



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Estudio del efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua
utilizando rocas volcánicas del Chimborazo

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

AUTOR:
Sandoval Rodríguez, Andy Jhonson

TUTOR:
Ing. José Gregorio Prato, Ph.D

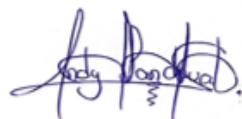
Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Andy Jhonson Sandoval Rodríguez**, con cédula de ciudadanía **060490616-4**, autor del trabajo de investigación titulado: **Estudio del efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua utilizando rocas volcánicas del Chimborazo**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 10 de noviembre de 2024



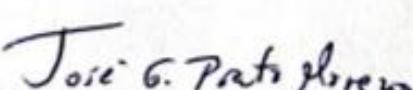
Andy Jhonson Sandoval Rodríguez

C.I: 060490616-4



**ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
CARRERAS NO VIGENTES**

En la Ciudad de Riobamba, a los 24 días del mes de octubre de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **Andy Jhonson Sandoval Rodríguez** con CC: **060490616-4**, de la carrera **de Ingeniería Ambiental** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado "**Estudio del efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua utilizando rocas volcánicas del Chimborazo**", por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



PhD. José G. Prato

TUTOR

**DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE
TRIBUNAL**

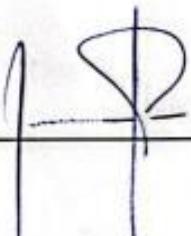
Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación titulado “**Estudio del efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua utilizando rocas volcánicas del Chimborazo**”, presentado por **Andy Jhonson Sandoval Rodríguez**, con cédula de identidad número **060490616-4**, certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 15 de noviembre del 2024

Ing. Marcel Paredes Herrera, MSc.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

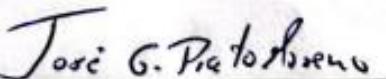


Ing. Iván Ríos García, Ph.D
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



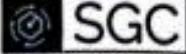

Ing. Carla Fernanda Silva Padilla, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Ing. José Gregorio Prato Moreno, Ph.D
TUTOR





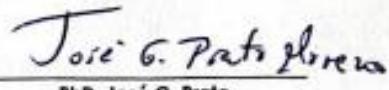
Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, SANDOVAL RODRÍGUEZ, ANDY JHONSON con CC: 060490616-4, estudiante de la Carrera INGENIERÍA AMBIENTAL Facultad de INGENIERÍA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "Estudio del efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua utilizando rocas volcánicas del Chimborazo", cumple con el 7 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio TURNITIN, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 29 de octubre de 2024



PhD. José G. Prato
TUTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, cuyo amor y apoyo incondicional me han permitido llegar hasta aquí. A mis padres, por su constante motivación y por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo y perseverancia.

A mis abuelitos que de alguna manera sé que me están viendo desde el cielo, este triunfo también es por y para ellos.

Andy Jhonson Sandoval Rodríguez

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por permitirme cumplir un logro más en mi vida profesional.

Agradezco a mi tutor de tesis, Ing. José Prato, por su orientación, paciencia y apoyo durante todo el proceso. Sus valiosos consejos, comentarios y conocimientos han sido esenciales para el desarrollo de esta investigación.

A mis profesores y miembros del comité académico, quienes, con su sabiduría y experiencia, han enriquecido mi formación y me han motivado a seguir adelante.

A mis padres por su amor incondicional, apoyo emocional y comprensión en cada momento del proceso, en especial a mi madre gracias por ser mi mayor fuente de inspiración y fortaleza ya que nunca la vi rendirse ante ninguna adversidad, gracias por su ejemplo de perseverancia y por siempre confiar en mis capacidades.

A mis hermanos por siempre estar conmigo en mis altos y bajos, ya que son un pilar fundamental en mi vida.

A mi novia, y familia, quienes me brindaron su comprensión y ánimo en los momentos de incertidumbre, y a todos los que, de alguna manera, hicieron posible este logro.

A mis amigos, por brindarme su apoyo, comprensión y paciencia en los momentos de estrés y duda, y por recordarme la importancia de disfrutar del camino.

A mis familiares más cercanos, por su cariño y por siempre estar ahí cuando más los necesitaba.

Finalmente, agradezco a todas las personas, ingenieros de laboratorio que, directa o indirectamente, han participado en este proyecto, brindando su ayuda, información y recursos para hacer posible la realización de esta tesis.

Andy Jhonson Sandoval Rodríguez

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

ACTA FAVORABLE INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN15

1.1	Antecedentes	15
1.2	Planteamiento del Problema.....	16
1.3	Justificación.....	17
1.4	Objetivos	17

1.4.1	General	17
-------	---------------	----

1.4.2	Específicos	17
-------	-------------------	----

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....18

2.1	Estado del arte	18
-----	-----------------------	----

2.2	Bases Teóricas	19
-----	----------------------	----

2.2.1	Agua.....	19
-------	-----------	----

2.2.1.1	Contaminación del agua	19
---------	------------------------------	----

2.2.1.2	Contaminación por sales disueltas	19
---------	---	----

2.2.1.3	Dureza del agua.....	20
---------	----------------------	----

2.2.2	Adsorción	21
-------	-----------------	----

2.2.2.1	Tipos de adsorción	21
---------	--------------------------	----

2.2.3	Aplicación de la adsorción en el tratamiento del agua	22
-------	---	----

2.2.4	Equilibrio de adsorción	23
-------	-------------------------------	----

2.2.4.1	Isotermas de adsorción	23
---------	------------------------------	----

2.2.4.2	Cinética de adsorción	25
---------	-----------------------------	----

2.2.5	Rocas.....	26
-------	------------	----

2.2.5.1	Rocas volcánicas rocas ígneas	26
---------	-------------------------------------	----

2.2.5.2	Clasificación de las rocas volcánicas	26
	CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	27
3.1	Tipo de Investigación.....	27
3.2	Diseño de Investigación	27
3.3	Técnicas de recolección de datos	27
3.3.1	Revisión documental.....	27
3.3.2	Observación Directa	27
3.3.3	Análisis Cuantitativo	28
3.4	Población de estudio y tamaño de muestra	28
3.5	Fases de la Investigación.....	28
3.5.1	Fase 1. Elaboración de lechos de adsorción a partir de rocas volcánicas de Chimborazo.....	28
	Recolección de rocas volcánicas	28
3.5.1.1	Trituración del material volcánico	29
3.5.2	Fase 2. Caracterización del material adsorbente	29
3.5.2.1	Determinación del tamaño promedio de la roca triturada	29
3.5.2.2	Punto de Carga Neto Cero (PCNC)	30
3.5.3	Fase 3. Montaje de las columnas	31
3.5.4	Fase 4. Activación de los lechos.....	31
3.5.5	Fase 5. Pruebas de adsorción a diferentes pH	32
3.5.6	Fase 6. Equilibrio de adsorción	32
3.5.6.1	Isotermas.....	32
3.5.6.2	Cinética.....	34
3.6	Métodos de análisis.....	35
3.6.1	Análisis de tipo Cuantitativo	35
3.6.2	Procesamiento de datos.....	35
	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	Caracterización del material adsorbente	36
4.1.1	Punto de carga neta cero	36
4.1.2	Granulometría.....	36
4.2	Pruebas de adsorción con el lecho natural	37
4.2.1.	Activación de los lechos a diferentes pH.....	38
4.3	Equilibrio de adsorción	41
4.3.1	Isotermas	41

4.3.2	Cinética	44
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		47
5.1	Conclusiones	47
5.2	Recomendaciones	47
6. Bibliografía.....		48
7. Anexos		52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Coordenadas de recolección del material volcánico	28
Tabla 2.	Alícuotas de ácido e hidróxido necesario para el análisis de PCNC.....	30
Tabla 3.	Variables para graficar con el fin de determinar la isoterma adecuada al proceso de adsorción	33
Tabla 4.	Variables graficadas para determinar la cinética que mejor se adapta al proceso de adsorción	35
Tabla 5.	Caracterización granulométrica de la roca volcánica del Chimborazo...	37
Tabla 6.	Iones de dureza adsorbidos con el lecho a pH 7.....	38
Tabla 7.	Iones de dureza adsorbidos por los lechos activados de las rocas volcánicas del Chimborazo a diferentes niveles de pH.....	41
Tabla 8.	Constantes de la isoterma de mejor ajuste al proceso de adsorción a diferente pH.	43
Tabla 9.	Resultados de las isothermas de mejor ajuste al proceso de adsorción a diferente pH.	44
Tabla 10.	Cinéticas de mejor ajuste al proceso de adsorción a diferente pH	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de Ubicación del sitio de recolección del material volcánico.	29
Figura 2.	Valor obtenido del punto de carga neta cero para la roca volcánica del	
Chimborazo	36
Figura 3.	Pruebas de adsorción de la dureza empleando lechos naturales	38
Figura 4.	Curvas de activación de los lechos a diferentes pH: A) Lechos activados	
con pH básico (NaOH); B) Lechos activados con pH ácido (HCl)	38	
Figura 5.	Pruebas de adsorción a diferentes niveles de pH.....	39
Figura 6.	Porcentaje de remoción de iones de dureza con lecho activado a	
diferente pH	41
Figura 7.	Ajustes lineales de las Isotermas a pH 11,5 A) Freundlich, B) Langmuir,	
C) Temkin, D) Dubinin Radushkevich	42	
Figura 8.	Ajustes lineales de las Cinéticas a pH 11,5 A) Pseudo Primer Orden, B)	
Pseudo Segundo Orden, C) Difusión Intraparticular	45	
Figura 9.	Trituración de la roca volcánica	52
Figura 10.	Tamizado del material	52
Figura 11.	Calibrador digital de Vernier.....	52
Figura 12.	Medición de Lechos.....	52
Figura 13.	Pesado del material para el PCNC.....	53
Figura 14.	Montaje de vasos para el PCNC	53
Figura 15.	Adición de la solución ácida y básica a cada muestra	53
Figura 16.	Medición del pH en cada muestra	53
Figura 17.	Armado de la columna de adsorción	53
Figura 18.	Uso de la columna de adsorción.....	53
Figura 19.	Preparación de solución activadora	54
Figura 20.	Adicionamiento de la solución en la columna de adsorción.....	54
Figura 21.	Calibración de llaves.....	54
Figura 22.	Toma de muestras	54
Figura 23.	Preparación de los instrumentos para la titulación	54
Figura 24.	Titulación de muestras activadas.....	54
Figura 25.	Reactivación de los lechos a pH: 2,0 y pH:4,6.....	55
Figura 26.	Reducción de la dureza en lecho reactivado a pH:2,0 y pH:4,6.....	55
Figura 27.	Reactivación de los lechos a pH:9,5 y pH:11,5.....	55
Figura 28.	Reducción de dureza de los lechos a pH:9,5 y pH:11,5	55
Figura 29.	Representación gráfica de las isotermas a pH:2	56
Figura 30.	Representación gráfica de las isotermas a pH:7	57
Figura 31.	Representación gráfica de Cinética a pH:2	58
Figura 32.	Representación gráfica de Cinética a pH:7	59

RESUMEN

El agua natural varía en dureza según su ubicación, lo que puede afectar la salud humana (hipermagnesemia, cálculos renales) y dañar equipos industriales. Este estudio busca reducir la dureza del agua potable de Riobamba, causada principalmente por carbonatos de calcio y magnesio, mediante el uso de lechos adsorbentes a base de rocas volcánicas del Chimborazo, estudiando el efecto del pH de activación sobre la retención de estos iones. Las rocas fueron trituradas y activadas con soluciones de NaOH y HCl para mejorar la retención de cationes y determinar el pH óptimo para reducir la dureza. Los ensayos, con una dureza inicial de 500 mg/L CaCO₃ y un flujo de 100 mL/min, mostraron que los lechos activados con NaOH lograron una mayor eficiencia, con un 42.3% de remoción a pH 11,5. El estudio termodinámico reveló que las isotermas de Freundlich y Temkin describen adecuadamente el proceso de adsorción, indicando una adsorción física en multicapas. En cuanto a la cinética, el modelo de Pseudo Segundo Orden se ajustó mejor, sugiriendo que la velocidad del proceso depende de la disponibilidad de dos sitios activos en el adsorbente.

Palabras claves: Dureza total, Adsorción, Rocas volcánicas, Cinética; Activación.

ABSTRACT

Natural water varies in hardness depending on location. It can affect human health (hypermagnesemia, kidney stones) and damage industrial equipment. This study aims to reduce the hardness of drinking water in Riobamba, mainly caused by calcium and magnesium carbonates, using adsorbent beds made from volcanic rocks from Chimborazo to study the effect of activation pH on the retention of these ions. Cushing and activating the rocks with NaOH and HCl solutions was necessary to enhance cation retention and determine the optimal pH to reduce hardness. The tests, with an initial hardness of 500 mg/L CaCO₃ and a flow rate of 100 mL/min, showed that the beds activated with NaOH achieved greater efficiency, with a 42.3% removal rate at pH 11.5. The thermodynamic study revealed that the Freundlich and Temkin isotherms adequately describe the adsorption process, indicating physical multilayer adsorption. Regarding kinetics, the Pseudo-Second Order model provided the best fit, suggesting that the process rate depends on the availability of two active sites on the adsorbent.

Keywords: Total hardness, Adsorption, Volcanic rocks, Kinetics, Activation.



Reviewed by:

Mgs. Jessica María Guaranga Lema

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0606012607

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Un porcentaje alto de la mayoría de los organismos es simplemente agua, esta molécula a más de ser el principal componente de los seres vivos, es un elemento fundamental para la vida y el más importante, ya que, sus características físicas y químicas nos han permitido sobrevivir y poder evolucionar en el planeta Tierra.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la dureza del agua se define como la medida de la capacidad del agua para reaccionar con el jabón y producir un depósito notable de precipitado, por ejemplo: metales o sales insolubles. La principal causa de la dureza del agua natural es la presencia de iones de Calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+}). Otros iones bivalentes que también participan en la dureza son principalmente hierro (Fe^{2+}), Manganese (Mn^{2+}) y Estroncio (Sr^{2+}); aunque no en cantidades significativas. La forma estándar de expresar la dureza del agua es en miligramos de carbonato de calcio equivalente por litro (mg/L CaCO_3) o de ppm de CaCO_3 , considerándose agua dura aquella que excede los 60 mg/L CaCO_3 de concentración (Capote et al., 2017). Estas aguas tienen la desventaja de afectar las redes de distribución urbanas (debido a la aparición de incrustaciones internas en las tuberías) y los sistemas de riego agrícolas. Además, la precipitación de calcio altera la composición química del suelo, impidiendo la acción correcta de los agroquímicos en los cultivos.

Los estudios epidemiológicos son controversiales, sin embargo, han demostrado el riesgo de enfermedad cardiovascular por el depósito del calcio en las paredes de los vasos sanguíneos, que unido a los lípidos producen el endurecimiento de las paredes vasculares (aterosclerosis) y la reducción de la luz de las arterias que dificulta el flujo sanguíneo. También se ha reportado el retraso en el crecimiento de los niños, debido a la interferencia del exceso de calcio con la absorción de minerales esenciales (J. Prato et al., 2021). Además, el contacto prolongado con agua dura produce dermatitis atópica por deterioro de la barrera cutánea después de la exposición a los tensoactivos de los productos de lavado, combinado con altos niveles de calcio.

Igualmente, se ha estudiado la relación entre la Enfermedad Renal Crónica de etiología incierta y la dureza del agua en regiones rurales cercanas de Sri Lanka, y se ha encontrado una relación directa entre estas dos variables. Por tanto, reducir los niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} en el agua es un tema de importancia actual.

En la actualidad, se conoce que el agua potable de la ciudad de Riobamba tiene abundantes minerales, específicamente sales de calcio y magnesio (Romero, 2009). Debido a que, parte del agua que consumen los Riobambinos provienen de aguas subterráneas, mismas que previo a su captación atraviesan por diversas formaciones geológicas como acuíferos carbonatados formados por Ca y Mg, lo cual indica mayor presencia de dureza.

El interés de esta investigación es analizar el pH idóneo con el fin de reducir la presencia de sales disueltas en el agua potable de la ciudad de Riobamba que afectan la calidad de este recurso hídrico, específicamente de carbonatos de calcio y magnesio, debido a que, estos son los causantes de enfermedades como son cálculos de riñón, también se dice que la causa principal de hipermagnesemia que es la insuficiencia renal asociada con la habilidad

reducida de excretar el magnesio. El incremento del consumo de sales de magnesio puede causar cambios de movimientos intestinales.

