

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y DEL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE DE ZEOLITA NATURAL SOBRE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DEL EFLUENTE TRATADO DE LA PTAR LA MERCED."

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Ambiental

Autor:

Brito Valle Marcos Daniel

Tutor:

Moreno Ávila Andrés Sebastián

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto - 2026

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Brito Valle Marcos Daniel, con cédula de ciudadanía No. 1850625060, declaro ser autor del presente Proyecto de Investigación: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y DEL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE DE ZEOLITA NATURAL SOBRE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DEL EFLUENTE TRATADO DE LA PTAR LA MERCED."** siendo el Ingeniero Mg. Andrés Moreno, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 05 de agosto del 2026

Marcos Daniel Brito Valle

C.C: 1850625060

ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **BRITO VALLE MARCOS DANIEL**, identificado con cédula de ciudadanía **1850625060** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - EL CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y DEL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE DE ZEOLITA NATURAL SOBRE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DEL EFLUENTE TRATADO DE LA PTAR LA MERCED."** la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2022-Agosto 2022

Finalización de la carrera: Abril 2026 – Agosto 2026

Tutor: Ing. Andrés Moreno Ávila Mstr.

Tema: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y DEL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE DE ZEOLITA NATURAL SOBRE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DEL EFLUENTE TRATADO DE LA PTAR LA MERCED."**

CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

a. La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
b. La publicación del trabajo de grado.
c. La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
d. La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

e. Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 5 días del mes de agosto del 2026.

Marcos Daniel Brito Valle	Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
EL CEDENTE	**LA CESIONARIA**

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y DEL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE DE ZEOLITA NATURAL SOBRE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DEL EFLUENTE TRATADO DE LA PTAR LA MERCED.", de Brito Valle Marcos Daniel, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 05 de agosto del 2026

Ing. Andrés Moreno Ávila Mg.
C.C: 0503220063
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, la postulante: Brito Valle Marcos Daniel, con el título de Proyecto de Investigación: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y DEL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE DE ZEOLITA NATURAL SOBRE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DEL EFLUENTE TRATADO DE LA PTAR LA MERCED.",** ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 05 de agosto del 2026

Ing. José Andrade Valencia, Ph.D.
C.C: 0502524481
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Dra. Kalina Fonseca Largo, Ph.D.
C.C: 1723534457
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. José Agreda Oña, Mg.
C.C: 0401332101
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento

a Dios, por brindarme fortaleza, constancia y sabiduría para culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación durante todo este proceso académico y por nunca dejar de apoyarme. Su respaldo fue fundamental para superar cada dificultad y continuar avanzando hacia el cumplimiento de esta meta.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales y a la Carrera de Ingeniería Ambiental, por los conocimientos y experiencias adquiridos durante mi formación.

A mis amigos que hicieron este trayecto de mi vida una experiencia grata e inolvidable, gracias por acompañarme durante este camino y formar parte de esta etapa tan importante en mi vida.

De manera especial, agradezco a mi tutor, Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg., por su orientación, tiempo, observaciones y acompañamiento durante el desarrollo de la investigación.

Finalmente, agradezco a mis docentes y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo y culminación de esta tesis.

A todos, mi gratitud y reconocimiento.

Brito Valle Marcos Daniel

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi madre, Nelly Valle, la mujer más maravillosa que he conocido y el ser que más amo en este mundo, por ser el pilar de mi vida y mi apoyo constante durante todo este proceso académico, por su confianza, paciencia y motivación en cada etapa de mi formación.

A todas las personas que me acompañaron durante este camino, brindándome palabras de aliento, apoyo y comprensión en los momentos más exigentes.

Este trabajo y titulo es de ustedes y para ustedes.

Con gratitud y cariño.

Brito Valle Marcos Daniel

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: "EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA Y DEL ESPESOR DEL LECHO FILTRANTE DE ZEOLITA NATURAL SOBRE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FINALES DEL EFLUENTE TRATADO DE LA PTAR LA MERCED."

Autor:

Brito Valle Marcos Daniel

RESUMEN

La investigación evaluó el efecto de la granulometría y del espesor del lecho filtrante de zeolita natural de tipo comercial sobre los parámetros fisicoquímicos del efluente tratado de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Merced, en Santiago de Píllaro, Tungurahua. Se aplicó un enfoque cuantitativo, experimental y comparativo mediante un diseño factorial 2 × 3, conformado por dos granulometrías, de 0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm, y tres espesores, de 8, 12 y 16 cm. Se ejecutaron seis tratamientos con dos réplicas, para doce unidades experimentales de 1000 mL, bajo flujo ascendente y caudales entre 489 y 508 mL/min. La secuencia fue intercalada y no aleatoria: T1–T4, T2–T5 y T3–T6. Entre corridas, la grava, las mallas y la estructura interna de los filtros se lavaron con agua destilada para reducir el riesgo de contaminación cruzada. Se analizaron DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales; el pH y la temperatura se registraron como parámetros complementarios. Los datos se procesaron mediante estadística descriptiva, ANOVA factorial y prueba de Tukey. No se identificaron efectos significativos para DQO ni amonio; este último se interpretó de forma exploratoria por incumplimiento de normalidad y valores fuera del rango de trabajo. La turbidez presentó efectos significativos de la granulometría, el espesor y su interacción, mientras que en los TDS fueron significativos el espesor y la interacción. T3 presentó la mayor turbidez y T6 el menor promedio de TDS. Se concluyó que la hipótesis alternativa recibió respaldo parcial y que no existió una configuración universalmente superior evaluada.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, espesor del lecho, filtración ascendente, granulometría, parámetros fisicoquímicos, zeolita natural de tipo comercial.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

COLLEGE OF AGRICULTURAL SCIENCES AND NATURAL RESOURCES

TITLE: "EVALUATION OF THE EFFECT OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION AND FILTER BED THICKNESS OF COMMERCIAL-GRADE NATURAL ZEOLITE ON THE FINAL PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF THE TREATED EFFLUENT FROM THE LA MERCED WASTEWATER TREATMENT PLANT."

Author:

Brito Valle Marcos Daniel

ABSTRACT

This study evaluated the effect of particle size and the thickness of the commercial-grade natural zeolite filter bed on the physicochemical parameters of the treated effluent from the La Merced Wastewater Treatment Plant in Santiago de Píllaro, Tungurahua. A quantitative, experimental, and comparative approach was applied using a 2 × 3 factorial design, consisting of two particle size ranges—0.5–1.0 mm and 2.0–4.0 mm—and three bed thicknesses—8, 12, and 16 cm. Six treatments were carried out with two replicates, for twelve 1,000-mL experimental units, under upflow conditions and at flow rates ranging from 489 to 508 mL/min. The sequence was interleaved and non-random: T1–T4, T2–T5, and T3–T6. Between runs, the gravel, mesh, and internal structure of the filters were washed with distilled water to reduce the risk of cross-contamination. COD, ammonium, turbidity, and total dissolved solids were analyzed; pH and temperature were recorded as supplementary parameters. The data were analyzed using descriptive statistics, factorial ANOVA, and Tukey's test. The data were analyzed using descriptive statistics, factorial ANOVA, and Tukey's test. No significant effects were identified for COD or ammonium; the latter was interpreted on an exploratory basis due to a lack of normality and values outside the working range. Turbidity showed significant effects of particle size distribution, bed depth, and their interaction, while for TDS, bed depth and the interaction were significant. T3 exhibited the highest turbidity, and T6 had the lowest average TDS. It was concluded that the alternative hypothesis was partially supported and that no universally superior configuration was identified.

Keywords: domestic wastewater, bed thickness, upflow filtration, particle size distribution, physicochemical parameters, commercial-grade natural zeolite.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORIA ii

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR..... iii

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN..... v

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN v

AGRADECIMIENTO..... vi

DIDECATORIA..... viii

RESUMEN..... ix

ABSTRACT x

ÍNDICE DE CONTENIDO..... xi

ÍNDICE DE TABLAS..... xvi

ÍNDICE DE FIGURAS xvii

ÍNDICE DE ANEXOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**

1. INFORMACIÓN GENERAL 1

2. INTRODUCCIÓN..... 3

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO..... 5

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO 7

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 9

6. OBJETIVOS..... 10

6.1. General..... 10

6.2. Específicos..... 10

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS..... 12

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA..... 13

8.1. Calidad del agua 13

8.2. Aguas residuales domésticas 14
8.3. Tratamiento de aguas residuales 15
8.4. Filtración 16
8.5. Zeolita 17
8.5.1. Tipo de Zeolita 17
8.5.1.1. Zeolita Sintética 17
8.5.1.2. Zeolita Natural 17
8.6. Características de la Zeolita 18
8.6.1. Porosidad 18
8.6.2. Granulometría 18
8.6.3. Peso Unitario 19
8.6.4. Permeabilidad 19
8.6.5. Esfericidad 19
8.6.6. Capacidad de retención de agua 20
8.6.7. Grado de compactación 20
8.7. Propiedades de la Zeolita 20
8.7.1. Propiedades químicas 21
8.7.2. Propiedades físicas 21
8.8. Uso de la zeolita 21
8.8.1. Uso en el tratamiento de agua 22
8.8.2. Uso para la remoción de amonio 22
8.8.3. Uso para la remoción de metales 22
8.8.4. Uso en el tratamiento de aguas residuales 22
8.9. Filtro de zeolita natural 23
8.10. Aplicación de la zeolita natural en el tratamiento de aguas residuales 24

8.11. Evaluación y comparación de los tratamientos 25
8.12. Parámetros a Medir 25
8.12.1. Demanda Química de Oxígeno 25
8.12.2. Amonio 25
8.12.3. Turbidez 26
8.12.4. Sólidos Disueltos Totales 26
8.12.5. Temperatura 27
8.12.6. Potencial de Hidrógeno 27
8.13. Equipos e Instrumentos para el Análisis 27
8.13.1. Espectrofotómetro 27
8.13.2. Reactor o bloque digestor de DQO 28
8.13.3. Turbidímetro 28
8.13.4. Multiparámetro 28
8.14. MARCO LEGAL 29
8.14.1. Constitución de la República del Ecuador 29
8.14.2. Tratados y convenios internacionales 32
8.14.3.1. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua 32
8.14.3.2. Código Orgánico del Ambiente 33
8.14.3.3. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización 33
8.14.4. Reglamentos 34
8.14.4.1. Reglamento al Código Orgánico del Ambiente 34
8.14.5. Normativa técnica ambiental 34
8.14.5.1. Acuerdo Ministerial 097-A 34
9. VALIDACIÓN DE LA PREGUNTA CIENTÍFICA O HIPÓTESIS 38

9.1. Pregunta científica 38
9.2. Hipótesis estadísticas 38
9.3. Validación de la hipótesis 38
10. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL 39
10.1. Enfoque y diseño de la investigación 39
10.2. Área de estudio 40
10.3. Diseño experimental y variables de estudio 41
10.3.1. Factores y niveles experimentales 41
10.3.2. Tratamientos y unidades experimentales 42
10.3.3. Variables de estudio 43
10.4. Materiales y equipos 44
10.5. Diseño y dimensionamiento del sistema de filtración 48
10.5.1. Dimensiones y capacidad del filtro 48
10.5.2. Capas de soporte 50
10.5.3. Espesores del lecho de zeolita 51
10.5.4. Justificación de las granulometrías 52
10.5.5. Configuración hidráulica 54
10.6. Preparación y colocación de los materiales filtrantes 56
10.6.1. Preparación de la grava y la zeolita 56
10.6.2. Determinación de la cantidad de zeolita 57
10.6.3. Colocación de los materiales en el filtro 58
10.7. Recolección del efluente para los ensayos experimentales 59
10.8. Procedimiento experimental de filtración 60
10.9. Análisis de laboratorio y control de las mediciones 64
10.9.1. Análisis de DQO, amonio y turbidez 64

10.9.2. Medición de pH, temperatura y sólidos disueltos totales 65
10.9.3. Registro y control de los resultados 66
10.10. Procesamiento y análisis de datos 67
10.10.1. Análisis descriptivo 67
10.10.2. Análisis estadístico 67
11. RESULTADOS 69
11.1. Condiciones de ejecución de los ensayos 69
11.1.1. Fecha, hora y caudal 69
11.1.2. Funcionamiento de los dos filtros 70
11.2. Resultados de las doce unidades experimentales 70
11.2.1. Matriz general de resultados 70
11.2.2. Estadísticos descriptivos por tratamiento 71
11.3. Parámetros fisicoquímicos finales por tratamiento 71
11.3.1. Demanda química de oxígeno 71
11.3.2. Amonio 72
11.3.3. Turbidez 72
11.3.4. Sólidos disueltos totales 73
11.3.5. pH 73
11.3.6. Temperatura 73
11.4. Comparación estadística de los tratamientos 73
11.4.1. Evaluación de los supuestos del ANOVA 74
11.4.2. Análisis de varianza para la DQO final 75
11.4.3. Análisis de varianza para el amonio final 75
11.4.4. Análisis de varianza para la turbidez final 76
11.4.5. Análisis de varianza para los TDS finales 76

11.4.6. Interacción entre granulometría y espesor 77
11.4.7. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey 78
11.5. Comparación integral de los tratamientos 81
11.6. Validación de la hipótesis 82
11.7. Limitaciones del estudio 83
12. CONCLUSIONES 85
13. RECOMENDACIONES 87
14. BIBLIOGRAFÍA 88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Beneficiarios directos e indirectos del Proyecto. 8
Tabla 2: Sistematización de los objetivos específicos. 12
Tabla 3: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. 36
Tabla 4: Factores y niveles del diseño experimental. 42
Tabla 5: Distribución de los tratamientos experimentales. 42
Tabla 6: Operacionalización de las variables. 43
Tabla 7: Materiales del sistema experimental. 45
Tabla 8: Materiales y equipos para la preparación, muestreo y análisis. 47
Tabla 9: Volumen geométrico correspondiente a los espesores de zeolita. 51
Tabla 10: Distribución vertical de las capas dentro del filtro. 52
Tabla 11: Índice teórico relativo de superficie externa disponible. 54
Tabla 12:Condiciones de recolección del efluente para los ensayos experimentales. 60
Tabla 13: Registro de fecha, hora y caudal de las unidades experimentales. 62
Tabla 14: Parámetros evaluados después de la filtración. 64

Tabla 15: Matriz general de resultados fisicoquímicos finales. 70

Tabla 16: Media y desviación estándar de los parámetros por tratamiento (n = 2)..... 71

Tabla 17: Resumen del ANOVA factorial 2 × 3. 73

Tabla 18: Evaluación de la normalidad de los residuos. 74

Tabla 19: Análisis de varianza factorial para DQO final. 75

Tabla 20: Análisis de varianza factorial para amonio final. 75

Tabla 21: Análisis de varianza factorial para turbidez final. 76

Tabla 22: Análisis de varianza factorial para-TDS finales. 76

Tabla 23: Agrupación de Tukey para turbidez final. 78

Tabla 24: Agrupación de Tukey para-TDS finales. 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Ubicación de la zona de estudio. 40

Figura 2: Interacción granulometría × espesor para turbidez final. 77

Figura 3: Interacción granulometría × espesor para-TDS finales 78

Figura 4: Comparación de medias de turbidez final mediante la prueba de Tukey. 79

Figura 5: Comparación de los sólidos disueltos totales medios entre tratamientos mediante la prueba de Tukey. 80

Figura 6: Comparación de la turbidez media entre los tratamientos mediante la prueba de Tukey. 82

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Evaluación del efecto de la granulometría y del espesor del lecho filtrante de zeolita natural sobre los parámetros fisicoquímicos finales del efluente tratado de la PTAR La Merced.

Fecha de inicio:

Octubre 2025

Fecha de finalización:

Agosto 2026

Lugar de ejecución:

Sector La Merced, cantón Santiago de Píllaro, provincia de Tungurahua.

Facultad que auspicia

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

Carrera que auspicia:

Ingeniería Ambiental.

Equipo de Trabajo:

Tutor: Andrés Sebastián Moreno Ávila

Lector 1 (presidente): José Antonio Andrade Valencia

Lector 2: Kalina Marcela Fonseca Largo

Lector 3: José Luis Agreda Oña

Coordinador del Proyecto: Marcos Brito

Área de Conocimiento:

Protección del medio ambiente, Ciencias Naturales, Medio Ambiente y Ciencias Ambientales.

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub línea de investigación:

Manejo y conservación del recurso hídrico.

Línea de vinculación de la carrera:

Gestión de recursos naturales, biodiversidad, biotecnología y genética, para el desarrollo humano y social.

2. INTRODUCCIÓN

La generación de aguas residuales se ha incrementado como consecuencia del crecimiento poblacional, la urbanización y la intensificación de las actividades domésticas y productivas. A escala mundial se producen aproximadamente 359,4 mil millones de metros cúbicos de aguas residuales al año; sin embargo, únicamente el 52 % recibe algún tipo de tratamiento, mientras que el volumen restante es liberado al ambiente sin depuración adecuada (Murillo et al., 2023). Esta situación favorece el deterioro de los cuerpos hídricos, la incorporación de nutrientes y materia orgánica, y la alteración de los ecosistemas receptores. Para (Mendoza-Retana et al., 2021) el tratamiento adecuado y el aprovechamiento controlado de las aguas residuales constituyen medidas necesarias para reducir la presión sobre las fuentes naturales y fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

Las aguas residuales domésticas contienen materia orgánica, sólidos, nutrientes, microorganismos y diferentes sustancias disueltas procedentes de las actividades cotidianas de la población. Las plantas de tratamiento buscan reducir estas cargas antes de la descarga; no obstante, la eficiencia alcanzada depende del diseño, las condiciones operativas y las características del afluente. Incluso después del tratamiento convencional pueden permanecer concentraciones residuales de demanda química de oxígeno, amonio y partículas coloidales (Aguila et al., 2022). En diversos países como Colombia se ha demostrado que la turbidez puede relacionarse con la concentración de sólidos suspendidos totales, mientras que estudios experimentales desarrollados en Perú evidencian que las condiciones de operación de los tratamientos complementarios producen diferencias en la reducción de la turbidez (Bolívar-Cuartas et al., 2021).

Entre las alternativas empleadas para el tratamiento complementario se encuentra la zeolita natural, un aluminosilicato cristalino de estructura porosa que posee capacidad de adsorción e

intercambio catiónico. De manera complementaria, en su estudio (Vargas & Sánchez, 2022) detallan que la cinética de adsorción en materiales zeolíticos evidenciaron que el tiempo de contacto y la concentración inicial del contaminante influyen en la velocidad del proceso y en la saturación del adsorbente. Por consiguiente, el desempeño de la zeolita debe determinarse experimentalmente de acuerdo con el contaminante, las características del material y las condiciones de operación del sistema.

El desempeño de un filtro granular de zeolita no depende únicamente de las propiedades químicas del mineral, sino también de las condiciones físicas e hidráulicas del sistema. La granulometría determina la superficie disponible para el contacto con los contaminantes y la resistencia al paso del agua, mientras que el espesor del lecho modifica la cantidad de material adsorbente y el recorrido hidráulico del efluente (Santos & Ocaña, 2021a). Por esta razón, la evaluación conjunta de diferentes tamaños de partícula y espesores permite establecer si los cambios en la configuración del filtro producen diferencias en los valores finales de amonio, materia orgánica oxidable, turbidez y sólidos disueltos totales, evitando seleccionar las condiciones de operación únicamente con base en criterios descriptivos.

