



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

TEMA:

**“ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE ZEOLITA
NATURAL TIPO CLINOPTILOLITA EN LA REDUCCIÓN DE
COLORANTE REACTIVO NEGRO BODACTIVE WNN DE AGUAS
RESIDUALES DE LAVADORAS DE JEANS.”**

AUTOR: José Rafael Espinoza Apráez

TUTOR: Ing. Bolívar Eduardo Paredes Beltrán, PhD.

AMBATO – ECUADOR

Febrero – 2024

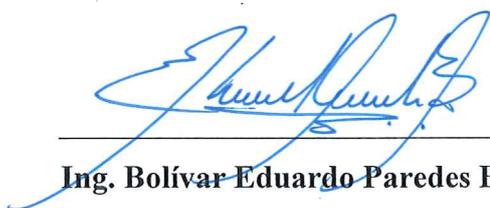
APROBACIÓN DE TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, con el tema: **“ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE ZEOLITA NATURAL TIPO CLINOPTILOLITA EN LA REDUCCIÓN DE COLORANTE REACTIVO NEGRO BODACTIVE WNN DE AGUAS RESIDUALES DE LAVADORAS DE JEANS.”**, elaborado por el Sr. José Rafael Espinoza Apráez, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1803848108, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente Trabajo Experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, febrero 2024



Ing. Bolívar Eduardo Paredes Beltrán, PhD.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **José Rafael Espinoza Apráez**, con C.I. 1803848108, declaro que todas la actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema **“ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE ZEOLITA NATURAL TIPO CLINOPTILOLITA EN LA REDUCCIÓN DE COLORANTE REACTIVO NEGRO BODACTIVE WNN DE AGUAS RESIDUALES DE LAVADORAS DE JEANS.”**, así como también los gráficos, análisis, tablas, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, febrero 2024



José Rafael Espinoza Apráez

C.I. 1803848108

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una garantía económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, febrero 2024



José Rafael Espinoza Apráez

C.I. 1803848108

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

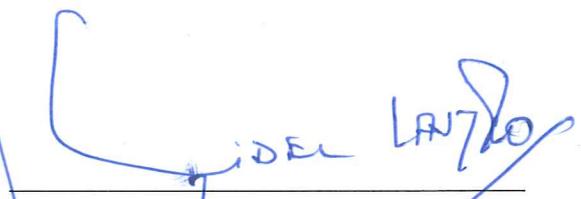
Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por el estudiante José Rafael Espinoza Apráez de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE ZEOLITA NATURAL TIPO CLINOPTILOLITA EN LA REDUCCIÓN DE COLORANTE REACTIVO NEGRO BODACTIVE WNN DE AGUAS RESIDUALES DE LAVADORAS DE JEANS.”**

Ambato, febrero 2024

Para constancia firman:



Ing. Fabián Rodrigo Morales Fiallos, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Fidel Alberto Castro Solórzano, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

El presente Trabajo Experimental se lo dedico a mi Familia que ha sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante, que a pesar de todo siempre ha estado dándome su mayor apoyo y amor sincero.

A mis Compañeros y Amigos, que en determinadas épocas de mi vida han sabido ser una fuente de cooperación para alcanzar mis objetivos y seguir adelante.

A mis Maestros, que con mucho afán y optimismo fueron capaces de compartir sus conocimientos y experiencias sin resguardo alguno.

A mi Universidad y Facultad, por permitirme culminar mi meta de ser un profesional íntegro capaz de construir un mejor futuro.

Y por último, mi más grande dedicatoria a Dios, por estar a mi lado a cada instante y darme fe de que todo va a estar bien.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que hicieron posible la realización de este Trabajo Experimental; desde el Personal Administrativo de mi Facultad, hasta mi Familia, que de una u otra forma han estado en esta fase de mi vida, permitiéndome alcanzar esta meta.

A mis Maestros, por su aporte de conocimientos en la rama de la hidráulica, en especial a mi Tutor, Ing. Bolívar Eduardo Paredes Beltrán PhD., por ser un excelente profesional y persona capaz de brindar su ayuda incondicional, convirtiéndose así en la pieza clave para terminar mi titulación.

A mi Universidad, mi Facultad y la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, por brindarme las herramientas necesarias para la culminación de mi trabajo experimental y darme la oportunidad de convertirme en Ingeniero Civil y una mejor persona.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN EJECUTIVO	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes Investigativos	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo General.....	7
1.3.2. Objetivos Específicos.....	7
CAPÍTULO II - METODOLOGÍA	8
2.1. Materiales	8
2.2. Métodos	12
2.2.1. Etapa I: Levantamiento de información y caracterización de la zeolita	12
2.2.2. Etapa II: Determinación del coeficiente de permeabilidad de la zeolita	16
2.2.3. Etapa III: Diseño de prototipo de filtro para el análisis comparativo entre la saturación y masa.	29
2.2.4. Etapa IV: Recolección de muestras para análisis espectrofotométrico	33

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
3.1. Análisis de los resultados.....	36
3.2. Discusión de los resultados.....	40
3.3. Verificación de hipótesis	42
3.3.1. Hipótesis nula.....	42
3.3.2. Hipótesis de trabajo.....	43
3.3.3. Verificación de la hipótesis.....	43
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
4.1. Conclusiones.....	44
4.2. Recomendaciones	45
MATERIALES DE REFERENCIA	47
ANEXOS	52
ANEXOS FOTOGRÁFICOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Materiales para el cumplimiento del objetivo 1.	8
Tabla 2: Materiales para el cumplimiento del objetivo 2.	9
Tabla 3: Materiales para el cumplimiento del objetivo 3.	10
Tabla 4: Materiales para el cumplimiento del objetivo 4.	11
Tabla 5: Juego de tamices utilizados para granulometría.	19
Tabla 6: Clasificación de los suelos según su coeficiente permeabilidad.	27
Tabla 7: Programación del periodo de toma de muestras de los filtros.	31
Tabla 8: Composición química de la zeolita estudiada.	37
Tabla 9: Clasificaciones visual, AASHTO y SUCS de la zeolita.	37
Tabla 10: Resumen de resultados del k.	38
Tabla 11: Resumen de resultados del $\omega\%$	38
Tabla 12: Resultados del método de saturación y masa.	39
Tabla 13: Resultados de espectrofotometría UV-Vis.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zeolita natural tipo clinoptilolita estudiada.	13
Figura 2: Microscopio electrónico de barrido marca Tescan, modelo Vega3.	14
Figura 3: Micrografía de la zeolita estudiada a 100 micrómetros (μm).	15
Figura 4: Difractograma de zeolita estudiada.	16
Figura 5: Tamizadora eléctrica.	20
Figura 6: Clasificación de los suelos granulares según la AASHTO.	21
Figura 7: Clasificación de los suelos según la SUCS.	22
Figura 8: Lavado manual de la zeolita.	23
Figura 9: Secado de zeolita en horno eléctrico.	24
Figura 10: Curva de tinturas con colorantes reactivos.	25
Figura 11: Características de permeabilidad y drenaje de los suelos.	27
Figura 12: Estructura del colorante reactivo negro.	28
Figura 13: Peso inicial de muestra A y su secado al horno.	31
Figura 14: Ensayos en el prototipo de filtro.	32
Figura 15: Toma de muestra y almacenamiento de las muestras.	33
Figura 16: Espectrofotómetro UV-Vis.	34
Figura 17: Cono de papel filtro para colocar muestra en la cubeta.	35
Figura 18: Micrografías con medición de partículas.	36

RESUMEN EJECUTIVO

La permeabilidad es una característica que tienen los materiales de dejar pasar un fluido a través de un medio filtrante, como la zeolita natural tipo clinoptilolita. El presente estudio pretende verificar si el coeficiente de permeabilidad (k) influye en la reducción del colorante negro reactivo WNN, el cual es un colorante de alto uso en la industria del jean, lo que genera grandes descargas de aguas residuales de dicho colorante sin un adecuado tratamiento.

Para analizar esta relación se efectuó ensayos de permeabilidad con distintas concentraciones de colorante con dosificaciones previamente estudiadas, seleccionando 1 g, 5.8 g y 10.6 g por cada 20 litros de agua cada uno. Además, se realizó un prototipo de filtro a escala que replique los volúmenes del permeámetro y nos permita tomar muestras para los análisis de líquido en espectrofotómetro UV-Vis y método de saturación y masa, a intervalos de 6 horas, hasta completar un día.

Se obtuvo una permeabilidad media, que no tuvo incidencia en la reducción del colorante, pero se constató que, a mayor concentración de colorante en el agua, menor coeficiente de permeabilidad, es decir, el líquido tarda más tiempo en pasar el volumen del material estudiado, sin embargo, la variación de tiempo es menor a un segundo, motivo por el cual no tiene mayor impacto. Por medio de los resultados del espectrofotómetro UV-Vis se visualizó que el material tarda aproximadamente 18 horas en saturarse y que la reducción del colorante es prácticamente nula.

Palabras clave: Zeolita, clinoptilolita, permeabilidad, espectrofotómetro, MEB.

ABSTRACT

Permeability is a characteristic of materials that allow a fluid to pass through a filter medium, such as the natural zeolite type clinoptilolite. The present study aims to verify if the permeability coefficient (k) influences the reduction of the reactive black dye WNN, which is a dye widely used in the jean industry, which generates large wastewater discharges of said dye without a adequate treatment.

To analyze this relationship, permeability tests were carried out with different concentrations of dye with previously studied dosages, selecting 1 g, 5.8 g and 10.6 g per 20 liters of water each. In addition, a scale filter prototype was made that replicates the volumes of the permeameter and allows us to take samples for liquid analysis in UV-Vis spectrophotometer and saturation and mass method, at intervals of 6 hours, until completing one day.

A medium permeability was obtained, which had no impact on the reduction of the dye, but it was found that, the higher the concentration of dye in the water, the lower the permeability coefficient, that is, the liquid takes longer to pass through the volume of the material studied. However, the time variation is less than one second, which is why it does not have a major impact. Through the results of the UV-Vis spectrophotometer, it was seen that the material takes approximately 18 hours to saturate and that the reduction of the dye is practically nil.

Keywords: Zeolite, clinoptilolite, permeability, spectrophotometer, SEM.

CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

En un ámbito global, el estudio de las propiedades de absorción de la zeolita clinoptilolita ha ganado relevancia, particularmente en la remoción de contaminantes de aguas residuales. Por ejemplo, la investigación desarrollada por Patricia Sáez González en 2021, como parte de su tesis en la Universidad Complutense de Madrid, se concentró en la eliminación de metales estratégicos en aguas residuales mediante la absorción con zeolitas naturales. El estudio arrojó como principal conclusión que las zeolitas naturales, especialmente la chabazita, son eficaces en adsorber metales como el cobalto y el galio. La chabazita se destacó por su baja relación entre el contenido de silicio y aluminio (Si/Al) y una elevada superficie específica, logrando una eliminación completa de estos metales a dosis bajas. Además, se sintetizaron exitosamente materiales híbridos a base de quitosán-clinoptilolita que mostraron selectividad hacia el cobalto, especialmente cuando la zeolita era tratada previamente con ácido clorhídrico (HCl) y operada a un potencial de hidrógeno (pH) de 4. Estos materiales híbridos también se caracterizaron por tener una capacidad de saturación más alta entre los adsorbentes ensayados, gracias a la contribución de los centros de absorción del quitosán y a su estructura tipo panal de abeja. Por otro lado, el análisis termodinámico demostró que la absorción de metales en la clinoptilolita es un proceso endotérmico y espontáneo, con una naturaleza fisicoquímica de las interacciones metal-adsorbente. Por último, el estudio destacó que las variables de flujo de efluente y masa de adsorbente son cruciales en la absorción continua, y que la reutilización del adsorbente es viable para el cobalto, pero no para el galio debido a su difícil desorción. Estos hallazgos proporcionan una base fundamental para comprender la aplicación global de las zeolitas en la remoción de metales de aguas residuales, resaltando su potencial en el tratamiento y gestión de recursos hídricos [1].

En un ámbito regional, la Universidad de Sonora de México realizó un estudio cuyo enfoque se basó en las propiedades de absorción de la clinoptilolita natural mexicana, específicamente tratada con plata para la remoción de diclorodifenildicloroetano (DDD) en aguas residuales. Este proyecto fue llevado a cabo por un equipo de investigación compuesto por Juana Alvarado-Ibarra, Karla Terán-Samaniego, Diana Vargas-Hernández y Ana Laura Bautista-Olivas, quienes se basaron en un enfoque

innovador para abordar este desafío ambiental. Durante el estudio, se utilizaron técnicas avanzadas como la microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (MEB-EDX) y el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET) para analizar tanto la muestra natural como la modificada con plata. Se encontró que la incorporación de plata en la zeolita mejoraba notablemente su eficiencia en la remoción del DDD, alcanzando un equilibrio en 180 minutos de contacto. Los resultados revelaron que el proceso de absorción seguía un patrón de absorción química, ajustándose al modelo de pseudo segundo orden, con coeficientes de determinación que oscilaron entre 0.9933 y 0.9997. Adicionalmente, las isotermas de absorción mostraron que la máxima eficiencia se obtenía a temperaturas más bajas, confirmando la naturaleza exotérmica del proceso. Este estudio, por lo tanto, proporcionó una base significativa para entender mejor la aplicación de la clinoptilolita en contextos ambientales, especialmente en la remoción de contaminantes en la industria textil y en la agricultura, destacando su relevancia en la ciencia ambiental a nivel global [2].

En el contexto local, el estudio de Diana Elizabeth Pérez Silva, realizado en 2017, se centró en la evaluación de la zeolita como filtro en el tratamiento de aguas residuales de la lavadora de autos "Ayuda al Campesino" en la parroquia La Matriz, cantón Quero, provincia de Tungurahua. Este análisis pionero demostró la eficacia de la zeolita en la remoción de contaminantes como la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO5), la demanda química de oxígeno (DQO), y aceites y grasas, superando significativamente los límites permisibles establecidos por el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). Se encontró que la zeolita, más del 60% de su volumen, fue efectiva en filtrar aceites y grasas, alcanzando un promedio de remoción del 68.31%. Además, la resistencia física de la zeolita fue confirmada por ensayos microestructurales, manteniendo áreas fijas significativas. Se observó una mejora en las características filtrantes de la zeolita con el tiempo, extendiendo su vida útil a más de 30 días en un ambiente controlado. La reducción de DBO5 y DQO durante el periodo de estudio cumplió con los estándares de TULSMA, mientras que el filtro de zeolita necesitó alrededor de 90 días para alcanzar los niveles permitidos de aceites y grasas. Además, se constató una disminución significativa en la conductividad y el color del agua tratada, manteniendo el pH dentro de los límites aceptables. Este estudio subraya la viabilidad y eficacia de

la zeolita como filtro en aplicaciones específicas de tratamiento de aguas residuales a nivel local, proporcionando una solución potencialmente sostenible para la gestión ambiental en pequeñas comunidades y empresas [3].

La revisión de los antecedentes investigativos a nivel macro, meso y micro revelan una tendencia global hacia la valorización de la zeolita clinoptilolita en el tratamiento de aguas residuales, destacando su versatilidad y eficiencia en la remoción de una amplia gama de contaminantes. A nivel global, estudios como el de la Universidad Complutense de Madrid demuestran la eficacia de las zeolitas naturales, especialmente la chabazita, en la absorción de metales estratégicos, resaltando la importancia de ciertas características como la relación Si/Al y la superficie específica. En un contexto regional, la investigación realizada en la Universidad de Sonora destaca cómo la modificación de la clinoptilolita, en este caso con plata, mejora significativamente su capacidad para eliminar contaminantes específicos como el DDD. Por otro lado, el estudio de Pérez en Tungurahua aporta una perspectiva local, mostrando la eficacia de la zeolita en aplicaciones específicas como el tratamiento de aguas residuales de lavadoras de autos, superando los límites permisibles de contaminantes establecidos por las normativas locales. Estos estudios, colectivamente, no solo subrayan la relevancia de la clinoptilolita como un medio eficaz para la purificación del agua, sino que también indican su potencial en aplicaciones ambientales específicas y su adaptabilidad a diferentes condiciones y requerimientos. Además, la capacidad de personalizar estas zeolitas para necesidades específicas, como se evidencia en el tratamiento con plata y la creación de materiales híbridos, abre posibilidades para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la remediación de aguas residuales. En resumen, estos antecedentes investigativos consolidan la posición de la zeolita clinoptilolita como un recurso valioso en el campo de la gestión ambiental y el tratamiento de aguas residuales.

1.2. Justificación

La crisis actual en torno a la contaminación de fuentes de agua representa un desafío significativo a escala global. Las políticas actuales de desarrollo y consumo han agotado nuestros recursos naturales, llevando a una sobreexplotación de acuíferos y a la contaminación generalizada de cuencas hídricas, impactando directamente en la disponibilidad de agua para usos básicos y actividades productivas. La situación se

agrava con el déficit masivo en el tratamiento de aguas residuales. Para el año 2002, alrededor de 2,600 millones de personas, el 42% de la población mundial, carecían de acceso a sistemas adecuados de tratamiento, debido principalmente por la explosión demográfica y los altos costos que implica la implementación de sistemas de tratamiento. Estudios posteriores revelan que, para el 2015, el uso extendido de aguas residuales se traduce en el consumo de alimentos regados con estas aguas en un 10% de la población mundial, además de la irrigación de 20 millones de hectáreas en 50 países con agua residual cruda o parcialmente tratada. Este problema no es exclusivo de ciertas regiones; afecta tanto a la población local como a los cursos de agua, expandiendo el alcance de la contaminación y socavando así fuentes vitales de agua dulce. La descarga descontrolada de aguas residuales, presente en más del 80% de los casos a nivel global, contamina ríos, lagos y zonas costeras, exponiendo a 1,800 millones de personas a fuentes de agua potable contaminadas, lo que resulta en más de 502,000 muertes anuales debido a enfermedades transmitidas por heces. Ejemplos como el caso de Chad, donde el 91% de la población se abastece de aguas contaminadas debido a la carencia de saneamiento, ilustran la gravedad de esta problemática. La presencia de agentes oxidantes y colorantes tóxicos en aguas residuales obstaculiza la capacidad de autoregeneración de los ríos, alterando la demanda química de oxígeno y afectando la vida marina en estos ecosistemas vulnerables. En este contexto crítico, se vuelve imperativo explorar métodos de tratamiento de aguas residuales que, además de minimizar la contaminación, permitan reutilizar el agua, restableciendo sus parámetros de calidad y contribuyendo así a mitigar esta crisis global de contaminación del agua [4] [5] [6].

A nivel nacional, en Ecuador la gestión de aguas residuales se ha visto restringida mayormente a la provisión, desatendiendo así la calidad del recurso. La carencia generalizada de sistemas de tratamiento de aguas residuales en casi todas las ciudades, a excepción de algunos sectores en Guayaquil y Cuenca, ha generado un problema de salud pública y pérdida de biodiversidad acuática significativa. La situación se agudiza en áreas críticas como Santa Bárbara Baja, al sur de Quito, con muestras que exceden en un asombroso 3,000% los límites permitidos para agua potable. En paralelo, la revisión y actualización de las normas de calidad ambiental y descarga de efluentes ha establecido criterios y límites permisibles para el vertido en cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado, buscando controlar y prevenir la contaminación del agua. La

contaminación del río Portoviejo en la provincia de Manabí, Ecuador, se ha convertido en un peligro para la salud de las comunidades locales, impulsando esfuerzos por parte de las autoridades gubernamentales para mitigar la contaminación amoniacal, enfrentando altos costos asociados al tratamiento con resinas artificiales. En este contexto, el uso de la zeolita como filtro para tratar aguas residuales se vislumbra como una solución viable y relevante. Los efluentes generados en Portoviejo, resultado inevitable de la actividad humana, provienen de diversas fuentes, desde escorrentías de tierras de cultivo hasta residuos industriales y domésticos, siendo el amoníaco uno de los principales contaminantes orgánicos. Esto ha llevado a la implementación de medidas para controlar y limitar sus concentraciones en los vertidos. La aplicación de la zeolita en la remediación de aguas residuales en este contexto local puede ofrecer una solución práctica y efectiva para mitigar la contaminación amoniacal, mostrándose como una alternativa más accesible y sostenible en comparación con métodos tradicionales más costosos. Además, el marco regulatorio establecido por las normas ambientales busca la protección del recurso agua, destacando la responsabilidad de las autoridades locales en la solución de problemas de contaminación y la importancia de la implementación de planes de manejo ambiental para controlar la contaminación del agua. En este escenario, se busca evitar conflictos de interés, especialmente cuando los municipios son prestadores de servicios de control de contaminación, instando a que no ejerzan como Entidades Ambientales de Control para sus propias instalaciones, con el fin de garantizar una gestión transparente y eficaz de la problemática ambiental [7] [8].

En la provincia de Tungurahua, la industria textil representa un pilar económico clave para el país, generando empleo, ingresos fiscales y un considerable impacto en la economía local. Con más de 2 millones de prendas confeccionadas mensualmente en 46 establecimientos, esta industria representa una importante fuente de empleo, generación de ingresos y aportes fiscales para la región. Sin embargo, esta destacada actividad no está exenta de consecuencias ambientales negativas, principalmente debido a la descarga de aguas residuales contaminadas con químicos dañinos utilizados en los procesos de lavado, teñido y acabado de las prendas, especialmente en las lavadoras de jeans. Este vertido de aguas residuales con altos contenidos de colorantes plantea un desafío ambiental urgente que requiere métodos de tratamiento efectivos. En este contexto, las zeolitas han sido identificadas como una posible

solución, gracias a su capacidad comprobada para retener colorantes al ser empleadas como medio de filtración. A pesar de los beneficios económicos que brinda la industria textil en Tungurahua, es imperativo abordar de manera efectiva y urgente la gestión de aguas residuales contaminadas para mitigar su impacto nocivo en los ecosistemas acuáticos locales y preservar la sostenibilidad ambiental en la región [9] [10] .