Por ende, el presente estudio pretende analizar el punto idóneo de pH mediante la experimentación de lechos adsorbentes elaborados a partir de rocas volcánicas previamente trituradas provenientes del volcán Chimborazo, que serán analizados de forma natural como de forma activada a distintos niveles de pH que ayude en la evaluación del equilibrio y a la cinética de adsorción de la dureza del agua potable de la ciudad de Riobamba, específicamente agua natural que surte a los laboratorios de la Facultad de Ingeniería para finalmente obtener las condiciones correctas las cuales las rocas volcánicas tendrán un mejor desempeño y así poder replicar en un sistema de retención de la dureza alternativo de bajo costo y que sea sustentable.

1.2 Planteamiento del Problema

La degradación a nivel regional de los ecosistemas, el uso irracional e intensivo de los suelos, han generado variaciones drásticas en los ciclos hidrológicos y en sus características físicas, químicas, biológicas del agua. Por tanto, el agua posee un poder disolvente capaz de incorporar a su paso materias orgánicas e inorgánicas, que aporta a la formación de la dureza en las aguas superficiales y subterráneas (Orellana, 2005).

Se ha considerado que los factores principales que interviene en la formación de la dureza del agua son de manera natural por medio de los minerales disponibles en las rocas, estiércol de los animales y descomposición de la materia orgánica; mientras que, artificialmente es provocado por el ser humano mediante la agricultura, ganadería, industrialización, urbanización desordenada; actividades que afectan en el ciclo hidrológico con efluentes altamente contaminantes.

Las vertientes que provee de agua para el consumo humano de la población urbana de Riobamba, está amenazado por aspectos naturales y antrópicas por el hecho de su ubicación bajo las montañas rocosas, amplias llanuras donde hay pastoreo de animales y asentamientos humanos. Por tanto, son factores que el agua durante el recorrido hasta el afloramiento adquiera elementos que conducen a formación de dureza.

Por lo tanto, es importante evaluar la posibilidad de emplear materiales oxídicos en el tratamiento del agua natural de la ciudad de estudio, debido a que, estos materiales han sido probados exitosamente en la eliminación de metales pesados de corrientes residuales (Márquez et al., 2020). Además, el país tiene numerosos volcanes con una gran diversidad geológica, es por ello, que se plantea la evaluación del efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua utilizando rocas volcánicas del Chimborazo, con la finalidad de estudiar el potencial del mineral ígneo en el tratamiento de la dureza del agua natural.

1.3 Justificación

El agua se encuentra en lagos, ríos, mares y constituye el 70 % de la superficie terrestre, lo cual permite ser sustento y fuente de vida, ya que, mantiene el equilibrio ecológico y permite el desarrollo adecuado de los procesos industriales.

El agua natural proveniente de la provincia de Chimborazo presenta concentraciones entre 150 y 407 mg/L CaCO₃, debido a que la principal actividad de los chimboracenses está enfocada en la agricultura, a la vez, la dureza del agua disminuye la efectividad de los herbicidas, por lo que, los agricultores de la provincia requieren que los niveles de dureza disminuyan por medio de una alternativa costo eficiente que permita a los agricultores desarrollar de manera adecuada las actividades diarias que exige el campo.

Por tanto, la finalidad del presente proyecto de investigación es estudiar el efecto que tiene el pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua, para el cual, se crearán lechos a base de rocas volcánicas del Chimborazo, por medio del método de adsorción para evaluar la eficiencia que presentan a diferentes pH.

A fin de obtener resultados beneficiosos enfocados en el costo para los agricultores se desarrollarán los ensayos con agua artificial y natural, para aprovechar H₂O en las actividades diarias que demanda la humanidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Estudiar el efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua utilizando rocas volcánicas del Chimborazo.

1.4.2 Específicos

- Evaluar la eficacia del proceso de adsorción de la roca volcánica a diferentes pH.
- Estudiar la influencia del pH en el equilibrio de adsorción utilizando la roca del volcán Chimborazo.
- Evaluar el efecto del pH sobre la cinética de adsorción de la dureza empleando rocas volcánicas.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

El desarrollo acelerado industrial incrementa la generación de aguas residuales, que requieren necesariamente un tratamiento previo antes de ser desechados a los cuerpos de agua (Carbonel, 2018). A su vez, cuando el agua pasa por los depósitos geológicos que poseen minerales, mismos que son arrastrados por la fuerza natural del agua, adiciones que al ser consumidas afectan en la salud humana. De acuerdo con (Prato et al., 2022), el agua dura provoca problemas agrícolas, industriales y domésticos, por lo cual, mediante investigaciones se buscan alternativas costo eficientes que minimicen el grado de dureza, tal como lo es el método de adsorción.

Dentro estudios de los investigadores (Tuesta et al., 2005) denominado “Modificación química de arcillas y su aplicación en la retención de colorantes” quienes trabajaron con arcilla natural recolectada de la región central de Perú, misma que fue caracterizada por fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja, área específica BET, para la determinación de la presencia de aluminio y silicio, investigación de la cual obtuvieron como resultados que la arcilla es montmorillonita molida, tamizada en un tamiz < 30 micras y termoactivada (someter a la arcilla a solución de ácido clorhídrico 2 N, en relación 10 mL de ácido por gramo de arcilla, a temperatura constante de 90 °C por 2 horas, para luego lavar el material y secarlo a 60 °C por 16 horas, para molerla a un tamaño de 0.45 mm y calcarla a 200 °C por 2 horas). Tras su experimentación confirman que al modificar las propiedades de las arcillas en tratamiento ácido se mejora la eficacia del proceso de adsorción mediante la aplicación de un tratamiento de activación a diferentes pH, lo cual resulta en el aumento de su carga superficial y mejora de la retención de los iones a ser adsorbido (dureza).

Dentro del estudio de (Largo & Villamarín, 2013) por título “Caracterización y activación química de arcilla tipo bentonita para su evaluación en la efectividad de remoción de fenoles presentes en aguas residuales”, en la cual utilizaron material arcilloso (bentonita) para caracterizarlo fisicoquímicamente, y activarlo con ácido sulfúrico, con bromuro de hexadecilmethylamonio y con ácido con anclaje salino, respectivamente, para posterior llevar a cabo una prueba de jarras con 250 mL de agua contaminada con fenoles y concentraciones de arcilla tanto natural como activada que va desde 2000 a 1000 ppm, por 6 horas a 300 rpm, para luego filtrar y cuantificar por espectrofotometría visible, como resultados se obtuvo que la arcilla activada con ácido sulfúrico con anclaje de bromuro de hexadecilmethylamonio, es el tratamiento que más eficiencia presenta removiendo un 88.1% de fenol. Los resultados de la investigación fueron que la arcilla roja al ser activada con una combinación ácido-base tiene una eficiencia para retener contaminantes positivamente, lo cual permite inferir que al realizar un tratamiento a diferentes pH utilizando arcilla blanca su eficiencia aumente.

Los investigadores (Prato et al., 2022), presentaron una investigación denominada “Evaluación de materiales litológicos oxídicos como adsorbentes para el tratamiento de efluentes y aguas residuales”, en el cual se implementó un sistema de filtros empleando bases adsorbentes a partir de materiales litológicos oxídicos de sectores andinos, los cuales primero fueron caracterizados, para luego preparar filtros mono y bicapa, con lechos peletizados con longitud entre 5 y 8 mm, para tratar agua con condiciones iniciales de 76 UNT, DBO 230

mg/L y DQO 445 mg/L, dichos parámetros fueron analizados cada 100 mL de volumen de agua residual percolado, hasta que se llegue a la saturación del lecho. Como resultado se obtuvo una remoción de turbidez del 61%, del DBO un 97.4% y del DQO un 94%, esto con el filtro bicapa, mientras que con el filtro convencional de arena se obtuvo un valor de remoción de 86%, con esta investigación se demuestra que los materiales litológicos oxídicos son de gran utilidad al descontaminar aguas residuales y sobre todo son de fácil aplicabilidad y de bajo costo, es un impulso para seguir indagando esta temática, aportando de esta manera a nuestra investigación.

En su investigación (Gallo & Morales, 2020b) denominado “estudio del equilibrio de adsorción de la dureza del agua sobre rocas volcánicas” evaluaron sobre lechos de tamaños 0,5 y 1,5 cm de rocas volcánicas El Altar, Chimborazo, Cotopaxi, Reventador y Tungurahua el equilibrio de adsorción de la dureza de agua utilizaron una concentración de inicial de 635 ppm CaCO₃ y se estudió la adsorción sobre lechos naturales y activados con Hidróxido de sodio y Ácido clorhídrico. Como resultados obtuvieron que los cinco lechos si adsorben la dureza del agua, siendo más eficientes los activados por el hidróxido de sodio. En el caso de los lechos de Chimborazo implica la aplicación de una isoterma (modelo Langmuir), sin embargo, al activar los lechos de tal procedencia es necesario ajustar con el modelo Dubbinin – Radushkevich, mismo que sigue una cinética de pseudo segundo orden.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Agua

De acuerdo (Guerrero, 2006) es una sustancia que resulta de la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno; de características incolora, inodora e insípida. Es el componente más abundante de la corteza terrestre, se encuentra en diferentes estados sosteniendo la vida en el planeta.

abundante en la Tierra, que

2.2.1.1 Contaminación del agua

(Juliño et al., 2021) en su estudio destaca la definición de agua contaminada como aquella que experimenta cambios en su composición natural hasta dejarla inaprovechable.

Parten de las acciones humanas, industriales y agrícolas que introducen algún residuo al agua y alteran su composición química y calidad (Guadarrama et al., 2016).

2.2.1.2 Contaminación por sales disueltas

La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en el agua, depende del origen del recurso y curso que toma hasta su uso, lo cual infiere en el tipo y contenido de sales disueltas, entre los principales solutos de los cuales se derivan estas sales son los cationes de sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K), al igual que los aniones cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos y los nitratos.

La presencia de sales disueltas de origen natural se debe a la cercanía al mar, la geología del terreno y el clima, mientras que, por origen antrópico por las aguas residuales domésticas y de industrias mineras, agrícolas y ganaderas. Ambos factores de origen consecuentemente generan la presencia de sales que condicionan la adaptabilidad de los seres

vivos como las plantas en un medio determinado, afectando así al equilibrio ecológico de un ecosistema, además de ello genera problemas en la producción agrícola y por ende pérdidas económicas (Mullor, 2017).

2.2.1.3 Dureza del agua

Es la cantidad de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua, también conocida como grado hidrotimétrico, la dureza es la suma de las concentraciones de cationes metálicos a excepción de los metales alcalinos y el ion hidrógeno. Minerales que tienen su origen en las formaciones rocosas calcáreas, su grado de dureza puede variar dentro de las aguas naturales. Si el agua presenta una dureza superior a 120 ppm CaCO₃ es considerada dura (Rodríguez, 2010). Por otra parte, de manera antrópica la dureza del agua proviene de los residuos de diferentes industrias químicas inorgánicas (Neira, 2006).

Dureza Temporal

También conocida de carbonatos. Se debe a los bicarbonatos y carbonatos de calcio y magnesio, mismos que pueden ser eliminados por ebullición, ya que, el calcio y el magnesio se precipitan en forma de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio. Otra forma de eliminar la dureza temporal es mediante la adición de hidróxido de calcio, logrando a su vez la esterilización del agua. Es decir, numéricamente la dureza es mayor que la suma de las alcalinidades de carbonatos y bicarbonatos (Rodríguez, 2010; Soto, 2010).

Dureza Permanente

También conocida dureza carbónica o residual. Es usualmente causada por la presencia de sulfato de calcio, magnesio o cloruros. Se logra su ablandamiento por medio de la ebullición, es decir, el bicarbonato se precipita desprendiendo dióxido de Carbono y disminuyendo el valor del pH, debido a las formaciones de ácido carbónico. No obstante, resulta económico y práctico agregarle en elevadas cantidades cal apagada con el fin de que reaccione con los bicarbonatos, precipitándose los carbonatos. Otra opción para el ablandamiento del agua permanente es mediante la filtración a través de zeolitas naturales o artificiales que absorben los iones de sodio en el agua (Rodríguez, 2010).

Grados de Dureza

De acuerdo con (Rodríguez, 2010), el grado de dureza es una medida de concentración total, del contenido de iones Ca²⁺ y Mg²⁺, expresado como equivalente de Carbonato de calcio en unidad de partes por millón (ppm), miligramos por litro (mg/L). Existen varios grados de dureza:

- Grado Ingles (°e) o grado Clark: Equivalente a 14,3 mg/L CaCO₃ de agua.
- Grado Alemán (Deutsche Harte, °dH): Equivalente a 17,9 mg/L CaCO₃ de agua.
- Grado Frances (°f): Equivalente a 10,0 mg/L CaCO₃ de agua.
- Grado Americano (a°): Equivalente a 17,2 mg/L CaCO₃ de agua.

Clasificación de la dureza del agua

De acuerdo con la Organización Mundial de la salud, la dureza se clasifica en:

- Blanda: 0 – 60 mg/L CaCO₃
- Moderadamente Dura: 61 - 120 mg/L CaCO₃
- Dura: 121 - 180 mg/L CaCO₃
- Muy Dura: >180 mg/L CaCO₃

Problemas del agua dura

La dureza del agua no es deseable en el ámbito doméstico, ya que disminuye la efectividad de los jabones durante el lavado. Esto ocurre porque las sales de sodio derivadas de los ácidos grasos con un mayor número de átomos de carbono reaccionan con el calcio y el magnesio presentes en el agua dura, formando sales insolubles. Como resultado, se generan manchas de cal en la ropa, grifos, sanitarios y utensilios de cocina. Además, la dureza del agua puede alterar los tiempos de cocción de carnes y vegetales, modificando su sabor, color y composición.

En el ámbito industrial, cuando se utiliza agua dura en los calentadores, el dióxido de carbono tiende a liberarse a altas temperaturas, lo que provoca la formación de sales de calcio y magnesio en el interior del equipo. Estas sales, solubles en el agua debido al calor, precipitan en forma de carbonatos insolubles que luego se acumulan en las tuberías y calderas, formando costras duras y aislantes difíciles de eliminar. Esto disminuye la conductividad térmica y, como resultado, incrementa el consumo de energía necesario para calentar o enfriar (Prato, et al., 2022).

Debido a la cantidad de problemas que genera la dureza se han implementado opciones de tratamiento que ayuden a reducir sus niveles, como son la oxidación química, electrodiálisis, intercambio iónico, filtración por membranas y adsorción. Siendo la adsorción el método más factible de aplicar, por la flexibilidad en las condiciones de diseño, a la facilidad de encontrar el material para la fabricación de los lechos adsorbentes, y a la baja complejidad de su funcionamiento (Prato, et al., 2022).

Efectos del agua dura en la salud humana

Según los investigadores (Prato et al., 2021) destacan que los elevados niveles de dureza en el agua provocan enfermedades cardiovasculares, debido a los depósitos de calcio en las paredes de los vasos sanguíneos que al unirse con grasas y lípidos endurecen las paredes de los conductos vasculares impidiendo un flujo adecuado. Por otra parte, los niños se ven afectados en el retraso en su crecimiento, debido a que, el exceso de calcio interfiere con la absorción adecuada de los minerales necesarios para su desarrollo. También, produce afecciones en la piel como la dermatitis atópica.

2.2.2 Adsorción

Es un proceso reversible, por el cual un gas es fijado en un sólido poroso, este se denomina adsorbente y el material gaseoso adsorbido es el adsorbato. El proceso de adsorción global consta de varias etapas.

2.2.2.1 Tipos de adsorción

Adsorción física o fisisorción:

También conocido como fisisorción. Este proceso se da por medio de la interacción entre las moléculas del adsorbente y del adsorbato se da por medio de las fuerzas de Van der Waals, lo cual es el resultado de interacciones intermoleculares débiles que tienen entre un sólido y el fluido.

Adsorbentes como la zeolita, el gel de sílice, el carbón activo y la alúmina tienen una estructura altamente porosa con una relación superficie/volumen del orden de cien por lo que pueden adsorber sustancias refrigerantes.