La literatura técnica latinoamericana señala que los procesos de adsorción pueden operar mediante columnas empacadas con materiales naturales, entre ellos las zeolitas, y combinarse con otras etapas para mejorar la calidad final del agua. Sin embargo, la capacidad de adsorción depende del tipo de estructura zeolítica, los sitios activos, el pH, la naturaleza del contaminante y las condiciones particulares de cada matriz acuosa, por lo que los resultados obtenidos con un material no deben trasladarse directamente a otro sistema sin una validación experimental (Capa Cobos, 2021). En este contexto, la presente investigación tuvo como finalidad comparar el comportamiento de filtros de flujo ascendente elaborados con zeolita natural de tipo comercial para el tratamiento complementario del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas

Residuales La Merced, ubicada en el cantón Santiago de Píllaro. El diseño experimental consideró dos granulometrías, comprendidas entre 0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm, y tres espesores de lecho filtrante de 8, 12 y 16 cm. La evaluación se estableció mediante la comparación de los parámetros fisicoquímicos finales obtenidos en los seis tratamientos, con el propósito de identificar las configuraciones con mejor comportamiento y generar información técnica aplicable a futuros procesos de optimización del tratamiento de aguas residuales domésticas.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La gestión adecuada de las aguas residuales constituye un desafío ambiental y de salud pública para los gobiernos locales, debido a los efectos que una descarga insuficientemente tratada puede generar sobre los cuerpos hídricos, los suelos, los ecosistemas y la población. En el sector La Merced, cantón Santiago de Píllaro, la planta de tratamiento de aguas residuales cumple una función fundamental en la reducción de la carga contaminante generada por las actividades domésticas. No obstante, resulta necesario evaluar alternativas complementarias que permitan mejorar la calidad final del efluente antes de su descarga y aportar al cumplimiento de la normativa ambiental aplicable.

En este contexto, la evaluación de la zeolita natural de tipo comercial como medio filtrante representa una alternativa técnica para el tratamiento complementario del efluente de la PTAR La Merced. Las zeolitas naturales poseen estructura porosa y capacidad de intercambio catiónico; dentro de este grupo, la clinoptilolita ha mostrado afinidad por el ion amonio. No obstante, debido a que el material adquirido no contó con una caracterización mineralógica, en esta investigación se lo denomina zeolita natural de tipo comercial. Su comportamiento puede estar relacionado con la granulometría, la cantidad de material y las condiciones hidráulicas del sistema (Muscarella et al., 2024).

La investigación se justifica desde el ámbito ambiental porque permitió evaluar el comportamiento de un filtro de zeolita natural de tipo comercial aplicado al agua residual doméstica previamente tratada. Para ello, se analizó la influencia de dos granulometrías y tres espesores del lecho sobre los parámetros fisicoquímicos finales. La comparación entre tratamientos permitió identificar las configuraciones con mejor comportamiento dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

Desde el ámbito técnico, el diseño experimental permitió analizar el efecto del espesor y el comportamiento de las configuraciones granulometría–filtro, además de la interacción entre ambos factores. Esta información facilitó la identificación de las combinaciones con mejor comportamiento según el parámetro evaluado. Asimismo, el estudio generó datos sobre el funcionamiento de un filtro de flujo ascendente construido con materiales de fácil adquisición y adaptable a escala de laboratorio.

En el ámbito económico, la zeolita natural presenta interés por su disponibilidad, facilidad de manipulación y posibilidad de ser utilizada como medio filtrante sin requerir equipos de elevada complejidad. Por esta razón, su evaluación permitió disponer de información preliminar sobre su potencial como alternativa de pulimiento para sistemas de tratamiento existentes. Sin embargo, la factibilidad de una implementación a escala real deberá analizarse posteriormente mediante estudios hidráulicos, operativos y económicos complementarios.

La relevancia social del proyecto se relaciona con la protección de la salud y del entorno de la población vinculada al sector La Merced. El mejoramiento de la calidad del efluente puede contribuir a disminuir los riesgos asociados con la contaminación del agua y fortalecer la gestión ambiental del cantón. De igual manera, los resultados obtenidos podrán servir como insumo técnico para el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santiago de Píllaro

y para futuras investigaciones relacionadas con el uso de materiales naturales en el tratamiento complementario de aguas residuales.

Finalmente, la investigación posee utilidad académica y práctica, debido a que permitió aplicar principios de filtración, adsorción, intercambio iónico y diseño experimental en una problemática ambiental local. Los resultados aportaron evidencia sobre el comportamiento de la zeolita natural bajo diferentes configuraciones del lecho filtrante y podrán constituir una base para estudios posteriores orientados al escalamiento, la optimización y la posible aplicación de esta tecnología en otros sistemas con características semejantes.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

La investigación genera beneficios de carácter técnico, académico, ambiental y social. Para su identificación, los beneficiarios se clasificaron en directos e indirectos de acuerdo con su relación con la ejecución del estudio y con el posible aprovechamiento de sus resultados.

Los beneficiarios directos corresponden a las personas e instituciones que participaron en el desarrollo del proyecto o que podrán utilizar de manera inmediata la información experimental generada. Los beneficiarios indirectos comprenden a la población, comunidades e instituciones que podrían beneficiarse posteriormente, en caso de que los resultados sirvan como base para nuevas investigaciones o para la implementación de sistemas complementarios de tratamiento. El filtro de zeolita fue evaluado a escala de laboratorio y no se instaló como una unidad permanente de la PTAR La Merced. Por esta razón, los beneficios ambientales y sociales asociados con una posible mejora del efluente se consideran potenciales y dependerán de estudios posteriores de optimización, escalamiento y viabilidad técnica.

Tabla 1:

Beneficiarios directos e indirectos del Proyecto.

Grupo beneficiario	Cantidad o alcance referencial	Beneficio relacionado con el proyecto
BENEFICIARIOS DIRECTOS		
Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santiago de Píllaro, especialmente las áreas de saneamiento y gestión ambiental	Personal institucional relacionado con el proyecto	Disponibilidad de información experimental sobre el comportamiento de diferentes configuraciones de filtros de zeolita aplicadas al efluente tratado de la PTAR La Merced.
Personal técnico y operativo relacionado con la PTAR La Merced	Según nómina institucional	Información técnica para valorar alternativas complementarias de tratamiento y orientar futuros ensayos. La PTAR forma parte del sistema municipal de saneamiento del cantón.
Universidad Técnica de Cotopaxi, postulante, tutor y personal académico vinculado	Comunidad académica relacionada con el proyecto	Generación de conocimiento, aplicación del diseño experimental y fortalecimiento de capacidades investigativas.
BENEFICIARIOS INDIRECTOS		
Población potencialmente atendida por la PTAR La Merced	1.490 habitantes, correspondientes a la población de diseño reportada para la planta	Posible beneficio futuro asociado con el mejoramiento del tratamiento del efluente, siempre que la alternativa sea validada e implementada a una escala mayor.
Comunidades, propietarios de terrenos, productores agropecuarios y usuarios del recurso hídrico ubicados en el área de influencia o aguas abajo	Cantidad no determinada	Posible disminución de riesgos ambientales relacionados con descargas de aguas residuales tratadas y mayor protección de los cuerpos receptores.
Otros gobiernos autónomos descentralizados, universidades e investigadores	Cantidad no determinada	Disponibilidad de información técnica para futuras investigaciones de optimización, escalamiento y evaluación económica de filtros de zeolita.

Nota. La cantidad de 1.490 habitantes corresponde a la población de diseño registrada para la PTAR La Merced y no necesariamente al número actual de usuarios conectados. Debido a que el estudio se desarrolló a escala de laboratorio, los beneficios ambientales para la población son potenciales.

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A escala mundial, el manejo inadecuado de las aguas residuales continúa representando una fuente importante de contaminación de los recursos hídricos y de alteración de los ecosistemas receptores. La descarga de efluentes domésticos sin un tratamiento suficiente incorpora materia orgánica, nutrientes, sólidos, microorganismos y otras sustancias que modifican las características naturales del agua y limitan sus posibles usos. Aunque las plantas de tratamiento reducen una parte de estas cargas contaminantes, los procesos convencionales no siempre consiguen remover eficientemente todos los compuestos presentes en los efluentes (Calixto et al., 2022).

En Ecuador persisten limitaciones en la cobertura y gestión del tratamiento de aguas residuales, en 2022, 162 gobiernos autónomos descentralizados municipales, equivalentes al 73,3 %, reportaron contar con una o más plantas de tratamiento, mientras que 53 municipios, correspondientes al 24,0 %, no realizaron tratamiento alguno. Asimismo, únicamente el 26,3 % del volumen de agua distribuida por los municipios ingresó a plantas de tratamiento de aguas residuales (Yungaicela Mera & Sánchez Vallejo, 2021). Esta situación que demuestra la necesidad de fortalecer la gestión de los procesos de saneamiento, mejorar la eficiencia de las unidades existentes y evaluar tecnologías complementarias que puedan incorporarse sin requerir infraestructuras excesivamente complejas o costosas.

En el ámbito local, la PTAR La Merced forma parte del sistema de saneamiento del cantón Santiago de Píllaro y recibe aguas residuales de origen doméstico. Una evaluación efectuada por (Amaguaña Moreta, 2023) en esta instalación permitió caracterizar sus unidades hidráulicas, medir los caudales de entrada y salida y analizar la calidad del afluente y del efluente; además identificaron deficiencias relacionadas con la limpieza y el mantenimiento de determinadas unidades. Sin embargo, dicho estudio un evaluó la incorporación de zeolita

natural como etapa complementaria de tratamiento ni comparó configuraciones de granulometría y espesor del lecho filtrante. Investigaciones latinoamericanas desarrolladas con filtros de zeolita señalan que la variación del espesor puede generar diferencias en la eficiencia obtenida, debido a que modifica la cantidad de material disponible y el recorrido del agua a través del medio filtrante (Chávez Marrufo, 2021). Sin embargo, no se dispone de suficiente información experimental sobre el comportamiento de la zeolita natural de tipo comercial como medio filtrante complementario para su efluente tratado. Específicamente, no se ha determinado si las variaciones de granulometría y espesor del lecho producen diferencias en los parámetros fisicoquímicos finales de las muestras filtradas, lo que limita la identificación de una configuración con mejor comportamiento bajo condiciones controladas de laboratorio.

En función de lo expuesto, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influyen la granulometría, el espesor del lecho filtrante y la interacción entre ambos factores en los parámetros fisicoquímicos finales del efluente tratado de la PTAR La Merced?

6. OBJETIVOS

6.1. General

Evaluar el efecto de la granulometría y del espesor del lecho filtrante de zeolita natural mediante la comparación de los parámetros fisicoquímicos finales del efluente tratado de la PTAR La Merced entre los tratamientos experimentales.

6.2. Específicos

1. Implementar un sistema de filtración de flujo ascendente a escala de laboratorio con zeolita natural, considerando las granulometrías y los espesores establecidos en el diseño experimental.

2. Determinar los parámetros fisicoquímicos finales de las muestras obtenidas después de la aplicación de los tratamientos de filtración con zeolita natural.

3. Comparar los parámetros fisicoquímicos finales entre los tratamientos experimentales mediante el análisis del efecto de la granulometría, del espesor del lecho filtrante y de la interacción entre ambos factores.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 2: *Sistematización de los objetivos específicos.*

Objetivo específico	Actividad	Metodología	Resultado
Implementar un sistema de filtración de flujo ascendente a escala de laboratorio con zeolita natural, considerando las granulometrías y los espesores establecidos en el diseño experimental.	Montaje y acondicionamiento del sistema.	Se construyeron dos filtros de acrílico, se preparó la zeolita y se colocaron los materiales de soporte y los espesores correspondientes. También se reguló el caudal de operación.	Sistema de filtración implementado y listo para los ensayos.
Determinar los parámetros fisicoquímicos finales de las muestras obtenidas después de la aplicación de los tratamientos de filtración con zeolita natural.	Ejecución de los tratamientos y análisis de las muestras.	Se aplicaron seis tratamientos con dos réplicas, obteniéndose doce muestras posteriores a la filtración para su análisis fisicoquímico.	Valores fisicoquímicos finales de las doce unidades experimentales.
Comparar los parámetros fisicoquímicos finales entre los tratamientos experimentales mediante el análisis del efecto de la granulometría, del espesor del lecho filtrante y de la interacción entre ambos factores.	Organización y análisis de los resultados.	Los datos se compararon mediante estadística descriptiva y un análisis de varianza factorial con un nivel de significancia de 0,05.	Identificación del efecto de los factores y de las configuraciones con mejor comportamiento.

Nota. Las actividades se organizaron según la secuencia del estudio: implementación del sistema, obtención de las muestras y comparación de los resultados finales.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1. Calidad del agua

La calidad del agua comprende el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan su aptitud para un uso específico o para su descarga al ambiente. Su evaluación permite identificar alteraciones ocasionadas por actividades humanas y establecer el grado de cumplimiento de los criterios ambientales aplicables. Por esta razón, la calidad no constituye una condición única, sino que depende del origen del agua, del uso previsto y de los límites establecidos en la normativa correspondiente.

El crecimiento poblacional, la expansión urbana y las actividades productivas han incrementado la generación de aguas residuales y la presión sobre los cuerpos hídricos. La descarga de efluentes sin un tratamiento adecuado puede incorporar materia orgánica, nutrientes, sólidos y microorganismos, provocando el deterioro de los ecosistemas acuáticos y riesgos para la salud pública. A escala mundial, todavía una proporción importante de las aguas residuales generadas una proporción importante de las aguas residuales se libera al ambiente sin tratamiento antes de su descarga (Saravanan et al., 2021)

La evaluación de la calidad de un efluente tratado se realiza mediante parámetros que permiten describir sus características fisicoquímicas y comparar el comportamiento de diferentes tratamientos. En esta investigación se consideran como variables de respuesta los valores finales de demanda química de oxígeno, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales, mientras que el pH y la temperatura se emplean como parámetros complementarios de control. La manipulación, conservación y determinación de estos parámetros se realizará de acuerdo con los métodos establecidos para el examen de aguas y aguas residuales (Lipps et al., 2023).

8.2. Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas se originan principalmente por el uso del agua en viviendas, establecimientos comerciales e instituciones, como resultado de actividades de aseo personal, lavado de ropa y utensilios, preparación de alimentos y descarga de servicios sanitarios. Su composición incluye materia orgánica biodegradable, nutrientes, microorganismos, detergentes, sólidos suspendidos y sustancias disueltas, cuyas concentraciones dependen de los hábitos de consumo, el volumen de agua utilizado y las características de la población generadora (Koul et al., 2022).

La calidad de estas aguas domésticas puede presentar variaciones durante el día, asociadas con los cambios en las actividades de la población y con los periodos de mayor utilización del agua (Sun et al., 2021). Por esta razón, su caracterización requiere el análisis de parámetros físicos y químicos que permitan conocer la carga contaminante y seleccionar el tratamiento más apropiado. Entre los indicadores utilizados se encuentran el pH, la temperatura, la turbidez, los sólidos disueltos, la demanda química de oxígeno y las formas de nitrógeno, especialmente el amonio (Koul et al., 2022).

Cuando las aguas residuales domésticas son descargadas sin un tratamiento adecuado, pueden provocar consumo del oxígeno disponible en los cuerpos receptores, incorporación excesiva de nutrientes y deterioro de las condiciones ecológicas del medio acuático. A escala mundial persisten diferencias importantes en la recolección y el tratamiento de las aguas residuales entre países y regiones, lo que evidencia la necesidad de optimizar las plantas existentes e incorporar tratamientos complementarios de bajo costo (Hasan et al., 2021).

En la presente investigación se empleó el efluente doméstico tratado de la PTAR La Merced, por lo que el filtro de zeolita se planteó como una etapa complementaria de depuración y no como un tratamiento principal. Su evaluación permitió determinar si las configuraciones de

granulometría–filtro y espesor presentaron diferencias en los valores finales de DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales.

8.3. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales comprende la aplicación organizada de procesos físicos, químicos y biológicos destinados a reducir la concentración de contaminantes antes de la descarga o reutilización del efluente. Estos procesos permiten remover sólidos, materia orgánica, nutrientes y otros compuestos que pueden alterar la calidad de los cuerpos receptores y generar efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos (Saravanan et al., 2021).

El tratamiento puede desarrollarse mediante diferentes etapas. El pretratamiento separa materiales gruesos, arenas y elementos flotantes; el tratamiento primario favorece la sedimentación de sólidos; mientras que el tratamiento secundario utiliza principalmente microorganismos para degradar la materia orgánica. Finalmente, los tratamientos terciarios o de pulimiento incorporan técnicas como filtración, adsorción, desinfección y remoción de nutrientes para mejorar la calidad final del efluente (Zagklis & Bampos, 2022).

La eficiencia de una planta depende de las características del agua residual, la carga contaminante, el caudal y las condiciones de operación. Por ello, después del tratamiento convencional pueden permanecer materia orgánica, amonio y partículas finas responsables de la turbidez, lo que justifica la incorporación de procesos complementarios que permitan mejorar la calidad del efluente tratado (Nazif et al., 2023).

En la presente investigación, la filtración con zeolita natural se planteó como una etapa complementaria para el efluente de la PTAR La Merced. Su aplicación permitió comparar los valores finales de DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales entre las configuraciones de granulometría–filtro y espesor evaluadas.

8.4. Filtración

La filtración es un proceso físico empleado en el tratamiento del agua para separar partículas y contaminantes mediante el paso del líquido a través de un medio poroso. Durante este proceso, los sólidos pueden quedar retenidos en la superficie o en los espacios internos del material filtrante por mecanismos como el tamizado, la sedimentación y la intercepción. Dependiendo de las propiedades del medio utilizado, también pueden presentarse fenómenos de adsorción e intercambio iónico que favorecen la remoción de sustancias disueltas (Sauter et al., 2021).

En los filtros de medio granular, el desempeño se encuentra relacionado con el tamaño de las partículas, la porosidad, el espesor del lecho y el caudal de operación. Una granulometría menor proporciona mayor superficie de contacto y puede favorecer la retención de contaminantes; sin embargo, también puede reducir la permeabilidad y aumentar la resistencia al paso del agua. Por otra parte, un lecho de mayor espesor incrementa el recorrido del efluente y las posibilidades de interacción con el material filtrante.

La filtración puede utilizarse como una etapa complementaria o de pulimiento después del tratamiento convencional de las aguas residuales. En estudios orientados a calcular eficiencia de remoción suele compararse la calidad del agua antes y después del medio filtrante (Salzmann et al., 2022). Sin embargo, la presente investigación no contó con una caracterización inicial correspondiente a la misma campaña experimental; por ello, el análisis se limitó a comparar los parámetros fisicoquímicos finales obtenidos en las doce unidades experimentales, sin calcular porcentajes de remoción.

En la presente investigación se empleó un sistema de filtración de flujo ascendente con zeolita natural, en el cual el agua residual tratada ingresó por la parte inferior y atravesó

progresivamente el lecho filtrante. Esta configuración permitió comparar los valores finales de DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales entre los tratamientos evaluados.

8.5. Zeolita

Las zeolitas son materiales aluminosilicatos cristalinos constituidos principalmente por unidades de silicio, aluminio y oxígenos organizadas en una estructura tridimensional. Son ampliamente usadas para el control de la contaminación debido a su alto rendimiento y a su bajo costo de producción (Rodríguez Valdivia et al., 2021). Las zeolitas pueden encontrarse de manera natural en depósitos de origen volcánico o producirse arterialmente mediante procesos de síntesis, obteniéndose distintos tipos de estructuras según la materia prima y las condiciones utilizadas. Para (Vásquez Álvarez, 2023) La sustitución de algunos átomos de silicio por aluminio origina una carga negativa en la estructura, la cual es compensada por cationes como sodio, potasio, calcio y magnesio. Estos cationes y las moléculas de agua se encuentran dentro de canales y cavidades microscópicas, donde pueden movilizarse o intercambiarse sin destruir la estructura principal del mineral.

8.5.1. Tipo de Zeolita

8.5.1.1. Zeolita Sintética

La zeolita sintética NaP con tipo de estructura Gismondine (GIS) posee una alta capacidad de intercambio catiónico y por su pequeño tamaño de poro es ampliamente utilizada en separación de gases, eliminación de metales pesados, amonio, elementos radiactivos, tratamiento de agua de mar, ablandamiento del agua, suavizante de agua en la industria de los detergentes (Rodríguez Valdivia et al., 2021).