La crisis de contaminación del agua representa un desafío urgente a nivel global, con impactos significativos en Ecuador y específicamente en la provincia de Tungurahua. La sobreexplotación de acuíferos y la falta de tratamiento de aguas residuales han llevado a una situación crítica. Sin embargo, la adopción de soluciones sostenibles es clave para revertir esta tendencia. En este contexto, la zeolita natural tipo clinoptilolita ha surgido como una alternativa prometedora para contrarrestar la contaminación del agua. Su capacidad para reducir colorantes en aguas residuales de lavadoras de jeans plantea una oportunidad valiosa para mitigar la contaminación en la provincia de Tungurahua. Por las grandes cualidades descritas anteriormente, la presente investigación tomará la zeolita natural tipo clinoptilolita para la reducción del colorante reactivo Negro Bodactive WNN en soluciones acuosas por medio del análisis de su coeficiente de permeabilidad K, ya que esta clase de colorantes se utilizan frecuentemente en la industria del jean, los cuales generan aguas residuales con gran carga contaminante. Además, se pretende que los datos obtenidos sirvan de aporte para investigaciones posteriores en el ámbito de la reducción de colorantes con zeolita. Por lo tanto, al incorporar soluciones innovadoras como la zeolita, Ecuador podría avanzar significativamente en la reducción de la contaminación del agua, preservando así los recursos hídricos vitales para la sostenibilidad ambiental y el bienestar de sus comunidades locales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Analizar el Coeficiente de Permeabilidad de la Zeolita Natural tipo Clinoptilolita en la reducción de colorante reactivo Negro Bodactive WNN de aguas residuales de Lavadoras de Jeans.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar morfológica y químicamente la zeolita natural tipo clinoptilolita.
- Determinar el coeficiente de permeabilidad de la zeolita natural tipo clinoptilolita para soluciones acuosas de colorante Negro Bodactive WNN.
- Analizar la reducción del colorante mediante el método de saturación y masa de la zeolita.
- Establecer la cantidad y tiempo de funcionamiento del material estudiado.

CAPÍTULO II - METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Por medio de los objetivos específicos planteados se obtuvieron los distintos materiales que se detallan a continuación:

Materiales para el cumplimiento del objetivo 1

Objetivo: Caracterizar morfológica y químicamente la zeolita natural tipo clinoptilolita.

Para la caracterización morfológica de la zeolita natural clinoptilolita se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y para su composición química la información del Reporte de Resultados de Análisis Mineralógico efectuado por el Laboratorio de Análisis de Materiales (DifracLab), ubicado en Monterrey (México), donde se muestra los elementos químicos de la zeolita estudia por medio del análisis de Difracción de Rayos X (DRX), dicho esto, se ocupó los siguientes materiales:

Tabla 1: Materiales para el cumplimiento del objetivo 1.

Ensayo	Materiales	Descripción
Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	<ul style="list-style-type: none"> • Zeolita natural tipo clinoptilolita. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Zona Industrial, San Luis Potosí, México. • Marca: Zeomedia 12-20. • Tamaño: Partículas que pasan tamiz #200. • Cantidad: 1 cm³
	<ul style="list-style-type: none"> • Portamuestras estándar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio Metalografía SEM de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Dimensiones: Diámetro 12.5 mm y altura 3 mm.
	<ul style="list-style-type: none"> • Cinta conductora doble cara. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio Metalografía SEM de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Tipo: Carbono.
	<ul style="list-style-type: none"> • Microscopio electrónico de barrido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio Metalografía SEM de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Marca: Tescan. • Modelo: Vega3.

Fuente: Autor.

Materiales para el cumplimiento del objetivo 2

Objetivo: Determinar el coeficiente de permeabilidad de la zeolita natural tipo clinoptilolita para soluciones acuosas de colorante Negro Bodactive WNN.

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad K de la zeolita natural clinoptilolita se realizó una granulometría para comprobar que el tamaño de partículas es óptimo para el permeámetro de carga constante y se ensayó las distintas disoluciones de colorante con las mismas cantidades de zeolita, utilizando así los siguientes materiales:

Tabla 2: Materiales para el cumplimiento del objetivo 2.

Ensayo	Normativa	Materiales	Descripción
Granulometría	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D 421-58 • ASTM D 422-63 • AASHTO T-87-70 • AASHTO T-88-70 	<ul style="list-style-type: none"> • Juego de tamices. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Tipo: Metálicos. • Geometría: Redondos. • Dimensión: Diámetro 23.5 cm. • Aberturas: Tapa, # 4, # 8, # 10, # 16, # 30, # 40, # 50, # 60, # 100, # 200 y fuente.
		<ul style="list-style-type: none"> • Tamizadora vibratoria eléctrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Marca: Controls. • Modelo: Automatic D407.
Permeabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D-2434-68 • AASHTO T-125-66 • BS 1377:5 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeolita natural tipo clinoptilolita. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Zona Industrial, San Luis Potosí, México. • Marca: Zeomedia 12-20. • Tamaño: Predominan partículas que pasan tamiz # 12 y se retienen en tamiz # 20. • Cantidad: 30 cm de longitud y 11.4 cm de diámetro para cada ensayo.
		<ul style="list-style-type: none"> • Colorante reactivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Seyquín Cía. Ltda., Parque Industrial, Ambato, Ecuador. • Tipo: Colorante reactivo Negro Bodactive WNN. • Cantidad: 1.0 g, 5.8 g y 10.6 g disueltos en 20 litros de agua cada uno.
		<ul style="list-style-type: none"> • Permeámetro de carga constante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Marca: Controls. • Modelo: 38-T0184/B1. • Geometría: Cilíndrica.

Fuente: Autor.

Materiales para el cumplimiento del objetivo 3

Objetivo: Analizar la reducción del colorante mediante el método de saturación y masa de la zeolita.

Para analizar la reducción del colorante nos centramos en el contenido de humedad que puede captar la zeolita y posteriormente en la masa que tiene antes y después de estar en contacto con el colorante disuelto, en distintos tiempos de saturación y concentración, para lo cual se elaboró un prototipo de filtro que nos sirve también para cubrir el próximo objetivo; a continuación, se detalla los materiales:

Tabla 3: Materiales para el cumplimiento del objetivo 3.

Ensayo	Normativa	Materiales	Descripción
Contenido de humedad	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM S 2216-71 • AASHTO T 217-67 • INEN 690 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeolita natural tipo clinoptilolita. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Zona Industrial, San Luis Potosí, México. • Marca: Zeomedia 12-20. • Tamaño: Predominan partículas que pasan tamiz # 12 y se retienen en tamiz # 20. • Cantidad: 270 g.
		<ul style="list-style-type: none"> • Balanza electrónica de precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Precisión: 0.001 g (milésima de gramo). • Capacidad: 300 g.
		<ul style="list-style-type: none"> • Horno eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Marca: GCA Corporation. • Modelo: Precision. • Temperatura: Regulable hasta 325 °C.
Método de saturación y masa	-	<ul style="list-style-type: none"> • Zeolita natural tipo clinoptilolita. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Zona Industrial, San Luis Potosí, México. • Marca: Zeomedia 12-20. • Tamaño: Predominan partículas que pasan tamiz # 12 y se retienen en tamiz # 20. • Cantidad: 270 g.
		<ul style="list-style-type: none"> • Colorante reactivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Seyquiin Cía. Ltda., Parque Industrial, Ambato, Ecuador. • Tipo: Colorante reactivo Negro Bodactive WNN. • Cantidad: 100 mg, 580 mg y 1060 mg disueltos en 2 litros de agua cada uno.
		<ul style="list-style-type: none"> • Filtro casero. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Prototipo de filtro planteado. • Tipo: Plástico transparente grueso. • Tamaño: 500 ml.
		<ul style="list-style-type: none"> • Balanza electrónica de precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Precisión: 0.001 g (milésima de gramo). • Capacidad: 300 g.
		<ul style="list-style-type: none"> • Horno eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Marca: GCA Corporation. • Modelo: Precision. • Temperatura: Regulable hasta 325 °C.

Fuente: Autor.

Materiales para el cumplimiento del objetivo 4

Objetivo: Establecer la cantidad y tiempo de funcionamiento del material estudiado.

Se diseñó un prototipo de filtro para realizar ensayos con distintas concentraciones del colorante en contacto con la zeolita, se tomó muestras del líquido filtrado en distintos tiempos para ser analizadas en un espectrofotómetro UV-Vis, los materiales se enlistan a continuación:

Tabla 4: Materiales para el cumplimiento del objetivo 4.

Ensayo	Materiales	Descripción
Espectrofotometría UV-Vis	<ul style="list-style-type: none"> • Zeolita natural tipo clinoptilolita. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Zona Industrial, San Luis Potosí, México. • Marca: Zeomedia 12-20. • Tamaño: Predominan partículas que pasan tamiz # 12 y se retienen en tamiz # 20. • Cantidad: 270 g.
	<ul style="list-style-type: none"> • Colorante reactivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Seyquiin Cía. Ltda., Parque Industrial, Ambato, Ecuador. • Tipo: Colorante reactivo Negro Bodactive WNN. • Cantidad: 100 mg, 580 mg y 1060 mg disueltos en 2 litros de agua cada uno.
	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro casero. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Prototipo de filtro planteado. • Tipo: Plástico transparente grueso. • Tamaño: 500 ml.
	<ul style="list-style-type: none"> • Balanza electrónica de precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Precisión: 0.001 g (milésima de gramo). • Capacidad: 300 g.
	<ul style="list-style-type: none"> • Horno eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Marca: GCA Corporation. • Modelo: Precision. • Temperatura: Regulable hasta 325 °C.
	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrofotómetro UV-Vis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Origen: Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). • Marca: Fisher Scientific. • Modelo: accuSkan GO.

Fuente: Autor.

2.2. Métodos

Para el presente proyecto de investigación, la metodología se desarrolló en cuatro etapas secuenciales: Etapa I, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con la zeolita natural tipo clinoptilolita y su aplicación en la reducción de colorante reactivo de aguas residuales, además se seleccionó la zeolita para conocer su caracterización morfológica y química, con ayuda del MEB y DRX respectivamente. En la Etapa II, se preparó la zeolita para ejecutar los ensayos de permeabilidad con ayuda del permeámetro de carga constante, para lo cual se instaló correctamente el equipo en el Laboratorio de Hidráulica y para garantizar su altura de carga hidráulica con las soluciones acuosas de colorante se instaló un balde de 20 litros de capacidad. La Etapa III, consiste en el diseño de un prototipo de filtro que replique aproximadamente las mismas cantidades de zeolita y agua con colorante usadas en los ensayos de permeabilidad, con dicho material resultante de la filtración se pretende analizar la masa en distintos tiempos de saturación. Finalmente, en la Etapa IV, se procedió a recolectar muestras de todas las filtraciones realizadas para posteriormente ser ensayadas en un espectrofotómetro UV-Vis y evaluar los resultados de la reducción del colorante en función de la concentración inicial, el tiempo y la cantidad de zeolita.

2.2.1. Etapa I: Levantamiento de información y caracterización de la zeolita

El objetivo principal de esta etapa fue establecer una sólida base de conocimiento teórico y técnico que respalde las investigaciones subsiguientes y permita una comprensión completa de las propiedades de la zeolita y su potencial de aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales, por otra parte, una vez elegida la zeolita poder analizar su estructura y composición química.

Zeolita natural

Las zeolitas naturales son cristales minerales de aluminosilicatos hidratados con cationes alcalinos o alcalino térreos que tienen alta capacidad de intercambio catiónico y de hidratación y deshidratación sin modificar su estructura porosa tridimensional con canales internos. Por estas características las zeolitas son minerales con la más amplia diversidad de usos, entre ellos el uso como filtro [11]. Las zeolitas fueron reconocidas como un grupo mineral por el geólogo sueco A. F. Cronstedt en 1756. Su nombre se deriva de las palabras griegas zeo (que hierve) y lithos (piedra). Cronstedt denominó al

nuevo grupo mineral como zeolitas, que significa “piedra que hierve”, porque al calentar los cristales con un mechero se produjo burbujeo y espuma. La propiedad del intercambio de iones de las zeolitas fue reportada por primera vez por Damour en 1840, quien mostró que estos minerales podrían ser reversiblemente deshidratados sin cambios aparentes en su transparencia o morfología cristalina [12].

Los yacimientos de zeolita se encuentran en cavidades de rocas basálticas que se formaron a partir de la interacción de la ceniza volcánica con el agua de mar y de lagos salinos que se solidificaron y mineralizaron en un periodo de millones de años [13]. Los yacimientos de zeolita natural se han descubierto en EE. UU., Cuba, Japón, Grecia, Ucrania, Ecuador, México, Canadá, Italia, Alemania, Hungría, África del Sur, Nueva Zelanda, Argentina, Australia, Indonesia, entre otros. Cada yacimiento contiene zeolitas de diferente tipo mezcladas en diversas proporciones con otros materiales. En general, dependiendo de su origen, las zeolitas presentan diferentes características y propiedades que es necesario conocer para determinar los usos que se les puede dar [14].

Se procedió seleccionar la zeolita natural tipo clinoptilolita de marca comercial Zeomedia 12-20, la cual se utiliza como medio filtrante para la remoción de partículas hasta 4 micras presentes en aguas residuales, su procedencia es de la Zona Industrial de San Luis Potosí en el país de México, en la actualidad distribuye su materia prima a distintos países entre estos Ecuador por medio de la empresa Puritech S.A. que se encuentra ubicada en el sector de Cunchibamba, Ambato, Ecuador.

Figura 1: Zeolita natural tipo clinoptilolita estudiada.



Fuente: Autor.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La MEB comúnmente conocida por sus siglas en inglés como SEM (Scanning Electron Microscopy), nos permite observar a gran aumento y con una nitidez de imagen estable la muestra ubicada en la cámara del microscopio, mediante electrones disparados a una gran aceleración que barren el objetivo, las imágenes se visualizan en un ordenador por medio del software que controla el microscopio [15]. La preparación de muestras es simple, solo se requiere que sea conductora y sólida, de no ser el caso la muestra se recubre con una delgada capa de carbón o un metal conductor como oro, la zeolita se considera un material no conductor [16].

Figura 2: Microscopio electrónico de barrido marca Tescan, modelo Vega3.

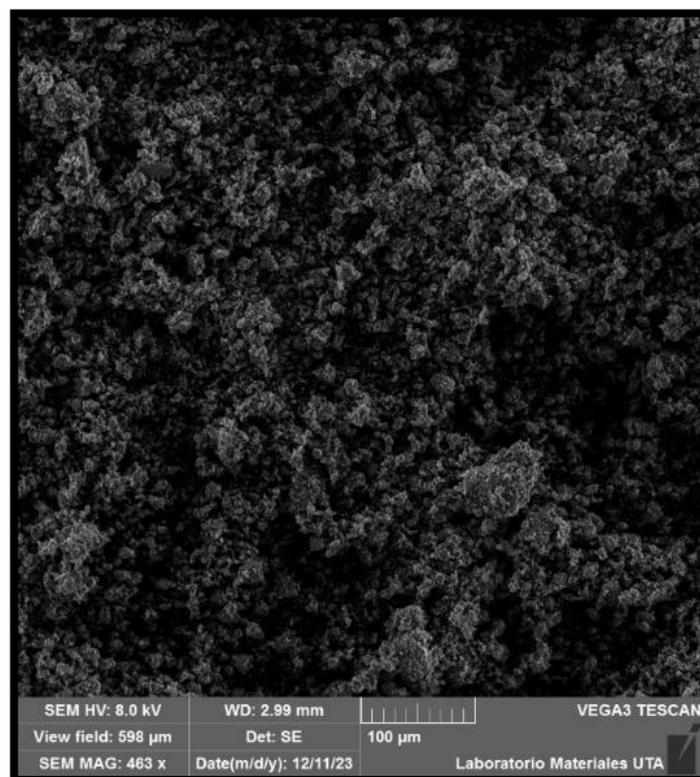


Fuente: Autor.

Para realizar el ensayo de MEB se necesita una muestra no alterada de zeolita, para lo cual implementamos la metodología utilizada en investigaciones previas [17] [18], que nos detallan que para obtener la muestra se procede a tamizar 1000 g del material, luego de ser secado por 24 horas en el horno eléctrico a una temperatura constante de 105 °C, con la finalidad que esté totalmente seco y las partículas no se adhieran al tamiz. Se recolecta la muestra tamizada de la fuente, es decir las partículas que pasaron el tamiz # 200 del ensayo granulométrico. En caso de no obtener un volumen mínimo de 1 cm³ de zeolita, se tamiza más muestra para conseguirlo. Una vez conseguida la cantidad necesaria de zeolita natural tipo clinoptilolita se la coloca dentro de dos fundas herméticas pequeñas con zipper para garantizar que se mantenga seca. Trasladamos la muestra al Laboratorio Metalografía SEM de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UTA para realizar el ensayo y adquirir la caracterización morfológica.

Se extrae el portamuestras del microscopio y se coloca cinta conductora doble cara de carbono en la parte superior, se pone la muestra con ayuda de la cuchara dosificadora en la cinta, procurando cubrir toda su área y sin abultar partículas para una mejor visualización. Se instala el portamuestras en el microscopio, se cierra para generar el vacío al encenderlo, precalentando el filamento y centrando la muestra, este proceso dura aproximadamente 10 minutos para así poder visualizar la imagen en el ordenador mediante el software incorporado. Se observa la muestra y se obtienen imágenes a distintos aumentos para poder medir las partículas en el programa y realizar un correcto análisis de su morfología.

Figura 3: Micrografía de la zeolita estudiada a 100 micrómetros (μm).



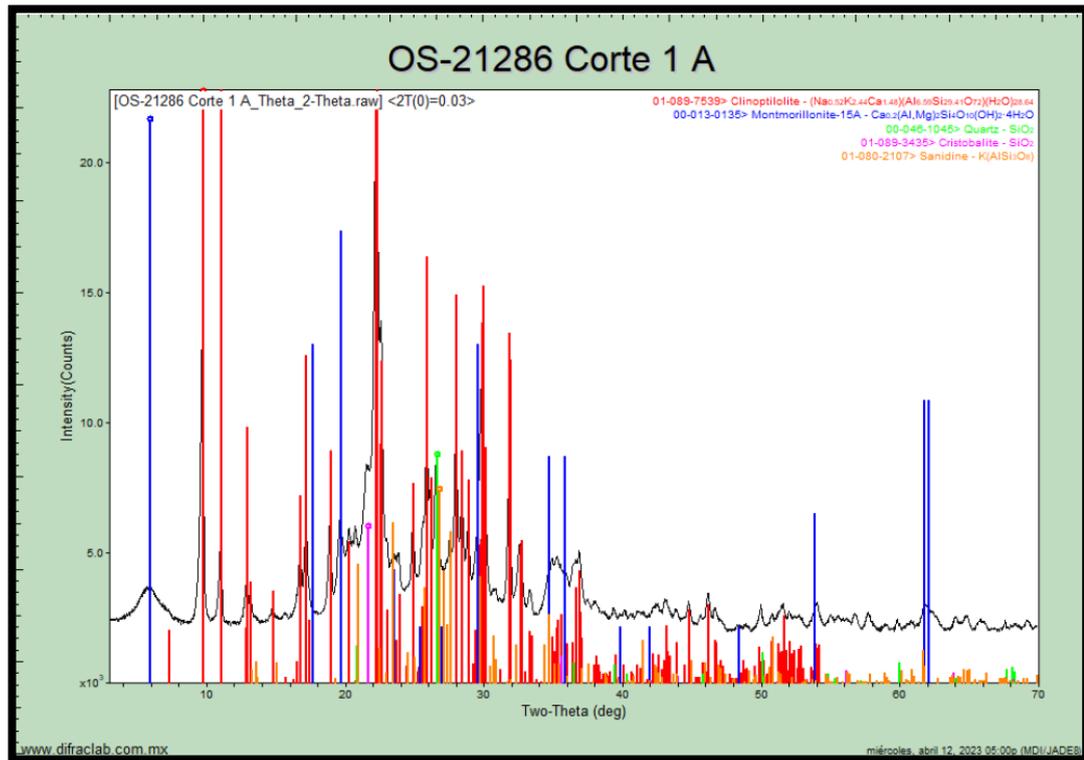
Fuente: Autor.

Difracción de Rayos X (DRX)

La DRX es una herramienta utilizada para el análisis de la composición química de cualquier sólido cristalino, entre ellos los suelos. Es una técnica de caracterización a escala nanométrica que proporciona información valiosa para la evolución y conocimiento de los materiales [19]. Para analizar la muestra se necesita tamizarla para conseguir tamaños de partículas alrededor de 0.074 mm (tamiz # 200) y así brindarnos un adecuado análisis mineralógico [20].

La empresa mexicana Zeomex proporcionó el reporte de resultados de los análisis mineralógicos de la zeolita natural tipo clinoptilolita que se está utilizando en el presente trabajo, estos estudios se los realizó en los laboratorios de DifraLab S.A. de Moterrey, México y se adjuntan en el Anexo 4.

Figura 4: Difractograma de zeolita estudiada.



Fuente: Zeomex.

2.2.2. Etapa II: Determinación del coeficiente de permeabilidad de la zeolita

En esta etapa se pretende conocer el comportamiento de soluciones acuosas de colorante reactivo al pasar por un volumen de zeolita, para conocer si la permeabilidad tiene una variación al contener mayor concentración de colorantes.

Coeficiente de permeabilidad k

Esta regla técnica ha sido aplicada para predecir y evaluar el paso de fluidos a través de materiales de diferentes granulometrías, cuarteo y caracterización, como pueden ser partículas fracturadas, arcillas, limos, arenas y gravas de diferentes materiales. Surge de allí la cuestión de la validez de la extensión de esta regla técnica para definir las clases de materiales como la arena, la grava y fluidos diferentes al agua [21].