El proceso es intermitente debido a que el adsorbente se regenera cuando se satura. Por ello, una máquina de adsorción consta de al menos 2 cámaras o lechos de adsorción porque así se consigue que las cámaras inviertan el ciclo de tal modo que donde se produce la adsorción se producirá la desorción y viceversa para conseguir que no pare la producción de frío y la operación sea continua.

Es un proceso exotérmico, en el cual los calores liberados oscilan entre los 20 y 40 kJ/mol, la molécula adsorbida físicamente mantiene su composición debido a que la energía de la interacción es muy débil como para romper su enlace, es un proceso no específico porque las fuerzas implicadas tampoco lo son, además de esto este tipo de adsorción se produce en multicapas, es decir sobre una capa de moléculas fisiorbida puede adsorberse otra (Ruiz, 2014).

Adsorción química o quimisorción:

Se caracteriza por la unión química fuerte entre el adsorbato y el adsorbente. Por lo tanto, es más difícil de revertir y requiere más energía para eliminar las moléculas adsorbidas que en la adsorción física. El producto más usado en este tipo de adsorción ha sido el cloruro de calcio (CaCl_2). También han sido utilizados silicatos.

En este tipo de adsorción las moléculas del adsorbente y adsorbato se mantienen unidas por un enlace químico, el calor liberado durante el proceso oscila entre 100 y 500 kJ/mol, estos valores pueden ser positivos o negativos dependiendo si durante la quimisorción se forman o rompen enlaces, este proceso es específico y se da en monocapa debido a que se da la formación de un enlace entre el adsorbato y adsorbente, sin embargo sobre esta monocapa quimisorbida se puede producir adsorción física (Ruiz, 2014).

2.2.3 Aplicación de la adsorción en el tratamiento del agua

La contaminación de origen industrial, agrícola o de uso doméstico generan consecuencias al recurso hídrico, poniendo en riesgo el equilibrio de ecosistemas y salud de los seres humanos. Por lo que, la adsorción es una opción viable para la remoción de contaminantes de las aguas potables, residuales, subterráneas, entre otras (Sotelo et al., 2004). Técnica que ha sido puesta en marcha con carbón activado como adsorbente de sustancias orgánicas e inorgánicas más empleado en el tratamiento de aguas (Bañuelos, 2015).

Los adsorbentes empleados para el tratamiento de aguas pueden ser naturales naturales o sometidos a procesos de activación. Sin embargo, los adsorbentes diseñados pueden llegar a ser más costosos, pero poseen una más alta capacidad de retención; pueden ser carbonosos,

polimétricos y oxídicos, mientras que los adsorbentes naturales son más económicos, pero presentan una menor capacidad de retención son empleados para casos muy específicos y comúnmente son zeolitas naturales, minerales de arcillas, óxidos o biopolímeros (José. Prato et al., 2021).

2.2.4 Equilibrio de adsorción

2.2.4.1 Isotermas de adsorción

Relacionan la concentración de una sustancia adsorbida en la superficie de un sólido con respecto a la concentración de esa misma sustancia presente en una solución una vez que ha alcanzado el equilibrio y a una temperatura determinada, la representación de estas permite determinar el rendimiento del sistema (Meza & Mallaupoma, 2018a).

2.2.4.1.1 Modelos que describen las isotermas de adsorción

Los modelos de las ecuaciones de Langmuir y Freundlich, son mayormente aplicados en la recuperación de un único componente, permiten una sencilla interpretación de cómo se interrelacionan el adsorbato con el absorbente (Meza & Mallaupoma, 2018b). Adicionalmente existen otras expresiones que permiten evaluar el proceso de adsorción son las isotermas entre las que destacan las ecuaciones de Temkin y Dubinin-Radushkevich (Al-Ghouti & Da'ana, 2020a; Kalam et al., 2021a).

Isoterma de Langmuir

De acuerdo con (Pavez & Saldaña, 2023) el modelo Langmuir describe de forma cuantitativa la capa de moléculas adsorbidas en la superficie del adsorbente en relación a la concentración del componente adsorbido presente en el líquido con el que incide, la adsorción tiene lugar en determinados sitios y no existe interacción entre moléculas retenidas (Kalam et al., 2021b; Prato et al., 2022).

La ecuación de Langmuir se representa con la siguiente expresión:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

En la ecuación (1), q_e (mg/g) representa la cantidad en miligramos de adsorbato que ha sido adsorbido por gramos de adsorbente cuando se llega al equilibrio; C_e (mg/L) es la concentración de adsorbato en la solución cuando se alcanza el equilibrio; q_m (mg/g), es la concentración de adsorbato que se requiere para formar una monocapa en la superficie del adsorbente; K_L (L/mg), representa la constante de Langmuir, misma que es mayor cuanto mayor sea la energía de atracción y menor sea la temperatura (Bejarano, Estrella, Márquez, Ríos, & Rodríguez, 2020).

Isoterma de Freundlich

Según (Pavez & Saldaña, 2023) la isoterma de Freundlich es un modelo no lineal el cual relaciona la concentración del soluto presente en la superficie del material adsorbente

con respecto a la presencia de ese mismo soluto en el líquido con el que tiene contacto. Este modelo plantea una adsorción en multicapa, con interacción entre moléculas adsorbidas, las cuales primero se unen a la superficie por enlaces fuertes, pero esta fuerza va disminuyendo con la reducción de sitios activos para ser ocupados por las moléculas de adsorbato

La ecuación que representa la isoterma de Freundlich es la siguiente:

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

En la ecuación (2), K_F (mg/g), representa a la constante de Freundlich; n es el factor de heterogeneidad y $1/n$ representa la intensidad de adsorción, si el valor de esta es cero el proceso de adsorción es irreversible y si es igual a uno la isoterma es lineal, pero si el valor oscila entre cero y uno, el proceso es favorable y normal, y si es mayor a uno el proceso es no favorable y se da de forma cooperativa.

Isoterma de Temkin

Conforme lo mencionan la isoterma de Temkin toma en cuenta las interacciones entre adsorbente y adsorbato de manera explícita, asume que el calor de adsorción presenta una disminución de forma lineal y no de forma logarítmica y asume una distribución uniforme de las energías de ligadura (Al-Ghouti & Da'ana, 2020; Kalam et al., 2021). La isoterma de Temkin se representa con la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln (A_T C_e) \quad (3)$$

En la ecuación (3) $B_T = RT/b$ (J/mol), es una constante que se relaciona con el calor de adsorción; R (J/mol*K), es la constante universal de los gases, con un valor de 8.314; T (K) es la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso; A_T (L/g), representa una constante de ligadura cuando se alcanza el equilibrio (Abdeen & Mohammad, 2014).

Isoterma de Dubinin-Radushkevich

El modelo determina la presencia de sólidos microporosos en procesos de adsorción que dan lugar a la formación de una monocapa. Aplicando la teoría de Polany (potencial de adsorción en superficies no porosas) y mediante el cálculo de la energía promedio de adsorción (E) se puede conocer si la naturaleza de la adsorción es química o física

La ecuación que representa la isoterma de Dubinin-Radushkevich es:

$$\begin{aligned} q_e &= q_m e^{(-A_{DR}\varepsilon^2)} \\ \varepsilon^2 &= RT \ln \left(1 + \frac{1}{c_e} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

En la ecuación (4), ADR (mol^2/kJ^2), es un valor constante, ε (kJ/mol), es el potencial de Polanyi, (J. Prato, Millán, González, et al., 2022). Este modelo facilita el cálculo de la energía de adsorción, gracias a la siguiente ecuación (5):

$$E = \frac{1}{\sqrt{2A_{DR}}} \quad (5)$$

Al obtener el calor de E, se deduce el tipo de adsorción, si el valor oscila entre 8 y 16 kJ/mol ocurre por adsorción química, si el valor es menor a 8 kJ/mol la adsorción es de tipo física (Al-Ghouti & Da'ana, 2020b; Kalam et al., 2021b).

2.2.4.2 Cinética de adsorción

Conforme a (Pavez & Saldaña, 2023) la cinética de adsorción determina la velocidad a la cual se da el proceso de adsorción y permite establecer el tiempo en el cual se llega al punto de equilibrio. siendo necesario para evaluar y mejorar el diseño de los adsorbentes.

La ecuación de pseudo-primer orden o ecuación de Lagergren

Este modelo fue planteado por Lagergren en 1898 y se representa por la siguiente ecuación:

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad (6)$$

En la ecuación (6), K_1 (min^{-1}), representa un valor constante de la cinética de adsorción de pseudo primer orden; q_t (mg/g) es la cantidad en miligramos de adsorbato que ha sido adsorbido por cada gramo de material adsorbente en un determinado tiempo (Wingen-Felder et al., 2005).

2.2.4.2.1 Ecuación de pseudo-segundo orden

Este modelo por lo general implica un proceso de adsorción química y se la representa mediante la siguiente expresión (Ho, 2006).

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (7)$$

En la ecuación (7) K_2 ($\text{g}/\text{mg}^* \text{min}$) representa la constante cinética de adsorción de segundo orden.

2.2.4.2.2 Modelo de difusión intraparticular

El paso de las moléculas presentes en una solución hacia la superficie del adsorbato involucra algunos mecanismos como son la difusión de las moléculas de adsorbato en solución, extensión a través de los espacios libres, difusión en la superficie de la partícula y la adsorción en la superficie (Elmoubarki et al., 2015), es importante saber cuáles de los mecanismos mencionados reducen, incrementan o determinan la cinética de adsorción (Bejarano, et al., 2020). La cinética de difusión intrapartícula está definido por la ecuación (8):

$$q_t = k_{id} t^{\frac{1}{2}} + C \quad (8)$$

En donde, k_{id} ($\text{mg/g} * \text{min}^{1/2}$), es la constante de velocidad de difusión intrapartícula; C (mg/g), representa la constante sobre el espesor de la capa de frontera (Bejarano, et al., 2020).

2.2.4.2.3 Modelo Elovich

Se aplica generalmente en procesos de adsorción química, asumiendo que los sitios activos presentes en el adsorbente son variados y por ende poseen distintas energías de activación (Figueroa et al., 2002). Este modelo se representa con la siguiente ecuación:

$$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q_t} \quad (9)$$

En la ecuación (9), α ($\text{mg g}^{-1} \text{ min}^{-1}$) representa el valor de la velocidad inicial de adsorción y β se refiere a la superficie cubierta y a la energía en la cual se activa la adsorción química.

2.2.5 Rocas

Roca se define como los procesos endómicos o exógenos que permiten la agrupación inorgánica de varios minerales producidos de manera natural. Es importante conocer el tipo de rocas que existen en determinados lugares y los procesos formación, debido a que, guardan en su interior valiosa información referente a los procesos geológicos del planeta que habitamos (Orozco-Centeno et al., 2014).

2.2.5.1 Rocas volcánicas rocas ígneas

Las rocas volcánicas se crean a partir de enfriamiento de una masa líquida fundida de alta temperatura de composición silicatada, que procede del interior del planeta (lava), que tiende a solidificarse durante su ascenso hacia la superficie de la Tierra (Orozco-Centeno et al., 2014).

2.2.5.2 Clasificación de las rocas volcánicas

Las rocas volcánicas de acuerdo con el proceso de formación se clasifican en:

Rocas ígneas intrusivas o plutónicas: son aquellas que se forman en zonas profundas de la corteza, por ende, al estar sometidas a grandes presiones, sus minerales crecen muy unidos, lo cual, no permiten el escape de gases, formándose de esta manera rocas densas no porosas. Su enfriamiento lento permite la formación de cristales de minerales relativamente grandes y bien formados. Dentro de esta clasificación, se encuentran comúnmente al granito, compuesto por la mezcla de tres minerales (cuarzo, mica y feldespato) y al grano caracterizado por su tono oscuro y ausencia de cuarzo (Orozco et al., 2014).

Las rocas ígneas efusivas o volcánicas: se forman a partir del magma que fluye hacia la superficie terrestre a través de zonas de debilidad o que fue expulsado desde un volcán y se enfrián en la superficie terrestre a presiones y temperaturas bajas. Proceso del cual, resultan rocas constituidas por masa de cristales de pequeño tamaño y amorfa sin cristalizar. En este grupo se encuentran con sus tonos oscuros el basalto (Orozco et al., 2014).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

En el presente trabajo se aplicó una investigación de tipo experimental, debido a que, se manipularon diferentes variables y se desarrollaron ensayos con el fin de verificar el efecto del pH en la cinética de adsorción de la dureza del agua.

3.2 Diseño de Investigación

La investigación metodológica permite al investigador utilizar documentos, recopilar, seleccionar, analizar y presentar resultados conscientes. De esta forma se obtiene el hallazgo de datos valiosos para desarrollar el proyecto de investigación, en el cual, se busca evidenciar efecto del pH en la cinética de la adsorción de la dureza del agua utilizando rocas volcánicas.

En su investigación (Ángel Azuero & Enrique Azuero, 2019) menciona que el instrumento metodológico es planteado a través de métodos especiales que incluyen técnicas de observación y recolección de datos. Por otra parte, el marco metodológico se puede dividir en dos grandes campos que requieren un enfoque fundamentalmente diferente: en universo y variables.

Dentro de la presente investigación se empleó el diseño bibliográfico, ya que, se procedió en una búsqueda y recolección de datos referentes a la dureza del agua, información que fue extraída de artículos científicos, revistas, libros, tesis y; el diseño experimental, debido a que, en el laboratorio realizó varios ensayos en los cuales se obtuvo datos necesarios para la determinación de la capacidad de adsorción que tienen las rocas volcánicas y la viabilidad de estas para ser utilizadas de manera alternativa en tratamiento aguas con altos contenidos de dureza.

3.3 Técnicas de recolección de datos

Actualmente existen múltiples y diferentes técnicas e instrumentos para la recolección de datos e información ya sean cuantitativas, cualitativas o mixtas:

3.3.1 Revisión documental

En la presente investigación se realizó la revisión bibliográfica de varias temáticas como: agua, contaminación del agua, dureza, tipos de dureza, grados de dureza, problemas del agua dura, efectos del agua dura en la salud humana, adsorción, tipos de adsorción, aplicaciones de la adsorción en el tratamiento del agua, equilibrio de adsorción, los modelos que describen las isotermas de adsorción, las rocas y su clasificación.

Para la presente investigación se revisaron artículos científicos, libros y por medio de la técnica del fichaje se discernió la información recolectada.

3.3.2 Observación Directa

Mediante la utilización de la técnica de observación directa se obtienen datos fiables y factibles, mismos que se basan en los ensayos para la realización del proyecto en donde pasaron por un proceso de selección para después ser ordenados y finalmente graficados seguido de un adecuado y profundo análisis; con el fin de medir variables posibles que forman parte del proceso de intercambio iónico en los lechos volcánicos y el efecto del pH.

3.3.3 Análisis Cuantitativo

En la presente investigación se utilizó la técnica de análisis cuantitativo, debido a que, se recolectaron, procesaron y analizaron datos numéricos sobre variables, dando como resultado datos organizados, así también, obtuvieron los resultados a través de una muestra, lo que ayuda aún más en la interpretación de resultados, arrojando así una realidad específica (Adasme & Zúñiga, 2020).

3.4 Población de estudio y tamaño de muestra

Población

En el presente estudio de investigación la población utilizada fue la roca volcánica del Chimborazo.

Muestra

Las muestras de este trabajo investigativo son:

- El agua, que se tomó de la llave del grifo de las instalaciones del laboratorio de Química, ubicado en el bloque B del edificio de la facultad de Ingeniería.
- Muestra de 10 kg de roca volcánica, utilizada para la presente investigación fue extraída del volcán Chimborazo.

3.5 Fases de la Investigación

El desarrollo de la presente investigación se llevó a cabo en fases.

3.5.1 Fase 1. Elaboración de lechos de adsorción a partir de rocas volcánicas de Chimborazo

Recolección de rocas volcánicas

Las rocas fueron recolectadas en el volcán Chimborazo a una altura de 4500 m.s.n.m., con ayuda de un GPS se tomaron puntos de posición geográfica en los lugares que se recolectaron (Figura 1), las muestras de aproximadamente 10 kg, las cuales fueron debidamente enfundadas y etiquetadas. En la Tabla 1. se observan las coordenadas del punto de muestreo del proyecto.

