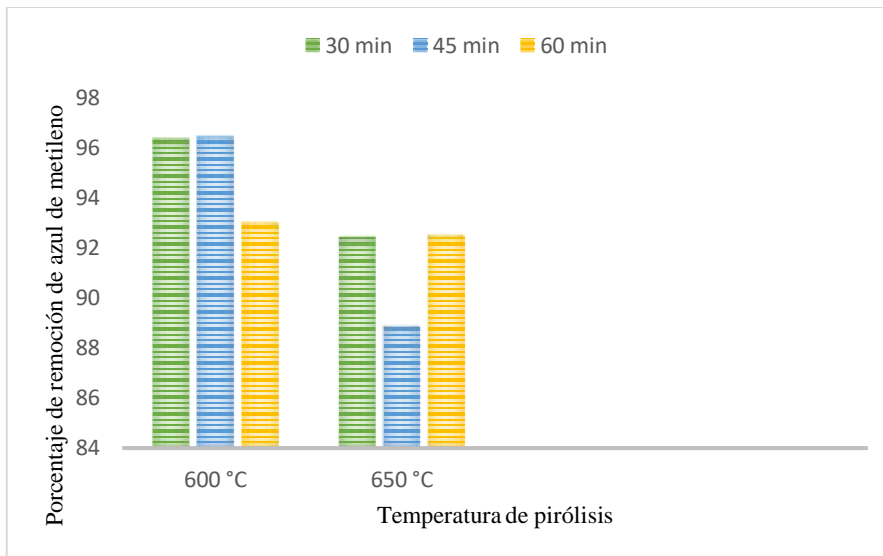
Tabla 13

Porcentaje de remoción de azul de metileno en cuanto a temperatura

Temperatura (°C)	Remoción de azul de metileno %
	96.38
600	96.38
	96.37
	96.45
600	96.43
	96.41
	93.00
600	93.00
	92.99
	92.46
650	92.44
	92.42
	88.87
650	88.88
	88.89
	92.56
650	92.51
	92.46

Figura 11

Porcentaje promedio de remoción en relación a la temperatura



En la tabla 10 y figura 8, se muestran valores promedio de remoción de AM de dos temperaturas a 600 °C (96.43 %) y 650 °C (92.51 %), evidenciando que al haber incremento de temperatura se reduce la capacidad de adsorción del carbón activado.

La temperatura determina la intensidad de los procesos de carbonización y activación. A 600 °C el calor elimina el material volátil y abre la estructura porosa sin destruir los grupos funcionales superficiales como los grupos fosfatos y carboxilo, siendo los principales responsables de la atracción de moléculas orgánicas (García & Salinas, 2018).

A 650 °C se degradan los grupos oxigenados y fosforados debido al exceso de temperatura, llegando a producirse el colapso parcial de la estructura porosa (Soria et al., 2020).

En la activación química, el ácido fosfórico actúa como agente reticulante, estabilizando la matriz carbonosa mediante la formación de enlaces P-O-C. Al

haber un incremento de temperatura pasado los 600 °C, los enlaces se rompen, reduciendo la cantidad de sitios activos, así como la capacidad de adsorción (López et al., 2022).

También coincide con lo reportado por Guo y Lua (2021), quienes hallaron que temperaturas mayores a 600 °C disminuyen la capacidad adsorbente del carbón activado proveniente de lodos

Se concluye que la temperatura óptima para obtener un carbón de buena calidad en cuanto a remoción de azul de metileno es de 600 °C.

4.4. Rendimiento del Lodo en la Producción del Carbón Activado (CA)

Tabla 14

Porcentaje de rendimiento de la producción del CA

Tiempo(min)	Rendimiento%	
	600 °C	650 °C
30	62.04	61.06
	62.00	61.07
	62.16	61.00
45	61.58	60.48
	61.52	60.43
	61.49	60.30
60	61.45	60.46
	61.47	60.48
	61.44	60.41

En la tabla 11, se observa valores comprendidos 61.44 % a 62.16 % (600 °C), y entre 60.30 % a 61.07 % (650°), considerando diferentes tiempos de

activación (30, 45 y 60 minutos). De manera general se observó que el rendimiento disminuye ligeramente con el incremento de temperatura y el tiempo de pirólisis.

En consecuencia, los productos unitarios en la producción de carbón activado como la carbonización y activación térmica provocan la eliminación progresiva de material volátil y la descomposición de compuestos orgánicos presentes en el lodo seco. Al incrementarse la temperatura como a 650 °C, ocurre una mayor oxidación y degradación térmica, llevando a la pérdida de masa sólida y a una reducción del rendimiento final del producto (Moreno et al., 2017).

A 600 °C y 30 min se alcanzó el mayor rendimiento (62.16 %), lo que quiere decir que, en esta condición, la tasa de descomposición fue menor y predominó la estabilidad de la matriz carbonosa. Por otro lado, a 650 °C y 45 min el rendimiento se redujo a valores cercanos a 60.30 %. Reflejando una activación más intensa y pérdida de carbono fijo.