Orígenes de los estudios de permeabilidad

Es de gran interés en la mecánica de suelos, está gobernado por una ley descubierta en 1865 por Henry Darcy quien investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados precisamente por materiales térreos lo cual es particularmente afortunado para la aplicación de los resultados de la investigación a la mecánica de suelos.

Permeabilidad en los Suelos

Se entiende por permeabilidad a la facilidad de movimiento de flujo a través de un medio poroso, esto permite clasificar los suelos en: suelos permeables y suelos impermeables, La permeabilidad puede definirse como velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario. El valor del coeficiente de permeabilidad (k) se usa como una medida de resistencia al flujo medida por el suelo.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a las características del agua circulante. Los factores principales son:

- La densidad del suelo.
- La relación de vacíos del suelo.
- La estructura y estratificación del suelo.
- La existencia de agujeros o fisuras en el suelo.
- La viscosidad del agua que varía con la temperatura [22].

Los factores más importantes que intervienen en la permeabilidad son los siguientes:

- **La relación de vacíos del suelo.** El espacio de los vanos es proporcional al tamaño de la partícula. En otras palabras, a mayor tamaño mayor cantidad de vanos [23].
- **La estructura y estratificación del suelo.** En un suelo se pueden encontrar diferentes permeabilidades en estado inalterado y alterado, aun cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos; esto puede ser debido a los cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o una combinación de los factores [24].
- La permeabilización sufre variaciones debido a que al momento de ser alterados quedan libres algunas partículas del suelo y al fluir el agua, esta las mueve y las

reacomoda, tapando los canales o arrastrándolas a la superficie o al exterior de la muestra causando turbidez en el agua [25].

- **Tamaño de las partículas.** La permeabilidad de un suelo será más baja cuando más pequeñas sean sus partículas y por ende menor serán los vacíos que forman los canales de flujo [26].
- El intervalo de los valores del coeficiente de permeabilidad k es muy amplio y se extiende desde 102 cm/s para las gravas de granos muy gruesos, hasta un valor insignificante en el caso de arcillas [27].

Para determinar el coeficiente de permeabilidad utilizamos un permeámetro de carga constante, que nos permite conocer las propiedades hidráulicas de la muestra bajo distintas disoluciones de colorante. Este método se basa en la Ley de Darcy, donde tenemos una muestra saturada de sección transversal (A) y longitud (L), por la cual pasa un líquido a una velocidad constante y se realiza mediciones del volumen y temperatura del fluido en un determinado tiempo (t).

Se realiza una granulometría en base a la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, más conocida por sus siglas en inglés como ASTM (American Society for Testing and Materials), y la Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras y Transporte, AASHTO (Association of State Highway and Transportation Officials), en sus normas D 421-58, D 422-63 y T-87-70, T-88-70, respectivamente, nos permiten determinar una correcta granulometría de la muestra y evitar que el permeámetro se tape por un exceso de finos o que contenga partículas muy grandes. Para lo cual se recomienda que el 100% de la muestra pase el tamiz # 4, menos del 35% de la muestra se debe retener entre el tamiz # 4 y # 10, por último, no más del 10% debe pasar el tamiz # 200. Se aprovechó ejecutando una granulometría más completa para conocer la clasificación que tiene el material.

Análisis mecánico o granulometría

Consiste en la separación de las partículas del suelo por tamaños con ayuda de una serie de tamices. Para realizar el ensayo en suelos arenosos se requiere una cantidad entre 500 a 1000 g y la utilización de tamices que van desde el # 4 (4.760 mm) hasta el # 200 (0.074 mm) [28].

Tabla 5: Juego de tamices utilizados para granulometría.

Tamiz (#)	Abertura (mm)
4	4.760
8	2.380
10	2.000
16	1.190
30	0.595
40	0.420
50	0.297
60	0.250
100	0.149
200	0.074

Fuente: Autor.

Una vez obtenida la zeolita natural tipo clinoptilolita se procede a pesar en la balanza eléctrica 1200 g dentro de recipientes de aluminio grandes, una cantidad superior a la muestra requerida para el ensayo granulométrico, con la intención que al ser secada obtengamos los 1000 g necesarios. Precedemos a secar la muestra en el horno eléctrico a una temperatura constante de 105 °C por 24 horas. Con ayuda de los guantes termoprotectores sacar los recipientes del horno y dejar enfriar la muestra durante 5 minutos, mientras armamos el juego de tamices desde la malla más grande (arriba tamiz # 4) a la más pequeña (abajo tamiz # 200), verificando que estén totalmente limpios y en buen estado, no olvidar colocar la fuente en la base. Pesamos 1000 g de material seco y lo depositamos en la parte superior del juego de tamices con ayuda de una pala jardinera y una brocha para evitar derrames, una vez colocada la muestra procedemos a tapar y tamizar por 30 minutos en la tamizadora vibratoria eléctrica correctamente asegurada. Transcurrido el tiempo dejamos reposar por 5 minutos para que el material más fino se asiente y así poder pesar el material retenido en cada uno de los tamices y la fuente, con ayuda de los recipientes y la balanza. Los pesos pueden ser acumulados, pero se recomienda usar recipientes individuales para cada fracción de suelo de los distintos tamices para repetir el pesaje en caso de error y procurando que todas las partículas sean depositadas en el recipiente con ayuda de la brocha. Se anotan todos los pesos retenidos para realizar el gráfico de la distribución granulométrica y clasificar el suelo según las normas.

Figura 5: Tamizadora eléctrica.



Fuente: Autor.

Conseguida la curva se determina sus parámetros granulométricos que nos dan información completa del material para su posterior clasificación, a continuación, se da una breve explicación de estos: [29]

El Tamaño Nominal Máximo (TNM) son las partículas de mayor tamaño presentes en la muestra, se cataloga como el 5% del grupo de partículas grandes del total de la muestra.

El Diámetro Efectivo (D10) es el grupo de partículas que simbolizan el 10% del material que pasa, el Diámetro Equiparable (D30) se convierte en el 30% de material que pasa y el Diámetro Dimensional (D60) el 60% del mismo.

El Coeficiente de Uniformidad (Cu) fue planteado por William Hazen y nos dice que, si el número decrece, la uniformidad aumenta. Si el resultado es mayor a 3 el suelo tiende a ser heterogéneo, por el contrario, si es menor que 3 sería homogéneo.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 1

Donde:

D_{60} = Diámetro dimensional (mm).

D_{10} = Diámetro efectivo (mm).

C_u = Coeficiente de uniformidad (adimensional).

El Coeficiente de Curvatura (C_c) nos permite conocer la graduación de la muestra. Si el valor está entre 1 y 3 el suelo es bien graduado, si está fuera del rango sería mal graduado.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Ecuación 2

Donde:

D_{30} = Diámetro equiparable (mm).

D_{60} = Diámetro dimensional (mm).

D_{10} = Diámetro efectivo (mm).

C_c = Coeficiente de curvatura (adimensional).

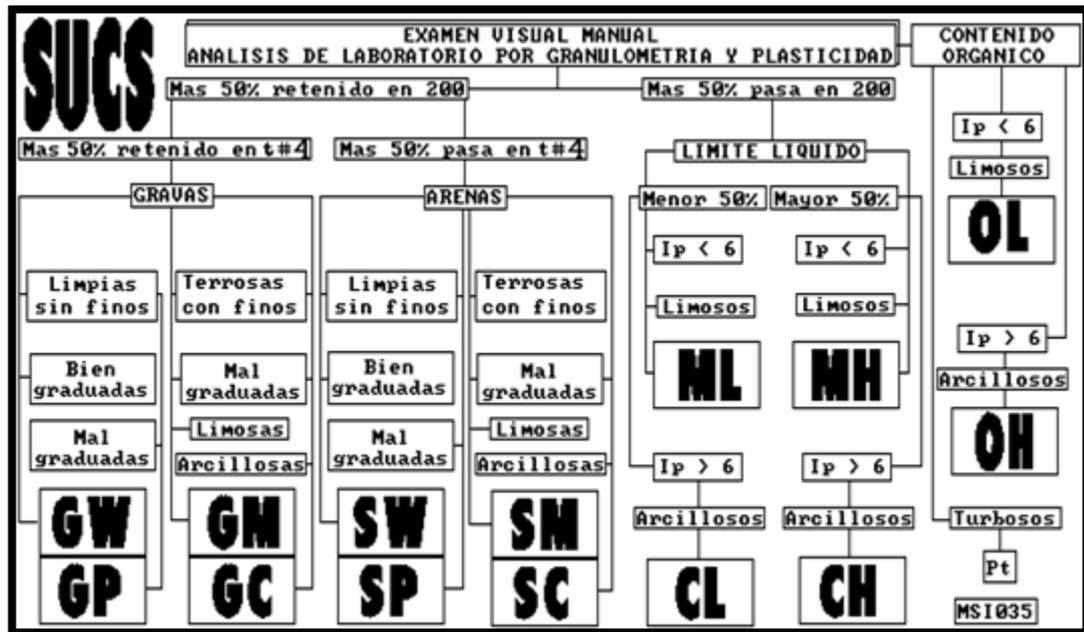
Para la clasificación del suelo analizado se utilizan las siguientes gráficas del AASHTO y SUCS:

Figura 6: Clasificación de los suelos granulares según la AASHTO.

AASHTO	CLASIFICACIÓN EN GRUPOS Y SUBGRUPOS DE SUELOS DE LA AASHTO						
	MATERIALES GRANULARES Más del 35% retenido en tamiz #200						
GRUPOS	A-1		A-2				A-3
Subgrupos	A-1-a	A-1-b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	
% Pasa Tamiz # 10 # 40 # 200	50 máx 30 máx 15 máx	50 máx 25 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	51 mín 10 máx
Plasticidad Límite Líquido Índice Plástico	6 máx	6 máx	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	N.P.
Índice Grupo	0	0	0	0	4 máx	4 máx	0
Tipos de Material	Fragmentos de piedra, gravas y arenas		Gravas y arenas, limosas y arcillosas				Arena fina
Terreno de Fundación	Excelente a bueno		Excelente a bueno		Regular		Excelente a bueno

Fuente: ASSHTO.

Figura 7: Clasificación de los suelos según la SUCS.



Fuente: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Una vez seleccionado el permeámetro de carga constante se procedió a la limpieza e instalación en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil, procurando que la altura de carga hidráulica al recipiente del permeámetro sea mayor que la altura de carga hidráulica del permeámetro, con la finalidad de que el caudal de entrada sea mayor que el de salida, garantizando así una carga constante para el ensayo. Para la instalación del permeámetro se fijó un recipiente de 20 L de capacidad sobre una base a una altura superior al recipiente de atura constante para garantizar los niveles antes mencionados, se seleccionó ese volumen de recipiente para tener la cantidad suficiente de líquido para los ensayos. Luego de la instalación del permeámetro se efectúan ensayos de prueba sin un medio filtrante para garantizar el correcto funcionamiento de la carga constante y evitar errores en los resultados que se obtengan al incorporar la zeolita. La instalación del permeámetro se la detalla en el Anexo 6.

Se procede con la ejecución del ensayo de permeabilidad con la muestra sin retrolavado, con retrolavado y con tres disoluciones. Para la determinación de la cantidad de colorante reactivo presente en aguas residuales de lavadoras de jeans nos basamos en investigaciones previas, donde se destacó que la concentración más baja

es de 50 mg/L y la más alta de 530 mg/L [30] [31]. Elegimos ambas relaciones y añadimos una intermedia, como se muestra a continuación:

Disolución baja

$$\frac{50 \text{ mg}}{1 \text{ L}} = \frac{1000 \text{ mg}}{20 \text{ L}} = \frac{1.0 \text{ g}}{20 \text{ L}}$$

Disolución media

$$\frac{290 \text{ mg}}{1 \text{ L}} = \frac{5800 \text{ mg}}{20 \text{ L}} = \frac{5.8 \text{ g}}{20 \text{ L}}$$

Disolución alta

$$\frac{530 \text{ mg}}{1 \text{ L}} = \frac{10600 \text{ mg}}{20 \text{ L}} = \frac{10.6 \text{ g}}{20 \text{ L}}$$

Pesamos las cantidades de colorante en una balanza eléctrica de precisión 0.001 g con ayuda de un recipiente de aluminio pequeño del cual se desprecia su peso al encerrarlo sobre la balanza, garantizando que los gramos añadidos sean los correctos. Se coloca las porciones en fundas herméticas pequeñas con zipper, hasta realizar las respectivas disoluciones para cada ensayo de permeabilidad.

Para simular el retrolavado y enjuague que se le aplica a la zeolita para su limpieza y eliminación de sedimentos, procedemos a lavar el material en recipientes con ayuda de una manguera, guantes y una pala hasta conseguir que el agua salga clara.

Figura 8: Lavado manual de la zeolita.



Fuente: Autor.

El ensayo de permeabilidad se lo puede realizar con muestra previamente saturada, pero para tener datos más precisos se procedió a secar el material lavado en el horno eléctrico por 24 horas a temperatura constante de 105 °C.

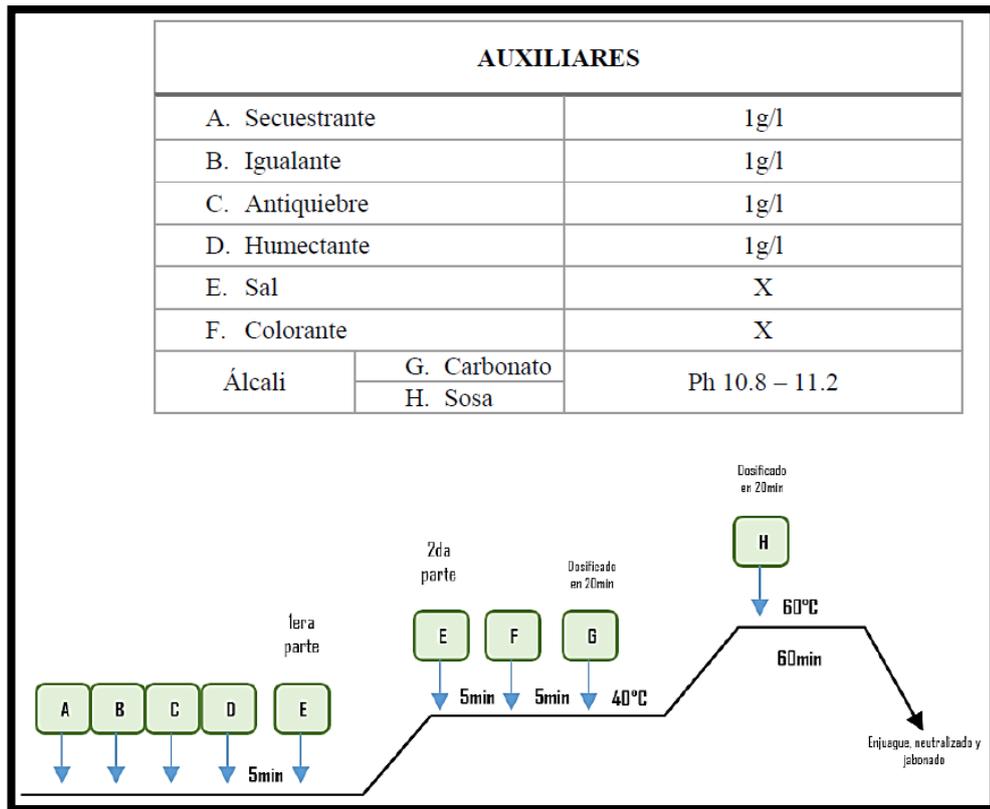
Figura 9: Secado de zeolita en horno eléctrico.



Fuente: Autor.

Se realizaron los ensayos correspondientes para obtener el coeficiente de permeabilidad de la zeolita sin retrolavado, con retrolavado y sus tres soluciones acuosas. Para los análisis que requirieron el colorante reactivo negro bodactive WNN, se utilizó una cocineta a gas para precalentar en un recipiente un litro de agua hasta alcanzar una temperatura de 40 °C, con ayuda de un termómetro verificamos que se mantenga así por 5 minutos luego de añadir el colorante y se remueve para garantizar una disolución correcta, el tiempo y temperatura necesaria se obtuvo del siguiente gráfico otorgado por el proveedor del colorante.

Figura 10: Curva de tinturas con colorantes reactivos.



Fuente: Seyquín.

Luego el litro de solución se mezcla con 19 litros de agua en balde superior del permeámetro, recordando que las cantidades de colorante estaban dosificadas para 20 litros que nos brindan el tiempo necesario para la ejecución de los ensayos de permeabilidad.

Se realizan mediciones previas antes de empezar el ensayo, como la longitud de la muestra (L), diámetro de la muestra (D) y altura de carga hidráulica (h). Con estos datos procedemos a calcular el área transversal (A).

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

Ecuación 3

Donde:

π = Constante pi 3.1416 (adimensional).

D = Diámetro de la muestra (cm)

A = Área transversal de la muestra (cm²).

Con ayuda de las normas ASTM D-2434-68, AASHTO T-125-66 y la Norma Británica BS (British Standard) 1377:5, realizamos los ensayos de permeabilidad de carga constante, se procede a llenar de zeolita hasta una altura de 30 cm que tomamos como marcador para realizar los ensayos con una misma longitud de muestra (L), seleccionamos esta dimensión porque el permeámetro permite modificar esta longitud acorde a las necesidades y cantidad de muestra en existencia. El llenado se lo hace por capas compactadas aproximadamente de 1.5 cm de altura por medio de 20 golpes distribuidos en toda su sección, hasta llegar a la longitud fijada. Se cierra el permeámetro y se abre la válvula superior para saturar la muestra por 24 horas. Cuando el líquido cubra todo el material se recomienda cerrar la válvula superior y dejar abierta la válvula de liberación de presión del permeámetro, con el afán de que el aire atrapado entre las partículas del suelo tenga la libertad de salir. Transcurrido el tiempo de saturación se abre la válvula superior hasta que el líquido empiece a salir por la válvula de liberación de presión y cuando esto suceda se cierra válvula de liberación. Se abre la válvula inferior del permeámetro y para comenzar con el ensayo se verifica que la carga hidráulica y el caudal de salida sean constantes, para lo cual se deja salir el líquido por 5 minutos. Con ayuda de la probeta graduada de 500 ml y un cronómetro de precisión 0.01 s, se toma el tiempo que se tarda en llenar 100 ml de la probeta y así sucesivamente hasta completar los 500 ml. Inmediatamente se mide la temperatura del líquido con ayuda de un termómetro. Se repite el proceso hasta verificar que los tiempos sean prácticamente iguales. Con los datos obtenidos se calcula el coeficiente de permeabilidad k y se realiza la corrección de la permeabilidad si la temperatura es diferente a 20 °C.

$$k = \frac{V * L}{A * h * t}$$

Ecuación 4

Donde:

V = Volumen filtrado en un tiempo (cm³).

L = Longitud de la muestra (cm).

A = Área transversal de la muestra (cm²).

h = Altura de carga hidráulica (cm).

t = Tiempo de la prueba (s).

k = Coeficiente de permeabilidad (cm/s).

$$k_{20} = \frac{\eta_t}{\eta_{20}} \times k$$

Ecuación 5

Donde:

η_t = Viscosidad dinámica a temperatura de ensayo (°C).

η_{20} = Viscosidad dinámica a 20 grados Celsius (°C).

k = Coeficiente de permeabilidad (cm/s).

k_{20} = Coeficiente de permeabilidad corregido (cm/s).

Los resultados obtenidos se expresan en notación científica y se los compara con las siguientes tablas de clasificación de los suelos según su k , para así analizar su grado de permeabilidad.

Tabla 6: Clasificación de los suelos según su coeficiente permeabilidad.

Grado de permeabilidad	Valor de k (cm/s)
Elevada	Mayor a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Prácticamente impermeable	Menor a 10^{-7}

Fuente: Manual de Practicas PPD.

Figura II: Características de permeabilidad y drenaje de los suelos.

		Coeficiente de permeabilidad "k" en cm/seg (escala logarítmica)										
		1.00E+02	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-02	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07	1.00E-08	1.00E-09
Propiedad de drenaje		Buen drenaje				Mal drenaje			Prácticamente impermeable			
Tipo de suelos		Grava limpia.		Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava.		Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificados.			Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición.			
Determinación directa del coeficiente de permeabilidad		Prueba directa de los suelos en su posición original (pozos de bombeo). Confiable si se conduce apropiadamente, requiere considerable experiencia.										
		Permeámetro de carga constante. Requiere poca experiencia.										
Determinación indirecta del coeficiente de permeabilidad		Permeámetro de carga variable. Confiable. Requiere poca experiencia.		Permeámetro de carga variable, rango de permeabilidad inestable. Requiere mucha experiencia para una correcta interpretación.			Permeámetro de carga variable. Aceptable. Requiere considerable experiencia.					
		Cálculo de la distribución granulométrica. (Fórmula de A. Hazen). Aplicable únicamente a gravas y arenas limpias sin cohesión.								Cálculos basados en los resultados de las pruebas de consolidación. Confiable. Requiere considerable experiencia.		
		1.00E+02	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-02	1.00E-03	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07	1.00E-08	1.00E-09

Fuente: Soil Mechanics in Engineering Practice Karl Terzaghi.

Aguas residuales

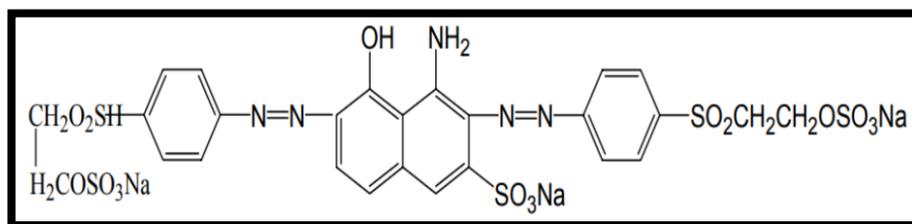
Las aguas residuales son el resultado de la utilización del agua para distintos fines. Como consecuencia de este uso, el agua recoge materias en suspensión y disueltas que alteran sus propiedades. Dependiendo del tipo de utilización, las aguas residuales presentan características muy diferentes. En especial, existe una gran diferencia entre las aguas residuales urbanas o domésticas, originadas en el uso del agua en las casas y las aguas residuales industriales. Entre estas últimas la diversidad es muy acusada, ya que la alteración de propiedades del agua resultante del uso industrial puede variar entre contaminación puramente física (como ocurre en la contaminación térmica que presentan las aguas de refrigeración) hasta contaminación bioquímica de gran complejidad (aguas que reciben efluentes de industrias farmacéuticas o químicas).