8.5.1.2. Zeolita Natural

La zeolita natural es, en esencia, un aluminosilicato hidratado que lleva consigo cationes alcalinos y alcalinotérreos: potasio, calcio, sodio y alguno más dependiendo de dónde la

encuentres. Su estructura es un marco tridimensional, pero lo que realmente la hace interesante es su red de poros. Gracias a esos poros, puede tragarse agua y soltarla después sin que su estructura cristalina se desmorone. Lo curioso es que, aunque saques muestras de diferentes puntos de la misma mina, no vas a obtener exactamente la misma zeolita: la composición química varía de un área a otra (Ramos Peñafiel, 2021).

8.6. Características de la Zeolita

(Amaya Díaz, 2021) señala que las características físicas de la zeolita comprenden aspectos como la porosidad, granulometría, peso unitario, permeabilidad, esfericidad, capacidad de retención de agua y grado de comparación.

8.6.1. Porosidad

Es la proporción de espacios vacíos o poros existentes dentro de un material con respecto a su volumen total. En la zeolita la porosidad permite el ingreso del agua y favorece el contacto de los contaminantes con la superficie interna del material. Una mayor cantidad de poros conectados puede incrementar la capacidad de absorción y facilitar los procesos de intercambio iónico.

8.6.2. Granulometría

La granulometría es la distribución de los diferentes tamaños de partículas que conforman un mineral, su determinación se realiza normalmente mediante un proceso de tamizado. En un filtro de zeolita, la granulometría influye en la superficie de contacto, la velocidad de circulación del agua, la pérdida de carga y la retención de contaminantes. Las partículas pequeñas proporcionan una mayor superficie específica, pero pueden reducir la permeabilidad y aumentar el riesgo de obstrucción. En cambio, las partículas grandes facilitan el paso del agua, aunque presentan una menor superficie de contacto con los contaminantes.

8.6.3. Peso Unitario

Es la relación entre el peso de un material y el volumen total que ocupa, incluyendo tanto las partículas sólidas como los espacios vacíos existentes entre ellas. En materiales granulares como la zeolita, el peso unitario depende del tamaño y la forma de las partículas, la humedad, el grado de compactación y la distribución granulométrica. Este parámetro permite estimar la cantidad de zeolita necesaria para llenar un filtro hasta un espesor determinado.

8.6.4. Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de un material poroso para permitir el paso de un fluido a través de sus poros interconectados. En un medio filtrante, esta característica determina la facilidad con la que el agua puede atravesar el lecho. La permeabilidad en la zeolita depende principalmente de la granulometría, la porosidad, la forma de las partículas, el grado de compactación y el espesor. las partículas grandes y poco compactadas suelen generar espacios más amplios para el paso del agua, mientras que las partículas finas pueden reducir la velocidad del flujo e incrementar la resistencia hidráulica.

8.6.5. Esfericidad

Es un parámetro que expresa qué tan semejante es la forma de una partícula a una esfera. En la zeolita triturada, la esfericidad influye en la manera en que las partículas se acomodan dentro del filtro. Las partículas redondeadas pueden generar una distribución más uniforme y facilitar el paso del agua. En cambio, las partículas angulares pueden presentar una mayor superficie de contacto y un mejor entrelazamiento, pero también pueden producir una mayor resistencia al flujo.

8.6.6. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua es la cantidad de agua que un material puede conservar en sus poros y sobre su superficie después de haber sido humedecido. La zeolita posee una estructura porosa capaz de captar y mantener moléculas de agua en sus canales y cavidades internas. Esta característica favorece el contacto entre el agua residual y los sitios activos del mineral. Sin embargo, una retención excesiva puede prolongar el drenaje y modificar las condiciones hidráulicas del filtro.

8.6.7. Grado de compactación

El grado de compactación representa el nivel de acomodamiento y reducción de los espacios vacíos entre las partículas de un material granular. Se produce cuando las partículas se reorganizan por efecto de la presión, la vibración, el peso propio del material o la circulación del agua. En un filtro de zeolita, la compactación influye directamente en la porosidad y en la permeabilidad. Una compactación excesiva disminuye los espacios disponibles para el paso del agua, incrementa la pérdida de carga y puede provocar obstrucciones. En cambio, una insuficiente puede generar canales preferenciales por los cuales el agua atraviesa rápidamente el filtro sin entrar en contacto uniforme con toda la zeolita.

8.7. Propiedades de la Zeolita

Las propiedades principales de las zeolitas son las siguientes:

- Alta capacidad de intercambio iónico (CIC)
- Alto grado de hidratación
- Baja densidad y un gran volumen cuando se deshidrata
- Sirve como tamiz molecular

- Capacidad de retener, absorber gases, humedad; petroquímicos, iones radioactivos, iones de amonio y iones de metales pesados (Ramos Peñafiel, 2021).

8.7.1. Propiedades químicas

En (Ramos Peñafiel, 2021) detalla que generalmente las propiedades químicas de la zeolita incluyen el intercambio iónico, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas propiedades están en función de su estructura cristalina de cada especie y de su composición catiónica.

8.7.2. Propiedades físicas

(Ramos Peñafiel, 2021) expone en su investigación que las propiedades físicas de uno zeolita deben considerarse de dos maneras:

- Desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo su morfología, tipos de cristal, gravedad especifica, densidad, color, tamaño de cristal, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión.
- Desde un punto de vista físico como un producto para cualquier aplicación especifica, tomando en cuenta sus características brillantes, color, área superficial, el tamaño de partícula, su dureza, resistencia al desgaste entre otros.

8.8. Uso de la zeolita

Las zeolitas se emplean en actividades ambientales, agrícolas, pecuarias, constructivas e industriales debido a su estructura porosa, capacidad de adsorción, intercambio catiónico y selectividad molecular. El uso específico del material depende de su composición mineralógica, pureza, granulometría, tamaño de los poros y acondicionamiento previo. Entre sus principales aplicaciones se encuentran el tratamiento de agua, la retención de contaminantes, el mejoramiento de sustratos agrícolas, entro otros (Vásquez Álvarez, 2023).

8.8.1. Uso en el tratamiento de agua

La zeolita se utiliza como medio filtrante y absorbente en sistemas destinados al tratamiento de agua potable, aguas residuales domésticas y efluentes industriales. Su estructura porosa permite que el agua ingrese en los espacios existentes entre las partículas y entre en contacto con los canales y cavidades internas del mineral (Santos & Ocaña, 2021).

8.8.2. Uso para la remoción de amonio

Una de las principales aplicaciones ambientales de la zeolita es la retención del ion amonio presente en aguas contaminadas. Este proceso ocurre principalmente mediante intercambio catiónico, cuando el amonio sustituye a cationes como sodio, potasio, calcio o magnesio ubicados en la estructura del mineral. La capacidad de retención depende del tipo de zeolita, la concentración inicial de amonio, el pH, la granulometría, el tiempo de contacto y la presencia de otros iones que puedan competir por los sitios de intercambio (Vargas & Sánchez, 2022).

8.8.3. Uso para la remoción de metales

Las zeolitas naturales y modificadas pueden utilizarse para disminuir la concentración de metales y metaloides presentes en el gua. Su retención se produce mediante la absorción, intercambió iónico y formación de interacciones entre contaminantes y los sitios activos del material. Se ha evaluado su aplicación para retener elementos como plomo, cadmio, cobre, zinc, níquel, arsénico y boro. La eficiencia depende del pH, la concentración inicial, la granulometría, la dosis de zeolita y la presencia de otros iones (Rubio-Arias et al., 2021).

8.8.4. Uso en el tratamiento de aguas residuales

En el tratamiento de aguas residuales, la zeolita se utiliza principalmente como una etapa complementaria o de pulimiento posterior a los procesos convencionales. Su incorporación puede contribuir a reducir concentraciones residuales de amonio, metales, sólidos, turbidez y otras sustancias disueltas. La zeolita no sustituye necesariamente a las unidades físicas,

químicas o biológicas de una planta de tratamiento. Su función consiste en mejorar la calidad final del efluente mediante mecanismos de filtración, adsorción e intercambio catiónico. Puede instalarse en columnas empacadas, filtros ascendentes, filtros descendentes, humedales construidos o sistemas combinados con otros materiales. Sin embargo, la conveniencia de su aplicación debe evaluarse de acuerdo con las características del agua residual y la eficiencia esperada del tratamiento (Garza & Rocha Rios, 2021)

8.9. Filtro de zeolita natural

Los filtros de zeolita natural emplean un material mineral poroso como medio para mejorar la calidad del agua mediante mecanismos de retención, adsorción e intercambio iónico. Las zeolitas naturales se destacan por su estructura cristalina formada por canales y cavidades microscópicas, dentro de los cuales se encuentran cationes intercambiables como sodio, potasio, calcio y magnesio. Esta estructura le permite retener determinados contaminantes presentes en soluciones acuosas (De Magalhães et al., 2022).

La zeolita natural de tipo comercial suele presentar especial afinidad por el ion amonio (NH_4^+), que puede sustituir a los cationes presentes en la estructura del mineral mediante intercambio iónico. Además, su superficie porosa favorece la adsorción de sustancias y la retención de partículas responsables de la turbidez. No obstante, su eficiencia depende de las características del agua, la concentración inicial de los contaminantes, el pH y la presencia de otros iones que pueden competir por los sitios disponibles del material (Muscarella et al., 2024).

En un sistema de filtración, el desempeño de la zeolita también está relacionado con la granulometría, el espesor del lecho y el caudal de operación. Las partículas de menor tamaño pueden proporcionar una mayor superficie de contacto, aunque también generan mayor resistencia al paso del agua; mientras que un lecho de mayor espesor incrementa la cantidad de

material disponible y el recorrido del efluente (Khamidun et al., 2022). En la presente investigación se analizarán estas condiciones mediante dos granulometrías y tres espesores de zeolita, con el propósito de determinar su influencia sobre los valores finales de DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales.

8.10. Aplicación de la zeolita natural en el tratamiento de aguas residuales

La zeolita natural se utiliza en el tratamiento de aguas residuales como material adsorbente y de intercambio iónico, principalmente en procesos complementarios o de pulimiento. La zeolita natural posee una estructura porosa con cavidades y canales internos que contienen cationes intercambiables, característica que favorece la retención de determinados contaminantes disueltos presentes en el agua (De Magalhães et al., 2022).

Una de sus principales aplicaciones corresponde a la remoción de amonio, debido a la afinidad de la clinoptilolita por el ion NH_4^+. La eficiencia de este proceso puede variar según la concentración inicial, el pH, el tiempo de contacto, la granulometría, la cantidad de material y la presencia de otros iones que compiten por los sitios de intercambio. Además, la zeolita puede someterse a procesos de desorción y recuperación mediante tratamientos químicos, lo que demuestra la posibilidad de reutilizar el material en determinadas condiciones operativas (Muscarella et al., 2024).

En aguas residuales domésticas tratadas, la zeolita puede incorporarse después del tratamiento convencional para mejorar la calidad final del efluente. En la presente investigación se aplicó como medio filtrante de flujo ascendente, mediante dos granulometrías y tres espesores de lecho. Su comportamiento se determinó mediante la comparación de los valores finales de amonio, DQO, turbidez y sólidos disueltos totales obtenidos en los tratamientos experimentales.

8.11. Evaluación y comparación de los tratamientos

La evaluación de los tratamientos se realizó a partir de los valores finales de demanda química de oxígeno, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales obtenidos después de la filtración. Cada parámetro se analizó de manera independiente para comparar las seis combinaciones de granulometría y espesor del lecho filtrante.

Los resultados se evaluaron mediante un análisis de varianza factorial, con el propósito de analizar el comportamiento de la granulometría, el espesor del lecho y la interacción entre ambos factores. El pH y la temperatura se registraron como parámetros complementarios para describir las condiciones de las muestras durante la medición.

8.12. Parámetros a Medir

8.12.1. Demanda Química de Oxígeno

Es un parámetro que representa la cantidad equivalente de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica y otras sustancias reductoras presentes en una muestra de agua. La DQO se utiliza como un indicador de la carga contaminante de las aguas residuales. Un valor elevado significa que existe una mayor concentración de sustancias susceptibles de oxidación, mientras que la disminución del parámetro después del tratamiento evidencia la remoción de parte de la carga orgánica y química (Guayasamin Díaz & Padilla Moreno, 2023).

8.12.2. Amonio

El amonio es un ion inorgánico de fórmula química NH_4^+ , formado cuando el amoníaco se encuentra disuelto en el agua y se combina con un ion hidrógeno. En las aguas residuales domésticas, el amonio se relaciona principalmente con la degradación de la urea, las proteínas y otros compuestos nitrogenados procedentes de las actividades humanas. La concentración de amonio constituye un indicador de contaminación nitrogenada y permite evaluar procesos

biológicos como la nitrificación, mediante la cual el nitrógeno amoniacal se transforma primero en nitrito y posteriormente en nitrato. Por esta razón, su reducción durante el tratamiento representa una disminución de la carga de nitrógeno del agua residual (López-Ocaña & Magaña-Flores, 2023).

8.12.3. Turbidez

Es una propiedad física y óptica del agua relacionada con la presencia de partículas suspendidas y coloidales que dificultan el paso de la luz. Estas partículas pueden estar constituidas por arcilla, limo, materia orgánica, microorganismos, residuos domésticos, partículas minerales y otros materiales finamente divididos. La presencia de materiales en suspensión provoca que el agua pierda transparencia y adquiera una apariencia turbia. Por ello, la turbidez permite estimar indirectamente la cantidad y comportamiento del material particulado presente en el agua. Este parámetro es especialmente importante para evaluar procesos de sedimentación, coagulación, filtración y clarificación (Araque Arellano, 2022a).

8.12.4. Sólidos Disueltos Totales

Los Sólidos Disueltos Totales, conocidos como SDT en español y TDS por sus siglas en inglés representan la concentración total de sustancias que se encuentran disueltas en el agua. Incluyen principalmente sales minerales, cationes, aniones y pequeñas cantidades de materia orgánica disuelta. Entre sus componentes pueden encontrarse calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y nitratos. Estas sustancias permanecen en el agua después de separar las partículas suspendidas mediante filtración (Guayasamin Díaz & Padilla Moreno, 2023).

8.12.5. Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro físico que expresa su condición térmica en un momento determinado. Es una variable fundamental para la evaluación de la calidad del agua porque influye en los procesos físicos, químicos y biológicos que se desarrollan en los cuerpos hídricos y en los sistemas de tratamiento. En el tratamiento de aguas residuales debe medirse directamente en el lugar de muestreo, ya que puede modificarse durante el almacenamiento y transporte de la muestra (Araque Arellano, 2022a).

8.12.6. Potencial de Hidrógeno

El potencial de hidrógeno (pH) es un parámetro químico utilizado para expresar la condición ácida, neutra o básica de una solución acuosa. La escala convencional del pH comprende valores de 0 a 14. Un valor de pH igual a 7 representa una condición neutra; los valores inferiores a 7 indican condiciones ácidas y los valores superiores a 7 indican condiciones básicas o alcalinas. En las aguas residuales, el pH influye en la actividad de los microorganismos, la solubilidad de los compuestos, los procesos de coagulación, precipitación, adsorción, nitrificación y desinfección. También permite identificar si un tratamiento modifica significativamente la condición química del agua (López-Ocaña & Magaña-Flores, 2023).

8.13. Equipos e Instrumentos para el Análisis

8.13.1. Espectrofotómetro

Es un instrumento de análisis óptico utilizado para determinar cuantitativamente la concentración de una sustancia mediante la medición de la radiación electromagnética que una muestra absorbe o transmite a una longitud de onda específica. De acuerdo con (Avila-Camacho et al., 2021), este instrumento permite realizar el análisis cuantitativo de sustancias químicas, orgánicas, inorgánicas o biológicas mediante la medición de la cantidad de luz absorbida por los compuestos presentes en una solución.

8.13.2. Reactor o bloque digestor de DQO

El reactor o bloque digestor de DQO es un equipo de calentamiento controlado diseñado para realizar la digestión química de muestras de agua o aguas residuales antes de su análisis colorimétrico. Está formado por un bloque metálico termorregulado que contiene cavidades en las que se colocan tubos o viales cerrados con la muestra y los reactivos de digestión. Su función consiste en mantener una temperatura uniforme durante un periodo determinado, favoreciendo la oxidación de la materia orgánica y de otras sustancias oxidables presentes en la muestra (Manrique Guerra, 2022).

8.13.3. Turbidímetro

El turbidímetro, también denominado nefelómetro cuando utiliza el principio nefelométrico, es un instrumento óptico empleado para determinar la turbidez de una muestra de agua. En los equipos nefelométricos, el detector se encuentra generalmente colocado en un ángulo de 90° con relación al haz de luz incidente. La cantidad de luz dispersada depende de la concentración, tamaño, forma y características ópticas de las partículas presentes en el agua; por ello, un incremento de la luz dispersada suele relacionarse con una mayor turbidez (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua et al., 2021).

8.13.4. Multiparámetro

El equipo multiparámetro o medidor multiparamétrico es un instrumento electrónico que integra diferentes sensores o electrodos para determinar varios parámetros fisicoquímicos de una muestra de agua mediante un solo sistema de medición. Los equipos multiparámetro pueden utilizarse directamente en campo para realizar mediciones in situ o en condiciones controladas de laboratorio. Su principal ventaja es que facilita la obtención de diferentes parámetros sin utilizar un instrumento independiente para cada variable; sin embargo, cada sonda requiere limpieza, conservación y calibración con soluciones patrón antes de realizar las mediciones (Bermeo Tapia & Endara Molina, 2024).

8.14. MARCO LEGAL

Las disposiciones se presentan conforme a su jerarquía normativa y contienen únicamente los artículos relacionados directamente con la protección del agua, el tratamiento de aguas residuales, las competencias municipales, el monitoreo de descargas y el control de la contaminación hídrica.

8.14.1. Constitución de la República del Ecuador

8.14.1.1. Derecho humano al agua

Art. 12.- El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 12).

8.14.1.2. Derecho a un ambiente sano

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 14).

8.14.1.3. Tecnologías ambientalmente limpias

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 15).

8.14.1.4. Derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación

Art. 66.- Se reconoce y garantizará a las personas: **27.** El derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 66, núm. 27).

8.14.1.5. Competencias de los gobiernos municipales

Art. 264.- Los gobiernos municipales tendrán las siguientes competencias exclusivas sin perjuicio de otras que determine la ley: **4.** Prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, actividades de saneamiento ambiental y aquellos que establezca la ley (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 264, núm. 4).

8.14.1.6. Objetivos del régimen de desarrollo

Art. 276.- El régimen de desarrollo tendrá los siguientes objetivos: **4.** Recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 276, núm. 4).

8.14.1.7. Gestión pública y comunitaria del agua

Art. 318.- El agua es patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio inalienable e imprescriptible del Estado, y constituye un elemento vital para la naturaleza y para la existencia de los seres humanos. Se prohíbe toda forma de privatización del agua. La gestión del agua será exclusivamente pública o comunitaria. El servicio público de saneamiento, el abastecimiento

de agua potable y el riego serán prestados únicamente por personas jurídicas estatales o comunitarias (Constitución de la República del Ecuador, 2008, art. 318).

8.14.1.8. Principios ambientales

Art. 395.- La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales: **1.** El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras. **2.** Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional. **3.** El Estado garantizará la participación activa y permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad

8.14.1.9. Principios ambientales

Art. 395.- La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales: **1.** El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras. **2.** Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional. **3.** El Estado garantizará la participación activa y permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales. **4.** En

caso de duda sobre el alcance de las disposiciones legales en materia ambiental, estas se aplicarán en el sentido más favorable a la protección de la naturaleza.

