



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN
Y POSGRADO

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:
MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL CON MENCIÓN EN
RECURSOS HÍDRICOS

TEMA:

“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN FILTRO A BASE DE CÁSCARAS DE
HUEVO Y CÁSCARAS DE CEBADA PARA LA DISMINUCIÓN DE LA
DUREZA DEL AGUA EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”

AUTOR:

Ing. Mery Cristina Robalino Vallejo

TUTOR:

Dra. Silvia Hipatia Torres Rodríguez, PhD.

Riobamba – Ecuador

2025

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN FILTRO A BASE DE CÁSCARAS DE HUEVO Y CÁSCARAS DE CEBADA PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DUREZA DEL AGUA EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”, ha sido elaborado por la Ingeniero Mery Cristina Robalino Vallejo, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutora. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta anti plagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 21 de marzo de 2025



Dra. Silvia Hipatia Torres Rodríguez, PhD.

TUTORA

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, Mery Cristina Robalino Vallejo, con número único de identificación 0604912501 declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN FILTRO A BASE DE CÁSCARAS DE HUEVO Y CÁSCARAS DE CEBADA PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DUREZA DEL AGUA EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”, previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 21 de marzo de 2025.

Ing. Mery Cristina Robalino Vallejo

N.U.I. 0604912501

Agradecimiento

A Dios y a la virgen, por darme fortaleza y sabiduría para culminar este proyecto.

A mi mamá Olga Vallejo y mi familia, por su apoyo incondicional y por ser mi motivación en los momentos más difíciles.

A mi tutora Dra. Silvia Hipatia Torres Rodríguez, por su paciencia, dedicación y guía académica, gracias por compartir su conocimiento y experiencia con mi persona.

A mis amigos y compañero de carrera, con quienes compartí gratos momentos de estudio en especial.

A la Universidad Nacional de Chimborazo y sus docentes.

Mery Cristina Robalino Vallejo

Dedicatoria

A Dios y mi Virgen, que me cuidan en cada paso de mi vida.

A mi papá Miguel, que, aunque ya no esté físicamente a mi lado, sigue presente en cada uno de mis logros a mi mamá Olga Vallejo, mi hermana Liliana Robalino, mis tías Mónica y Mercedes Robalino Coello, mis Abuelitos Carmen Coello y Guillermo Robalino pilares fundamentales para salir adelante y superarme.

A mis docentes, mentores en mi formación académica.

A mis colegas, compañeros de largas noches de estudio.

Mery Cristina Robalino Vallejo

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Índice General	vi
Índice de Tablas	ix
Índice De Figuras	x
Resumen	xii
Abstract	xiii
Introducción	13
Capítulo 1 Generalidades	15
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Justificación e la instigación	16
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivo Específicos.....	17
Capítulo 2 Estado del Arte y la Practica	18
2.1 Antecedentes investigativos.....	18
2.2 Fundamentación Legal.....	20
2.3 Fundamentación Teórica.....	22
2.3.1 Agua	22
2.3.2 Agua de consumo humano	22
2.3.3 Contaminación del agua	22

2.3.4	Dureza del agua	22
2.3.5	Clasificación del agua según su nivel de dureza	23
2.3.6	Efectos del agua dura.....	23
2.3.7	Métodos de determinación de la dureza	23
2.3.8	Adsorción	24
2.8.1	Tipos de Adsorción.....	24
2.3.9	Bioadsorción.....	24
2.3.10	Residuos orgánicos como bioadsorbente.....	25
•	Cáscara de huevo	25
•	Cascara de cebada.....	26
2.3.11	Filtración.....	26
2.3.12	Biofiltros.....	27
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....		28
3.1	Enfoque de la investigación.....	28
3.2	Diseño de la investigación	28
3.2.1	Variables.....	28
3.2.2	Tratamientos	28
3.3	Tipo de investigación.....	29
3.4	Técnicas e instrumentos de muestreo y recolección de datos.....	29
3.5	Materiales, reactivos y equipos.....	30
3.6	Preparación del material orgánico	31
3.6.1	Cáscara de huevo	31
3.6.2	Cáscara de cebada.....	34
3.7	Caracterización fisicoquímica de las cáscaras de huevo y cebada	36
3.7.1	Determinación del pH y conductividad.....	36

3.7.2	Determinación del porcentaje de humedad	37
3.7.3	Determinación aparente y real.....	37
3.7.4	Porosidad	38
3.8	Determinación de la dureza total del agua.....	39
3.9	Activación de las cáscaras huevo con Hidróxido de Sodio (NaOH)	39
3.10	Diseño del filtro a base de cáscaras de huevo y cebada.....	39
Capítulo 4 Análisis y Discusión de Resultados.....		47
4.1	Propiedades fisicoquímicas de las cáscaras de huevo y las cáscaras de cebada....	47
4.2	Evaluación de los prototipos filtro a base de cáscaras de huevo y cebada para la disminución de la dureza del agua.....	48
4.2.1	Porcentajes de remoción y determinación de los resultados obtenidos.....	48
4.3	Eficacia del filtro a base de cascaras de huevo y cebada en la reducción de la dureza del agua.....	57
Capítulo 5		58
5.1	Conclusiones.....	58
5.2	Recomendaciones	59
6.	Referencias Bibliográficas.....	60

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación del agua según tipo de dureza	23
Tabla 2. Proporciones de cáscaras de huevo y cebada para los tratamientos.....	29
Tabla 3. Dimensión del filtro.....	40
Tabla 4. Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de huevo 200g	41
Tabla 5. Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 200g	42
Tabla 6: Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 100g y cáscaras de huevo 100g	43
Tabla 7: Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 150g y cáscaras de huevo 50g	44
Tabla 8: Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 25g y cáscaras de huevo 150g	45
Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas de la muestra.....	47
Tabla 10 . Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula <850 μm	49
Tabla 11. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula 850 a 2000 μm	50
Tabla 12. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula <850 μm	51
Tabla 13. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula 850 a 2000 μm	52
Tabla 14. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula <850 μm	53
Tabla 15. Concentración final de la dureza de las cáscaras de cebada (150 g) y huevo (50 g) de tamaño de partícula <850 μm	54
Tabla 16. Concentración final de la dureza de las cáscaras de cebada (50 g) y huevo (150 g) de tamaño de partícula <850 μm	56
Tabla 17. Porcentaje de eficiencia de las diferentes proporciones del filtro	57

Índice De Figuras

Figura 1. Capas de la cascara de huevo	25
Figura 2. Partes del grano de cebada	26
Figura 3. Lavado de las cáscaras de huevo con agua de llave y agua destilada	32
Figura 4. Secado inicial de las cáscaras de huevo	32
Figura 5. Triturado de las cáscaras de huevo.....	33
Figura 6. Tamizado de las cáscaras de huevo.....	33
Figura 7. Secado final de las cáscaras de huevo tamizadas.....	33
Figura 8. Cáscaras de huevo almacenadas en un recipiente plástico hermético.....	34
Figura 9. Lavado de las cáscaras de cebada con agua de llave y destilada	34
Figura 10. Secado inicial de las cáscaras de cebada.....	35
Figura 11. Molienda de las cáscaras de cebada	35
Figura 12. Tamizado de las muestras de cáscaras de cebada	36
Figura 13. Cáscaras de cebada almacenadas en un recipiente plástico hermético	36
Figura 14. Montaje del prototipo de filtro	40
Figura 15. Medio filtrante de cáscaras de cebada 200g y cáscaras de huevo 200g.....	41
Figura 16. Prototipo de filtro a base de cáscara de huevo 100% (200g), tamaño de partícula <850 μm y 850 a 2000 μm	42
Figura 17. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 100% (200g), tamaño de partícula <850 μm y 850 a 2000 μm	43
Figura 18. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 50% (100g) y cáscara de huevo 50% (100g), tamaño de partícula < 850 μm	44
Figura 19. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 25% (50g) y cáscara de huevo 75%(150g), tamaño de partícula < 850 μm	45
Figura 20. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 75% (150g) y cáscara de huevo 25% (25g), tamaño de partícula < 850 μm	46
Figura 21. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada <850 μm , 200 gramos	49
Figura 22. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada 850 a 2000 μm , 200 gramos	50
Figura 23. Concentración de dureza de las cáscaras de huevo <850 μm , 200 gramos.....	52
Figura 24. Concentración de dureza de las cáscaras de huevo 850 a 2000 μm , 200 gramos.....	53

Figura 25. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada (100 g) y huevo (100 g) de tamaño de partícula <math><850 \mu\text{m}</math>	54
Figura 26. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada (150 g) y huevo (50 g) de tamaño de partícula <math><850 \mu\text{m}</math>	55
Figura 27. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada (50 g) y huevo (150 g) <math>< 850 \mu\text{m}</math>.....	56
Figura 28. Porcentaje de eficiencia de las diferentes proporciones del filtro.....	57

Resumen

La dureza del agua es un problema frecuente que afecta la calidad del uso de distintas fuentes de agua, es por eso que este proyecto de investigación tiene como objetivo diseñar y validar un filtro a base de cáscaras de huevo y cáscaras de cebada como material adsorbente para la disminución de la dureza presente en el agua de consumo de la ciudad de Riobamba. Con base en revisión bibliografía los métodos utilizados para la preparación las cáscaras de cebada fue un lavado con agua destilada, posterior se sometió a un secado en el horno de secado por aire forzado BOV-VF a 90°C por 15 horas, luego se procedió a moler las cáscaras de cebada en un molino de granos manual de tolva baja de hierro fundido, después el material resultante fue sometido a tamizado mediante el equipo tamiz BIOBASE modelo BK-TS200 obteniéndose tamaño de partícula <850 y 850 a 2000 micras. Las cáscaras de huevo tuvieron un tratamiento similar se lavaron con agua destilada, se secó en el horno a 60°C por 24 horas, se trituro con ayuda de un mortero hasta obtener un tamaño de partícula homogéneo, y se tamizó hasta obtener los mismos tamaños de partícula ya mencionados, luego se volvió a secar el material en una estufa de secado BIOBASE BOV-VF a 200°C por 2 horas finalmente se dio un tratamiento adicional en medio básico con (NaOH). Para el diseño de los prototipos de los filtros a escala de laboratorio que combinen estos materiales orgánicos previamente preparados se empleó diferentes proporciones de 200, 100, 150, y 50 gramos de cada uno, además se midió parámetros fisicoquímicos como el pH, conductividad, densidad aparente, densidad real y porosidad de cada uno de los materiales orgánicos a trabajar, también se midió la dureza del agua antes y después del proceso de filtración. Los resultados obtenidos en los análisis demostraron que el prototipo de filtro que tuvo una mayor eficiencia fue a base de cáscaras de cebada con 150 gramos y cáscaras de huevo con 50 gramos con un tamaño de partícula < 850 micras que obtuvo una eficiencia del 18%, a pesar tener una eficiencia mayor a la de los otros prototipos de filtro el porcentaje es bajo a comparación de otros materiales, por lo cual se sugiere continuar con más estudios experimentales de estos materiales orgánicos para encontrar el método adecuado para mejorar la eficiencia en la eliminación de la dureza del agua.

Palabras claves: Dureza del agua, Filtro, Cáscaras de cebada, Cáscaras de huevo.

Abstract

Water hardness is a frequent problem that affects the quality of use of different water sources, which is why this research project aims to design and validate a filter based on eggshells and barley shells as adsorbent material for the reduction of hardness present in drinking water in the city of Riobamba. The methods used for the preparation of these organic wastes was a thermal treatment of barley shells and eggshells in an oven at 90°C and 200°C respectively, on the other hand, additional treatment was given to eggshells in an essential medium (NaOH), After that, the barley shells were milled and the eggshells were crushed, and then sieved, obtaining for the two organic materials two particle sizes < 850 microns that obtained an efficiency of 18%, despite having a higher efficiency than the other filter prototypes the percentage is low compared to other materials, so it is suggested to continue with more experimental studies of these organic materials to find the correct method to improve the efficiency in the removal of water hardness.

Keywords: *Water hardness, Filter, Barley hulls, Eggshells, Eggshells*



Firmado electrónicamente por:
SOFIA FERNANDA
FREIRE CARRILLO

Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

Introducción

El agua es uno de los recursos más importantes e indispensables de los seres vivos y se utiliza en la vida cotidiana (AbKadir et al., 2017). Este líquido vital tiene diferentes usos como el consumo humano, ganadero, agrícola, recreativo e industrial (Fernández, 2017).

Consumir agua de buena calidad es fundamental y significativo hacia la mejora del nivel de vida de la sociedad (Angulo & Hernández, 2019). No obstante, la contaminación y la escasez del agua son una problemática importante sobre todo en países en vías de desarrollo.

Los cuerpos de agua naturales contienen diversos tipos de contaminantes, principalmente sales disueltas que influyen directamente en la calidad del agua, independientemente si son causados por procesos naturales (geología) o actividades humanas, los iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) son los principales responsables de la dureza del agua (Bolaños et al. 2017).