El agua potable suministrada por las redes municipales no es agua químicamente pura, sino que contiene sustancias en disolución en pequeñas cantidades. Entre estas sustancias, las más importantes son algunos gases, como el oxígeno y nitrógeno, y compuestos inorgánicos que el agua ha disuelto, tanto durante su período de estancia en el medio natural del que proviene (embalse, río o acuífero) como una vez producida su captación por parte del hombre para incorporarla a la red de agua potable [32].

Colorante reactivo negro Bodactive WNN

Este colorante se caracteriza por su afinidad a fibras celulósicas como el algodón. Presenta en su estructura de grupos sulfónicos y aminas aromáticas, a continuación, se visualiza su estructura [33].

Figura 12: Estructura del colorante reactivo negro.



Fuente: OTHMER, 1993.

Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes textiles

Las aguas residuales de la industria química, farmacéutica y de colorantes a menudo contienen cantidades significativas de compuestos orgánicos no biodegradables. La

eliminación de estos contaminantes tóxicos no biodegradables requiere algún pretratamiento antes del tratamiento biológico, que, en general, es la alternativa más económica de tratamiento en comparación con otros procesos. Las características del agua residual, tales como el pH, la conductividad o la presencia de compuestos inhibitorios, juegan un papel importante en la biodegradación de los contaminantes. La mayoría de las moléculas orgánicas son fácilmente biodegradables, aunque algunas moléculas son biorecalcitrantes o resistentes a la biodegradación. Según la naturaleza y nivel de los contaminantes, la destoxificación puede ser difícil y costosa económicamente utilizando medios de tratamiento convencionales. En tales casos, los procesos biológicos solos no son aconsejables y se requieren pretratamientos o post-tratamientos. Escoger la combinación adecuada lleva a considerar diversos aspectos técnicos y económicos [34].

El objetivo de cualquier tratamiento de efluentes es eliminar los contaminantes, de tal manera que el efluente, una vez tratado, cumpla las especificaciones de vertido determinadas por el organismo competente [34].

Cada vez más se están imponiendo los tratamientos de efluentes que permitan el reciclado del agua al proceso productivo. Un efluente industrial puede tener gran variedad de productos químicos contaminantes, que se pueden dividir en dos categorías básicas: inorgánicas y orgánicas [34].

Los compuestos inorgánicos pueden ser transformados generalmente en compuestos menos peligrosos mediante procesos de oxidación-reducción, o bien separados de los efluentes mediante precipitación, obteniendo lodos o soluciones concentradas en contaminantes. Por otra parte, los compuestos orgánicos de aguas residuales industriales pueden incluir sustancias derivadas de materiales orgánicos, como grasas, aceites y productos químicos orgánicos [34].

2.2.3. Etapa III: Diseño de prototipo de filtro para el análisis comparativo entre la saturación y masa.

La etapa consiste en el diseño de un prototipo de filtro que nos permita comparar la saturación y masa de la muestra, antes y después de filtrar líquidos con colorante, pero para entender si la zeolita es capaz de absorber colorante y retenerlo, debemos analizar su contenido de humedad.

Contenido de humedad

El contenido de humedad ($\omega\%$) es la relación que existe entre el peso del agua contenida en una muestra de suelo en estado natural y el peso de la misma muestra después de ser secada al horno por 24 horas a una temperatura de 105 °C, garantizando así la evaporación de todo el líquido. La masa del suelo resultante se considera la parte sólida y la pérdida de peso es la masa del agua evaporada. [35]

Para conocer la humedad que contiene la zeolita se la ensayó en tres estados: ambiente (Muestra A), saturado superficie seca (SSS) (Muestra B) y saturado mojado (Muestra C). La primera muestra se ensayó en recipientes de aluminio grandes con 600 g cada uno en estado ambiente sin alteraciones. La segunda muestra se saturó por 24 horas, luego se dejó escurrir el líquido y se secó la superficie con papel filtro hasta que el material tenga un comportamiento de SSS, la cantidad obtenida se dividió en proporciones parecidas. La última muestra se saturó por 24 horas y sólo se dejó escurrir el agua, manteniéndose mojada.

$$W_w = (W_m + Rec) - (W_s + Rec)$$

Ecuación 6

Donde:

$(W_m + Rec)$ = Peso húmedo + recipiente (g).

$(W_s + Rec)$ = Peso seco + recipiente (g).

W_w = Peso del agua (g).

$$W_s = (W_s + Rec) - Rec$$

Ecuación 7

Donde:

$(W_s + Rec)$ = Peso seco + recipiente (g).

Rec = Peso recipiente (g).

W_s = Peso de los sólidos (g).

$$\omega\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Ecuación 8

Donde:

$(W_s + Rec)$ = Peso seco + recipiente (g).

Rec = Peso recipiente (g).

W_s = Peso de los sólidos (g).

Figura 13: Peso inicial de muestra A y su secado al horno.



Fuente: Autor.

Prototipo de filtro

Para el diseño del prototipo de filtro se intentó replicar a escala las mismas proporciones del ensayo de permeabilidad, es decir su volumen de muestra y de líquido. Para lo cual trasladamos en porcentaje sus volúmenes a una botella transparente de plástico duro de capacidad 500 ml. Se determinó que necesitaríamos 270 g de zeolita retrolavada en estado seco al horno y 300 ml de solución acuosa, las 12 cantidades de zeolita se pesó en la balanza y se guardaron en fundas herméticas pequeñas con zipper. Se realizaron un total de 12 filtros, 4 por disolución y tomar muestras cada 6 horas acorde la siguiente tabla:

Tabla 7: Programación del periodo de toma de muestras de los filtros.

Tiempo (h)	Disolución Baja	Disolución Media	Disolución Alta
0	06h00	06h20	06h40
6	06h02 – 12h02	06h22 – 12h22	06h42 – 12h42
12	06h04 – 18h04	06h24 – 18h24	06h44 – 18h44
18	06h06 – 00h06	06h26 – 00h26	06h46 – 00h46
24	06h08 – 06h08	06h28 – 06h28	06h48 – 06h48

Fuente: Autor.

Figura 14: Ensayos en el prototipo de filtro.



Fuente: Autor.

Se realizó la disolución bajo 10 minutos antes de la hora programada para el primer ensayo, con el debido procedimiento que se explicó anteriormente de la preparación del colorante para los análisis de permeabilidad, a diferencia que sólo se dosificó para 2 litros de solución acuosa por cada concentración y tomando en cuenta que las cantidades necesarias de colorante para aquel volumen de líquido sería de 100, 580 y 1060 mg respectivamente para cada disolución. Para medir los 300 ml necesarios para cada filtro se utilizó una jarra de plástico graduada de 500 ml de capacidad, la que nos permite distribuir la cantidad necesaria para cada filtro en el tiempo programado para su inicio y para la toma de muestras al final del intervalo temporal. Se deja filtrar todo el líquido y se procede a recolectar todo el material presente en cada prototipo en fundas herméticas individuales, procurando almacenar todas las partículas con ayuda de una brocha de ser necesario. Se secan las muestras en recipientes de aluminio medianos para verificar si existe un incremento en la masa del material en distintos tiempos de saturación.

2.2.4. Etapa IV: Recolección de muestras para análisis espectrofotométrico

Con ayuda de los ensayos realizados en la etapa anterior del prototipo de filtro que se detalla en el Anexo 10, recolectamos muestras en los tiempos establecidos en la tabla de programación dentro de frascos de vidrio ámbar de 60 ml, para lo cual transcurridas las primeras 6 horas del líquido en contacto con la zeolita procedemos a retirar la cinta eléctrica de PVC, que bloquea la salida del líquido a través de un agujero realizado con un alfiler en el centro de la tapa del filtro, lo que ocasiona un goteo en la parte inferior del filtro que nos permite la toma de muestras filtradas. Cabe señalar que se realiza un prelavado con el líquido obtenido para garantizar que cualquier residuo o contaminante presente en el frasco se elimine antes del muestreo real, para esto tomamos por un minuto una muestra del líquido y la removemos por todo el frasco antes de ser desechada, una vez realizado el prelavado recolectamos por 2 minutos el líquido y cerramos el frasco para el posterior análisis con espectrofotómetro UV-Vis, sin olvidar etiquetarlos y colocarlos dentro de una caja de muestras para evitar cambios significativos de temperatura o luz que puedan alterar los resultados de las muestras.

Figura 15: Toma de muestra y almacenamiento de las muestras.



Fuente: Autor.

Espectrofotometría UV-Vis

La espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-Vis) es un método analítico por el cual se hace pasar luz a través de una muestra para medir la cantidad de luz absorbida en distintas longitudes de onda, dentro de un rango ultravioleta y visible de un espectro establecido. La cantidad de luz absorbida se relaciona con la concentración de

sustancias presentes en la muestra, es decir que a mayor absorbancia más luz fue absorbida por la muestra, indicando la presencia de más moléculas que obstruyen el paso de la luz. Si la absorbancia tiene un valor bajo existe menor concentración de sustancias [36].

Figura 16: Espectrofotómetro UV-Vis.



Fuente: Autor.

Obtenidas las muestras de los ensayos de filtración nos dirigimos al Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato, para analizar las concentraciones de colorantes recolectadas en el espectrofotómetro UV-Vis de marca Fisher Scientific, modelo accuSkan GO. Una vez encendido el equipo se seleccionó la muestra con la disolución media sin contacto con la zeolita para realizar el barrido espectral y encontrar la longitud de onda con la que vamos a trabajar. Enceramos el equipo con una cubeta llena de agua destilada, nos dirigimos a espectro para seleccionar 200 nm como valor inicial y 800 nm como valor final de longitud de onda, con intervalos cada 10 nm, obteniendo así el espectro y dándonos como resultado que la longitud de onda adecuada para la muestra es de 390 nm. Configuramos la longitud de onda de trabajo y realizamos las mediciones de absorbancia de todas las muestras, para garantizar que los resultados no sean alterados por un sedimento se ocupó papel filtro doblado en forma de cono para depositar el líquido en la cubeta y también el respectivo prelavado de cubeta con cada muestra.

Figura 17: Cono de papel filtro para colocar muestra en la cubeta.



Fuente: Autor.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

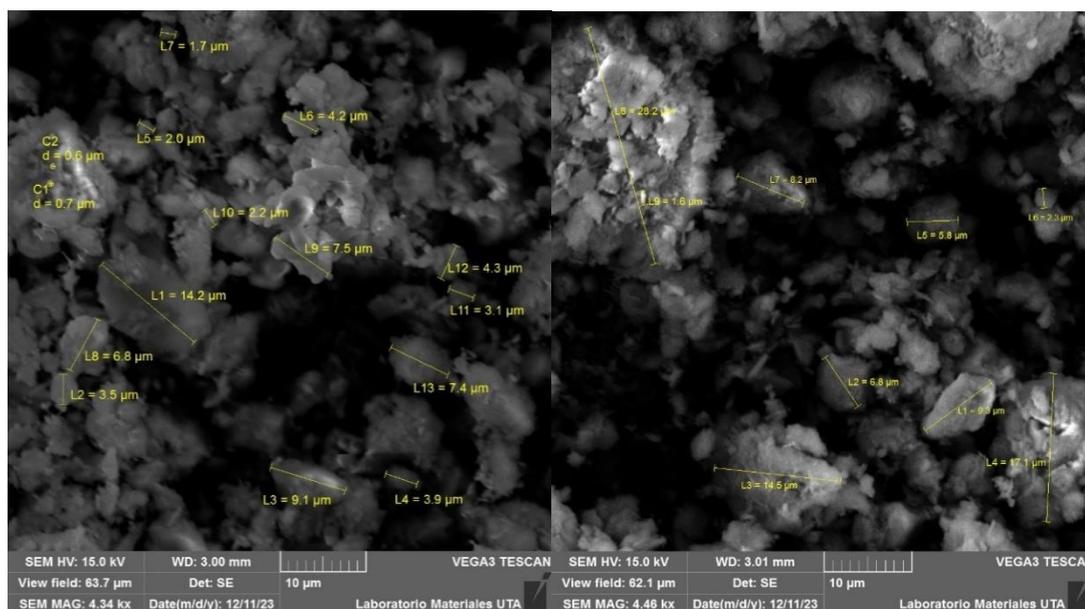
3.1. Análisis de los resultados

Luego de la recopilación de los datos obtenidos en las distintas etapas de estudio, se realizó el procesamiento y tabulación por medio de gráficos y tablas, que nos facilitan la comprensión de las variables a determinar y consiguiendo los resultados necesarios de una forma precisa y clara.

- **Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

La muestra de zeolita natural tipo clinoptilolita de partículas inferiores al tamiz # 200, se caracterizó mediante el microscopio electrónico de barrido. Para la obtención de las micrografías se hizo un microanálisis en las mismas condiciones a 15 kV y con magnificaciones de 4.34 kx y 4.46 kx.

Figura 18: Micrografías con medición de partículas.



Fuente: Autor.

En las micrografías se observan gránulos sueltos amorfos con partículas pequeñas en su superficie, con aristas sutilmente redondeadas, encontrando que el tamaño promedio de partículas es de 7.1 μm y su variación va desde 0.6 μm a 28.2 μm, se puede observar las medidas en el Anexo 3.

- **Difracción de Rayos X (DRX)**

De acuerdo con el reportaje de resultados del análisis de DRX que están en el Anexo 4, se identificó la presencia de clinoptilolita en un 86.69% en promedio de 8 ensayos realizados, además nos arrojó su composición química que se detalla a continuación:

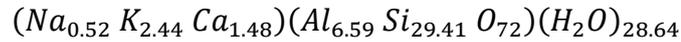


Tabla 8: Composición química de la zeolita estudiada.

Elemento	% Atómico
Na	0.52
K	2.44
Ca	1.48
Al	6.59
Si	29.41
O	59.56
Total	100.00

Fuente: Autor.

Se puede observar la presencia de sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), aluminio (Al), silicio (Si) y oxígeno (O), de los cuales existe un pico elevado de silicio con relación a sus otros elementos de 29.41 de porcentaje atómico, a diferencia de su pico más bajo con 0.52% de sodio. Confirmando la alta presencia de silicio en las zeolitas clinoptilolitas.

- **Análisis mecánico o granulometría**

Con la finalidad de conocer las características de la zeolita, se realizó la granulometría para poder clasificarla por medio de los sistemas utilizados en la ingeniería civil, como se muestra en el siguiente resumen de resultados.

Tabla 9: Clasificaciones visual, AASHTO y SUCS de la zeolita.

Muestra	Clasificación		
	Visual	AASHTO	SUCS
1	Arena gruesa Mal distribuida Partículas subangulares	A-1-a Arena granular	SP Arena limpia Sin finos Mal graduada

Fuente: Autor.

La clasificación visual de la muestra es arena gruesa mal distribuida con partículas subangulares con un tamaño nominal máximo de 2.37 mm, con un Cu 1.47 y Cc 0.98.

Según la AASHTO (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transporte) es una arena granular dentro del grupo A-1 y el subgrupo A-1-a. Mientras que en la SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) es una arena limpia sin finos y mal graduada, siendo un SP. La gráfica granulométrica se adjunta en el Anexo 5.

- **Coefficiente de permeabilidad k**

Se realizaron ensayos de permeabilidad con agua y soluciones acuosas de colorante reactivo negro bodactive WNN, utilizando la zeolita natural clinoptilolita como medio filtrante, obteniendo así los siguientes resultados de k.

Tabla 10: Resumen de resultados del k.

Coefficiente de Permeabilidad	
Muestra	k corregido
Zeolita sin retrolavado	8.08E-03
Zeolita con retrolavado	8.69E-02
Zeolita con retrolavado y disolución baja	8.50E-02
Zeolita con retrolavado y disolución media	7.91E-02
Zeolita con retrolavado y disolución alta	7.62E-02

Fuente: Autor.

Las distintas muestras nos dan como resultado que la zeolita es una arena limpia con un drenaje bueno y con un grado de permeabilidad medio según las tablas, además se puede observar que las soluciones acuosas tienen una incidencia en el k, ya que a mayor concentración de colorante se produce una menor permeabilidad. Las mediciones respectivas para llegar al k corregido se adjuntan en el Anexo 8.

- **Contenido de humedad**

Los ensayos de contenido de humedad de la zeolita se los realizó en tres estados de humedad, para tener una visión más amplia de la capacidad de absorción, el resumen de resultados se muestra en la siguiente tabla y se los detalla en el Anexo 9.

Tabla 11: Resumen de resultados del $\omega\%$.

Contenido de humedad	
Muestra	$\omega\%$
Zeolita en estado ambiente	15.55
Zeolita en estado saturado superficie seca	30.87
Zeolita en estado saturado mojado	40.10

Fuente: Autor.

Los valores oscilan entre 15 y 40% sin embargo el contenido de humedad que predomina por ser en estado natural de ambiente es el óptimo y real a tomar en cuenta, sin embargo, presenta un alto contenido de humedad con respecto a otros tipos de material.

- **Método de saturación y masa**

Para tener la comparación de masas con respecto a la saturación, se obtuvo los pesos luego de estar en contacto con las distintas concentraciones de colorante en los tiempos establecido de saturación, como se detalla a continuación:

Tabla 12: Resultados del método de saturación y masa.

Método de saturación y masa			
Tiempo de saturación	Masa de muestra seca sin colorante	Masa de muestra seca con colorante	Pérdida de masa
Disolución baja			
6 h	270.00	266.00	4.00
12 h	270.00	265.90	4.10
18 h	270.00	265.80	4.20
24 h	270.00	265.60	4.40
Disolución media			
6 h	270.00	266.10	3.90
12 h	270.00	266.00	4.00
18 h	270.00	265.80	4.20
24 h	270.00	265.50	4.50
Disolución alta			
6 h	270.00	265.70	4.30
12 h	270.00	265.40	4.60
18 h	270.00	265.30	4.70
24 h	270.00	265.00	5.00

Fuente: Autor.

La masa inicial de las muestras era de 270 g antes del contacto con las soluciones acuosas, pero existe una pérdida de masa después de la interacción, esto es producto la eliminación de finos en la filtración y la manipulación del mismo hasta realizar el próximo pesaje, sin embargo, se puede apreciar que a mayor tiempo de saturación existe más pérdida de masa, esta tendencia se repitió en todos los ensayos.

- **Espectrofotometría UV-Vis**

Al realizar las gráficas individuales del comportamiento de cada disolución se observó un comportamiento bajo de reducción del colorante, incluso visualmente era inapreciable, por lo que la reducción del colorante no muestra ser efectiva con la zeolita estudiada.

Tabla 13: Resultados de espectrofotometría UV-Vis.

Tiempo (h)	Absorbancia (UA)		
	A	B	C
0	0.5326	3.0771	3.9745
6	0.4962	3.0395	3.9467
12	0.4847	3.0288	3.9335
18	0.4824	3.0241	3.9232
24	0.4818	3.0237	3.9218

Fuente: Autor.

También se pudo determinar que, a mayor tiempo de ensayo, más colorante fue absorbido por la zeolita, por otra parte, se puede observar una cierta estabilización de los resultados a las 18 horas de prueba, lo que se traduce a que la zeolita tiende a saturarse a ese tiempo de estar en contacto con un líquido, pero su efectividad en la reducción del colorante es casi nula, esto se puede ver a mayor amplitud en el Anexo 11.

3.2. Discusión de los resultados

- **Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

Según Maldonado en su trabajo experimental “Estudio de la zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU en la construcción”, la zeolita tiene tamaños de partículas entre 5 a 15 μm con formas ovoidales [37].

En este estudio, las micrografías de la zeolita muestran también partículas ovoidales con aristas redondeadas, con un promedio de dimensiones de 7.1 μm , dentro de los rangos mencionados.

- **Difracción de Rayos X (DRX)**

Según la caracterización de la zeolita que realiza Montes-Luna en artículo de “Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca^{2+} por distintos métodos

físico-químicos”, muestra resultados de Ca 1.99, K 1.01, Si 35.32, Al 6.82, Mg 0.46, Na 0.57 y O 53.83, destacando la alta concentración de silicio y aluminio [38].

Observamos una cierta similitud en la mayoría de elementos obtenidos con la caracterización química, donde claramente destaca el silicio con 29.41 y el aluminio con 6.59, valores muy cercanos a los mostrados anteriormente, lo que confirma que es una zeolita clinoptilolita.

- **Análisis mecánico o granulometría**

En el estudio de Amaya, se realizó un estudio granulométrico de zeolita clinoptilolita, por medio de las mismas normas aplicadas en el presente trabajo experimental, donde obtuvo un Cu de 1.36, un Cc de 0.88 y un TNM de 0.43 mm, clasificándose como homogéneo y mal graduado [39]. En el Anexo 2 se tiene un Cu de 1.48.

En análisis mecánico realizado nos dio un Cu 1.47, Cc 0.98 y TNM 2.37. Podemos observar una cierta similitud en el coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura, a pesar que el tamaño nominal máximo sea muy distinto. Además, se puede confirmar que el Cu calculado y el Cu de la empresa es prácticamente el mismo, demostrando que la clasificación de homogéneo y mal graduado es correcta.

- **Coficiente de permeabilidad k**

Amaya también realizó ensayos de permeabilidad de carga constante que muestran el siguiente comportamiento de la zeolita, con un k de $1.40E-02$ determinó que posee una permeabilidad media [39].