Tabla 1. *Coordenadas de recolección del material volcánico*

Punto de muestreo	Coordinada X	Coordinada Y
Punto 1	739419	9837070



Figura 1. Mapa de Ubicación del sitio de recolección del material volcánico.

3.5.1.1 Trituración del material volcánico

Una vez obtenido el material volcánico, se procedió con la ayuda de un martillo a la trituración manual de las rocas hasta obtener de 0,8 a 1,0 cm de diámetro, posterior se utilizó un tamiz de 1cm para obtener una muestra homogénea para el lecho (ver Anexo 1).

El material triturado antes de ser utilizado en las columnas de adsorción es lavado con agua destilada y secado.

3.5.2 Fase 2. Caracterización del material adsorbente

3.5.2.1 Determinación del tamaño promedio de la roca triturada

Este proceso permitió determinar el tamaño promedio de la roca volcánica triturada, para llevar a cabo este proceso se tomaron en cuenta 100 rocas al azar del lecho filtrante utilizado en los distintos procesos, para lo cual, se requirió la ayuda de un calibrador Vernier a medir el largo y ancho de cada roca. (ver Anexo 2).

Se aplicaron las ecuaciones (10) (11) (12) para determinar los valores promedios del material triturado:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad (10)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

$$C_V = \frac{S}{\bar{X}} * 100\% \quad (12)$$

Donde:

\bar{X} = Tamaño promedio (mm),

S = Desviación estándar (mm)

C_V = Coeficiente de variación (%)

n = Número de muestras.

3.5.2.2 Punto de Carga Neto Cero (PCNC)

En el presente proyecto para determinar el punto de carga neta cero (PCNC) se realizó el siguiente procedimiento:

- Se distribuyeron en 33 recipientes a los que se dividió en 3 grupos y a su vez se enumeró del 1 al 11.
- Se pesó 4 gramos del material (rocas Volcánicas de Chimborazo) en cada uno de los 33 frascos, se le añadió 10 mL de agua destilada y a la vez de alícuotas de hidróxido de sodio (**NaOH**) 0.01 N y ácido clorhídrico (**HCl**) 0.01 N como se muestra en la Tabla 2.
- Posterior se agregó agua destilada con el fin de llegar a un volumen completo de 20 mL, tomando en cuenta las alícuotas ya agregadas, el proceso de determinación del PCNC.

Tabla 2. Alícuotas de ácido e hidróxido necesario para el análisis de PCNC.

Frascos	V HCl (mL)	V NaOH (mL)
1	2.00	0.00
2	1.50	0.00
3	1.00	0.00
4	0.50	0.00
5	0.25	0.00
6	0.00	0.00
7	0.00	0.25
8	0.00	0.50
9	0.00	1.00
10	0.00	1.25
11	0.00	1.50

Fuente. (Navas & Durán, 2000).

- Durante tres días las mezclas pasaron en reposo, mismas que se agitaron constantemente en periodos regulares.
- Se midió el pH, (pH_0) transcurridos los 3 días.

- Se agregó 1mL de KCl 2N a los frascos del grupo GI, mientras que, 2 mL y 3 mL a los grupos GII y GIII, respectivamente.
- Los recipientes con las nuevas mezclas se dejaron reposar por 3 horas con una agitación constante, con el fin de realizar la medición del pH, y se registró los datos en el apartado correspondiente a pH_{KCl} .
- Después se realizó el cálculo de la variación del pH (ΔpH), el cual nos indica que afinidad poseen los lechos. Para lo cual se empleó la fórmula (13):

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{\text{Agua}} \quad (13)$$

Donde:

ΔpH : Variación del pH de la solución sobrenadante.

pH_{KCl} : pH de la solución sobrenadante en KCl a 2N.

$pH_{\text{agua destilada}}$: pH de la roca volcánica en agua.

3.5.3 Fase 3. Montaje de las columnas

El montaje del sistema de adsorción consta de 2 tubos PVC de 13 cm de diámetro y de 60 cm de largo, con válvulas con el fin de controlar el ingreso y salida del agua, en el interior de ambas columnas de adsorción se introdujo una malla de acero inoxidable con el fin de asegurar la estabilidad de los lechos de roca volcánica y evitar obstrucciones en los sistemas de adsorción a través de las válvulas de salida.

El lecho de roca volcánica constó de 1200 g de roca volcánica triturada, tamizada y lavada. El cual fue colocado en el interior de la columna en una malla para estabilizar el lecho seguido se lavó por segunda ocasión con agua destilada. Posterior se le hizo reposar por el lapso de 15 minutos en la columna con muestra problema y finalmente los lechos estuvieron listos para las pruebas del estudio.

3.5.4 Fase 4. Activación de los lechos

Los lechos de las rocas volcánicas en su estado natural fueron modificados para que sus cargas superficiales adquieran diferente afinidad química, para lo cual se prepararon soluciones: acuosas con hidróxido de sodio a diferentes concentraciones, para obtener valores de pH de 11,5 y 9,5; y con ácido clorhídrico para obtener solución activadora de pH de 4,6 y 2,0; las cuales se hicieron circular individualmente a través del lecho, y se tomaban muestras de 30 mL, después del paso de un determinado nivel de volumen.

Finalmente, para valorar si el lecho se activó con ácido (HCl) o con base (NaOH), se evaluaron las muestras por el método titulométrico usando como agente indicador fenolftaleína al 25%, y para el cálculo de la concentración del ácido o base se aplicó la fórmula (14). Para las pruebas de adsorción con pH neutro se empleó el lecho en su estado natural.

$$C[HCl]_o[NaOH] = \frac{V_t * C_s}{V_m} \quad (14)$$

Donde:

$C[HCl]o[NaOH]$: Concentración de ácido (N)

C_s : Concentración de la solución titulante (N)

V_t : Volumen de titulación (mL)

V_m : Volumen de la muestra (mL)

3.5.5 Fase 5. Pruebas de adsorción a diferentes pH

Las pruebas de adsorción se llevaron a cabo con mismos valores de pH que fueron activados los lechos de adsorción, para lo cual se colocó 500 g de lecho dentro de cada columna, el cual fue repartido en dos bolsas de nylon y acomodado en la columna tratando de que no queden espacios vacíos, se trabajó con agua de grifo del laboratorio de Servicios Ambientales de la Universidad Nacional de Chimborazo, la cual presenta un valor promedio de dureza de 300 ppm, misma que se colocó en el tanque de distribución arriba de las columnas en un soporte de madera.

Se fijó con un caudal de trabajo constante de 100 mL/min, se tomaron muestras de 30 mL, las cuales eran recolectadas en diferentes volúmenes hasta alcanzar la saturación del lecho, dichas muestras fueron evaluadas por el método estándar título métrico EDTA 2340C (Clesceri et al., 1999), aplicando la fórmula (15) para la determinación de la dureza total del agua tratada, este proceso se repite por duplicado para cada uno de los pH evaluados.

$$Dureza\ total = \frac{V_t * N * 50000}{V_m} \quad (15)$$

Donde:

V_t : Volumen de titulación (mL)

N : Normalidad del EDTA (N)

V_m : Volumen de muestra (mL)

3.5.6 Fase 6. Equilibrio de adsorción

Para evaluar el equilibrio de adsorción se requirió hacer estudios termodinámicos de isotermas y cinética:

3.5.6.1 Isotermas

Para determinar las isotermas se pesaron en vasos plásticos con tapa 7 muestras de 5 g de lecho, para luego adicionar volúmenes crecientes a cada vaso (50, 60, 70, 80, 90, 100 y 110 mL) respectivamente, de agua de grifo de dureza conocida, se agitaron constantemente, posteriormente se tomaron muestras de 5 mL a los 30 minutos; 1 hora, 2 horas y a las 24 horas, para determinar la concentración de dureza en las muestras se empleó el método estándar EDTA 2340C (Clesceri et al., 1999).

Luego de obtener los datos experimentales, éstos se ajustan a una recta para determinar la factibilidad de aplicación del modelo, tomando en cuenta los 4 tipos de isotermas citados

en la Tabla 3, y sus respectivas ecuaciones lineales (16), (17), (18), (19), siendo la isoterma que mejor se ajuste al proceso de adsorción de dureza, aquella que posea un mayor valor del coeficiente de correlación lineal (Foo & Hameed, 2010; Prato, et al., 2022).

La isoterma de Langmuir puede escribirse de manera lineal como se presenta en la ecuación (16) de tal manera que al graficar $1/q_e$ en función de $1/C_e$, se obtiene una recta, la cual al intersecar con el eje “y” indica el valor de $1/q_m$, y el valor de la pendiente equivale a $1/(K_L q_m)$.

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (16)$$

La forma lineal de la ecuación de la isoterma de Freundlich (17) es la siguiente:

$$\log_{10}(q_e) = \log_{10}(K_F) + \frac{1}{n} \log_{10}(C_e) \quad (17)$$

Al graficar $\log_{10}(q_e)$ en función de $\log_{10}(C_e)$, se consigue una línea recta que arroja el valor equivalente a $\log_{10}(K_F)$ cuando interseca con el eje “y”, y su pendiente equivale a $1/n$.

La forma lineal de la isoterma de Temkin se expresa en la ecuación (18)

$$q_e = B_T \ln(A_T) + B_T \ln(C_e) \quad (18)$$

En donde al graficar q_e en función $\ln(C_e)$ se obtienen los valores B_T y A_T

ecuación lineal de la isoterma de Dubinin-Radushkevich (19) es la siguiente:

$$\ln(q_e) = \ln(q_m) - A_{DR} \varepsilon^2 \quad (19)$$

En la cual al graficar $\ln(q_e)$ en función de ε^2 , se obtienen los valores de A_{DR} y q_m representados con la pendiente y la intersección de la línea con el eje “y”

Tabla 3. *Variables para graficar con el fin de determinar la isoterma adecuada al proceso de adsorción*

Modelo Isoterma	Variables a graficar	Pendiente de la recta	Corte en el eje “y”
Langmuir	$\left(\frac{1}{q_e} \right) vs \left(\frac{1}{C_e} \right)$	$\frac{1}{K_L q_m}$	$\frac{1}{q_m}$
Freundlich	$(\log q_e) vs (\log C_e)$	$\frac{1}{n}$	$\log (K_F)$

Temkin	$(q_e) \text{ vs } (\ln C_e)$	B_T	$B_T \ln(A_T)$
Dubinin-Radushkevich	$(\ln(q_e) \text{ vs } \left[R T \ln\left(1 + \frac{1}{C_e}\right) \right])$	A_{DR}	$\ln(q_m)$

Fuente: (Gallo & Morales, 2020a).

3.5.6.2 Cinética

Se pesaron 6 vasos con muestras de 5 g de lecho, para luego adicionar a cada vaso 110 mL de agua de grifo de dureza conocida, se agitaron constantemente, posteriormente se tomaron muestras de 3 mL a los 5 min., 15 min., 30 min., 45 min., 1 h, 3 h y 24 h, mismas que fueron analizadas mediante el método estandarizado EDTA 2340C (Clesceri et al., 1999b), para luego ajustar los datos obtenidos a una recta de acuerdo a las ecuaciones lineales para cada caso (20), (21), (22), tomando en cuenta las variables presentadas en la Tabla 4, siendo la cinética que se adapta al proceso aquella que posea un mayor coeficiente de linealidad (R^2).

La forma lineal de la ecuación de pseudo primer orden se obtiene al integrar la ecuación principal, tomando en cuenta condiciones de contorno tales como $qt = 0$ cuando $t = 0$ y $qt = q_t$ cuando $t = t$ (Al-Ghouti & Da'ana, 2020; Kalam et al., 2021), la ecuación obtenida es (20):

$$\log_{10}(q_e - q_t) = \log_{10}(q_e) - \left(\frac{k_1}{2,303}\right)t \quad (20)$$

Al graficar $\log_{10}(q_e - q_t)$ en función de t se obtiene el valor de k_1

La ecuación lineal de la ecuación de pseudo segundo orden (21) se obtiene al integrar la ecuación principal:

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{q_e}\right)t + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (21)$$

Al graficar t/qe en función de t , se obtiene los valores de $1/qe$ y $1/k_2 q_e^2$, representados por la pendiente y la intersección de la recta con el eje "y" respectivamente.

La ecuación lineal del modelo de difusión intraparticular es (22):

$$qt = K_{ID*}t^{0.5} + c \quad (22)$$

Tabla 4. *Variables graficadas para determinar la cinética que mejor se adapta al proceso de adsorción.*

Modelo cinético	Variables a graficar	Pendiente de la recta	Corte en el eje “y”
Pseudo - primer orden	$[\log(q_e - q_t)] vs (t)$	$\frac{k_1}{2.303}$	$\log(q_e)$
Pseudo – segundo orden	$\left(\frac{1}{q_t}\right) vs (t)$	$\frac{1}{q_2}$	$\frac{1}{k_2 q_e^2}$
Difusión intra partícula	$(q_t) vs \left(t^{\frac{1}{2}}\right)$	k_{ID}	C

Fuente. Autor

3.6 Métodos de análisis

La determinación de la concentración de la dureza en el agua se llevó a cabo mediante:

3.6.1 Análisis de tipo Cuantitativo

En el presente trabajo investigativo se aplicaron métodos de cuantificación para los parámetros experimentales en las instalaciones del laboratorio de Servicios Ambientales, que permitieron obtener la caracterización del agua de estudio, la determinación del punto de carga neta cero (PCNC) de los materiales de adsorción y sobre todo demostrar la capacidad que tiene la roca volcánica del Chimborazo para retener minerales del agua (medidas de adsorción de dureza).

Los datos obtenidos mediante las pruebas de adsorción a diferentes pH y el equilibrio de adsorción contribuyeron en la determinación mediante cálculos específicos la capacidad de adsorción e intercambio iónico, la concentración de la dureza del agua, el porcentaje de retención de la dureza de agua y el estudio de los equilibrios de adsorción.

3.6.2 Procesamiento de datos

En la presente investigación se utilizó el programa Microsoft Excel con el fin de procesar los datos obtenidos, debido a que, permite la tabulación de datos, análisis técnico y resultados inmediatos, por ende, es factible en tiempo, dinero y rapidez.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización del material adsorbente

El material adsorbente utilizado fue analizado tomando en cuenta por dos factores el punto de carga neta cero y la granulometría, los resultados que se obtuvieron de dichos procesos se describen a continuación:

4.1.1 Punto de carga neta cero

Los materiales litológicos oxídicos en este caso las rocas volcánicas del Chimborazo son considerado un material anfótero ya que estos tienen una característica muy particular, que poseen un alto contenido de metales como principales están el hierro y el aluminio, los cuales les aportan variabilidad a las cargas superficiales del lecho, haciéndolos dependientes de la solución en la que se encuentran, ya que si se encuentran en medio alcalino adquieren cargas negativas y en medio ácido adquieren cargas positivas y es así que dependerán de la afinidad química con los adsorbatos . En la *Figura 2* se representa el valor obtenido para el punto de carga neta cero que corresponde a 7,02 para la roca volcánica del Chimborazo.

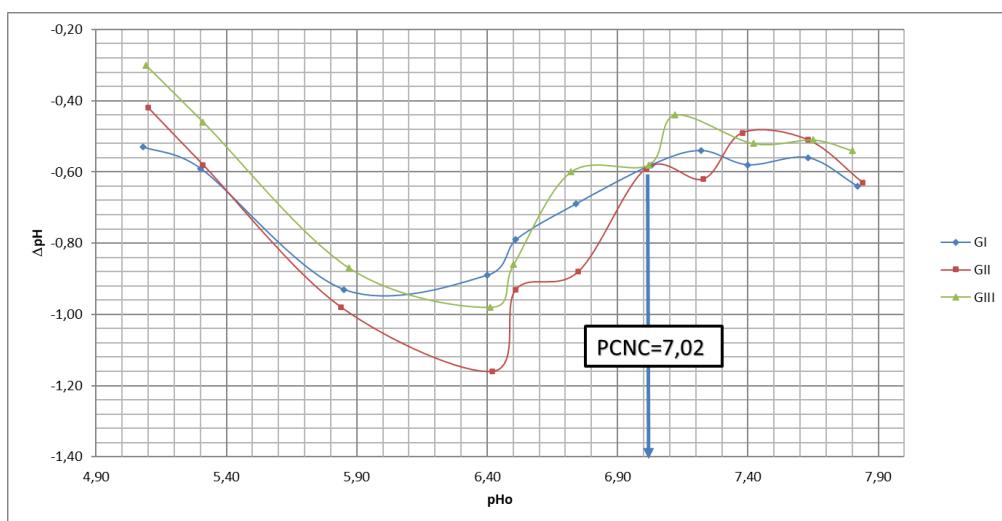


Figura 2. Valor obtenido del punto de carga neta cero para la roca volcánica del Chimborazo

4.1.2 Granulometría

Un factor condicionante en el proceso de adsorción es el tamaño de partícula usada del material adsorbente, ya que si el material posee una mayor superficie específica esta tendrá una mayor posibilidad de contacto adsorbente – adsorbato, favoreciendo la retención (Jabłońska, 2021).