Diversos estudios han evidenciado que las aguas naturales de distintas zonas en la provincia de Chimborazo, presentan una alta concentración de iones de calcio y magnesio, como consecuencia provoca inconvenientes como: incrustaciones en las tuberías, afectando el funcionamiento de los sistemas de distribución del agua, debido a que puede acelerar los procesos de corrosión por la presencia de deposititos blanquecinos afectando la calidad de este líquido vital (Bolaños et al. 2017). Además, la elevada dureza del agua puede generar un sabor desagradable del agua y los altos niveles de sales no son recomendados para el consumo humano (OMS, 2016).

El uso de filtros a base de residuos orgánicos para disminuir contaminantes en el agua aprovechando sus propiedades naturales de adsorción es una alternativa ecológica y económica, además estos residuos orgánicos como la cascara de frutas (naranjas, toronja, coco etc.), cáscaras de cereales (cebada, trigo, arroz) y cáscaras de huevo tiene propiedades químicas que pueden modificarse para convertirlo en un material capaz de adsorber un contaminante en específico que ese encuentre en el agua (Rengifo, 2023).

Este presente estudio tiene como objetivo principal diseñar y validar un filtro elaborado a base de cáscaras de huevo y cáscaras de cebada para la disminución de la dureza del agua en la ciudad de Riobamba. El propósito no solo evaluar la eficiencia del filtro en condiciones

experimentales controladas sino también a promover el desarrollo sostenible mediante el aprovechamiento de estos residuos orgánicos.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

El agua es vital para la vida en la Tierra, y los seres humanos necesitan consumirla en condiciones adecuadas para evitar problemas de salud. Sin embargo, en muchos lugares del planeta se deja de lado la calidad de agua, ante su disponibilidad (Chavéz et al., 2021).

La contaminación del agua ocurre cuando su composición fisicoquímica o biológica se ve modificada, teniendo efectos negativos sobre los seres vivos que la consumen (Guadarrama et al., 2016). La dureza del agua se refiere a la cantidad de iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) disueltos en el agua (Bolaños et al. 2017). En su mayoría estas aguas “duras” provienen de fuentes subterráneas en las que el agua ha pasado por una infiltración natural por medio de la porosidad de las formaciones geológicas (Ordoñez, 2011).

En la provincia de Chimborazo las aguas subterráneas que se usan para el consumo humano descienden de fuentes que provienen de las vertientes del volcán Chimborazo, estas aguas se caracterizan como aguas extremadamente duras por tener niveles de concentración de dureza que varían entre 150 y 407,67 mg/L CaCO_3 (Prato et al., 2022). Por otro lado, Riobamba es una ciudad donde el agua destinada para el consumo humano posee una dureza promedio de 336,86 mg/L (Logroño, 2019). Lo que puede modificar el umbral de gusto del líquido, dañar tuberías debido a las incrustaciones de estos iones, entre otros efectos negativos (EMAPAR, 2023).

El uso de materiales orgánicos de la cáscara de huevo y cebada para la elaboración de filtros permite aprovechar estos materiales considerados por la población como residuos sin uso que no reciben un tratamiento específico en nuestro país y terminan en los rellenos sanitarios municipales (MAATE, 2015). El uso de estos materiales orgánicos permitirá reducir la dureza del agua de consumo en la ciudad de Riobamba gracias a su capacidad de adsorber distintos contaminantes presentes en este recurso. Por lo tanto resulta imperativo diseñar un filtro que combine estos dos materiales orgánicos que permitan disminuir la dureza del agua de consumo en la ciudad de Riobamba.

1.2 Justificación de la instigación

En la actualidad se han presentado avances y descubrimientos importantes en el desarrollo de materiales que prometen un sinnúmero de aplicaciones como es la elaboración de medios filtración para la disminución de contaminantes como las altas concentraciones de dureza en el agua, gracias a una de sus características principales que poseen estos materiales orgánicos como es la adsorción debido a sus composición química y estructura porosa (Revelo et al., 2019).

La disminución de la dureza en el agua de consumo en la ciudad de Riobamba es sumamente necesaria, para evitar la formación de sarro (depósitos de carbonatos de calcio y magnesio) en tuberías debido a que puede dañar sistemas de plomería y aumentar costos de mantenimiento, además de cambiar el sabor del agua, incluso tener efectos negativos en la salud de quienes la consumen (Calvache, 2022) .

Por lo tanto, es esencial implementar técnicas que permitan disminuir la dureza del agua para consumo humano, considerando su eficiencia, facilidad de implementación y que sea amigable con el ambiente (Bolaños et al. 2017). Por lo cual el proceso de adsorción de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) mediante el uso de filtros a base residuos orgánicos como las cáscaras de huevo y cebada es una alternativa innovadora, sencilla, economía que ha demostrado ser muy eficientes en la retención de diferentes contaminantes gracias a su capacidad de adsorción (Revelo et al., 2019).

En este contexto, el presente trabajo de investigación propone diseñar y validar un filtro a base de cáscaras de huevo y cebada como biosorbente, para conocer qué proporción de combinación de estos materiales orgánicos tiene mayor porcentaje de retención de dureza del agua de consumo, para de esta manera proponer una solución viable y de bajo costo como solución accesible para la ciudad de Riobamba.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar y validar un filtro a base de cáscaras de huevo y cáscaras de cebada para la disminución de la dureza del agua en la ciudad de Riobamba.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Determinar las propiedades fisicoquímicas de las cáscaras de huevo y las cáscaras de cebada que permitan optimizar su capacidad de adsorción para la reducción de iones de calcio y magnesio en el agua.
- Diseñar un prototipo de filtro que combine estos materiales en diferentes granulometrías, proporciones adecuadas y bajo distintos tiempos de contacto.
- Validar la eficacia del filtro en la reducción de la dureza del agua mediante pruebas experimentales en laboratorio, asegurando su viabilidad técnica y económica como solución accesible para la ciudad de Riobamba.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Practica

2.1 Antecedentes investigativos

A continuación, se describe información obtenida referente a filtros a base residuos orgánicos en la reducción de la dureza del agua mediante la adsorción, en los cuales se describe lo siguiente:

Gutierrez (2023), en su proyecto de investigación utilizó cascara de tumbo en polvo para la biosorción del plomo, el propósito de este trabajo fue estimar la capacidad máxima de adsorción utilizando la cáscara de tumbo como bioadsorbente para la remoción de plomo (II) en soluciones acuosas. Para lo cual primero se preparó el bioadsorbente, el cual se lavó, secó en la estufa a una temperatura entre 50 y 60 grados durante 48 horas y finalmente se trituró hasta obtener partículas de tamaño $<250 \mu\text{m}$, luego se realizó la caracterización fisicoquímica de los parámetros como humedad, pH, densidad, porosidad, acidez titulable y capacidad de intercambio catiónico. Para las pruebas de adsorción del plomo (II) se realizaron a temperatura ambiente entre 25 y 27°C, donde se delimitó el pH de la solución, el tiempo de contacto, peso de bioadsorbente y la concentración del plomo. Los resultados indicaron que la adsorción de plomo (II) fue mejor usando 0,2 g de biosorbente en polvo, con una concentración de plomo (II) de 10 ppm, con un pH e 4 por 3 horas de agitación se alcanzó un máximo de remoción del 93,43% logrando una capacidad máxima de adsorción del 45,87 mg/g concluyendo así que el modelo de Langmuir es el mejor (Gutierrez, 2023).

Rodríguez (2021), en su trabajo de fin de máster titulado “ Empleo de la cáscara de huevo como adsorbente para la eliminación de contaminantes emergentes y refractarios en aguas residuales”, tuvo como objetivo reutilizar la cáscara de huevo como adsorbente para la eliminar de las aguas residuales los contaminantes emergentes como la eritromicina y los ácido húmicos, para lo cual primero se acondiciono el material, se lavó las cáscaras de huevo con agua de grifo después con agua destilada, se dejó secar a temperatura ambiente, se trituró y se colocó en la estufa a 105°C por 20 horas, nuevamente se trituro el material, se molió, se tamizo hasta obtener un tamaño de partícula de 250 μm , se llevó nuevamente a la estufa a 105 °C por 24 horas y finalmente se calcino el material en la mufla una muestra de 8g en un

crisol a diferentes temperaturas 300, 450, 600 y 750 °C, además se realizó la caracterización química, estructura (XRD), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, textura, estabilidad térmica y morfología de todas las muestras (SEM y TEM). Para estimar la capacidad de adsorción de los distintos materiales se analizaron los diferentes parámetros fisicoquímicos de interés (pH, color, DQO y TOC) evolucionaron con el tiempo. Como resultado la cáscara calcinada a 750°C presentó un mejor comportamiento como adsorbente que el resto de materiales, tanto en el proceso de adsorción de la eritromicina (38%) y los ácidos húmicos (90%) (Rodríguez, 2021).

Álvarez & Álvarez (2023) en su proyecto de tesis comparó la bioadsorción de níquel con cáscaras de cebada y toronja en aguas sintéticas, este trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar y comparar la efectividad de las cáscaras de toronja y cebada en la bioadsorción de níquel presente en aguas contaminadas, para lo cual se realizó la preparación de las cáscaras de toronja y cebada, además se preparó la solución níquel (agua sintética) a concentraciones de 200 ppm y 100 ppm, el cual se llevó a cabo mediante la técnica de la espectrofotometría. Para los experimentos se utilizaron las cantidades de 1g, 1,5 g, 2g y 3g de bioadsorbente, en desarrollaron un total de 52 ensayos, dando como resultado principal que la cáscara de toronja con una cantidad de 2g y de tamaño de partícula de 600 micras es más eficiente debido a que obtuvo un porcentaje de remoción del 82,63%. En cambio, la cáscara de cebada con una cantidad de 3g tamaño de partícula de 300 µm, tuvo una capacidad de bioadsorción del níquel del 41,56% (Álvarez & Álvarez, 2023).

Calvache (2022) en su proyecto de investigación comparó dos sistemas de filtrado usando cáscaras de naranja y huevo para retener el cromo hexavalente en aguas sintéticas. La investigación fue de tipo aplicada y descriptiva, debido a que se analizaron los filtros a partir de las cáscaras en un período determinado, una vez filtradas las muestras se concluyó cuál de los elementos filtrantes es más efectivo para el tratamiento del metal pesado, para la elaboración del filtro se utilizó un recipiente de PVC con diámetro de 10cm y 18 cm de altura, posterior se colocó grava y arena en pequeñas capas que servían como medio filtrante y finalmente se colocó 100g del biomaterial. Se identificó la concentración inicial de cromo para determinar el porcentaje de eliminación, el pH debe ser neutro (7-7,5) y el tiempo de contacto de 120 min. Para determinar la cantidad de cromo hexavalente en las muestras se utilizó espectrometría de absorción ultravioleta visible a una longitud de onda de 540 nm. El

filtro hecho a base de cascara de cebada tuvo mayor retención, con valores de 81,33% para 0 ppm, 92,50% para 6 ppm, 93,20% para 1 ppm y 96,04% para 1,5 ppm. A diferencia del filtro con cáscaras de huevo el cual obtuvo un porcentaje menor de retención de cromo a las mismas concentraciones de cromo (VI), finalmente como resultado se obtuvo que los filtros de cascara de cebada son más eficientes (Calvache, 2022). Este estudio busca aportar conocimientos sobre el uso de filtros a partir de materiales orgánicos, como las cáscaras de huevo y las cáscaras de cebada, demostrando su efectividad en la disminución de la dureza del agua, siendo así una alternativa útil, económica y eficaz.

Ronquillo et al., (2024) en su artículo científico titulado “ Biofiltro a base de cáscara de huevo para la adsorción de tensoactivos aniónicos en aguas residuales de lavandería”, tuvo como objetivo el desarrollo de un biofiltro a partir del uso de cáscara de huevo como material adsorbente para los tensoactivos aniónicos en el aguas residuales domésticas proveniente de lavanderías, los métodos utilizados para preparar la cáscara de huevo se dio un tratamiento térmico a 200 °C, seguido de una molienda y tamizado (200 micras). El ensamblaje del biofiltro se realizó a escala de laboratorio, realizándose pruebas experimentales con muestras de agua residuales, también se midió parámetros físicos y químicos (pH, turbidez, DQO, temperatura y concentración de tensoactivos aniónicos) antes y después del proceso de filtración utilizando el método Spectroquant mediante el análisis colorimétrico de MBAS. Como resultado se obtuvo una eficiencia de adsorción de tensoactivos aniónicos del 67% después de una hora de operación. Aun cuando este biofiltro tuvo una efectividad alta no cumple con los límites máximos establecidos por el AM 097 A, 2025. No obstante, este estudio destacó la importancia de seguir innovando tecnologías para disminuir contaminantes presentes en el agua combinado otros materiales adsorbentes para mejorar la eficiencia el filtro (Ronquillo et al., 2024).

2.2 Fundamentación Legal

La ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua garantiza el derecho humano al agua y regula su gestión integral. Prioriza el uso de agua para consumo humano, riego, caudal ecológico y actividades productivas. Este marco es clave para cualquier iniciativa relacionada con el tratamiento y aprovechamiento del agua (Ministerio del Ambiente, 2014). El reglamento para la Calidad del Agua Potable: Emitido por el

Ministerio de Salud Pública, establece los parámetros de calidad que debe cumplir el agua destinada al consumo humano, incluyendo límites para la dureza del agua (Regulación Agua, 2021). El Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica se encarga de generar políticas con enfoque de sostenibilidad ambiental promoviendo la protección conservación y recuperación de los cuerpos hídricos (Ministerio del Ambiente, 2021). La Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) se enfoca en regular la gestión técnica y operativa de proyectos hídricos, incluyendo permisos y normativas concretas para la calidad y aprovechamiento (ARCA, 2021). El Acuerdo Ministerial del Ministerio de Salud Pública sobre la calidad del agua potable define los estándares técnicos y parámetros de calidad, incluyendo la dureza del agua, para garantizar su aptitud para el consumo humano. Estos estándares sirven como referencia para el diseño y validación del filtro propuesto (Ministerio del Ambiente, 2014).

La Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 1108:2019 establece los parámetros requeridos que debe cumplir al agua para que sea apta para el consumo humano y aplica al agua proveniente de sistemas de abastecimiento, suministrada a través de sistemas de distribución, en la normativa se presentan tablas que contienen límites máximos permisibles que el agua debe cumplir. Se toman en cuenta requisitos físicos, químicos y microbiológicos (Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108, 2020).

El texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), es un decreto ejecutivo que se aplica en el país, los objetivos de esta herramienta ambiental son proteger, preservar y controlar los recursos naturales como agua, aire y suelo; resguardando con esto las interrelaciones de integridad entre seres humanos con el medio ambiente en general (TULSMA, 2017). La Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes: recurso agua se encuentra en el libro VI, Anexo 1, es una norma técnica ambiental en la cual se incluyen tablas para este anexo cuyo objetivo es prevenir y controlar la contaminación del agua. En las primeras tablas se puede observar los criterios de calidad que debe cumplir una fuente hídrica destinada al consumo humano y uso doméstico (Herrera & Quisaguano, 2019).

1.3 Fundamentación Teórica

2.31 Agua

El agua es vital para el desarrollo de la vida y ecosistemas, el 70% de toda la superficie terrestre es agua, la composición química es de dos átomos de hidrogeno y una de oxígeno formando así H₂O, tiene propiedades únicas que lo convierte en un disolvente universal, el agua es indispensable en todos los procesos físicos, químicos y biológicos. A nivel ambiental la calidad y disponibilidad son cruciales en la calidad de vida ya que está estrechamente ligada con la pobreza y salud. En la actualidad el recurso hídrico enfrenta grandes amenazas debido a la sobrexplotación, contaminación y uso irracional generando un desequilibrio para generaciones futuras. Por lo tanto, es imperativo adoptar una actitud responsable hacia su uso y conservación, promoviendo una educación ambiental que fomente la valoración del agua no solo como un recurso, sino como un componente esencial de nuestro planeta y de nuestra existencia (Caycedo & Trujillo, 2020).

2.3.2 Agua de consumo humano

Es fundamental para la salud y bienestar de los seres humanos, siendo indispensable para realizar diferentes actividades diarias, como la preparación y cocción de alimentos, cuidado personal y limpieza del hogar (Parrales et al., 2022).

2.3.3 Contaminación del agua

La contaminación del agua refiere a cualquier alteración en sus parámetros fisicoquímicos y biológicos que inciden en su calidad, pudiendo tener efectos negativos en la salud de la población, pudiendo ser la contaminación de origen natural o antrópico (Guadarrama et al., 2016).

2.3.4 Dureza del agua

Se refiere básicamente a la cantidad de cationes metálicos, principalmente carbonato de calcio y magnesio, disueltos en ella a excepción de los metales alcalinos que contiene, dado que pueden existir en forma de carbonato o bicarbonato. Estos minerales provienen de la interacción del agua con el suelo y las rocas a través de las cuales fluye, entre estos minerales se encuentran el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ba^{2+} y Sr^{2+} . Debido a que la concentración de iones

de Ca^{2+} y Mg^{2+} es elevada en comparación con otros cationes, la dureza del agua se expresa básicamente como $CaCO_3$ (Flores & Machuca, 2017).

2.3.5 Clasificación del agua según su nivel de dureza

El agua se puede clasificar de acuerdo al valor de la dureza total de iones (Ca^{2+} y Mg^{2+}) según lo indica la siguiente tabla:

Tabla 1. Clasificación del agua según tipo de dureza

Tipo de agua	Dureza ($CaCO_3$ mg/L)
Blanda	0-60
Moderadamente dura	61-120
Dura	121-180
Muy dura	>180

Fuente: OMS, (2007)

2.3.6 Efectos del agua dura

El agua dura dentro de su estructura contiene una cantidad considerable de sales de calcio y magnesio puede considerar que afectan a componentes industriales además de hogares, comprendiendo también las incrustaciones que se producen en las tuberías reduciendo la eficiencia energética y aumentan los costos de mantenimiento, interfiere con la acción de jabones y detergentes, aumentando el consumo de estos productos y dejando residuos en la ropa, genera molestias digestivas en personas no habituadas a consumir agua dura, en niveles moderados, mejora el sabor del agua; en exceso, puede resultar desagradable para beber. (Arce, 2017).

2.3.7 Métodos de determinación de la dureza

Existen varias técnicas según diferentes fuentes bibliográficas, una de las más comunes es:

- **Método EDTA o Volumétrico**

Es un método analítico y volumétrico se utiliza para titular una muestra de agua, el pH de la muestra entre 6 y 8 se ajusta con de esta muestra es amortiguado mediante un agente orgánico y una solución de ácido etilendiaminotetraacético y sales de sodio (EDTA) con representación de un colorante que vale como indicador. Las sumatorias de las concentraciones de calcio y magnesio de esta titulación define la dureza del agua (mg/L $CaCO_3$) (Barahona & Córdova, 2019).

2.3.8 Adsorción

Técnica que se basa en una transferencia de masa en la que el adsorbato, presente en una fase líquida o gaseosa, es atraído y acumulado en la superficie de un sólido conocido como adsorbente. Durante el proceso, las especies disueltas en el efluente son transportadas al interior del adsorbente sólido granular por difusión, donde son finalmente retenidas en la superficie interna del adsorbente a través de mecanismos de adsorción física o química. Este proceso continúa hasta que el sólido está casi saturado, y ya no se logra la separación requerida (Luján, 2015).

2.3.9 Tipos de Adsorción

Existen dos tipos de adsorción:

- **Adsorción Física:** actúan las fuerzas de Van der Waals, y la molécula adsorbida, no está en un sitio específico del adsorbente, es por esto por lo que puede trasladarse en la interface, además este tipo de adsorción de produce en una mono o multicapa y el adsorbato mantiene su identidad (Guadarrama et al., 2016).
- **Adsorción Química:** se produce cuando el adsorbato constituye enlaces fuertes en los centros activos del adsorbente, la adsorción de produce en una monocapa y el adsorbato puede modificar su estructura (Guadarrama et al., 2016).

2.3.10 Bioadsorción

Se trata de una alternativa rentable y eficiente para la remoción de contaminantes del agua, en donde se usa bioadsorbentes como son las algas, bacterias, hongos, cáscaras de frutas y semillas, los contaminantes del agua entran en contacto con un biosorbente sólido y se adhieren a la superficie del mismo. Diversos estudios en los últimos años han explorado la potencia de esta tecnología centrándose en la caracterización de residuos orgánicos empleados como adsorbentes gracias a su eficacia, además no requiere un aporte de nutrientes ni enfrenta limitaciones de tipo biológico, la eficiencia de este proceso depende de la concentración del contaminante, el tamaño de las partículas del adsorbente y el pH del medio (Zúñiga, 2022).

2.3.11 Residuos orgánicos como bioadsorbente

- **Cáscara de huevo**

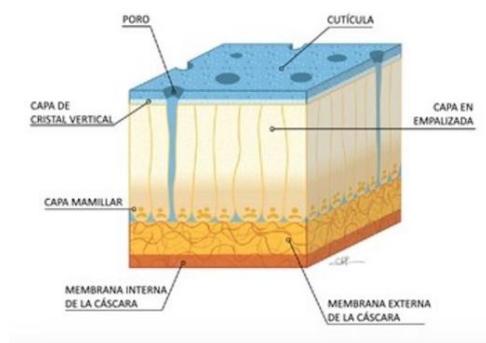
- **Características y estructura de la cáscara de huevo**

El huevo de gallina tiene como nombre científico “*Gallus gallus domestocus*” (Salazar & Valencia, 2021). La cascara de huevo constituye alrededor del 9% al 12% del peso total del huevo, tiene composición predominante mineral y es impermeable al aire y el agua. El carbonato de calcio es su principal componente, forma cristales de calcita, representando más del 90% de su peso. Está compuesta de varias capas: cutícula externa, que actúa como una barrera protectora y una serie de poros microscópicos que facilitan el intercambio gaseoso durante el desarrollo del embrión (Chang, 2020).

- **Composición química de la cascara de huevo**

La cascara de huevo está compuesta por un 95% materia inorgánica, 3,5% de materia orgánica, 2% de proteína, 1,5% de lípidos y azúcares y 1,5% de agua. En ella se diferencian cuatro capas: cutícula, capa esponjosa, capa mamilar y membrana de la cáscara como se muestra en la Figura 1 (Castro, 2021).

Figura 1. Capas de la cascara de huevo



Fuente: Castro, (2021).

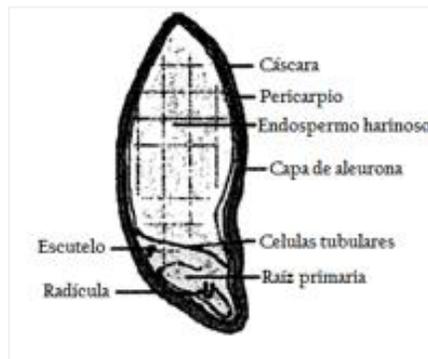
- **Propiedades de adsorción de la cascara de huevo**

Posee propiedades de adsorción que la hacen útil en procesos de purificación y tratamiento del agua. Estudios han demostrado que gracias a su alta porosidad y superficie específica permiten la adsorción de metales pesados, colorantes entre otros reduciendo su concentración (Noluthando et al., 2019).

- **Cascara de cebada**

El consumo de cereales representa un porcentaje considerado en la alimentación alrededor de todo el planeta, mayormente en países en vías de desarrollo, debido su precio económico. Uno de los cereales más producidos en el mundo es la cebada (*Hordeum vulgare*) cultivado principalmente para la producción de alimentos y usado en la industria cervecera, su cascara también conocida como salvado, constituye la parte externa del grano, que rodea el endospermo y el germen en la Figura 2 se observa las partes del grano de cebada (Ramalho et al, 2021).

Figura 2. Partes del grano de cebada



Fuente: Ramalho et al, (2021).

- **Composición química de la cascara de cebada**

Es un material altamente fibroso, con un contenido significativo de celulosa y hemicelulosa, convirtiéndolo en un buen adsorbente. También, contiene proteínas, lípidos y minerales esenciales, como K, Ca y Mg (Mamani, 2017).

- **Propiedades de adsorción de la cascara de cebada**

El uso de cáscara de cebada como adsorbente es muy eficaz en la disminución y eliminación de contaminantes en el agua como metales pesados como el cromo, plomo, cadmio y compuestos orgánicos gracias a su alto contenido en fibra y los compuestos fenólicos (Hassan, y otros, 2023).

2.3.12 Filtración

Es un proceso de separación de coloides y partículas suspendidas en el agua mediante un medio poroso, su finalidad es eliminar microorganismos y partículas no retenidas en etapas

previas como la coagulación y sedimentación, el proceso puede clasificarse según la velocidad de filtración lenta o rápida, el tipo de medio filtrante poroso o particulados, la dirección del flujo descendente o ascendente y el mecanismo de generación del flujo (Cánepa, 2010).

2.3.13 Biofiltros

Es una alternativa sencilla para el tratamiento de agua, son materiales lignocelulósicos que se componen de celulosa, hemicelulosa y lignina como la cascara de cebada, arroz, trigo entre otros que destacan por su capacidad de retención de contaminantes, compuesto por capas de materiales orgánicos e inorgánicos (Garzón, 2012).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la investigación

La investigación es mixta ya que posee un enfoque cuantitativo debido a que, se realizó pruebas experimentales y se combinó factores como granulometría, proporciones y tiempos de contacto, además se midió la concentración inicial y final de la dureza en el agua de consumo humano, lo que ayudará a indicar el porcentaje de reducción de dureza del agua alcanzado en el proceso de adsorción, en cuanto al enfoque es esencial para medir y validar la efectividad del filtro el cual de diseño a escala de laboratorio, este enfoque permite obtener resultados numéricos que respalden las conclusiones

3.2 Diseño de la investigación

El estudio se realizó empleando un enfoque bibliográfico debido a que se procedió a realizar la fundamentación y descripción teórica del tema, con base en libros, artículos, tesis entre otros. También se llevó a cabo mediante una investigación experimental, en el cual se realizaron pruebas experimentales en los laboratorios de la UNACH donde se diseñó y validó la eficiencia del filtro para el tratamiento de disminución de la dureza del agua mediante la combinación dos bioadsorbentes: las cáscaras de huevo y cebada a diferentes granulometrías, proporciones adecuadas y bajo distintos tiempos de contacto, para así obtener los resultados correspondientes.