8.14.2. Tratados y convenios internacionales

Protocolo Adicional a la Convención Americana sobre Derechos Humanos en materia de Derechos Económicos, Sociales y Culturales —Protocolo de San Salvador—

El artículo 11 del Protocolo de San Salvador reconoce el derecho de toda persona a vivir en un ambiente sano y a contar con servicios públicos básicos. También determina que los Estados deben promover la protección, preservación y mejoramiento del ambiente. Ecuador ratificó este instrumento internacional, por lo que sus disposiciones forman parte del marco jurídico aplicable a la protección ambiental y al saneamiento.

8.14.2.1. Leyes orgánicas y códigos

8.14.2.1.1. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

Esta ley regula la conservación, protección y aprovechamiento sustentable del agua en el territorio ecuatoriano.

El artículo 79 establece objetivos para la prevención y conservación de la calidad del agua, entre ellos preservar su calidad, controlar la acumulación de sustancias tóxicas y prevenir, controlar y sancionar la contaminación de los recursos hídricos.

El artículo 80 define como vertidos a las descargas de aguas residuales realizadas directa o indirectamente en el dominio hídrico público. Asimismo, prohíbe descargar aguas residuales sin tratamiento y determina que los gobiernos municipales son responsables del tratamiento de las aguas servidas y residuales generadas dentro de su jurisdicción.

El artículo 81 establece que las descargas de aguas residuales requieren la correspondiente autorización administrativa y deben cumplir las condiciones técnicas y ambientales establecidas por la autoridad competente.

Estas disposiciones son aplicables a la PTAR La Merced, debido a que su efluente debe recibir tratamiento suficiente antes de ser descargado y debe cumplir con los parámetros autorizados por la autoridad ambiental.

8.14.2.2. Código Orgánico del Ambiente

El Código Orgánico del Ambiente constituye la principal norma legal que regula la gestión ambiental en Ecuador. Su aplicación comprende la prevención, control, seguimiento y reparación de los impactos ambientales generados por obras, actividades y proyectos.

El artículo 196 determina que los gobiernos autónomos descentralizados municipales deben contar con infraestructura técnica para la instalación de sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales, de conformidad con las normas técnicas y ambientales aplicables. Además, promueve el reúso de las aguas residuales tratadas cuando sea técnicamente viable.

Por tanto, el funcionamiento de la PTAR La Merced debe garantizar que el efluente final no produzca alteraciones negativas en el cuerpo receptor y que cumpla los límites de descarga establecidos por la normativa ambiental.

8.14.2.3. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización

El COOTAD atribuye a los gobiernos municipales la competencia de prestar los servicios de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales y saneamiento ambiental.

También establece que los municipios deben ejecutar progresivamente sistemas de tratamiento que permitan eliminar o reducir las descargas contaminantes provenientes de los sistemas de alcantarillado antes de su incorporación a ríos, quebradas, lagos u otros cuerpos de agua.

En este contexto, el GAD Municipal de Santiago de Píllaro tiene la responsabilidad de administrar, mantener y controlar la operación de la PTAR La Merced.

8.14.2.4. Reglamentos

8.14.2.4.1. Reglamento al Código Orgánico del Ambiente

El Reglamento al Código Orgánico del Ambiente desarrolla los mecanismos de control, monitoreo, seguimiento e inspección ambiental.

El artículo 486 establece que los muestreos de calidad ambiental y de efluentes deben ejecutarse de acuerdo con el plan de monitoreo, las normas técnicas vigentes y los sitios adecuados para la toma de muestras y medición de caudales.

El artículo 487 faculta a la autoridad ambiental competente para realizar inspecciones, tomar muestras y verificar el cumplimiento de las obligaciones ambientales. El artículo 488 regula la presentación de informes de cumplimiento y monitoreo por parte del operador.

El Reglamento también dispone que, mientras no se expidan nuevas normas técnicas secundarias, continuarán aplicándose las disposiciones ambientales existentes que no sean contrarias al Código Orgánico del Ambiente y su reglamento. Esto permite mantener la aplicación del Acuerdo Ministerial 097-A para evaluar las descargas de aguas residuales.

8.14.3. Normativa técnica ambiental

8.14.3.1. Acuerdo Ministerial 097-A

El Acuerdo Ministerial 097-A contiene los anexos técnicos del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Su Anexo 1 corresponde a la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua.

Esta normativa establece:

- Los criterios de calidad de las aguas superficiales y subterráneas.
- Los límites máximos permisibles para descargas líquidas.
- Las prohibiciones relacionadas con la contaminación del agua.
- Los métodos de control, seguimiento y evaluación de los efluentes.
- Las responsabilidades de los operadores que generan descargas.

Para una descarga realizada directamente hacia un río, quebrada, canal natural u otro cuerpo de agua dulce, corresponde aplicar la.

Tabla 3:

Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetro	Unidad normativa	Límite máximo permisible para descarga a agua dulce	Aplicación en la investigación
Potencial de hidrógeno, pH	Unidades de pH	6–9	Parámetro complementario medido en las doce muestras; se verificará su ubicación respecto del intervalo normativo.
Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO_5	mg/L	100	No fue analizada en esta investigación; se incluye únicamente como referencia normativa.
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg/L	200	Se compararán los valores finales obtenidos en los tratamientos y se presentará el límite únicamente como referencia normativa.
Sólidos Suspendidos Totales, SST	mg/L	130	No fueron analizados en esta investigación; se incluyen únicamente como referencia normativa.
Nitrógeno amoniacal, expresado como N	mg/L	30	Se compararán los valores finales de amonio entre los tratamientos experimentales.
Turbidez	NTU	No establece un límite específico en la Tabla 9	Variable de respuesta para comparar tratamientos; la Tabla 9 no establece un límite específico.

Parámetro	Unidad normativa	Límite máximo permisible para descarga a agua dulce	Aplicación en la investigación
Fósforo total	mg/L	10	No fue analizado en esta investigación; se incluye únicamente como referencia normativa.
Aceites y grasas	mg/L	30	No fue analizado en esta investigación; se incluye únicamente como referencia normativa.
Coliformes fecales	NMP/100 mL	2.000	No fue analizado en esta investigación; se incluye únicamente como referencia normativa.
Sólidos totales	mg/L	1.600	No fue analizado en esta investigación; se incluye únicamente como referencia normativa.
Sustancias tensoactivas	mg/L	0,5	No fue analizado en esta investigación; se incluye únicamente como referencia normativa.
Materia flotante	—	Ausencia	No fue analizado en esta investigación; se incluye únicamente como referencia normativa.

Nota. La tabla presenta límites de descarga a un cuerpo de agua dulce establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A. Los parámetros no medidos se incluyen únicamente como referencia normativa y no forman parte de la comparación experimental.

9. VALIDACIÓN DE LA PREGUNTA CIENTÍFICA O HIPÓTESIS

9.1. Pregunta científica

¿La granulometría, el espesor del lecho filtrante y la interacción entre ambos factores producen diferencias en los parámetros fisicoquímicos finales del efluente tratado de la PTAR La Merced?

9.2. Hipótesis estadísticas

Hipótesis nula (H_0): La granulometría, el espesor del lecho filtrante y la interacción entre ambos factores no producen diferencias estadísticamente significativas en los parámetros fisicoquímicos finales del efluente tratado de la PTAR La Merced. Hipótesis alternativa (H_1): Al menos uno de los factores evaluados —granulometría, espesor del lecho filtrante o su interacción— produce diferencias estadísticamente significativas en los parámetros fisicoquímicos finales del efluente tratado de la PTAR La Merced.

9.3. Validación de la hipótesis

La validación se realizó mediante un análisis de varianza factorial de dos factores con replicación, correspondiente al diseño 2 × 3, con un nivel de significancia de 0,05. Cada parámetro fisicoquímico se analizó de manera independiente. La hipótesis nula correspondiente a cada efecto se rechazó cuando el valor de significancia fue menor que 0,05; en caso contrario, se determinó que no existía evidencia estadística suficiente para rechazarla.

10. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

10.1. Enfoque y diseño de la investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, debido a que el comportamiento del sistema de filtración se evaluó mediante mediciones fisicoquímicas y el registro numérico de las condiciones experimentales. Las variables principales correspondieron a los valores finales de DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales, mientras que el pH y la temperatura se consideraron parámetros complementarios.

El estudio fue de tipo experimental y se desarrolló a escala de laboratorio. Se modificaron de manera controlada dos características del lecho filtrante: la granulometría de la zeolita natural y su espesor. Los demás elementos del sistema, como la configuración de flujo ascendente, las dimensiones de los filtros, las capas de soporte y el caudal objetivo, se mantuvieron bajo condiciones semejantes.

La investigación comprendió la recolección del efluente tratado, la preparación de la zeolita, el montaje de dos filtros de flujo ascendente, la ejecución de los seis tratamientos con dos réplicas y la medición de los parámetros fisicoquímicos de las doce muestras obtenidas después de la filtración.

Se aplicó un diseño factorial 2 × 3, conformado por dos granulometrías de zeolita (0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm) y tres espesores del lecho filtrante (8, 12 y 16 cm). La combinación de estos factores originó seis tratamientos, cada uno con dos réplicas, para un total de doce unidades experimentales. El diseño permitió comparar el espesor y las configuraciones granulometría–filtro, además de su interacción, sobre las variables de respuesta. Debido a que cada granulometría se mantuvo en un filtro físico diferente, las diferencias asociadas con este factor

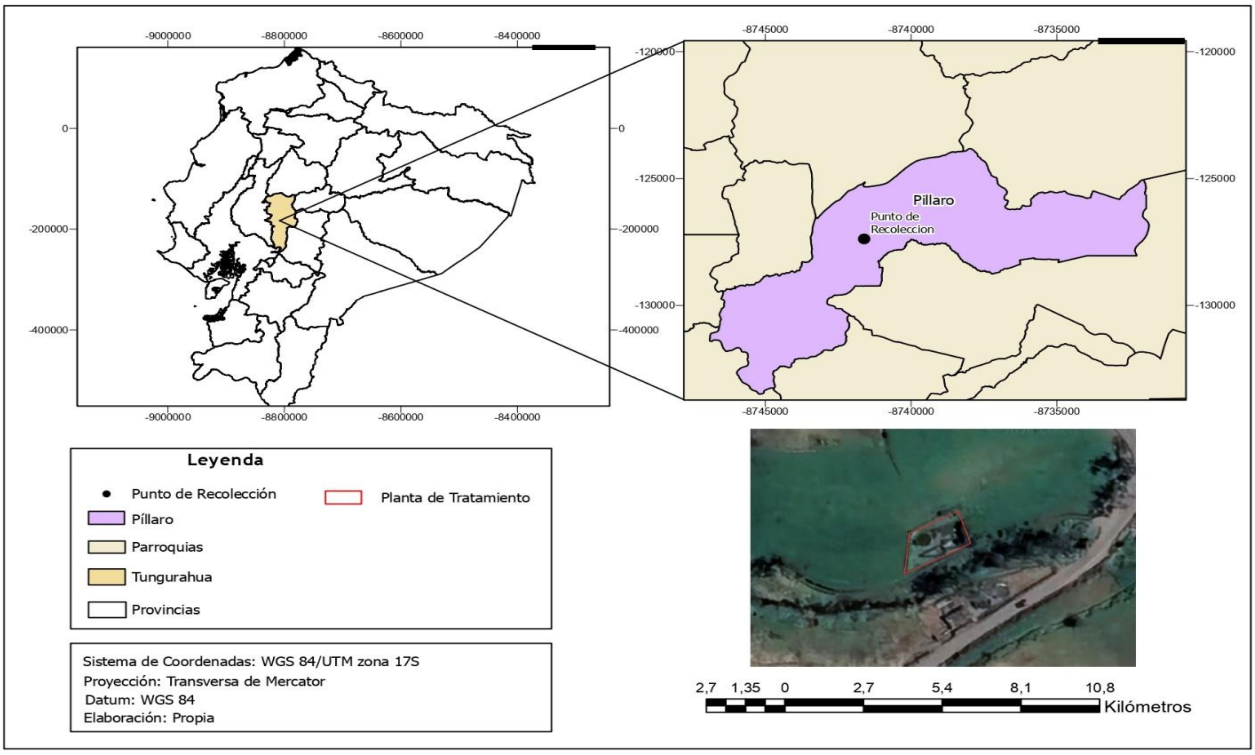
se interpretaron de manera exploratoria y no se atribuyeron exclusivamente al tamaño de partícula (Montgomery, 2020).

10.2. Área de estudio

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) La Merced está ubicada en el cantón Santiago de Píllaro, provincia de Tungurahua, y forma parte del sistema municipal de saneamiento. La planta recibe aguas residuales de origen doméstico procedentes de los sectores conectados al alcantarillado y fue reportada con una población de diseño de 1.490 habitantes en la documentación institucional disponible (GAD Municipal de Santiago de Píllaro, s. f.). El efluente utilizado en el estudio se recolectó en la salida final de la planta, antes de su descarga al cuerpo receptor. Véase la Figura 1.

Figura 1:

Mapa de Ubicación de la zona de estudio.



Fuente: Google Earth, GeoPortales

La PTAR fue considerada únicamente como fuente del efluente tratado empleado en los ensayos. El sistema experimental no constituyó un escalamiento de las unidades de la planta,

debido a que no se dispuso de planos ni de información hidráulica suficiente para reproducir su funcionamiento.

El efluente utilizado en la fase experimental se recolectó en la salida final de la PTAR La Merced, después de las unidades de tratamiento y antes de la descarga al cuerpo receptor. El agua recolectada se destinó exclusivamente a la alimentación de los dos filtros.

La preparación de los materiales, el montaje de los filtros, los ensayos experimentales y las mediciones de pH, temperatura y sólidos disueltos totales se realizaron en los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Salache. Las doce muestras filtradas fueron remitidas a Ambienlab Servicios Ambientales y Laborales Cía. Ltda. para la determinación de DQO, amonio y turbidez.

10.3. Diseño experimental y variables de estudio

Para evaluar el funcionamiento del sistema se aplicó un diseño factorial 2 × 3, formado por dos niveles de granulometría y tres niveles de espesor del lecho de zeolita. El diseño permitió comparar los valores finales de DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales entre las seis configuraciones y analizar la interacción entre los factores. La interpretación de la granulometría se limitó por su asociación con la identidad física de los filtros (Montgomery, 2020).

10.3.1. Factores y niveles experimentales

Los factores considerados correspondieron a las características físicas del lecho de zeolita natural utilizado en los dos sistemas de filtración.

Tabla 4:

Factores y niveles del diseño experimental.

Factor	Descripción	Niveles
A	Granulometría de la zeolita	0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm
B	Espesor del lecho filtrante	8 cm, 12 cm y 16 cm

Nota. En la Tabla 4 se detallan los factores y niveles empleados en el diseño experimental.

La granulometría permitió comparar el comportamiento de partículas finas y gruesas. Las partículas de menor tamaño presentaron una mayor superficie externa disponible para el contacto con el agua, mientras que las partículas gruesas facilitaron el paso del flujo a través del lecho. El aumento del espesor incrementó el volumen de zeolita disponible durante la filtración.

10.3.2. Tratamientos y unidades experimentales

La combinación de los niveles de ambos factores dio lugar a seis tratamientos experimentales. Cada tratamiento se ejecutó con dos réplicas, obteniéndose un total de doce unidades experimentales.

Tabla 5:

Distribución de los tratamientos experimentales.

Tratamiento	Granulometría	Espesor del lecho	Réplicas	Unidades experimentales
T1	0,5–1,0 mm	8 cm	2	2
T2	0,5–1,0 mm	12 cm	2	2
T3	0,5–1,0 mm	16 cm	2	2
T4	2,0–4,0 mm	8 cm	2	2
T5	2,0–4,0 mm	12 cm	2	2
T6	2,0–4,0 mm	16 cm	2	2
Total			**12**	

Nota. Diseño factorial 2 × 3 con dos réplicas por tratamiento, para un total de 12 unidades experimentales.

Cada unidad experimental estuvo constituida por un ensayo de filtración de 1000 mL de agua residual doméstica tratada, utilizando una combinación específica de granulometría y espesor. Los tratamientos de granulometría fina se realizaron en uno de los filtros y los de granulometría gruesa en el segundo filtro. Esta asignación permanente impidió separar completamente el efecto de la granulometría de un posible efecto asociado con diferencias físicas mínimas entre los dos filtros.

10.3.3. Variables de estudio

Tabla 6:

Operacionalización de las variables.

Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad o nivel
Independiente	Granulometría de la zeolita	Tamaño de partícula	0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm
Independiente	Espesor del lecho	Altura de la capa de zeolita	8, 12 y 16 cm
Dependiente	DQO final	Concentración posterior a la filtración	mg/L
Dependiente	Amonio final	Concentración posterior a la filtración	mg/L
Dependiente	Turbidez final	Valor posterior a la filtración	NTU
Dependiente	Sólidos disueltos totales finales	Valor posterior a la filtración	mg/L
Complementaria	pH	Valor medido después de la filtración	Unidades de pH
Complementaria	Temperatura	Temperatura durante la medición	°C

Nota. La Tabla 6 detalla el tipo de variable.

Durante los ensayos se mantuvieron constantes el volumen recolectado por unidad experimental, las dimensiones de los filtros, la configuración de flujo ascendente y las capas de soporte. El caudal objetivo fue de 500 mL/min; los valores registrados oscilaron entre 489 y 508 mL/min, con un promedio de 497,25 mL/min.

10.4. *Materiales y equipos*

Para la construcción y operación del sistema de filtración se utilizaron materiales de fácil adquisición, resistentes al contacto con agua residual y adecuados para mantener condiciones experimentales semejantes. Los materiales se agruparon en componentes hidráulicos, medios granulares y elementos destinados al muestreo y análisis.

Tabla 7: *Materiales del sistema experimental.*

Material	Cantidad	Especificación dimensión	Función
Filtro de acrílico	2	Sección interna de 15 × 15 cm y altura de 60 cm; acrílico de seis líneas	Contener las capas de soporte y el lecho de zeolita en cada granulometría
Recipientes plásticos	2	Capacidad de 20 L	Alimentación del sistema y recolección o almacenamiento temporal del agua
Soporte elevado	2	Altura aproximada de 1,20 m	Mantener el recipiente de alimentación elevado y generar flujo por gravedad
Manguera	2	Diámetro de ½ pulgada	Conducir el agua desde el recipiente de alimentación hasta el filtro
Válvulas de paso	4	Compatibles con conexiones de ½ pulgada	Regular el caudal de entrada y controlar la salida del filtro
Adaptadores y conectores	Según requerimiento	Diámetro de ½ pulgada	Unir el filtro, las válvulas y la manguera
Material de sellado	Según requerimiento	Silicona, cinta de teflón o equivalente	Evitar fugas en las conexiones
Malla de separación	4	Abertura inferior al tamaño de la grava y la zeolita	Separar las capas y evitar el desplazamiento de partículas

Material	Cantidad	Especificación dimensión	Función
Grava gruesa	Según volumen calculado	Capa de 7 cm	Distribuir el flujo y proteger el ingreso del agua
Grava media	Según volumen calculado	Capa de 7 cm	Sostener el lecho de zeolita y mejorar la distribución del flujo
zeolita natural de tipo comercial	Según tratamiento	Presentación comercial de 45 kg; tamizada en 0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm	Medio filtrante y adsorbente principal

Nota. Las dimensiones del filtro se establecieron previamente; a partir de su geometría se determinaron los volúmenes y cantidades de los materiales del lecho.

La cantidad de zeolita se estableció de manera volumétrica, de acuerdo con los espesores de 8, 12 y 16 cm. El material fue adquirido en una presentación comercial de 45 kg, identificada en la factura como “zeolita gruesa malla 6 – Filterocel”. La factura se utilizó como respaldo de adquisición y se incorporó en los anexos; no incluyó un análisis mineralógico ni una ficha de composición.