Según Guo et al. (2021), la disminución del rendimiento con el aumento de temperatura es característica de los procesos donde se utiliza activación física o química con agentes deshidratantes, favoreciendo la eliminación de impurezas y compuestos volátiles del material precursor.

En conclusión, el rendimiento del carbón activado disminuyó ligeramente con el incremento de temperatura y tiempo, en consecuencia, de los procesos de pirólisis, deshidratación y eliminación de compuestos volátiles que reducen la masa sólida del material. No obstante, los valores obtenidos son consistentes con la literatura y confirman que las condiciones de 600 °C y 30 minutos optimizan el equilibrio entre rendimiento y calidad de adsorción, garantizando una buena producción eficiente y sostenible.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Tanto el tiempo y la temperatura influyen significativamente en la calidad del carbón activado obtenido a partir de lodos residuales de la PTAR Celendín, para la remoción de azul de metileno. Demostrando que a 600 °C y 45 minutos existe un equilibrio adecuado tanto en temperatura como en tiempo favoreciendo la formación de una estructura porosa activa sin degradación.

La influencia del tiempo en la calidad del carbón activado varía moderadamente, se mostró que al pasar de 30 minutos a 60, la capacidad de adsorción disminuyó. Dejando evidencia que a tiempos prolongados se intensifica la gasificación interna del material, provocando un colapso de microporos, el cual reduce la superficie activa disponible. Por lo tanto, el tiempo óptimo resultó ser el de 45 minutos manteniendo su elevada capacidad de adsorción.

La temperatura influye significativamente en la calidad del carbón activado, el aumento de 600 °C (remoción de 96.43 %) a 650 °C (remoción de 92.52%) generó una leve disminución en la remoción de azul de metileno, este resultado se

explica que a mayor temperatura existe una mayor descomposición térmica conduciendo a la pérdida de oxígenos funcionales superficiales responsables de la adsorción. Por ende, la temperatura óptima es de 600 °C ya que permite preservar la estabilidad para una mejor adsorción del carbón activado proveniente de lodos residuales.

El rendimiento de lodo en la producción del carbón activado disminuyó ligeramente al incrementarse la temperatura y el tiempo de activación, relacionándose con la pérdida de masa debido a la eliminación de compuestos volátiles, gases y materia orgánica durante la carbonización. A pesar de dicha reducción los resultados se mantienen dentro del rango reportado por otros estudios (55% - 65 %), esto confirma la viabilidad técnica del uso de lodos residuales de la PTAR Celendín como materia prima para la elaboración del carbón activado.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda optimizar las condiciones de activación del carbón tomando como referencia la temperatura de 600 °C y un tiempo de 45 minutos, ya que esta combinación mostró el mejor desempeño en la remoción de azul de metileno. Los resultados evidenciaron que tanto el tiempo como la temperatura influyeron en la calidad del material, por lo que mantener estos parámetros permitirá mejorar la eficiencia del proceso y el aprovechamiento de los lodos residuales.

Se recomienda ampliar la investigación evaluando el comportamiento del carbón activado frente a diversos contaminantes, como colorantes, metales pesados y compuestos orgánicos, a fin de analizar su desempeño y potencial en distintos escenarios de tratamiento bajo condiciones controladas.

Se sugiere desarrollar un protocolo experimental que permita analizar el comportamiento del carbón activado frente a metales pesados, considerando variables como pH de la solución, tiempo de contacto, la dosis del adsorbente y la concentración inicial del contaminante, para determinar las condiciones más adecuadas para su aplicación en el tratamiento de agua.

Se recomienda realizar un análisis del consumo energético asociado al proceso de obtención del carbón activado, especialmente durante la etapa de pirólisis, ya que este proceso requiere altas temperaturas. Este análisis permitirá estimar la viabilidad energética del proceso en caso de plantearse una aplicación a mayor escala.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

- Al Dawery, S. K., Khalaf, J. M., & Jasim, H. H. (2023). *Treatment of produced water using prepared activated carbon-based sewage sludge*. *Separations*, 10(10), 519.
<https://doi.org/10.3390/separations10100519>
- Aquino Espinoza, P. (2017). *Calidad de agua en el Perú. Derecho, Ambiente y Recursos Naturales* (DAR).
https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/4.4_libro_aguas-residuales-tratadas-peru.pdf
- Agudelo Alvarez, B. (2017). *Estandarización de proceso de producción de carbón activado por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial* [tesis de pregrado, Fundación Universidad de América].
<https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/33e6fb36-dc29-4019-9a57-ec14f8e21f28/content>
- Bautista-Toledo, I., Rivera-Utrilla, J., & Sánchez-Polo, M. (2020). *Adsorción y procesos avanzados de tratamiento de aguas residuales*. Universidad de Granada.
<https://digibug.ugr.es>