3.2.1 Variables

- **Variables independientes**
 - Filtro a base cáscaras de huevo y cebada
- **Variables dependientes**
 - Disminución de la dureza

3.2.2 Tratamientos

Se diseñaron cinco prototipos de filtros utilizando residuos orgánicos como son las cáscaras de huevo y cáscaras de cebada a diferentes tamaños de partícula (granulometría) $<850 \mu\text{m}$ y

850 a 2000 μm y a diferentes proporciones. A continuación, en la Tabla 2 se puede observar los prototipos de filtros a diferentes proporciones de las cáscaras de huevo y cebada, cuyas mismas proporciones van a ser utilizadas para los diferentes tamaños de partículas:

Tabla 2. Proporciones de cáscaras de huevo y cebada para los tratamientos

Prototipos de filtros	Porcentaje de dosificación del bioadsorbente	Aplicabilidad
P1	100% cáscaras de huevo	1 capa de 200 g de cáscaras de huevo
P2	100% cáscaras de cebada	1 capa de 200 g de cáscaras de cebada
P3	50% cáscaras de huevo y 50% cáscaras de cebada	1 capa de 100 g de cáscaras de huevo y 1 capa de 100 g de cáscaras de cebada
P4	75% cáscaras de huevo 25% cáscaras de cebada	1 capa de 150 g de cáscaras de huevo y 1 capa de 50 g de cáscaras de cebada
P5	25% cáscaras de huevo 75% cáscaras de cebada	1 capa de 50 g de cáscaras de huevo y 1 capa de 150 g de cáscaras de cebada

Fuente: Autora

3.3 Tipo de investigación

Esta investigación adopta un enfoque práctico en base a la naturaleza de la información, llevando a cabo pruebas experimentales con diferentes variables en el laboratorio de Ciencias Químicas, Servicios Ambientales y Calidad del Suelo de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH). El estudio buscó diseñar un filtro a partir de residuos orgánicos utilizados como bioadsorbentes como son: las cáscaras de huevo y cebada para disminuir la dureza del agua gracias a su capacidad de adsorción.

3.4 Técnicas e instrumentos de muestreo y recolección de datos

Las técnicas que se utilizaron en este estudio fueron las siguientes:

- **Revisión documental**

Consistió en la consulta de distintas fuentes bibliográficas, incluyendo tesis, libros, artículos científicos, informes técnicos. Esta investigación se centró en temática clave, como la dureza

del agua, adsorción, residuos orgánicos como bioadsorbentes entre otros. Para garantizar la selección de información relevante, se utilizaron varias técnicas, como la revisión de investigaciones previas, elaboración de resúmenes y análisis crítico, para facilitar la posterior organización de información recolectada.

- **Técnicas de observación directa**

A través del montaje de experimentos en el laboratorio, durante estos ensayos se aplicó la observación directa de la dureza del agua con filtros a base de cáscaras de huevo y cebada realizados en la parte experimental, esto proporcionó datos que finalmente se tabularon, realizando un análisis comparativo con cada representación gráfica del proceso de filtración.

- **Análisis de datos**

La información recopilada permitió caracterizar a los materiales filtrantes, determinar la granulometría, sus propiedades físico químicas, entre otros factores. Se identificó cual es el material filtrante con mayor capacidad para retener iones de calcio y magnesio en diferente granulometría, finalmente se realizó varias gráficas en donde sus interpretaciones permitieron obtener conclusiones con fundamentos sobre el material absorbente.

3.5 Materiales, reactivos y equipos

En el desarrollo de este proyecto de investigación se emplearon diversos materiales, muestras, reactivos y equipos, cada uno de estos elementos desempeña un papel fundamental en las distintas etapas del estudio, desde la preparación del material orgánico hasta el diseño del filtro.

- **Materiales**

- Muestra de agua de consumo
- Cáscaras de huevo
- Cáscaras de cebada
- Tamices
- Bandejas de aluminio
- Piseta
- Bureta
- Vasos de precipitación

- Peras de succión
- Pipeta
- Espátula
- Crisoles
- Soportes universales
- Morteros
- **Reactivos**
 - EDTA (Ácido etilendiaminotetraacético)
 - Buffer de dureza
 - Indicador Eriochrome Black T
 - Agua destilada
- **Equipos**
 - Horno de secado por aire forzado BOV-VF
 - Estufa de calentamiento
 - Balanza analítica
 - Molino
 - pH metro
 - Conductímetro

3.6 Preparación del material orgánico

Antes de proceder a caracterizar e implementar la cáscara de huevo y las cáscaras de cebada para diseñar el filtro, fue necesario realizar el siguiente procedimiento. Este proceso tuvo como objetivo eliminar impurezas, elementos extraños y otros compuestos que pudieran interferir en la eficiencia del sistema de filtración. De esta manera se garantizó que los materiales orgánicos utilizados estuvieran en condiciones óptimas para su correcto funcionamiento en el tratamiento para la disminución de dureza del agua de consumo.

3.6.1 Cáscara de huevo

La preparación de este material orgánico para el diseño del filtro se llevó a cabo mediante la metodología descrita a continuación:

1. **Limpieza:** Se lavó las cáscaras de huevo recolectadas con agua de llave para eliminar residuos de yema, claras y otras impurezas superficiales, posteriormente se lavó con agua destilada para remover impurezas solubles y evitar que se depositen sales o minerales adicionales que pueden interferir en el proceso de adsorción además también con este paso se garantiza la pureza del material (Calvache, 2022).

Figura 3. Lavado de las cáscaras de huevo con agua de llave y agua destilada



Fuente: Autora

2. **Secado inicial:** Posterior de lavar las cascaras se dejó secar a temperatura ambiente sobre una superficie limpia por 12 horas aproximadamente, para evitar que el exceso de agua se evapore antes de la exposición temperaturas más altas, luego las cáscaras de huevo se colocaron en una bandeja de aluminio la cual se llevó al horno de secado por aire forzado BOV-VF a una temperatura de 60°C por 24 horas (Calvache, 2022).

Figura 4. Secado inicial de las cáscaras de huevo



Fuente: Autora

3. **Triturado:** Las cáscaras se trituraron en el mortero hasta que se obtuvo partículas de tamaño homogéneo. La reducción de tamaño de partícula es importante debido a que incrementa la superficie específica del material, mejorando su capacidad de adsorción.

Figura 5. Triturado de las cáscaras de huevo



Fuente: Autora

4. **Tamizado:** Se emplea una técnica de cernido y se fracciona el material por medio de tamices Humbolt número 10 y 20 hasta obtener las cáscaras de huevo a diferentes tamaños de < 850 y 850 a $2000 \mu\text{m}$.

Figura 6. Tamizado de las cáscaras de huevo



Fuente: Autora

5. **Secado final:** Se llevó las cáscaras a una estufa de secado BIOBASE BOV-VF a una temperatura de 200°C durante 2 horas, esto con el fin de modificar la estructura de las cáscaras de huevo, es decir su superficie y poros aumentando su capacidad de adsorción debido a que el calentamiento es controlado y uniforme (Ronquillo et al. 2024).

Figura 7. Secado final de las cáscaras de huevo tamizadas



Fuente: Autora

6. **Almacenamiento:** Finalmente, se recoge el contenido y se guardó en recipientes herméticos de plástico.

Figura 8. Cáscaras de huevo almacenadas en un recipiente plástico hermético



Fuente: Autora

3.6.2 Cáscara de cebada

A continuación, se detalla el procedimiento paso a paso para la adecuación de este residuo orgánico:

1. **Limpieza:** Se sumergió las cáscaras de cebada en agua destilada y se agito suavemente para eliminar impurezas adheridas. Luego se deja escurrir el agua de las cáscaras para lo cual se colocaron sobre una bandeja y se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas.

Figura 9. Lavado de las cáscaras de cebada con agua de llave y destilada



Fuente: Autora

2. **Secado inicial:** Se colocaron las cáscaras en una bandeja de aluminio y se llevó a un horno de secado por aire forzado BOV-VF a una temperatura 90° por 15 horas, con el fin de evitar correr el riesgo de degradar la estructura de la celulosa y reducir la porosidad del material (Álvarez, 2023).

Figura 10. Secado inicial de las cáscaras de cebada



Fuente: Autora

- 3. Molienda:** Se molió las cáscaras de cebada en el molino de granos manual granos manuales de tolva baja de hierro fundido hasta que se obtuvo partículas de tamaño homogéneo. La reducción de tamaño de partícula es importante debido a que incrementa la superficie específica del material, mejorando su capacidad de adsorción.

Figura 11. Molienda de las cáscaras de cebada



Fuente: Autora

- 4. Tamizado:** Se empleó una técnica de cernido y se fraccionó el material por medio de tamices número 10 y 20. El material resultante fue sometido a tamizado mediante el equipo tamiz BIOBASE modelo BK-TS200, el cual agitó alrededor de 3 minutos cada carga hasta obtener el material clasificado en los siguientes tamaños < 850 y 850 a $2000 \mu\text{m}$.

Figura 12. Tamizado de las muestras de cáscaras de cebada



Fuente: Autora

- 5. Almacenamiento:** Finalmente se guardó el material granulado en recipientes herméticos de plástico.

Figura 13. Cáscaras de cebada almacenadas en un recipiente plástico hermético



Fuente: Autora

3.7 Caracterización fisicoquímica de las cáscaras de huevo y cebada

Para evaluar las propiedades fisicoquímicas de las cáscaras de huevo y cebada previamente tratadas, es importantes determinar parámetros como el pH, conductividad eléctrica, porcentaje de humedad y porosidad la cual se obtiene a partir de determinar la densidad aparente y real del bioadsorbente (cáscaras de huevo y cebada). A continuación, se detalla el procedimiento para cada una de estas mediciones.

3.7.1 Determinación del pH y conductividad

- **Peso de la muestra:** Se tomó 5 gramos del material previamente preparado.
- **Disolución:** En un vaso de precipitación se puso 50 mililitros de agua destilada y luego se añadió los 5 gramos de la muestra.
- **Agitación:** Se mezcló la solución utilizando una varilla de vidrio hasta que se obtuvo una solución homogénea.

- **Medición pH:** Se introdujo el electrodo del pH-metro en la suspensión preparada y se registró el valor cuando la lectura se estabilizó.
- **Medición conductividad eléctrica:** Se sumergió la celda del conductímetro en la misma suspensión utilizada para la medición anterior y posterior se registró el valor (Calvache, 2022).

3.7.2 Determinación del porcentaje de humedad

- **Peso inicial:** Se pesó un crisol para conocer el peso de este, luego se colocó 5 gramos de la muestra en el crisol.
- **Secado:** Se colocó el crisol con la muestra en una estufa a 70°C por 24 horas aproximadamente.
- **Enfriado:** Después del secado, se llevó el crisol con la muestra a un desecador para que se enfriara a temperatura ambiente, evitando la adsorción de humedad.
- **Peso final:** Una vez que la muestra estuvo fría, se pesó nuevamente.

Para calcular el contenido de humedad se aplicó la Ecuación 4:

$$\%Humedad = \left(\frac{P1-P2}{P1-P} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

P: cápsula vacía

P1: cápsula + material húmedo

P2: cápsula + materia seca (Sanchez & Sedado, 2023).

3.7.3 Determinación aparente y real

Para calcular la densidad aparente se realizó el siguiente proceso:

- **Método de la probeta:** Se pesó 200gr de la muestra y se colocó en una probeta vacía, después se distribuye homogéneamente la muestra y se aplica la Ecuación 5:

$$\delta A = \frac{(m_{probeta+masa}) - m_{probeta\ vacia}}{Vol} \quad (5)$$

Donde:

Vol: Es el volumen total que ocupó la muestra dentro de la probeta (Sanchez & Sedado, 2023).

La densidad real se calculó mediante el siguiente proceso:

- **Método del picnómetro:** Se pesó el picnómetro(p) vacío en una balanza de precisión y se anotó su masa (m_p), después se añadió 0,5 gr de la muestra(mu) y se anotó su masa en conjunto (m_{p+mu}), luego se completó el llenado con agua y enrasar (llenarlo completamente), se anotó la masa (m_{p+mu+a}). Finalmente se llenó el picnómetro de agua y enrasar se pesó y se anotó su masa (m_a).

Para calcular la masa de agua desplazada (m) se usa la Ecuación 6:

$$m = m_{p+a} - (m_{p+mu+a} - (m_{p+a} - m_p)) \quad (6)$$

Una vez determinada m, se calcula el volumen ocupado por la muestra (V_{real}) según la Ecuación 7:

$$V_{real} = \frac{m}{\delta_{agua}} \quad (7)$$

Finalmente, se calcula la densidad real dividiendo la masa de la muestra entre el volumen real del mismo ($m_{p+mu} - m_p$) utilizando la Ecuación 8. El método del picnómetro permitió el cálculo de la densidad real de las muestras (cáscaras de huevo y cebada) a través de la determinación de la masa del agua desplazada por el arroz (Atarés, 2016).

$$\delta R = \frac{m_{p+mu} - m_p}{V_{real}} \quad (8)$$

3.7.4 Porosidad

Permite determinar la capacidad de almacenamiento o absorción de la dureza del agua, se usó la Ecuación 9:

$$\varepsilon = \frac{\delta R - \delta A}{\delta R} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

δR : Densidad real

δA : Densidad aparente

3.8 Determinación de la dureza total del agua

Se sigue el siguiente procedimiento:

- Colocar 3 ml de la muestra en un vaso de precipitación de 50 ml
- Agregar 2 gotas de buffer pH 10
- Añadir la cantidad almacenada en la punta de la espátula (mínima cantidad)
- Titular con EDTA (sal disódica) 0,01N hasta el viraje de morado a azul.

