



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN PILOTO PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE BIOMASA MODIFICADA CON NANOPARTÍCULAS
MAGNÉTICAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL TEXTIL**

MICHAEL YESID JIMÉNEZ PENAGOS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2020



**DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN PILOTO PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE BIOMASA MODIFICADA CON NANOPARTÍCULAS
MAGNÉTICAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL TEXTIL**

**MICHAEL YESID JIMÉNEZ PENAGOS
CÓDIGO: 507103**

**TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DOCENTE ASESOR
PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2020**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C. 3 de diciembre de 2020



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Todo esto va dedicado a mi madre, Mariela, quién día a día decidió dar sus horas para cuidarme, guiarme y brindarme todo el amor incondicional. A mi padre Hernando, porque me enseñó el valor de cada pequeña cosa, el significado del trabajo duro y me dio siempre su apoyo inmenso. A mis hermanas y sobrinas por ser un ejemplo único de dedicación y maravillosas mujeres. A toda mi familia, por siempre desear lo mejor para mí. A Yenny y su familia, quiénes han estado a mi lado en las buenas y en las no tan buenas y me han dado todo el afecto de una segunda familia. A mis amigos, Jhon, David, Jessica y Edwin quiénes hacen parte de mi vida hace muchos años y me han acompañado en cada decisión importante de ella. A mis amigos de vida, a mis amigos de la universidad y a todos aquellos que aportaron un granito de arena en este camino, gracias.

“La única herencia que tiene valor, que te podemos dejar y que además jamás perderá su importancia, es la educación”

Mariela y Hernando

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar en primer lugar, agradecimiento a la Universidad Católica de Colombia por abrirme sus puertas, por mostrarme un camino diferente y por el apoyo brindado en cada etapa de este proceso.

A la facultad de Ingeniería por cada uno de los docentes que me formaron como ingeniero, como persona y como profesional y en especial al ingeniero y decano Jaime Díaz, que con su gran liderazgo, determinación y conocimiento me guió en muchos aspectos de mi formación.

A la ingeniera Marisol Nemocón, quién brindó numerosas horas de su tiempo para escucharme, apoyarme y enseñarme. Al ingeniero Víctor Mendoza, quien fundó en mi un gusto gigante por las estructuras y me ayudó a conocer más de estas.

Al ingeniero Santiago Perilla y la ingeniera Scherazada Calderón, a quienes agradezco infinitamente el impulso dado para empezar mi recorrido como monitor de la universidad. A Diana Pardo y a el ingeniero Andrés López, quienes fueron un apoyo incondicional y de primera mano mientras fui monitor de la facultad.

En segundo lugar, quiero agradecer de manera especial al ingeniero Wilfredo Marimón, quién dedicó todo su trabajo, empeño, su confianza y conocimiento en apoyar, seguir y desarrollar esta investigación. Le agradezco por su gran compromiso, por inculcar día a día la importancia del cuidado del agua y la importancia de seguir buscando más soluciones y nunca quedarse solamente con lo que ya existe, por ser ese gran docente que siempre está dispuesto a enseñar, a tender la mano y hacer de mi un mejor profesional.

Finalmente quiero agradecer a todos los que me acompañaron en este proceso, a quienes me tendieron la mano cuando más la necesitaba, a mis amigos y compañeros, gracias.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
3. ANTECEDENTES	18
3.1. LIMITACIONES	19
4. JUSTIFICACIÓN	20
5. ESTADO DEL ARTE	22
6. MARCO DE REFERENCIA	24
6.1. MARCO TEÓRICO	24
6.1.1. Calidad de agua	24
6.1.2. Índice de Calidad del agua	25
6.1.3. La industria textil	26
6.1.4. Técnicas convencionales para tratamiento de aguas residuales	27
6.1.5. Procesos Físicos	27
6.1.6. Procesos químicos	28
6.1.7. Nanotecnología en tratamiento de aguas residuales	30
6.1.8. Nanopartículas magnéticas	33
6.1.9. Columnas de adsorción	34
6.1.10. Sistemas de redes de protección contra incendios	35
6.2. MARCO CONCEPTUAL	37
6.3. MARCO LEGAL	38
7. OBJETIVOS	41
7.1. OBJETIVO GENERAL	41
7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
8. METODOLOGÍA	42
8.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AGUA RESIDUAL	42
8.2. MODELACIÓN DEL SISTEMA EN EL SOFTWARE FAST	44
8.2.1. Software FAST	44
8.2.2. Parámetros de la modelación	45
8.2.3. Descripción de los parámetros de entrada y procedimiento de diseño	46
8.2.3.1. Selección del tipo de experimento	47
8.2.3.2. Selección del modelo	47
8.3. DISEÑO DEL SISTEMA PILOTO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN	56
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
9.1. SIMULACIONES	66
9.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LAS SIMULACIONES	75

9.3.	DISEÑO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN	78
9.3.1.	DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA	78
9.4.	ESQUEMA DE LA COLUMNA	81
9.5.	COSTO Y ANÁLISIS DEL DISEÑO	85
10.	CONCLUSIONES	87
	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	89

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características físicas	24
Cuadro 2. Características químicas	24
Cuadro 3. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana	25
Cuadro 4. Características microbiológicas	25
Cuadro 5. Métodos convencionales para el tratamiento de aguas y sus principales limitaciones	30
Cuadro 6. Nanomateriales y sus aplicaciones	31
Cuadro 7. Nanomateriales en el tratamiento de aguas y aguas residuales	32
Cuadro 8. Caracterización del agua residual	43
Cuadro 9. Parámetros de modelación	45
Cuadro 10. Biomasas	45
Cuadro 11. Variaciones para modelación	46
Cuadro 12. Criterios de calidad de reúso	57
Cuadro 13. Contaminantes residuales por remover	59
Cuadro 14. Cuadro de caracterización del agua y su comparativo con la normatividad de reúso	62
Cuadro 15. Valores óptimos de simulación	75
Cuadro 16. Valores finales simulaciones	76
Cuadro 17. Parámetros para cálculos de dimensión de la columna	78
Cuadro 18. Costo estimado elaboración de la columna	85

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura cristalina de la magnetita	34
Figura 2. Mecanismo de adsorción	35
Figura 3. Interfaz Software FAST	47
Figura 4. Tipo de experimento FAST	47
Figura 5. Modelos FAST	49
Figura 6. Forma de curva de ruptura	55
Figura 7. Modelo ejemplo Columna de Adsorción	61
Figura 8. Primera simulación	64
Figura 9. Resultado simulación 001 de aserrín y carbón activado en polvo	65
Figura 10. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el aserrín de pino y el carbón activado en polvo	66
Figura 11. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el aserrín de pino y el carbón activado granular	67
Figura 12. Comparación variación de masas, porosidades y caudales en el aserrín con carbón activado granular y en polvo	68
Figura 13. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el rumex y el carbón activado en polvo	69
Figura 14. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el rumex y el carbón activado granular	70
Figura 15. Comparación variación de masas, porosidades y caudales en el rumex con carbón activado granular y en polvo	71
Figura 16. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para la cascarilla de arroz y el carbón activado en polvo	72
Figura 17. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para la cascarilla de arroz y el carbón activado granular	73
Figura 18. Comparación variación de masas, porosidades y caudales en el rumex con carbón activado granular y en polvo	74
Figura 19. Gráfica c/c_0 vs Tiempo de las simulaciones finales	76
Figura 20. Esquema general montaje columna	81
Figura 21. Detalle tanque c_0 y succión inicial	82

Figura 22. Detalle montaje bomba y columna	83
Figura 23. Detalle montaje salida efluente y tanque colector	84

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Caracterización, elementos y parámetros.

Anexo B. Simulaciones y comparativos.

Anexo C. Simulaciones finales.

Anexo D. Carpeta de archivos de simulaciones

Nota: Todos los anexos se encuentran fuera del documento.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se planteó un diseño conceptual de un sistema piloto de columna de adsorción de lecho fijo, utilizando materiales de 3 diferentes tipos de biomásas modificados con nanopartículas de carbón activado y así se encontró finalmente las condiciones más adecuadas para el dimensionamiento de la columna. Este diseño se formuló a partir de simulaciones apoyadas por el software FAST, fundamentados en el sistema de modelación de difusión homogénea de superficies o HSMD (por sus siglas en inglés) y el modelo de Isoterma de Freundlich, para posteriormente ingresar los parámetros de condiciones iniciales del agua residual a tratar, en nuestro caso, el agua residual de una industria textilera y se fueron variando los parámetros de trabajo como la masa, la porosidad y el caudal de flujo, esto para definir si su posterior reuso era viable o no.

Durante el desarrollo del proyecto se obtuvieron resultados favorables en la simulación del diseño de la columna, revelando que, si era efectiva para reducir el nivel de concentración y llevarlo al 99% de reducción, a partir de esta premisa se realizó el diseño de las dimensiones de la columna que se ajustaran a la necesidad y finalmente se dio visto bueno al agua residual tratada para su reuso en sistemas de redes contra incendio, bajo la normatividad vigente.

PALABRAS CLAVE: Carbón activado, Columna adsorción, Industria textil, Freundlich, Aserrín de pino, Rumex, Cascarilla de arroz.

ABSTRACT

In this research work, a conceptual design of a fixed-bed adsorption column pilot system was proposed, using materials from 3 different types of biomass modified with activated carbon nanoparticles and thus, the most suitable conditions for the dimensioning of the column were finally found. This design was formulated from simulations supported by FAST software, based on the homogeneous surface diffusion modeling system or HSDM (for its acronym in English) and the Freundlich Isotherm model, in order to start the initial conditions parameters of the wastewater to be treated, in our case, the wastewater of a textile industry and then the work parameters such as mass, porosity and flow rate were varied, this to define whether its subsequent reuse was viable or not.

During the development of the project, favorable results were obtained in the simulation of the design of the column, revealing that it was effective to reduce the concentration level and bring it to 99% reduction, after this point the design of the dimensions of the column was performance and the column was adjusted to the needs and finally the treated wastewater was approved for reuse in fire network systems, under current regulations.

KEY WORDS: Activated carbon, Adsorption column, Freundlich, Pine sawdust, Rumex, Rice husk.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso finito en la creciente economía mundial y el rápido avance de la población. En los países en desarrollo, tales como algunos latinoamericanos, diversos factores, tales como: circunstancias severas, sequías, cambio climático y otras posibles acciones o contaminantes, crean una persistente escasez de agua. Por lo tanto, el crecimiento en la demanda de agua y el vertimiento de aguas residuales debido al rápido desarrollo urbano y el crecimiento industrial facilita una oportunidad para la reutilización de aguas residuales.

Por ello, muchos profesionales están seguros de que la reutilización de aguas residuales es una parte importante y subutilizada de la gestión sostenible de los recursos naturales, ya que esta práctica trae consigo una serie de beneficios como son la protección de los recursos hídricos, la prevención de la contaminación costera, recuperación de nutrientes para agricultura, ahorro en el uso de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), entre otros¹.

Por ello, este proyecto tiene como fin dar un adecuado uso, en cumplimiento a la normativa vigente en la reutilización del agua residual proveniente de las industrias para su uso en sistemas de redes de protección contra incendios como alternativa de aprovechamiento, con lo cual se requieren procesos de tratamiento fisicoquímico para la eliminación de los contaminantes y junto con la acción del uso de la nanotecnología en el tratamiento del agua como alternativa biosustentable.

Un proceso de reutilización de agua tiene como fin mejorar la calidad de aguas residuales provenientes de procesos industriales para cumplir con los requisitos de calidad de las aguas regeneradas, en función de su nuevo uso. Para ello, es preciso complementar los equipos o procedimientos de tratamiento con procesos de depuración avanzados que reduzcan la carga contaminante residual hasta valores admisibles para el uso al que vaya a destinarse el agua producto. También es importante eliminar todos los microorganismos patógenos para asegurar la adecuada calidad sanitaria del agua y que esta no se convierta en un riesgo para la comunidad.

Por tal motivo la presente propuesta de trabajo de grado pretende diseñar una columna de adsorción para la implementación de biomasa modificada con nanopartículas basado en el tratamiento del agua residual colorada de la industria textil para su aprovechamiento.

¹ MURNI Po, JULIANE D Kaercher, and BLAIR E Nancarrow, *Literature Review Of Factors Influencing Public Perceptions Of Water Reuse*, 2003 <www.clw.csiro.au/ImageGallery/> [accessed 12 September 2019].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante el último siglo, especialmente en la última década el impacto ambiental se ve plenamente reflejado y directamente acusado con el uso del agua y los recursos hídricos² y a su vez los aportes de agua de las distintas cuencas hidrográficas, muestra un descenso considerable de las mismas, resultado de los constantes cambios climáticos, la acción del hombre sobre la captación y uso del agua, un poco más de un tercio del total de agua dulce disponible³ y del constante escenario de fuerte consumo tanto para las personas, como para la agricultura y la industria, se plantea la necesidad de buscar nuevos recursos, nuevas técnicas o nuevas formas de usar adecuadamente este recurso tan preciado y así evitar la contaminación o desperdicio del mismo.

En Colombia la industria textil es una de las más representativas en la economía del país. No obstante, es una de las industrias que presenta un alto gasto energético y de agua. Los desechos que generan estos procesos como las aguas residuales contienen una elevada cantidad de contaminantes de distinta naturaleza. Uno de estos contaminantes son los colorantes. Estos compuestos se crean para ser muy resistentes a cambios físicos y químicos, lo cual evita el desgaste y la biodegradación el compuesto, siendo así, también difíciles de eliminar por métodos convencionales en las plantas de tratamiento.

La industria textil utiliza entre 6000 a 9000 billones de litros de agua cada año, solo para teñir tejidos⁴. Sumado a esto casi las tres cuartas partes del agua utilizada se convertirá en agua no potable y en muchos casos será dirigida directamente a los cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento, ya que estas aguas residuales pueden contener grasas, aceites, sales, metales pesados, colorantes, alcalinos, entre otros.

Los colorantes sintéticos que se utiliza en la mayoría de las industrias textiles del país presentan compuestos tóxicos, los cuales generan afectaciones y cambios en el medio ambiente, tales como, pérdida de la fauna y flora acuífera, disminución del oxígeno disponible, aumento de la carga orgánica, intoxicación y depreciación de la acción fotosintética⁵.

Es así, que el uso de aguas reutilizadas, el aprovechamiento de las aguas recicladas o tratadas y muy especialmente las que provienen de algunas industrias, tomarán un lugar indudable en el cuidado y aprovechamiento de las

² FERNÁNDEZ Carrasco, Pedro. 'Estudio Del Impacto Del Cambio Climático Sobre Los Recursos Hídricos. Aplicación En Diecinueve Pequeñas Cuencas En España', 2002.

³ Asociación Española de Empresas de Tratamiento y Control del Agua., 2016.

⁴ O ECOTEXTILES. Carbon footprint of the textile industry, 2009.

⁵ H. M. PINHEIRO, E. Touraud, and O. Thomas, 'Aromatic Amines from Azo Dye Reduction: Status Review with Emphasis on Direct UV Spectrophotometric Detection in Textile Industry Wastewaters', *Dyes and Pigments*, 61.2 (2004), 121–39 <<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2003.10.009>>.

nuevas tecnologías para el cuidado del agua como se desarrolla en algunos países desarrollados en estas áreas, que tienen como fundamento la importancia del agua y el impacto económico y ambiental del recurso.

En la vida cotidiana existe una variedad de usos para el agua que no necesita de una alta calidad o que sea totalmente potable. Para estos usos es suficiente con el agua de la lluvia o residual de lavamanos y duchas o proveniente de algún otro proceso donde el agua residual se pueda reutilizar con un adecuado tratamiento, donde se le pueda dar una alternativa de uso, como ejemplo, en riegos, limpieza del hogar, usos industriales o comerciales, entre otros, reduciendo así el consumo de agua potable en cerca de un 40% y economizarla para propósitos netamente obligatorios⁶.

En Colombia, el uso del agua en sistemas de redes de protección contra incendio puede requerir durante un evento que el tanque de reserva se descargue completamente para este fin, si ejemplificamos en números, un tanque relativamente pequeño (ya que va en función del diseño y uso de cada edificación) puede tener una capacidad promedio de almacenamiento de hasta 10 m³, es decir, al descargarse completamente se habrá utilizado cerca de 10.000 litros de agua potable para este fin, debido a esto se propone la siguiente hipótesis:

¿Cuál es el diseño óptimo de sistema piloto de una columna de adsorción con biomasa modificada con nanopartículas de carbón para ser implementada en el laboratorio y tratar el agua residual textil para su reúso en un sistema de redes de protección contra incendios?

⁶ Asociación Española de Empresas de Tratamiento y Control del Agua., 2016.

3. ANTECEDENTES

La industria textil es una de las principales fuentes de contaminación de cuerpos de agua, con actividades tales como: el desecho de residuos líquidos con cargas orgánicas, la producción de fibras textiles con sustancias peligrosas y la liberación de material particulado a la atmósfera que son parte de la mayoría de estos problemas. Cabe mencionar que, los planes de gestión ambiental de la industria textil son altamente deficientes y en su mayoría no tienen la capacidad de controlar, monitorear y aplicar estándares de regulación ambiental.

En la actualidad se buscan día a día métodos que ayuden a la actualización de procesos tecnológicos, reducir los costos de producción, desarrollo de nuevos materiales con el fin de obtener mejores resultados comerciales acorde a las demandas mercantiles y también a su vez reducir los costos de los tratamientos químicos sobre los textiles, esto con la finalidad de minimizar los desperdicios en materia prima y en especial también reducir al máximo la producción de contaminantes vertidos en el agua, durante la producción de los bienes textiles.

Es así, como en la búsqueda de dar una solución adecuada para el tratamiento de las aguas residuales y a través del semillero de investigación Nanotechnology and Water Quality de la Universidad Católica de Colombia, dirigido por el ingeniero PhD. Wilfredo Marimón Bolívar, se desarrollaron múltiples proyectos de investigación con nanomateriales y nanopartículas para la remoción de metales pesados, contaminantes y tratamientos de afluentes, que han aportado al antecedente de la presente investigación, algunos de estos son:

- “Implementación de nanopartículas de arcilla modificada magnéticamente para la potabilización de agua proveniente del río Cuja”, en el año 2019, donde desarrollaron un material magnético capaz de retener metales pesados, evaluando las características morfológicas y magnéticas del material sintético y así ser usado en una planta de tratamiento de agua potable, en especial donde hay vertimientos de aguas ilegales⁷.
- “Optimización de un sistema de filtración con nanomateriales para la mejora de los índices de calidad del agua”, en el año 2019, quienes presentaron la ventaja y eficacia de usar el carbón activado modificado con nanopartículas, obteniendo mejoras significativas en la reducción de parámetros como color, sólidos totales y parámetros de turbiedad⁸.
- “Tratamiento de agua residual de la industria textil utilizando nanopartículas magnéticas@biomasa residual como tratamiento terciario”, en el año 2020, donde

⁷ MORENO, Harol; ROMERO Julián, ‘Implementación De Nanopartículas De Arcilla Modificada Magnéticamente Para La Potabilización De Agua Proveniente Del Río Cuja’, Journal Of Chemical Information And Modeling, 53.9 (2019), 1689–99.

⁸ GONZÁLEZ ESCOBAR, Anyi Carolina; Linarez García, 2019.

se presentó un proceso con nanopartículas magnéticas y biomasa de cáscara de naranja y cáscaras de plátano para reducir la contaminación del agua, residuo de la industria textil⁹.

Gracias a estas investigaciones previas, se logró obtener un referente técnico y metodológico para en el manejo de nanopartículas, el beneficio del uso de materiales modificados para el tratamiento de aguas, la implementación de las biomásas resultado de la investigación de diferentes compuestos de origen orgánico para ser combinados con nanomateriales y diseñar dispositivos de tratamiento de aguas a través de múltiples técnicas tales como, la filtración por membrana, la electrodialisis, la ósmosis inversa, la nanofiltración, la ultrafiltración, el intercambio iónico, la precipitación química y la adsorción, dentro de esta última, se pudo encontrar el uso de carbón activado o el uso de nanotubos de carbón, entre muchas otras metodologías para el tratamiento de aguas residuales, de esta y así encontrar una técnica adecuada que fuese idónea, funcional, de bajo costo y que le lograse brindar una solución óptima a la problemática planteada.

3.1. LIMITACIONES

- La investigación se fundamentará solamente en una muestra específica caracterizada de agua y no se podrá generalizar para cualquier tipo de muestra residual colorada.
- El diseño estará limitado a los resultados que arroje el software de modelación FAST, teniendo como premisa que las condiciones de diseño tienen algunos parámetros fijos como el caudal, la masa, el pH y la cantidad de concentración y otros parámetros que no son considerados en el diseño como la temperatura del fluido.