- Bazán Escalante, L. (2022). *Elaboración de ladrillos de arcilla con inclusión de lodos residuales de la PTAR de la provincia de Celendín, Cajamarca* [Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Chiclayo]. Archivo digital.
[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/102953/Baz%
a1n_ELG-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/102953/Baz%c3%a1n_ELG-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Camargo,A., & Collazos, E. (2015).*Producción y caracterización de carbón activado a partir de lodos de fermentación para adsorción de ácidos carboxílicos* [Tesis de pregrado, Universidad de los andes].
[https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/cfde9997-52e3-
4ed9-bed0-7107e63b9209/content](https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/cfde9997-52e3-4ed9-bed0-7107e63b9209/content)
- Candela Levano, G. M., Miglio Toledo, R., Vela Cardich, R., & Cadillo La Torre, E. A. (2025). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de lodos de PTAR y BES bajo un enfoque de reaprovechamiento agronómico. *Ecología Aplicada*, 23(2), 151-164. <https://doi.org/10.21704/rea.v23i2.2219>
- Carcasi,J. & Vilchez,A. (2022).*Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de agua como agregado fino para la producción de concreto en la provincia de Mala, Cañete* [Tesis de posgrado, Universidad Ricardo Palma].
[https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/58ecac0a-2c5d-470c-
9eb7-5a3914b11dad/content](https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/58ecac0a-2c5d-470c-9eb7-5a3914b11dad/content)
- Castañeda, C., & Valdés, A. (2020). Aplicación del carbón activado como catalizador en procesos de oxidación avanzada. *Revista Iberoamericana de Ciencia y Tecnología*, 23(4), 55–65.

- Castro, R., Mendoza, S., & Santos, M. (2007). Caracterización físico-química de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas. Universidad de La Habana.
- Castro Cruzado, E. (2022). *Determinación de la efectividad del lombricompostaje en la estabilización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín* [Tesis para el grado, Cajamarca Perú 2022].
file:///C:/Users/ROXI/Downloads/Tesis%20Ing%20Ambiental.%20Emeli%20MCC.%202022%20(4).pdf
- Cayo, R. & Montalvo, C. (2019). *Cinética e Isotermas de adsorción de iones de Arsénico (III) mediante nanoporos de carbón activado derivados de lodos orgánicos de aguas residuales*. [Tesis para grado, Universidad Peruana Unión]
https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/2077/Richar_Tesis_Licenciatura_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chen, Y., Li, X., Zheng, M., & Wang, C. (2019). Sludge treatment and management in wastewater treatment plants: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 13, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.11.003>
- Chen, D., Li, W., & Mei, C. (2020). Preparation and characterization of activated carbon from sludge by chemical activation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103685.
- Comisión Nacional del agua (s. f). *Manual de agua potable, Alcantarillado y saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales. p1*
- Cruz, F., Pérez, D., & Molina, A. (2020). Procesos avanzados de oxidación aplicados a la remoción de contaminantes orgánicos. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Espinoza, J. J., & Santos, E. G. (2021). *Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú*. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 24(48), 205–216.
- Fernández, R., Trapero, A., y Domínguez, J. (2010). *Experimentación en Agricultura (Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca (ed.))*. Secretaría General Técnica. Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Flores-Ruiz, E., Miranda-Novales, M. G., y Villasís-Keever, M. Á. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. Revista Alergia México, 64(3), 364–370.
<https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>
- Franco, M. A., & Londoño, C. A. (2017). Adsorción de colorantes en medio acuoso utilizando carbón activado. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (82), 62–70.
- Franco Cagnat, K. (2021). *Caracterización fisicoquímica de lodos provenientes de una planta de tratamiento por tipo de residuo* [Tesis de grado, Instituto superior Tecnológico Superior de Martínez de la Torre].
<https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4600/1/CARACTERIZACION%20FISICOQUIMICA%20DE%20LODOS%20PROVENIENTES%20DE%20UNA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20POR%20TIPO%20DE%20RESIDUO%20IA%202021.p>
- Ganji, F., Kamani, H., Ghayebzadeh, M., Abdipour, H., & Moein, H. (2023). Evaluation of physical and chemical characteristics of wastewater and sludge of Zahedan

- urban wastewater treatment plant for reuse. *Environmental Research*, 224, 115054. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115054>
- García, M., & Salinas, R. (2018). Influencia de la temperatura en la estructura porosa de carbones activados. *Revista de Ciencia y Ambiente*, 12(2), 45–53.
- Gómez, J., & Rodríguez, P. (2018). Tratamientos fisicoquímicos aplicados al agua mediante carbón activado. Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, L., & Rivera, M. (2021). Propiedades y aplicaciones del carbón activado en el tratamiento de contaminantes ambientales. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 12(3), 45–58. <https://doi.org/10.1016/rlaia.2021.03.004>
- Gonzales, L. Otelo, M. Junco. J. Pardine, J. (2009). *Aprovechamiento de lodos de depuradoras urbanas como adsorbente*. Efecto del método de activación. Universidad de Oriente Santiago de Cuba. Archivo digital. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543758013.pdf>
- González, J., Herrera, C., & Rojas, D. (2016). Obtención de carbón activado a partir de residuos orgánicos: influencia de la temperatura y el agente activante. *Revista Colombiana de Materiales*, 7(2), 45–58. <https://doi.org/10.18273/revcolmat.v7n2-2016>
- González, M., & Romero, C. (2016). Propiedades fisico-químicas del carbón activado a partir de residuos agroindustriales. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(2), 55–66.
- Granados Jamanca, Y. (2024). Obtención de carbón activado a partir de lodos abandonados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Huaripampa en el distrito de Olleros – Huaraz [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero

- Ambiental, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional UNSAM. <https://repositorio.unsam.edu.pe/handle/123456789/1418>
- Guo, T., et al. (2017). Characteristics and adsorption study of the activated carbon derived from municipal sewage sludge. *Environmental Technology & Innovation*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28991786/>
- Guo, Y., & Lua, A. (2021). Characterization of activated carbons prepared from industrial sludge by chemical activation. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123456.
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313–2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Gutierrez, J., Ramirez, A., Rivas, R., Linares, B., y Paredes, R. (2014). *Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua*. Revista Ingenierías. Universidad de Medellín. vo. 13, N°25. Archivo digital. [//www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n25/v13n25a02.pdf](http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n25/v13n25a02.pdf)
- Herrera Meza, L. (2018). *Eficiencia en la producción de carbón activado por pirólisis a partir de lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales, Coropongo*. [Tesis para obtener el título de ingeniero ambiental, Universidad César Vallejo. Lima]. Archivo digital. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/37910/Herrera_MLJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Huamán Siuce, M. (2020). *Aprovechamiento de lodos activados provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales para obtención de carbón activado*

[Tesis para optar el grado de bachiller, Universidad Científica del Sur].

<https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1472/TB-Huaman%20M.pdf?sequence=1>

- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966–2005
- Jiménez, L., & Vargas, R. (2021). Evaluación del carbón activado como catalizador en la oxidación avanzada de aguas residuales. *Revista Peruana de Química Ambiental*, 15(2), 45–58.
- Li, M., Zhao, Y., & Zhang, J. (2019). Production and characterization of activated carbon from municipal sludge under controlled pyrolysis conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(15), 15332–15340.
- Loli, F., & Zamora, E. (2021). Propiedades de adsorción del carbón activado obtenido de residuos agroindustriales en el Perú. *Revista de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional de Cajamarca*, 12(1), 77–89.
- López, C. Méndez, G. García, A., Francisco, J. Carrillo, J. (2017). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. p. 35
- López, C., Fernández, A., & Vargas, L. (2022). Síntesis y propiedades fisicoquímicas del carbón activado obtenido de residuos orgánicos urbanos. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 18(1), 33–41.
- Maita Rodríguez, J. (2022). *Carbón activado de la cáscara de arroz modificado con ácido nítrico para adsorción de cadmio en efluentes textiles* [Tesis de posgrado,

Universidad Nacional del Centro del Perú]. Archivo digital.

<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8885>

Martínez, D., Pérez, A., & López, R. (2020). Avances en la producción y uso del carbón activado para la descontaminación ambiental. *Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente*, 8(2), 65–79. <https://doi.org/10.19084/ctma.2020.08.02.065>

Mayta Casas, C. (2017) *Elaboración de carbón activado a partir de lodos residuales*.

[Tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Villa el Salvador].

http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/247/1/Mayta_Consuelo_Trabajo_Profesional_2017.pdf

Medina Tiznado, J (2023) *Lodos residuales como alternativa para la recuperación de suelos* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro].

<https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/6328/T13983%20MEDINA%20TIZNADO,%20JOSE%20MISAEL%20TESIS.pdf?sequence=1>

Metcalf & Eddy, Inc. (2015). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Metcalf & Eddy, Inc. (2016). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Ministerio del Ambiente. (2010). *Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM: Límites máximos permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Lima, Perú.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2017). *Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA: Reglamento para la gestión y*

aprovechamiento de biosólidos. Diario Oficial El Peruano.

<https://www.gob.pe/vivienda>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA: Reglamento para el reaprovechamiento de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). *Guía técnica para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Lima, Perú.

Ministerio del Ambiente. (2021). Decreto Supremo N.º 003-2021-MINAM: Estándares de calidad ambiental y límites máximos permisibles para la gestión de aguas residuales. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2021). Guía técnica para el manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales. Lima, Perú.

Molina-Sabio, M., & Rodríguez-Reinoso, F. (2004). Role of chemical activation in the development of carbon porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 241(1–3), 15–25.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.04.007>

Morales, M. 2005. *Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento*. Capítulo 4. Lodos. Tesis de Ing. Puebla, México, Universidad de Las Américas. 18 p.

Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon*, 42(1), 83–94.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2003.09.022>

Moreno, H. Droppelmann, C. Verdejo. (2006) *Evaluación de carbón activado producido a partir de lodo generado en una planta de tratamiento de aguas servidas.*

[Universidad Tecnológica Metropolitana y Universidad Andrés Bello]. Archivo digital. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000300003

Moreno, R., Alarcón, J., & Ramírez, P. (2017). Influencia de la temperatura en la activación térmica de carbones obtenidos de residuos orgánicos. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 13(2), 75–86.