La medición se llevó a cabo tomando al azar 100 rocas trituradas del lecho que se elaboró mediante la trituración de la roca volcánica del Chimborazo que, fueron medidos a lo largo y ancho para realizar el respectivo promedio de granulo como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización granulométrica de la roca volcánica del Chimborazo

Material Oxídico		Promedio (cm)	% Cv
Roca del Chimborazo	Largo	1,191±0,287	18,540
	Ancho	0,939±0,359	23,932

Los valores presentados en la Tabla 5, indican que el proceso que se dio en la adsorción es dependiente de propiedades químicas del material adsorbente y también depende de la afinidad del material para ser adsorbido y no del tamaño de los lechos de adsorción, debido a que la granulometría presenta coeficientes de variación inferiores al 25 %. Según (Borja et al., 2015), la capacidad de un material para adsorber disminuye cuando el tamaño de la partícula aumenta.

En el caso de la roca volcánica del Chimborazo el lecho presente en los distintos experimentos presenta tamaño de valor bajo y es descartable la influencia del tamaño del grano en el proceso de adsorción ya que al triturar la roca de forma manual hizo que exista una mayor variabilidad en el ancho 23,932 % con respecto a la longitud 18,54 %, ya que al momento de triturar la roca siempre va a existir unas rocas más grandes que otras.

4.2 Pruebas de adsorción con el lecho natural

A continuación, se muestran los resultados de los procesos de adsorción realizados a niveles de pH 7, con el lecho natural, la Figura 3 ilustra el proceso de adsorción realizado en dos pruebas.

En el primer experimento se puede observar que rápidamente baja la concentración de la dureza total a un valor de 216,43 mg/L y paulatinamente se empieza a saturar llegando a su punto inicial de dureza pasado los 7000 mL de agua percolada.

El segundo experimento arroja datos similares al primero, siendo la concentración más baja de 227,25 y llegando a su punto de saturación a los 7000 mL de agua tratada.

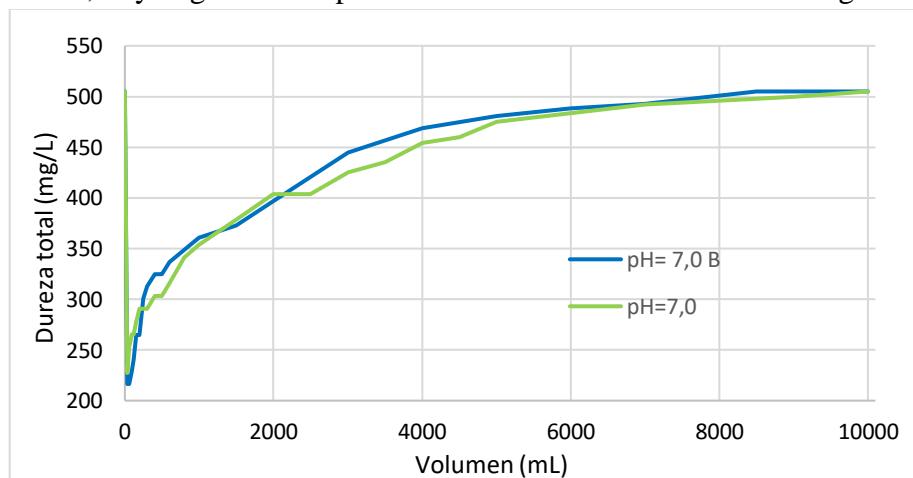


Figura 3. Pruebas de adsorción de la dureza empleando lechos naturales

En la Tabla 6, se muestran las cantidades adsorbidas de mg CaCO₃, así como el porcentaje de remoción alcanzado, los resultados son similares entre sí. Esto indica que los lechos tienen la capacidad de regenerarse.

Tabla 6. Iones de dureza adsorbidos con el lecho a pH 7

pH	mg CaCO ₃ totales	mg CaCO ₃ adsorbidos	% Adsorción
7 A	6060000	1538898,75	25,39
7 B	6060000	1464980,952	24,17

4.2.1. Activación de los lechos a diferentes pH

Después de completar el proceso de adsorción con el lecho natural, se procedió a activar los lechos a distintos niveles de pH, utilizando soluciones alcalinas y ácidas. Estas soluciones se prepararon mediante diluciones de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, según el valor de pH que se necesitaba evaluar.

A continuación, se muestran los resultados de los procesos de activación de los lechos a distintos niveles de pH.

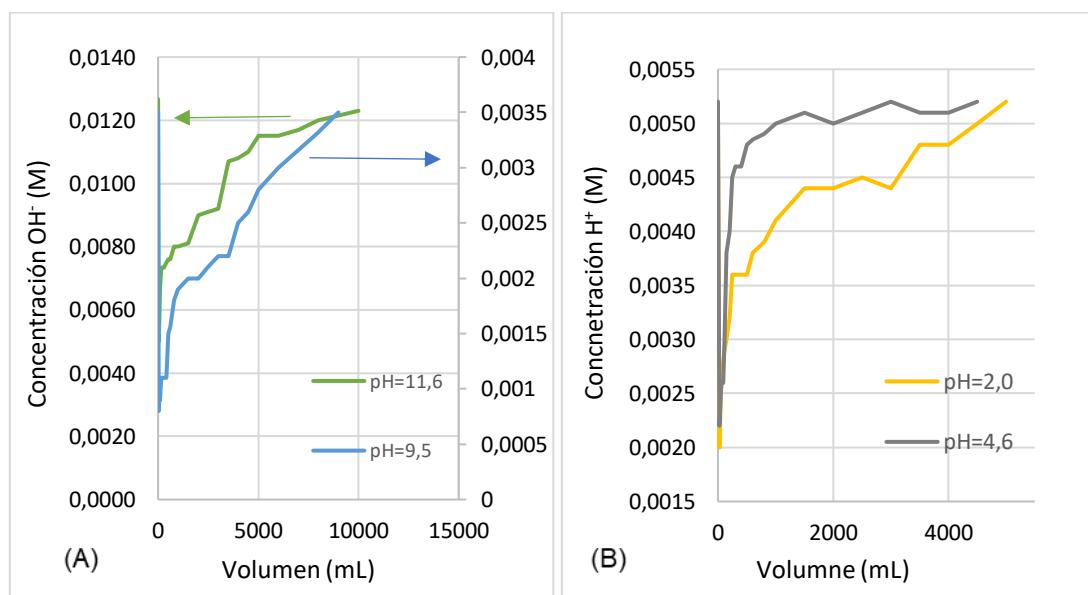


Figura 4. Curvas de activación de los lechos a diferentes pH: A) Lechos activados con pH básico (NaOH); B) Lechos activados con pH ácido (HCl)

Como se observa en la Figura 4, en todos los casos de activación del lecho, inicialmente se registra una reducción en la concentración de la solución activadora. Esto sugiere que los iones ácidos y básicos se están reteniendo en la superficie del material adsorbente. Posteriormente, la saturación ocurre gradualmente hasta que se alcanza el equilibrio, momento en el cual ya no se retienen más iones.

Esto demuestra que los lechos formados con roca volcánica del Chimborazo pueden captar tanto las cargas positivas del ácido como las negativas de las bases. Además, se confirma la presencia de cargas variables debido a los óxidos de Al y Fe en la roca volcánica, lo que favorece el proceso de adsorción (Prato, et al., 2022).

Después de activar los lechos a distintos pH, se llevaron a cabo pruebas con cada uno de ellos para medir su capacidad de adsorción de la dureza del agua. En la Figura 5 se pueden observar los resultados, mientras que en el Anexo 6 se incluyen las gráficas de reacción para cada pH, así como la reducción de los iones de dureza correspondientes.

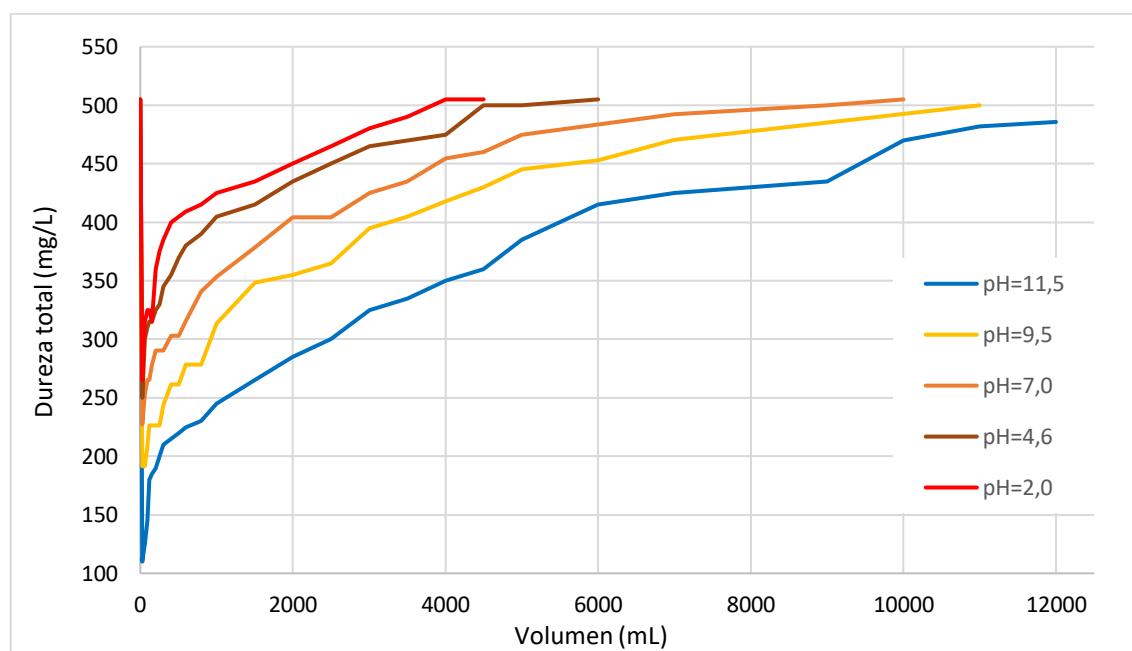


Figura 5. Pruebas de adsorción a diferentes niveles de pH.

En la Figura 5 se puede deducir que el lecho es menos efectivo al trabajar con pHs ácidos, como en los casos de 2,0 y 4,6, en comparación con aquellos activados a pHs alcalinos y neutros. En el caso del pH 2,0, la concentración inicial de dureza disminuye a 265 mg/L de CaCO₃, pero luego aumenta paulatinamente acercándose al valor inicial en un volumen percolado de 3500 mL finalmente, a los 4000 mL se alcanza la saturación, momento en el cual el lecho no puede retener más dureza. Para el pH 4,6, la dureza inicial baja a 250 mg/L de CaCO₃ y luego también se incrementa, aproximándose al valor inicial a los 4500 mL y alcanzando la saturación a los 6000 mL.

Este comportamiento se puede explicar por el aumento de la densidad de iones H⁺ en el material adsorbente a pH ácido, lo que carga positivamente al lecho. Dado que la dureza

del agua también tiene una carga catiónica, se produce una repulsión electrostática entre el adsorbente y el adsorbato (Bejarano, et al., 2020; Das et al., 2019; Millán et al., 2017; Prato, et al., 2022), por lo que se evidencia que el proceso de adsorción de iones de dureza no es eficiente al trabajar con pH básico.

En cuanto a la eliminación de la dureza utilizando lechos activados con un medio alcalino, se observa que la línea correspondiente al lecho activado vez a pH 9,5 muestra una disminución inicial de la concentración de dureza hasta 55 mg/L. Luego, comienza a aumentar lentamente, alcanzando una concentración de 135 mg/L después de percolar 3500 mL, manteniéndose estable hasta los 4000 mL, el lecho tiende a regresar al valor inicial de dureza cuando es percolado un volumen de 4500 mL, como se indica en el Anexo 7.

Cuando el lecho se activa a pH 11,5, se observa que la concentración disminuye inicialmente a 180 mg/L de CaCO₃ y luego se eleva lentamente hasta 390 mg/L después de 4000 mL de volumen percolado, y alcanza el valor inicial de dureza al llegar a los 4500 mL de percolado. Además, al trabajar con el lecho activado a pH 7, se presenta una dinámica comparable, con una caída inicial y un aumento lento hasta estabilizarse entre 4000 y 4500 mL de volumen percolado, alcanzando el valor inicial de concentración en un volumen percolado de 10000 mL.

La mayor eficacia de los lechos activados a un pH básico para retener iones de dureza se debe a que las cargas de OH⁻ predominan, cargando negativamente la superficie del lecho. Esto genera una afinidad química que favorece la retención de iones con carga positiva, como los iones responsables de la dureza del agua (Prato, et al., 2022).

En la Figura 6, se presenta una comparación del porcentaje de eliminación de iones de dureza en lechos activados a distintos niveles de pH. Al contrastar la eficiencia del lecho activado a pH neutro (25,4%) con la del lecho ácido a pH: 2 se evidencia un porcentaje de remoción del (18,5%), mientras que el pH: 4,6 tiene un porcentaje de remoción del 20,7% y se observa que la eficiencia en el pH ácido es menor. Esto indica que el pH ácido disminuye la efectividad del proceso, debido a la repulsión entre las moléculas del adsorbente y el adsorbato causado por la diferencia en las cargas electrostáticas (J. G. Prato, et al., 2022b).

En cambio, al trabajar con pH alcalino, la eficiencia aumenta considerablemente. A pH 9,5, la remoción de dureza es del 30,5%, mientras que a pH 11,5 se logra una eficiencia del 42,3%. Esto demuestra que, a mayor pH del lecho, mayor es la eliminación de iones de dureza en el agua, ya que un incremento en las cargas negativas del lecho mejora su capacidad para retener cationes (Prato, et al., 2022).

En la Tabla 7 se presenta una comparación de los valores de iones de dureza adsorbidos por lechos activados a distintos niveles de pH. Se deduce que el lecho con el porcentaje de adsorción más bajo es el que opera a pH ácido. En cambio, los lechos que funcionan a pH alcalino muestran valores porcentuales más altos, lo que se traduce en una mayor cantidad de mmoles y miligramos de dureza adsorbidos por cada gramo de lecho. A pH 11,5 se registran 3416150,00 mg adsorbidos y un porcentaje de adsorción del 42,3.