⁹ NÚÑEZ BAUTISTA, Sandra Sofía ; VICTORIA RUEDA, Tania Judith, 'Tratamiento De Agua Residual De La Industria Textil Utilizando Nanopartículas Magnéticas@Biomasa Residual Como Tratamiento Terciario', 21.1 (2020), 1–9.

4. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, el reúso de aguas residuales para fines no potables, como el riego o el uso industrial, se han implementado en todo el mundo^{10, 11}. Los programas de gobierno basados en los enfoques de reutilización de aguas residuales se planifican de acuerdo con los estudios de factibilidad de estos, sin embargo, los proyectos exitosos de reutilización de aguas residuales también dependen de la aprobación y el apoyo de los usuarios. En los últimos años, la percepción y aceptación de los usuarios se han convertido en exigencias para la ejecución exitosa de la política de reutilización de aguas residuales.

Durante el análisis de un estudio realizado en Sudáfrica, este reveló que las personas tenían una perspectiva optimista hacia la aplicación industrial de la reutilización de aguas residuales (76%)¹² sin embargo, cuando se mencionaron aplicaciones relacionadas con los alimentos, como cultivos de animales o cultivos de vegetales, la perspectiva pública cambiaba por completo¹³. Otro estudio elaborado sobre una encuesta realizada en los EE. UU, arrojó un valor entre el 47% y el 74% de aceptación pública y otro realizado en Australia arrojó un valor superior al 95%¹⁴ revelando que el público estaba muy de acuerdo con la aplicación de la reutilización de aguas residuales en sectores industriales, parques públicos, zonas escolares y zonas de riego, entre otros, debido a que los riesgos para la salud relacionados con el agua reciclada fueron la mayor preocupación entre el público ¹⁵.

La reutilización de aguas residuales actualmente presenta una serie de alternativas de carácter tanto nacional como internacional dando una solución a la problemática del desperdicio de agua y su posible reutilización, para Colombia, específicamente hablando, existen normas tales como la resolución número 1207 de 2014 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia) y de carácter internacional, por ejemplo, Real Decreto 1620/2007 – BOE de España, EPA 2012 (Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, 2012), entre las más relevantes. Para la debida reutilización del agua en diferentes países del mundo, todas las iniciativas coinciden con eliminar los debidos contaminantes presentes en el agua por medio de sistemas de tratamiento eficientes como

¹⁰ J. R. Adewumi, A. A. Ilemobade, and J. E. Van Zyl, 'Treated Wastewater Reuse in South Africa: Overview, Potential and Challenges', *Resources, Conservation and Recycling*, 55.2 (2010), 221–31 <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.012>>.

¹¹ TROY W. Hartley, 'Public Perception and Participation in Water Reuse', *Desalination*, 187.1–3 (2006), 115–26 <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.072>>.

¹² NEKTARIOS KANTANOLEON, Leonidas Zampetakis, and Thrassyvoulos Manios, 'Public Perspective towards Wastewater Reuse in a Medium Size, Seaside, Mediterranean City: A Pilot Survey', *Resources, Conservation and Recycling*, 50.3 (2007), 282–92 <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.006>>.

¹³ KANTANOLEON, Zampetakis, and Manios.

¹⁴ JUNE S. Marks, 'Taking the Public Seriously: The Case of Potable and Non Potable Reuse', *Desalination*, 187.1–3 (2006), 137–47 <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.074>>.

¹⁵ KANTANOLEON. Op. cit.

coagulación, floculadores, decantación, filtración u osmosis inversa, brindando nuevas alternativas para reutilizarla en distintos consumos como lo son: el doméstico, público, agrícola, industrial, con lo cual se minimicen los impactos en el medio ambiente a un costo razonable.

El fuego es un componente indispensable y a su vez un potencial peligro para las residencias, edificios y lugares de trabajo del ser humano. Desde la antigüedad las personas se han imaginado numerosos medios más o menos útiles para contrarrestar los incendios, normalmente se tiene dispone de conjuntos de bomberos a los que se deja dicha tarea. Inicios del siglo XX, se empezaron a situar sistemas mecánicos de detección y extinción de incendios que fundamentaban su trabajo en la acumulación de agua y su descarga inmediata y automatizada o manual en caso de un acontecimiento¹⁶. A pesar de que estos sistemas han ido evolucionando con el paso de los años, el agua utilizada para este fin rara vez es diferente, es decir, en su mayoría el suministro de agua para una red de protección contra incendios proviene de un tanque que es abastecido directamente de la red principal de agua potable.

El agua necesaria para suplir una necesidad en caso de una emergencia está diseñada en función de dos factores principales: la ocupación de la edificación y los casos de escenarios de incendio (NFPA 15). El caudal de consumo para una red de suministro oscila entre los 4 a 20 litros por minuto por metro cuadrado (4-20 litros/min/m²), es decir, durante una emergencia de aproximadamente 30 minutos, se utilizará aproximadamente 350 litros de agua por cada metro cuadrado de edificación, pero no necesariamente el agua debe provenir directamente del suministro de agua potable para este fin.

¹⁶ NAEME Nikooe; EHSAN Saljoughi, 'Preparation and Characterization of Novel PVDF Nanofiltration Membranes with Hydrophilic Property for Filtration of Dye Aqueous Solution', *Applied Surface Science*, 413 (2017), 41–49 <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.029>>.

5. ESTADO DEL ARTE

La reutilización del agua se ha venido llevando a cabo mediante distintos tratamientos que ayudan a su recuperación para utilizarla en el mismo sector donde se recolecta o conduciéndola a otro lugar, con el propósito de darle buen uso y evitar la contaminación del medio ambiente. En el mundo, el agua es un recurso fundamental para la vida en la tierra siendo uno de los más abundantes del planeta ya que cubre el 71% de la superficie de ésta, y donde solo el 3% es de agua dulce la cual es la requerida para el consumo humano¹⁷.

Se ha señalado que se requieren más de 100 litros de agua por kg de producto textil¹⁸. La alta demanda química de oxígeno (DQO) y el intenso contenido de color son las características más destacadas de las aguas residuales en la industria textil¹⁹. La mayoría de las aguas residuales textiles son generalmente complejas y tienen un alto peso molecular, debido a su compleja estructura química. Son aguas que traen residuos pesados y muchos productos químicos.

Las columnas de adsorción de lecho fijo son aquellas que contienen partes formadas por partículas sólidas que están dispuestas de tal manera que no pueden permitir el paso de partículas sólidas de tal forma que el sistema entre sí, se siga manteniendo.

La adsorción es una de las técnicas más utilizadas para eliminar contaminantes. Sin embargo, los estudios de adsorción se pueden realizar en lotes (también llamados estudios por carga o por discontinuidad) y se pueden realizar de forma constante. Los estudios por lotes brindan información sobre la capacidad de adsorción de sustancias específicas sobre adsorbentes, estos estudios incluyen colocar una solución que contenga la sustancia a eliminar con una cantidad específica de adsorbente durante el tiempo suficiente para establecer el equilibrio. Como consecuencia de esto y a los múltiples procesos de eliminación de metales pesados, se muestran a continuación algunos estudios referidos al diseño de columnas de adsorción para el tratamiento de aguas residuales, tales como:

- “Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa”, en julio de 2017, donde el autor muestra la efectividad del carbón activado en los procesos de adsorción para depuración de agua, en especial como tratamiento terciario y tratamiento final de agua, es así, como

¹⁷ KANTANOLEON, Zampetakis, and Manios.

¹⁸ SIMONA Vajnhandl and Julija Volmajer Valh, 'The Status of Water Reuse in European Textile Sector', Journal of Environmental Management (Academic Press, 2014), 29–35 <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.014>>.

¹⁹ AKSHAYA Kumar Verma, Rajesh Roshan Dash, and Puspendu Bhunia, 'A Review on Chemical Coagulation/Flocculation Technologies for Removal of Colour from Textile Wastewaters', Journal of Environmental Management (Academic Press, 2012), 154–68 <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.012>>.

propuso una caracterización, diseño y modelado una columna de adsorción que trabajase con carbón activo granular, para la eliminación de colorante orgánico que está presente en la muestra acuosa del problema. El autor indica que realizó dos modelos matemáticos con los modelos de Freundlich y Langmuir, teniendo como premisas la transferencia de materia interna y una vez finalizadas las modelaciones procedieron a diseñar la columna de adsorción²⁰.

- “Diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo de adsorción con dos columnas a escala de laboratorio”, en el año de 2019, los autores plantearon diseñar y construir un prototipo de dos columnas de adsorción a escala en el laboratorio para la eliminación de azul de metileno sobre soluciones acuosas, eliminando las fases fluidas mediante retención de sólidos y evaluando dos tipos diferentes de carbón activado para el diseño de la columna, ajustando estos para el diseño óptimo de la misma y determinaron los tiempos de adsorción óptimos para alcanzar un 0.99 y 0.98 de la concentración inicial a los 122 minutos de operación²¹.

²⁰ LIRIOS Castelló Torre, ‘Diseño de Un Sistema de Adsorción Para La Eliminación de Colorantes Presentes En Disolución Acuosa’, 2017, 65 <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/93468/CASTELLÓ - Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disol....pdf?sequence=1>>.

²¹ ERICSON DE AVILA Martinez, Elder David Puella Pájaro, And Pedro Luis Castilla Bossio, ‘Diseño, Construcción Y Puesta En Marcha De Un Equipo De Adsorción Con Dos Columnas A Escala De Laboratorio’, 2, 2019 <[Http://Repositorio.Unan.Edu.Ni/2986/1/5624.Pdf](http://Repositorio.Unan.Edu.Ni/2986/1/5624.Pdf)>.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1. Calidad de agua. La calidad del agua de cualquier área o fuente específica se puede evaluar utilizando parámetros físicos, químicos o biológicos. Los valores de estos parámetros son perjudiciales para la salud humana si se producen más de los límites definidos en las normas o manuales. Por lo tanto, la idoneidad de las fuentes de agua para el consumo humano se ha descrito en términos del índice de calidad del agua (WQI), que es una de las formas más efectivas de describir la calidad del agua.

Las características físicas (véase cuadro 1), químicas (véase cuadros 2 y 3) y microbiológicas (véase cuadro 4) mínimas que debe cumplir la caracterización del agua para consumo y uso humano en Colombia, están fijadas por la normatividad dada en la resolución 2115 de 2007 y en la resolución 0330 de 2017 del Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

Cuadro 1. Características físicas

Características Físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad	2

Fuente: Resolución 2115 de 2007, hoja No. 2

Cuadro 2. Características químicas

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0.02
Arsénico	As	0.01
Bario	Ba	0.7
Cadmio	Cd	0.003
Cianuro libre y disociable	CN	0.05
Cobre	Cu	1.0
Cromo total	Cr	0.005
Mercurio	Hg	0.001

Cuadro 2. (Continuación)

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Níquel	Ni	0.02
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Trihalometanos Totales	THMs	0.2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0.01

Fuente: Resolución 2115 de 2007, hoja No. 3

Cuadro 3. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5.0
Nitritos	NO ₂	0.1
Nitratos	NO ₃	10.0
Fluoruros	F	1.0

Fuente: Resolución 2115 de 2007, hoja No. 3

Cuadro 4. Características microbiológicas

Técnicas utilizadas	Coliformes Totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm ³	0 UFC/100 cm ³
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm ³	0 microorganismo en 100 cm ³
Presencia - Ausencia	Ausencia en 100 cm ³	Ausencia en 100 cm ³

Fuente: Resolución 2115 de 2007, hoja No. 6

6.1.2. Índice de Calidad del agua. EL ICA o WQI por sus siglas en inglés (Water quality index) fue inicialmente desarrollado por Since Horton en 1965 (Horton, 1965) en Estados Unidos seleccionando las 10 variables de calidad del agua más

comúnmente utilizadas como oxígeno disuelto (OD), pH, coliformes, conductancia específica, alcalinidad y cloruro, etc. y ha sido ampliamente aplicado y aceptado en Europa, países africanos y asiáticos. Recientemente, se han considerado muchas modificaciones para el concepto WQI a través de varios científicos y expertos. Un enfoque general de WQI se basa en los factores más comunes, que son la selección de parámetros, la determinación de la función de calidad para cada parámetro e incorporación de subíndices para modelación²².

El WQI utiliza los datos de calidad del agua y ayuda a modificar las políticas, formuladas por varias agencias de monitoreo ambiental. Se han dado cuenta de que el uso de variables de calidad del agua individuales para describir la calidad del agua para el público en general no es fácilmente comprensible. Es por eso que el WQI tiene la capacidad de reducir la mayor parte de la información en un solo valor para expresar los datos de forma simplificada y lógica²³.

6.1.3. La industria textil. La industria textil es uno de los productores más importantes en los países en desarrollo donde se utiliza una gran cantidad de tintes para ser utilizados como agentes colorantes²⁴. Los colorantes azoicos se utilizan principalmente y representan más del 70% de los colorantes utilizados en el mercado de la industria textil²⁵. Los colorantes azoicos causan problemas de salud pública debido a sus bencidinas y anillos aromáticos, que son cancerígenos en su estructura. Los colorantes azoicos garantizan que los colorantes utilizados en textiles se adhieran en el producto. Sin embargo, hay muchos aromáticos, y 24 de ellos han sido prohibidos por la Unión Europea debido a su carcinogenicidad²⁶. Se han propuesto varios métodos de tratamiento (tratamiento anaeróbico, coagulación-floculación, adsorción al carbón activado, oxidación, tratamiento aeróbico, cloración, técnicas de membrana, tratamiento con nanopartículas, entre otros)²⁷; para el tratamiento de aguas residuales textiles. Los procesos de membrana y con nanopartículas se han convertido en un buen tema de investigación en los últimos años debido a sus éxitos en el tratamiento de aguas residuales.

²² FERNÁNDEZ Carrasco. Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España, 2002.

²³ SHWETA Tyagi and Bhavtosh Sharma, 'Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index', American Journal of Water Resources, 2013 1 (3), Pp 34-38., 1.3 (2014), 34–38 <<https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>>.

²⁴ CASTELLÓ Torre. Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa, 2017.

²⁵ MARTINEZ Et Al. Diseño, Construcción Y Puesta En Marcha De Un Equipo De Adsorción Con Dos Columnas A Escala De Laboratorio, 2019.

²⁶ HARTLEY. Public perception and participation in water reuse, 2006.

²⁷ HARTLEY; Moreno and Romero. Implementación De Nanopartículas De Arcilla Modificada Magnéticamente Para La Potabilización De Agua Proveniente Del Río Cuja, 2019.

Sin embargo, las tecnologías convencionales de tratamiento sobre los cuerpos de agua residual pueden presentar varias desventajas en cuanto a la generación de lodos, crecimiento bacteriano, entre otros, generando costos extras con la ejecución de un tratamiento posterior. Es por esto por lo que la nanotecnología ha venido tomando importancia para el desarrollo de nuevas alternativas de tratamiento o para potenciar las técnicas existentes. Esto es debido a que los materiales a escala nanométrica exhiben propiedades diferentes a las mostradas por los materiales de igual composición a escala de mayor magnitud²⁸.

Como ejemplo de esto está la utilización de biomásas modificadas nanomateriales las cuales muestran gran afinidad en la interacción con contaminantes como metales pesados. Además, su implementación tiene ventajas respecto a otras tecnologías convencionales, debido a su bajo costo comercial, amplia disponibilidad y excelente rendimiento de adsorción²⁹. Sin embargo, su implementación no se ha masificado por la dificultad de separación del medio acuático después de su implementación en el tratamiento, por esto la alternativa de modificar con materiales magnéticos que puedan ser retirados por campos magnéticos de bajo gradiente ha llamado la atención en los últimos años³⁰.

6.1.4. Técnicas convencionales para tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de aguas abarca las operaciones de tipo físico, químico o biológico, cuya meta es eliminar la gran cantidad de características no requeridas de las aguas de abastecimiento o residuales. Las aguas residuales normalmente provienen de industrias, instituciones, casas y locales comerciales, el tratamiento de las aguas residuales son un proceso complejo³¹.

6.1.5. Procesos Físicos: Los procesos físicos del tratamiento de aguas residuales son aquellos donde se emplean fuerzas físicas, los principales procesos físicos son el desbaste, dilaceración, mezclado, floculación, sedimentación, flotación y filtración³².

- **Desbaste:** Si, en el diseño de la planta, se estima la presencia de sólidos de gran dimensión o de una gran cantidad de arenas en el agua bruta, conviene

²⁸ TYAGI and Sharma. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index, 2014.

²⁹ AMÍLCAR Muñoz, 'Caracterización y Tratamiento de Aguas Residuales', *Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería*, 2008, 114

<http://cvonline.uaeh.edu.mx/Cursos/Especialidad/Modulo1_PDF/Gen12/ESTEM01T01E08.pdf>.

³⁰ MARIMÓN-Bolívar, Wilfredo; Lesly Tejeda-Benítez, and Adriana P. Herrera, 'Removal of Mercury (II) from Water Using Magnetic Nanoparticles Coated with Amino Organic Ligands and Yam Peel Biomass', *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 10 (2018), 486–93 <<https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2018.10.001>>.

³¹ MUÑOZ, A. Caracterización y tratamiento de aguas residuales, 2008

³² Ibid., p. 25.

incluir, en el inicio del proceso de instalación, un mecanismo de retención de estos grandes sólidos; este resulta ser un pozo situado a la entrada del colector³³.

- **Dilaceración:** Se emplean para triturar los sólidos gruesos sin separarlos del flujo, para conseguir partículas de tamaño menor y más uniforme, que se reincorporan al flujo para su eliminación posterior. Con esta operación se protegen las bombas de problemas de obstrucciones producidas por trapos y objetos de gran tamaño.
- **Floculación:** se encarga de que las partículas en suspensión aumenten su superficie de contacto debido a la adición de productos químicos en los procesos de precipitación química, gracias a la floculación las partículas se agregan en partículas mayores alcanzando la masa suficiente para sedimentar ³⁴.
- **Flotación:** En este método se usan burbujas de gas para la separación de partículas suspendidas que no pueden eliminarse por sedimentación, se pueden realizar utilizando aire, nitrógeno, entre otros, ayuda a eliminar sustancias orgánicas volátiles, aceite y grasa del agua ³⁵.
- **Sedimentación:** Es la separación de los componentes del agua en dos, una fase sólida y una fase líquida. Este proceso se utiliza en puntos de depuración de aguas residuales ³⁶.

6.1.6. Procesos químicos: Son aquellos que eliminan contaminantes del agua residual por medio de reacciones químicas de diversos compuestos, se utilizan normalmente en la depuración de agua en conjunto con procesos biológicos. Algunos de los principales procesos químicos son la precipitación química, la transferencia de gases, decoloración, adsorción, desinfección, ósmosis inversa, intercambio iónico, entre otros³⁷.

- **Adsorción:** Es aquel proceso donde los iones o moléculas se retienen en la superficie de un sólido llamado adsorbente, como ejemplo de adsorción se tiene el proceso de flotación, donde el gas es el adsorbato y el adsorbente son los sólidos suspendidos.

³³ ¿Qué es el desbaste?, <https://www.ceupe.com/blog/que-es-el-desbaste.html>, 2020.

³⁴ MUÑOZ, A. Caracterización y tratamiento de aguas residuales, 2008.

³⁵ MOHAMMAD A. Al-Ghouti and others, 'Produced Water Characteristics, Treatment and Reuse: A Review', *Journal of Water Process Engineering*, 28 (2019), 222–39 <<https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2019.02.001>>.

³⁶ MUÑOZ, Op. cit., p 30.

³⁷ Ibid., p. 12

- **Declaración:** Elimina todo el cloro residual combinado, ya que quedan compuestos orgánicos altamente tóxicos en las aguas después del tratamiento biológico³⁸.
- **Precipitación química:** Consiste en agregar productos químicos en el agua residual consiguiendo la alteración del estado físico de los sólidos disueltos o suspendidos ayudando a eliminar un 97% estas partículas³⁹.
- **Procesos Biológicos:** Normalmente es un tratamiento secundario, el cual coagula y eliminan los sólidos coloidales no sedimentables. Se utiliza variedad de microorganismos bacterianos⁴⁰.

Los principales procesos utilizados son los aerobios, anóxicos y anaerobios.

- **Procesos aerobios:** Los microorganismos en estos procesos se mantienen fijos en lechos formados por materiales permeables. Su aplicación en el tratamiento de aguas residuales es reducida por la baja solubilidad del oxígeno en el agua⁴¹.
- **Procesos anaerobios:** Con este proceso se hace la descomposición de la materia orgánica e inorgánica donde no hay oxígeno. Este sistema tiene como principal ventaja la obtención de gases combustibles⁴².
- **Sistemas anóxicos:** Son sistemas con falta de oxígeno y presencia de altas concentraciones de nitratos, siendo este compuesto el receptor de electrones, y generando principalmente nitrógeno (Fibras y Normas de Colombia S.A.S. 2018).