Tabla 8: *Materiales y equipos para la preparación, muestreo y análisis.*

Material o equipo	Cantidad	Uso
Tamices	Según disponibilidad	Clasificar la zeolita en las dos granulometría experimentales
Balanza	1	Registrar, cuando fue necesario, la masa d materiales
Recipiente graduado o probeta	1	Medir el volumen de agua y verificar el caudal
Cronómetro	1	Registrar el tiempo durante la calibración del cauda
Recipientes para muestreo	Según requerimiento del laboratorio	Recolectar y transportar las muestras filtradas
Recipientes plásticos de tapa rosca tipo recolector clínico	12	Conservar las muestras filtradas para medir pH temperatura y TDS en la universidad
Nevera portátil	1	Transportar y conservar las muestras
Material refrigerante	Según requerimiento	Mantener las muestras a baja temperatura durante e traslado
Etiquetas y marcador permanente	Según requerimiento	Identificar el punto, tratamiento, réplica, fecha y hor de muestreo
Multiparámetro Apera Instruments PC850	1	Medir pH, temperatura y sólidos disueltos totales
Agua destilada	Según requerimiento	Enjuagar los recipientes y la sonda entre medicione
Guantes, mascarilla, gafas y mandil	Según requerimiento	Proteger al investigador durante la manipulación de agua residual y los materiales

Nota. En la Tabla 8 se detallan los materiales y equipos utilizados para la preparación, el muestreo y las mediciones.

Los recipientes destinados a las doce muestras de DQO, amonio y turbidez fueron seleccionados de acuerdo con las indicaciones del laboratorio Ambienlab. Las muestras para pH, temperatura y sólidos disueltos totales se conservaron en recipientes plásticos identificados con el código de tratamiento y réplica. Antes de los ensayos, la grava, las mallas y la estructura interna de los dos filtros se lavaron con agua destilada, con el propósito de evitar la contaminación cruzada; además, se verificó la hermeticidad de los filtros y de sus conexiones.

10.5. Diseño y dimensionamiento del sistema de filtración

El sistema experimental estuvo constituido por dos filtros de flujo ascendente, dos recipientes elevados para la alimentación, recipientes de recolección, mangueras, válvulas de regulación y medios granulares. Las dimensiones internas de los filtros se definieron como punto de partida del diseño experimental. A partir de su área transversal y capacidad geométrica se determinaron posteriormente los espesores, volúmenes y cantidades de los materiales colocados en su interior. Uno de los filtros se destinó a la granulometría de 0,5–1,0 mm y el segundo a la granulometría de 2,0–4,0 mm.

10.5.1. Dimensiones y capacidad del filtro

Los dos filtros se construyeron con acrílico de seis líneas y presentaron dimensiones internas de 15 cm de ancho, 15 cm de largo y 60 cm de altura. El sistema se concibió como una unidad experimental independiente a escala de laboratorio y no como una reproducción o escalamiento de la PTAR La Merced, debido a que no se dispuso de planos ni de datos hidráulicos suficientes de la planta. La geometría seleccionada permitió disponer de un equipo manejable, transparente, estable y operable por gravedad. La sección cuadrada de 15 × 15 cm proporcionó un área transversal constante para los doce ensayos, facilitó la fabricación en acrílico, la medición de los espesores y la observación del flujo. Mantener la misma sección en todos los tratamientos

evitó que las diferencias experimentales estuvieran asociadas con cambios en el ancho del recipiente.

Como verificación de compatibilidad geométrica, el ancho interno de 150 mm se comparó con el tamaño máximo de partícula utilizado, correspondiente a 4 mm. La relación obtenida fue de 37,5, es decir, el ancho del filtro fue 37,5 veces mayor que la partícula más grande. La norma ASTM D6646-03(2022), aunque está dirigida a columnas de carbón activado y no regula directamente filtros de zeolita, establece como referencia una relación entre el diámetro interno de la columna y el diámetro medio de partícula superior a 10 para reducir los efectos de pared. Por tanto, el valor de 37,5 permitió verificar que la sección seleccionada era suficientemente amplia respecto al material granular (ASTM International, 2022). Los efectos de pared pueden modificar la porosidad y la distribución del flujo en lechos empacados, por lo que esta comprobación constituye un criterio de consistencia geométrica (Reddy & Joshi, 2010).

Relación geométrica = 150 mm / 4 mm = 37,5

La altura de 60 cm proporcionó una relación altura–ancho de 4:1, adecuada para mantener una configuración vertical, instalar la entrada inferior y la salida superior y operar el sistema por gravedad sin dificultar su transporte y manipulación en el laboratorio. Esta altura se definió antes de establecer la configuración interna; posteriormente se verificó que permitiera colocar los diferentes tratamientos y conservar un margen operativo.

De acuerdo con (Araque Arellano et al., 2022), el área transversal interna de cada filtro se determina mediante el producto de su ancho por su largo:

$$A = b \times l$$

(Ecuación 1)

$$A = 15cm * 15cm = 225cm^2$$

Asi mismo, el volumen de un prima de sección constante se obtiene multiplicando el área de su base por su altura (Araque Arellano, 2022). Debido a que el filtro posee una geometría prismática rectangular, su volumen geométrico se calculó mediante:

$$V = A \times H$$

(Ecuación 2)

$$V = 225cm^2 * 60cm = 13500cm^3$$

$$V = 13.5L$$

El área transversal resultante fue de 225 cm² y la capacidad geométrica de cada filtro vacío fue de 13,5 L. A partir de estas dimensiones previamente establecidas se calcularon posteriormente los volúmenes de grava y zeolita correspondientes a cada configuración experimental. En consecuencia, la secuencia de diseño fue: dimensiones del filtro, cálculo del área y volumen interno, definición de la configuración del lecho y determinación de las cantidades de materiales.

10.5.2. Capas de soporte

(Arias Oñate & Gonzabay Santana, 2022) señala que la grava colocada en la parte inferior de un filtro cumple la función de soportar el medio filtrante y facilitar el paso del agua a través del sistema. Asimismo, los filtro con material granulado pueden estar constituidos por capas grava de diferentes tamaños. Por ello en la presente investigación, en la parte inferior de cada filtro se colocó una capa de grava gruesa de 7 cm, seguida de una malla de separación y una capa de grava media de igual espesor. Sobre la segunda capa se ubicó otra malla, cuya función fue evitar que la zeolita se mezclara con la grava.

Según (Madrigal, 2021) el volumen de un cuerpo prismático de sección constate se determina mediante el producto del su área de su base por la altura o espesor.

Por consiguiente, el volumen ocupado por cada capa de grava se calculó mediante la siguiente expresión:

$$V_g = A * h_g$$

(Ecuación 3)

$$V_g = 225cm^2 * 7cm = 1575cm^3$$

$$V_g = 1.575Lporcapa$$

Las dos capas de grava ocuparon un volumen geométrico total de 3,15 L y una altura conjunta de 14 cm en cada filtro. El espesor de 7 cm proporcionó estabilidad al lecho, cubrió la entrada lateral y favoreció la distribución del flujo ascendente antes de su contacto con la zeolita.

10.5.3. Espesores del lecho de zeolita

Se evaluaron espesores de 8, 12 y 16 cm. Debido a que el área transversal permaneció constante, el volumen de zeolita cambió proporcionalmente con la altura del lecho.

Tabla 9:

Volumen geométrico correspondiente a los espesores de zeolita.

Espesor del lecho	Cálculo	Volumen
8 cm	225*8	1800 cm³ = 1,80 L
12 cm	225*12	2700 cm³ = 2,70 L
16 cm	225*16	3600 cm³ = 3,60 L

Nota. Los volúmenes se calcularon con un área transversal interna de 225 cm² (15 cm × 15 cm); 1000 cm³ equivale a 1 L.

El lecho de 12 cm contiene un 50 % más de volumen de zeolita que el de 8 cm:

$$\frac{2.70}{1.80} = 1.50$$

El lecho de 16 cm contiene el doble del volumen correspondiente al espesor de 8 cm:

$$\frac{3.60}{1.80} = 2.00$$

Por consiguiente, manteniendo una misma granulometría, el aumento del espesor incrementó proporcionalmente el volumen de zeolita disponible para el contacto con el agua. Los tres espesores permitieron comparar un nivel bajo, intermedio y alto de material filtrante sin ocupar completamente la altura de los filtros.

Tabla 10:

Distribución vertical de las capas dentro del filtro.

Espesor de zeolita	Grava gruesa	Grava media	Altura total ocupada	Espacio libre
8 cm	7 cm	7 cm	22 cm	38 cm
12 cm	7 cm	7 cm	26 cm	34 cm
16 cm	7 cm	7 cm	30 cm	30 cm

Nota. La Tabla 10 presenta la distribución vertical de los materiales dentro del filtro y el espacio libre disponible después de conformar cada tratamiento.

El espacio libre permitió mantener una columna de agua sobre el lecho, controlar la salida y evitar el desbordamiento durante el funcionamiento.

10.5.4. Justificación de las granulometrías

Las granulometrías seleccionadas fueron 0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm. La primera representó un material fino con mayor superficie externa por unidad de masa, mientras que la segunda representó un material más grueso con mayores espacios entre partículas y menor resistencia al paso del agua.

Para efectuar la comparación teórica entre las dos granulometrías de zeolita se asumió que las partículas presentan formas geométricas semejantes y la misma densidad. Bajo estas condiciones, el área externa de una partícula es proporcional al cuadrado de su diámetro, mientras que su masa es proporcional al cubo del diámetro (Vega et al., 2021). Por consiguiente, la superficie externa por unidad de masa es inversamente proporcional al diámetro representativo de la partícula:

$$d_f = \frac{0.5 + 1.0}{2} = 0.75mm$$

$$d_g = \frac{2.0 + 4.0}{2} = 3.00mm$$

Considerando partículas de forma semejante y una misma densidad, la superficie externa por unidad de masa es inversamente proporcional al diámetro de la partícula. Por tanto (Vega et al., 2021) detalla la siguiente expresión:

$$\frac{S_f}{S_g} = \frac{d_g}{d_f}$$

(Ecuación 4)

$$\frac{S_f}{S_g} = \frac{3.00}{0.75} = 4$$

De manera teórica, la granulometría de 0,5–1,0 mm proporcionaría aproximadamente cuatro veces más superficie externa por unidad de masa que la granulometría de 2,0–4,0 mm. Este cálculo corresponde a una comparación geométrica y no representa la superficie específica interna determinada mediante el método BET.

Al combinar el efecto del tamaño de partícula con el volumen de los tres espesores se obtiene el siguiente índice relativo:

Tabla 11:

Índice teórico relativo de superficie externa disponible.

Tratamiento	Granulometría	Espesor	Índice relativo
T1	0,5–1,0 mm	8 cm	4,0
T2	0,5–1,0 mm	12 cm	6,0
T3	0,5–1,0 mm	16 cm	8,0
T4	2,0–4,0 mm	8 cm	1,0
T5	2,0–4,0 mm	12 cm	1,5
T6	2,0–4,0 mm	16 cm	2,0

Nota. La Tabla 11 presenta el índice teórico relativo de la superficie externa disponible.

El índice utilizó como referencia el tratamiento de granulometría gruesa y 8 cm de espesor. Su finalidad fue justificar la selección de los niveles experimentales, sin sustituir la evaluación basada en los resultados de laboratorio y el análisis de varianza.

10.5.5. Configuración hidráulica

Cada filtro fue alimentado por gravedad desde un recipiente de 20 L colocado a una altura aproximada de 1,20 m respecto al punto de entrada La diferencia de elevación permitió que el agua circulara hacia el medio filtrante sin necesidad de utilizar una bomba. Asi mismo (Cevallos Muñoz, 2022) indica que la ecuación fundamental de la hidrostática permite relacionar la variación de presión con la elevación de un fluido de densidad constante.

Por consiguiente, la presión hidrostática ideal disponible en la entrada de cada filtro se estimó mediante:

$$\Delta P = pgh$$

(Ecuación 5)

Donde:

- **ΔP=** presión hidrostática.
- **ρ =** densidad del agua, aproximadamente 1000 kg/m³.
- **g =** aceleración de la gravedad, 9,81 m/s².
- **h=**diferencia de altura, 1,20 m.

$$\Delta P = (1000)(9.81)(1.20)$$

$$\Delta P = 11772 Pa$$

$$\Delta P = 11.8 kPa$$

La altura aproximada de 1,20 m proporcionó la carga hidráulica necesaria para conducir el agua por la manguera y vencer la resistencia inicial de las capas. El caudal se ajustó mediante las válvulas de entrada de cada filtro, el caudal objetivo de operación fue de 500 mL/min.

Según (Araque Arellano et al., 2022) consideran la velocidad o tasa de filtración como un parámetro hidráulico de diseño y la expresan en unidades de volumen por unidad de área y tiempo, dimensionalmente equivalentes a una unidad de velocidad. Por ello, la carga hidráulica superficial se calculó mediante la siguiente expresión:

$$v = \frac{Q}{A}$$

(Ecuación 6)

$$v = \frac{500\ cm^3/min}{225 cm^2} = 2.22\ cm/min$$

$$v = 1.33\, m/h$$

El caudal se verificó mediante la recolección del agua durante un minuto en un recipiente graduado. Las válvulas se ajustaron hasta obtener valores cercanos a 500 mL/min. Durante la jornada experimental se registraron caudales comprendidos entre 489 y 508 mL/min.

La autonomía teórica del recipiente de alimentación será:

$$t = \frac{20L}{0.5\, L/min} = 40min$$

Para recolectar 1000 mL en cada unidad experimental se requerirá un tiempo nominal de salida de:

$$t = \frac{1L}{0.5\, L/min} = 2min$$

El tiempo nominal de dos minutos correspondió al periodo aproximado requerido para recolectar 1000 mL y no se consideró como tiempo hidráulico real de contacto, debido a que este último dependió del volumen de vacíos de cada lecho.

10.6. *Preparación y colocación de los materiales filtrantes*

Antes de iniciar los ensayos, la grava y la zeolita fueron acondicionadas para retirar polvo, partículas finas y residuos que pudieran alterar la turbidez y los sólidos disueltos totales de las muestras. La preparación se efectuó de manera independiente para cada material.

10.6.1. Preparación de la grava y la zeolita

La grava gruesa y la grava media se lavaron con agua destilada hasta que el líquido de enjuague presentó una apariencia visualmente clara. Las mallas y la estructura interna de los filtros

también se lavaron con agua destilada antes del montaje, con el propósito de evitar la contaminación cruzada entre las unidades experimentales. Posteriormente, la grava y las mallas se dejaron secar a temperatura ambiente sobre una superficie limpia, evitando el contacto con tierra u otros contaminantes.

La zeolita natural se clasificó primero mediante un juego de tamices, con el propósito de separar las fracciones de 0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm. Después del tamizado, cada granulometría se lavó por separado con agua destilada. El lavado continuó hasta que el agua de enjuague presentó una apariencia visualmente clara; luego, el material se dejó secar a temperatura ambiente.

- 0,5–1,0 mm.
- 2,0–4,0 mm.

Las partículas que no se encontraron dentro de los intervalos establecidos fueron separadas y no se utilizaron en los ensayos. No se aplicó activación química ni tratamiento térmico, debido a que se evaluó el comportamiento del material natural tamizado, lavado y secado.

10.6.2. Determinación de la cantidad de zeolita

La cantidad de zeolita utilizada en cada tratamiento se estableció de manera volumétrica, considerando el área transversal interna de cada filtro y el espesor definido en el diseño experimental. Cada filtro presentó una sección interna de 15 cm por 15 cm, equivalente a un área transversal de 225 cm².

Por su parte (Mejía Viera, 2024) calculó el volumen de un lecho granular como el producto del área transversal por su altura, relación geométrica equivalente a la utilizada en un filtro de sección rectangular. El volumen de zeolita se determinó mediante la siguiente expresión:

$$V = A * h$$

(Ecuación 7)

Donde:

- **V** = volumen del lecho de zeolita;
- **A** = área transversal interna del filtro;
- **h** = espesor del lecho filtrante.

Para el espesor de 8 cm:

$$V = 225m^2 * 8cm = 1800cm^3 = 1.80L$$

Para el espesor de 12 cm:

$$V = 225m^2 * 12cm = 2700cm^3 = 2.70L$$

Para el espesor de 16 cm:

$$V = 225m^2 * 16cm = 3600cm^3 = 3.60L$$

10.6.3. Colocación de los materiales en el filtro

Los materiales se colocaron desde la parte inferior de cada filtro en el siguiente orden:

1. Capa de grava gruesa de 7 cm.
2. Malla de separación.
3. Capa de grava media de 7 cm.
4. Malla de separación.
5. Lecho de zeolita de 8, 12 o 16 cm, según el tratamiento.

Cada capa se distribuyó de forma uniforme, evitando una compactación excesiva que dificultara el paso del agua. Los espesores se verificaron con una regla graduada desde el exterior de los filtros de acrílico.

Antes de recolectar cada muestra experimental, los sistemas se llenaron lentamente con agua residual para desplazar el aire retenido y humedecer completamente las capas. Esta etapa permitió reducir la formación de canales preferenciales y favorecer el paso uniforme del agua.

Para cada tratamiento y réplica se colocó zeolita sin uso hasta alcanzar el espesor correspondiente. La zeolita fue reemplazada entre unidades experimentales para evitar que la saturación de una corrida influyera en la siguiente. Después de cada ensayo, las capas de grava y las mallas se retiraron, y tanto estos materiales como la estructura interna del filtro se lavaron con agua destilada antes de su reutilización, con el propósito de evitar la contaminación cruzada.

10.7. Recolección del efluente para los ensayos experimentales

El efluente utilizado en los ensayos se recolectó el 8 de julio de 2026 en la salida final de la PTAR La Merced, después de las unidades de tratamiento y antes de su descarga al cuerpo receptor. El agua correspondió a un efluente doméstico previamente tratado.

Durante la jornada experimental se utilizaron aproximadamente 50 L de efluente, volumen que permitió alimentar los dos filtros y ejecutar las doce unidades experimentales correspondientes a las seis combinaciones de granulometría y espesor, con dos réplicas por tratamiento.

El agua recolectada se distribuyó entre los dos sistemas de filtración. Uno de los filtros se destinó a la granulometría de 0,5–1,0 mm y el segundo a la granulometría de 2,0–4,0 mm. Las corridas no se asignaron de manera aleatoria; se ejecutaron mediante una secuencia previamente establecida e intercalada entre ambos filtros, organizada por los pares T1–T4, T2–T5 y T3–T6, con diferencias reducidas de tiempo.

Las muestras obtenidas después de cada unidad experimental se identificaron mediante el código del tratamiento y la réplica. Una fracción se destinó a Ambienlab para los análisis de

DQO, amonio y turbidez, y otra se utilizó para medir pH, temperatura y sólidos disueltos totales en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Tabla 12:

Condiciones de recolección del efluente para los ensayos experimentales.

Elemento	Descripción
Punto de recolección	Salida final de la PTAR La Merced
Tipo de agua	Efluente de agua residual doméstica tratada
Fecha de recolección y ejecución	8 de julio de 2026
Volumen aproximado utilizado	50 L
Uso del agua	Alimentación de los dos filtros y ejecución de las doce unidades experimentales
Destino de las muestras filtradas	Ambienlab para DQO, amonio y turbidez; Universidad Técnica de Cotopaxi para pH, temperatura y sólidos disueltos totales

Nota. La Tabla 12 resume las condiciones de recolección y utilización del efluente durante la fase experimental.

10.8. *Procedimiento experimental de filtración*

Los ensayos se realizaron con aproximadamente 50 L de efluente tratado recolectado para la fase experimental. Se utilizaron dos filtros de iguales dimensiones: el filtro 1 se destinó a la granulometría de 0,5–1,0 mm y el filtro 2 a la granulometría de 2,0–4,0 mm. Antes de iniciar cada unidad experimental se verificaron las conexiones, las válvulas y la disposición de las capas.