Al conseguir haber realizado varios ensayos de permeabilidad podemos validar que el material tiene un grado de permeabilidad media, porque todos los valores de obtenidos están dentro de dicho rango.

- **Contenido de humedad**

En los estudios realizados por Adriano, se observa una gran capacidad de contener líquidos por parte de las zeolitas, se debe a su estructura porosa que puede generar altos contenidos de humedad a temperatura ambiente [40].

Los resultados obtenidos en el ensayo de contenido de humedad nos dieron porcentajes altos de humedad en sus distintos estados, a temperatura ambiente se llegó al 15.55%, que viene a ser alto como se esperaba en comparación a información previa.

- **Método de saturación y masa**

En el libro “Science: An Introduction” de Plaster, nos dice que un material al estar en contacto con un líquido o expuesto a altas temperaturas, puede generar una reacción química que produzca variaciones en el peso original de la muestra [41].

Teniendo en cuenta que los resultados muestran una pérdida de masa entre 3.90 a 5.00 gramos luego de ser secado por segunda vez al horno, se puede considerar que la exposición a altas temperaturas por largos periodos de tiempo y el contacto con el colorante reactivo, puede ser la razón por la cual existe este desface, además la manipulación del material al realizar los ensayos puede ocasionar errores.

- **Espectrofotometría UV-Vis**

Según Marcano, en su libro “Introducción a la Química de los Colorantes”, la longitud de onda va acorde al líquido que se va a estudiar, pero cuando se obtiene pocas variaciones en las unidades de absorbancia (UA), quiere decir que no existe cambios significativos [42].

Al analizar los resultados pudimos observar que la variación de absorbancia es aproximadamente de 0.5 UA en las tres disoluciones, lo es una pequeña variación de absorbancia luego de transcurrir 24 horas en contacto con la zeolita, se puede deducir que la reducción de colorante es inapreciable.

3.3. Verificación de hipótesis

El presente trabajo experimental se lo realizó en base a las siguientes hipótesis:

3.3.1. Hipótesis nula

El coeficiente de permeabilidad de zeolita natural tipo clinoptilolita no tiene incidencia en la reducción de colorante reactivo negro bodactive WNN de aguas residuales de lavadoras de jeans.

3.3.2. Hipótesis de trabajo

El coeficiente de permeabilidad de zeolita natural tipo clinoptilolita tiene incidencia en la reducción de colorante reactivo negro bodactive WNN de aguas residuales de lavadoras de jeans.

3.3.3. Verificación de la hipótesis

En base a los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad de zeolita natural tipo clinoptilolita en la reducción de colorante reactivo negro bodactive WNN de aguas residuales de lavadoras de jeans, se puede concluir que la hipótesis planteada no se cumple.

En primer lugar, los valores del coeficiente de permeabilidad no interfieren significativamente en la reducción del colorante, sin embargo, es verdad que a menor permeabilidad el agua residual tendría más tiempo en contacto con la zeolita, lo cual incrementaría muy levemente su capacidad de reducción, pero sigue siendo inapreciable su mejoría.

En segundo lugar, el tiempo de saturación de la zeolita natural tipo clinoptilolita, sucede aproximadamente a las 18 horas de contacto con la disolución y al revisar los resultados de absorbancia se deduce que es muy poca la reducción del colorante como para considerar que la zeolita estudiada sea una buena opción.

Además, al realizar el retrolavado de la zeolita, el material incrementa su coeficiente de permeabilidad por la eliminación de partículas finas y sedimentos, lo que reduce que el tiempo de interacción del líquido con el material, se vea perjudicado.

En resumen, se puede decir que la investigación no respalda la hipótesis planteada. El coeficiente de permeabilidad de la zeolita estudiada no tiene mayor incidencia en la reducción del colorante reactivo negro bodactive WNN de aguas residuales de lavadoras de jeans.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los resultados de la caracterización morfológica muestran una estructura y tamaño de partículas típico de una clinoptilolita, por otra parte, su composición química valida aún más que es una zeolita por su alto contenido de silicio con respecto a los demás elementos que lo conforman.
- Por medio de los resultados del contenido de humedad se puede concluir que la zeolita clinoptilolita tiene una gran capacidad de contener líquidos, por ser un material microporoso.
- Al determinar el coeficiente de permeabilidad de la zeolita natural tipo clinoptilolita con la utilización del permeámetro de carga constante, los resultados indican que su drenaje es bueno, con un grado de permeabilidad medio a pesar del retrolavado.
- El estudio se lo realizó con el colorante reactivo negro Bodactive WNN, sin la adicción de otras sustancias que interfieran en su comportamiento, con la finalidad de conocer el comportamiento real de dicho colorante en contacto con la zeolita.
- El método de saturación y masa resulta inefectivo por no poseer los equipos de precisión necesarios para calcular pequeñas variaciones de masa, que nos permitan evitar la pérdida de pequeñas cantidades de material con la manipulación de este en los distintos ensayos, cabe señalar que las reacciones químicas que le ocurren a la zeolita al estar en contacto con el colorante, así como las altas temperaturas al ser secado, pueden ser la causa principal de la pérdida de masa.
- En el caso de poseer los equipos óptimos para el método de saturación y masa, resulta muy difícil encontrar pequeñas variaciones de peso en la zeolita seca luego del contacto con el colorante, ya que estamos hablando de 1 g de colorante en 20 litros de agua en su disolución baja.
- La espectrofotometría UV-Vis, resulta más eficaz para medir pequeñas variaciones moleculares, motivo por el cual, si se pudo visualizar la reducción del colorante en los resultados, pero sin un mayor impacto que represente una mejoría.

- Los resultados de absorbancia nos ayudaron a conocer que la zeolita estudiada tuvo un tiempo de saturación de 18 horas, lo que se puede considerar como el tiempo de funcionamiento con respecto a la cantidad de muestra ensayada.

4.2. Recomendaciones

- Se realizar el ensayo de la MEB en zeolitas, se recomienda que la muestra no tenga alteraciones, las cuales se pueden producir por un proceso de molido, lo más apropiado es realizar una granulometría para captar los finos necesarios para la práctica.
- Para obtener una mejor granulometría del material estudiado se recomienda implementar la mayor cantidad de tamices, logrando así una gráfica más exacta que nos permita conocer sus características a detalle.
- Para el ensayo de permeabilidad con el permeámetro de carga constante se recomienda la utilización de una bomba de vacío para eliminar todo el aire que queda atrapado y que puede interferir en los resultados de su coeficiente k.
- Se recomienda tomar la temperatura en los ensayos de permeabilidad, ya que la viscosidad del agua puede generar cambios significativos, cuando el ambiente de trabajo está muy caliente o frío.
- Para el correcto armado del permeámetro de carga constante se necesita que el caudal de entrada al tanque de nivel constante, sea mayor al caudal de salida del mismo tanque, es decir debe tener una buena presión para que la altura de carga hidráulica se mantenga constante.
- Se recomienda saturar la muestra en el mismo permeámetro para facilitar su colocación, ya que suelos con alta presencia de finos pueden dificultar el proceso al estar húmedos.
- En el retrolavado del material se recomienda utilizar un sistema de retrolavado de filtros, para evitar grandes pérdidas de agua hasta alcanzar la eliminación de todos los sedimentos y finos que contenga la zeolita.
- Para analizar la reducción de colorantes se recomienda la utilización del espectrofotómetro UV-Vis, ya que nos permite analizar hasta pequeñas variaciones del líquido y visualizar de mejor manera los resultados, a diferencia del método de saturación y masa que no puede medir pequeñas variaciones de masa sin equipo de alta precisión.

- Para conseguir resultados más exactos en el espectrofotómetro UV-Vis, se recomienda prelavar la cubeta hasta 3 veces en cada muestra antes de realizar la lectura de absorbancia.

MATERIALES DE REFERENCIA

- [1] P. Sáez González, «Eliminación de metales estratégicos en aguas residuales mediante adsorción con zeolitas naturales,» Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2021.
- [2] J. Alvarado, K. Terán, D. Vargas y A. L. Bautista, «Clinoptilolita natural mexicana tratada con plata para remover DDD en agua,» *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, vol. 22, nº 3, pp. 146-155, 2020.
- [3] D. E. Pérez Silva , «Análisis de zeolita como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de autos “ayuda al campesino” de la parroquia la Matriz - cantón Quero - provincia de Tungurahua”,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2017.
- [4] G. Rodríguez, «Renewable Energy Sources and Local Development,» *International Journal of Social Sciences and Humanities*, vol. 1, nº 2, pp. 10-19, 2017.
- [5] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, «Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos,» [En línea].
- [6] O. M. d. l. Salud, «Agua,» 2017. [En línea].
- [7] M. Guerrero, A. Vázquez y M. Rodríguez , «La zeolita en la descontaminación de aguas residuales,» *Universidad Ciencia Y Tecnología*, vol. 2, nº 9, pp. 109-117, 2019.
- [8] D. Puente, «La mayor contaminación en ríos y quebradas está en 8 sitios del sur,» *El Comercio*, 18 Febrero 2015.
- [9] El Telégrafo, «Solo 25 lavadoras de jeans de Pelileo tienen permiso. Las que se quedaron fuera pagarán una multa de \$ 708,» 10 Agosto 2015.
- [10] J. Balladares, «Análisis de la cáscara de naranja como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de industrias de lavadoras de jeans Fashion de la

ciudad de Ambato de la provincia de Tungurahua.,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2018.

- [11] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, «Zeolita Natural,» México, 2013.
- [12] « Synthesis of zeolites and their application as soil amendments to increase crop yield and potentially act as controlled release fertilizers.,» *University of Wolverhampton*, p. 275, 2005.
- [13] R. Virta, «Geological Survey,» pp. 82-85, 1999.
- [14] AEnglert y J. Rubio, «Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite,» *Miner. Process.*, n° 21-29, 2004.
- [15] J. Clavijo, «Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM),» *Elementos*, vol. 3, n° 3, pp. 133-146, 2013.
- [16] J. Torres Díaz, «Caracterización superficial de diversos tipos de zeolita, por medio de un microscopio electrónico de barrido,» *JEEOS*, vol. 1, n° 2, pp. 1-10, 2017.
- [17] V. E. Salcedo Rivera, Estudio de las propiedades físicas de zeolita natural (aluminosilicato) de tipo clinoptilolita para reemplazo parcial del cemento Portland, Ambato: UTA, 2021.
- [18] R. P. Fernández Álvarez, Estudio comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos del cantón Guayaquil para sustitución parcial del cemento Portland IP., Ambato: UTA, 2021.
- [19] M. E. Aparicio Ceja y G. G. Carbajal Arizaga, «Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias,» *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, vol. 3, n° 2, pp. 62-72, 2010.
- [20] N. K. Pérez Gonzáles, F. Legorreta García, D. Díaz Guzmán, M. Vargas Ramírez, V. E. Reyes Cruz y M. I. Flores Zamora, «Determinación de las

Características Físico-Químicas de una Zeolita Natural,» *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 8, pp. 14-18, 2020.

- [21] J. Rojas, D. Camilia y P. Fabian, «Caracterización de los suelos de la zona de cafetales de la Hacienda Majavita,» *Innovando en la U* , pp. 5-14, 2012.
- [22] J. Sanchez, «Medidas puntuales de permeabilidad,» *Universidad Salamanca*, 2011.
- [23] Secretaria de Educación Municipal , «Caracterización de Girardot,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.semgirardot.gov.co/wp-content/uploads/2013/07/CARACTERIZACION-SECRETARIA-DE-EDUCACION.pdf>.
- [24] C. Tafur, «Universidad Nacional de Colombia,» 2012. [En línea].
- [25] L. T. y P. Borrego, « Efecto del uso y manejo de los suelos de la ciudad universitaria de Trujillo en sus propiedades físico-químicas,» *Pueblo Continente* , pp. 441-447, 2019.
- [26] P. Torres, «Ensayo de permeabilidad Lefranc,» *Geología y geotecnia*, 2019.
- [27] UNIVERSIDAD DE VALPARAISO, «Clasificación de suelos».
- [28] Ó. Palacio León, Á. Chávez Porras y Y. L. Velásquez Castiblanco, «Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados,» *Tecnura*, vol. 21, n° 53, pp. 96-106, 2017.
- [29] F. Mantilla, Manual didáctico de prácticas de Laboratorio de Mecánica de Suelos en la Ingeniería Civil, Ambato.
- [30] A. A. Pérez Martínez, Degradación de los colorantes negro reactivo 5, rojo directo 28 y verde básico 4 en presencia de aditivos por ozono: Tesis, México, 2009.

- [31] E. Maldonado Cueva, Reducción de la concentración de colorante Negro Reactivo 5 en agua mediante el uso de las Micro nanoburbujas de Ozono-Aire escala laboratorio: Tesis, Lima, 2017.
- [32] D. Días, «ESTUDIO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PRODUCIDAS POR LA LAVADORA Y TINTURADORA DE PRENDAS DE VESTIR “CRISTIAN CAR” Y SU INFLUENCIA EN LA RED DE ALCANTARILLADO DEL SECTOR DE TAMBO EL PROGRESO, CANTÓN PELILEO, PROVINCIA DEL TUNGURAHUA,» 2015. [En línea]. Available:
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/18627/1/Tesis%20966%20-%20D%C3%ADas%20Mayorga%20Daniel%20Andr%C3%A9s.pdf>.
- [33] OTHMER, “*Reducción de la concentración de colorante Negro Reactivo 5 en agua mediante el uso de las Micro nanoburbujas de Ozono-Aire escala laboratorio*, 1993.
- [34] M. Vilaseca, Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la tintura con colorantes reactivos, 2015.
- [35] A. Salazar, L. Marini y R. Willian, Análisis del comportamiento mecánico del suelo arcilloso reforzado con PET para obras geotécnicas, provenientes de botellas plásticas recicladas, en el Distrito de Ricuricocha-tarapoto, Perú, 2021.
- [36] J. M. Sánchez Viveros, J. C. Espinoza Tapia, J. A. Colín Luna, G. Zacahui Tlacuatl, F. Chávez Rivas y I. Hernández Pérez, «Degradación fotocatalítica del colorante negro reactivo 5 (RB-5) empleando zeolitas naturales modificadas térmicamente,» *Azcapotzalco*, 2016.
- [37] D. A. Maldonado, Estudio de la zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU en la construcción, Ambato: UTA, 2021.
- [38] A. D. J. Montes, «Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca²⁺ por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases,» vol. 28, nº 1, pp. 5-11, 2015.

- [39] A. M. Amaya Díaz, Determinación de las características físicas de sustancias reactivas: piroclastos volcánicos, zeolita clinoptilolita, zeolita modernita, de origen ecuatoriano para el tratamiento de agua, Ambato: UTA, 2021.
- [40] A. F. Adriano Macas, Absorción y Desorción de Vapor de Agua mediante la utilización de las Zeolitas Naturales de la Provincia de Guayas, Guayaquil, 2012.
- [41] E. Plaster, Soil Science: An Introduction, 2013.
- [42] D. Marcano, Introducción a la Química de los Colorantes, 2018.
- [43] C. Jordón, M. oLguín y M. Díaz, «Adsorción de colorante azul vegetal y azul acuarela por zeolitas naturales modificadas con surfactes,» *IAEA*, 2019.
- [44] G. Salas, «Tratamiento Físicoquímico de Aguas Residuales de la Industria Textil,» pp. 73-80, 2010.

ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones técnicas de la zeolita.



Especificaciones Técnicas Zeomedia 12-20 Premium

Parámetro	Rango de especificación	Estándar o metodología
Peso volumétrico (kg/M3)	690-790 kg	ASTM D7263 - 09
Peso específico (g/cm2)	1.5 -2.2g	ASTM D854 - 14
Rango efectivo de malla	12-20	ASTM D1921 - 18
Coefficiente de uniformidad	1.55	ASTM D1921 - 18
Porcentaje por debajo de malla 40 (peso)	Max.: 2% Max	ASTM D1921 - 18
% de solubilidad en ácido	5%	ANSI/AWWA B100-89
Firmesa del grano (Newtons)	Min.: 74	Análisis por texturometer
Trabajo de compresión (secs.)	Min.: 22	TVT
Coefficiente de poison (Secs./Nw)	Min.: 029	
Area superficial m2/gram	34 m2/g	Método bed
Porcentaje de clinoptilolita	Min.: 81%	Difracción de rayos X
Porcentaje de arcillas	Max: 3%	Difracción de rayos X
Certificación	NSF/ANSI 61	NSF/ANSI 61

Anexo 2: Características y parámetros de la zeolita.

Características fisicoquímicas				Parámetros de operación		
Parámetro	Estándar	Zeomedia 12-20	Zeomedia 14-40	Zeomedia	12-20	14-40
Peso volumétrico	ASTM D7265-09	690 – 730 kg/m ³		Tasa de Flujo	8-20 gpm/ft ²	10-12 gpm/ft ²
Peso específico	ASTM D854-14	1.5 – 2.2 g/cm ³			20-50 m ³ *h/m ²	26-32 m ³ *h/m ²
Rango efectivo de tamaño de malla	ASTMD1921-18	8-20	14-40	Tasa de flujo máxima recomendable	20 gpm/ft ²	
Coefficiente de uniformidad		1.48	1.27		50 m ³ *h/m ²	
Material debajo de la malla		Max 2%			18 gpm/ft ²	
Solubilidad en ácido	ANSI/AWWA B100-89	Max 5%		Flujo Retrolavados *Temperatura ambiente	55 m ³ *h/m ²	23 m ³ *h/m ² 30 m ³ *h/m ²
Firmeza del grano (N)	=TVT Texturómetro	79	77.4		Expansión Recomendada *Datos proporcionados son a escala piloto. Diámetro de partícula y diámetro de lecho > 15'	30%
Área superficial	BET Method	35-40 m ² /g		Altura de cama	30'-48' pg 0.76 - 1.22 m	30'-48' pg 0.76 - 1.22 m
Clinoptilolite	Difracción de rayos X	75-83%		Presión máxima recomendada	45 psi	
Arcillas		3% max		Presión diferencial retrolavados	10-15 psi	10-15 psi
Cuarzo y montmorillonita		14% -20%				

Anexo 3: Dimensiones de partículas con el MEB.

Dimensión	µm	Imagen
L1	14.2	Micrografía 1
L2	3.5	
L3	9.1	
L4	3.9	
L5	2.0	
L6	4.2	
C1	0.7	
L8	6.8	
L9	7.5	
L10	2.2	
L11	3.1	
L12	4.3	
L13	7.4	
C2	0.6	
L1	9.3	Micrografía 2
L2	6.8	
L3	14.5	
L4	17.1	
L5	5.8	
L6	2.3	
L7	8.2	
L8	28.2	
L9	1.6	
	7.1	Promedio

Anexo 4: Reporte de resultados DRX.

- Resumen de resultados DRX



Carlos Barrera No. 4721 Col. Valle Verde 3er. Sector, Monterrey, N.L. México C.P. 64339
 e-mail: difraclab@hotmail.com
 Tel.: (81) 83 11 16 04
 www.difraclab.com.mx

Solicitante: Ing. Armando Valdez Fuentes	Fecha de recepción de las muestras: 10 de abril de 2023	Fecha de Reporte: 12 de abril de 2023
Análisis Solicitados: - Análisis Mineralógico - Densidad Específica - Densidad Aparente	No. Reporte: DRX-DEN-142-2023	

Muestras:



Las muestras se recibieron en forma de piedras de las cuales se tomó una fracción representativa que fue pulverizada finamente antes de realizar los análisis solicitados. Para las densidades aparentes, las muestras se pasaron por los tamices número 8 y 12 y se utilizó el retenido en el tamiz 12 para realizar dichos análisis.

REPORTE DE RESULTADOS DE ANÁLISIS MINERALÓGICO

ESPECIE IDENTIFICADA	MUESTRAS			
	CORTE 1 "A"	CORTE 1 "B"	CORTE 1 "C"	CORTE 2 "A"
$(Na_{0.52}K_{2.44}Ca_{1.48})(Al_{6.59}Si_{29.41}O_{72})(H_2O)_{28.64}$ Clinoptilolita	76.0%	93.0%	92.0%	83.0%
$Ca_{0.2}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ Montmorillonita	15.0%	3.0%	4.0%	10.0%
$KAlSi_3O_8$ Sanidina	4.0%	2.0%	2.0%	3.0%
SiO_2 Cristobalita	3.0%			2.0%
SiO_2 Cuarzo	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%

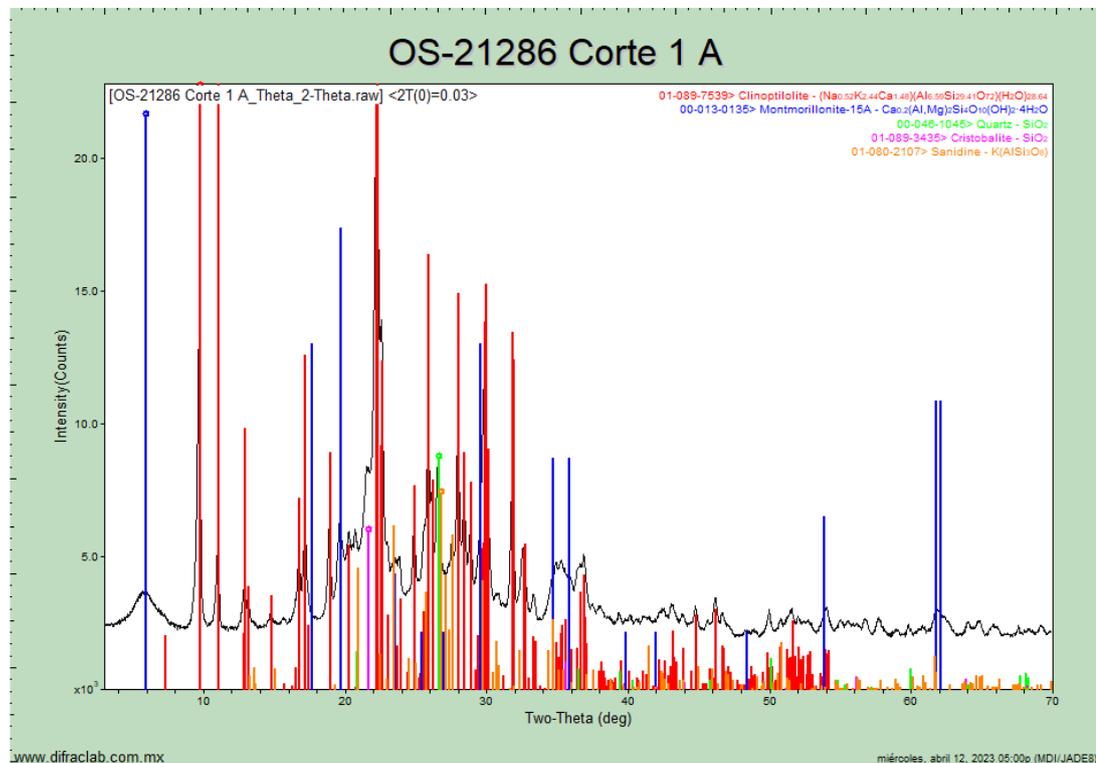
Nota: La estimación del contenido de las especies fue obtenida con base en cálculos estequiométricos en combinación con el método de whole pattern fitting and rietveld refinement.