Otras técnicas de tratamiento convencionales utilizadas son:

- **Tratamiento de macrófitos:** son aquellos estanques donde se añaden plantas acuáticas, donde se han venido utilizando en los últimos años mejorando los efluentes de los estanques de estabilización. Las macrófitas absorben grandes cantidades de nutrientes inorgánicos y metales pesados siendo muy eficientes extrayendo los nutrientes⁴³.
- **Electrocoagulación:** Es un proceso donde se desestabilizan partículas contaminantes las cuales están suspendidas, emulsionadas o disueltas en el agua, donde se implementa corriente eléctrica que proporciona fuerza

³⁸ MUÑOZ, A. Caracterización y tratamiento de aguas residuales, 2008.

³⁹ Al-Ghouti and others. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review, 2019.

⁴⁰ MUÑOZ. Op. cit., p. 35.

⁴¹ FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA S.A.S., 'Aguas Residuales', Metodos De Tratamiento, Venta | Definiciones Fyn Ingeniería En Agua, 2018.

⁴² Ibid., p 1.

⁴³ 'WASTEWATER Treatment', Conventional Wastewater Treatment Processes, 2016.

electromotriz provocando reacciones químicas, a través de placas metálicas, como el hierro y/o el aluminio, estabilizando las moléculas contaminantes⁴⁴.

Cabe resaltar que los métodos convencionales, tienen en su mayoría limitaciones propias de cada técnica de tratamiento, que son importante de conocer antes de poder iniciar con cualquiera de estos, así también para que se ajuste a condiciones necesarias para los tratamientos (véase cuadro 5).

Cuadro 5. Métodos convencionales para el tratamiento de aguas y sus principales limitaciones

Métodos convencionales	Limitaciones
Destilación	Los contaminantes requieren altas cantidades de energía y agua. Los contaminantes con punto de ebullición >100 ° C son difíciles de eliminar.
Transformación química	Se requiere exceso de reactivos. El producto puede ser una mezcla de baja calidad y no se puede liberar al medio ambiente.
Coagulación y floculación	Método complejo y requiere aditivos alcalinos para lograr un pH óptimo.
Tratamiento biológico	Los microorganismos son sensibles a los factores ambientales y difíciles de controlar. Los intermedios dañan las células microbianas.
Osmosis inversa	No puede eliminar sustancias orgánicas volátiles, productos químicos y productos farmacéuticos. Requiere alta energía.
Filtro de carbón	No se pueden eliminar los nitratos, fluoruros, metales, sodio, etc. La obstrucción ocurre con sólidos no disueltos. Susceptible al moho. Requiere cambio frecuente de filtros.
Nano-filtración	Requiere alta energía y pretratamiento. La suciedad de la membrana se producirá con una vida útil limitada y costosa.

Fuente: Nanotechnology for water purification: applications of nanotechnology methods in wastewater treatment.⁴⁵

6.1.7. Nanotecnología en tratamiento de aguas residuales. La nanotecnología en el tratamiento del agua es donde se utilizan nanomateriales innovadores desarrollados en los últimos años, una ventaja importante de esta tecnología es la

⁴⁴ RESTREPO ,Ana Patricia Mejía, Álvaro Arango Ruiz, and Luis Fernando Garcés Giraldo, *Electrocoagulation: Challenges and Opportunities in Water Treatment Artículo de Revisión*, 2006.

⁴⁵ NANOTECHNOLOGY for water purification: applications of nanotechnology methods in wastewater treatment, 2017.

posibilidad de utilizar materiales que se pueden usar como absorbente, fotocatalizador o membrana de nanocompuesto⁴⁶. Estos nanomateriales, debido a su tamaño menor a 100 nm, expresan propiedades como alta área superficial, fuertes fuerzas de interacción, resonancia de plasmones superficiales, entre otros⁴⁷.

Los nanomateriales utilizados para el tratamiento de agua contaminada por agentes como metales pesados tóxicos, químicos orgánicos tóxicos, bacterias, incluyen:

Cuadro 6. Nanomateriales y sus aplicaciones

Nanomaterials	Applications
Carbon nanotubes	Removal of organic contaminants
Nanoscale metal oxides	Heavy metal radionuclides adsorption
Nanocatalyst	PCB, azo dyes, pesticides
Bioactive nanoparticles	Removal of bacteria and fungi
Biomimetic membranes	Removal of salts
Nano zero valent iron	Halogenated organic compounds
Nanoscale calcium peroxide	Destruction of organics (e.g., gasoline)
Nano-Ag	Reduction of membrane biofouling
Nano-magnetite	Forward osmosis
Zeolite	Heavy metal ion removal
Magnetic nanoparticles	Removal of organic contaminants and heavy metal ions
Molybdenum sulfide nanosheets	Dye removal

Fuente: P. Patanjali, R. Singh, A. Kumar, and P. Chaudhary, "Nanotechnology for water treatment

- **Nanopartículas de metal:** Son metales nanométricos que exhiben una gran área de superficie por lo tanto pueden absorber moléculas orgánicas en su superficie, pueden eliminar gran variedad de contaminantes y así poderlos usar en el tratamiento de aguas residuales, las más estudiadas son: nano-plata, nano-oro

⁴⁶ PARIMAL Pal and Parimal Pal, 'Nanotechnology in Water Treatment', Industrial Water Treatment Process Technology, 2017, 513–36 <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810391-3.00007-2>>.

⁴⁷ MARIMÓN-Bolívar, Tejeda-Benítez, and Herrera.

y nano-hierro, donde la última es la más usada debido a su alta reactividad hacia éstas⁴⁸.

- **Óxidos metálicos de nano-escala:** Tienen la capacidad de eliminar iones de metales pesados del agua contaminada⁴⁹. Entre los adsorbentes existentes, los óxidos pueden usarse para la eliminación de metales pesados de aguas contaminadas debido a su relación superficie-masa y su reactividad química muy alta. Éstas poseen alta absorción hacia los metales pesados en términos de mayor capacidad y selectividad, lo que resulta en la eliminación de contaminantes de metales pesados tóxicos⁵⁰.

- **Nano-catalizadores:** Se utilizan debido a su capacidad para aumentar la actividad catalítica de la superficie, ayudan a mejorar la degradación de contaminantes ambientales como los pesticidas, los colorantes azoicos, los aromáticos nitros, entre otros. El nanocatalizador de plata son eficientes para la reducción de contaminantes microbianos presentes en el agua⁵¹.

- **Nanomembranas:** Son aquellas que están compuestas por fibras las cuales pueden eliminar partículas de tamaño micrométrico con una tasa muy alta de eliminación. Se tiene que los nanomateriales antimicrobianos, se han implementado sobre estructuras de membrana polimérica para impedir la unión bacteriana en la superficie de la membrana⁵².

Cuadro 7. Nanomateriales en el tratamiento de aguas y aguas residuales

Nanomaterial	Propiedades/Aplicaciones	Limitaciones
Nanoadsorbentes	Tiene una alta superficie específica y buena capacidad de adsorción. Se utiliza para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos y bacterias.	Altos costos de producción
Nanometales	Contienen alta superficie específica y de corta distancia de difusión entre partículas y es resistente a la abrasión, magnético.	Menos reutilizable
Nanomembranas	Proceso altamente confiable, aplicado en todos los campos de los tratamientos de aguas y residuos.	Requiere fuente de alta energía.

⁴⁸ POOJA PATANJALI and others, 'Nanotechnology for Water Treatment: A Green Approach', *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles*, 2019, 485–512 <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00021-6>>.

⁴⁹ Ibid., p. 492.

⁵⁰ Ibid., p. 480.

⁵¹ Ibid., p. 495-501.

⁵² Ibid., p. 531.

Cuadro 7. (Continuación)

Nanomaterial	Propiedades/Aplicaciones	Limitaciones
Fotocatálisis	Actividad fotocatalítica y, posiblemente, en el rango de luz visible, baja toxicidad humana, alta estabilidad y bajo costo	Selectividad de reacción
Desinfección y control microbiano	Actividad antimicrobiana fuerte y de amplio espectro, baja toxicidad para los humanos, facilidad de uso.	Falta de residuos de desinfección.

Fuente: Nanotechnology for water purification: applications of nanotechnology methods in wastewater treatment

6.1.8. Nanopartículas magnéticas. Las nanopartículas magnéticas son materiales que pueden tener aplicaciones en diferentes campos, como la resonancia magnética (MRI), la remediación ambiental, la producción de energía, la administración de medicamentos, entre otros, debido a su gran capacidad magnética⁵³. Dentro de los óxidos metálicos para la eliminación de contaminantes, los óxidos de hierro se encuentran dentro de los más aplicable, esto debido a que algunos óxidos de hierro como la magnetita en la escala nanométrica exhiben propiedades super-paramagnéticas^{54, 55}.

“La magnetita tiene una configuración molecular de tipo AB₂O₄, siendo ésta del grupo de las espinelas donde A es el catión divalente (Fe⁺²) y B el catión trivalente lo que le da un empaquetamiento cubico centrado en las caras por parte de los átomos de oxígeno. Es espinela inversa debido a que los espacios tetraédricos se encuentran ocupados por el ion trivalente y los espacios octaédricos repartidos entre los trivalente y divalentes”⁵⁶.

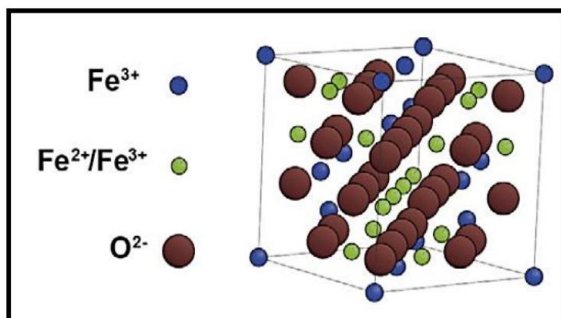
⁵³ MARIMÓN Wilfredo -Bolívar and Edgar E. González, 'Green Synthesis with Enhanced Magnetization and Life Cycle Assessment of Fe₃O₄ Nanoparticles', *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 9 (2018), 58–66 <<https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2017.12.003>>.

⁵⁴ PATRICK Nadoll and others, 'The Chemistry of Hydrothermal Magnetite: A Review', *Ore Geology Reviews*, 61 (2014), 1–32 <<https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2013.12.013>>.

⁵⁵ CORAL Diego F and Jenny A Mera, 'Ingeniería y Ciencia', *Ing. Cienc*, 13.26 (2017), 207–32 <<https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.8>>.

⁵⁶ MARIMON, Wilfredo Bolivar, *Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas Para La Remoción de Metales Pesados En Aguas*, 2018.

Figura 1. Estructura cristalina de la magnetita



Fuente: Marimon Bolívar, 2018

La reducción del tamaño de las partículas donde se mantienen las formas, el del dominio magnético se reduce más, debido a su que están relacionados proporcionalmente el tamaño del cristal y la raíz cuadrada del tamaño dominio ⁵⁷. Las nanopartículas magnéticas son de gran ayuda en la separación de catalizadores, diseños nucleares, productos bioquímicos y células pues éstos son reconocidos como una herramienta versátil para la remediación de varios tipos de contaminantes en el agua⁵⁸.

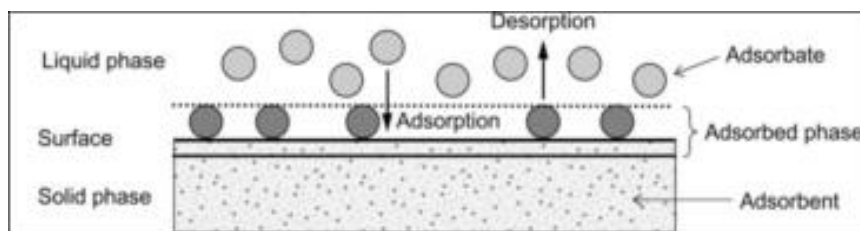
6.1.9. Columnas de adsorción. La adsorción es un fenómeno de transferencia de masa entre dos fases y se usa ampliamente en el proceso de eliminación de sustancias de la fase líquida. Esto se puede definir como: "Enriquecimiento de especies químicas líquidas en la superficie sólida"⁵⁹. Esta adquisición causa una fase intermedia denominada interfaz, entre la cual se produzca la adsorción, la fase líquida tiene el componente que queremos eliminar y el otro componente es el adsorbente. Los componentes por adsorber deben disolverse en el líquido en fase líquida. Sin embargo, estos procesos de adsorción requieren dos etapas: una fase sólida o de adsorción y una fase líquida, que es donde se encuentra el adsorbato.

⁵⁷ SŌSHIN Chikazumi, C. D. (Chad D.) Graham, and Sōshin Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism* (Oxford University Press, 2009).

⁵⁸ PATANJALI and others. Nanotechnology for water treatment: A green approach, 2019.

⁵⁹ WORCH Eckhard and Walter de Gruyter GmbH & CO, *Adsorption Technology in Water Treatment. Fundamentals, Processes, and Modeling*, 1st edn (Berlin/Boston, 2012) <<https://doi.org/10.1515/9783110240238>>.

Figura 2. Mecanismo de adsorción



Fuente: Eckhard Worch, 2012

La eficiencia del proceso de adsorción se ve afectada por muchos parámetros, incluida la interacción entre el tinte y el adsorbente, el área de superficie específica del adsorbente, el tamaño de la molécula de tinte, la temperatura, el pH y el tiempo de contacto. Por tanto, el tipo de adsorbente seleccionado es muy importante. El adsorbente más utilizado es el carbón activado, aunque también se utilizan otros adsorbentes inorgánicos como la zeolita, la piedra preciosa o el vidrio volcánico.

La característica principal de la adsorción es su capacidad para retener el adsorbato en su pared (es decir, en la superficie). Por lo tanto, el adsorbente debe tener un área superficial alta por unidad de masa. El carbón activado tiene una gran superficie por unidad de área, es decir, una fuerte capacidad de adsorción, por lo que puede cumplir con los requisitos de nuestro trabajo. Además, si elegimos carbón activado como adsorbente, tendremos variedad de opciones. Esto se debe al hecho de que el carbón activado se puede producir a partir de diferentes materiales que contienen principalmente carbón en la estructura molecular. Los materiales más habituales son: madera, carbón vegetal, lignito, turba, serrín, residuos plásticos, etc.

Hay dos formas de producir adsorción: física o química. En nuestro caso, nos interesa el primer tipo de adsorción. En lo que se refiere a la adsorción de componentes orgánicos, esta adsorción será muy efectiva, por lo que cuanto más similar sea el adsorbente a los compuestos orgánicos en términos de desempeño, mejor será su desempeño de adsorción⁶⁰.

6.1.10. Sistemas de redes de protección contra incendios. El sistema de red contra incendios es una red de composiciones las cuales buscan la forma de evitar o controlar un incendio de forma segura y eficaz por medio de su gran funcionalidad, esta plataforma se usa mediante distintos sistemas tanto aéreos como subterráneos, los cuales cuentan cada uno con sus respectivas herramientas y accesorios en distintos tamaños y diámetros para la instalación,

⁶⁰ CASTELLÓ Torre. Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa, 2017.

mantenimiento y funcionamiento correcto de cada uno de ellos. Estos sistemas cumplen con las normas de seguridad y calidad certificadas por la UL (Underwriters Laboratories) y FM (Factory Mutual).

Con el uso apropiado de estos sistemas de protección contra incendio es seguro que se podrán evitar incendios de gran proporción, evitando pérdidas considerables. Además, se puede tener tranquilidad al saber que, si algún fuego se inicia, los sistemas de red contra incendio lo neutralizarán, extinguiéndolo o disminuyéndolo, evitando de esta forma el incendio.

6.2. MARCO CONCEPTUAL



Fuente: El autor

6.3. MARCO LEGAL

a) La Constitución política de Colombia (1991). La constitución define el uso, conservación y preservación por parte del gobierno nacional, para el manejo ambiental incluyendo las fuentes hídricas, algunos de los artículos se mostrarán a continuación:

- Título I- Artículo 8 “Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación”⁶¹.

- Título II- Capítulo 3- Artículo 79 “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”⁶².

- Título II- Capítulo 3- Artículo 80. “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas”⁶³.

- Título XII – Capítulo 5 – Artículo 366 “El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable. Para tales efectos, en los planes y presupuestos de la Nación y de las entidades territoriales, el gasto público social tendrá prioridad sobre cualquier otra asignación”⁶⁴.

b) Ley 373 de 1997. Esta normativa establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, del artículo 1 al 11 se habla principalmente del ahorro y reutilización del agua mostrando a continuación algunos de éstos:

Artículo 1. “PROGRAMA PARA EL USO EFICIENTE Y AHORRO DEL AGUA. Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Se entiende por programa para el uso eficiente y ahorro de agua el conjunto de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación de los servicios de

⁶¹ REPÚBLICA DE COLOMBIA, Constitución Política de Colombia, 1991.

⁶² Ibid., p. 13.

⁶³ Ibid., p. 13.

⁶⁴ Ibid., p. 60.

acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico”⁶⁵.

Artículo 5. “REÚSO OBLIGATORIO DEL AGUA. Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socioeconómico y las normas de calidad ambiental”⁶⁶.

Artículo 15. “TECNOLOGÍA DE BAJO CONSUMO DE AGUA. Los ministerios responsables de los sectores que utilizan el recurso hídrico reglamentarán en un plazo máximo de seis (6) meses la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua para ser utilizados por los usuarios del recurso y para el reemplazo gradual de equipos e implementos de alto consumo”⁶⁷.

c) La Protección Ambiental de los Estados Unidos de América de 2012 (EPA)

d) Resolución 0330 de 2017. La Resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.

La Resolución aplica a los prestadores de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo, a las entidades formuladoras de proyectos de inversión en el sector, a los entes de vigilancia y control, a las entidades territoriales y las demás con funciones en el sector de agua potable y saneamiento básico, en el marco de la Ley 142 de 1994. Así como a los diseñadores, constructores, interventores, operadores, entidades o personas contratantes que elaboren o adelanten diseños, ejecución de obras, operen y mantengan obras, instalaciones o sistemas propios del sector de agua y saneamiento básico.

e) Resolución 2115 de 2007. La Resolución 2115 resuelve las características que debe tener el agua para consumo humano, así como las características, instrumentos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad de esta.

f) Resolución 1207 de 2014. Las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Esta resolución tiene por objeto establecer las disposiciones

⁶⁵ CONGRESO DE COLOMBIA, Ley 373, 2003.

⁶⁶ *ibid.*, p. 2.

⁶⁷ *ibid.*, p. 8.

relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos⁶⁸.

⁶⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 'Resolución Número 1207', 2014.julio 25 (2014),
9<http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf>.

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema piloto de una columna de adsorción con relleno de biomasa modificada con nanopartículas para el tratamiento de un agua residual de una industria textil para su reutilización en un sistema de redes de protección contra incendio.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los parámetros fisicoquímicos y biológicos de las aguas residuales provenientes de la fábrica textil.
- Realizar un diseño conceptual de un sistema piloto de columna de adsorción de lecho fijo.
- Indicar los costos totales de implementación del sistema piloto de tratamiento.

8. METODOLOGÍA

8.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AGUA RESIDUAL

El objetivo inicial de la investigación era realizar la caracterización del agua residual industrial en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia o el laboratorio de la Universidad Javeriana de Bogotá, pero por las condiciones extraordinarias y de salud pública que se presentaron durante el desarrollo de esta investigación, la caracterización del agua se obtuvo de diferentes informes e investigaciones hechos a muestras reales de aguas residuales de industrias textiles, los ensayos previamente realizados y documentados, fueron:

- 1 “Caracterización de las aguas residuales generadas en una industria textil cubana”⁶⁹.
- 2 “Tratamiento de aguas residuales del sector textil mediante proceso acoplado electrocoagulación-electro-oxidación”⁷⁰.
- 3 “Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante Coagulación química acoplada a procesos fenton intensificados con Ultrasonido de baja frecuencia”⁷¹.
- 4 “Diseño del tratamiento de las aguas residuales de una industria textil (70 m³/d) para la eliminación de fibras y reutilización de agua”⁷².