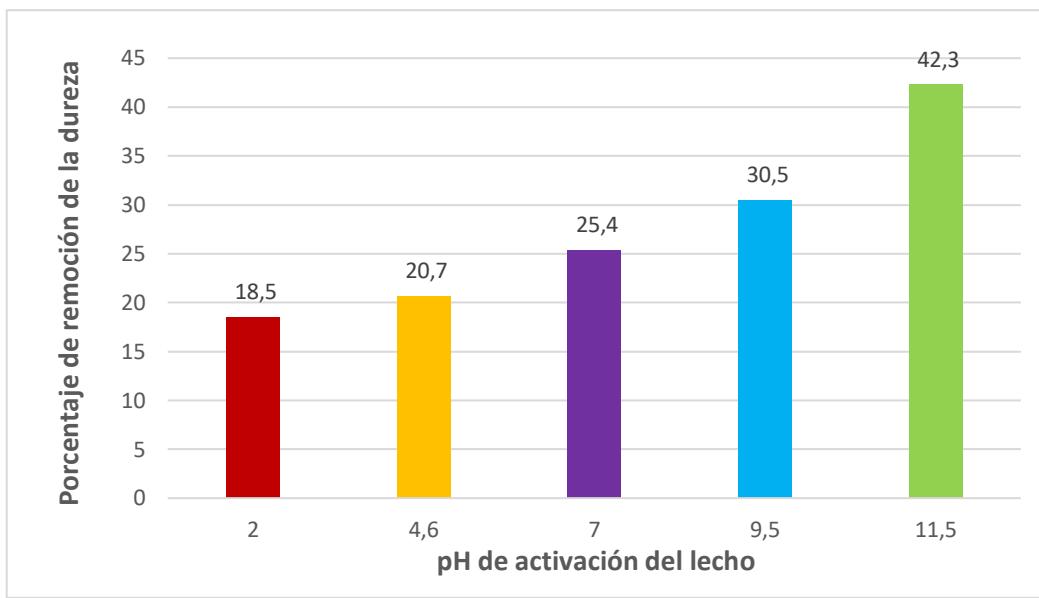


Figura 6. Porcentaje de remoción de iones de dureza con lecho activado a diferente pH

Tabla 7. Iones de dureza adsorbidos por los lechos activados de las rocas volcánicas del Chimborazo a diferentes niveles de pH

pH	mg CaCO ₃ totales	mg CaCO ₃ adsorbidos	% Adsorción
2,0	2525000	468250	18,54
4,6	3434000	709800	20,66
7	6060000	1538898,75	25,39
9,5	6817500	2079277,414	30,49
11,5	8080000	3416150	42,27

Estos resultados respaldan la idea de que las rocas volcánicas del Chimborazo facilitan el proceso de adsorción, dado que sus cargas superficiales son variables gracias a la presencia de óxidos anfóteros en su estructura. Esto permite manipular el pH de los lechos, haciendo que la retención dependa del pH del medio en el que se encuentran. En el caso del lecho activado a pH 11,5 son las cargas negativas las que aumentan su densidad (Prato, et al., 2022). Por esta razón, atraen las cargas positivas presentes en el agua dura.

4.3 Equilibrio de adsorción

4.3.1 Isotermas

Las isotermas de adsorción ayudan a entender la interacción entre el lecho adsorbente y la dureza del agua, permitiendo así evaluar la capacidad de adsorción del lecho. Estas

isotermas representan la adsorción de una molécula en la superficie del adsorbente a una temperatura constante (Bejarano, et al., 2020b).

En la Figura 7, se representa los resultados que se obtuvieron a partir del estudio de las isotermas de adsorción para el pH 11,5, ya que se obtuvieron buenos resultados siendo el caso para dos isotermas mayor a 0,9; siendo los mejores Freundlich y Temkin (Kalam et al., 2021; Prato, et al., 2022).

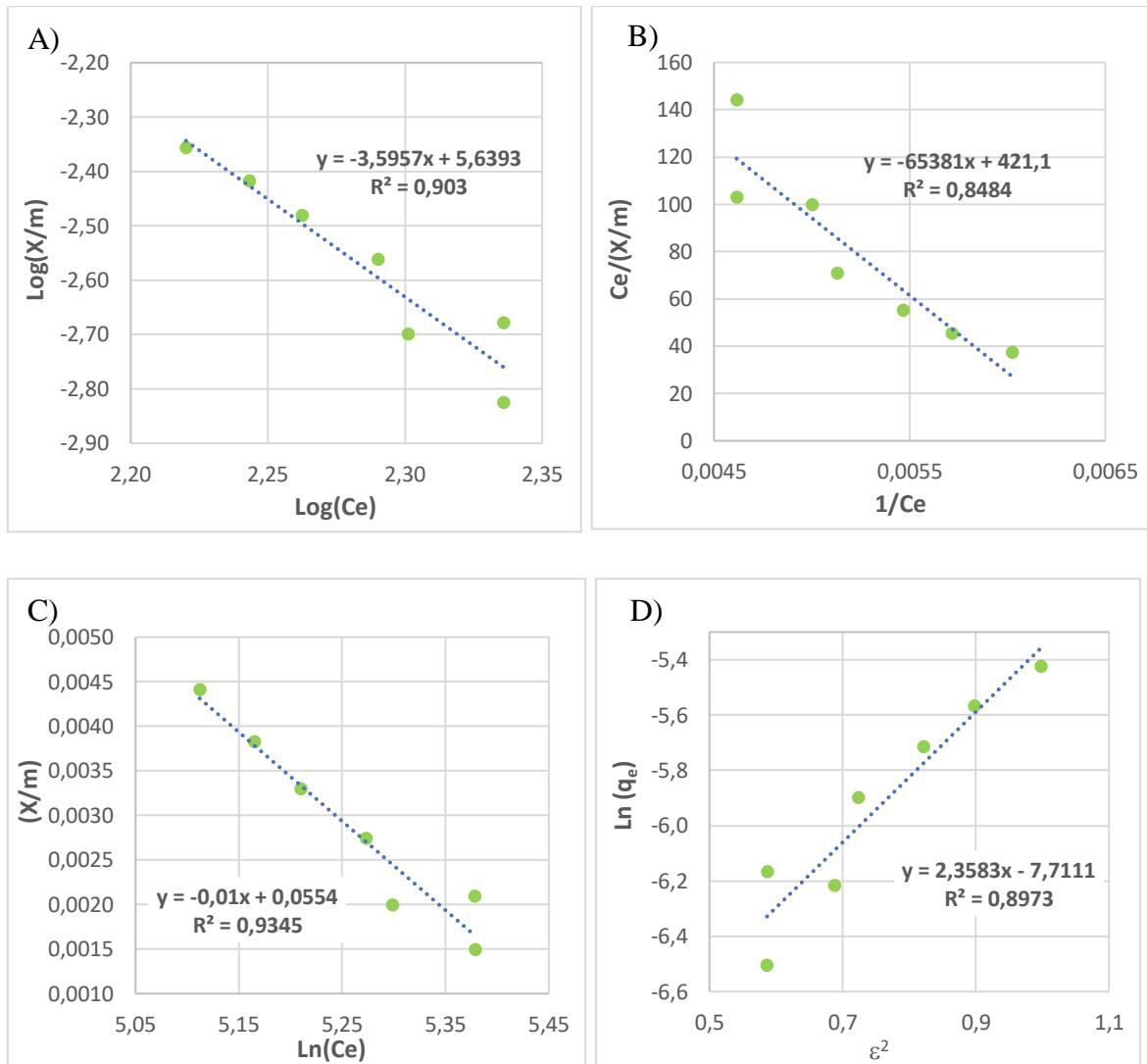


Figura 7. Ajustes lineales de las Isotermas a pH 11,5 A) Freundlich, B) Langmuir, C) Temkin, D) Dubinin Radushkevich

Resultados similares fueron observados por (Millán et al., 2017), quien utilizó materiales litológicos refractarios para adsorber iones de Cu^{+2} , encontrando que las isotermas de Freundlich y Langmuir eran las que mejor se ajustaban al proceso. Por otro lado, (Prato, et al., 2022) trabajó con materiales litológicos para la adsorción de dureza a pH alcalino, y la isotermas de Freundlich se ajustó mejor a los datos experimentales. Además, para los demás pH en los que se trabajó con el lecho, se obtuvieron resultados similares, donde la mayoría

mostró un mejor ajuste lineal con el modelo de Freundlich, como se ilustra en las figuras del Anexo 8.

En la Tabla 8, se puede observar que las isotermas que mejor se ajustan al proceso de adsorción a pH 11,5 son las de Freundlich y Temkin. La isoterma de Freundlich, con un coeficiente de correlación de 0,91, indica que la superficie adsorbente retiene las moléculas en multicapa, y su constante $n > 1$ sugiere que la adsorción es favorable (Figueroa et al., 2015). Este tipo de isoterma implica que la interacción entre el lecho adsorbente y la dureza del agua es de naturaleza física y ocurre en sitios con diferentes energías de adsorción (Bajarano, et al., 2020).

Tabla 8. Constantes de la isoterma de mejor ajuste al proceso de adsorción a diferente pH.

pH	Isoterma	R ²	Constantes
2,0	Temkin	0,98	$B \left(\frac{kJ}{mol} \right)$ 0,0623
			$A_T \left(\frac{mol \times m^2}{mg \times s^2} \right)$ 1,00018
7	Temkin	0,97	$B \left(\frac{kJ}{mol} \right)$ 0,0529
			$A_T \left(\frac{mol \times m^2}{mg \times s^2} \right)$ 1,00018
11,5	Temkin	0,93	$B \left(\frac{kJ}{mol} \right)$ 0,0554
			$A_T \left(\frac{mol \times m^2}{mg \times s^2} \right)$ 1,00018

Fuente: Autor

Por otro lado, la isoterma de Temkin, con un coeficiente de correlación de 0,93, muestra que las moléculas del adsorbato se adsorben exclusivamente en los sitios disponibles del adsorbente, siendo el proceso de tipo heterogéneo. Además, señala que no hay interacción entre las moléculas adsorbidas y que el proceso es reversible de tipo físico debido a que la energía de adsorción es menos a 8 kJ/mol ($B = 7,71 \text{ kJ/mol}$). Resultados similares fueron obtenidos por (Prato, et al., 2022), quien trabajó con dos tipos de materiales litológicos oxídicos para la retención de dureza, encontrando que la isoterma de Temkin era la que mejor se ajustaba al proceso con un coeficiente de correlación de 0,93 y hace referencia a que tiene en cuenta la disminución de la entalpía molar a medida que transcurre el proceso, el mismo caso es para el pH 2 y pH 7 teniendo valores de 0,98 y 0,97 respectivamente siendo la isoterma de Temkin la mejor acertada en ambos casos también. (Tejeda Benítez et al., 2001).

En la Tabla 9 se muestran los valores de las isotermas que ofrecieron el mejor ajuste lineal en las pruebas realizadas a diferentes pH. Se observa que la isoterma Temkin es la que

se ajusta de mejor manera a los resultados experimentales, lo que coincide con los hallazgos reportados por(Prato, et al., 2022).

Tabla 9. *Resultados de las isotermas de mejor ajuste al proceso de adsorción a diferente pH.*

pH	Isoterma	R ²
2,0	Temkin	0,98
7,0	Temkin	0,97
11,5	Temkin	0,93

4.3.2 Cinética

Los ajustes lineales de la cinética permiten determinar cómo varía, a lo largo del tiempo, la interacción entre las moléculas adsorbidas y el lecho adsorbente (Bejarano, et al., 2020). En la Figura 8, se presentan los distintos resultados obtenidos en cuanto al estudio que se realizó de cinéticas de adsorción a pH 11,5 siendo el modelo de Pseudo Segundo Orden el que mejor se adapta a los datos experimentales.

El resultado que mejor se ajusta a la cinética es la de pseudo segundo orden con un coeficiente de correlación de 0,97 que implica un equilibrio en la capacidad de adsorción y señala que la velocidad del proceso es proporcional al cuadrado de los sitios activos disponibles. Esto sugiere que el adsorbato ocupa dos sitios activos en el adsorbente, además de indicar que la adsorción ocurre en una monocapa y es de naturaleza química.

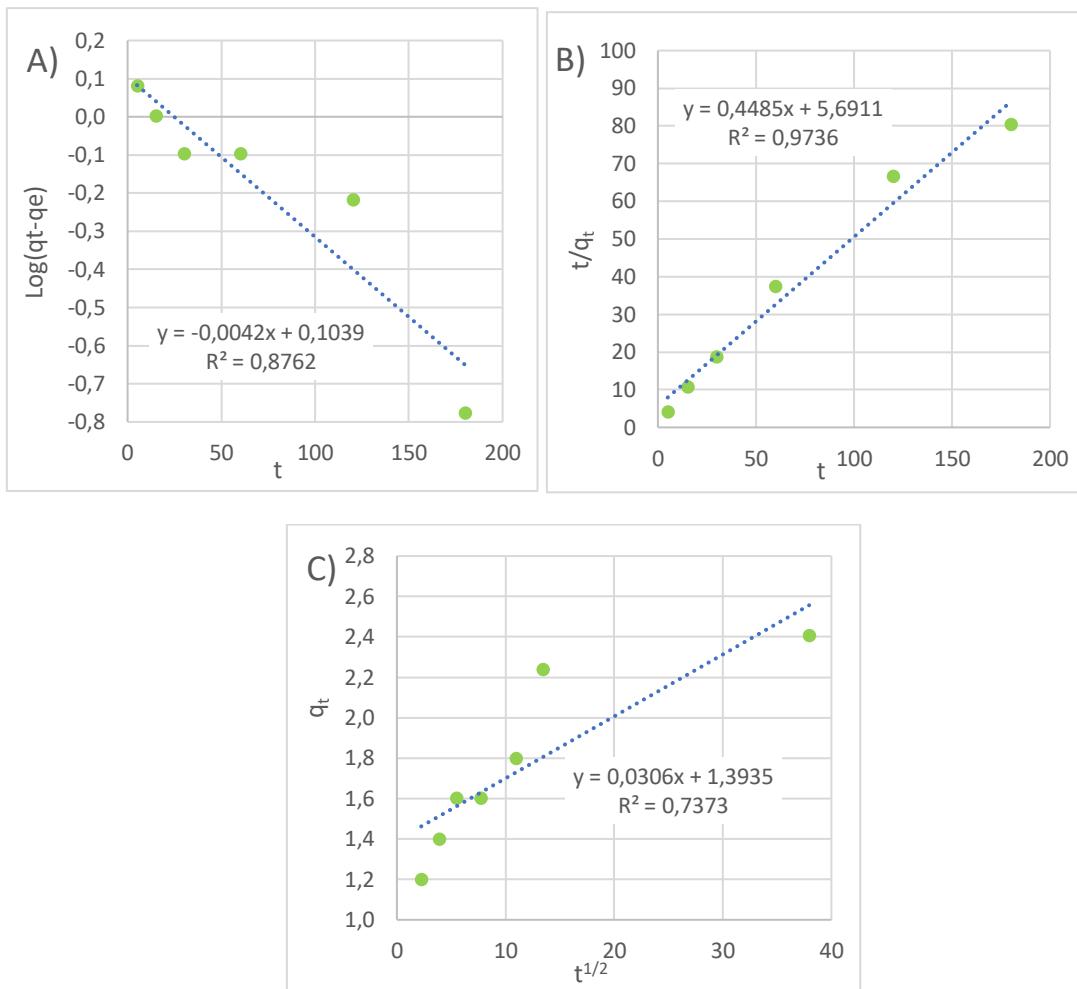


Figura 8. Ajustes lineales de las Cinéticas a pH 11,5 A) Pseudo Primer Orden, B) Pseudo Segundo Orden, C) Difusión Intraparticular

Resultados similares han sido presentados por (Bejarano, et al., 2020) Se evaluó la capacidad de las arcillas activadas para eliminar colorantes catiónicos, y el modelo cinético que mejor se ajustó al proceso fue el de Pseudo Segundo Orden, también (Gallo Tibanquiza & Morales Toainga, 2020), utilizaron materiales de roca volcánica de distintas regiones de Ecuador para adsorber la dureza del agua.

Los resultados del estudio cinético mostraron que la ecuación de pseudo segundo orden es la que mejor se ajusta a todos los materiales, incluso trabajando a diferentes niveles de pH. Para los otros niveles de pH analizados, se obtuvieron resultados similares, con el modelo de pseudo segundo orden siendo el que mejor se ajusta al proceso de adsorción en la mayoría de los casos, tal como se muestra en las Figuras del Anexo 9.

Tabla 10. Cinéticas de mejor ajuste al proceso de adsorción a diferente pH

pH	Modelo Cinético	Constantes	R ²
2,0	Pseudo Segundo Orden	K ₂ (mg/mg*min)	101744,132

		q_e (mg/g)	0,00138	
		K_2 (mg/mg*min)	50302,49	
7,0	Pseudo Segundo Orden	q_e (mg/g)	0,00161	0,98
11,5	Pseudo Segundo Orden	K_2 (mg/mg*min)	35345,06	0,99
		q_e (mg/g)	0,00223	

Fuente: Autor

La Tabla 10 se muestra los valores correspondientes a los modelos cinéticos que mejor se ajustan al proceso de adsorción a diferentes niveles de pH 2; 7 y 11,5, utilizando un lecho de 5 g de peso. Se observa que el modelo de pseudo segundo orden es el que, en todos los casos, ofrece el mejor ajuste, lo que sugiere que la capacidad de retención de iones de dureza es proporcional al número de sitios activos disponibles en la superficie del adsorbente (Del et al., 2009).