ESPECIE IDENTIFICADA	MUESTRAS			
	CORTE 2 "B"	CORTE 3 "A"	CORTE 3 "B"	CORTE 3 "C"
$(Na_{0.52}K_{2.44}Ca_{1.48})(Al_{6.59}Si_{29.41}O_{72})(H_2O)_{28.64}$ Clinoptilolita	91.0%	87.0%	85.5%	86.0%
$KAlSi_3O_8$ Sanidina	2.0%	5.0%	6.0%	7.0%
$Ca_{0.2}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ Montmorillonita	3.0%	3.0%	4.0%	3.0%
SiO_2 Cuarzo	2.0%	2.0%	2.5%	2.0%
SiO_2 Cristobalita	2.0%	3.0%	2.0%	2.0%

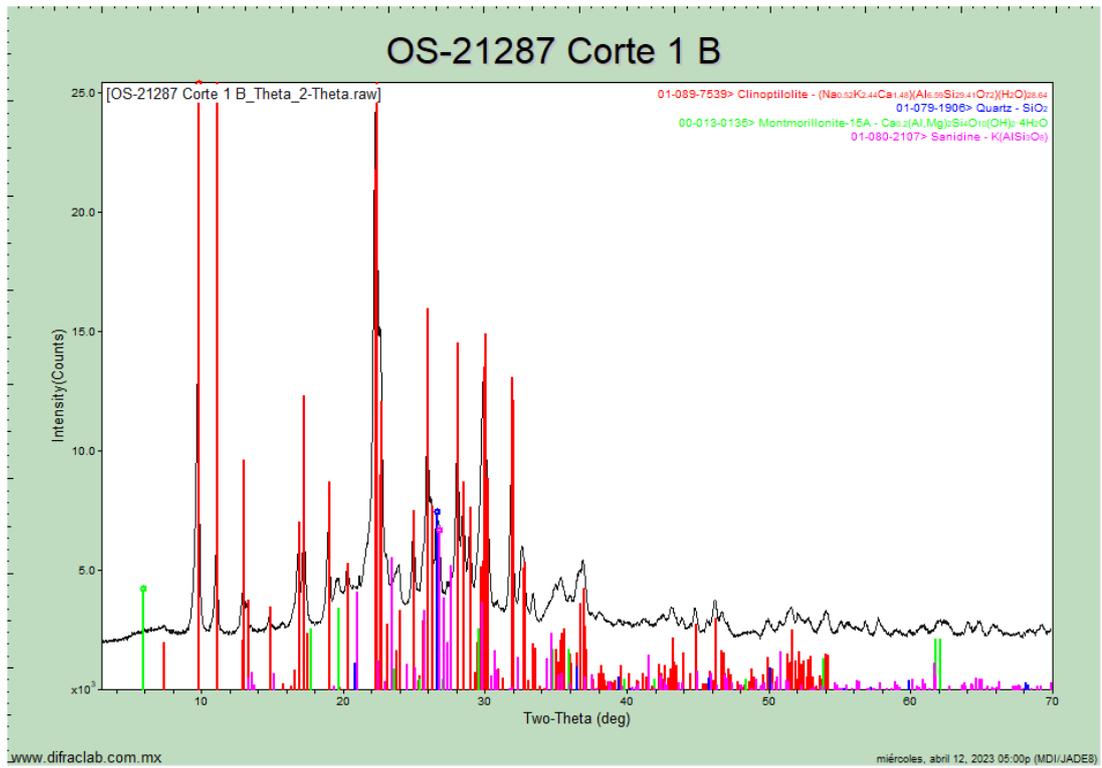
Nota: La estimación del contenido de las especies fue obtenida con base en cálculos estequiométricos en combinación con el método de whole pattern fitting and rietveld refinement.

OBSERVACIONES: Muestras formadas predominantemente por Clinoptilolita. Se adjuntan difractogramas.