De cada una de estas investigaciones se obtuvieron datos relevantes de la caracterización del agua dados en los diferentes laboratorios y tomas de los muestreos de las industrias textiles y se compararon entre sí, para generar una lista con valores a ser observados y comparados con la normatividad vigente, asumiendo como los valores de cada parámetro el valor mayor encontrado en los resultados de las anteriores investigaciones, estos datos incluyen características o parámetros como la absorbancia, la acidez, la alcalinidad, los metales pesados, bacterias, coliformes, carbono total y pH, los valores finales se pueden observar en el cuadro ,mostrado a continuación:

⁶⁹ TERESITA Romero López, Humberto Rodríguez Fiallo, And Arquímedes Masó Mosqueda, ‘Caracterización De Las Aguas Residuales Generadas En Una Industria Textil Cubana’, *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 37.3 (2016), 46–58.

⁷⁰ OSPINA & Betancur, 2016

⁷¹ MENDOZA López Francisco Alonso And Others, ‘Experimental Estimation Of Structures Impact Pressure Of A Granular Debris Flow’, *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, 34.1 (2018), 157–61 <<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>>.

⁷² SEPÚLVEDA Juan, ‘Diseño Del Tratamiento De Las Aguas Residuales De Una Industria Textil (70m³/D) Para La Eliminacion De Fibras Y Reutilizacion Del Agua’, 2019, 119.

Cuadro 8. Caracterización del agua residual

PARÁMETRO	UND	VALOR
Absorbancia a (670 nm)		42.1
Acidez		360
acidez total como CaCO ³	mg/L CaCO ³	0
Alcalinidad total como CaCO ³	mg/L CaCO ³	4.65
Cadmio Total	mg/L	0.015
Cinc	mg/L	0.07
Cloruros	mg/L Cl	1776.9
Cobalto	mg/L	0.05
Cobre Total	mg/L	0.212
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	27*E(-3)
Color	U Pt-C	>500
Compuestos Fenólicos	mg/L	0.115
Concentración color índigo	mg/L	437.17
Conductividad	Us/cm	17.31
Carbono Orgánico Total COT	mg/L C	155
Cromo Total	mg/L Cr	0.18
DBO5	mg/L	813
DQO	mg/L	1236
Electroconductividad		8.13
Grasas y Aceites	mg/L	51.7
Helminthos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	0
Hidrocarburos Totales	mg/L	18.8
Níquel	mg/L	0.204
Óxigeno disuelto	mg/L	3.19
pH	und	7.78
Plomo Total	mg/L	0.09
POR	mV	-315
Potencial zeta	mV	-16.5 +/- 15.2
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	N/A
Salinidad		6.5
Salmonella sp	NMP/100 ml	N/A
Solidos disueltos	mg/L	12.786
Solidos Sedimentables	mg/L	60
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	266

Cuadro 8. (Continuación)

PARÁMETRO	UND	VALOR
Sulfatos	mg/L SO_4^{-2}	1000
Sulfuros Totales	mg/L	23.2
Temperatura	°C	32
Tensoactivos	mg/L	5.05
Turbidez	NTU	240

Fuente: El autor

A partir de los resultados recolectados de las caracterizaciones y los parámetros establecidos por la normatividad vigente en la norma de reúso (Resolución 1207 de 2014), se hizo un cuadro comparativo de los parámetros y de cuáles eran los elementos que querían ser removidos por la columna de adsorción para así poder ser modelados en el software FAST. Cabe resaltar que en la norma colombiana de reúso, solamente se indica que para que el agua sea apta para utilizar en sistemas de redes contraincendios debe tener: una concentración igual o menor a 300 mg/L de cloro, coliformes totales menores a 10 NMP/100 ml, helmintos 1 huevos y larvas / litro, un pH comprendido entre 6 y 9, protozoos 1 quiste/L y sulfatos de 500 mg/L de SO_4^{-2} , pero durante el resumen de la caracterización se encontraron diferentes concentraciones de metales pesados, sulfuros e hidrocarburos, que se debían tratar para garantizar un agua apta para el contacto y uso industrial.

8.2. MODELACIÓN DEL SISTEMA EN EL SOFTWARE FAST

8.2.1. Software FAST

FAST significa Fixed-bed Adsorption Simulation Tool, por sus siglas en inglés o su transcripción más cercana, Herramienta de Simulación de Adsorción de lecho fijo. FAST es un software para suponer curvas revolucionarias de filtros de adsorción de lecho fijo utilizados en el tratamiento de agua. Dependiendo del contaminante que se va a excluir en el progreso, se pueden optar diferentes medios adsorbentes, como carbón activado granular (GAC) para o óxidos metálicos (por ejemplo, alúmina activada, hidróxido férrico granular). FAST se puede aprovechar para el diseño o escalado de estos sistemas de tratamiento. Otra práctica es el análisis de parámetros cinéticos de experimentos de laboratorio. FAST proporciona una decisión numérica del modelo Modelo de difusión homogénea de superficies (HSDM por sus siglas de “homogeneous surface diffusion model”) y el acercamiento de la potencia de dirección lineal o modelo de difusión intraparticular.

8.2.2. Parámetros de la modelación. Los diferentes parámetros que fueron necesarios para la modelación en el software son aquellos que caracterizan el tipo de modelo que se está buscando establecer, estos varían en función del tipo de material, el tipo de modelo, la cantidad de tiempo de operación, el tipo de carbón activado con el que se desea trabajar y la concentración de contaminante a eliminar. En nuestro caso los parámetros de diseño y modelación fueron los siguientes:

Cuadro 9. Parámetros de modelación

Parámetros	Valores	Variación
masa, m (g)	50-200	50-70-100-150-200
porosidad eB (%)	10-50	cada 10
diámetro partícula, dp (mm)	0.25-1.5	0.25 mm polvo - 1.5 mm grano
caudal, Q (m³/d)	10-1000	10-50-250-500-1000
Tiempos de operación (s)	60.0	60
Parámetros fijos	Valores	Unidad
densidad de la partícula, rho_P		g/cm³
concentración del contaminante, cO	125.5	mg/L
n	0.521	adimensional
KF	1.11	(mg/g)(L/mg)n
kL	0.21	m/s
Ds	0.00001	m²/s

Fuente: El autor

Las partículas de biomasa que se trabajaron en este caso fueron tres: aserrín de pino, planta de acedera o rumex y cascarilla de arroz, teniendo las siguientes densidades para el modelo de trabajo:

Cuadro 10. Biomasas

Biomasa	densidades g/ml	porosidad
Aserrín de pino	0.5	70%
Planta Acedera o Rumex	0.41	64%
Cascarilla de arroz	0.96	33%

Fuente: El autor

Estos datos fueron ingresados en el software FAST y así iniciar las modelaciones respectivas con cada una de las variaciones de la siguiente manera (ver cuadro 11).

Cuadro 11. Variaciones para modelación

Aserrín- CA polvo	Variación	Aserrín-CA granular	Variación
001-004	Masas desde 50 hasta 150	013-016	Masas desde 50 hasta 150
005-008	eB desde 0.2 con masa de 50	017-020	eB desde 0.2 con masa de 50
009-012	Q desde 50 hasta 1000 con masa 50 y eB de 0.5	021-024	Q desde 50 hasta 1000 con masa 50 y eB de 0.5
Rumex- CA polvo	Variación	Rumex-CA granular	Variación
025-028	Masas desde 50 hasta 150	037-040	Masas desde 50 hasta 150
029-032	eB desde 0.2 con masa de 50	041-044	eB desde 0.2 con masa de 50
033-036	Q desde 50 hasta 1000 con masa 50 y eB de 0.5	045-048	Q desde 50 hasta 1000 con masa 50 y eB de 0.5
Arroz-CA polvo	Variación	Arroz-CA granular	Variación
049-052	Masas desde 50 hasta 150	061-064	Masas desde 50 hasta 150
053-056	eB desde 0.2 con masa de 50	065-068	eB desde 0.2 con masa de 50
057-060	Q desde 50 hasta 1000 con masa 50 y eB de 0.5	069-072	Q desde 50 hasta 1000 con masa 50 y eB de 0.5

Fuente: El autor

8.2.3. Descripción de los parámetros de entrada y procedimiento de diseño

Para iniciar las simulaciones en el software se debe considerar cada una de las variables mostradas en la interfaz (véase figura 3), ya que el diseño y los resultados pueden variar considerablemente si estos no se contemplan de la manera adecuada.

Figura 3. Interfaz Software FAST

The screenshot displays the FAST software interface with the following sections:

- Name:** A text input field.
- Buttons:** Open, Save, Save As.
- Operational Parameters:**
 - ☐ EBCT: empty bed contact time (unit: s)
 - ☒ m: mass of adsorbent (unit: g)
 - ☐ eB: bed porosity
 - ☒ rho_B: bed density (unit: kg/m³)
 - rho_P: particle density (unit: kg/m³)
 - dp: particle diameter (unit: mm)
 - c0: influent concentration (unit: mg/m³)
 - Q: flow rate (unit: m³/s)
 - BV: bed volume (unit: mL)
- Equilibrium and Kinetics:**
 - n: Freundlich exponent
 - KF: Freundlich constant (unit: $\frac{\text{mg}}{\text{g}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mg}} \right]^n$)
 - kL: film diffusion coefficient (unit: m/s)
 - Ds: surface diffusion coefficient (unit: m²/s)
- Experiment type:**
 - ☒ Column breakthrough
 - ☐ Batch reactor
- Dimensionless Parameters:**
 - ☐ (checkbox)
 - Dg: solute distribution parameter
 - Bi: Biot number
 - St: Stanton number
 - n: Freundlich exponent
- Model selection:**
 - ☒ HSDM
 - ☐ HSDM (faster)
 - ☐ LDF
 - ☒ Freundlich isotherm
 - ☐ Langmuir isotherm
- X-axis:**
 - ☒ operation time (unit: s)
 - ☐ volume treated (unit: m³)
 - ☐ volume treated by mass (unit: m³/kg)
- Buttons:** Start calculation, Info, Help >>

Fuente: Software FAST

Los datos y procedimientos para el inicio de las modelaciones fueron:

8.2.3.1. Selección del tipo de experimento. El tipo de ensayo, en nuestro caso fue la columna o column breakthrough, para simular la curva de ruptura de un filtro de adsorción de lecho fijo, en el software está localizado en la parte superior derecha como muestra la figura 4, a continuación:

Figura 4. Tipo de experimento FAST

This image shows a close-up of the 'Experiment type' section from the FAST software interface. It contains two radio buttons: 'Column breakthrough' (which is selected) and 'Batch reactor'.

Fuente: Software FAST

8.2.3.2. Selección del modelo:

- **Modelo de difusión homogénea de superficies o HSDM.** En este modelo, supone que la transmisión de masa se produce a lo amplio de la zona interior de las partículas adsorbentes en el estado de adsorción. Se menosprecia la transferencia de materia externa. El gradiente de cohesión de la fase sólida en las

partículas juega un papel al conducir la fase sólida. El adsorbente se considerará un medio homogéneo, de ahí el nombre. El modelo se fundamenta en⁷³:

- El balance de masa en el reactor considerado.
- Asegurar la transferencia entre cristales a través de la difusión superficial.
- La continuidad entre el flujo "exterior" y el flujo "interior" en la superficie del grano de carbón.
- El equilibrio entre la capacidad de adsorción y la concentración en la superficie exterior de la película.
- Esfericidad y uniformidad de partículas adsorbentes.

El modelo tiene en cuenta los parámetros característicos del carbón activado utilizado, fundamentalmente el tamaño o diámetro medio. El cálculo de masa sobre el filtro se deduce de la siguiente forma:

$$\epsilon_B \frac{\partial c}{\partial t} + v_F \frac{\partial c}{\partial z} + 3(1 - \epsilon_B) \frac{k_L}{r_P} (c - c^*) = 0 \quad (1)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

La transferencia de masa de fase sólida se forma como propagación sobre la superficie homogénea con la segunda ley de Fick dada en coordenadas radiales, así:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

• **Modelo de difusión intraparticular o LFD.** Este modelo es una reducción del modelo de difusión de superficie (HSDM). El gradiente de concentración utilizado en HSDM se sustituye por una diferencia de concentración lineal. Se asume explícitamente que la reducción de carga ocurre en una película sólida implícita y

equivalente a la película del lado de la solución en el modelo HSDM. Este supuesto reduce las ecuaciones de trabajo, porque todo es lineal. El balance de masa sobre el filtro se calcula como:

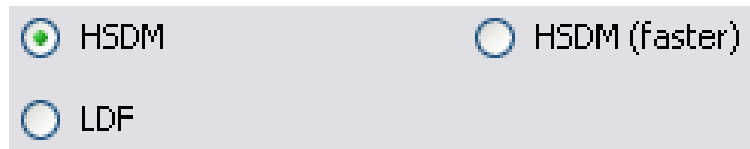
$$\epsilon_B \frac{\partial c}{\partial t} + v_F \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{15 D_s \rho_B}{r_p^2} (q^* - \bar{q}) = 0 \quad (3)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

Donde la transferencia de masa de fase sólida se aproxima mediante una fuerza matriz lineal.

En la investigación y en el modelaje del proyecto, se utilizó el modelo HSDM, ya que este se ajusta más a las condiciones que se estaban buscando al diseñar la columna de adsorción, debido a que el modelo LDF asume que las partículas dentro de este tienen una conducta lineal, la cual no corresponde al comportamiento de eliminación de residuos en la columna y consecuentemente el modelo HSDM tendrá una mejor aproximación de diseño a un modelo real. Dentro del software este se ubica en la parte media izquierda y como muestra la figura 5, a continuación:

Figura 5. Modelos FAST



Fuente: Software FAST

- **Isoterma de Langmuir.** El modelo plantea las siguientes premisas:
 - El área del adsorbente es uniforme, lo que significa que la energía de adsorción es la misma en todos los puntos y la adsorción sucede en la misma ubicación.
 - La capacidad máxima de adsorción pertenece a una capa única saturada de moléculas adsorbentes en la superficie del adsorbente.

- El adsorbato no cambia sobre la superficie del adsorbente y no hay interacción entre las moléculas de adsorbente ⁷⁴.

La ecuación que representa a la isoterma es la siguiente:

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (4)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

Donde q_e y C_e tienen el equivalente que una isoterma lineal, q_m es la capacidad máxima de adsorción y b es una constante afín con la energía de adsorción.

• **Isoterma de Freundlich.** El modelo de Freundlich es el primer modelo empírico manejado con éxito para la adsorción de modelos de fases sólidas-líquidas. Las hipótesis planteadas son:

- Una vez adsorbido, la configuración molecular no se asociará, disociará o cambiará.
- No habrá adsorción química en absoluto ⁷⁵.
- El área del adsorbente es desigual, esto significa que las zonas de adsorción no son las mismas, tienen diferentes energías de adsorción y no siempre son aprovechables.
- La adsorción ocurre en variadas capas. Para soluciones muy diluidas, esta no es una relación razonable ⁷⁶.

La ecuación del modelo de Freundlich es la siguiente:

$$q_e = K_F C_e^{1/N_F} \quad (5)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

⁷⁴ CASTELLÓ Torre. Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa, 2017.

⁷⁵ M. FRANCO y S. P. M. D. Tenev, G. L. Fontana, C. M. Torre, C. Mansilla, K. Ayala and Boeykens, Efecto Del PH En La Adsorción Del Azul de Metileno Con Chips de Quebracho Agotado, 2018.

⁷⁶ M. D. Tenev, G. L. Fontana, C. M. Torre, C. Mansilla, K. Ayala and Boeykens.

Donde q_e y C_e tienen equivalente valor que en la isoterma lineal; K_F es un parámetro que está en función del origen del método adsorbato-adsorbente y del área específica de la concentración inicial; N_F es un parámetro empírico que simboliza la dimensión de las interacciones sobre el adsorbente.

El modelo de Freundlich tiende a enunciarse en forma lineal a través de la esta expresión:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{N_F} \log C_e \quad (6)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

La ecuación muestra que una representación logarítmica de q_e en función de C_e lleva a una línea recta que admite la determinación de las cuantificaciones N_F y K_F desde de la pendiente y el intercepto, respectivamente⁷⁷.

Para este estudio, se adoptó el modelo de Freundlich el cual se adaptó mejor a la configuración y condiciones de diseño de la muestra a tratar y adicionalmente el software FAST solamente puede utilizar datos isotérmicos de Freundlich.

- **El tiempo de contacto del lecho vacío EBCT.** El tiempo de contacto de la cama vacía se calcula como el volumen de la cama ocupada por los medios adsorbentes, incluido el volumen de porosidad dividido por el caudal.

$$EBCT = \frac{BV}{Q} = \frac{m}{\rho_B Q} \quad (7)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

- **Masa de adsorbente m.** La masa de adsorbente se puede tratar como peso seco o húmedo. La masa adsorbente m , la densidad del lecho, la densidad de partículas y los parámetros de equilibrio K_F y n se basan en el mismo contenido de agua.

⁷⁷ M. D. Tenev, G. L. Fontana, C. M. Torre, C. Mansilla, K. Ayala and Boeykens.

- **Porosidad de la cama ϵ_B .** La porosidad del lecho de filtro es igual a la proporción de vacío al volumen total dentro de una capa de filtro. Se puede calcular a partir de la densidad del lecho filtrante y la densidad de la partícula adsorbente. Pero en nuestro caso se simulaban diferentes valores para encontrar el óptimo.

- **Densidad del lecho ρ_B .** La densidad de lecho se define como proporción de masa adsorbente con volumen del lecho filtrante.

$$\rho_B = \frac{m}{BV} = \rho_P (1 - \epsilon_B) \quad (8)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

Si se selecciona la densidad del lecho como parámetro de entrada, la porosidad del lecho se calculará a partir de la densidad de partículas y la porosidad del lecho (por encima de la ecuación).

- **Densidad de partículas- ρ_P .** La densidad de partículas (densidad del grano adsorbente) incluye la porosidad interna, pero excluye la fracción vacía del lecho.

- **Diámetro de partícula d_P .** Diámetro de la partícula de grano adsorbente. Como el diámetro se distribuyó dentro de un rango de tamaño de grano, se utilizó el tamaño de grano efectivo.

- **Concentración de influencia c_0 .** Concentración en fase líquida del adsorbato. FAST sólo puede trabajar con concentraciones constantes de afluentes.

- **Caudal Q .** Caudal volumétrico al adsorber. FAST requiere un valor constante del caudal.

- **Volumen de lecho BV .** Volumen ocupado por medios adsorbentes incluyendo volumen de porosidad:

$$BV = \frac{m}{\rho_B} \quad (9)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

El volumen del lecho no se utiliza como parámetro de entrada, sino que se calcula automáticamente. Se puede utilizar para verificar las dimensiones del lecho filtrante.

- **Coeficientes de isoterma de Freundlich K_F y n .** La cantidad de adsorbato adsorbido es una función de la concentración de fase líquida y llamada isoterma de equilibrio de adsorción. Se pueden utilizar diferentes funciones para describir el equilibrio de adsorción. En FAST, solo se pueden utilizar datos isotérmicos de Freundlich. Esta isoterma de adsorción fue propuesta por Freundlich (1906) como una ecuación empírica y se utiliza ampliamente para describir los datos de los adsorbentes heterogéneos.

$$q = K_F \cdot c^n \quad (10)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

El exponente Freundlich n (parámetro de capacidad de adsorción de Freundlich) es adimensional. La unidad de K_F está compuesta por las unidades de m (masa de adsorbente) y c_0 (concentración influente). Al introducir los parámetros de Freundlich, se seleccionó primero la unidad de m y c_0 y, a continuación, se introdujo n y luego K_F .

- **Coeficiente de difusión de película k_L .** También llamado coeficiente de transferencia de masa de fase líquida. La velocidad de transferencia de masa a través de la superficie exterior del adsorbente se supone que es proporcional a la superficie y la diferencia en la concentración de la solución en cantidad y la superficie adsorbente:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k_L A (c - c^*) \quad (11)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

El coeficiente de difusión de película k_L se puede estimar a partir de correlaciones empíricas para el número de Sherwood, por ejemplo, las correlaciones de Wilson y Geankoplis (1966) o Gnielinski (1978). Alternativamente, k_L se puede determinar ajustando la simulación a datos experimentales.

- **Coefficiente de difusión de superficie DS.** También llamado: coeficiente de transferencia de masa de fase sólida El transporte de masa en el grano adsorbente se supone que es la difusión de la superficie homogénea y modelado por la segunda ley de Fick.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (12)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

El coeficiente de difusión de superficie DS calculará ajustando la simulación a los datos experimentales.

- **Parámetro de distribución de Solute Dg.** El parámetro de distribución de soluto Dg representa el equilibrio de adsorción. Dg es la relación de soluto adsorbido en el grano adsorbente a la de la fase líquida.

$$D_g = \frac{\rho_B q_0}{\epsilon_B c_0} \quad q_0 = K_F \cdot c_0^n \quad (13)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

Aquí, q_0 es la concentración de fase sólida de equilibrio correspondiente a la concentración de influente c_0 . Una Dg más alta implica un cambio del equilibrio de adsorción hacia la fase sólida, lo que resulta en un avance retardado.