3.9 Activación de las cáscaras huevo con Hidróxido de Sodio (NaOH)

Para activar las cáscaras huevo se preparó una solución diluida de NaOH (0,01 N). En varios recipientes se añade la solución y se coloca las cáscaras huevo en proporciones iguales por separado, después se lleva a un agitador magnético por 3 horas, finalmente se enjuaga las cascaras con agua destilada para eliminar el exceso de la base y se coloca en el horno a 105°C por 2 horas.

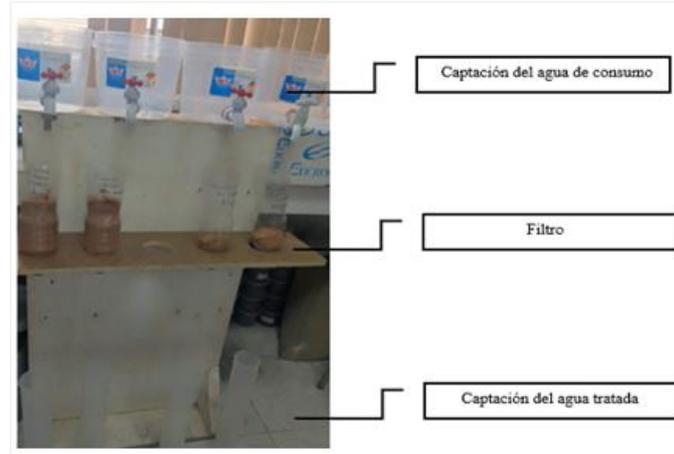
3.10 Diseño del filtro a base de cáscaras de huevo y cáscaras de cebada

Para el diseño de los filtros se usó como soporte una estructura de madera de 1 metro de altura aproximadamente. El prototipo constó de 4 baldes de suministro colocados uno al lado del otro en la parte superior del soporte de madera cada uno poseía una llave de paso para regular el caudal del agua, en la parte media de colocaron cuatro recipientes de plástico en los que se añadió las cascaras de huevo y cebada a diferentes proporciones como se describe en la Tabla 2 finalmente en la parte inferior de coloco cuatro recipientes para recolectar el agua tratada.

Una vez que el prototipo de filtro esté listo, se procede a trabajar con las diferentes granulometrías (<850 y 850 a 2000 μm), y a diferentes proporciones de las cáscaras de huevo y cebada como se puede observar en la Tabla 2.

En la Figura 14, se muestra el montaje del prototipo de filtro:

Figura 14. Montaje del prototipo de filtro



Fuente: Autora

- **Diseño de los prototipos de filtros a escala a base de cáscaras de huevo y cebada**

Para el diseño del filtro se empleó una botella plástica para cada prueba con los diferentes tamaño de partículas y proporciones a trabajar, según las especificaciones de la Tabla 3 y su proporción correspondiente a la Tabla 2.

Tabla 3. Dimensión del filtro

Dimensión del filtro	
Estructura	Botella plástica
Altura (h)	30 cm
Diámetro (D)	7 cm
Volumen (V)	1000 cm ³

Fuente: Autora

En la Figura 15 se muestra el montaje del material filtrante de cáscaras de cebada y cáscaras de huevo con un tamaño de partículas <850 y 850 a 2000 μm , y con una proporción de 200 gramos respectivamente.

Figura 15. Medio filtrante de cáscaras de cebada 200g y cáscaras de huevo 200g



Fuente: Autora

A continuación, se muestra los prototipos de filtros a diferente tamaño de partícula (<850 y 850 a 2000 μm) y a diferentes proporciones, cabe resaltar que la posición de las cáscaras de huevo se encuentran en la parte inferior y las cáscaras de cebada en la parte superior en todas las pruebas:

- **Filtros a base de cáscaras de huevo 100% (200g).**

En la Tabla 4, se detallan los materiales empleados y medidas respectivas para la elaboración de los prototipos de filtros que estuvo constituido por una capa de 2, 40 cm de cáscaras de huevo para un tamaño de partícula de < 850 μm , y para el tamaño de partícula de 850 a 2000 μm una capa de 2.90 cm.

Tabla 4. Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de huevo 200g

Materiales	Medidas del material
2 botellas plásticas	30 cm
Cáscaras de huevo	2, 40 cm (<850 μm) 2,90 cm (850 a 2000 μm)

Fuente: Autora

En la Figura 16 se puede observar el prototipo de filtro a base de cáscara de huevo 100% (200g) con tamaño de partícula <850 μm y 850 a 2000 μm .

Figura 16. Prototipo de filtro a base de cáscara de huevo 100% (200g), tamaño de partícula <math><850\ \mu\text{m}</math> y 850 a 2000 $\mu\text{m}</math>$



Fuente: Autora

- **Filtro a base de cáscaras de cebada 100% (200g).**

En la Tabla 5, se detallan los materiales empleados y medidas respectivas para la elaboración de los prototipos de filtros que estuvo constituido por una capa de 13,10 cm de cáscaras de huevo para un tamaño de partícula de <math><850\ \mu\text{m}</math>, y para el tamaño de partícula de 850 a 2000 $\mu\text{m}</math> una capa de 13.90 cm.$

Tabla 5. Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 200g

Materiales	Medidas del material
Botella plástica	30 cm
Cáscaras de cebada	13,10 cm (<math><850\ \mu\text{m}</math>)
	13.90 cm (850 a 2000 $\mu\text{m}</math>)$

Fuente: Autora

En la Figura 17 se puede observar el prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 100% (200g) con tamaño de partícula <math><850\ \mu\text{m}</math> y 850 a 2000 $\mu\text{m}</math>.$

Figura 17. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 100% (200g), tamaño de partícula <850 μm y 850 a 2000 μm



Fuente: Autora

- **Filtro a base de cascara de huevo 50% (100g) y cáscara de cebada 50%(100g)**

En la Tabla 6, se detallan los materiales empleados y medidas respectivas para la elaboración de los prototipos de filtros que estuvo constituido por una capa de 6.55 cm de cáscaras de cebada para un tamaño de partícula de < 850 μm , y para la cascara de huevo < 850 μm una capa de 1.20 cm.

Tabla 6: Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 100g y cáscaras de huevo 100g

Materiales	Medidas del material
Botella plástica	30 cm
Cáscaras de cebada	6.55 cm (<850 μm)
Cáscaras de huevo	1, 20 cm (<850 μm)

Fuente: Autora

En la Figura 18 se puede observar el prototipo de filtro a base de cáscara de huevo 50% (100g) con tamaño de partícula <850 μm y cascara de cebada 50% (100g) con tamaño de partícula < 850 μm .

Figura 18. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 50% (100g) y cáscara de huevo 50% (100g), tamaño de partícula < 850 μm



Fuente: Autora

- **Filtro a base de cascara de huevo 75% (150g) y cáscara de cebada 25% (50g)**

En la Tabla 7, se detallan los materiales empleados y medidas respectivas para la elaboración de los prototipos de filtros que estuvo constituido por una capa de 3.27 cm de cáscaras de cebada para un tamaño de partícula de < 850 μm , y para la cascara de huevo < 850 μm una capa de 1.80 cm.

Tabla 7: Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 150g y cáscaras de huevo 50g

Materiales	Medidas del material
Botella plástica	30 cm
Cáscaras de cebada	3.27 cm (<850 μm)
Cáscaras de huevo	1, 80 cm (<850 μm)

Fuente: Autora

En la Figura 19 se puede observar el prototipo de filtro a base de cáscara de huevo 75% (150g) con tamaño de partícula <850 μm y cascara de cebada 25% (50g) con tamaño de partícula < 850 μm .

Figura 19. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 25% (50g) y cáscara de huevo 75%(150g), tamaño de partícula < 850 μm



Fuente: Autora

- **Filtro a base de cascara de huevo 25% (50g) y cáscara de cebada 75%(150g)**

En la Tabla 8, se detallan los materiales empleados y medidas respectivas para la elaboración de los prototipos de filtros que estuvo constituido por una capa de 9.8 cm de cáscaras de cebada para un tamaño de partícula de < 850 μm , y para la cascara de huevo < 850 μm una capa de 0.6 cm.

Tabla 8: Materiales empleados en el diseño del prototipo de filtro a base de cáscaras de cebada 25g y cáscaras de huevo 150g

Materiales	Medidas del material
Botella plástica	30 cm
Cáscaras de cebada	9.8 cm (<850 μm)
Cascara de huevo	0.6 cm (<850 μm)

Fuente: Autora

En la Figura 19 se puede observar el prototipo de filtro a base de cáscara de huevo 25% (50g) con tamaño de partícula <850 μm y cascara de cebada 75%(150g) con tamaño de partícula < 850 μm .

Figura 20. Prototipo de filtro a base de cáscara de cebada 75% (150g) y cáscara de huevo 25% (25g), tamaño de partícula < 850 μm



Fuente: Autora

- **Determinación de la eficiencia de la disminución de la dureza del agua de consumo**

Para obtener la disminución de la concentración de la dureza en el agua (%), se aplica la siguiente Ecuación 10:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{final}} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

$C_{inicial}$: Concentración inicial de la dureza del agua

C_{final} : Concentración final de la dureza del agua después de pasar por el filtro.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de Resultados

4.1 Propiedades fisicoquímicas de las cáscaras de huevo y las cáscaras de cebada

Para diseñar el filtro a partir de las cáscaras de huevo y cebada, se realizó la caracterización fisicoquímica de las mismas, ya que estas propiedades pueden influir en la eficiencia de adsorción, capacidad de retención de contaminantes y la interacción del material con el agua. Determinar el pH del bioadsorbente que se va utilizar para el filtro es importante ya que un pH ácido es mejor para los procesos de adsorción (Calvache, 2022). La conductividad indica la cantidad de iones solubles presentes en las cáscaras, una conductividad alta indica la presencia de sales residuales que pueden afectar la calidad del agua tratada. También es importante que las cáscaras no tengan un porcentaje de humedad alto, debido a que afecta el proceso de adsorción (Verdugo, 2017).

Cuando las densidades aparentes son altas es un buen indicador, debido a que permiten el empaquetamiento de una cantidad de sólido con un volumen menor en una columna de material, la porosidad determina el área superficial disponible para la retención de contaminantes (Verdugo, 2017).

A continuación, en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en el presente trabajo:

Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas de la muestra

Parámetro	Cáscaras de huevo <850 μm	Cáscaras de huevo 850 a 2000 μm	Cáscaras de cebada <850 μm	Cáscaras de cebada 850 a 2000 μm
pH	8,98	9,05	6,25	6,28
Conductividad (us/cm)	81,7	81,2	712	672
Humedad (%)	0,099	0,099	3,47	3,47
Densidad real (g/cm ³)	2,2	2,7	1,3	1,2
Densidad aparente (g/cm ³)	0,95	1,05	0,6	0,5
Porosidad (%)	56	61	53	58

Fuente: Autora

EL potencial hidrogeno pH de la cáscara de huevo es alcalino, similar al estudio de Calvache (2022) que obtuvo un pH de 8,86 para el material previamente tratado. El pH alcalino favorece a la precipitación de iones de calcio y magnesio. Respecto al pH de la cebada se obtuvo un pH neutro a ligeramente ácido de 6,25 a 6,28 similar a los resultados de Mamani (2017) que obtuvo un valor de 6,27; no favorece a la precipitación de iones, pero puede adsorber algunos iones de calcio y magnesio. Respecto a la conductividad de la cáscara de huevo el resultado obtenido fue diferente al estudio de Calvache (2022), quien obtuvo una conductividad de 140,4; pero cabe recalcar que nuestros valores se mantienen bajos es decir que libera pocos iones en el agua, lo que es beneficioso para mantener la calidad de agua. La densidad real y aparente de las cáscaras de huevo y cebada se utilizaron para determinar la porosidad del dicho material obteniéndose como resultado que tanto la cáscara de huevo y cebada de tamaño de partícula de 850 a 200 μm tiene mayor porosidad, lo que permitió un mayor flujo de agua pero el tamaño de partícula $<850 \mu\text{m}$ posee una mayor retención de iones de calcio y magnesio a pesar de que su porosidad es menor a la del tamaño de partícula ya antes mencionado, esto debido a que es considerado un buen material si la porosidad se encuentra entre el 30 y 50 %.

4.2 Evaluación de los prototipos filtro a base de cáscaras de huevo y cebada para la disminución de la dureza del agua

Para la evaluación de los filtros se tomó en cuenta el parámetro dureza, también registro el tiempo en el que el agua filtrada tarda en salir de los filtros, donde cabe indicar que para cada filtro se pudo filtrar 1 litro de agua en un tiempo de 15,30,45,60,75,90,105, 120 y 180 minutos por prototipo de filtro. Luego el agua filtrada se la receptó en recipientes colocados debajo del filtro.