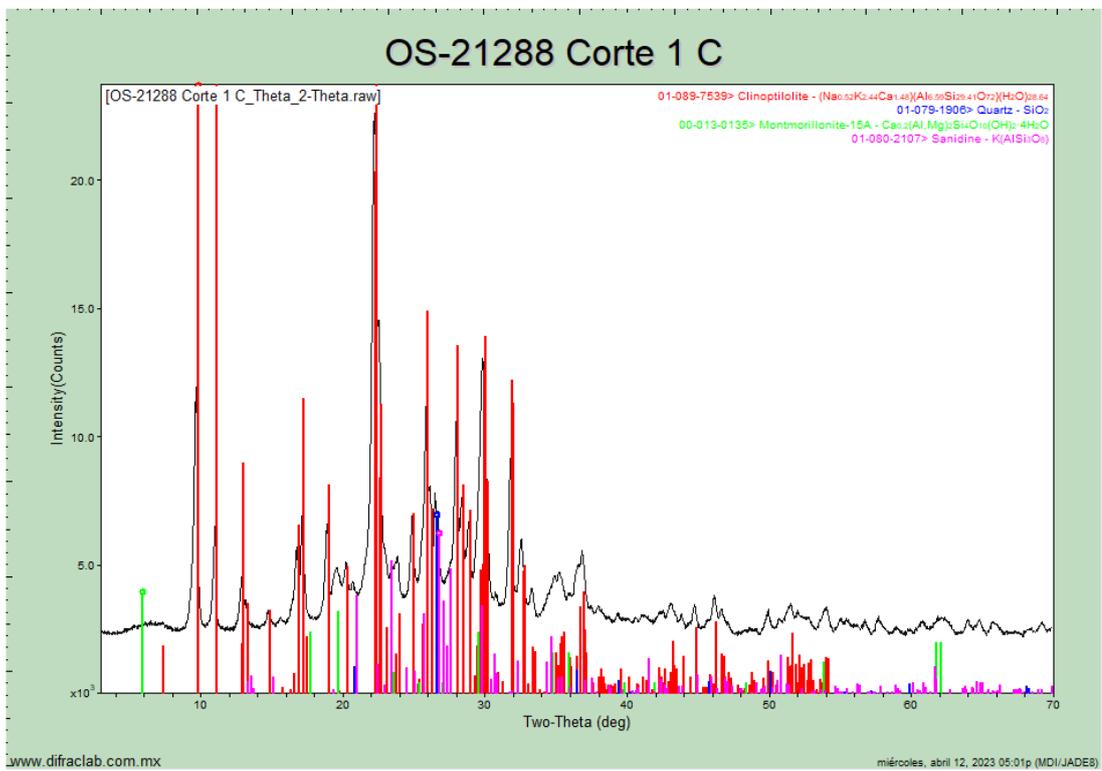
- Difractograma 1 A



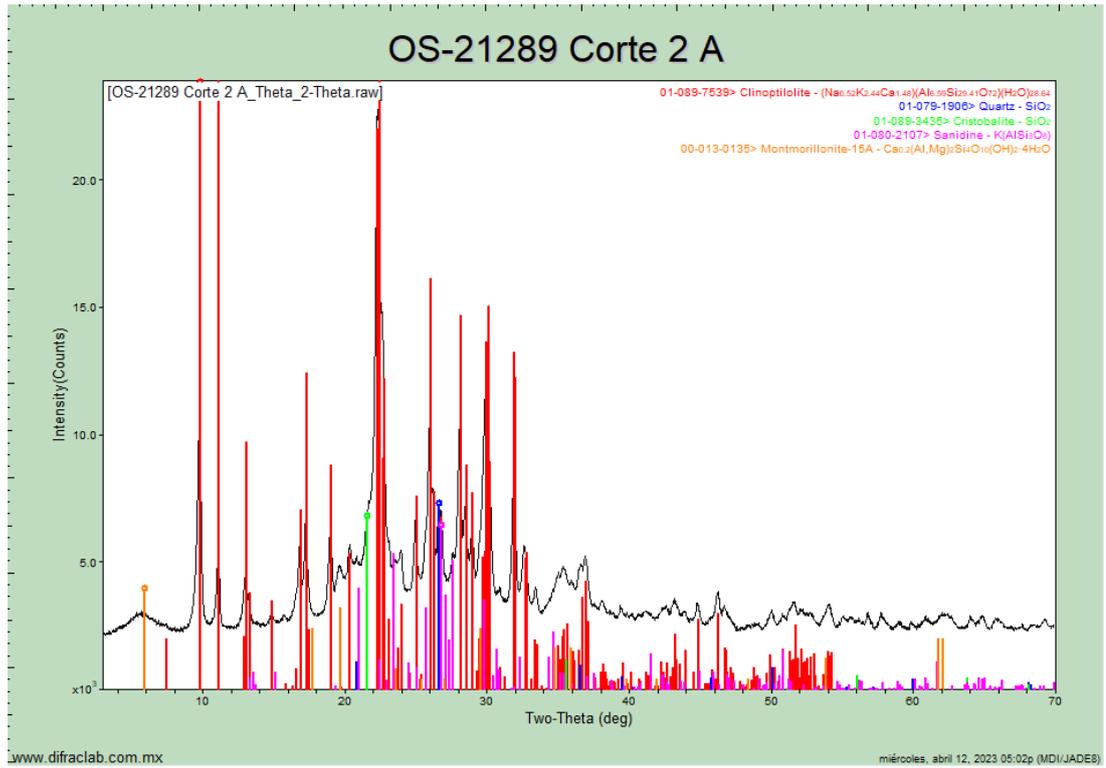
- Difractograma 1 B



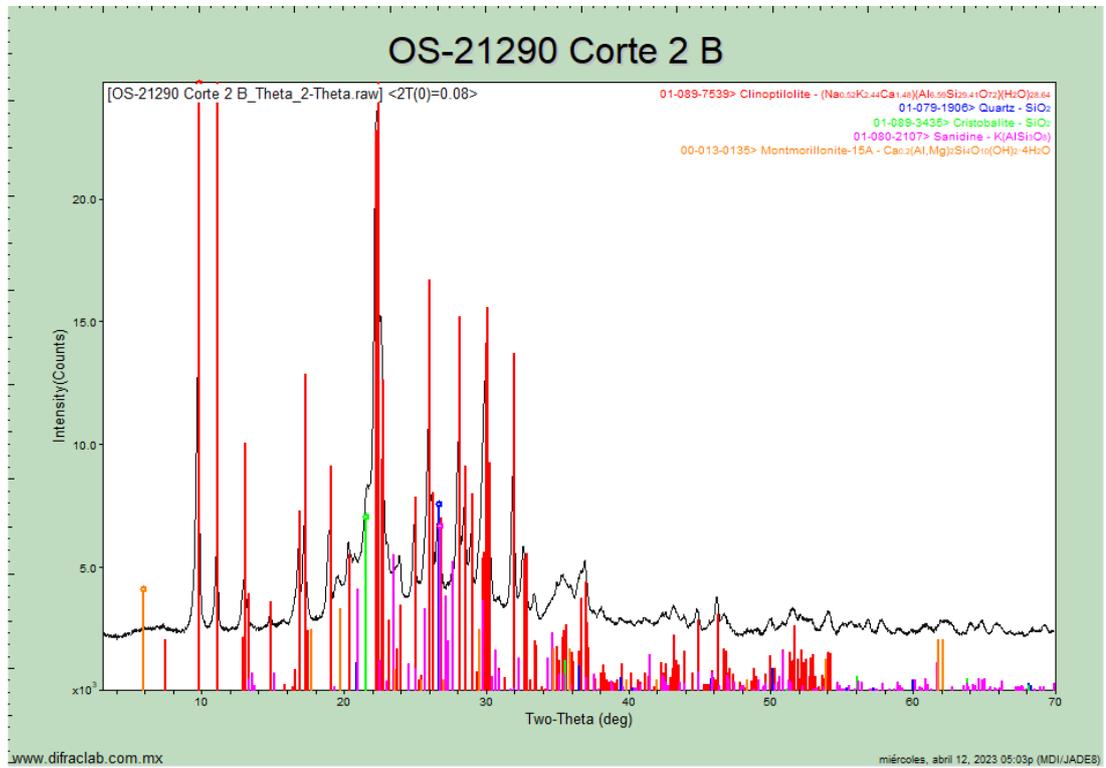
- Difractograma 1 C



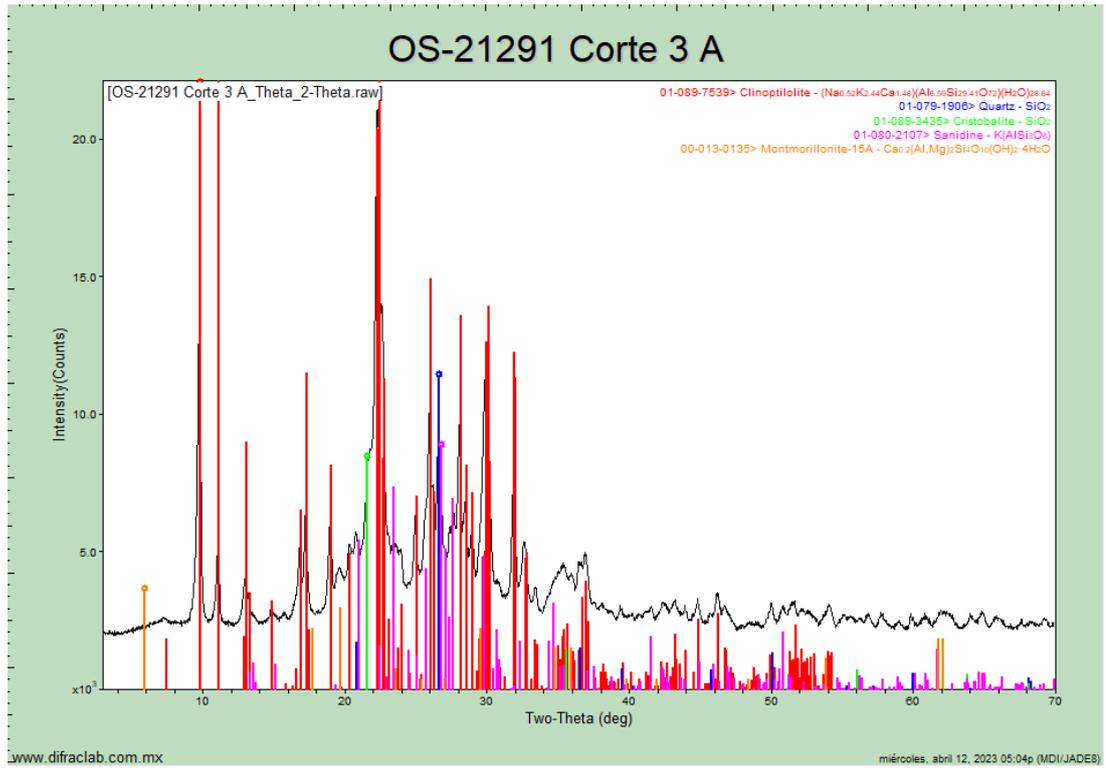
- Difractograma 2 A



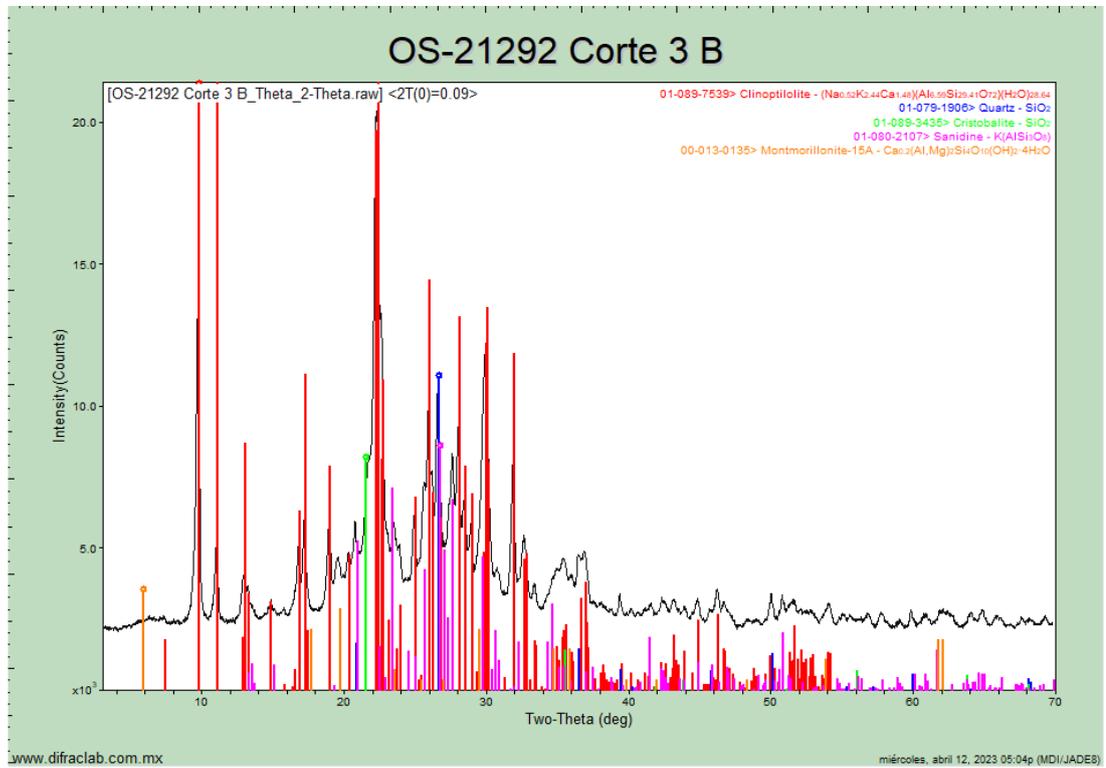
- Difractograma 2 B



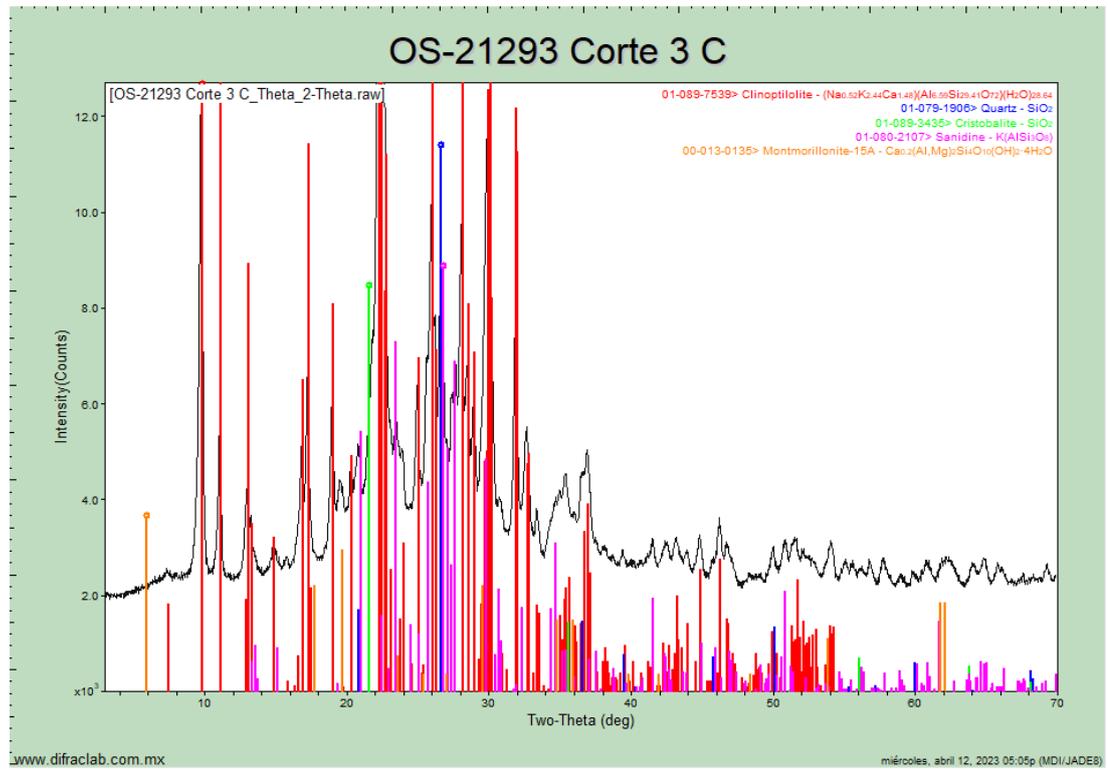
- Difractograma 3 A



- Difractograma 3 B



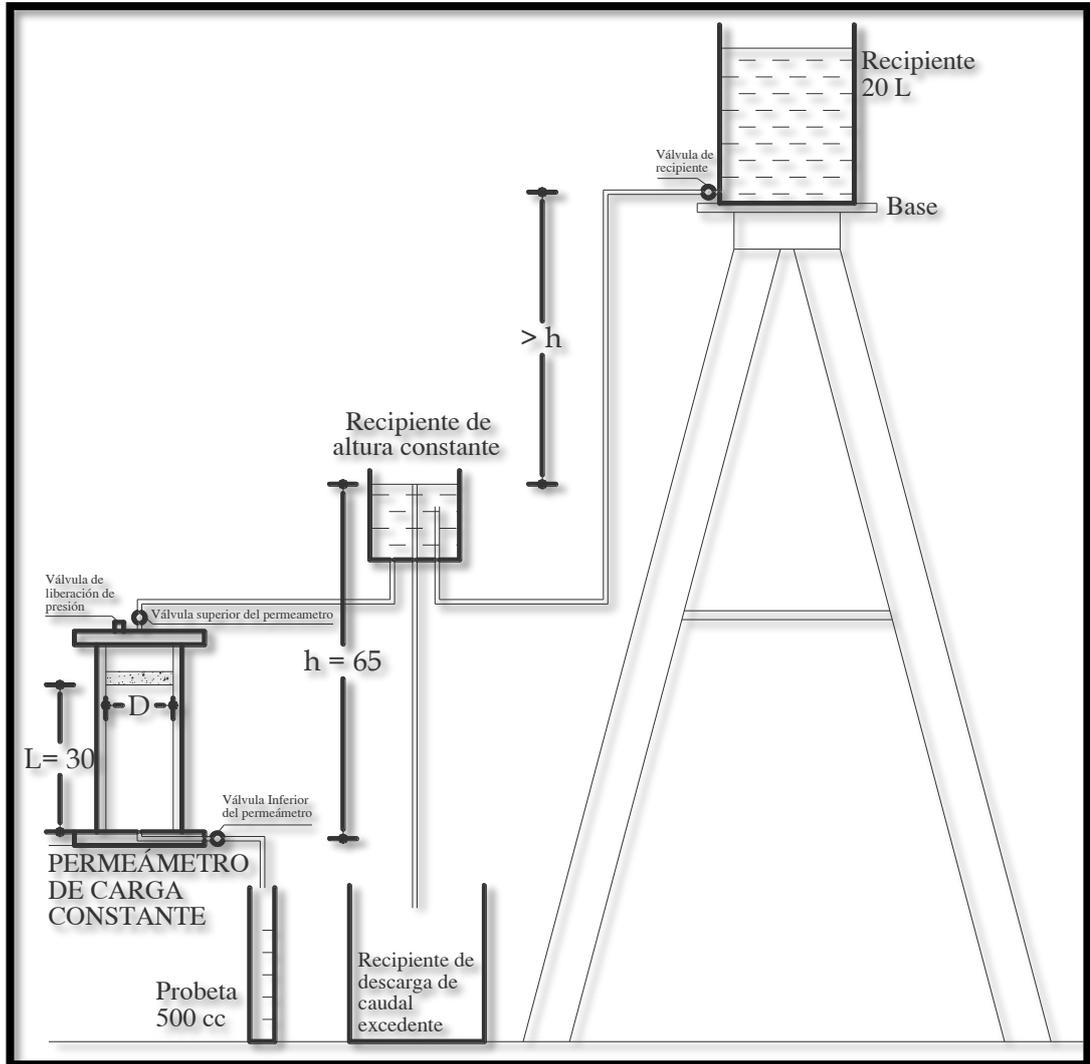
- Difractograma 3 C



Anexo 5: Análisis mecánico o granulometría.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL				
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS				
NORMAS:	ASTM:	D 421-58 y D 422-63		
	AASHTO:	T-87-70 y T-88-70		
PROYECTO:	Análisis Mecánico o Granulometría de la Zeolita			
DIRECCIÓN:	Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica			
MUESTRA:	Zeolita Natural - Clinoptilolita			
1. ENSAYO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS				
TAMIZ	ABERTURA	PESO RET/ACUM	% RETENIDO	% QUE PASA
# 4	4.760	0.00	0.00	100.00
# 8	2.380	46.80	4.68	95.32
# 10	2.000	248.30	24.83	75.17
# 16	1.190	919.00	91.90	8.10
# 30	0.595	971.80	97.18	2.82
# 40	0.420	975.00	97.50	2.50
# 50	0.297	976.90	97.69	2.31
# 60	0.250	977.80	97.78	2.22
# 100	0.149	980.40	98.04	1.96
# 200	0.074	985.00	98.50	1.50
PASA # 200		15.00	1.50	
TOTAL		1000.00		
Peso ant lavado	1000.00	Peso cuarteo antes del lavado		1000.00
Peso des lavado		Peso cuarteo después de lavado		985.00
Total - diferencia		Diferencia o pasa el tamiz # 200		15.00
2. GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA				
<div style="text-align: center;"> <p>GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA</p> </div>				
3. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL SUELO				
D10 en mm	1.23	Cu	D60 / D10	1.47
D30 en mm	1.48	Cc	$D30^2 / (D60 * D10)$	0.98
D60 en mm	1.81	TNM	en mm	2.37
4. CLASIFICACIÓN DEL SUELO ANALIZADO				
SISTEMAS	VISUAL	Arena gruesa	Mal distribuida - Subangular	
	AASHTO	A-1	A-1-a - Arena	
	SUCS	SP	Arena - Limpia sin finos - Mal Graduada	
REALIZADO POR:		REVISADO POR:		
José Rafael Espinoza Apráz		Ph.D. Eduardo Paredes		

Anexo 6: Armado y longitudes del ensayo de k.



Anexo 7: Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas.

Temperatura	Viscosidad Dinámica	Temperatura	Viscosidad Dinámica
°C	kg/(m*s)	°C	kg/(m*s)
0	0.001792	51	0,000538
1	0.001731	52	0,000529
2	0.001674	53	0,000521
3	0.001620	54	0,000512
4	0.001569	55	0,000504
5	0.001520	56	0,000496
6	0.001473	57	0,000489
7	0.001429	58	0,000481
8	0.001386	59	0,000474
9	0.001346	60	0,000467
10	0.001308	61	0,000460
11	0.001271	62	0,000453
12	0.001236	63	0,000447
13	0.001202	64	0,000440
14	0.001170	65	0,000434
15	0.001139	66	0,000428
16	0.001109	67	0,000422
17	0.001081	68	0,000416
18	0.001054	69	0,000410
19	0.001028	70	0,000404
20	0.001003	71	0,000399
21	0.000979	72	0,000394
22	0.000955	73	0,000388
23	0.000933	74	0,000383
24	0.000911	75	0,000378
25	0.000891	76	0,000373
26	0.000871	77	0,000369
27	0.000852	78	0,000364
28	0.000833	79	0,000359
29	0.000815	80	0,000355
30	0.000798	81	0,000351
31	0.000781	82	0,000346
32	0.000765	83	0,000342
33	0.000749	84	0,000338
34	0.000734	85	0,000334
35	0.000720	86	0,000330
36	0.000705	87	0,000326
37	0.000692	88	0,000322
38	0.000678	89	0,000319
39	0.000666	90	0,000315
40	0.000653	91	0,000311
41	0.000641	92	0,000308
42	0.000629	93	0,000304
43	0.000618	94	0,000301
44	0.000607	95	0,000298
45	0.000596	96	0,000295
46	0.000586	97	0,000291
47	0.000576	98	0,000288
48	0.000566	99	0,000285
49	0.000556	100	0,000282
50	0.000547		

Anexo 8: Ensayos del coeficiente de permeabilidad.

- Muestra sin retrolavado.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS					
NORMAS:	ASTM:	D-2434-68	AASHTO:	T-125-66	BS 1377:5
PROYECTO:	Permeabilidad de la Zeolita				
DIRECCIÓN:	Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICM				
MUESTRA:	Zeolita Natural Clinoptilolita - Sin retrolavado				
1.- MEDICIÓN DIRECTA PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS					
Ensayo número	1	2	3	4	5
L = Longitud de la muestra	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
D = Diámetro de la muestra	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
A = El área transversal de la muestra en cm ²	102.07	102.07	102.07	102.07	102.07
t = Tiempo de la prueba en segundos	50.85	53.30	54.40	53.70	54.47
h = Altura de carga hidráulica	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
V = Volumen en cc. filtrado en un tiempo t	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ηt = Viscosidad dinámica a 22 °C	0.000955				
η20 = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
k = Coeficiente de permeabilidad cm/seg.	8.89E-03	8.48E-03	8.31E-03	8.42E-03	8.30E-03
k promedio cm/seg.	8.48E-03				
k20 = Coeficiente de permeabilidad corregido	8.47E-03	8.08E-03	7.91E-03	8.02E-03	7.90E-03
k20 promedio cm/seg.	8.08E-03				
2.- DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS ANALIZADOS					
<p>Con el método de la granulometría se determinó que la zeolita era una arena gruesa, SP (SUCS) y A-1 (AASHTO). Al tamizar la muestra pudimos comprobar que era apta para usar en el permeámetro de carga constante. El k es 8.08E-03 nos indica que la muestra es una arena limpia con un drenaje bueno.</p>					
REALIZADO POR:			REVISADO POR:		
José Rafael Espinoza Apráez			Ph.D. Eduardo Paredes		

- Muestra con retrolavado.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS					
NORMAS:	ASTM:	D-2434-68	AASHTO:	T-125-66	BS 1377:5
PROYECTO:	Permeabilidad de la Zeolita				
DIRECCIÓN:	Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICM				
MUESTRA:	Zeolita Natural Clinoptilolita - Con retrolavado				
1.- MEDICIÓN DIRECTA PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS					
Ensayo número	1	2	3	4	5
L = Longitud de la muestra	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
D = Diámetro de la muestra	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
A = El área transversal de la muestra en cm ²	102.07	102.07	102.07	102.07	102.07
t = Tiempo de la prueba en segundos	5.34	5.47	5.31	5.67	5.58
h = Altura de carga hidráulica	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
V = Volumen en cc. filtrado en un tiempo t	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
η_t = Viscosidad dinámica a 18 °C	0.001054				
η_{20} = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
k = Coeficiente de permeabilidad cm/seg.	8.47E-02	8.27E-02	8.52E-02	7.97E-02	8.10E-02
k promedio cm/seg.	8.27E-02				
k ₂₀ = Coeficiente de permeabilidad corregido	8.90E-02	8.69E-02	8.95E-02	8.38E-02	8.52E-02
k ₂₀ promedio cm/seg.	8.69E-02				
2.- DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS ANALIZADOS					
<p>Con el método de la granulometría se determinó que la zeolita era una arena gruesa, SP (SUCS) y A-1 (AASHTO). Al tamizar la muestra pudimos comprobar que era apta para usar en el permeámetro de carga constante. El K es 8.69E-02 nos indica que la muestra es una arena limpia con un drenaje bueno.</p>					
REALIZADO POR:			REVISADO POR:		
José Rafael Espinoza Apráez			Ph.D. Eduardo Paredes		

- Muestra con retrolavado y disolución baja.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS					
NORMAS:	ASTM:	D-2434-68	AASHTO:	T-125-66	BS 1377:5
PROYECTO:	Permeabilidad de la Zeolita				
DIRECCIÓN:	Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICM				
MUESTRA:	Zeolita Natural Clinoptilolita - Con retrolavado - Disolución baja				
1.- MEDICIÓN DIRECTA PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS					
Ensayo número	1	2	3	4	5
L = Longitud de la muestra	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
D = Diámetro de la muestra	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
A = El área transversal de la muestra en cm ²	102.07	102.07	102.07	102.07	102.07
t = Tiempo de la prueba en segundos	5.56	5.43	5.25	5.28	5.11
h = Altura de carga hidráulica	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
V = Volumen en cc. filtrado en un tiempo t	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ηt = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
η20 = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
k = Coeficiente de permeabilidad cm/seg.	8.13E-02	8.33E-02	8.61E-02	8.56E-02	8.85E-02
k promedio cm/seg.	8.50E-02				
k20 = Coeficiente de permeabilidad corregido	8.13E-02	8.33E-02	8.61E-02	8.56E-02	8.85E-02
k20 promedio cm/seg.	8.50E-02				
2.- DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS ANALIZADOS					
Con el método de la granulometría se determinó que la zeolita era una arena gruesa, SP (SUCS) y A-1 (AASHTO). Al tamizar la muestra pudimos comprobar que era apta para usar en el permeámetro de carga constante. El K es 8.50E-02 nos indica que la muestra es una arena limpia con un drenaje bueno.					
REALIZADO POR: José Rafael Espinoza Apráez			REVISADO POR: Ph.D. Eduardo Paredes		

- Muestra con retrolavado y disolución media.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS					
NORMAS:	ASTM:	D-2434-68	AASHTO:	T-125-66	BS 1377:5
PROYECTO:	Permeabilidad de la Zeolita				
DIRECCIÓN:	Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICM				
MUESTRA:	Zeolita Natural Clinoptilolita - Con retrolavado - Disolución media				
1.- MEDICIÓN DIRECTA PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS					
Ensayo número	1	2	3	4	5
L = Longitud de la muestra	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
D = Diámetro de la muestra	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
A = El área transversal de la muestra en cm ²	102.07	102.07	102.07	102.07	102.07
t = Tiempo de la prueba en segundos	5.81	5.62	5.73	5.55	5.90
h = Altura de carga hidráulica	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
V = Volumen en cc. filtrado en un tiempo t	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ηt = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
η20 = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
k = Coeficiente de permeabilidad cm/seg.	7.78E-02	8.05E-02	7.89E-02	8.15E-02	7.66E-02
k promedio cm/seg.	7.91E-02				
k20 = Coeficiente de permeabilidad corregido	7.78E-02	8.05E-02	7.89E-02	8.15E-02	7.66E-02
k20 promedio cm/seg.	7.91E-02				
2.- DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS ANALIZADOS					
<p>Con el método de la granulometría se determinó que la zeolita era una arena gruesa, SP (SUCS) y A-1 (AASHTO). Al tamizar la muestra pudimos comprobar que era apta para usar en el permeámetro de carga constante. El K es 7.91E-02 nos indica que la muestra es una arena limpia con un drenaje bueno.</p>					
REALIZADO POR:			REVISADO POR:		
José Rafael Espinoza Apráez			Ph.D. Eduardo Paredes		

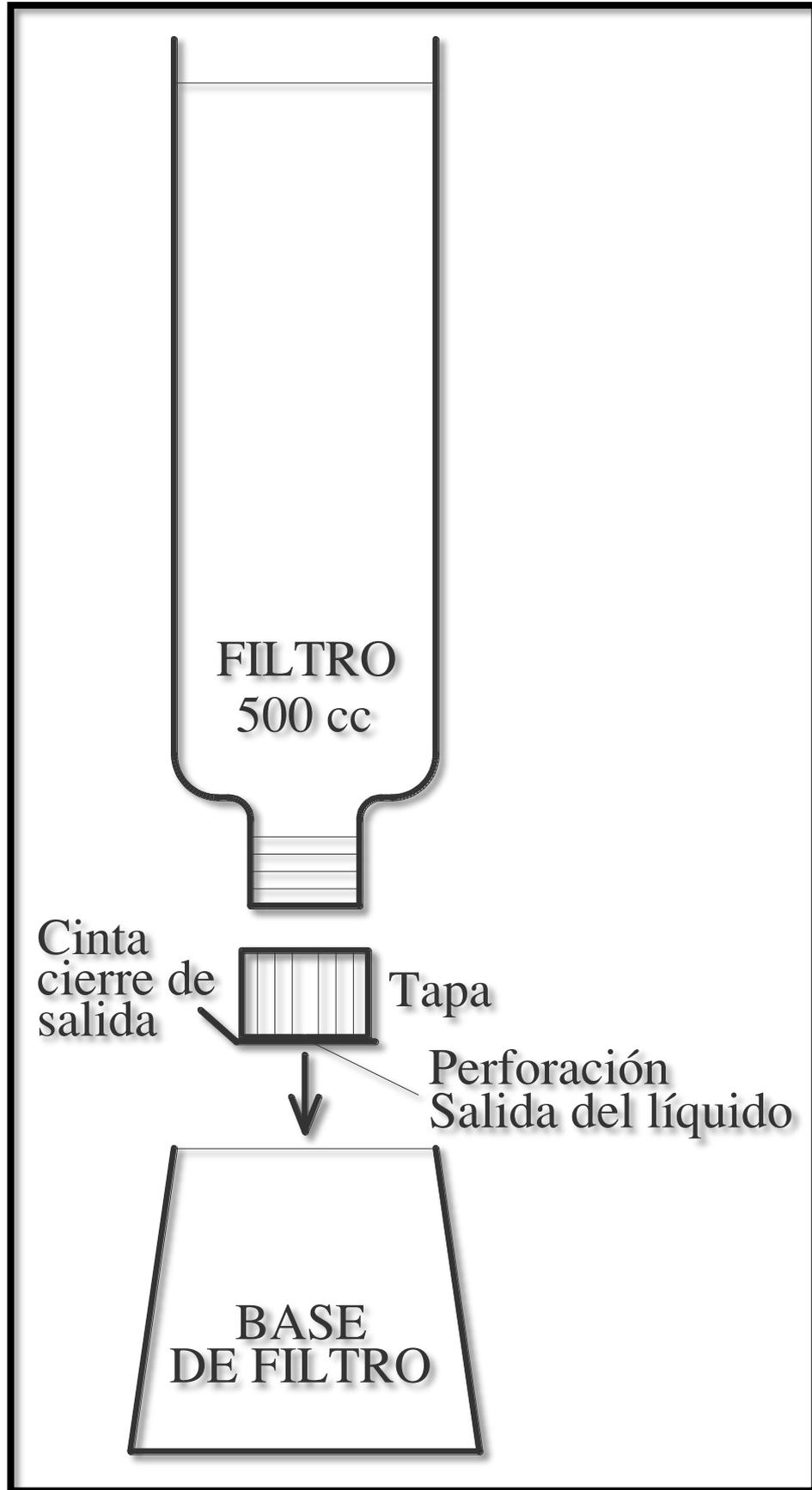
- Muestra con retrolavado y disolución alta.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS					
NORMAS:	ASTM:	D-2434-68	AASHTO:	T-125-66	BS 1377:5
PROYECTO:	Permeabilidad de la Zeolita				
DIRECCIÓN:	Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICM				
MUESTRA:	Zeolita Natural Clinoptilolita - Con retrolavado - Disolución alta				
1.- MEDICIÓN DIRECTA PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS					
Ensayo número	1	2	3	4	5
L = Longitud de la muestra	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
D = Diámetro de la muestra	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
A = El área transversal de la muestra en cm ²	102.07	102.07	102.07	102.07	102.07
t = Tiempo de la prueba en segundos	5.99	5.95	5.75	5.88	6.10
h = Altura de carga hidráulica	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00
V = Volumen en cc. filtrado en un tiempo t	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ηt = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
η20 = Viscosidad dinámica a 20 °C	0.001003				
k = Coeficiente de permeabilidad cm/seg.	7.55E-02	7.60E-02	7.86E-02	7.69E-02	7.41E-02
k promedio cm/seg.	7.62E-02				
k20 = Coeficiente de permeabilidad corregido	7.55E-02	7.60E-02	7.86E-02	7.69E-02	7.41E-02
k20 promedio cm/seg.	7.62E-02				
2.- DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS ANALIZADOS					
Con el método de la granulometría se determinó que la zeolita era una arena gruesa, SP (SUCS) y A-1 (AASHTO). Al tamizar la muestra pudimos comprobar que era apta para usar en el permeámetro de carga constante. El K es 7.62E-02 nos indica que la muestra es una arena limpia con un drenaje bueno.					
REALIZADO POR: José Rafael Espinoza Apráz			REVISADO POR: Ph.D. Eduardo Paredes		

Anexo 9: Ensayos de contenido de humedad.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS						
NORMAS:	ASTM S2216-71		AASHTO T217-67		INEN 690	
PROYECTO:	Contenido de Humedad					
DIRECCIÓN:	Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICM					
MUESTRA:	Zeolita Natural - Clinoptilolita					
TIPO DE SUELO	ARENAS					
Recipiente número	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Peso húmedo + recipiente (W_m + Rec)	600.00	600.00	70.234	70.351	100.002	100.001
Peso seco + recipiente (W_s + Rec)	520.40	520.10	54.107	54.183	71.896	71.913
Peso recipiente (Rec)	7.50	7.50	1.856	1.826	1.841	1.836
Peso del agua (W_w)	79.60	79.90	16.127	16.168	28.106	28.088
Peso de los sólidos (W_s)	512.90	512.60	52.251	52.357	70.055	70.077
Contenido de humedad (ω%)	15.52	15.59	30.864	30.880	40.120	40.082
Contenido de humedad promedio (ω%)	15.55		30.872		40.101	
OBSERVACIONES:						
Muestra A			Zeolita en estado ambiente.			
Muestra B			Zeolita en estado saturado superficie seca.			
Muestra C			Zeolita en estado saturado mojado.			
EJECUTADO POR: José Rafael Espinoza Apráz			REVISADO POR: Ph.D. Eduardo Paredes			

Anexo 10: Prototipo de filtro.