Moreno, J., Pérez, E., & Rojas, C. (2019). Efecto del tiempo de activación en la capacidad de adsorción del carbón activado de biomasa residual. *Revista Colombiana de Química*, 48(1), 23–30.

Montaño, M., Rojas, L., & García, A. (2019). Evaluación del carbón activado como adsorbente de contaminantes en aguas industriales. *Revista Colombiana de Química*, 48(1), 15–25. <https://doi.org/10.15446/rev.col.quim.v48n1.77045>

Núñez, D., Campos, L., & Valdivia, M. (2021). Evaluación del rendimiento de carbones activados a partir de lodos residuales. *Revista Peruana de Ingeniería Ambiental*, 7(3), 112–119.

Ordoñez, M (2019) *Determinación del proceso óptimo de pirólisis de lodos residuales, para la mayor eficiencia de producto sólido.* [Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador]. Archivo digital.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17235/1/UPS-CT008221.pdf>

- Paramasivam, G., Rao, I. R., y Prabhu, M. A. (2024). Normality testing in statistics: what clinician–researchers should know. *Heart Failure Journal of India*, 2(1), 55–60. <https://doi.org/10.4103/HFJI.HFJI>
- Padrón, R. Rodríguez, C. Gómez, A. García, A. Gonzales, L. (2013) *El carbón activado un material adsorbente* (Monografía, Universidad de Matanzas). Archivo digital. <http://monografias.umcc.cu/monos/2013/Facultad%20de%20Ingenierias/mo13253.pdf>
- Peña Reina, L. (2019) *Evaluación del efecto del tamaño de grano de la ilmenita de la actividad fotocatalítica en mezclas de ilmenita /carbón activado sobre la remoción de azul de metileno* [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/272384c9-6e52-4d12-ad0b-164d1f014d37/content>
- Porras, M., & Vizcaíno, A. (2020). Evaluación de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el Perú. *Revista Ambiental Peruana*, 5(2), 12–18.
- Quispe, A., & Cabrera, L. (2019). Reutilización y regeneración del carbón activado en tratamientos de aguas residuales industriales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Rendón-Macías, M. E., Villasís-Keever, M. Á., y Miranda-Novales, M. G. (2016). Estadística descriptiva. *Revista Alergia México*, 63(4), 397–407. <https://doi.org/10.29262/ram.v63i4.230>
- Rodríguez-Miranda, J., García, R., & Pardo, P. (2015). *Procesos de tratamiento de aguas residuales: fundamentos y aplicaciones*. Editorial Académica Española.

- Rodríguez-Miranda, J. P., García, M. A., & Pardo, R. (2015). Tratamiento y gestión de lodos en plantas de aguas residuales urbanas. *Ingeniería del Agua*, 22(3), 189–200. <https://doi.org/10.4995/ia.2015.3456>
- Rodríguez-Reinoso, F. (2018). The role of carbon materials in heterogeneous catalysis. *Carbon*, 132, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.02.075>
- Rojas Quino, C. (2020). Adsorción de colorantes en carbones activados de lodos residuales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Rojas, J. Gutiérrez, Colina. (2016). *Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales de una industria avícola*. México. Archivo digital.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774316300312>
- Rojas, P., & Díaz, C. (2020). Efecto del tiempo de activación en la porosidad y rendimiento de carbones activados de origen agroindustrial. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 14(3), 115–125.
- Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2011). Sustainable porous carbons with a superior performance for CO₂ capture. *Energy & Environmental Science*, 4(5), 1765–1771. <https://doi.org/10.1039/C0EE00784F>
- Serrano, D. P., Aguado, J., & Escola, J. M. (2020). Producción de carbón activado y su aplicación en la adsorción de contaminantes emergentes. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Ambiental*, 11(3), 112–128.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.009>

- Silva,P. & Flores,J (2019) *Adsorción con carbón activado modificado para la remoción de Cr6+ en efluentes de la industria de Cromado, Lima 2018-2019* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://core.ac.uk/reader/368577480>
- Soria, L., Mamani, P., & Cruz, A. (2020). Propiedades texturales del carbón activado obtenido de residuos agroindustriales. *Revista Boliviana de Ingeniería Química*, 5(2), 58–67.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Thovar Puebla, A. (2023). *Producción, tratamientos, caracterización y destino final de los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) generados en la comunidad de Madrid* [Tesis de posgrado,Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/73573/1/TFM_ALVARO_THOVAR_PUEBLA.pdf
- Torres, M., Rincón, J., & Salazar, C. (2020). Regeneración térmica y química del carbón activado agotado. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 45–55.
<https://doi.org/10.14483/22502079.16136>
- Valencia, L., & Torres, A. (2018). Obtención y caracterización de carbón activado a partir de residuos lignocelulósicos para aplicaciones ambientales. *Revista Colombiana de Materiales*, 9(1), 45–56.
- Vargas Proaño, P. (2023). *Evaluación de la eficiencia en la remoción de tensoactivos (sustancias activas al azul de metileno), como tratamiento terciario, a nivel de*

laboratorio utilizando agua sintética, mediante la aplicación de un carbón activado producido de lodos resultantes de una PTAR. Universidad Central del Ecuador Quito. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/29556/1/FING-CIC-VARGAS%20PAULINA.pdf>

Wijesekara, U., et al. (2025). A review of properties, occurrence, fate, and transportation of biosolids. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 3, 1547596.