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los lechos de rocas volcánicas del Chimborazo, tanto naturales como activados, tienen la capacidad de adsorber cationes, reteniendo los iones de dureza disueltos en el agua. La eficacia de este proceso depende del pH, debido a las cargas variables en la superficie de los adsorbentes.
- La retención de iones de dureza presentó mayor eficacia con los lechos activados a pH alcalino alcanzando un porcentaje del 42,3% y 30,5% a un pH de 11,5 y 9,5 respectivamente, mientras que con pH neutro se obtuvo una retención del 25,4%, y con pH ácidos de 4,6 y 2 se obtuvo el menor rendimiento del 20,7 y 18,5 respectivamente, debido a que cuando el lecho es activado a pH ácido se incrementa la densidad de iones H⁺, cargando positivamente al lecho, lo cual hace que repela cationes.
- El estudio de equilibrio de adsorción con el lecho activado a diferentes niveles de pH, se ajustó de mejor manera a la isoterma de Temkin, lo cual indica que el calor de adsorción de todas las moléculas disminuye linealmente por el aumento de la superficie del adsorbente, esto quiere decir que la adsorción es caracterizada por una distribución uniforme de todas las energías del enlace hasta llegar a una energía máxima.
- En el estudio cinético, el material oxídico activado a diferentes niveles de pH se ajustó mejor al modelo de Pseudo Segundo Orden. Esto indica que la capacidad de adsorción se relaciona más con los enlaces químicos entre el adsorbato y las moléculas en la superficie del adsorbente, en lugar de depender de la concentración del adsorbato.

5.2 Recomendaciones

- Investigar más materiales litológicos oxídicos de diversas regiones de Ecuador para evaluar su capacidad de adsorción de dureza.
- Realizar análisis para determinar la reducción de otros iones que alteran la composición del agua, como nitratos, fosfatos, metales pesados y colorantes utilizados en la industria.
- Considerar otras variables en el proceso de adsorción, como el tiempo, la temperatura, el caudal, la masa y el tamaño del lecho, para identificar factores que puedan mejorar la eficacia del proceso y desarrollar un sistema de adsorción de iones de dureza que sea rentable y fácil de implementar.

6. Bibliografía

- Abdeen, Z., & Mohammad, S. (2014). Study of the Adsorption Efficiency of an Eco-Friendly Carbohydrate Polymer for Contaminated Aqueous Solution by Organophosphorus Pesticide. *Open Journal of Organic Polymer Materials*, 04(01), 16–28. <https://doi.org/10.4236/ojopm.2014.41004>
- Adasme, R., & Zúñiga, J. (2020). *Introducción al análisis cuantitativo de datos* (Issue July). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25253.93926>
- Ale Borja, N., García Villegas, V., Yipmantin Ojeda, A., Guzmán Lezama, E., & Maldonado García, H. (2015). Estudio de la cinética de biosorción de plomo (II) en alga *Ascophyllum Nodosum* *Rev Soc Quím Perú* (Vol. 212, Issue 3).
- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020a). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- Bañuelos, J. (2015). “Tratamiento de agua contaminada mediante el uso de un electrodo tridimensional de carbón activado y/o modificado con hierro acoplado a un proceso Fenton electroquímico”.
- Bejarano, M., Estrella, A., Márquez, O., Ríos, A., Rodríguez, , Marco, Bejarano, M., Estrella, A., Márquez, O., Ríos, A., & Rodríguez, , Marco. (2020a). Estudio de la adsorción de los colorantes “Drimaren Amarillo CL-2R” y “Basic Azul Marino 2 RN” en arcillas activadas. *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, 3(2), 93–107. <https://doi.org/10.37135/ns.01.06.08>
- Bejarano, M., Estrella, A., Márquez, O., Ríos, A., Rodríguez, , Marco, Bejarano, M., Estrella, A., Márquez, O., Ríos, A., & Rodríguez, , Marco. (2020c). Estudio de la adsorción de los colorantes “Drimaren Amarillo CL-2R” y “Basic Azul Marino 2 RN” en arcillas activadas. *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, 3(2), 93–107. <https://doi.org/10.37135/ns.01.06.08>
- Capote, T., Matute, S., & Rojas, J. (2017). Determinación de la dureza total en agua con EDTA empleando una solución amortiguadora inodora de borato. *Revista Del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 46(1–2), 25–37.
- Carbonel, D. (2018). Cadmium, Copper and Lead Adsorption on Natural and Modified Bentonite, Kaolin and Zeolite: A Review of Process Parameters, Isotherms and Kinetics. *Ingeniería*, 23(3), 252–273.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (1999a). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater autoclaving. In *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- Das, A., Banerjee, M., Bar, N., & Das, S. K. (2019). Adsorptive removal of Cr(VI) from aqueous solution: kinetic, isotherm, thermodynamics, toxicity, scale-up design, and GA modeling. *SN Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0813-9>

- Del, M., Sun-Kou, R., & Lazo, J. C. (2009). Study of strength ionic effect in adsorption of phenol with organophilic clays. Equilibrium and kinetic. In *Rev Soc Quím Perú* (Vol. 75, Issue 1).
- Elmoubarki, R., Mahjoubi, F. Z., Tounsadi, H., Moustadraf, J., Abdennouri, M., Zouhri, A., El Albani, A., & Barka, N. (2015). Adsorption of textile dyes on raw and decanted Moroccan clays: Kinetics, equilibrium and thermodynamics. *Water Resources and Industry*, 9, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.11.001>
- Figueroa, D., Moreno, A., & Hormaza, A. (2002). Revista ingenierías. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 105–120. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242015000100008&lng=en&nrm=iso&tlang=es
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Gallo, L., & Morales, A. (2020b). Estudio del Equilibrio de Dsorción de la Dureza del Agua sobre Rocas Volcánicas. In *Universidad Nacional de Chimborazo* (p. 53).
- Guadarrama, R., Kido, J., Roldan, G., & Salas, M. (2016). Contaminación de agua. *ECORFAN ® Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(5), 1–10.
- Guerrero, M. (2006). El Agua. In *Fondo de Cultura Económica* (Vol. 5).
- Ho, Y. S. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*, 681–689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>
- Jabłońska, B. (2021). Optimization of ni(Ii), pb(ii), and zn(ii) ion adsorption conditions on pliocene clays from post-mining waste. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min11060568>
- Juliño, M., Ocaña, F., & Concha, J. (2021). Contaminación ambiental y su influencia en la salud. *ReNaCientE - Revista Nacional Científica Estudiantil - UPEL-IPB*, 2(1), 75–90. <https://doi.org/10.46498/renacipb.v2i1.1566>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M., & Patil, S. (2021a). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M., & Patil, S. (2021b). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- KOINONIA Santa Ana de Coro Venezuela Ángel Azuero, F., & Enrique Azuero Azuero, Á. (2019). Significatividad del marco metodológico en el desarrollo de proyectos de investigación. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía, ISSN-e 2542-3088, Vol. 4, Nº. 8 (Julio - Diciembre), 2019, Págs. 110-127, 4(8)*, 110–127. <https://doi.org/10.35381/r.k.v4i8.274>
- Largo, D., & Villamarín, K. (2013). *Caracterización y activación química de arcilla tipo bentonita para su evaluación en la efectividad de remoción de fenoles presentes en aguas residuales* (Vol. 66, Issue 1997).

- Márquez, A., Millán, F., Prato, J. G., & La Cruz, C. (2020). Adsorción de iones Cr(VI) sobre lechos adsorbentes calcinados con superficie de carga variable químicamente modificada. *Revista Técnica De La Facultad De Ingeniería Universidad Del Zulia*, 72–81. <https://doi.org/10.22209/rt.v43n2a03>
- Meza, Y., & Mallaupoma, L. (2018b). *Adsorción de iones Cu (II) desde soluciones acuosas utilizando nanoarcillas*.
- Millán, F., Prato, J. G., Prato, J. G., Zerpa, D., & Levei, E.-A. (2017b). *Copper Adsorption on Calcined Substrates from Three Granulometric Fractions Coming from Two Refractory Variable Charges Lithological Materials International Journal of Recent Development in Engineering and Technology Website: www Copper Adsorption on Calcined Substrates from Three Granulometric Fractions Coming from Two Refractory Variable Charges Lithological Materials* (Vol. 6, Issue 8). <https://www.researchgate.net/publication/364252890>
- Mullor, C. (2017). Estudio De La Salinidad De Las Aguas De Escorrentía En El Entorno Agrícola De Los Ríos Segura-Vinalopó. In *Dspace*.
- Navas, P., & Durán, A. (2000). *Cargas eléctricas superficiales y propiedades adsorbentes del salvado de arroz (Oryza sativa L.)*. 5. 1–10.
- Neira, M. A. (2006). Dureza En Aguas De Consumo Humano Y Uso Industrial, Impactos Y Medidas De Mitigación. Estudio De Caso: Chile. In *Universidad de Chile*. Universidad De Chile.
- Orellana, J. (2005). Tratamiento De Las Aguas. *Ingeniería Sanitaria- UTN - FRRO*, 1–123.
- Orozco-Centeno, W. P., Branch Bedoya, J. W., & Jiménez-Builes, J. A. (2014). Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 36, 5–9. <https://doi.org/10.15446/rbct.n36.44037>
- Pavez, A., & Saldaña, G. (2023). *Efecto del pH sobre el Equilibrio de Adsorción de la Dureza del Agua sobre Arcilla Roja de la Región Pastaza*.
- Prato, J. G., Millán, F., Ríos, A., & González-Ramírez, L. C. (2022a). Uso de materiales litológicos oxídicos para la reducción de la dureza en aguas naturales. *Información Tecnológica*. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200145>
- Prato, J., González, L., Pérez, M., & Rodríguez, M. (2021). Adsorción de la dureza del agua sobre lechos de rocas volcánicas de Ecuador. *Información Tecnológica*, 32(2), 51–60. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642021000200051>
- Prato, J., Millán, F., González, L., Ríos, A., López, E., Ríos, I., Navas, S., Márquez, A., Carrero, J., & Díaz, J. (2022). Adsorption of Phosphate and Nitrate Ions on Oxidic Substrates Prepared with a Variable-Charge Lithological Material. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w14162454>
- Prato, J., Millán, F., Ríos, A., & González, L. (2022). Uso de materiales litológicos oxídicos para la reducción de la dureza en aguas naturales. *Información Tecnológica*, 33(2), 145–156. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200145>
- Prato, José., Millán, Fernando., González, Luisa., Ríos, Iván., Márquez, Andrés., Sánchez, Jorge., Palomares, Antonio., & Díaz, Juan. (2021). Evaluación de materiales litológicos oxídicos como adsorbentes para el tratamiento de efluentes

- y aguas residuales. *Novasinergia*, 2021(2), 93–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/XXXX>
- Rodríguez, S. (2010). La dureza del agua. In *FACSA ciclo integral del agua* (Vol. 1).
- Romero, C. (2009). *Optimización de la red n° 2 del sistema de agua potable de la ciudad de Riobamba*.
- Ruiz, N. (2014). *Caracterización Textural y Química de Materiales de Carbón*. Universidad de Jaén.
- Sotelo, J., Ovejero, G., Delgado, J., & Martínez, I. (2004). *Eliminación de compuestos organoclorados para potabilización de aguas mediante un proceso de adsorción-regeneración en carbón activado*. 253–258.
- Soto, J. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 11(2), 167–177. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2010.11n2.014>
- Tejeda Benítez, L., Tejada Tovar, C., Marimón Bolívar, W., & Villabona Ortiz, Á. (2001). Revista luna azul. *Luna Azul*, 39, 124–142. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742014000200008&lng=en&nrm=iso&tlang=es
- Tuesta, E., Vivas, M., Sun, R., & Gutarra, A. (2005). Modificación Química De Arcillas Y Su Aplicación En La Retención De Colorantes. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 10.
- Wingenfelder, U., Hansen, C., Furrer, G., & Schulin, R. (2005). Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites. *New Trends in Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater*, 4606–4613. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822965-1.00008-8>

7. Anexos

Anexo 1. Preparación de los lechos



Figura 9. Trituración de la roca volcánica

Figura 10. Tamizado del material

Anexo 2. Granulometría de los Lechos



Figura 11. Calibrador digital de Vernier



Figura 12. Medición de Lechos

Anexo 3. Determinación del Punto de Carga Neta Cero (PCNC)