Las corridas se ejecutaron mediante una secuencia no aleatoria, previamente establecida e intercalada entre los dos filtros: T1–T4, T2–T5 y T3–T6. De esta manera, los tratamientos de ambas configuraciones de granulometría–filtro se desarrollaron con diferencias reducidas de tiempo. Esta organización permitió disminuir la variación asociada con el almacenamiento del

agua y con las condiciones ambientales de la jornada; sin embargo, al no existir aleatorización, esta condición se consideró una limitación del diseño experimental.

El procedimiento se desarrolló de la siguiente manera:

1. Se colocaron en cada filtro la capa de grava gruesa de 7 cm, una malla de separación, la capa de grava media de 7 cm, una segunda malla y el espesor de zeolita correspondiente al tratamiento.

2. Los recipientes de alimentación se llenaron con el agua residual tratada recolectada para la fase experimental.

3. Las válvulas de entrada se abrieron lentamente para permitir el ingreso del agua por la parte lateral inferior. El llenado gradual facilitó la salida del aire retenido y evitó el desplazamiento brusco de los materiales.

4. Los lechos filtrantes se humedecieron completamente antes de iniciar la recolección. Se comprobó visualmente que el agua atravesara las capas sin desbordamientos ni alteraciones visibles en la operación.

5. El caudal se reguló mediante las válvulas de entrada y se verificó con un recipiente graduado y un cronómetro. El caudal objetivo fue de 500 mL/min y los registros reales variaron entre 489 y 508 mL/min.

6. Una vez estabilizado el flujo, se recolectaron 1000 mL de agua filtrada por cada unidad experimental. El tiempo nominal de recolección fue cercano a dos minutos.

7. La muestra obtenida se homogeneizó suavemente y se dividió según los análisis requeridos. Una parte se colocó en los recipientes destinados a DQO, amonio y turbidez, y otra se conservó para la medición de pH, temperatura y sólidos disueltos totales.

8. Cada muestra se identificó mediante el código del tratamiento y la réplica correspondiente, desde T1-R1 hasta T6-R2. También se registraron la fecha, la hora, la granulometría, el espesor, el caudal, la temperatura, el pH y los sólidos disueltos totales.

9. Después de cada ensayo se retiró la zeolita y se reemplazó por material sin uso. Las capas de grava y las mallas se retiraron, y estos materiales, junto con la estructura interna del filtro, se lavaron con agua destilada antes de la siguiente corrida, con el propósito de evitar la contaminación cruzada y reducir la transferencia de residuos entre unidades experimentales.

10. El procedimiento se repitió para las seis combinaciones de granulometría y espesor, con dos réplicas por tratamiento. Durante la jornada se presentó lluvia ligera; no se observaron alteraciones operativas en los filtros ni en los registros de caudal.

Tabla 13:

Registro de fecha, hora y caudal de las unidades experimentales.

Código	Granulometría	Espesor (cm)	Fecha y hora	Caudal (mL/min)
T1-R1	0,5–1,0 mm	8	08/07/2026 13:15	502
T1-R2	0,5–1,0 mm	8	08/07/2026 13:19	495
T2-R1	0,5–1,0 mm	12	08/07/2026 13:27	500
T2-R2	0,5–1,0 mm	12	08/07/2026 13:31	493
T3-R1	0,5–1,0 mm	16	08/07/2026 13:38	499
T3-R2	0,5–1,0 mm	16	08/07/2026 13:42	490

Código	Granulometría	Espesor (cm)	Fecha y hora	Caudal (mL/min)
T4-R1	2,0–4,0 mm	8	08/07/2026 13:25	508
T4-R2	2,0–4,0 mm	8	08/07/2026 13:28	495
T5-R1	2,0–4,0 mm	12	08/07/2026 13:40	501
T5-R2	2,0–4,0 mm	12	08/07/2026 13:43	497
T6-R1	2,0–4,0 mm	16	08/07/2026 13:49	498
T6-R2	2,0–4,0 mm	16	08/07/2026 13:53	489

Nota. Los caudales registrados variaron entre 489 y 508 mL/min, con un promedio de 497,25 mL/min.

Las doce muestras se conservaron y transportaron de acuerdo con las indicaciones del laboratorio Ambienlab, procurando reducir el tiempo entre la recolección y la entrega. Las fotografías del montaje, la preparación de los materiales y la ejecución de los ensayos se reservaron para los anexos.

El análisis de la investigación se estableció exclusivamente a partir de la comparación de los valores finales de DQO, amonio, turbidez y sólidos disueltos totales obtenidos en las doce unidades experimentales. El pH y la temperatura se utilizaron como parámetros complementarios.

10.9. *Análisis de laboratorio y control de las mediciones*

Tabla 14:

Parámetros evaluados después de la filtración.

Parámetro	Unidad	Laboratorio/equipo	Método de referencia	Rango de trabajo	Uso del resultado
DQO	mg/L	Ambienlab	SM 5220 D, Ed. 24 (2023) / HACH 8000	4–1500 mg/L	Comparación de valores finales
Amonio (NH_4)	mg/L	Ambienlab	HACH 8155, Ed. 10 (2015)	0,0645–6,45 mg/L	Comparación de valores finales
Turbidez	NTU	Ambienlab	SM 2130 B, Ed. 24 (2023)	0,5–800 NTU	Comparación de valores finales
Sólidos disueltos totales	mg/L	UTC / Apera PC850	Lectura instrumental	Según equipo	Comparación de valores finales
pH	Unidades de pH	UTC / Apera PC850	Lectura instrumental	Según equipo	Parámetro complementario
Temperatura	°C	UTC / Apera PC850	Lectura instrumental	Según equipo	Parámetro complementario

Nota. La Tabla 14 detalla los parámetros, laboratorios, equipos y métodos considerados para las muestras posteriores a la filtración.

10.9.1. Análisis de DQO, amonio y turbidez

Las doce muestras filtradas fueron entregadas a Ambienlab Servicios Ambientales y Laborales Cía. Ltda., bajo la proforma N.° 2026-03976-1, para la determinación de DQO, amonio y turbidez. Los recipientes se identificaron con el código del tratamiento, el número de réplica, la fecha y la hora.

Según la proforma del laboratorio, el amonio (NH_4) se determinó mediante espectrofotometría UV-VIS con el método HACH 8155, edición 10 de 2015, y método interno PRA-31, con un rango de trabajo de 0,0645 a 6,45 mg/L. La DQO se determinó mediante espectrofotometría UV-visible con SM 5220 D, edición 24 de 2023, HACH 8000 y método interno PRA-09, con un rango de 4 a 1500 mg/L. La turbidez se determinó por turbidimetría mediante SM 2130 B, edición 24 de 2023, y método interno PRA-62, con un rango de 0,5 a 800 NTU.

Los informes analíticos emitidos por Ambienlab presentaron los resultados de DQO, amonio y turbidez para las doce muestras. Los valores se incorporaron a la matriz experimental exactamente como fueron reportados por el laboratorio. En el caso del amonio, los resultados de T1-R2, T5-R1 y T5-R2 superaron el límite superior de 6,45 mg/L del rango de trabajo informado; estos valores se conservaron sin modificaciones y se interpretaron con cautela.

10.9.2. Medición de pH, temperatura y sólidos disueltos totales

Las doce muestras destinadas a la Universidad Técnica de Cotopaxi se almacenaron en recipientes plásticos de tapa rosca, identificados con el tratamiento y la réplica correspondiente.

El pH, la temperatura y los sólidos disueltos totales se midieron mediante un equipo multiparamétrico Apera Instruments PC850. Antes de las mediciones, el equipo se calibró o verificó de acuerdo con las instrucciones del fabricante y con las soluciones disponibles en el laboratorio. El procedimiento aplicado fue el siguiente:

1. Se homogeneizó suavemente cada muestra, evitando la formación de burbujas.
2. Se colocó una porción de la muestra en un recipiente limpio.
3. Se introdujo la sonda del equipo hasta cubrir el área de medición.
4. Se esperó hasta que la lectura se estabilizó.
5. Se registraron los valores de pH, temperatura y sólidos disueltos totales.

6. La sonda se enjuagó con agua destilada entre muestras para reducir la contaminación cruzada.

Las mediciones se realizaron bajo condiciones semejantes para las doce muestras. Los sólidos disueltos totales se consideraron una variable de respuesta, mientras que el pH y la temperatura se utilizaron como parámetros complementarios.

La temperatura registrada correspondió al momento de la medición en el laboratorio de la universidad y no a la temperatura original del efluente en el punto de recolección.

10.9.3. Registro y control de los resultados

Se elaboró una matriz de registro que incluyó:

- código del tratamiento;
- granulometría;
- espesor del lecho;
- número de réplica;
- fecha y hora de ejecución;
- caudal registrado;
- DQO, amonio y turbidez;
- sólidos disueltos totales;
- pH;
- temperatura.

10.10. *Procesamiento y análisis de datos*

Se definió una matriz de datos organizada por tratamiento, granulometría, espesor, réplica, fecha, hora y caudal. Los resultados de pH, temperatura, sólidos disueltos totales, DQO, amonio y turbidez se incorporaron para las doce unidades experimentales.

10.10.1. Análisis descriptivo

Para cada tratamiento se calcularon la media y la desviación estándar de las dos réplicas. Los resultados se presentaron mediante tablas y gráficos comparativos, con el propósito de describir el comportamiento de las configuraciones evaluadas.

El pH y la temperatura se analizaron de forma descriptiva y se utilizaron como información complementaria de las condiciones de medición. Estos parámetros no formaron parte del ANOVA factorial.

10.10.2. Análisis estadístico

Se seleccionó un análisis de varianza factorial de dos factores con replicación para cada variable de respuesta:

- valores finales de DQO;
- valores finales de amonio;
- valores finales de turbidez;
- valores finales de sólidos disueltos totales.

El análisis permitió examinar:

- el efecto de la granulometría de la zeolita;
- el efecto del espesor del lecho filtrante;

- la interacción entre granulometría y espesor.

Se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Para cada parámetro se evaluaron por separado la granulometría, el espesor y la interacción entre ambos factores. Cuando el valor de probabilidad fue menor que 0,05, se rechazó la hipótesis nula correspondiente al efecto analizado.

Cuando la interacción entre granulometría y espesor resultó significativa, la interpretación se realizó sobre las seis combinaciones experimentales y no únicamente sobre los efectos principales (Montgomery, 2020). La prueba de Tukey se aplicó a la turbidez y a los sólidos disueltos totales. En el amonio, el incumplimiento de la normalidad de los residuos y la presencia de valores superiores al rango de trabajo informado limitaron la interpretación inferencial.

11. RESULTADOS

Los resultados correspondieron a un diseño factorial 2 × 3, integrado por dos granulometrías de zeolita natural de tipo comercial (0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm), tres espesores del lecho filtrante (8, 12 y 16 cm) y dos réplicas por combinación, para un total de doce unidades experimentales. La DQO, el amonio, la turbidez y los sólidos disueltos totales se analizaron como variables de respuesta, mientras que el pH y la temperatura se describieron como parámetros complementarios.

El análisis se efectuó sobre los valores finales obtenidos después de la filtración. Debido a que no se contó con una caracterización inicial correspondiente al mismo lote de agua y a la misma jornada experimental, los resultados permitieron comparar las configuraciones, pero no calcular porcentajes de remoción, eficiencias de tratamiento ni balances de masa.

11.1. Condiciones de ejecución de los ensayos

11.1.1. Fecha, hora y caudal

Las doce unidades experimentales se ejecutaron el 8 de julio de 2026 utilizando aproximadamente 50 L de efluente tratado recolectado en la salida final de la PTAR La Merced. Los ensayos se desarrollaron mediante una secuencia no aleatoria, previamente establecida e intercalada entre los dos filtros, organizada por los pares T1–T4, T2–T5 y T3–T6, con el propósito de reducir la influencia de cambios temporales durante la jornada.

Los caudales registrados variaron entre 489 y 508 mL/min, con un promedio de 497,25 mL/min, próximo al caudal objetivo de 500 mL/min. Para cada unidad experimental se recolectaron 1000 mL de agua filtrada y se registraron la fecha, la hora, la granulometría, el espesor y el caudal correspondiente.

11.1.2. Funcionamiento de los dos filtros

El sistema operó mediante flujo ascendente. El filtro 1 se destinó permanentemente a la granulometría de 0,5–1,0 mm y el filtro 2 a la granulometría de 2,0–4,0 mm. Para cada réplica se colocó zeolita sin uso; después de cada corrida se retiró el material filtrante y se lavaron con agua destilada las capas de grava, las mallas y la estructura interna del filtro antes del siguiente ensayo, con el propósito de evitar la contaminación cruzada.

Las réplicas se ejecutaron por separado. No obstante, cada granulometría quedó asociada con un filtro físico distinto, por lo que ambos efectos no pudieron separarse. En consecuencia, las diferencias vinculadas con la granulometría se interpretaron como correspondientes a las configuraciones granulometría–filtro evaluadas y no se atribuyeron exclusivamente al tamaño de partícula.

11.2. Resultados de las doce unidades experimentales

11.2.1. Matriz general de resultados

Tabla 15:

Matriz general de resultados fisicoquímicos finales.

Código	Granulometría	Espesor (cm)	pH	Temperatura (°C)	TDS (mg/L)	DQO (mg/L)	Amonio NH_4 (mg/L)	Turbidez (NTU)
T1-R1	0,5–1,0 mm	8	6,857	9,11	173,33	46,6	1,68	32,9
T1-R2	0,5–1,0 mm	8	6,977	11,98	164,67	51,1	9,61	53,8
T2-R1	0,5–1,0 mm	12	7,117	5,81	187,00	37,7	2,98	33,9
T2-R2	0,5–1,0 mm	12	6,933	8,63	182,67	24,4	3,44	41,2
T3-R1	0,5–1,0 mm	16	6,957	5,81	183,33	44,8	1,68	92,3
T3-R2	0,5–1,0 mm	16	6,883	6,46	174,00	40,5	1,77	117,0

T4-R1	2,0–4,0 mm	8	6,730	5,31	192,33	47,2	1,47	22,8
T4-R2	2,0–4,0 mm	8	6,923	6,94	188,00	47,2	1,46	22,8
T5-R1	2,0–4,0 mm	12	6,767	5,74	188,33	47,5	8,13	36,4
T5-R2	2,0–4,0 mm	12	6,730	5,93	185,00	39,5	8,67	29,4
T6-R1	2,0–4,0 mm	16	6,733	7,98	162,67	43,0	4,13	49,4
T6-R2	2,0–4,0 mm	16	6,703	8,13	169,00	36,4	2,86	25,0

Nota. Para pH, temperatura y TDS se presenta el promedio de tres lecturas técnicas realizadas en cada unidad experimental. Los valores de DQO, amonio y turbidez corresponden a los resultados analíticos reportados para cada muestra. Los resultados de amonio de T1-R2, T5-R1 y T5-R2 superaron el límite superior de 6,45 mg/L del rango de trabajo informado por Ambienlab; se conservaron sin modificaciones y deben interpretarse con cautela.

11.2.2. Estadísticos descriptivos por tratamiento

Tabla 16:

Media y desviación estándar de los parámetros por tratamiento (n = 2).

Trat.	Granulometría	Espesor (cm)	pH	Temperatura (°C)	TDS (mg/L)	DQO (mg/L)	Amonio (mg/L)	Turbidez (NTU)
T1	0,5–1,0 mm	8	6,92 ± 0,08	10,55 ± 2,03	169,00 ± 6,13	48,85 ± 3,18	5,65 ± 5,61	43,35 ± 14,78
T2	0,5–1,0 mm	12	7,03 ± 0,13	7,22 ± 1,99	184,83 ± 3,06	31,05 ± 9,40	3,21 ± 0,33	37,55 ± 5,16
T3	0,5–1,0 mm	16	6,92 ± 0,05	6,14 ± 0,46	178,67 ± 6,60	42,65 ± 3,04	1,73 ± 0,06	104,65 ± 17,47
T4	2,0–4,0 mm	8	6,83 ± 0,14	6,13 ± 1,15	190,17 ± 3,06	47,20 ± 0,00	1,47 ± 0,01	22,80 ± 0,00
T5	2,0–4,0 mm	12	6,75 ± 0,03	5,83 ± 0,13	186,67 ± 2,36	43,50 ± 5,66	8,40 ± 0,38	32,90 ± 4,95
T6	2,0–4,0 mm	16	6,72 ± 0,02	8,06 ± 0,10	165,83 ± 4,48	39,70 ± 4,67	3,50 ± 0,90	37,20 ± 17,25

Nota. Los valores se expresan como media ± desviación estándar. Cada media corresponde a dos réplicas experimentales. Las desviaciones estándar describen la variación entre las dos observaciones disponibles y no constituyen una estimación definitiva de la variabilidad poblacional.

11.3. Parámetros fisicoquímicos finales por tratamiento

11.3.1. Demanda química de oxígeno

La DQO media varió entre 31,05 y 48,85 mg/L. El menor promedio descriptivo se obtuvo en T2, correspondiente a la granulometría de 0,5–1,0 mm y 12 cm de espesor, mientras que el

mayor se registró en T1, con la misma granulometría y 8 cm de espesor. En las configuraciones de 2,0–4,0 mm, los promedios disminuyeron de 47,20 mg/L en 8 cm a 39,70 mg/L en 16 cm. Sin embargo, estas diferencias descriptivas no fueron respaldadas por un efecto estadísticamente significativo.

11.3.2. Amonio

El amonio (NH_4) presentó medias entre 1,47 y 8,40 mg/L. T4 registró el menor promedio descriptivo, seguido de T3, mientras que el mayor se observó en T5. T1 presentó una dispersión elevada debido a la diferencia entre sus réplicas de 1,68 y 9,61 mg/L. No se observó una tendencia uniforme con el incremento del espesor, puesto que la menor media se presentó en 16 cm para la configuración de 0,5–1,0 mm y en 8 cm para la configuración de 2,0–4,0 mm. Los valores de T1-R2, T5-R1 y T5-R2, correspondientes a 9,61; 8,13 y 8,67 mg/L, respectivamente, superaron el límite superior de 6,45 mg/L del rango de trabajo informado por Ambienlab. Estos resultados se conservaron exactamente como fueron reportados, pero su interpretación se realizó con cautela. Los valores se mantuvieron en la base química indicada por el informe: amonio (NH_4), expresado en mg/L.

11.3.3. Turbidez

La turbidez media osciló entre 22,80 y 104,65 NTU. T4 presentó la menor media descriptiva, mientras que T3 alcanzó el mayor promedio. En las configuraciones de 0,5–1,0 mm, la turbidez disminuyó de 43,35 NTU en 8 cm a 37,55 NTU en 12 cm y posteriormente aumentó hasta 104,65 NTU en 16 cm. En las configuraciones de 2,0–4,0 mm, las medias se mantuvieron entre 22,80 y 37,20 NTU. Este patrón mostró que el comportamiento del espesor no fue uniforme entre las dos configuraciones granulometría–filtro.

11.3.4. Sólidos disueltos totales

Los TDS medios variaron entre 165,83 y 190,17 mg/L. El menor promedio correspondió a T6, con granulometría de 2,0–4,0 mm y 16 cm de espesor, mientras que el mayor se obtuvo en T4, con la misma granulometría y 8 cm. En las configuraciones de 2,0–4,0 mm se observó una disminución descriptiva de los TDS al aumentar el espesor, mientras que en las configuraciones de 0,5–1,0 mm el comportamiento no fue monotónico. Por esta razón, la respuesta se interpretó mediante la interacción entre los factores.

11.3.5. pH

El pH medio por tratamiento se mantuvo entre 6,72 y 7,03. T2 registró el promedio más alto y T6 el más bajo. Todos los valores se ubicaron dentro del intervalo de 6 a 9 considerado como referencia para descargas a agua dulce. El pH se utilizó como parámetro complementario y no se incluyó en el ANOVA factorial.