<https://doi.org/10.3389/fenvc.2025.1547596>

Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218–235.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>

Zhang, Y., et al. (2024). Microbiological characterization and pathogen control in sludge drying. *Water*, 16(22), 3276. <https://doi.org/10.3390/w16223276>

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo A. Panel fotográfico

Anexo 1

Lodos obtenidos de la PTAR Celendín



Anexo 2

Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Celendín

**Anexo 3**

Lechos de secado de la PTAR Celendín



Anexo 4

Secado de lodo previa activación

**Anexo 5**

Lodo seco listo para tamizar

a.



b.

**Anexo 6**

Lodo triturado y tamizado



Anexo 7

Peso de lodo tamizado para su activación

a.



b.



Anexo 8

Activador ácido fosfórico

**Anexo 9**

Activación de lodo seco con ácido fosfórico

a.



Anexo 10

Lodo seco activado listo para pirólisis

a.



b.



Anexo 6

Lodo activado en la mufla

**Anexo 7**

Lodo carbonizado listo para lavado con agua destilada hervida



Anexo 8*Lavado de resto de activante del lodo seco pirolizado*

a.



b.



Anexo 9

Peso de carbón activado para determinar su calidad mediante remoción de azul de metileno



Anexo 10

Determinación de azul de metileno aplicando carbón activado

**Anexo 11**

Medición de color en el espectrofotómetro



Anexo B. Informes de laboratorio

Anexo 12

Primer informe de laboratorio – marzo del 2025



ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO
DE SUELOS Y AGUAS
PARA LA AGRICULTURA Y CONSTRUCCIÓN

OIKOSLAB
SOC

ENSAYO DE MATERIA ORGÁNICA EN LODOS OIKOSLAB N°2165-2025

Solicitantes : Bach. Rocycela Silva Cabellos
 Fecha de recepción : 13-02-2025
 Proyecto de tesis : Influencia del tiempo y temperatura en la calidad del carbón activado a partir de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín.
 Institución : Universidad Nacional de Cajamarca-Filial Celendín

Muestra proporcionada por el solicitante

Datos

Procedencia : Lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín
 Distrito : Celendín
 Provincia : Celendín
 Región : Cajamarca

I.- Descripción de la muestra

Tipo de muestra : Lodo seco

II.-Resultados

Ensayo	W crisol (g)	Wcrisol y muestra seca antes de la calcinación (g)	Wcrisol y muestra seca después de la calcinación (g)	Materia Orgánica (%)
1	42.5506	47.5511	45.5228	68.24
2	42.8361	47.8371	45.7932	69.12
PROMEDIO				68.68

Leyenda:
W : Peso

III.-Protocolo

Norma técnica : ASTM-297400-Método C y D

Se pesó con exactitud crisoles, se adiciona a cada crisol 5.0000 gramos de suelos totalmente secos, se calcina en la mufla a 375°C por 12 horas, se enfrían los crisoles y se pesan con aproximación al 0.1 mg.



Jorge A. Delgado Soto
ING. RESPONSABLE
CIP. 56757



Psje. San Pedro #113
 Morro Solar Alto - Jaén, Cajamarca.
 Cel.: 970 911 920
 R.U.C.: 20487352072

Anexo 13

Segundo informe de laboratorio – abril del 2025



PIROLISIS DE MUESTRAS DE LODO TRATADAS- OIKOSLAB N°2172-2025

Solicitantes : Bach. Rocycela Silva Cabellos
 Fecha de recepción : 15-02-2025
 Proyecto de tesis : Influencia del tiempo y temperatura en la calidad del carbón activado a partir de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín.
 Institución : Universidad Nacional de Cajamarca-Filial Celendín
 Muestra proporcionada por el solicitante

Datos
 Procedencia : Lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín
 Distrito : Celendín
 Provincia : Celendín
 Región : Cajamarca

I.- Descripción de la muestra
 Tipo de muestra : Lodo tratado antes de la pirólisis

II.-Resultados

Tratamientos Temperatura/tiempo	Unidades Experimentales	Rendimiento (%)
600°C /30MIN	T1R1	62.04
	T1R2	62.00
	T1R3	62.16
600°C /45MIN	T2R1	61.58
	T2R2	61.52
	T2R3	61.49
600°C /60MIN	T3R1	61.45
	T3R2	61.47
	T3R3	61.44
650°C/30MIN	T4R1	61.06
	T4R2	61.07
	T4R3	61.00
650°C/45MIN	T5R1	60.48
	T5R2	60.43
	T5R3	60.30
650°C/60MIN	T6R1	60.46
	T6R2	60.48
	T6R3	60.41

Las fotografías adjuntas a su WhatsApp, son propiedad del Laboratorio Oikoslab SAC, para la impresión en algún documento deberá mencionar la fuente y el año, de lo contrario estaría incurriendo en el delito de plagio y usurpación de derechos autorales que tipifica el Artículo 219 y 220 del código penal.