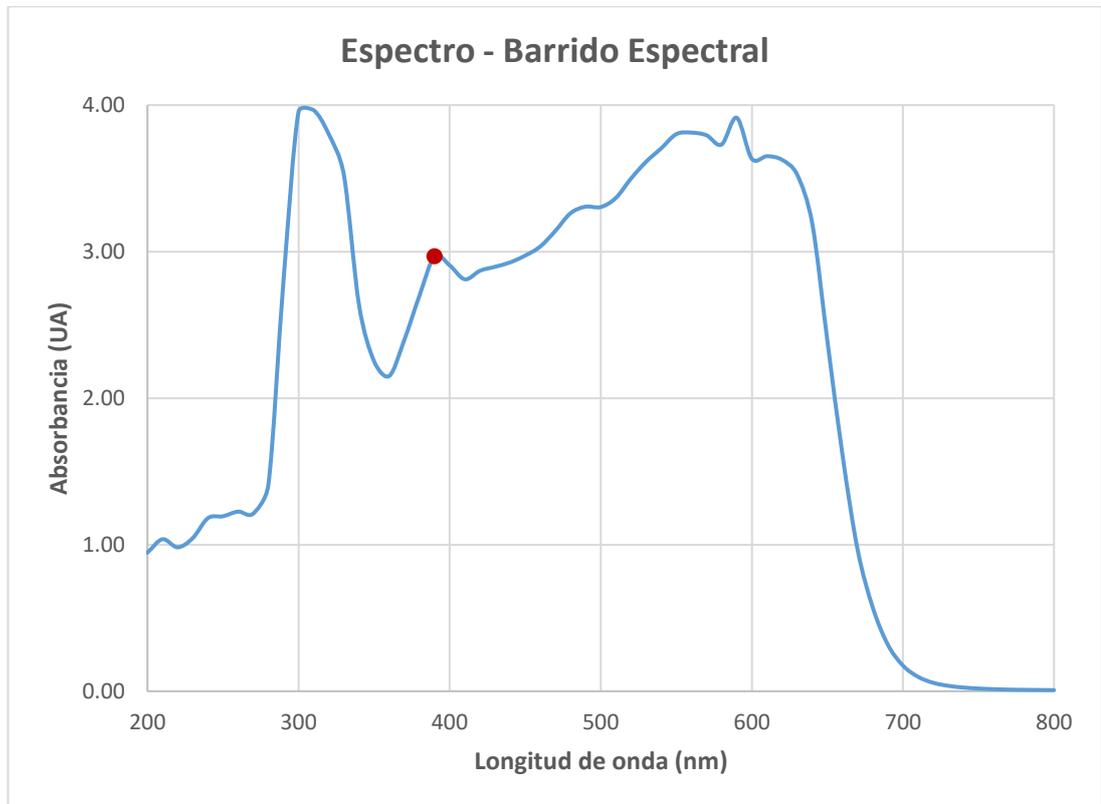


Anexo 11: Ensayos de Espectrofotómetro UV-Vis

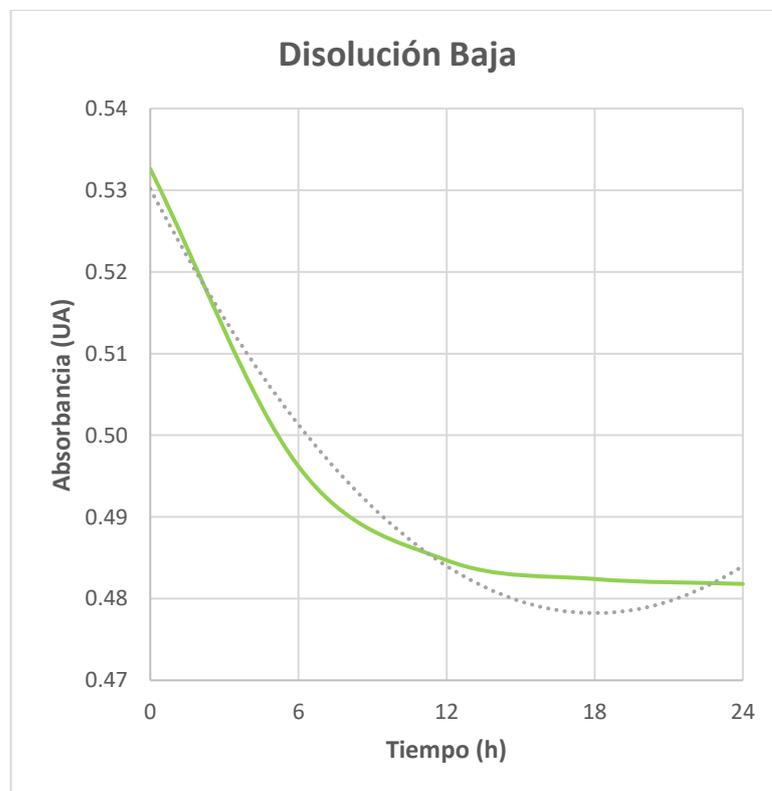
- Barrido espectral para encontrar longitud de onda.

L. onda (nm)	Abs (UA)	L. onda (nm)	Abs (UA)
200	0.9455	510	3.3663
210	1.0373	520	3.4984
220	0.9821	530	3.6132
230	1.0453	540	3.7048
240	1.1810	550	3.8018
250	1.1939	560	3.8120
260	1.2256	570	3.7940
270	1.2121	580	3.7307
280	1.4067	590	3.9135
290	2.7969	600	3.6335
300	3.9544	610	3.6513
310	3.9654	620	3.6266
320	3.8011	630	3.5253
330	3.5242	640	3.1908
340	2.6375	650	2.3915
350	2.2513	660	1.6119
360	2.1508	670	0.9669
370	2.3970	680	0.5726
380	2.6986	690	0.3183
390	2.9670	700	0.1753
400	2.9067	710	0.0986
410	2.8111	720	0.0576
420	2.8689	730	0.0370
430	2.8964	740	0.0251
440	2.9263	750	0.0185
450	2.9728	760	0.0141
460	3.0350	770	0.0110
470	3.1417	780	0.0095
480	3.2619	790	0.0084
490	3.3066	800	0.0073
500	3.3040		

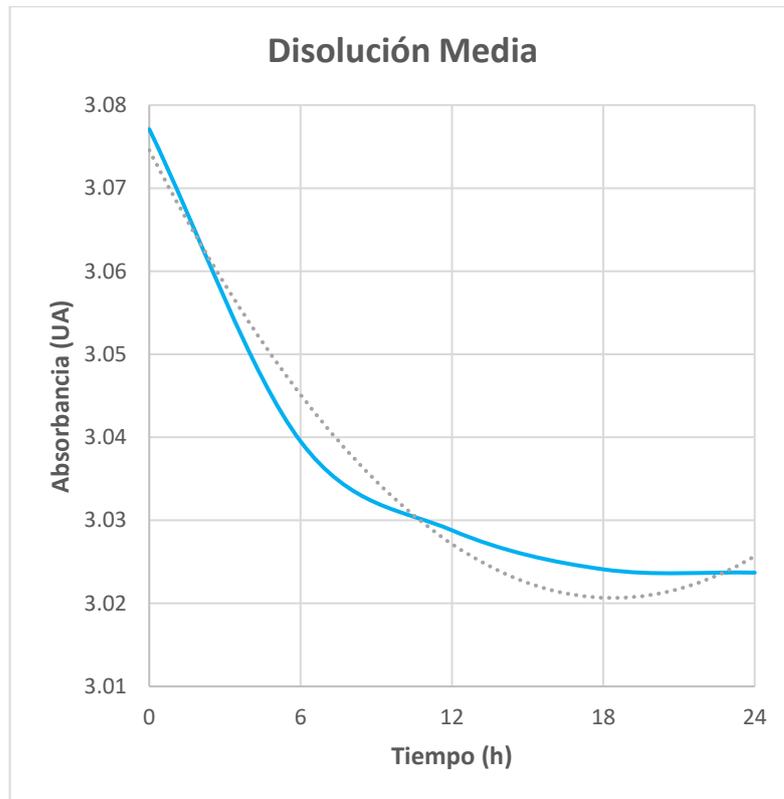
- Espectro obtenido por barrido espectral.



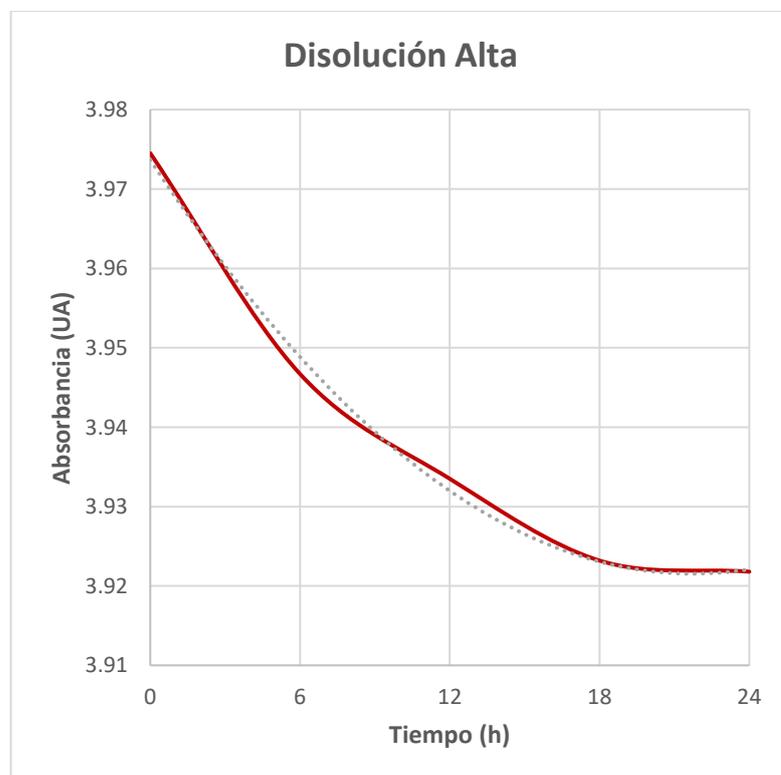
- Gráfica de resultados de disolución baja.



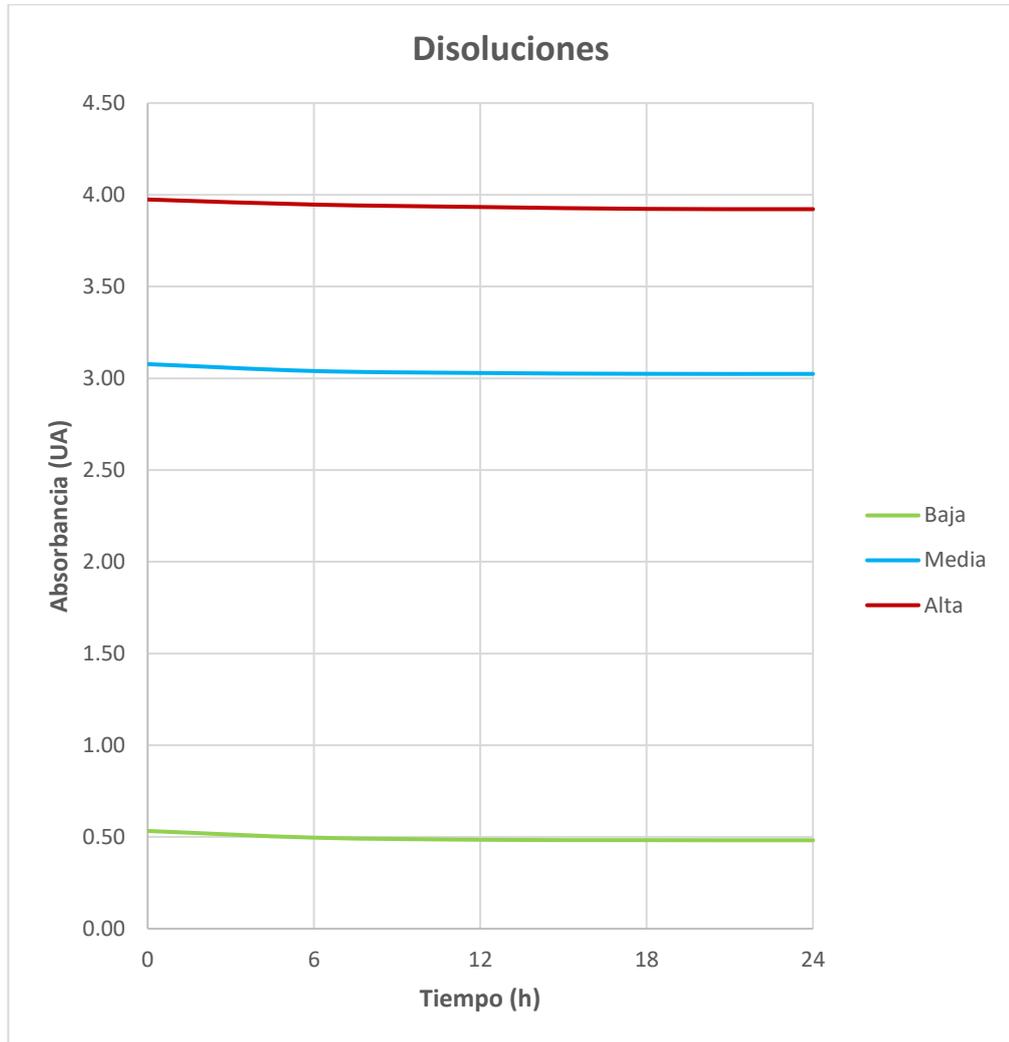
- Gráfica de resultados de disolución media.



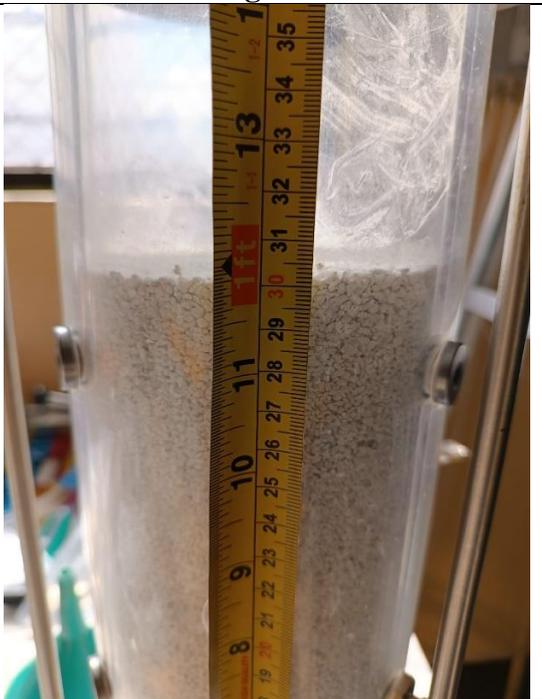
- Gráfica de resultados de disolución alta.

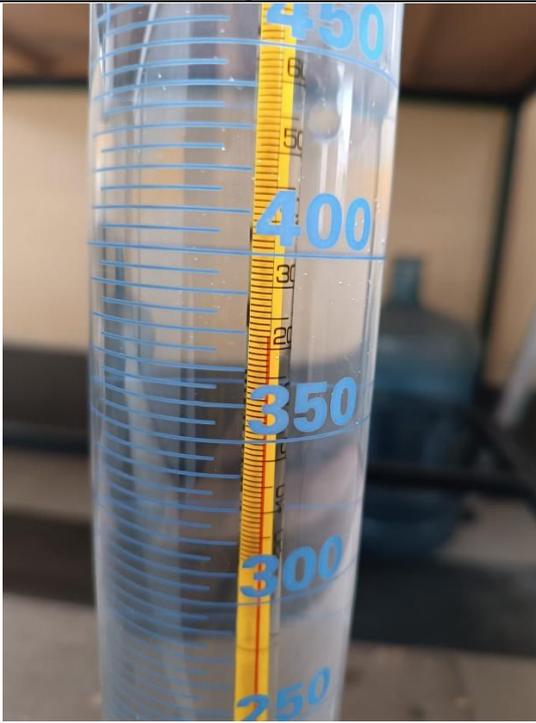
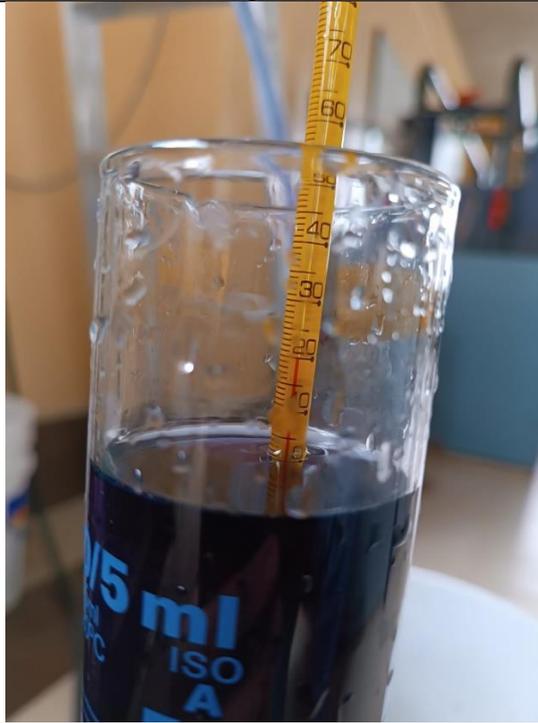


- Comparación de gráficas de disoluciones.



ANEXOS FOTOGRÁFICOS

Fotografía 1	Fotografía 2
 A photograph showing the disassembled components of a permeameter on a grey table. The parts include a clear cylindrical chamber, a metal base with a central rod, a circular metal plate with a mesh, a black O-ring, and various small screws and tools.	 A photograph showing the permeameter assembly on a table. The clear chamber is filled with a light-colored granular material. A green lid is on top, and various tools like a knife and a marker are visible on the table.
Permeámetro desarmado	Colocación del material
Fotografía 3	Fotografía 4
 A close-up photograph of the permeameter chamber. A yellow ruler is placed vertically next to it to measure the height of the granular material. The ruler shows markings from 8 to 35 cm.	 A photograph of the permeameter assembly on a table. The chamber is filled with granular material. A white label with the text "30 cm" is attached to the side of the chamber. The device is connected to a water supply line.
Medición de longitud (L)	Saturación por 24 horas

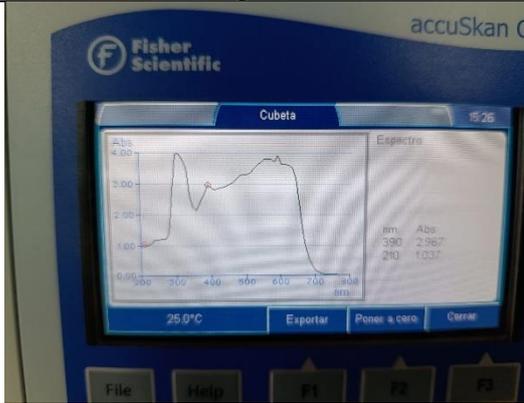
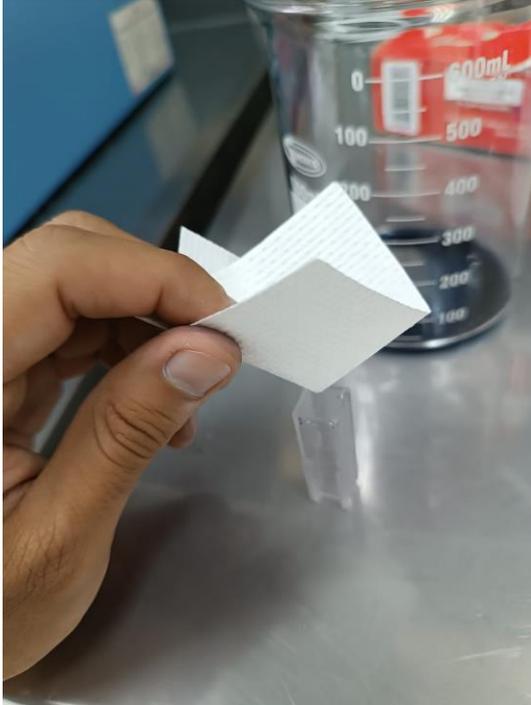
<p style="text-align: center;">Fotografía 5</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 6</p> 
<p style="text-align: center;">Medición de temperatura 22 °C</p>	<p style="text-align: center;">Medición de temperatura 20 °C</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 7</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 8</p> 
<p style="text-align: center;">Comparación visual del filtrado</p>	<p style="text-align: center;">Secado de material</p>

<p style="text-align: center;">Fotografía 9</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 10</p> 
<p style="text-align: center;">Juego de tamices</p>	<p style="text-align: center;">Instalación de portamuestras</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 11</p>	<p style="text-align: center;">Fotografía 12</p>
	
<p style="text-align: center;">Portamuestras con zeolita</p>	<p style="text-align: center;">Medición de partículas</p>

<p style="text-align: center;">Fotografía 13</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 14</p> 
<p style="text-align: center;">Pesaje de colorante</p>	<p style="text-align: center;">Dosificaciones de colorante</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 15</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 16</p> 
<p style="text-align: center;">Pesaje de material para filtro</p>	<p style="text-align: center;">Zeolita para los filtros</p>

<p style="text-align: center;">Fotografía 17</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 18</p> 
<p style="text-align: center;">Perforación de tapa</p>	<p style="text-align: center;">Cinta de cierre de perforación</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 19</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 20</p> 
<p style="text-align: center;">Colorante preparado</p>	<p style="text-align: center;">Ensayos con dosis baja</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 21</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 22</p> 
<p style="text-align: center;">Prototipos en funcionamiento</p>	<p style="text-align: center;">Recolección de primera muestra</p>

<p style="text-align: center;">Fotografía 23</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 24</p> 
<p style="text-align: center;">Toma de muestra para espectrofotómetro</p>	<p style="text-align: center;">Muestras luego de ser filtradas</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 25</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 26</p> 
<p style="text-align: center;">Recolección de muestras</p>	<p style="text-align: center;">Muestras trasladadas para pesar</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 27</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 28</p> 
<p style="text-align: center;">Muestras listas para pesar</p>	<p style="text-align: center;">Resultado de la masa con recipiente</p>

<p style="text-align: center;">Fotografía 29</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 30</p> 
<p style="text-align: center;">Preparación para el barrido</p>	<p style="text-align: center;">Espectro obtenido</p>
<p style="text-align: center;">Fotografía 31</p> 	<p style="text-align: center;">Fotografía 32</p> 
<p style="text-align: center;">Cono de papel filtro para filtración</p>	<p style="text-align: center;">Culminación de ensayos</p>