- **Número de Biot, Bi.** El número Biot sin dimensiones representa la relación entre la tasa de transferencia de masa de fase líquida y sólida.

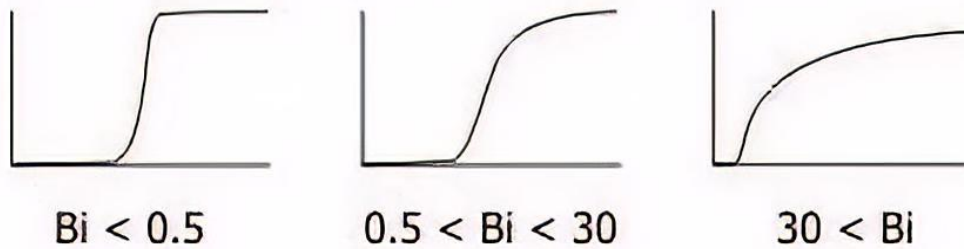
$$Bi = \frac{k_L r_p c_0}{D_s \rho_p q_0} \quad q_0 = K_F \cdot c_0^n \quad (14)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

Aquí, q_0 es la concentración de fase sólida de equilibrio correspondiente a la concentración de influente c_0 y r_p es el radio de partícula $d_p/2$. La forma de la curva

de ruptura se puede clasificar por el valor del número Biot, como se muestra en la figura 6, así:

Figura 6. Forma de curva de ruptura



Fuente: Über die Adsorption in Lösungen. Z. Phys. Chem, Freundlich, H.

- **Número Stanton, St.** El número Stanton modificado representa el coeficiente de transferencia de masa de fase líquida sin dimensiones. Cuanto menor sea el valor de St, mayor será la influencia de la propagación de la película en la forma de la curva de ruptura.

$$St = \frac{k_L m}{r_p \rho_p Q} \quad (15)$$

Aquí, r_p es el radio de partícula $d_p/2$.

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

- **Freundlich exponente n.** En la isoterma de Freundlich n , es la concentración de fase sólida adimensional y X es la concentración de fase líquida adimensional. K_F y la información sobre el equilibrio de adsorción (es decir, sobre el tiempo de avance) se incluye en el parámetro de distribución de soluto D_g .

$$Y = \frac{q}{q_0} = \frac{K_F c^n}{K_F c_0^n} = \left(\frac{c}{c_0} \right)^n = X^n \quad (16)$$

Fuente: Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters

- Formato del eje X. Se seleccionó en el tipo de eje X y se introdujo la longitud del intervalo de simulación en tiempo de funcionamiento, con un tiempo de 60 segundos, la concentración de efluentes normalizado se traza contra el tiempo de operación en segundos, minutos, horas o días.

8.3. DISEÑO DEL SISTEMA PILOTO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN

Con el fin de llegar tener una calidad de agua cercana a la requerida, se consultó la normatividad vigente en reúso del agua (Resolución 1207 de 2014) ⁷⁸, para conocer cuáles son los valores admisibles para el reúso del agua en sistemas redes contra incendio (ver cuadro 12). Al observar la normatividad, se encuentra que los parámetros admisibles para esta actividad son mínimos, es decir, y en teoría, casi cualquier tipo de agua podría ser reusada para la finalidad solicitada, pero cabe resaltar que los criterios de uso y tratamiento de las aguas para reúso también están bajo los criterios del diseñador, en nuestro caso y como se observa en el cuadro 13, existe una alta presencia de metales pesados, felones y algunos sulfuros que deben ser eliminados o reducidos en su mayoría para poder dar un uso adecuado al agua.

⁷⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Presentación reúso de Aguas residuales Tratadas Resolución 1207/2014.

Cuadro 12. Criterios de calidad de reúso

Variable	Unidad de medida	Valor límite máximo permisible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas	Descarga de aparatos sanitarios	Limpieza mecánica de vías y riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contraincendios
Fisicoquímicos					
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0
Microbiológicos					
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	1,0*E(+3)	1,0*E(+4)	1,0*E(+3)	1,0*E(+1)
Helmintos	Huevos y larvas/L	0,1	1,0	1,0	0,1
Parásitos Humanos					
Protozoos	Quistes/L	0,0	1,0	1,0	1,0
Parásitos Humanos					
Salmonella sp.	NMP/100 ml	1,0	1,0	1,0	1,0
Químicos					
Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX)	mg/L	0,001		0,001	
Ésteres Ftalatos	mg/L	0,005		0,005	
Fenoles	mg/L	0,002		0,002	
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	0,01		0,01	

Cuadro 12. (Continuación)

Variable	Unidad de medida	Valor límite máximo permisible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas	Descarga de aparatos sanitarios	Limpieza mecánica de vías y riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contraincendios
Biocidas					
2,4 D ácido	mg/L	0,0001		0,0001	
Diurón	mg/L	0,0001		0,0001	
Glifosato	mg/L	0,0001		0,0001	
Mancozeb	mg/L	0,0001		0,0001	
Propineb	mg/L	0,0001		0,0001	
Iones					
Cianuro Libre	mg CN-/L	0,05			
Cloruros	mg Cl-/L	300,0		300,0	300,0
Fluoruros	mg F-/L	1,0			
Sulfatos	mg SO42-/L	500,0		500,0	500,0
Metales					
Aluminio	mg Al/L	5,0		5,0	
Berilio	mg Be/L	0,1		0,1	
Cadmio	mg Cd/L	0,01		0,01	
Cinc	mg Zn/L	3,0		3,0	
Cobalto	mg Co/L	0,05		0,05	
Cobre	mg Cu/L	1,0		1,0	
Cromo	mg Cr/L	0,1		0,1	
Plomo	mg Pb/L	5,0		5,0	
Hierro	mg Fe/L	5,0		5,0	
Litio	mg Li/L	2,5		2,5	
Manganeso	mg Mn/L	0,2		0,2	

Cuadro 12. (Continuación)

Variable	Unidad de medida	Valor límite máximo permisible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas	Descarga de aparatos sanitarios	Limpieza mecánica de vías y riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contraincendios
Mercurio	mg Hg/L	0,001		0,001	
Molibdeno	mg Mo/L	0,07		0,07	
Níquel	mg Ni/L	0,2		0,2	
Vanadio	mg V/L	0,1		0,1	
Metaloides					
Arsénico	mg As/L	0,1		0,1	
No Metales					
Selenio	mg Se/L	0,01		0,02	
Otros					
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días (DBO5)	mg O2/L			30,0	

Fuente: Resolución 1207 de 2014

Cuadro 13. Contaminantes residuales por remover

Parámetro	unidad	valor	masa molecular, u	valencia	equivalente gramo	mEq total	Valor admisible
Cadmio Total	mg/L Cd	0.015	112.4110	2	56.2055	0.00026688	
Cinc	mg/L Zn	0.070	65.4090	2	32.7045	0.00214038	

Cuadro 13. (Continuación)

Parámetro	unidad	valor	masa molecular, u	valencia	equivalente gramo	mEq total	Valor admisible
Cloruros	mg/L Cl ⁻	1776.90 0	35.45 30	-1	35.4530	50.119877	300
Cobalto	mg/L Co	0.050	58.93 32	3	19.6444	0.00254525	
Cobre Total	mg/L Cu	0.212	63.54 60	2	31.7730	0.00667233	
Compuestos Fenólicos	mg/L C ₆ H ₆ O	0.115	94.06 42	6	15.6774	0.00733542	
COT	mg/L C	155.000	12.01 07	4	3.0027	51.6206383	
Cromo Total	mg/L Cr	0.180	51.99 61	3	17.3320	0.01038539	
Hidrocarburos Totales	mg/L HC	18.800	13.00 00	1	13.0000	1.44615385	
Níquel	mg/L Ni	0.204	58.69 34	2	29.3467	0.00695138	
Plomo Total	mg/L Pb	0.090	207.2 000	2	103.600 0	0.00086873	
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	1000.00 0	96.06 30	-2	48.0315	20.8196704	500
Sulfuros Totales	mg/L S	23.200	32.06 50	-2	16.0325	1.44706066	
Σ		2974.83				125.5	

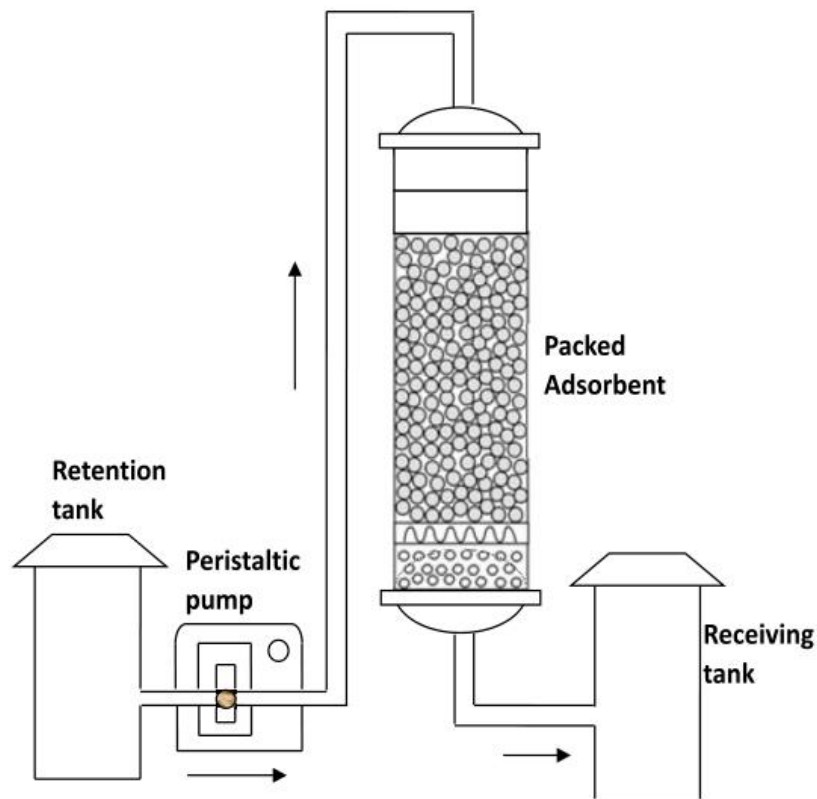
Fuente: El autor

Luego de tener los parámetros a remover se hizo un consolidado y un equivalente de masa total para así poder ingresar los datos en el software y empezar a hacer las pruebas piloto para las simulaciones de la columna, para esto se usaron 3 tipos de biomásas modificadas, aserrín de pino, rumex y cascarilla de arroz y se realizó una modelación con cada una de ellas variando parámetros tales como la masa, la porosidad, el diámetro de la partícula de carbón, ya sea en polvo o granular, el caudal de trabajo y la densidad de la partícula de biomasa, a su vez teniendo un tiempo fijo de exposición de 60 segundos.

Al finalizar las simulaciones el software arrojó los resultados de concentración versus el tiempo de trabajo de la columna y se ponderó el resultado de exposición de cada simulación y así se recogieron los datos que dieron las mejores condiciones de diseño y con estos se planteó un dimensionamiento óptimo para la columna, el ideal de esta es que llegue a ser lo más parecido a una columna real (para poder ser implementada en un futuro en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia), ver figura 7 como referente.

El diseño conceptual de la columna de adsorción tendrá un cuerpo de vidrio o de PVC con un diámetro interno entre 1.5 y 10.0 cm y una longitud entre 50 y 200 cm. En la parte inferior se colocará una capa de perlas de vidrio o de grava y se llenará con aproximadamente 2000 g de material modificado. Se bombeará una concentración influyente de aproximadamente 125.5 mg/L desde la parte superior de la columna fluyendo de arriba hacia abajo. Véase figura 7 como referencia.

Figura 7. Modelo ejemplo Columna de Adsorción



Fuente: L. Yanyan et al., "Removal of acetaminophen from synthetic wastewater in a fixed-bed column adsorption"

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado de la búsqueda de información para constituir la caracterización del agua, de los parámetros a ser tratados por la columna de adsorción y de la comparación respecto a la norma de reúso se puede observar en el siguiente cuadro (ver cuadro 14).

Cuadro 14. Cuadro de caracterización del agua y su comparativo con la normatividad de reúso

PARÁMETRO	UND	VALOR	Reúso 1207 de 2014
Absorbancia a (670 nm)		42.1	
Acidez		360	
acidez total como CaCO_3	mg/L CaCO_3	0	
Alcalinidad total como CaCO_3	mg/L CaCO_3	4.65	
Cadmio Total	mg/L	0.015	
Cinc	mg/L	0.07	
Cloruros	mg/L Cl	1776.9	300
Cobalto	mg/L	0.05	
Cobre Total	mg/L	0.212	
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	27*E(-3)	1,0*E(+1)
Color	U Pt-C	>500	
Compuestos Fenólicos	mg/L	0.115	
Concentración color índigo	mg/L	437.17	
Conductividad	Us/cm	17.31	
Carbono Orgánico Total COT	mg/L C	155	
Cromo Total	mg/L Cr	0.18	
DBO5	mg/L	813	
DQO	mg/L	1236	
Electroconductividad		8.13	
Grasas y Aceites	mg/L	51.7	
Helminthos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	0	0.1
Hidrocarburos Totales	mg/L	18.8	
Níquel	mg/L	0.204	
Oxígeno disuelto	mg/L	3.19	
pH	und	7.78	6,0 - 9,0
Plomo Total	mg/L	0.09	
POR	mV	-315	

Cuadro 14. (Continuación)

PARÁMETRO	UND	VALOR	Reúso 1207 de 2014
Potencial zeta	mV	-16.5 +/- 15.2	
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	N/A	1
Salinidad		6.5	
Salmonella sp	NMP/100 ml	N/A	1
Solidos disueltos	mg/L	12.786	
Solidos Sedimentables	mg/L	60	
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	266	
Sulfatos	mg/L SO_4^{-2}	1000	500
Sulfuros Totales	mg/L	23.2	
Temperatura	°C	32	
Tensoactivos	mg/L	5.05	
Turbidez	NTU	240	

Fuente: El autor

La columna de color amarillo son los valores aceptados por la normatividad de reúso para sistemas de redes contra incendio. En color azul se marcaron los contaminantes a remover a través de la columna de adsorción, la mayoría de estos la norma no los contempla por el tipo de reúso, pero al ser metales pesados en su mayoría, se ve la necesidad de removerlos para que el agua no sea un factor de riesgo para la salud humana.

Al tener preparado, la caracterización del agua, los contaminantes a remover, los parámetros de modelación y las condiciones para ingresar en el software, se inició cada una de las simulaciones, teniendo en cuenta las variaciones para cada condición (cuadro 10), agrupando estas simulaciones en conjuntos de resultados y haciendo las comparaciones de cada grupo, es decir, el primer grupo de simulaciones se realizó con el aserrín y el carbón activado en polvo (como se muestra en figura 8) con los siguientes parámetros de diseño:

- Masa, m: 50 g
- Porosidad, eB: 0.1 o 10%
- Densidad de la partícula, ρ_P : 0.5 g/cm³
- Diámetro de la partícula de carbón, d_p : 0.25 mm
- Concentración, c_0 : 125.5 mg/L

- Caudal, Q: 10 m³/d
- n: 0.521
- KF: 1.11 (mg/g)*(L/mg)ⁿ
- kL: 0.21 m/s
- Ds: 0.00001 m²/s
- Tiempo de operación: 60 segundos

Figura 8. Primera simulación

001 - FAST 2.1beta - Fixed-bed Adsorption Simulation Tool

Name: 001-aserr

Operational Parameters

☐ EBCT: 0.959998 s empty bed contact time

☒ m: 50 g mass of adsorbent

☒ eB: 0.1 bed porosity

☐ rho_B: 0.45 g/cm³ bed density

rho_P: 0.5 g/cm³ particle density

dp: 0.25 mm particle diameter

c0: 125.5 mg/L influent concentration

Q: 10 m³/d flow rate

BV: 111.111 mL bed volume

Equilibrium and Kinetics

n: 0.521 Freundlich exponent

KF: 1.11 $\frac{\text{mg}}{\text{g}} \left[\frac{\text{L}}{\text{mg}} \right]^n$ Freundlich constant

kL: 0.21 m/s film diffusion coefficient

Ds: 0.00001 m²/s surface diffusion coefficient

Experiment type

☒ Column breakthrough ☐ Batch reactor

Dimensionless Parameters

Dg: 493.498 solute distribution parameter

Bi: 4.78726e-002 Biot number

St: 1451.52 Stanton number

n: 0.521 Freundlich exponent

Model selection

☐ HSDM ☒ HSDM (faster)

☐ LDF

☒ Freundlich isotherm ☐ Langmuir isotherm

X-axis

☒ 60 s operation time

☐ 6.94446e-003 m³ volume treated

☐ 0.138889 m³/kg volume treated by mass

Start calculation estimated calculation time: 6 h

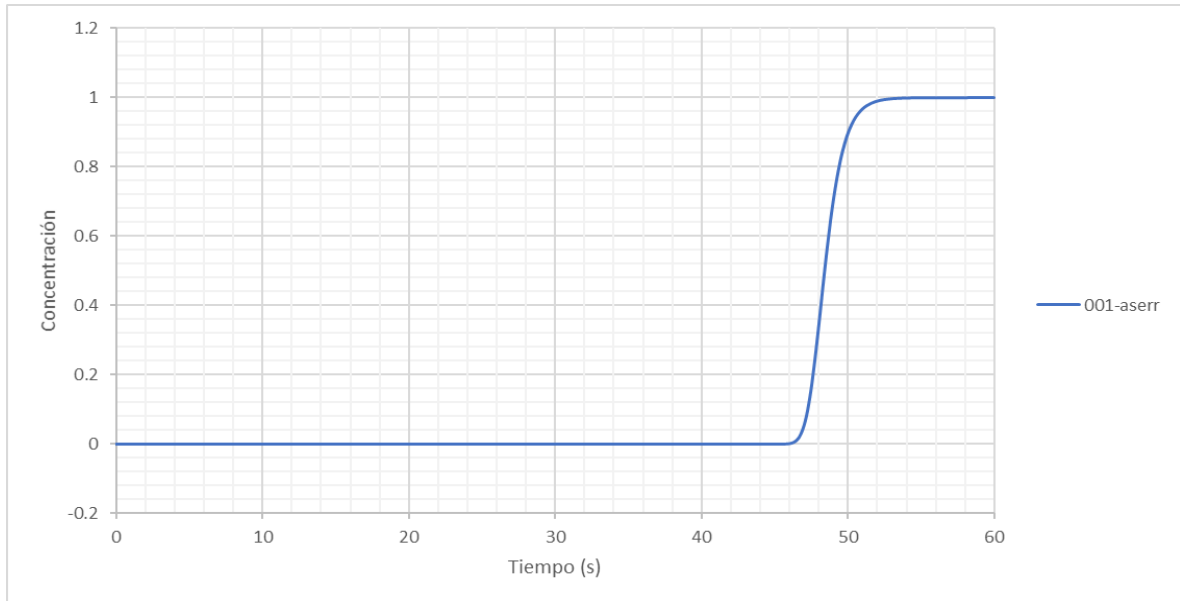
Info Help >>

Fuente: Software FAST

Luego de finalizada la simulación se lograron consolidar los datos de salida de la relación entre concentración final y concentración inicial (c/c0) contra el tiempo de exposición, donde el resultado arrojado fue una serie de 200 datos, estos se graficaron para poder observar el comportamiento en el transcurso del tiempo de exposición del contaminante dentro de la columna de adsorción, en el cual la relación de la concentración empieza a variar y así se pudo determinar cuáles eran los indicadores de diseño adecuados según las condiciones iniciales, para así obtener un tiempo de exposición óptimo (ni muy acelerado, ni muy lento) y así

llegar a un 100% (valor idealizado) en la relación de la concentración y poder mantener un tiempo adecuado de exposición. Para ejemplificar mejor esto, en la figura 9, se puede observar el resultado que se obtuvo de la primera simulación de la biomasa de aserrín con carbón activado granular.

Figura 9. Resultado simulación 001 de aserrín y carbón activado en polvo



Fuente: El autor

De la misma forma se realizaron un total de 72 simulaciones, es decir, 24 simulaciones por cada biomasa modificada (aserrín de pino, rumex, y cascarilla de arroz) y se hizo el comparativo analítico por un método gráfico entre estos resultados y donde así se escogieron los mejores criterios para el diseño.