Figura 13. Pesado del material para el PCNC



Figura 14. Montaje de vasos para el PCNC



Figura 15. Adición de la solución ácida y básica a cada muestra



Figura 16. Medición del pH en cada muestra

Anexo 4. Montaje de Columnas de Adsorción



Figura 17. Armado de la columna de adsorción



Figura 18. Uso de la columna de adsorción

Anexo 5. Pruebas de Activación y Reducción de la Dureza



Figura 19. Preparación de solución activadora



Figura 20. Adicionamiento de la solución en la columna de adsorción



Figura 21. Calibración de llaves



Figura 22. Toma de muestras



Figura 23. Preparación de los instrumentos para la titulación



Figura 24. Titulación de muestras activadas

Anexo 6. Reducción de dureza del agua en el lecho reactivado con HCl

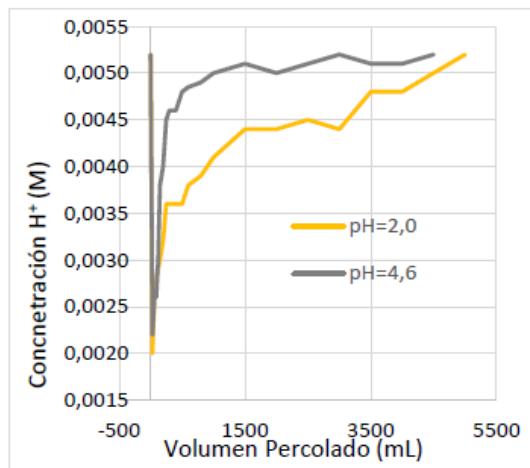


Figura 25. Reactivación de los lechos a pH: 2,0 y pH:4,6

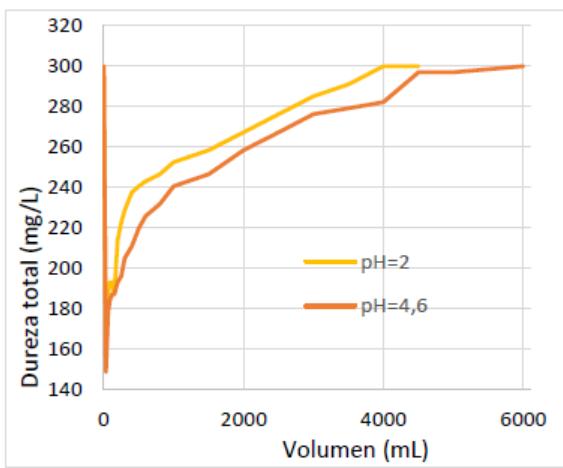


Figura 26. Reducción de la dureza en lecho reactivado a pH:2,0 y pH:4,6

Anexo 7. Reducción de dureza del agua en el lecho reactivado con NaOH

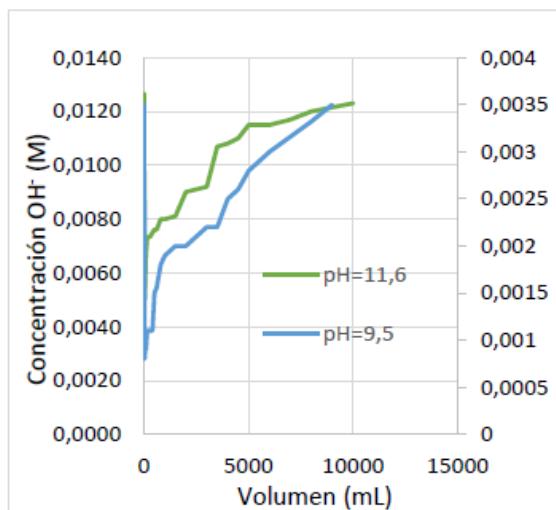


Figura 27. Reactivación de los lechos a pH:9,5 y pH:11,5

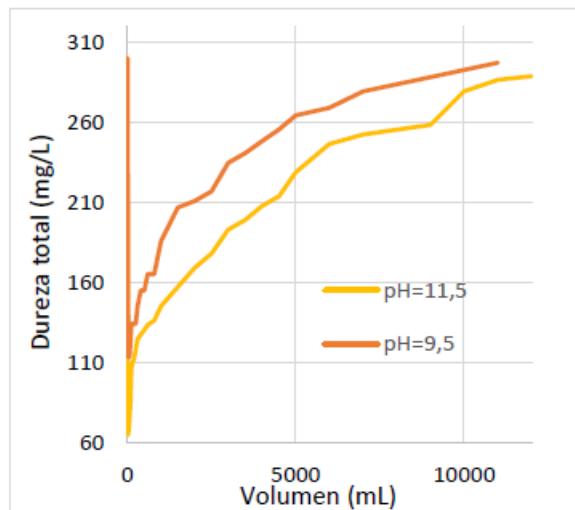


Figura 28. Reducción de dureza de los lechos a pH:9,5 y pH:11,5

Anexo 8. Determinación de Isotermas

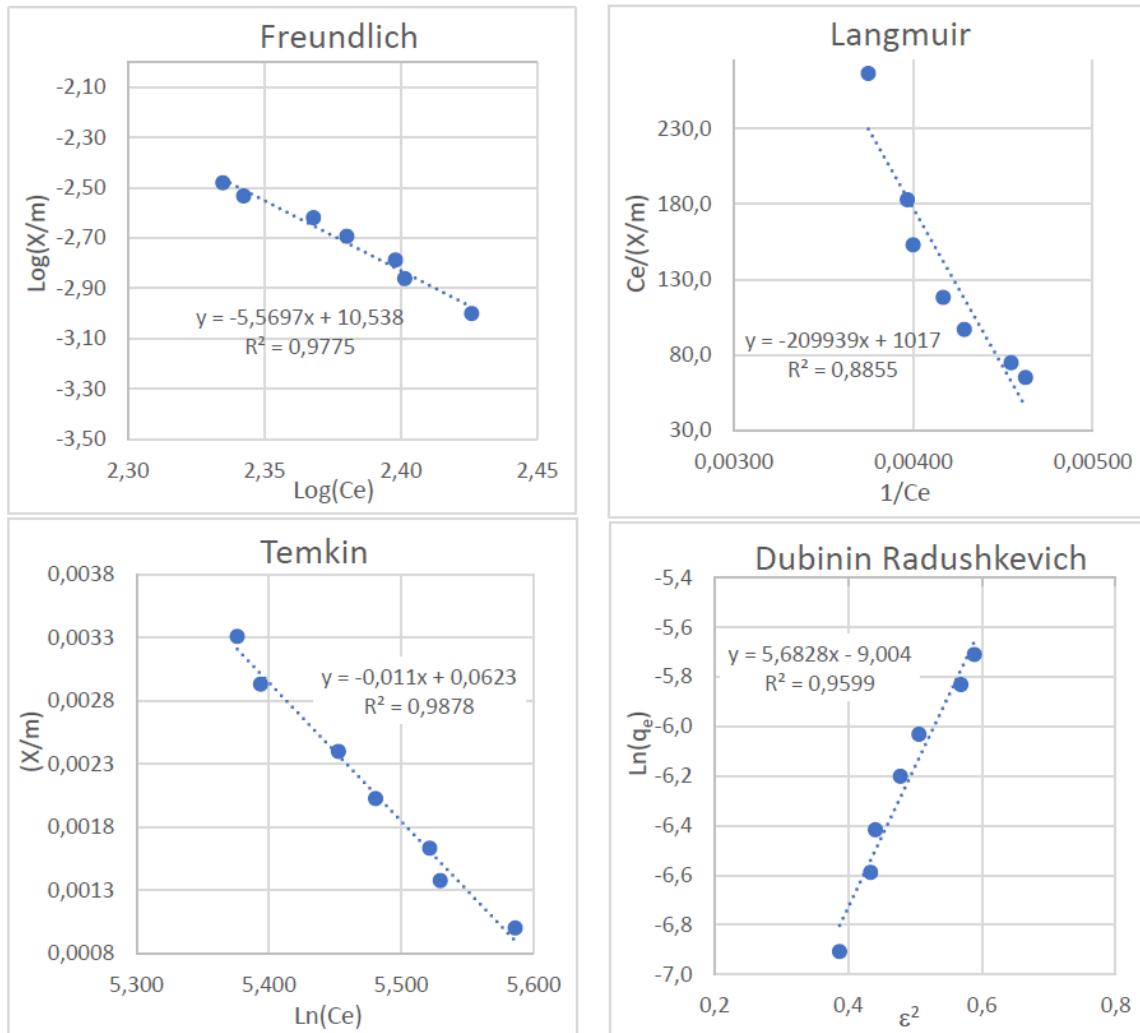


Figura 29. Representación gráfica de las isotermas a pH:2

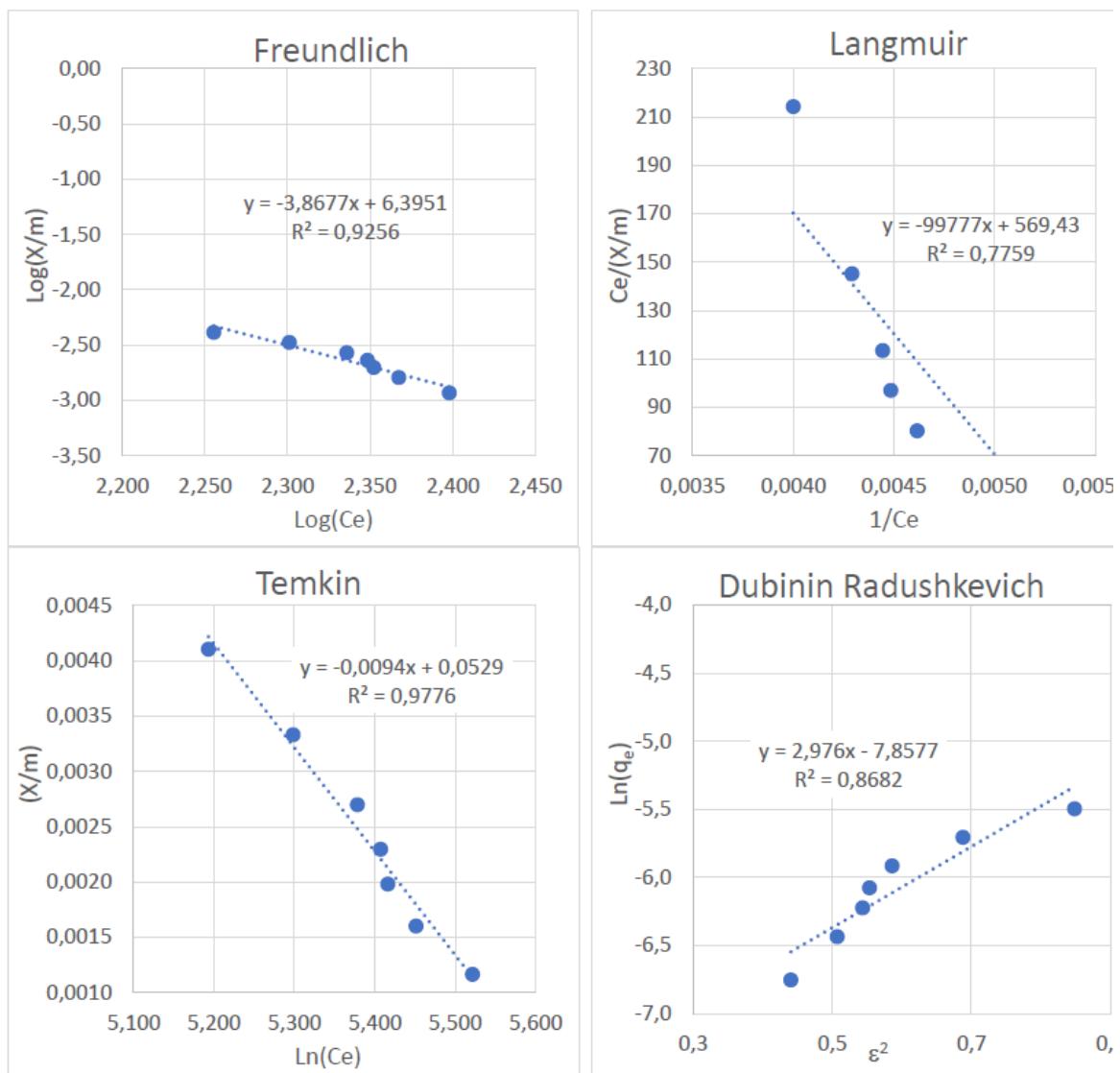


Figura 30. Representación gráfica de las isotermas a pH:7

Anexo 9. Determinación de Cinéticas.

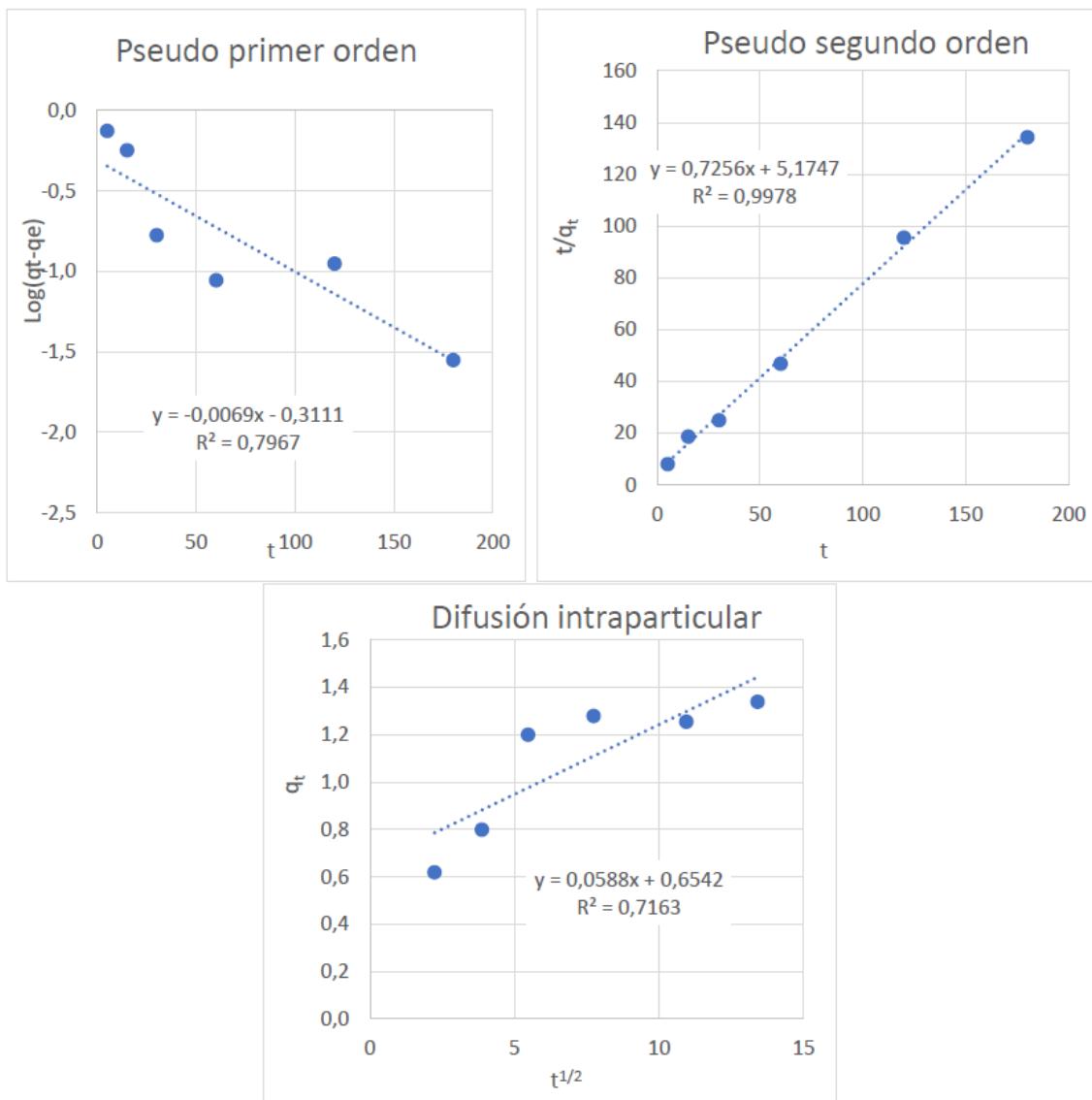


Figura 31. Representación gráfica de Cinética a pH:2

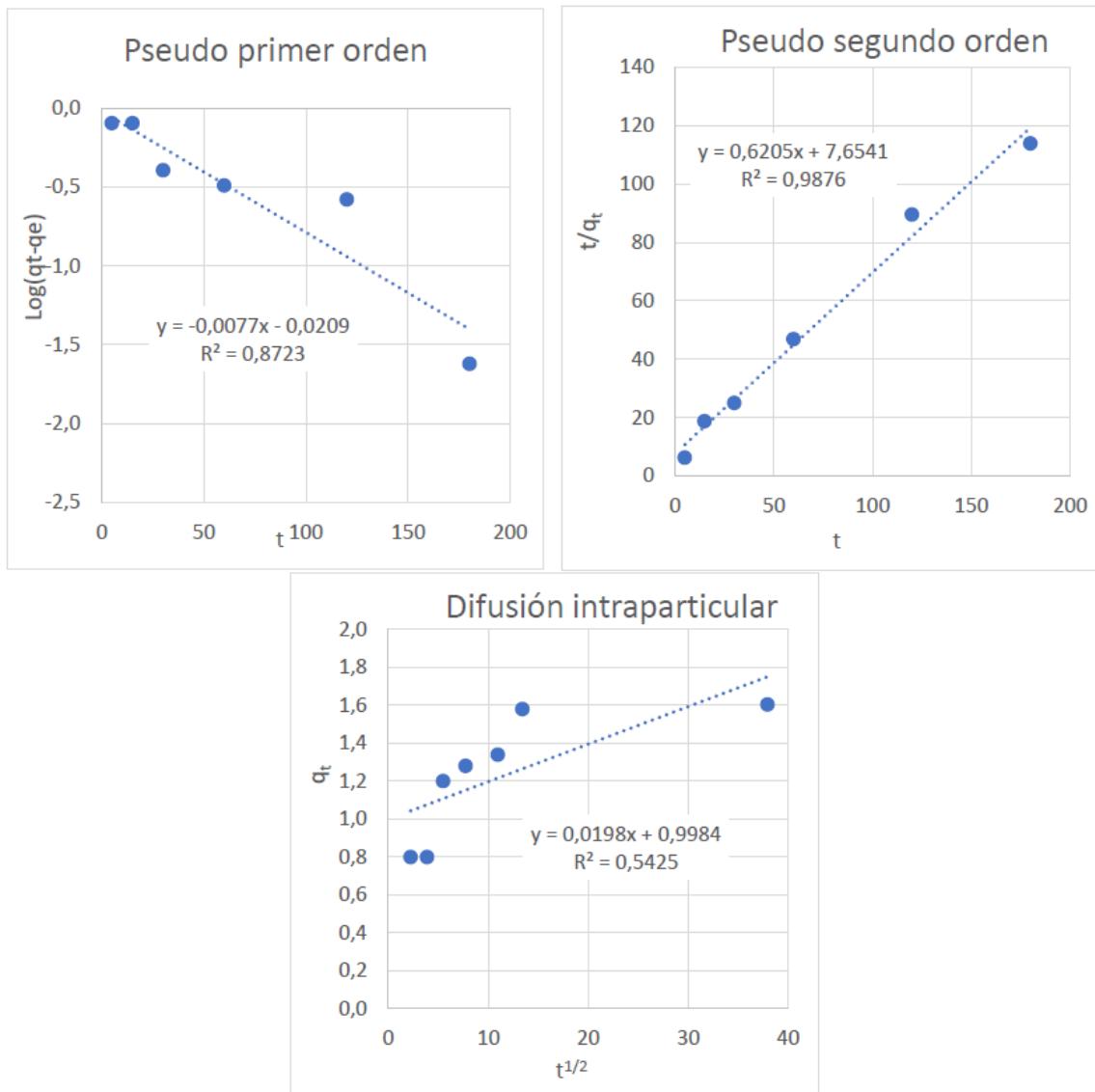


Figura 32. Representación gráfica de Cinética a pH:7