A continuación, se pude observar todos los resultados obtenidos después de cada proceso de filtración de agua para conocer el porcentaje de disminución de la dureza:

4.2.1 Porcentajes de remoción y determinación de los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos después de filtrar el agua de consumo de la ciudad de Riobamba, la cual presentaba una dureza inicial del agua es de 467 mg/L CaCO_3 .

- **Filtro a base de cáscara de cebada 100% (200g)**

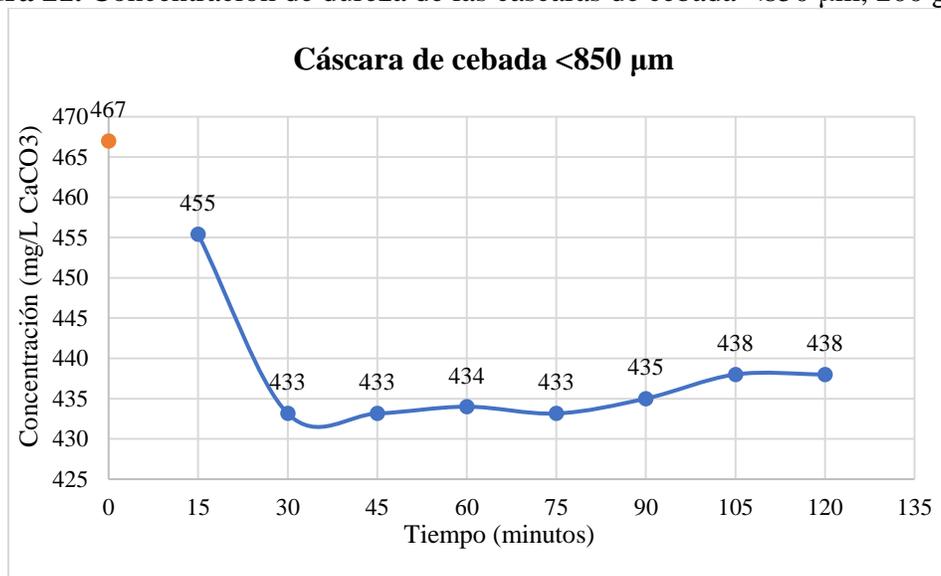
Como se puede observar en la Tabla 10 y en Figura 23 la concentración inicial de la dureza del agua es 467 mg/L CaCO₃, al realizar el filtrado con las cáscaras de cebada previamente preparadas con un tamaño de partícula <850 µm después de 30 minutos se puede evidenciar que esta dureza disminuyó a 433 mg/L y este valor se mantiene constante hasta los 45 minutos, después de este tiempo esta concentración aumenta a 434 mg/L específicamente a los 60 minutos, finalmente a los 105 minutos y 120 minutos se observa que la concentración de dureza se mantiene en 438 mg/L, siendo estos valores menores que la concentración inicial del agua.

Tabla 10 . Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula <850 µm

Tiempo (min)	Concentración CaCO ₃ mg/L
0	467
15	455
30	433
45	433
60	434
75	433
90	435
105	438
120	438

Fuente: Autora

Figura 21. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada <850 µm, 200 gramos



Fuente: Autora

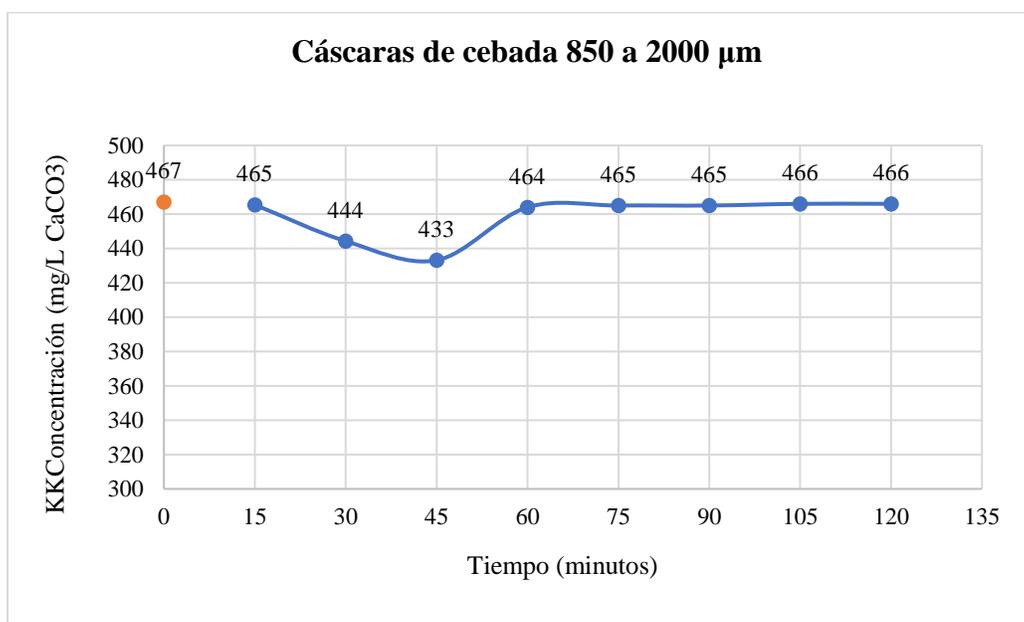
Por otro lado, como se observa en la Tabla 11 y Figura 24 al realizar el filtrado con las cáscaras de cebada previamente preparadas con un tamaño de partícula 850 a 2000 μm después de 30 minutos se puede evidenciar que esta dureza disminuyo en promedio de 444 mg/L a 433 mg/L en un tiempo de 30 y 45 minutos, en cambio a los 60 minutos este valor sube levemente a 464 mg/L, y después de 75 minutos hasta llegar a los 120 minutos este valor sube hasta 466 mg/L y se mantiene constante.

Tabla 11. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula 850 a 2000 μm

Tiempo (min)	Concentración CaCO_3 mg/L
0	467
15	465
30	444
45	433
60	464
75	465
90	465
105	466
120	466

Fuente: Autora

Figura 22. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada 850 a 2000 μm , 200 gramos



Fuente: Autora

Con esto podemos evidenciar que la cáscara de cebada de tamaño de partícula < 850 μm adsorbe mejor que el tamaño de partícula de 850 a 2000 μm , esto debido a que la porosidad es mayor en el segundo caso lo que ocasiona que el agua fluya rápidamente por los espacios porosos por lo tanto su capacidad de adsorción es baja en comparación con el tamaño de partícula <850 μm el cual si adsorbe de mejor manera la dureza del agua de consumo, por lo cual para utilizar en diferentes proporciones las cáscaras de cebada se optó por trabajar con el tamaño de partícula < 850 μm .

- Filtro a base de cáscara de huevo 100% (200g)

Para el montaje de este filtro cabe recalcar que las cáscaras de huevo fueron activadas con NaOH debido a que, a pesar de la preparación previa de este material, la capacidad de adsorción fue nula.

Como se puede evidenciar en la Tabla 12 y la Figura 25 la concentración inicial es de 467 mg/L, pasado 15 minutos hasta los 90 minutos se puede observar que la concentración de dureza disminuye en un promedio de 434 mg/L hasta 430 mg/L. Mientras tanto desde los 105 minutos hasta completar los 180 minutos se observa que la dureza baja hasta 416 mg/L

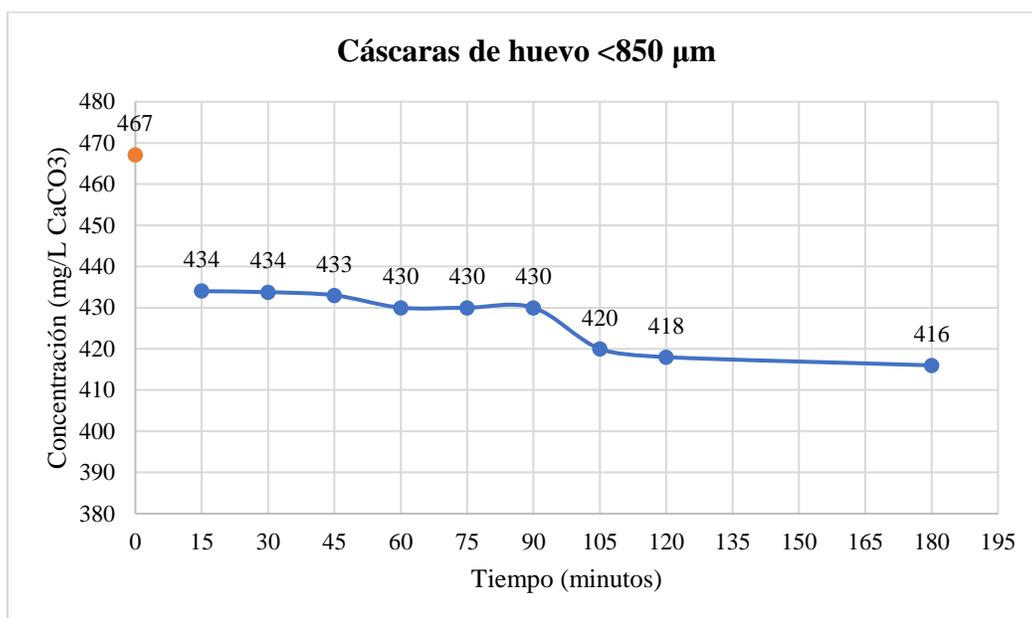
Tabla 12. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula

<850 μm

Tiempo (min)	Concentración CaCO₃ mg/L
0	467
15	434
30	434
45	433
60	430
75	430
90	430
105	420
120	418
180	416

Fuente: Autora

Figura 23. Concentración de dureza de las cáscaras de huevo <850 μm , 200 gramos



Fuente: Autora

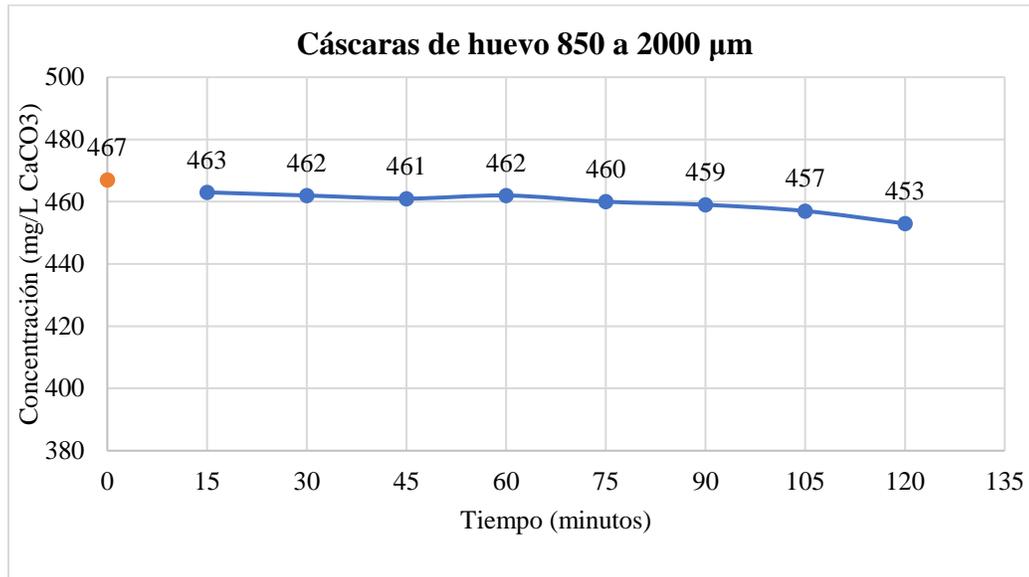
Como se puede evidenciar en la Tabla 13 y la Figura 26, se inicia con una concentración inicial de 467 mg/L, y para este tamaño de partícula se observa que no existe una buena capacidad de adsorción debido a que en un tiempo de 15 minutos hasta llegar a los 180 minutos existe una disminución de dureza del agua de consumo en un promedio de 463 mg/L a 453 mg/L.

Tabla 13. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula 850 a 2000 μm

Tiempo (min)	Concentración CaCO ₃ mg/L
0	467
15	463
30	462
45	461
60	462
75	460
90	459
105	457
120	453

Fuente: Autora

Figura 24. Concentración de dureza de las cáscaras de huevo 850 a 2000 μm , 200 gramos



Fuente: Autora

Por lo tanto, al igual que el caso de la cebada se procedió a trabajar con el tamaño de partícula $< 850 \mu\text{m}$, debido a que este presenta mayor capacidad de adsorción de dureza del agua.

- Filtro a base de cascara de huevo 50% (100g) y cáscara de cebada 50% (100g)

Al usar el filtro combinado con 100 gramos cáscaras de cebada y 100 gramos de cáscaras de huevo se puede observar en la Tabla 14 y en la Figura 27 que de 15 a 30 minutos la dureza del agua disminuye de 467 mg/L a 450 mg/L, de 45 a 120 minutos de observa una disminución de dureza que va en un promedio de 449 a 438 mg/L, y a los 180 minutos se obtiene una disminución a 430 mg/L.