Psje. San Pedro #113
 Morro Salar Año - Juan, Cajamarca.
 Cel.: 970 911 920
 R.U.C.: 20487352072


Jorge A. Delgado Soto
 ING. RESPONSABLE
 CIP. 66767



INFORME PIROLISIS DE MUESTRAS DE LODO TRATADAS

OIKOSLAB N°2172-2025

Protocolo de la Investigación

Se pesó con exactitud crisoles, se adicionó a cada crisol aproximadamente 25.0000 g de muestra antes de la pirolisis, luego se llevan a cabo los tratamientos mostrados en la tabla

Tratamientos Temperatura/tiempo	Unidades Experimentales (g)	Wc (g)	Wm (g)	Wc+Wca (g)	Wca (g)	Rendimiento (%)
600°C /30MIN	T1R1	57.3476	25.0003	72.8584	15.5108	62.04
	T1R2	69.3653	25.0002	84.8651	15.4998	62.00
	T1R3	66.9196	25.0000	82.4591	15.5395	62.16
	PROMEDIO					
600°C /45MIN	T2R1	69.3734	25.0000	84.768	15.3946	61.58
	T2R2	57.3512	25.0003	72.7303	15.3791	61.52
	T2R3	66.9273	25.0002	82.2998	15.3725	61.49
	PROMEDIO					
600°C /60MIN	T3R1	57.3551	25.0000	72.7182	15.3631	61.45
	T3R2	69.3734	25.0005	84.7413	15.3679	61.47
	T3R3	66.9350	25.0007	82.2950	15.3600	61.44
	PROMEDIO					
650°C/30MIN	T4R1	57.3587	25.0005	72.6239	15.2652	61.06
	T4R2	69.3754	25.0001	84.6420	15.2666	61.07
	T4R3	66.9407	25.0004	82.1900	15.2493	61.00
	PROMEDIO					
650°C/45MIN	T5R1	57.3618	25.0001	72.4819	15.1201	60.48
	T5R2	69.3767	25.0003	84.4851	15.1084	60.43
	T5R3	66.9459	25.0003	82.022	15.0761	60.30
	PROMEDIO					
650°C/60MIN	T6R1	57.3646	25.0000	72.48	15.1154	60.46
	T6R2	69.3782	25.0003	84.4993	15.1211	60.48
	T6R3	66.9496	25.0007	82.0532	15.1036	60.41
	PROMEDIO					

Leyenda: Wc (Peso del crisol en gramos), Wm (Peso de la muestra de carbón antes de la pirolisis), Wc+Wca (Peso del crisol + Peso del carbón activado), Wca (Peso del carbón activado)

2

Las fotografías adjuntadas a su WhatsApp, son propiedad del Laboratorio Oikoslab SAC, para la impresión en algún documento deberá mencionar la fuente y el año, de lo contrario estaría incurriendo en el delito de plagio y usurpación de derechos autorales que tipifica el Artículo 219 y 220 del código penal.

Psje. San Pedro #113
Marro Solar Alto - Jaén, Cajamarca.
Cel.: 970 911 920
R.U.C.: 20487352072



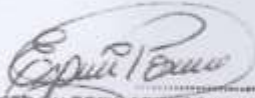


Jorge A. Delgado Soto
 ING. RESPONSABLE
 CIP. 56787



Anexo 14

Documento de calibración de horno de laboratorio

	METROLOGÍA Y AUTOMATIZACIÓN S.R.L. METAUT	
CERTIFICADO DE CALIBRACION LT-HL-005-25		Pag. 1 de 8
CLIENTE : OIKOSLAB S.A.C.		
<u>INFORMACION DEL INSTRUMENTO:</u>		
EQUIPO	HORNO DE LABORATORIO	<p>Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el sistema internacional de unidades (SI).</p> <p>La dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrológicas a solicitud de los interesados.</p> <p>Para la realización del Proceso de calibración del equipo Metaut sigue el Procedimiento para la calibración de Medios Isotérmicos con aire como Medio termostático PC-018- INACAL.</p> <p>Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.</p>
FABRICANTE	NAHITA	
MODELO	632 PLUS	
N° SERIE	50632131	
CAPACIDAD	125 Lts	
INDICADOR	---	
Precisión	1°C	
Sensor	Tipo J	
RANGO	0 - 250 °C	
Procedencia	---	
Tipo de Ventilación	Forzada	
Punto de Operación	110 +/- 5°C	
UBICACIÓN	Laboratorio In Situ - Jaen	
DIA DE LA MEDICION	10/02/2025	
	 EFRAÍN ESPINOZA POSADAS JEFE LAB. TEMPERATURA IE CIP N°125481	
JR. ANDRES RAZURI N° 242 - PACASMAYO - PACASMAYO - LA LIBERTAD CELULAR 999934038 - 970830283 E-MAIL servicios@metaut.com - ventas@metaut.com WWW.METAUT.COM		