11.3.6. Temperatura

La temperatura media durante la medición en el laboratorio varió entre 5,83 y 10,55 °C. T1 presentó el valor más alto y T5 el más bajo. Estas temperaturas correspondieron al momento de la lectura en el laboratorio y no representaron la temperatura original del efluente en el punto de recolección. La temperatura se analizó únicamente de forma descriptiva.

11.4. Comparación estadística de los tratamientos

Tabla 17:

Resumen del ANOVA factorial 2 × 3.

Parámetro	Granulometría p	Espesor p	Interacción p	Conclusión
DQO	0,4161	0,0667	0,1452	No se obtuvo evidencia de efectos significativos.

Amonio	0,5162	0,2174	0,0739	No significativo; interpretación exploratoria por no normalidad.
Turbidez	0,0044	0,0073	0,0245	Granulometría, espesor e interacción significativos.
TDS	0,2467	0,0167	0,0056	Espesor e interacción significativos; granulometría no significativa como efecto principal.

Nota. Se utilizó α = 0,05. Un valor p menor que 0,05 indicó un efecto estadísticamente significativo. La ausencia de significancia se interpretó como falta de evidencia suficiente y no como demostración de igualdad entre las configuraciones.

11.4.1. Evaluación de los supuestos del ANOVA

Tabla 18:

Evaluación de la normalidad de los residuos.

Parámetro	Shapiro–Wilk W	p	Decisión sobre normalidad
DQO	0,983	0,9923	No se rechaza la normalidad
Amonio	0,760	0,0034	Se rechaza la normalidad
Turbidez	0,921	0,2950	No se rechaza la normalidad
TDS	0,907	0,1935	No se rechaza la normalidad

Nota. La Tabla 18. Detalla la evaluación de la normalidad de los residuos de cada uno de los parámetros que han sido evaluados.

Los residuos de la DQO, la turbidez y los TDS no mostraron evidencia estadística de desviación de la normalidad. En el amonio se rechazó este supuesto (p = 0,0034), principalmente por la elevada diferencia entre las réplicas de T1 y por la distribución de los valores altos observados en T5.

La homogeneidad de varianzas no pudo evaluarse de manera robusta debido a que cada combinación contó únicamente con dos réplicas y algunas presentaron varianza igual a cero. La independencia se sustentó en la ejecución separada de las unidades experimentales; sin embargo, la asociación permanente entre granulometría e identidad física del filtro constituyó una limitación para la interpretación causal.

11.4.2. Análisis de varianza para la DQO final

Tabla 19:

Análisis de varianza factorial para DQO final.

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Decisión
Granulometría	93,841	1	93,841	0,806	0,4161	No significativo
Espesor	824,101	2	412,051	3,540	0,0667	No significativo
Granulometría × espesor	532,642	2	266,321	2,288	0,1452	No significativo
Error	698,300	6	116,383	—	—	—
Total	2148,884	11	—	—	—	—

Nota. En la Tabla 19. Se detalla el análisis de varianza para el parámetro DQO final

La granulometría (p = 0,4161), el espesor (p = 0,0667) y la interacción (p = 0,1452) no fueron estadísticamente significativos. El valor correspondiente al espesor fue próximo a 0,05, pero no alcanzó el criterio establecido; por tanto, no se obtuvo evidencia suficiente para atribuir las diferencias de DQO final a los factores evaluados.

11.4.3. Análisis de varianza para el amonio final

Tabla 20:

Análisis de varianza factorial para amonio final.

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Decisión
Granulometría	2,576	1	2,576	0,476	0,5162	No significativo
Espesor	21,551	2	10,776	1,989	0,2174	No significativo
Granulometría × espesor	44,965	2	22,483	4,150	0,0739	No significativo
Error	32,505	6	5,417	—	—	—
Total	101,597	11	—	—	—	—

Nota. Análisis de varianza factorial para el amonio final.

No se identificaron efectos significativos de la granulometría (p = 0,5162), del espesor (p = 0,2174) ni de la interacción (p = 0,0739). La interacción no alcanzó el nivel de significancia de 0,05. Debido al incumplimiento de normalidad, al número reducido de réplicas y a la presencia

de tres valores superiores al rango de trabajo informado, este análisis se consideró exploratorio y no sustentó conclusiones definitivas sobre ausencia de efectos.

11.4.4. Análisis de varianza para la turbidez final

Tabla 21*:*

Análisis de varianza factorial para turbidez final.

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Decisión
Granulometría	2861,341	1	2861,341	19,682	0,0044	Significativo
Espesor	3615,647	2	1807,823	12,435	0,0073	Significativo
Granulometría × espesor	2132,087	2	1066,043	7,333	0,0245	Significativo
Error	872,275	6	145,379	—	—	—
Total	9481,349	11	—	—	—	—

Nota. En la Tabla 21. Se detalla el análisis de la varianza factorial para la turbidez final

La granulometría (p = 0,0044), el espesor (p = 0,0073) y la interacción (p = 0,0245) fueron estadísticamente significativos. La interacción indicó que el comportamiento del espesor dependió de la configuración granulometría–filtro utilizado; por esta razón, los efectos principales no se interpretaron de forma aislada.

11.4.5. Análisis de varianza para los TDS finales

Tabla 22:

Análisis de varianza factorial para-TDS finales.

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Decisión
Granulometría	34,454	1	34,454	1,647	0,2467	No significativo
Espesor	365,407	2	182,704	8,735	0,0167	Significativo
Granulometría × espesor	581,630	2	290,815	13,903	0,0056	Significativo
Error	125,500	6	20,917	—	—	—
Total	1106,991	11	—	—	—	—

Nota. En esta tabla se detalla el análisis de varianza factorial para los Solidos totales disueltos final

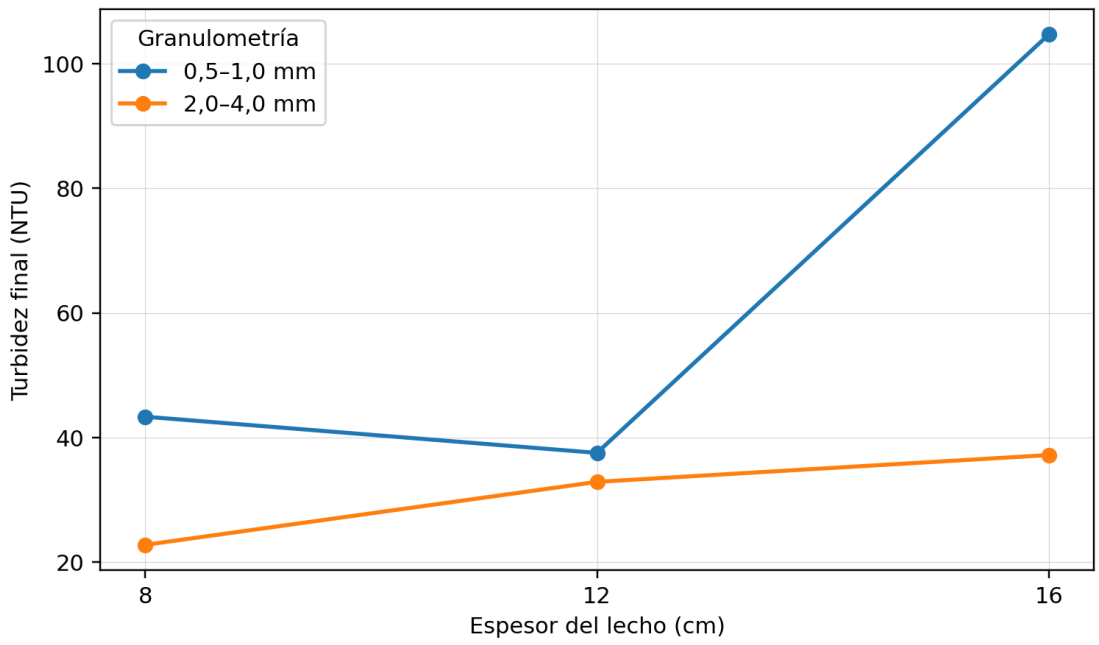
La granulometría no fue significativa como efecto principal (p = 0,2467), mientras que el espesor (p = 0,0167) y la interacción (p = 0,0056) sí presentaron significancia estadística. La interacción mostró que el efecto del espesor sobre los TDS dependió de la configuración granulometría–filtro utilizado.

11.4.6. Interacción entre granulometría y espesor

La interacción no fue estadísticamente significativa para la DQO ni para el amonio. En cambio, fue significativa para la turbidez y los TDS. En la turbidez, la configuración de 0,5–1,0 mm presentó un incremento marcado al alcanzar 16 cm de espesor, mientras que las configuraciones de 2,0–4,0 mm mantuvieron valores considerablemente menores. En los TDS, las configuraciones de 2,0–4,0 mm mostraron una disminución descriptiva al aumentar el espesor hasta 16 cm, patrón que no se reprodujo en las configuraciones de 0,5–1,0 mm.

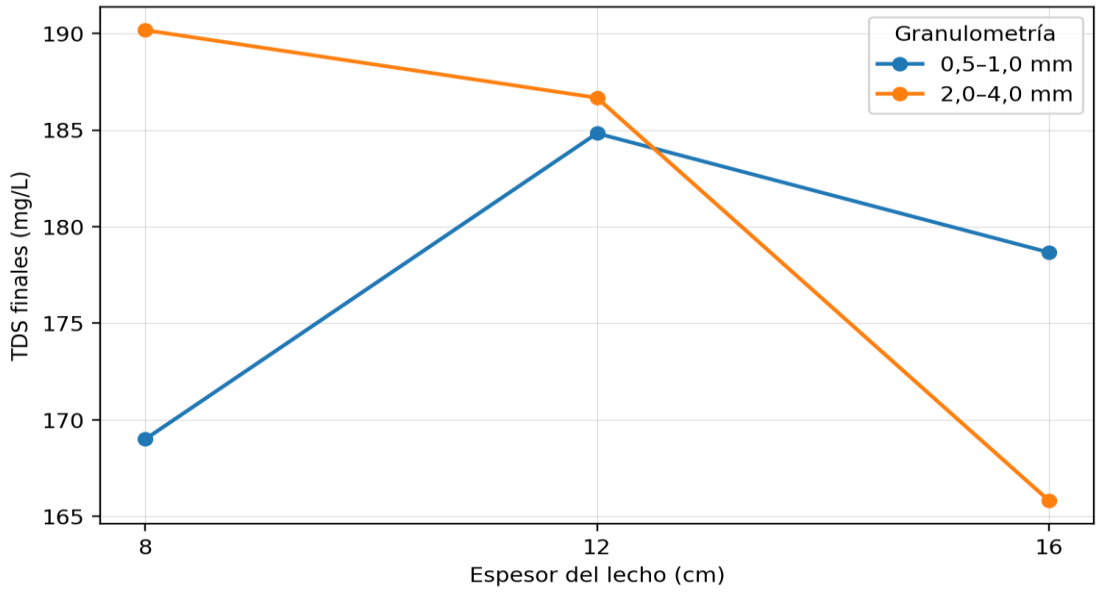
Figura 2:

Interacción granulometría × espesor para turbidez final.



Nota. Los puntos representan la media de dos réplicas experimentales por configuración.

Figura 3:
Interacción granulometría × espesor para-TDS finales.



Nota. Los puntos representan la media de dos réplicas experimentales por configuración.

11.4.7. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey

La prueba de Tukey se aplicó a las seis combinaciones experimentales para la turbidez y los TDS, debido a que la interacción entre granulometría y espesor fue significativa. No se aplicó para la DQO ni para el amonio, porque sus análisis de varianza no identificaron efectos significativos al nivel de $\alpha = 0,05$.

Tabla 23:

Agrupación de Tukey para turbidez final.

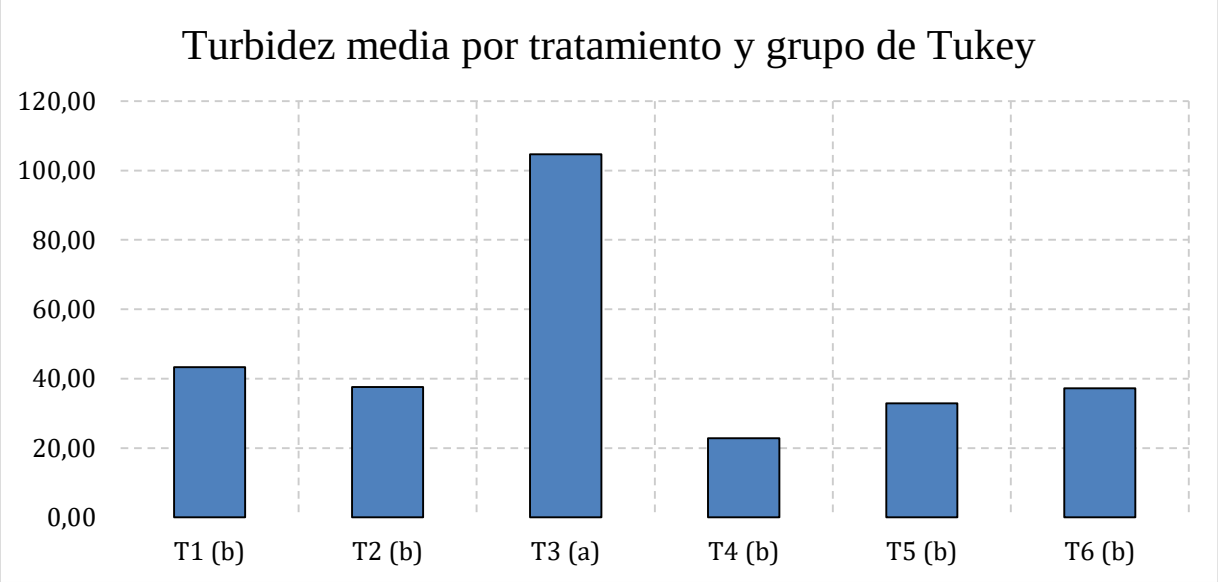
Tratamiento	Combinación experimental	Media (NTU)	Grupo
T3	0,5–1,0 mm × 16 cm	104,65	A
T1	0,5–1,0 mm × 8 cm	43,35	B
T2	0,5–1,0 mm × 12 cm	37,55	B
T6	2,0–4,0 mm × 16 cm	37,20	B
T5	2,0–4,0 mm × 12 cm	32,90	B
T4	2,0–4,0 mm × 8 cm	22,80	B

Nota. Las medias que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas. T3 fue significativamente mayor que los otros cinco tratamientos; entre T1, T2, T4, T5 y T6 no se detectaron diferencias.

En la figura se representan los valores medios de turbidez obtenidos para T1, T2, T3, T4, T5 y T6; las letras ubicadas junto a cada tratamiento indican la agrupación estadística, de modo que los tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 4:

Comparación de medias de turbidez final mediante la prueba de Tukey.



Nota. Las barras representan la media de dos réplicas experimentales y las líneas de error corresponden a la desviación estándar. Las letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey, con $\alpha = 0,05$.

Aunque T4 presentó descriptivamente la menor media de turbidez, no fue estadísticamente inferior a T1, T2, T5 ni T6. Por tanto, el principal resultado de la comparación fue la diferenciación de T3 como la configuración con mayor turbidez final, sin identificar una única configuración estadísticamente superior entre los otros cinco tratamientos.

Tabla 24:

Agrupación de Tukey para-TDS finales.

Tratamiento	Combinación experimental	Media (mg/L)	Grupo
T4	2,0–4,0 mm × 8 cm	190,17	A
T5	2,0–4,0 mm × 12 cm	186,67	AB
T2	0,5–1,0 mm × 12 cm	184,83	AB

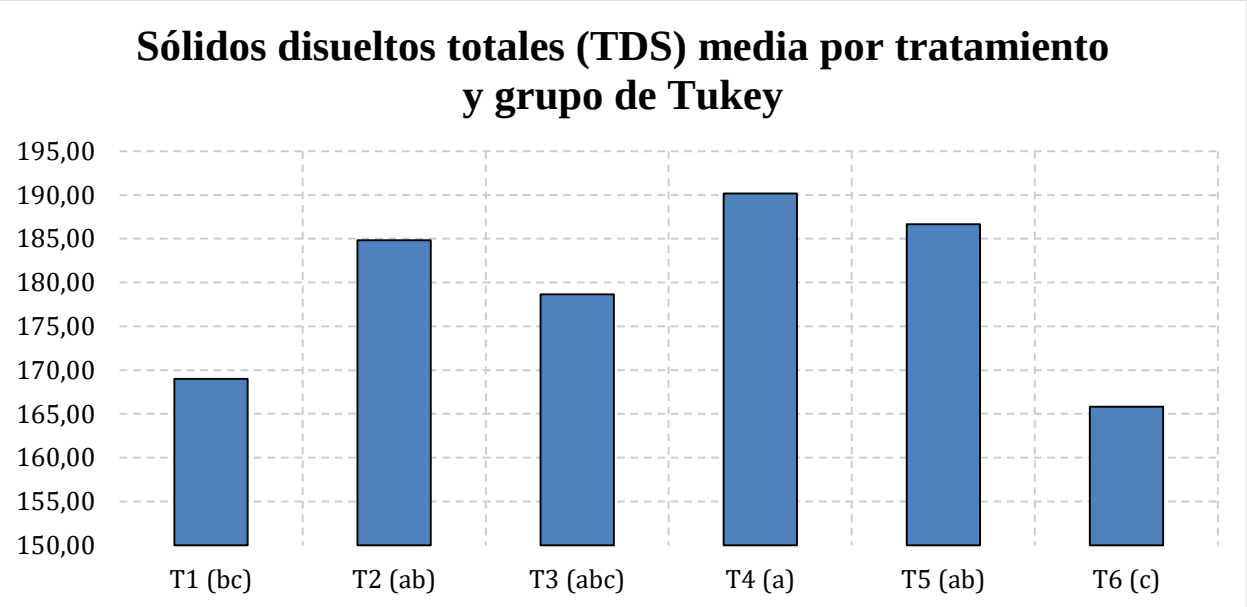
T3	0,5–1,0 mm × 16 cm	178,67	ABC
T1	0,5–1,0 mm × 8 cm	169,00	BC
T6	2,0–4,0 mm × 16 cm	165,83	C

Nota. Las medias que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas. Las diferencias significativas se presentaron entre T1–T4, T2–T6, T4–T6 y T5–T6.

Debido a que el análisis de varianza factorial identificó un efecto estadísticamente significativo del espesor y de la interacción entre la granulometría y el espesor sobre los sólidos disueltos totales, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Esta prueba permitió comparar las medias de las seis configuraciones experimentales e identificar los tratamientos que presentaron diferencias estadísticamente significativas. En la figura se muestran los valores medios de TDS obtenidos para T1, T2, T3, T4, T5 y T6, junto con las letras correspondientes a los grupos homogéneos. Los tratamientos que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí.

Figura 5:

Comparación de los sólidos disueltos totales medios entre tratamientos mediante la prueba de Tukey.



Nota. Las barras representan la media de dos réplicas experimentales. Los tratamientos que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey, con $\alpha = 0,05$.

El T6 presentó el menor promedio descriptivo de TDS y fue significativamente menor que T2, T4 y T5, pero no difirió de T1 ni de T3. T4 presentó el mayor promedio descriptivo y fue significativamente mayor que T1 y T6, pero no difirió de T2, T3 ni de T5.