Tabla 14. Concentración final de la dureza de la cáscara de cebada de tamaño de partícula

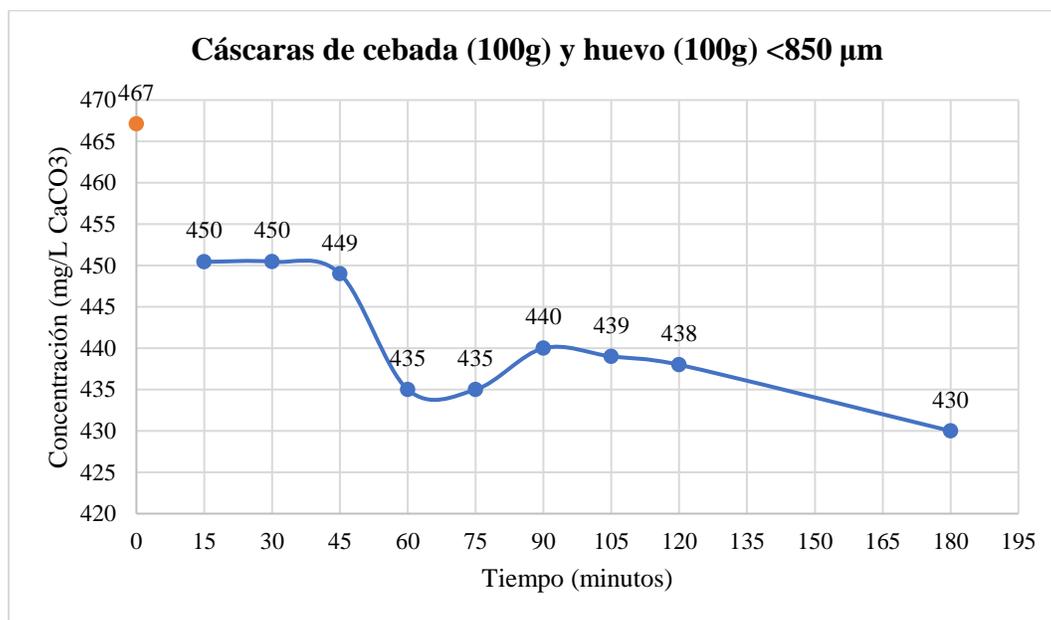
$< 850 \mu\text{m}$

Tiempo (min)	Concentración CaCO ₃ mg/L
0	467
15	450
30	450
45	449
60	435
75	435

90	440
105	439
120	438
180	430

Fuente: Autora

Figura 25. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada (100 g) y huevo (100 g) de tamaño de partícula <850 µm



Fuente: Autora

- **Filtro a base de cascara de huevo 75% (150 g) y cáscara de cebada 25% (50 g)**

Al usar el filtro combinado con 150 gramos cáscaras de cebada y 50 gramos de cáscaras de huevo se puede observar en la Tabla 15 y en la Figura 28 que de 15 a 120 minutos la dureza del agua disminuye en promedio 411 mg/L a 384 mg/L y a los 180 minutos se obtiene una disminución a 384 mg/L.

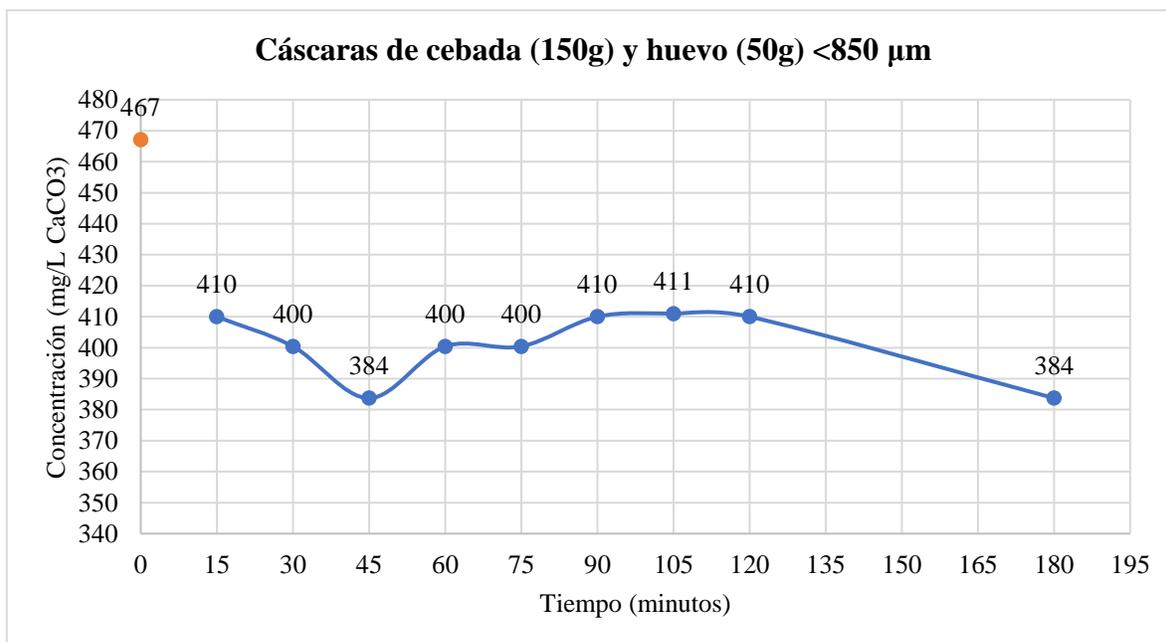
Tabla 15. Concentración final de la dureza de las cáscaras de cebada (150 g) y huevo (50 g) de tamaño de partícula <850 µm

Tiempo (min)	Concentración CaCO ₃ mg/L
0	467
15	410
30	400
45	384
60	400

75	400
90	410
105	411
120	410
180	384

Fuente: Autora

Figura 26. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada (150 g) y huevo (50 g) de tamaño de partícula <850 µm



Fuente: Autora

- **Filtro a base de cascara de huevo 25% (50 g) y cáscara de cebada 75% (150 g)**

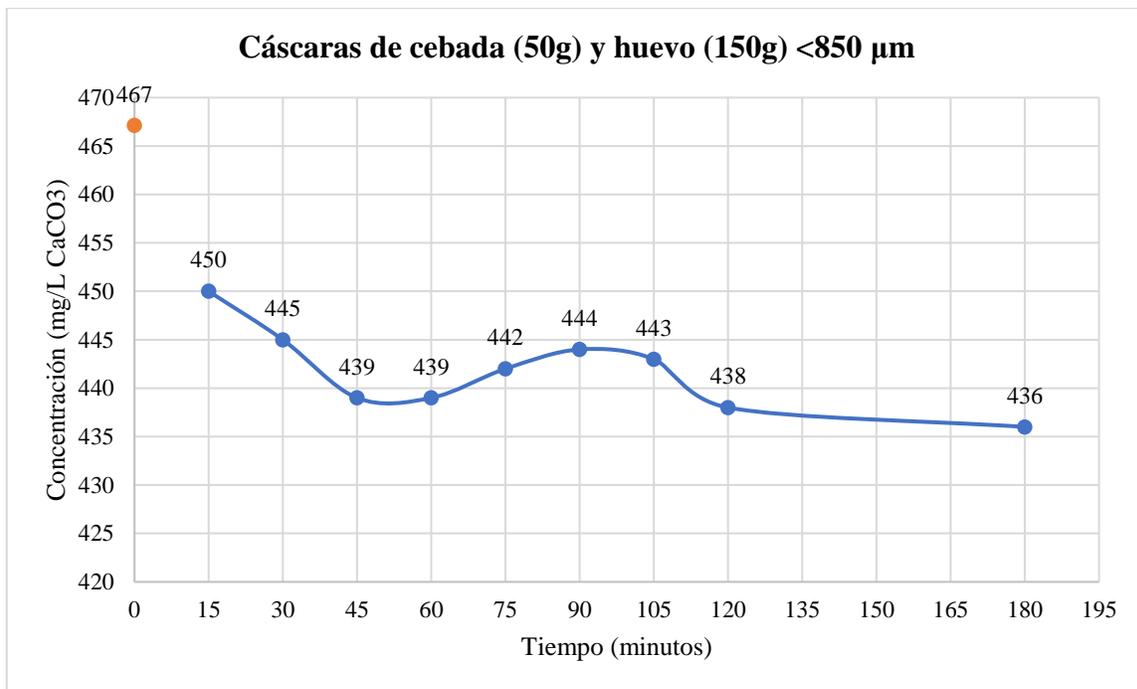
Al usar el filtro combinado con 50 gramos cáscaras de cebada y 150 gramos de cáscaras de huevo se puede observar en la Tabla 16 y en la Figura 29 que de 15 a 30 minutos la dureza del agua disminuye a 450 mg/L y 445 mg/L respectivamente y de 45 a 120 minutos de observa una disminución de dureza que va en un promedio de 438 mg/L a 444 mg/L, y a los 180 minutos se obtiene una disminución de 430 mg/L.

Tabla 16. Concentración final de la dureza de las cáscaras de cebada (50 g) y huevo (150 g) de tamaño de partícula <850 μm

Tiempo (min)	Concentración CaCO_3 mg/L
0	467
15	450
30	445
45	439
60	439
75	442
90	444
105	443
120	438
180	436

Fuente: Autora

Figura 27. Concentración de dureza de las cáscaras de cebada (50 g) y huevo (150 g) < 850 μm



Fuente: Autora

4.3 Eficacia del filtro a base de cascaras de huevo y cebada en la reducción de la dureza del agua

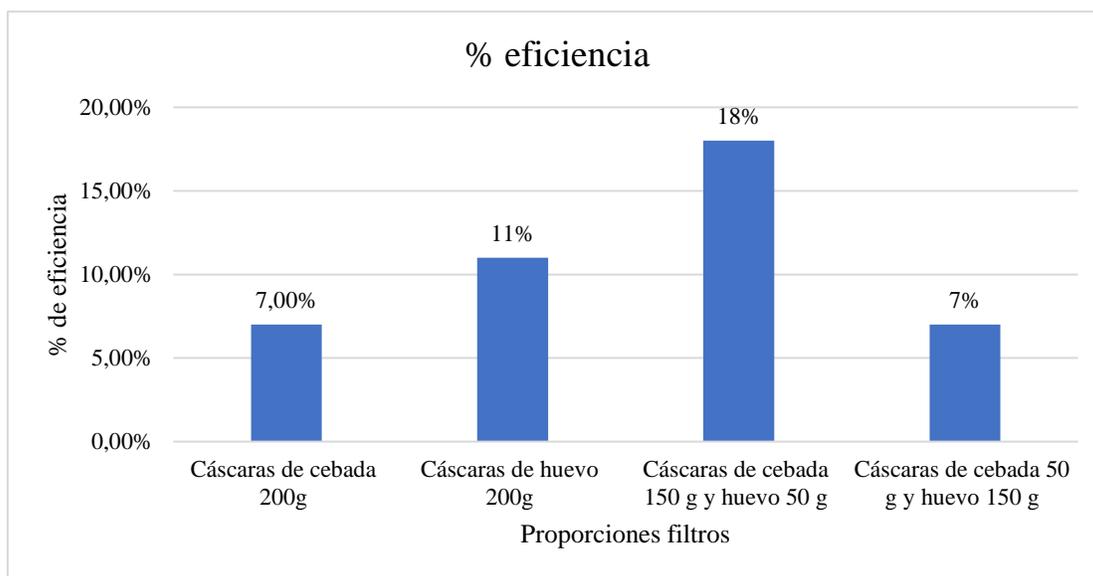
Mediante pruebas experimentales en laboratorio, después de utilizar los diferentes filtros a diferentes proporciones, se observaron los siguientes resultados como se puede observar en la Tabla 17, el mejor filtro es el que tiene una proporción de 150 gramos de cebada y 50 gramos de huevo con una eficiencia del 18 %, a diferencia de los otros filtros cuyo porcentaje de eficiencia es menor con un valor promedio del 7% al 11% de eficiencia.

Tabla 17. Porcentaje de eficiencia de las diferentes proporciones del filtro

Proporciones filtro <850 µm	% eficiencia
Cáscaras de cebada 200g	7%
Cáscaras de huevo 200g	11%
Cáscaras de cebada 150 g y huevo 50 g	18%
Cáscaras de cebada 50 g y huevo 150 g	7%

Fuente: Autora

Figura 28. Porcentaje de eficiencia de las diferentes proporciones del filtro



Fuente: Autora

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

- Se determinó las propiedades fisicoquímicas de las cáscaras de huevo y las cáscaras de cebada, donde el primero obtuvo un pH básico con un valor promedio entre 8,98 a 9,05; mientras que la cáscara de cebada obtuvo un pH de 6,25 a 6,28. Con respecto al % de humedad en los dos materiales orgánicos previamente preparados es baja con un valor promedio de 0,099 a 3,47 respectivamente. Y la porosidad en ambos materiales es buena, debido a que se mantiene en un porcentaje del 50 al 60%.
- El diseño de los prototipos de los filtros combinados de cáscaras de huevo y cebada a diferentes proporciones de 200, 100, 150, y 50 gramos de cada uno de los materiales orgánicos a escala de laboratorio realizándose pruebas experimentales, donde se descartó el tamaño de partícula entre 850 a 2000 micras debido a su baja capacidad de adsorción en comparación con el tamaño de partícula < 850 micras.
- Finalmente, se validó la eficacia del prototipo de filtro que tuvo una mayor eficiencia, que fue el filtro a base de cáscaras de cebada con 150 gramos y cáscaras de huevo con 50 gramos con un tamaño de partícula < 850 micras que obtuvo una eficiencia del 18% en 180 minutos.
- La viabilidad técnica no es posible o recomendable debido a la baja eficiencia del filtro, la relación costo-beneficio no sería rentable ya que no justifica la inversión en materiales, diseño y mantenimiento, por lo tanto, un filtro con resultados tan limitados no sería bien recibido por la población, ya que no resolvería el problema de manera significativa

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda continuar con más estudios experimentales de estos residuos orgánicos para encontrar el método adecuado para mejorar la eficiencia en la eliminación de la dureza del agua.
- En el diseño de este tipo filtros a base de residuos orgánicos, se recomienda usar materiales de mejor calidad, para obtener un mejor rendimiento de estos y poder tener mejores resultados.
- Realizar más pruebas o repeticiones para así obtener resultados más precisos y poder determinar el tiempo de vida de los filtros al momento de la implementación en la disminución cualquier contaminante.
- Se recomienda probar con otro tipo de materiales para diseñar un filtro que disminuya la dureza del agua, debido a que existen varias opciones las cuales pueden tener una mayor eficiencia.