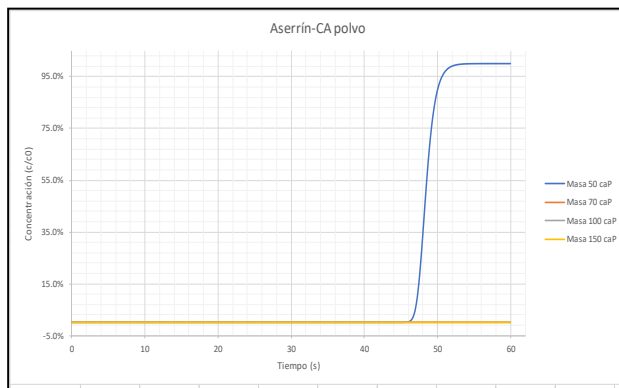
El primer parámetro modificado en cada una de las simulaciones fue la masa, con valores de: 50, 70, 100 y 150 gramos; el segundo parámetro modificado fue la porosidad con valores entre 0.20 (20%) y 0.50 (50%); el tercer parámetro modificado fue el caudal con valores entre los 50 y los 1000 m³/día o 0.6 litros por segundo y 12 litros por segundo aproximadamente. Nuevamente la variación se repitió en el mismo orden y con los mismos parámetros de diseño, pero esta vez cambiando el diámetro de la partícula de carbón de polvo (0.25 mm) por carbón activado granular (1.5 mm). Estas condiciones se ejecutaron para cada una de las biomásas trabajadas (aserrín de pino, rumex, y cascarilla de arroz).

9.1. SIMULACIONES

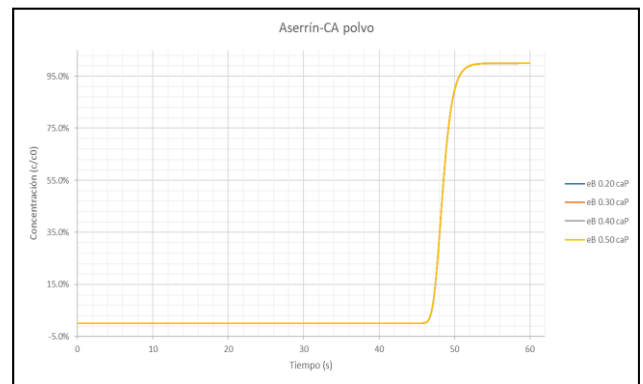
Los resultados gráficos de la comparación de las curvas de simulación de cada uno de los diferentes escenarios, es decir, la variación en las masas, la variación en las porosidades y la variación en los caudales, para la biomasa modificada de aserrín y el carbón activado en polvo se pueden observar en la figura 10 (para observar al detalle cada una de las curvas de las figuras 10, 11 y 12, producto de las simulaciones, véase el anexo B. “Simulaciones y comparativos”, hojas “Aserr masas, Aserr eB y Aserr Q”)

Figura 10. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el aserrín de pino y el carbón activado en polvo

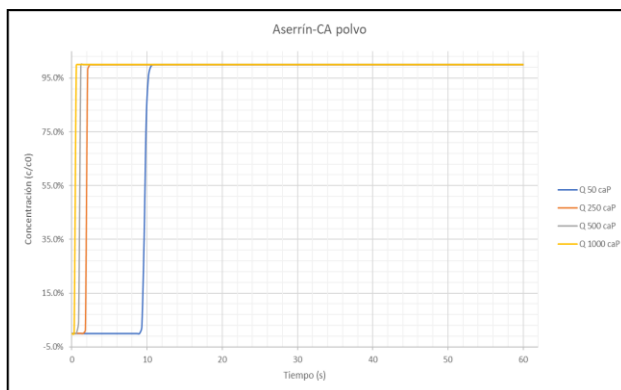
(a)



(b)



(c)



(a) Variación de masas

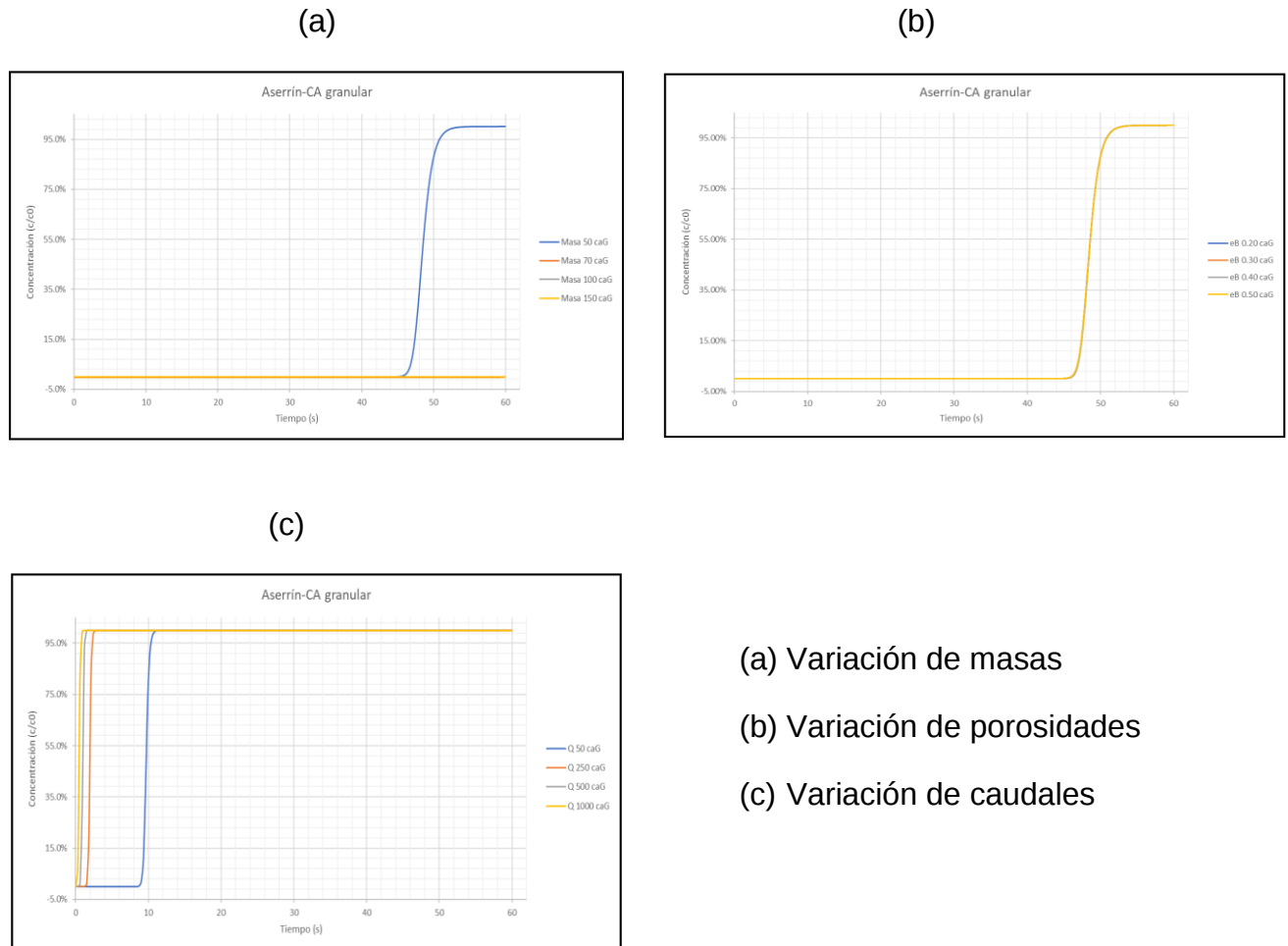
(b) Variación de porosidades

(c) Variación de caudales

Fuente: El autor

De igual forma se presentan los resultados de las comparaciones de las simulaciones del aserrín de pino, pero en este caso con la modificación principal del carbón activado granular, véase figura 11, a continuación:

Figura 11. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el aserrín de pino y el carbón activado granular

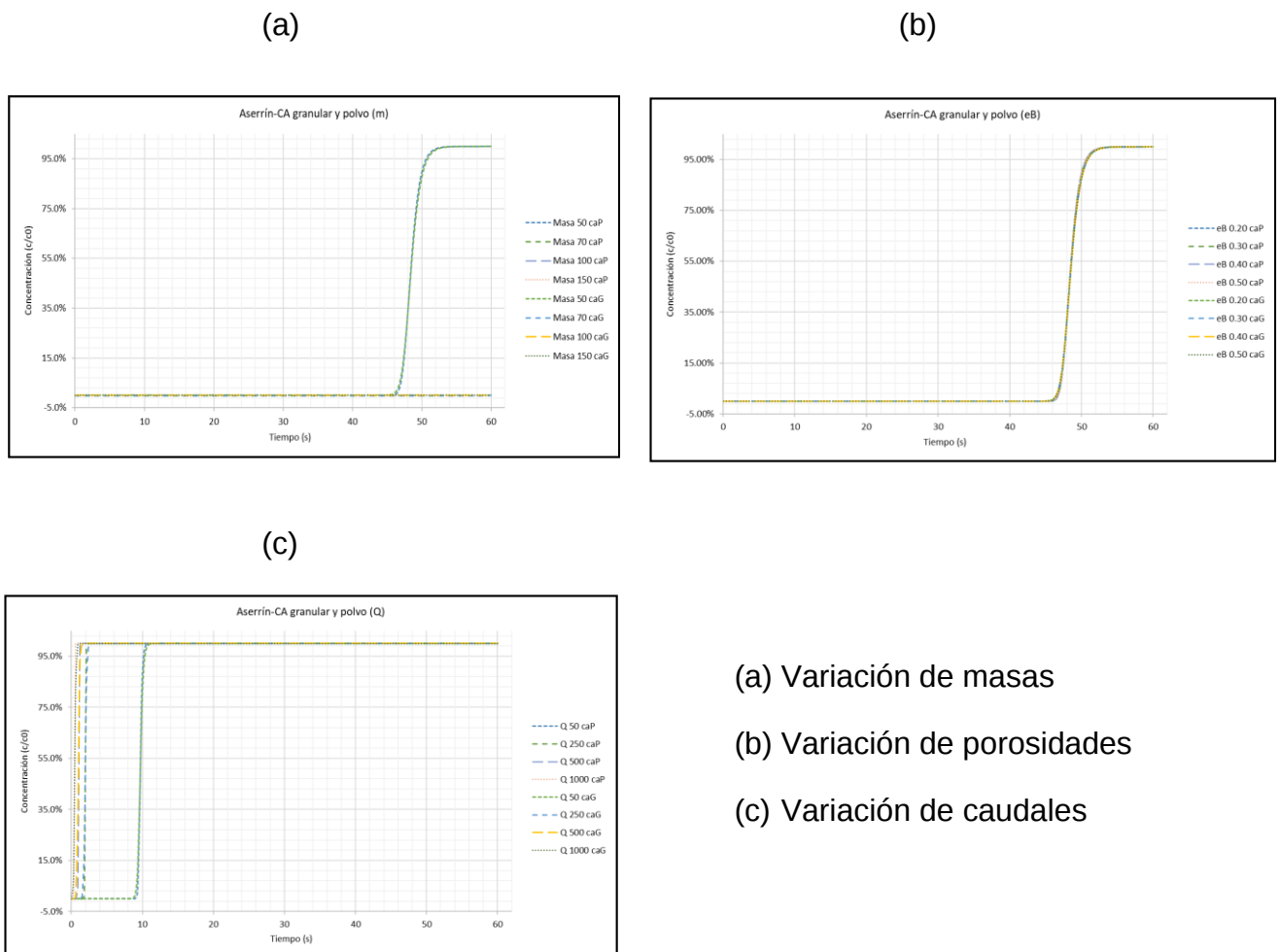


Fuente: El autor

Posterior a la obtención de estos resultados se realizó la comparación gráfica entre las diferenciaciones obtenidas por las muestras de aserrín de pino en el uso de los dos tipos de carbón activado para cada una de las variaciones de masa, porosidad y caudal, véase figura 12 a continuación (para observar al detalle cada

una de las curvas producto de las simulaciones, véase el anexo B. Simulaciones y comparativos, hojas “Aserr masas, Aserr eB y Aserr Q)

Figura 12. Comparación variación de masas, porosidades y caudales en el aserrín con carbón activado granular y en polvo



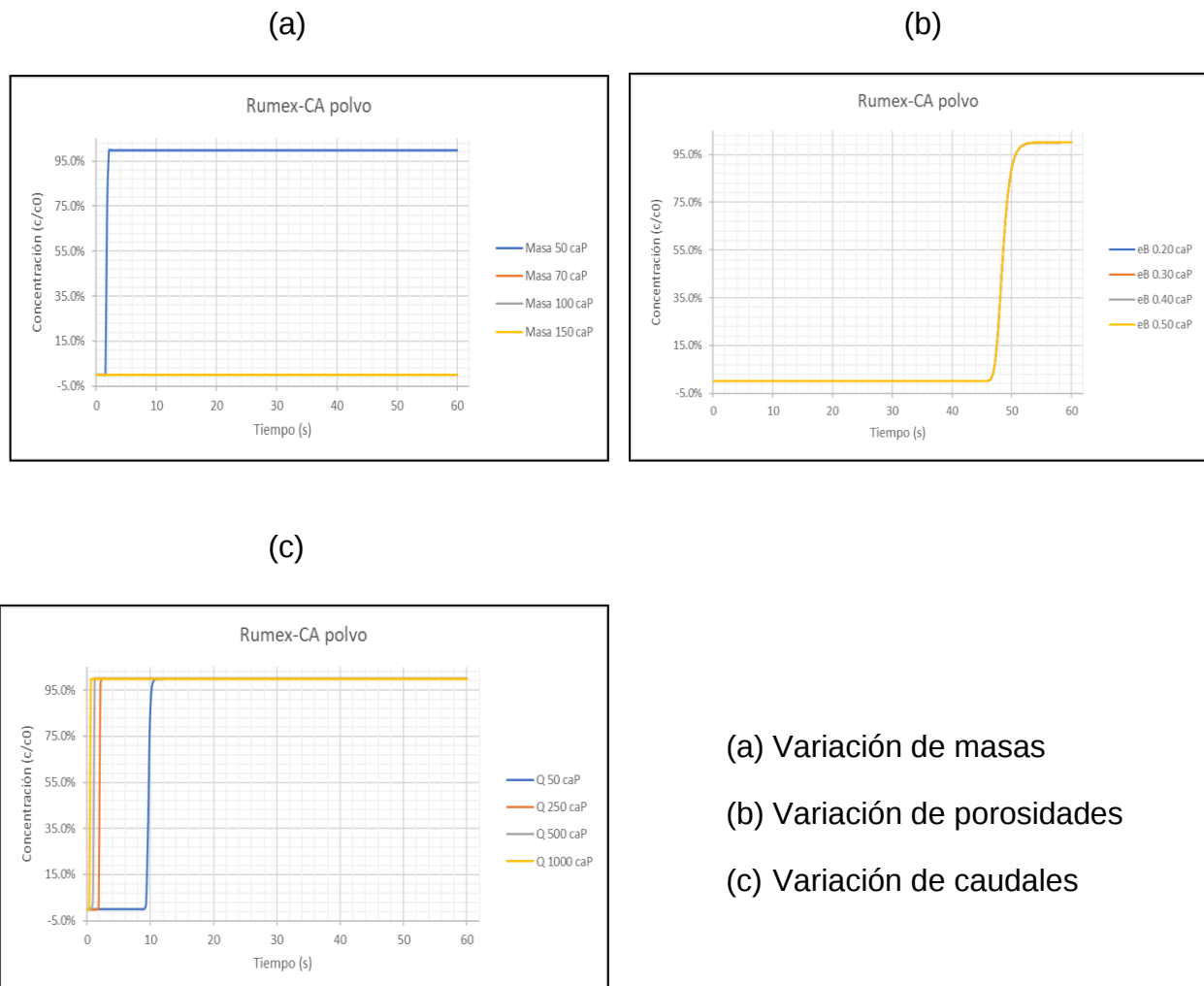
Fuente: El autor

De esta manera y de igual forma, se realizó el mismo procedimiento, para el rumex y para la cascarilla de arroz, arrojando los siguientes resultados (véase figuras de la 13 a la 15 para observar los resultados de las simulaciones con

rumex y de la 16 a la 18 para ver los resultados obtenidos de la simulación con la cascarilla de arroz).

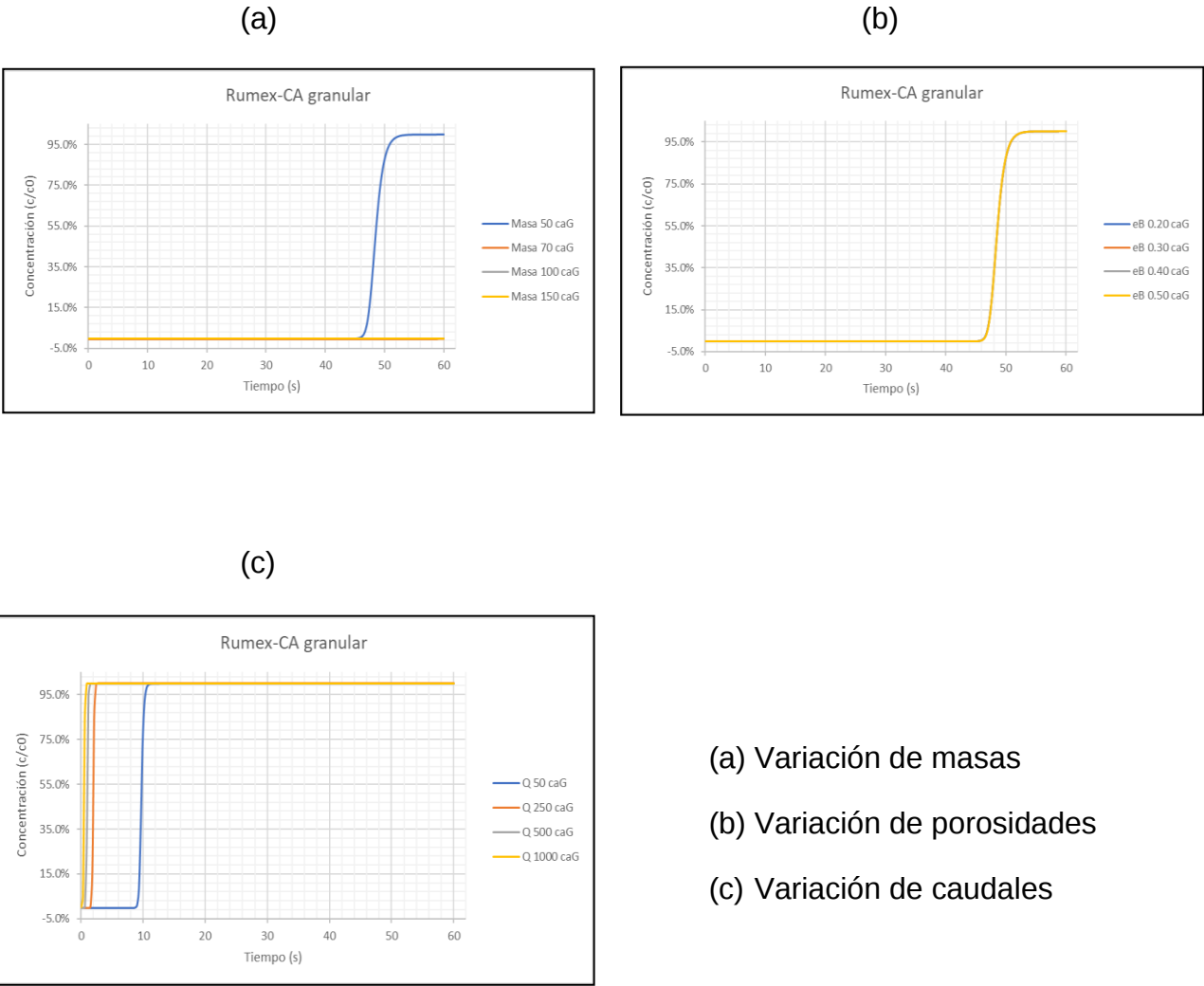
Para observar al detalle cada una de las curvas producto de las simulaciones, véase el anexo B. Simulaciones y comparativos, hojas “Aserr masas, Aserr eB, Aserr Q, Rumex masas, Rumerx eB, Rumex Q, Arroz masas, Arroz eB y Arroz Q.