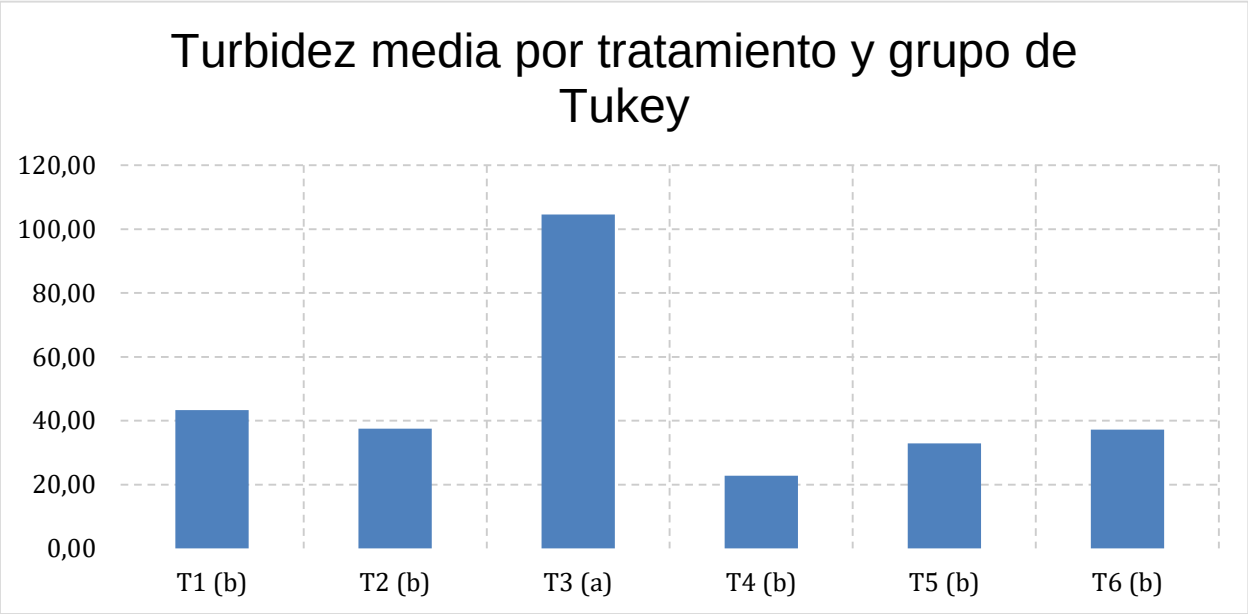
11.5. Comparación integral de los tratamientos

Los resultados no permitieron identificar un único tratamiento superior para todos los parámetros. T2 presentó la menor media descriptiva de DQO; T4 registró las menores medias descriptivas de amonio y turbidez; y T6 obtuvo la menor media de TDS. Sin embargo, la presencia del menor promedio no implicó necesariamente superioridad estadística frente a las demás configuraciones.

Para la DQO y el amonio no se detectaron diferencias estadísticamente significativas, por lo que T2 y T4 se reconocieron únicamente como las configuraciones con menores medias descriptivas para estas variables. Para la turbidez, T4 compartió el mismo grupo estadístico con T1, T2, T5 y T6. Para los TDS, T6 presentó el mayor respaldo estadístico, al ser significativamente menor que T2, T4 y T5, aunque no difirió de T1 ni de T3. En consecuencia, la selección de una configuración debe realizarse de acuerdo con el parámetro prioritario. No se calculó un índice ponderado ni una función de deseabilidad que integrara las cuatro variables en una sola calificación; por esta razón, no se estableció una clasificación general de los tratamientos ni una configuración universalmente superior.

Figura 6:

Comparación de la turbidez media entre los tratamientos mediante la prueba de Tukey.



Nota. Las barras representan la turbidez media de dos réplicas experimentales por tratamiento, expresada en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Los tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. T3 conformó el grupo «a», mientras que T1, T2, T4, T5 y T6 pertenecieron al grupo «b».

11.6. Validación de la hipótesis

La validación de la hipótesis se realizó a partir de los resultados obtenidos en el análisis estadístico de los parámetros fisicoquímicos evaluados. Los resultados evidenciaron que la influencia de la granulometría y del espesor del lecho filtrante dependió de la variable analizada. Para la demanda química de oxígeno no se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, mientras que el análisis del amonio tuvo un carácter exploratorio debido al incumplimiento del supuesto de normalidad y a la presencia de resultados fuera del rango de trabajo reportado por el laboratorio. En contraste, la turbidez presentó diferencias significativas asociadas a la granulometría, al espesor del lecho filtrante y a la interacción entre ambos factores, mientras que para los sólidos disueltos totales se observaron diferencias significativas relacionadas con el espesor y la interacción, pero no con la granulometría como efecto principal.

En consecuencia, la hipótesis alternativa fue aceptada parcialmente, debido a que el efecto de la granulometría y del espesor del lecho filtrante no fue consistente para todos los parámetros fisicoquímicos evaluados. Los resultados demostraron que dichas variables influyeron significativamente sobre la turbidez y, de forma parcial, sobre los sólidos disueltos totales; sin embargo, no se obtuvo evidencia estadística suficiente para confirmar ese efecto en la demanda química de oxígeno ni en el amonio. Estos hallazgos indican que el desempeño del sistema de filtración dependió del parámetro de calidad del agua considerado y no permitió establecer una configuración experimental universalmente superior.

Finalmente, la interpretación de los efectos asociados con la granulometría debe realizarse con cautela, debido a que cada tamaño de partícula fue evaluado en un filtro físico diferente, condición que impidió separar completamente el posible efecto propio del material filtrante respecto de las características particulares de cada unidad experimental.

11.7. Limitaciones del estudio

La granulometría de 0,5–1,0 mm se evaluó en un filtro físico y la granulometría de 2,0–4,0 mm en otro. Aunque ambos equipos se construyeron con iguales dimensiones y se operaron bajo condiciones semejantes, la identidad física del filtro permaneció asociada con la granulometría, por lo que no fue posible separar completamente ambos efectos. Además, la secuencia de ejecución no se asignó de manera aleatoria, sino que se estableció previamente e intercaló mediante los pares T1–T4, T2–T5 y T3–T6. El diseño incluyó dos réplicas por tratamiento. Este número permitió ejecutar el análisis factorial, pero proporcionó una estimación limitada de la variabilidad, del error experimental y de la homogeneidad de varianzas. Asimismo, los residuos del amonio no cumplieron el supuesto de normalidad y tres resultados superaron el rango de trabajo informado por el laboratorio.

No se dispuso de una caracterización inicial correspondiente al mismo lote de agua utilizado en los ensayos. Por tanto, no fue posible calcular porcentajes de remoción, eficiencia de tratamiento ni balances de masa. Los resultados corresponden a condiciones controladas de laboratorio y no constituyen una validación directa para la operación a escala real de la PTAR La Merced.

12. CONCLUSIONES

Se implementó satisfactoriamente un sistema de filtración de flujo ascendente a escala de laboratorio utilizando zeolita natural como medio filtrante, lo que permitió evaluar experimentalmente el efecto de dos granulometrías (0,5–1,0 mm y 2,0–4,0 mm) y tres espesores de lecho (8, 12 y 16 cm) bajo condiciones hidráulicas controladas. El sistema mantuvo un caudal estable durante la ejecución de los ensayos, garantizando la comparabilidad entre los tratamientos experimentales. No obstante, la utilización de un filtro físico diferente para cada granulometría constituyó una limitación metodológica, por lo que el posible efecto de la identidad del filtro debe considerarse al interpretar los resultados obtenidos.

La determinación de los parámetros fisicoquímicos finales permitió caracterizar el comportamiento del efluente tratado después de la aplicación de cada configuración experimental, evidenciándose diferencias descriptivas entre los tratamientos para la demanda química de oxígeno, el amonio, la turbidez y los sólidos disueltos totales. Sin embargo, debido a que no se dispuso de una caracterización inicial correspondiente al mismo lote de agua empleado durante la experimentación, el estudio se limitó a comparar los valores finales obtenidos después de la filtración, sin que fuera posible calcular porcentajes de remoción ni determinar la eficiencia del sistema de filtración.

La comparación estadística evidenció que el efecto de la granulometría, del espesor del lecho filtrante y de la interacción entre ambos factores dependió del parámetro fisicoquímico evaluado. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas para la demanda química de oxígeno, mientras que el análisis del amonio tuvo un carácter exploratorio debido al incumplimiento del supuesto de normalidad y a la presencia de resultados fuera del rango de trabajo reportado por el laboratorio. En contraste, la turbidez presentó diferencias significativas asociadas a la granulometría, al espesor y a la interacción de ambos factores, mientras que para

los sólidos disueltos totales el espesor del lecho y la interacción mostraron un efecto significativo. En consecuencia, se concluye que la influencia de la granulometría y del espesor del lecho filtrante sobre la calidad final del efluente fue dependiente del parámetro evaluado, por lo que no fue posible identificar una configuración experimental que presentara un comportamiento consistentemente superior para todas las variables analizadas. Por ello, la hipótesis alternativa fue aceptada parcialmente.

13. RECOMENDACIONES

En futuras investigaciones, evaluar las dos granulometrías en cada unidad de filtración mediante una asignación aleatoria o cruzada, o utilizar varios filtros independientes por granulometría, con el propósito de separar el efecto del tamaño de partícula del posible efecto asociado con la construcción y el funcionamiento de cada filtro. Incrementar el número de réplicas independientes por tratamiento, utilizando al menos tres y preferentemente cinco, para mejorar la estimación del error experimental, aumentar la capacidad de detectar diferencias y comprobar con mayor solidez los supuestos del análisis estadístico.

Caracterizar el mismo lote de agua inmediatamente antes y después de cada tratamiento, manteniendo iguales condiciones de conservación y análisis, para calcular porcentajes de remoción, eficiencia de tratamiento y balances de masa directamente comparables.

Repetir mediante diluciones validadas las determinaciones de amonio que superen el límite superior del rango de trabajo del método y mantener controles analíticos que permitan confirmar la precisión de los resultados antes de incorporarlos al análisis estadístico. Desarrollar una fase experimental posterior a escala piloto que incluya periodos prolongados de operación, pérdida de carga, saturación del medio filtrante, estabilidad del lecho, liberación de partículas, mantenimiento, vida útil de la zeolita y costos operativos, antes de recomendar una configuración para su aplicación en la PTAR La Merced.

14. BIBLIOGRAFÍA

Aguila, M. G. P. D., Reátegui, L. S. C., & Villegas, C. A. (2022). EFICIENCIA DE LA HARINA DE CÁSCARA DE CACAO (THEOBROMA CACAO) EN LA REMOCIÓN DE TURBIDEZ DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *88*(4). https://doi.org/10.37761/rsqp.v88i4.407

Amaguaña Moreta, R. F. (2023). *Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del sector La Merced de la parroquia Píllaro perteneciente al cantón Santiago de Píllaro, provincia de Tungurahua*. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/38074

Amaya Díaz, A. M. (2021). *Determinación de las características físicas de sustancias reactivas: Piroclastos volcánicos, zeolita clinoptilolita, zeolita modernita, de origen ecuatoriano para el tratamiento de agua*. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32615

Araque Arellano, M. (2022). *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable*. Editorial Abya-Yala. https://books.scielo.org/id/m8d8m

Araque Arellano, M., Arias, E., Vásconez, M., Avilés, E., Cuarán, F., García, D., Álvarez, D., Prehn, C., Borja, X., Valdiviezo, J., & Fernández, G. (2022). *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable*. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22350

Arias Oñate, B. F., & Gonzabay Santana, J. M. (2022). *Propuesta de Diseño y estudio de un Filtro de Grava para potabilizar el agua subterránea para el consumo en una finca ubicada en la vía Progreso-Playas* [bachelorThesis]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22783

Avila-Camacho, F. J., Moreno-Villalba, L. M., Cerón-Montes, G. I., Garrido-Hernández, A., Cardoso-Chávez, C. A., & Pacheco-Piña, C. J. (2021). Diseño de un espectrofotómetro

UV-VIS de bajo costo para la industria bioquímica: Una Revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, *9*, 19-28. https://doi.org/10.29057/icbi.v9iEspecial2.7788

Bermeo Tapia, D. M., & Endara Molina, J. S. (2024). *Diseño e implementación de un sistema multiparámetros para el monitoreo de la calidad de agua de la planta de tratamiento de aguas residuales del campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi"*. http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11991

Bolívar-Cuartas, S. M., Castaño-Muñoz, D. L., Gutiérrez-Flórez, O. D., Bolívar-Cuartas, S. M., Castaño-Muñoz, D. L., & Gutiérrez-Flórez, O. D. (2021). Modelo Correlacionai de Sólidos Suspendidos Totales Presentes en Aguas Residuales Domésticas Mediante Análisis de Turbiedad. *Producción + Limpia*, *16*(1), 186-197. https://doi.org/10.22507/pml.v16n1a10

Calixto, N. J., Bonilla, C., Carillo Soto, G. A., Carrillo Soto, G. A., & Cely Calixto, N. J. (2022). *Tratamientos de aguas residuales*. Bogotá - Ecoe Ediciones S.A.S. https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6727

Capa Cobos, L. F. (2021). *Estudio computacional de la adsorción de fosfatos como moléculas contaminantes de aguas residuales, en zeolitas tipo faujasita* [masterThesis]. http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/28126

Cevallos Muñoz, O. (2022). *Introducción a la mecánica de fluidos*. UTEO. https://www.uteq.edu.ec/investigacion/libro/178?utm_source=chatgpt.com

Chávez Marrufo, J. C. A. (2021). *Tratamiento de la dureza de las aguas utilizando un filtro con espesor variable de zeolita-2019*.

De Magalhães, L. F., Da Silva, G. R., & Peres, A. E. C. (2022). Zeolite Application in Wastewater Treatment. *Adsorption Science & Technology*, *2022*, 4544104. https://doi.org/10.1155/2022/4544104

Garza, Z., & Rocha Rios, J. (2021). EVALUACIÓN SISTEMÁTICA DE LA TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO A BASE DE ZEOLITAS DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS POR EL RASTRO TIF DE VILLAHERMOSA TABASCO. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, *14*, 1350. https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.3.76317

Guayasamin Díaz, W. A., & Padilla Moreno, S. G. (2023). *Elaboración de un plan de manejo ambiental para la conservación de la microcuenca del río San Pedro, parroquia de San Pedro de Taboada, cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha* [bachelorThesis]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25866

Hasan, M. N., Altaf, M. M., Khan, N. A., Khan, A. H., Khan, A. A., Ahmed, S., Kumar, P. S., Naushad, Mu., Rajapaksha, A. U., Iqbal, J., Tirth, V., & Islam, S. (2021). Recent technologies for nutrient removal and recovery from wastewaters: A review. *Chemosphere*, *277*, 130328. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130328

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, I., Morales-Mejía, J. C., Vargas-Martínez, M. G., & Camps, J. M. (2021). Tecnología y ciencias del agua. *Tecnología y ciencias del agua*, *12*(1), 113-132. https://doi.org/10.24850/j-tyca-imta

Koul, B., Yadav, D., Singh, S., Kumar, M., & Song, M. (2022). Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review. *Water*, *14*(21), 3542. https://doi.org/10.3390/w14213542

López-Ocaña, G., & Magaña-Flores, A. (2023). Aguas residuales domésticas tratadas con Sagittaria latifolia en humedales artificiales. *DYNA*, *90*(226), 27-35. https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.105263

Madrigal, A. (2021). *Manual de Álgebra para Bachillerato 2021 | PDF | Evaluación | Aprendizaje*. Scribd. https://es.scribd.com/document/620964734/Manual-Algebra-20-21-Del-Estudiante-Aprendizajes-Esenciales-FINAL-2

Manrique Guerra, L. A. (2022). *Electrocoagulación de efluentes con colorantes sintéticos de industria textil para la disminución de la demanda química de oxigeno*. https://hdl.handle.net/20.500.14292/2207

Mejía Viera, T. S. (2024). *Aplicación de filtros anaerobios de flujo ascendente en la tratabilidad de aguas residuales domesticas generadas en Puerto Ayora Isla Santa Cruz Provincia de Galápagos* [bachelorThesis]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27481

Mendoza-Retana, S. S., Cervantes-Vázquez, M. G., Valenzuela-Garcia, A. A., Guzmán-Silos, T. L., Orona-Castillo, I., & Cervantes-Vázquez, T. J. Á. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *12*(1), 115-126. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2789

Murillo, F. A. B., Aponte, Á. E. P., & Escobar, H. M. R. (2023). Revista Tecnura. *Tecnura*, *27*(76), 111-143. https://doi.org/10.14483/22487638.19390

Muscarella, S. M., Laudicina, V. A., Di Trapani, D., & Mannina, G. (2024). Recovering ammonium from real treated wastewater by zeolite packed columns: The effect of flow rate and particle diameter. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *41*, 101659. https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101659

Nazif, S., Forouzanmehr, F., & Khatibi, Y. (2023). Developing a practical model for the optimal operation of wastewater treatment plant considering influent characteristics. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(14), 39764-39782. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24981-8

Ramos Peñafiel, R. F. (2021). *Análisis comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos en relación con el cemento puzolánico tipo IP*. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32166

Rodríguez Valdivia, M., Guzmán Ale, R., & Huamán Gutiérrez, M. (2021). Aplicación de un diseño experimental en la síntesis hidrotermal de Zeolita Gis-NaP a partir de residuos de ladrillo. *Revista Boliviana de Química*, *38*(4), 133-147. https://doi.org/10.34098/2078-3949.38.4.1

Rubio-Arias, H. O., Ochoa-Rivero, J. M., Villalba, M. de L., Barrientos-Juárez, E., Mora-Orozco, C. D. la, & Rocha-Gutiérrez, B. A. (2021). Eliminación de metales pesados en agua utilizando filtros empacados con zeolita natural de diversos tamaños. *Tecnología y ciencias del agua*, *12*(6), 282-327. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-07

Santos, N. M. de los, & Ocaña, G. L. (2021). Zeolitas nativas en el tratamiento de agua residual doméstica. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, *10*(19), 1-38. https://doi.org/10.23913/ciba.v10i19.106

Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, *280*, 130595. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595

Sauter, D., Dąbrowska, A., Bloch, R., Stapf, M., Miehe, U., Sperlich, A., Gnirss, R., & Wintgens, T. (2021). Deep-bed filters as post-treatment for ozonation in tertiary municipal wastewater treatment: Impact of design and operation on treatment goals. *Environmental Science: Water Research & Technology*, *7*(1), 197-211. https://doi.org/10.1039/D0EW00684J

Sun, S., Geng, J., Li, B., Ma, L., Sun, X., Meng, F., Qi, H., & Shen, J. (2021). Temporal variations of antibiotic resistance genes in influents and effluents of a WWTP in cold

regions. *Journal of Cleaner Production*, *328*, 129632. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129632

Valdivia, M. R. (2022). Cinética y Mecanismos de Adsorción de Plomo (II) Usando Zeolita Gis-NaP Obtenida a Partir de Residuos de Ladrillo. *Revista Politécnica*, *50*(2), 63-70. https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.07

Vargas, H. S., & Sánchez, L. R. (2022). EVALUACIÓN DE ZEOLITAS CLINOPTILOLITAS CAMAGÜEYANAS PARA LA REMOCIÓN DE AMONIO EN AGUAS CONTAMINADAS. *Advances in Science and Innovation*, *1*(1), 93-106. https://doi.org/10.61210/asi.v1i1.9

Vásquez Álvarez, P. E. (2023). *La zeolita como mineral asociado al cemento en hormigón* [bachelorThesis, Universidad del Azuay]. http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13717

Vega, M. A. A. la, Meza-Gordillo, R., Villalobos-Maldonado, J. J., Pola-Albores, J. F., & Enciso-Sáenz, S. (2021). EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE DIÓXIDO DE TITANIO INMOVILIZADO EN LA OXIDACIÓN FOTOCATALÍTICA DE PÚRPURA DE BROMOCRESOL. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *37*, 589-599. https://doi.org/10.20937/RICA.54008

Yungaicela Mera, K. J., & Sánchez Vallejo, J. S. (2021). *Análisis entre los sistemas tradicionales de tratamientos de aguas residuales domésticas y el de biofiltro lombrices californianas para el sector colibrí, parroquia San Pedro de Chongón, cantón Guayaquil, provincia Guayas*. https://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/4343

Zagklis, D. P., & Bampos, G. (2022). Tertiary Wastewater Treatment Technologies: A Review of Technical, Economic, and Life Cycle Aspects. *Processes*, *10*(11), 2304. https://doi.org/10.3390/pr10112304