6. Referencias Bibliográficas

- AbKadir, N., Shahadat, M., & Ismail, S. (2017). Formulation study for softening of hard water using surfactant modified bentonite adsorbent coating. *Applied Clay Science*, 137, 168-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.025>
- Álvarez, F., & Álvarez, A. (2023). *Estudio Comparativo de Bioadsorción de Níquel en Aguas Sintéticas mediante Cáscaras de Toronja y Cebada*. Obtenido de <https://goo.su/iNSzstU>
- Angulo, L., & Hernández, Á. (2019). Importancia de los servicios de agua potable y saneamiento básico en la zona rural del Perú: Revisión Sistemática. 9-10. Obtenido de <https://goo.su/PjqEGzs>
- ARCA. (2021). *AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DEL AGUA*. Obtenido de <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/2021/03/RESOLUCI%C3%93N-Nro.-ARCA-DE-001-2021.pdf>
- Arce, C. (2017). Consencuencias económicas por uso de aguas duras en el Gran Santiago. 1-97.
- Atarés, L. (2016). Determinación de la porosidad. *Departamento de Tecnología de Alimentos*.
- Barahona, F., & Córdova, D. (2019). *Reducción de la dureza del agua a partir de rocas volcánicas en lechos de adsorción*. Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/5512>

- Bejarano, F., & Estrella, C. (2019). Cinética de adsorción en la remoción de color mediante la utilización de arcillas en muestras de agua sintética. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4871>
- Bolaños, J., Cordero, G., & Segura, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *30*(4), 15. doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- Calvache, G. (2022). Estudio comparativo de dos sistemas de filtrado a base de residuos orgánicos de huevo y naranja para la retención de cromo hexavalente (**Cr+6**) de soluciones acuosas. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/17608/1/236T0607.pdf>
- Cánepa, L. (2010). Filtración lenta como proceso de desinfección. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/>
- Caycedo, L., & Trujillo, D. (2020). *Concepto del agua y sus implicaciones en la formación ambiental*. Obtenido de <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1018>
- Chang, A. (2020). La importancia de la nutrición para la calidad de la cáscara de huevo en reproductoras de pollos de engorde. *Ross an Aviagen Brand*. Obtenido de <https://n9.cl/faxbjj>
- Chávez, M. I., Herrera, G. C., & Mirian Yolanda Jiménez. (2021). *Monitoreo y calidad del agua en contribución a una experiencia sostenible de vida*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5768/576868768003/html/>

Chávez-Cadena, M., Herrera-Morales, G., & Jiménez-Gutiérrez, M. (2021). Monitoreo y calidad del agua en contribución a una experiencia sostenible de vida. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 6(11). doi:<https://doi.org/10.35381/r.k.v6i11.1146>

EMAPAR. (2023). *EMPRESA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE RIOBAMBA MEMORIA DE DELIBERACIÓN*. Obtenido de https://www.epemapar.gob.ec/wp-content/uploads/rcuentas/2022/fase3/acta_sugerencias_ciudadana.pdf

Fernández, A. (2017). Ambiente. *TRAVESSIA - Revista Do Migrante*, 81. doi:<https://doi.org/10.48213/travessia.vi81.866>

Flores, E., & Machuca, M. (2017). Evaluación de la calidad de agua tratada de los sectores general vintimilla y señor de flores, de la parroquia bayas del cantón Azogues. Obtenido de <https://n9.cl/txkxo>

Garzón, M., Buelna, G., & Moeller, G. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(3), 153-151. Obtenido de <https://goo.su/fyGvn>

González, J., & Guzmán, N. (2022). Simulación de curvas de rompimiento con un modelo fenomenológico para describir la adsorción de Cu (II) y de Pb (II) en columna empacada de lecho fijo empleando isoterma de adsorción de Langmuir, Freundlich y Redlich-Peterson. *Química*, 11(3), 34-40. doi:<https://doi.org/10.29105/qh11.03-297>

- Guadarrama Tejas, R., Kido Miranda, J., Roldan Antunez, G., & Salas Salgado, M. (2016). Contaminación de agua. *ECORFAN® Revista de Ciencias Ambientales y Recursos*, 2(5), 1-10. Obtenido de <https://n9.cl/69qm8>
- Guadarrama, R., Kido, J., Roldán, G., & Salas, M. (2016). Contaminación de agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(5).
- Gutierrez, I. (2023). Estudio de la biosorción del plomo (II) en soluciones acuosas utilizando cáscara de tumbo (*Passiflora tarminiana* Coppens & Barney) en polvo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12866/14308>
- Hassan, S., Abbas, M., Mujahid, W., Ahmed, W., Ahmad, S., Maan, A., . . . Muhammad, R. (2023). Utilization of cereal-based husks to achieve sustainable development goals: Treatment of wastewater, biofuels, and biodegradable packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 140, 104166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104166>
- Herrera, L., & Quisaguano, S. (2019). Evaluación de la calidad del agua del sistema de abastecimiento y conducción de la junta Administradora de Agua Potable de Tambillo. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20309/1/CD9776.pdf>
- Junco, Y. (2019). *Adsorción de calcio y magnesio en agua subterránea por aluminiosilicatos activados a nivel de laboratorio de la Universidad Continental Huancayo-2018*. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/6945/4/IV_FIN_107_TE_Junco_Tapahuasco_2019.pdf

- Logroño, J. (2019). Lechos activados de rocas volcánicas de Chimborazo y Tungurahua para la retención de la dureza del agua. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/5825>
- Luján, A. (2015). Ablandamiento de agua con adsorbentes modificados químicamente. *151*.
- MAATE. (2015). Programa 'PNGIDS' Ecuador. *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>
- Mamani, R. (2017). *Bioadsorción de plomo (II) de las aguas del río Ayaviri, mediante el uso de salvado de cebada*. Obtenido de <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3274955>
- Ministerio del Ambiente. (2014). *LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA*. Obtenido de <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2021). *ACUERDO MINISTERIAL NRO. MAATE-2023-081*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2023-081.pdf>
- Noluthando, K., Kaviyarasu, K., Khamliche, T., Magdalene, C., & Maaza, M. (2019). Stability and thermal conductivity of CuO nanowire for catalytic applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *7*(4). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103255>

- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108. (2020). Agua para consumo humano. Requisitos. Obtenido de <https://studylib.net/doc/25540804/agua-potable-n-inen-1108-6-marzo-2020>
- OMS. (2016). WHO guidelines for drinking- water quality. *WHO Chronicle*. 38(3), 104-108. Obtenido de <https://n9.cl/6r0xo>
- Ordoñez, J. (2011). Aguas Subterráneas-Acuíferos. *Global Partnership*, 1, 10.
- Parrales, V., Reyna, G., & Cedeño, H. (2022). Calidad de agua potable de las zonas urbanas. *Revista Científica de Educación Superior y Gobernanza Interuniversitaria*, 3(5), 8-12. Obtenido de <https://publicacionescd.ulead.edu.ec/index.php/aula-24/article/view/446/752>
- Pino, M., Vásquez, F., Pazmiño, M., & Andrade, P. (2021). *Efectividad de los Lechos Filtrantes en la Reducción de Sulfatos y Carbonato de Calcio en el agua de Consumo Humano*. Obtenido de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2477-91052021000200083
- Prato, J., Millán, F., Ríos, A., & González-Ramírez, L. (2022). Uso de materiales litológicos oxídicos para la reducción de la dureza en aguas naturales. *Información tecnológica*, 33(2), 145-156. doi:<https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200145>
- Ramalho, R., Ferreira, F., & Lima, A. (2021). Caracterización de la cáscara de cebada y su uso en la remoción de contaminantes del agua.

Regulación Agua. (2021). *AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DEL AGUA* .

Obtenido de <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/2021/03/RESOLUCI%C3%93N-Nro.-ARCA-DE-001-2021.pdf>

Rengifo, J. (2023). Residuos orgánicos para descontaminar el agua. Obtenido de <https://udemedellin.edu.co/residuos-organicos-para-descontaminar-el-agua/>

Revelo-Vargas, D., Pérez-Rodríguez, E., & Maya-Rosero, M. (2019). Evaluación de la capacidad de adsorción selectiva de cáscaras de huevo ante compuestos azufrados para purificación de agua potable. *Revista de Ciencias*, 32(2), 77-85. doi:<https://doi.org/10.25100/rc.v23i2.8423>

Rodríguez, C. (2021). Empleo de la cáscara de huevo como adsorbente para la eliminación de contaminantes emergentes y refractarios en aguas residuales. 1-92. Obtenido de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/60197>

Ronquillo, D., Olaya, M., Bower, E., & Chang, M. (2024). Biofiltro a base de cáscara de huevo para la adsorción de tensoactivos aniónicos en aguas residuales de lavandería. *Revista científica INSPILIP*, 8. doi:[0.31790/inspilip.v8i27.702](https://doi.org/10.31790/inspilip.v8i27.702)

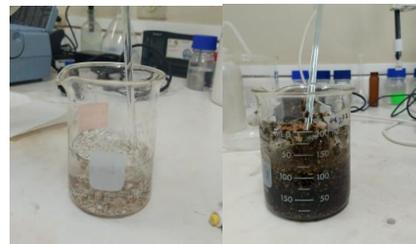
Rotoplas. (2021). *¿Qué es la dureza del agua y cómo se mide?* Obtenido de <https://rotoplas.com.ar/agroindustria/que-es-la-dureza-del-agua-y-como-se-mide/#:~:text=La%20clasificaci%C3%B3n%20del%20agua%20se,total%20de%20sales%20que%20contiene.&text=Se%20trata%20de%20una%20dureza,de%2050%20partes%20por%20mill%C3%B3n.&text=Aqu%C3%AD>

- Salazar, A., & Valencia, M. (2021). Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática. *Revista colombiana de ciencia animal recia*, 12(2). doi:<https://doi.org/10.24188/recia.v12.n2.2020.776>
- Samaniego, M., & Lema, S. (2024). Calidad del agua en Airón, Chimborazo, Ecuador: análisis físico-químico y microbiológico para consumo humano, evaluación de impacto en salud pública. *La ciencia al servicio de la salud y nutrición*, 15(1), 15-27. doi:<https://doi.org/10.47187/cssn.Vol15.Iss1.268>
- Sanchez, I., & Sedado, L. (2023). Eficiencia del carbón activado obtenido de semillas de eucalipto (*Eucalyptus*) y cáscara de cebada (*Hordeum vulgare*) en la bioadsorción de Plomo (Pb), en aguas contaminadas por actividades mineras-Julcani Buenaventura. Obtenido de <https://repositorio.unh.edu.pe/items/e4a372d7-24da-44df-9cb2-ae1c81205e08>
- Smith, J., McCabe, W., & Harriot, P. (2016). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Vol. 7). España.
- Solis, J. (2021). *Influencia del empleo de un filtro ablandador-multimedia en la reducción de la concentración de carbonatos presentes en el agua para consumo humano del Centro poblado Casa Blanca del Distrito de Santiago - Ica – 2021*. Obtenido de <https://repositorio.unica.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ad475fe5-2b44-4f11-a676-c6f2adcc7510/content>
- TULSMA. (2017). Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Texto Unificado de Legislación. Secundaria de Medio Ambiente. Obtenido de <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

- Verdugo, J. (2017). Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de la mandarina(*Citrus reticulata* var. clementina).
- Weber, W. (2003). Control de la calidad del agua / Water Quality control:Procesos fisicoquimicos. 2010-234.
- Yumar, S. J. (2019). *Adsorción de calcio y magnesio en agua subterránea por aluminosilicatos activados a nivel de laboratorio de la Universidad Continental Huancayo-2018.* Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/6945/4/IV_FIN_107_TE_Junco_Tapahuasco_2019.pdf
- Zúñiga-Martínez, S. (2022). Métodos de remoción de metales en aguas para consumo humano:: Una revisión. *Instituto de Ingeniería y Tecnología*. Obtenido de <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/22920>

7. Anexos

Anexo 1. Determinación del pH y conductividad



Anexo 2. Determinación del porcentaje de humedad



Anexo 3. Determinación de la densidad real y aparente





Anexo 4. Determinación de la dureza