Figura 13. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el rumex y el carbón activado en polvo



Fuente: El autor

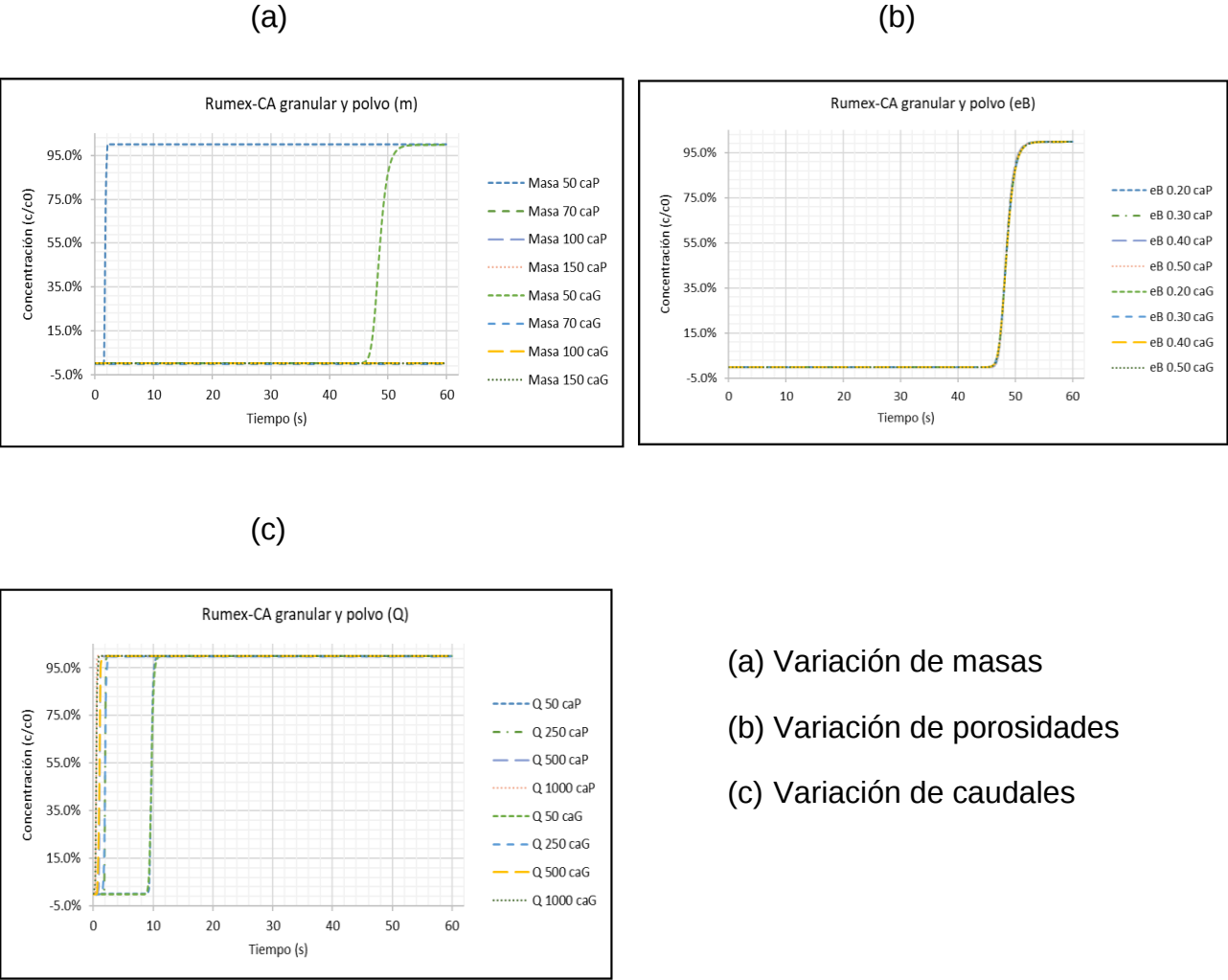
Figura 14. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para el rumex y el carbón activado granular



- (a) Variación de masas
(b) Variación de porosidades
(c) Variación de caudales

Fuente: El autor

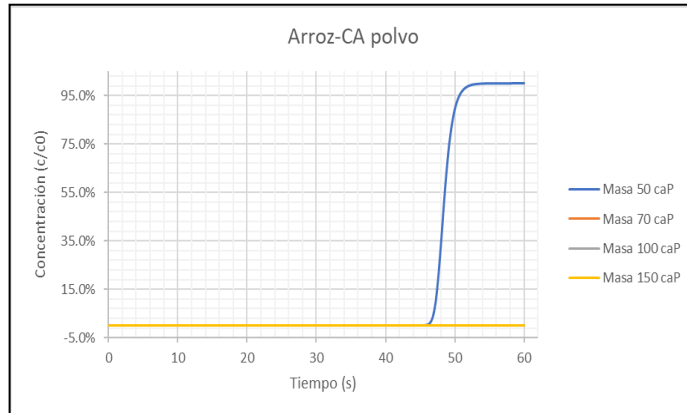
Figura 15. Comparación variación de masas, porosidades y caudales en el rumex con carbón activado granular y en polvo



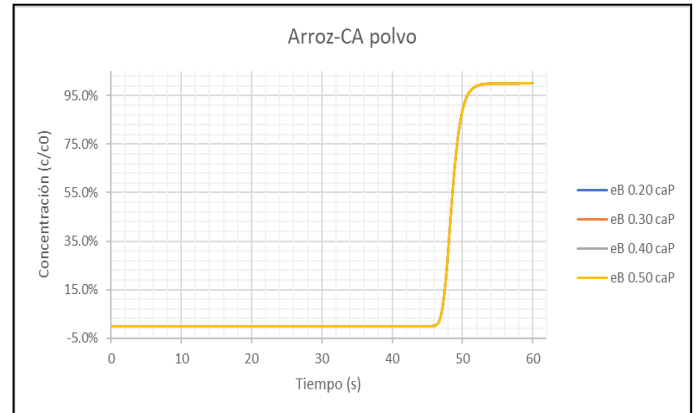
Fuente: El autor

Figura 16. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para la cascarilla de arroz y el carbón activado en polvo

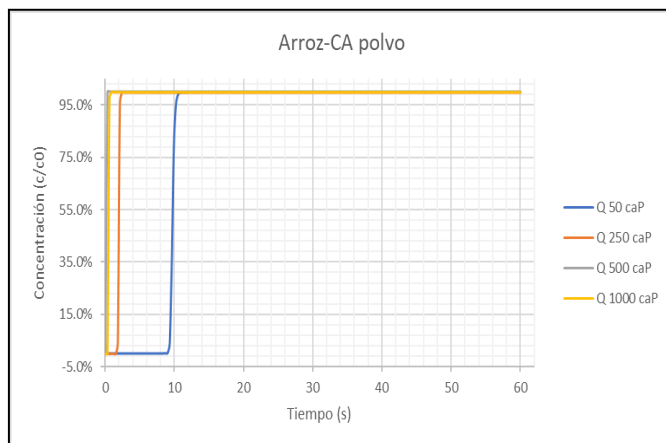
(a)



(b)



(c)



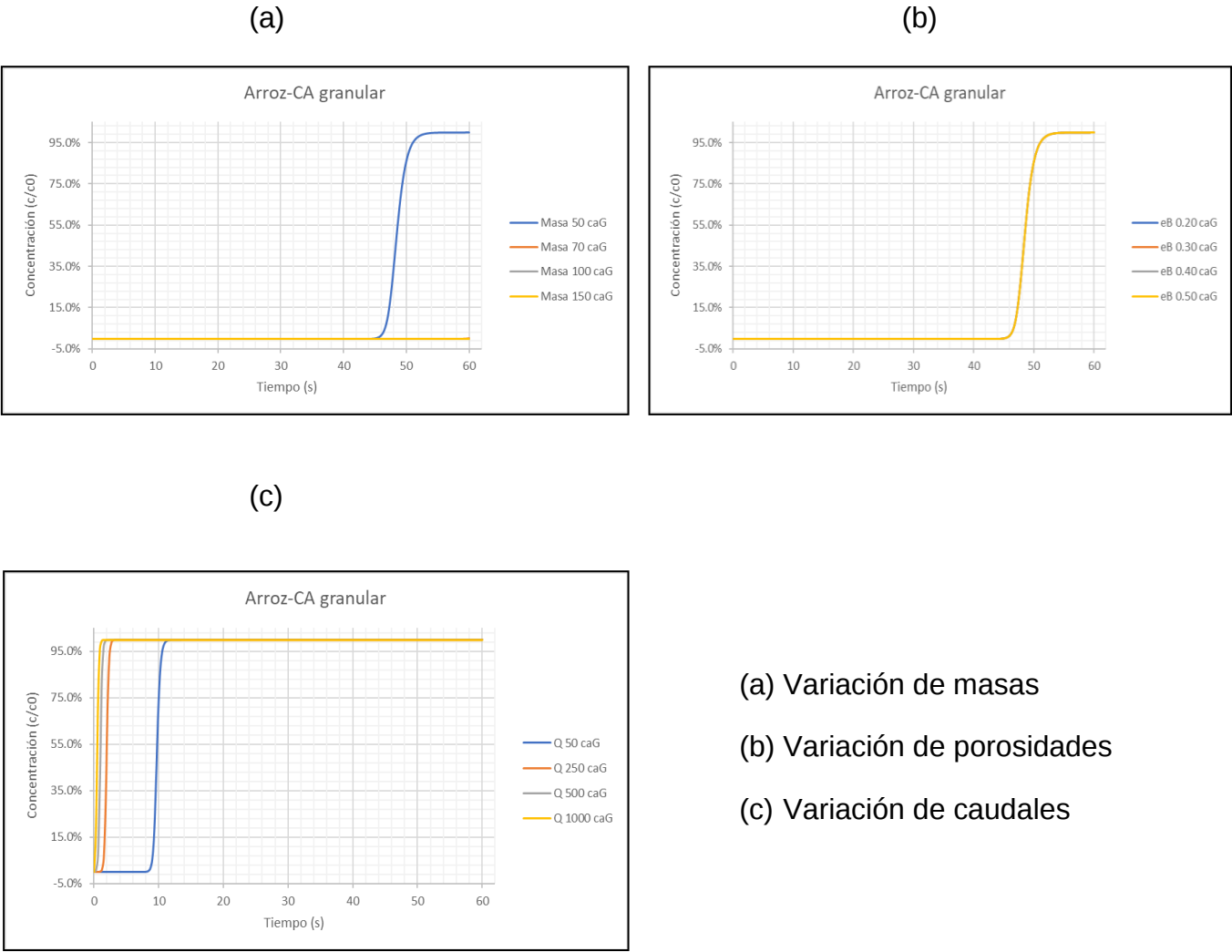
(a) Variación de masas

(b) Variación de porosidades

(c) Variación de caudales

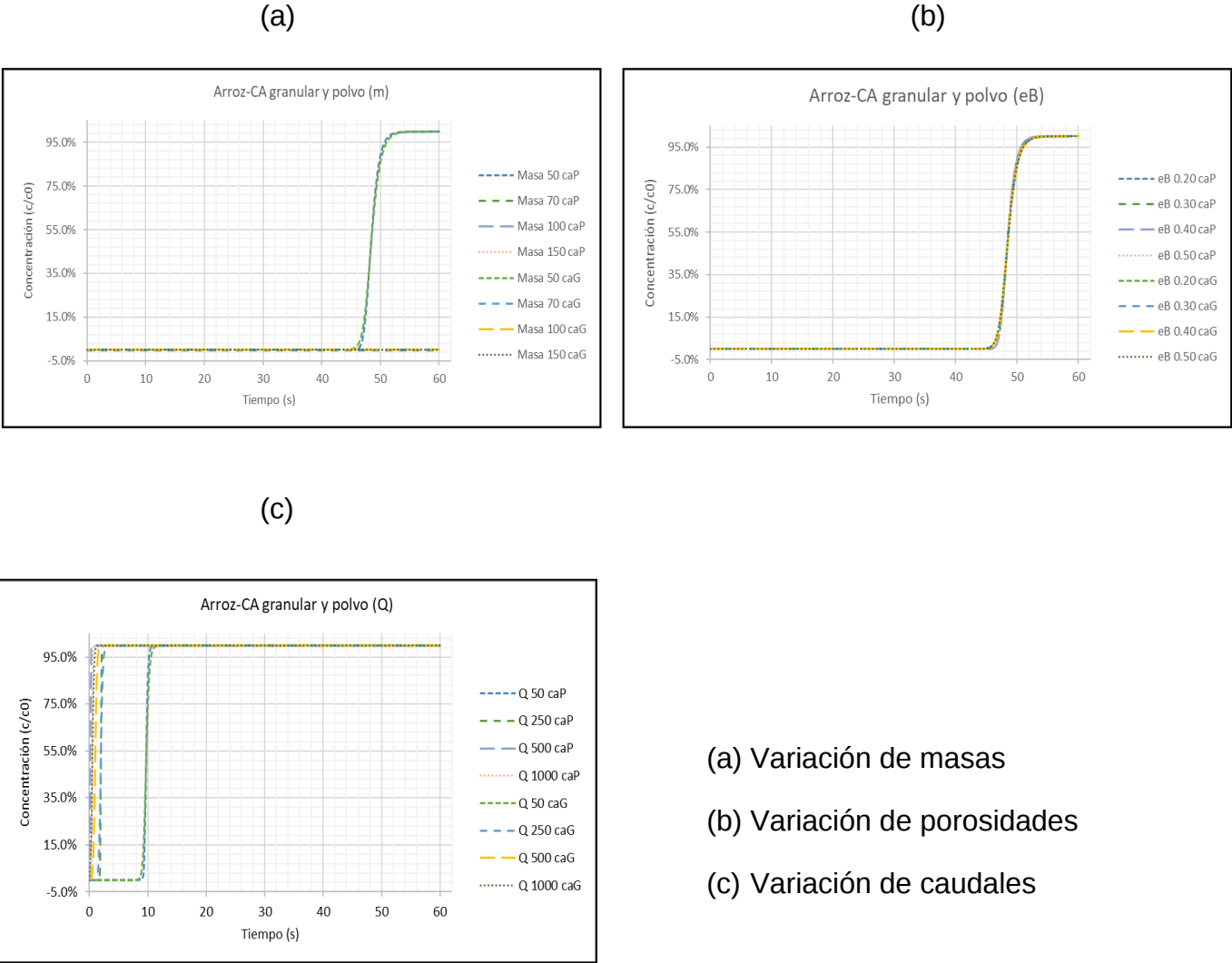
Fuente: El autor

Figura 17. Curvas de simulación, variación de masas, porosidades y caudales para la cascarilla de arroz y el carbón activado granular



Fuente: El autor

Figura 18. Comparación variación de masas, porosidades y caudales en el rumex con carbón activado granular y en polvo



Fuente: El autor

9.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LAS SIMULACIONES

Al analizar cada uno de los parámetros simulados y sus comportamientos se encontró que las variaciones entre los diferentes tipos de biomasa son mínimas y no muestran una significancia alta en el diseño de la curva de ruptura para el modelado de la columna de adsorción, también a su vez se pudo observar que algunos valores no son aptos para el diseño, como por ejemplo la variabilidad en la masa, esta solamente tuvo un desempeño apto en el valor de 50 gramos en todas las simulaciones con la diferencia que en el comportamiento del rumex el carbón activado en polvo no tuvo un comportamiento favorable para este, es así cómo se extrajeron los valores óptimos para el ajuste y realización de una nueva simulación con estos nuevos valores, fundamentado en esto, se obtuvo la siguiente información (véase cuadro 15).

Cuadro 15. Valores óptimos de simulación

Análisis de valores óptimos de las simulaciones				
Parámetro	Biomasa	Valor óptimo	caP	caG
masa	Aserrín	50	x	x
	Rumex	50		x
	Arroz	50		x
eB	Aserrín	0.1 a 0.5	x	x
	Rumex	0.1 a 0.5	x	x
	Arroz	0.1 a 0.5	x	x
Q	Aserrín	10		x
	Rumex	10		x
	Arroz	10		x

Fuente: El autor

Como resultado, se tomaron los siguientes datos para efectuar una simulación final por cada tipo de biomasa y obtener la curva de ruptura final para así determinar las dimensiones finales de la columna (véase cuadro 16).

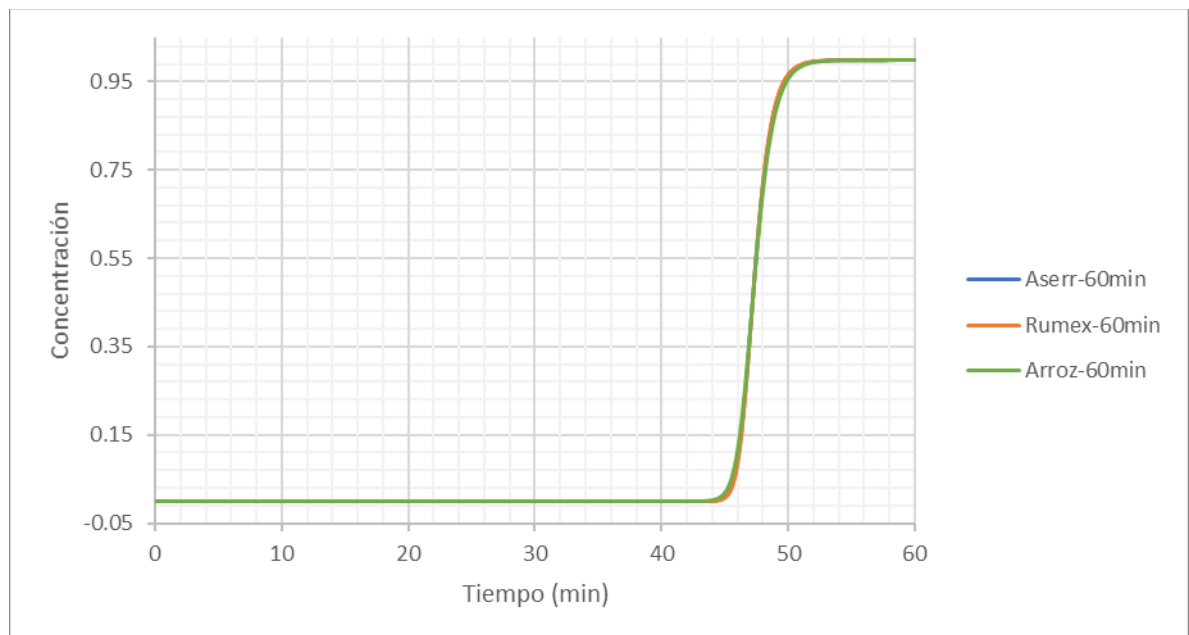
Cuadro 16. Valores finales simulaciones

Valores finales			
Parámetro	Biomasa	Valor	caG
masa	Aserrín	50	x
	Rumex	50	x
	Arroz	50	x
eB	Aserrín	0.1	x
	Rumex	0.1	x
	Arroz	0.1	x
Q	Aserrín	10	x
	Rumex	10	x
	Arroz	10	x

Fuente: El autor

El resultado final de las simulaciones utilizando los parámetros finales obtenidos en las lecturas para el diseño fue el siguiente, véase figura 19 (para observar la gráfica con mayor precisión, véase Anexo C. Simulaciones Finales).

Figura 19. Gráfica c/c0 vs Tiempo de las simulaciones finales



Fuente: EL autor

Se pudo observar que la divergencia entre la variación de cada una de las biomásas es casi imperceptible, tanto así, que el aserrín y el rumex tienen un comportamiento, por poco idéntico y con estos valores, pero la biomasa que tuvo el mejor comportamiento en tiempo de trabajo y exposición fue la cascarilla de arroz, obteniendo un tiempo para que la columna empezara a reducir la concentración de material de 35.1 minutos con un porcentaje de reducción muy por debajo del 0.001%.

Cabe resaltar que si se aumenta porosidad y se aumenta el caudal el tiempo se reducirá considerablemente, pero el tiempo de funcionamiento se reduciría casi a menos de 10 segundos, el cual no genera una curva de ruptura, si no un comportamiento lineal, donde la mayor parte de la concentración no tendría ningún tipo de tratamiento.

De acuerdo con los análisis finales de la investigación, se pudo observar que la variación en la masa inicial debe estar alrededor de los 50 gramos o inferior a este para poder alcanzar una curva ideal, ya que al incrementar el valor la columna de adsorción no genera ningún cambio en la concentración inicial a tratar dentro de ella y por consiguiente el tiempo de exposición debería incrementarse sustancialmente para que este fuese efectivo para el tratamiento del contaminante.

Por otra parte, la porosidad no tuvo significancia dentro del proceso de remoción de contaminante concentrado, su participación significativa fue en tiempo de duración de la simulación, ya que a una menor porosidad el tiempo de tratamiento aumentaba notablemente, pero durante el tiempo de exposición mantenía la misma correlación de concentración inicial versus concentración final, lo que dio como resultado una curva similar para las porosidades investigadas (entre el 10% y el 50%).