Anexo 15

Documento de calibración de balanza de funcionamiento no automático

		METROLOGÍA Y AUTOMATIZACIÓN S.R.L. METAUT
CERTIFICADO DE CALIBRACION LM-BAL-022-25		Pag. 1 de 3
CLIENTE: OIKOSLAB S.A.C.		
<u>INFORMACION DEL INSTRUMENTO:</u>		
EQUIPO	BALANZA DE FUNCIONAMIENTO NO AUTOMATICO	<p>Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el sistema internacional de unidades (SI)</p> <p>La dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones primarios de las unidades de medida, realiza mediciones y certificaciones metroológicas a solicitud de los interesados.</p> <p>Para la realización del Proceso de calibración del equipo METAUT cumple con los protocolos de calidad de la NTP-ISO/IEC 17025-2017 y los Procedimientos de calibración establecidos por INACAL-DM.</p> <p>Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones es recomendable calibrar sus instrumentos a intervalos apropiados</p>
MARCA	OHAUS	
MODELO	PX224/E	
SERIE	B829149517	
TIPO	Electronica	
CAPACIDAD MÁXIMA	220 g	
DIVISION DE ESCALA (d)	0,0001 g	
DIVISION DE VERIF. (e)	0,001 g	
CLASE	I	
F. CALIBRACIÓN	10/02/2025	
F. PROX. CALIBRACIÓN *	10/02/2029	
F. EMISIÓN	11/02/2025	
<u>METODO DE CALIBRACION:</u>		
<p>La calibración se realizó por comparación directa según PC-011 procedimiento para la Calibración de balanzas de funcionamiento No automático Clase I y II SNM-INDECOPI – 4Ta Edición 2010.</p>		
<u>TRAZABILIDAD:</u>		
<p>01 Juego de Pesas de 1 mg a 1 kg, Clase E2 certificado LM-C-211-2024, LM-C-212-2024, LM-C-213-2024 Certificados Trazables al S.I. de unidades a través de INACAL</p>		
<u>LUGAR DE LA CALIBRACIÓN:</u>		
<p>El servicio de calibración se realizó en las instalaciones del cliente localizado en PASAJE SAN PEDRO 113 DISTRITO Y PROVINCIA DE JAÉN, REGIÓN CAJAMARCA.</p>		
<u>CONDICION AMBIENTAL DE CALIBRACION:</u>		
ΔT LOCAL	(22°C Hasta 26°C)	
COEF. DERIVA TEMP.	1x10 ⁻⁵ /°C	
		
 CARLOS MENDOZA MEDINA INGENIERO ELECTRONICO JEFE DE METROLOGIA		 STALIN OLAZABAL TREJO JEFE LABORATORIO MASA IE CIP N° 182685
JR. ANDRES RAZURI N° 242 - PACASMAYO - PACASMAYO - LA LIBERTAD CELULAR 999934038 – 970830283 E-MAIL servicios@metaut.com - ventas@metaut.com WWW.METAUT.COM		

Anexo 16

Tercer informe de laboratorio- mayo 2025

a.



**ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO
DE SUELOS Y AGUAS
PARA LA AGRICULTURA Y CONSTRUCCIÓN**

**oikoslab
SOC**

DETERMINACIÓN DE AZUL DE METILENO - OIKOSLAB N°2184-2025

Solicitantes : Bach. Rocycela Silva Cabellos
 Fecha de recepción : 07-04-2025
 Proyecto de tesis : Influencia del tiempo y temperatura en la calidad del carbón activado a partir de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín.
 Institución : Universidad Nacional de Cajamarca-Filial Celendín
 Muestra proporcionada por la solicitante
 Datos

I.- Descripción de la muestra

Se evaluaron 18 soluciones de azul de metileno correspondientes a seis tratamientos, los cuales fueron tratadas con carbón activado en una relación de 30 mL de azul de metileno de 100 ppm de concentración filtrado en 5 gramos de carbón activado tratado a diferentes temperaturas. Para la determinación se empleó el método espectrofotométrico de luz Visible, el equipo es de la marca UNICO modelo 1200, la medición se realizó a 664 nm. Para llevar a cabo la determinación se efectuaron los siguientes pasos:

II.- Preparación de la curva de calibración

Se preparó una solución de azul de metileno de 100 ppm, para ello se pesó en la balanza analítica de la marca OHAUSS modelo PX224/E, se disolvieron 0.025 gramos en 250 mL de agua destilada. A partir de esta solución se prepararon soluciones de 2 ppm, 4 ppm 6 ppm 8 ppm y 10 ppm de concentración. Luego se realizaron las lecturas de dichas concentraciones, no se consideró la lectura de 10 ppm por obtener una lectura errónea. A continuación se muestra la tabla y la curva de calibración.

Tabla 1

Concentración de AM (ppm)	Absorbancia (%)
2	0.357
4	0.511
6	1.046
8	1.35



Jorge A. Delgado Soto
ING. RESPONSABLE
CIP. 56757



Psje. San Pedro #113
 Marro Solar Alto - Joten, Cajamarca.
 Cel.: 970 911 920
 R.U.C.: 20487352072

b.