La variación de los caudales, por su parte, generan un estado atípico del comportamiento de la columna, es decir, al aumentar el caudal de trabajo la concentración se reduce significativamente en un periodo de tiempo muy corto, pero como ya se estableció en un principio, el ideal es buscar un comportamiento que no sea lineal y que establezca una correlación directa con el tiempo de exposición, por lo que esto podría afectar el diseño final de la columna de adsorción y la simulación en el software, por lo tanto se estableció que el caudal máximo permitido para este diseño es de 10 m³/día o aproximadamente 7 L/min.

Es así, como se vieron reflejados resultados favorables en el proceso de adsorción y luego de transcurrido el tiempo de operación el modelo alcanza un 99% del valor de la concentración inicial, en los tres modelos, lo que hizo inferir, que el agua puede ser utilizada para el reúso que se estaba buscando. En comparación con otros estudios el nivel de concentración final alcanzado es relativamente similar, pero todo en función del tiempo de operación, la concentración de contaminante a

eliminar y la biomasa utilizada para tal fin, como en el caso del modelo de adsorción de plomo y cadmio diseñado con un lecho fijo de residuos de cacao, manteniendo parámetros fijos como el pH, la velocidad de flujo y la concentración inicial, las pruebas de adsorción arrojaron una remoción del 91.32%⁷⁹. Por otro lado, el diseño de una columna de adsorción diseñada solamente con lecho de carbón activado donde el experimental y el diseño simulado de la columna no obtuvieron el mismo resultado mostrando una gran diferencia en los resultados calculados, alcanzando un valor cercano al 70% de remoción en la simulación⁸⁰.

9.3. DISEÑO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN

9.3.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA

Al obtener las condiciones de operación de la modelación final, de las biomosas modificadas con el carbón activado granular, los cálculos, dimensionamientos, especificaciones y condiciones de diseño son los siguientes:

Cuadro 17. Parámetros para cálculos de dimensión de la columna

Parámetro	Valor
Concentración de entrada (mg/L)	125.5
Concentración final (mg/L)	16.4 o menor
Caudal (m ³ /d)	10
Densidad aparente del carbón activado granular	500 g/L
Kf [mg/L * (L/mg) ⁿ]	1.11
c mg/L	125.5
n	0.521

Fuente: El autor

Ecuación de estimación de relación de carbón activado gramos de adsorbente por litros de adsorbato:

⁷⁹ JOSÉ Lara and others, 'Adsorción de Plomo y Cadmio En Sistema Continuo de Lecho Fijo Sobre Residuos de Cacao Adsorption of Lead and Cadmium in Continuous of Fixed Bed on Cocoa Waste Adsorção de Chumbo e Cádmio No Sistema de Leito Fixo Contínua Relativa Aos Resíduos de Cacau', 29.2 (2016), 113–24 <<https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>>.

⁸⁰ CASTELLÓ Torre. Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa, 2017.

$$\boxed{\frac{m_e}{Q} = \frac{C_0 - C_u}{q_e}} \quad (17)$$

Fuente: Diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo de adsorción a escala de laboratorio.

Se empleó entonces la ecuación de isoterma de Freundlich (ecuación 13) y sustituimos en la ecuación número 22 así:

$$\boxed{\frac{m_e}{Q} = \frac{C_0 - C_u}{K_F * c^n}} \quad (18)$$

Fuente: Diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo de adsorción a escala de laboratorio.

$$\frac{m_e}{Q} = 0.792$$

$$m_e = 2200 \text{ g de carbón activado}$$

$$\text{Volumen lecho de carbón} = \frac{m_e}{\rho_e}$$

$$\frac{m_e}{\rho_e} = 4.4 \text{ L}$$

- **Altura del lecho de carbón activado:**

Área transversal del lecho. Se asume un tubo de 3 pulgadas de diámetro nominal, es decir, 88 mm elegido para la columna, se tiene:

$$A_t = \left(\frac{\pi}{4}\right) * D^2$$

$$A_t = 0.00608 \text{ m}^2 \text{ ó } 6082.12 \text{ mm}^2$$

- Altura del lecho

$$H = \frac{V_c}{A_t} = \frac{7.5 \text{ L} * 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{L}}{0.00608 \text{ m}^2} = 1.2336 \text{ m}$$

Se puede redondear a 1.30 m y adicional se deja una cama de protección de 0.20 m que sirve como soporte en material granular tipo grava.

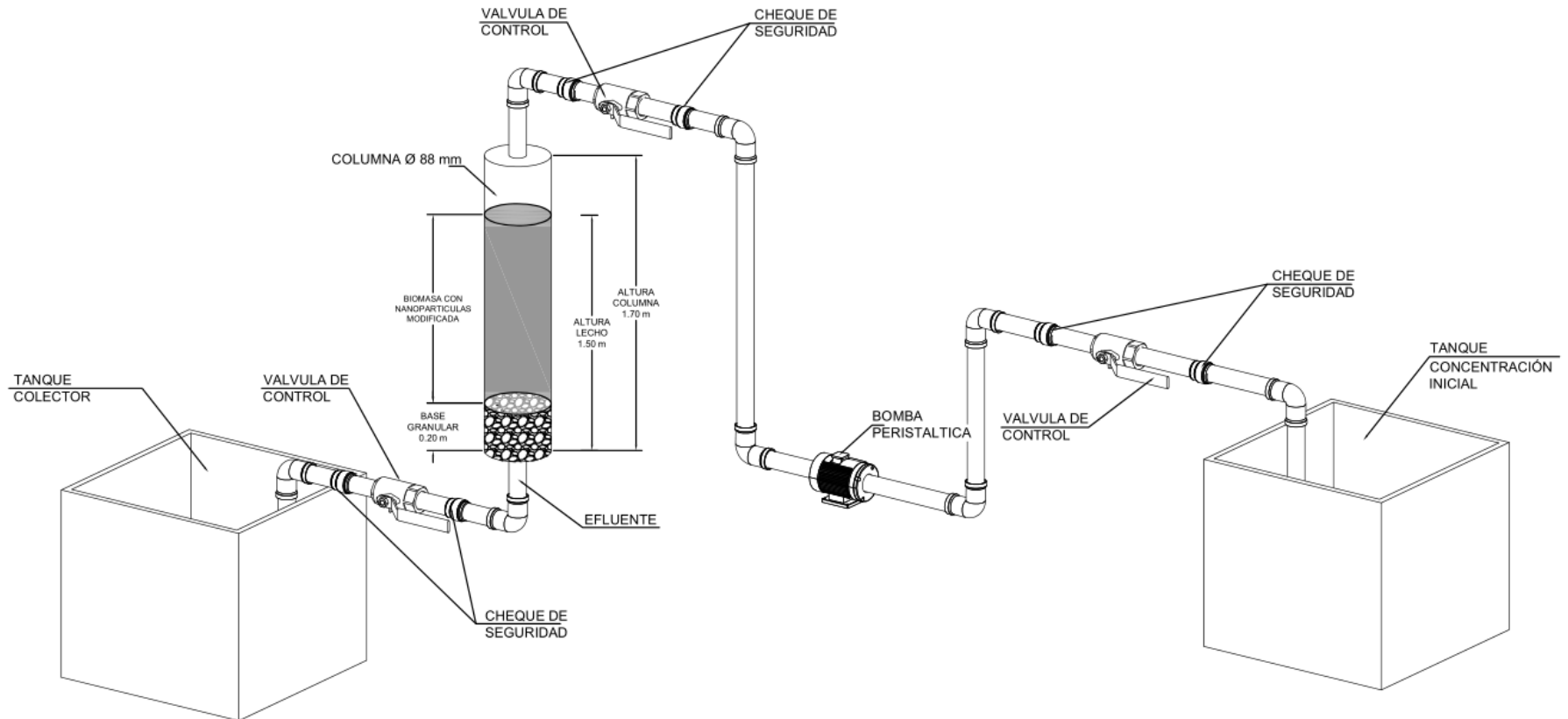
- Altura de la columna total. Se incrementa en un 20% para dejar espacio libre para compensar el proceso de adsorción, que eleva un poco el lecho, como también, un nivel para libre flujo.

$$H_t = 1.2 * 1.2336 = 1.48 \text{ m, se redondea a } 1.50 \text{ m}$$

Altura total final: 1.50 m + 0.20 m = 1.70 m

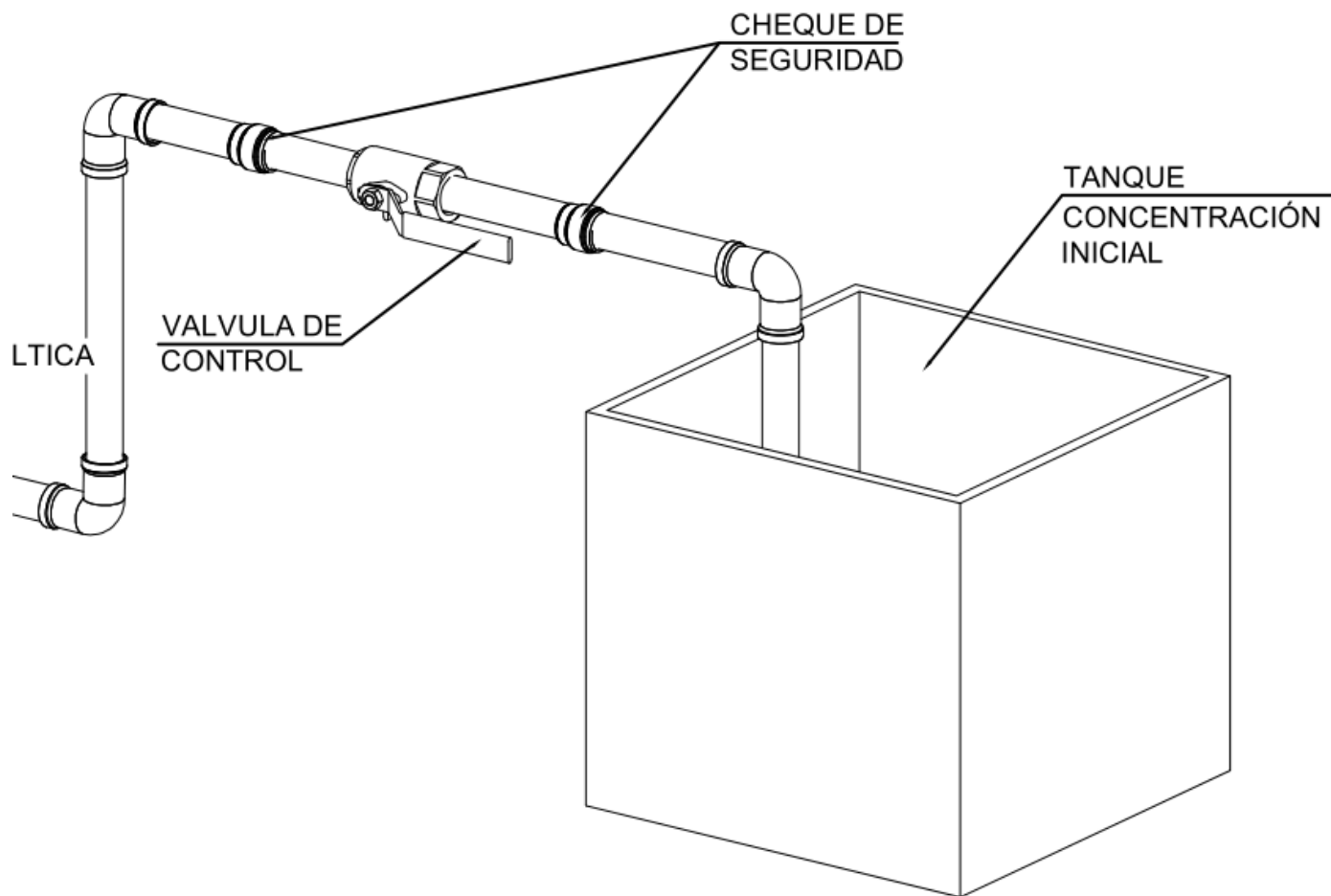
9.4. ESQUEMA DE LA COLUMNA

Figura 20. Esquema general montaje columna



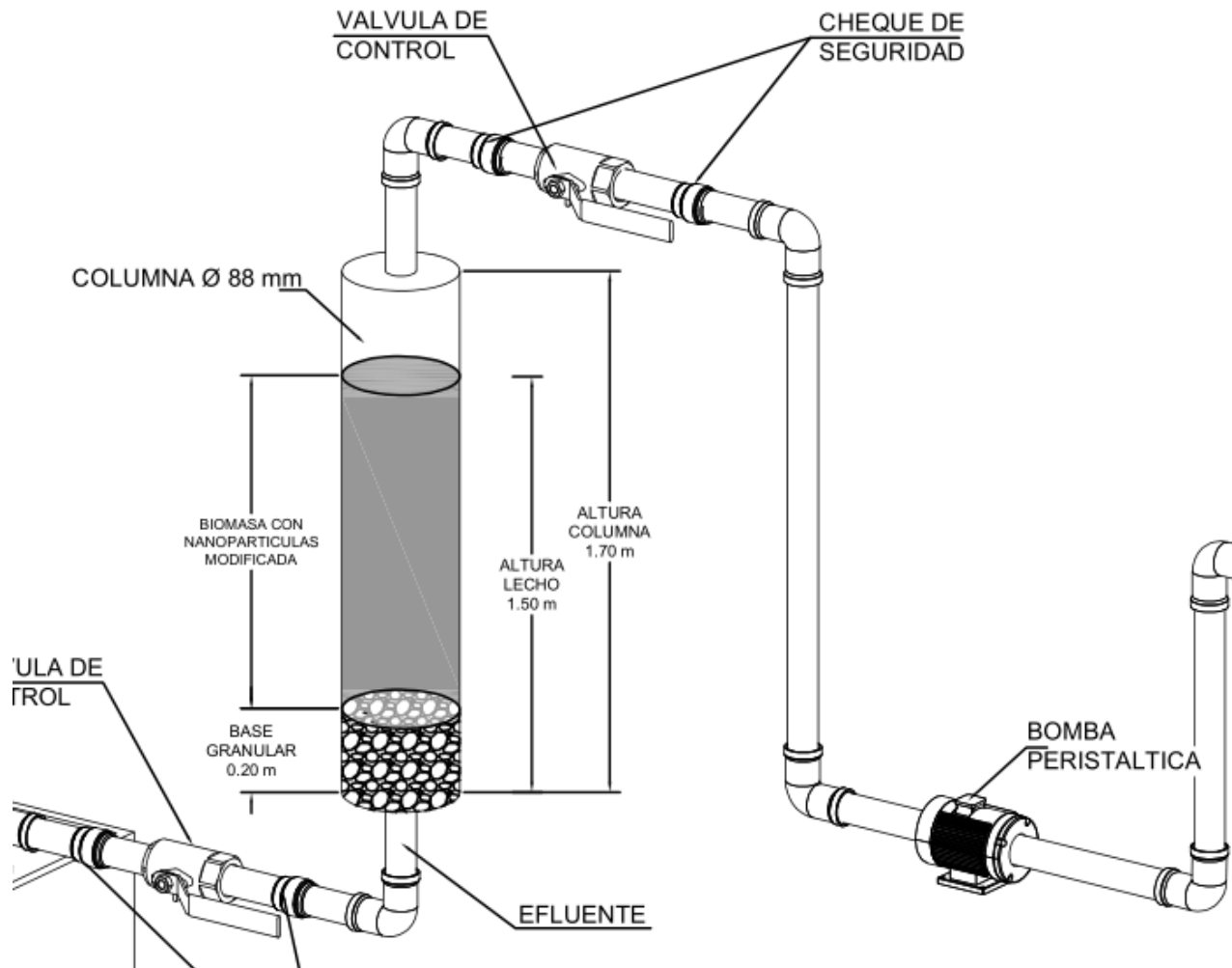
Fuente: El autor

Figura 21. Detalle tanque c0 y succión inicial



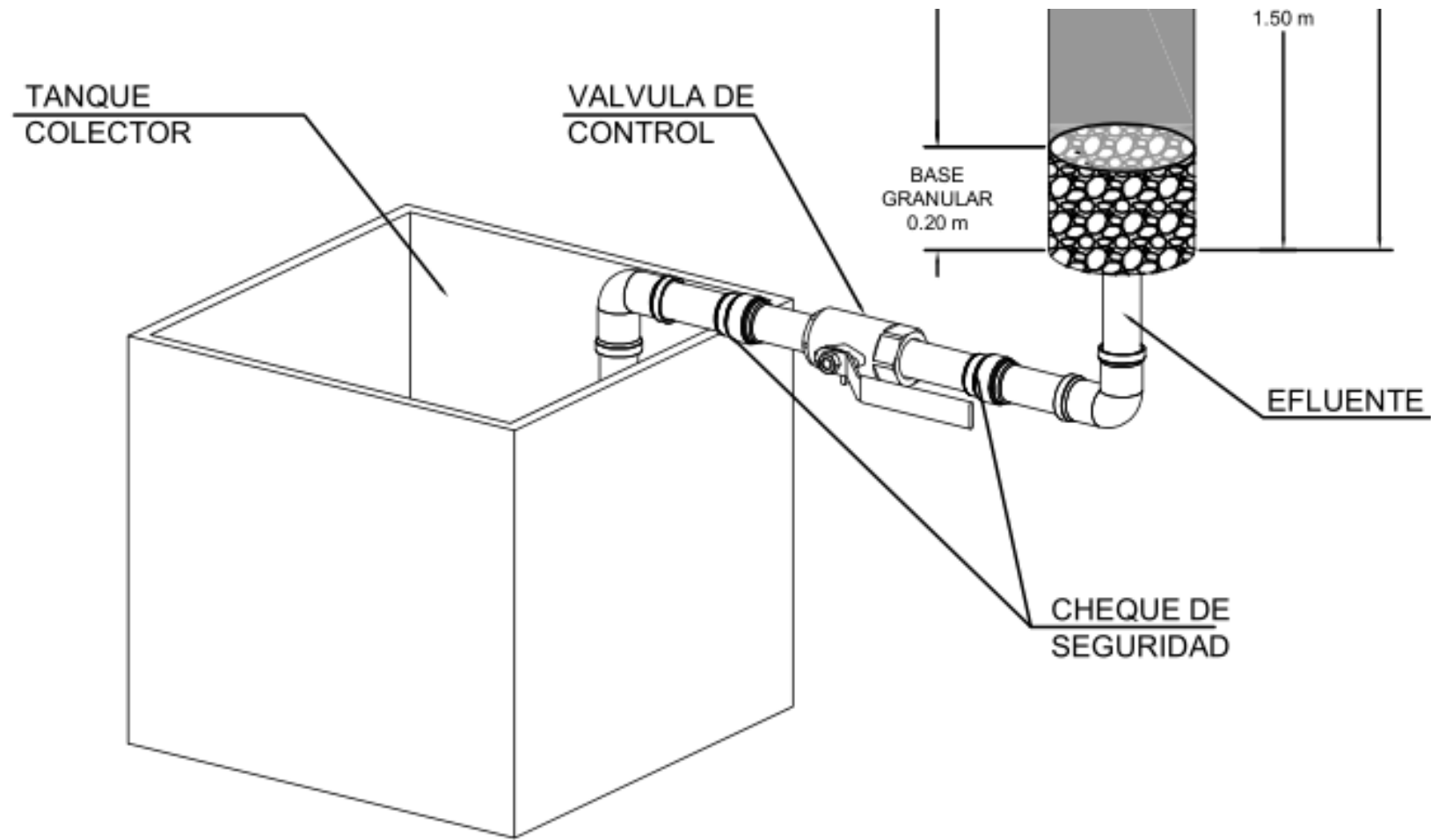
Fuente: El autor

Figura 22. Detalle montaje bomba y columna



Fuente: El autor

Figura 23. Detalle montaje salida efluente y tanque colector



Fuente: El autor

9.5. COSTO Y ANÁLISIS DEL DISEÑO

Para el estimado de costos de la instalación de la columna se recurrió a la base de datos de la empresa PAVCO la cual maneja catálogos de tuberías y accesorios para instalaciones hidráulica y sanitarias y a la empresa Boyser para la bomba periestáltica.

Cuadro 18. Costo estimado elaboración de la columna

Elemento	Cantidad	Precio
Tubería de diferentes denominaciones PVC	2	\$ 285.600
Bomba periestáltica de al menos 500 L/h	1	\$ 1.308.700
Accesorios tipo conexiones	6	\$182.700
Válvulas de seguridad	2	\$ 84.303
Cheques cortina	4	\$ 195.600
Depósito de agua concentración inicial	1	\$ 55.000
Depósito de agua efluente	1	\$ 55.000
Herramienta menor	1	\$ 100.000
Material filtrante	UND	\$ 659.900
Total		\$ 2.926.803

Fuente: El autor

El diseño conceptual mostrado de la columna tiene una altura de 1500 mm y un diámetro interno de 88 mm, para utilizar un lecho una masa de 2200 g y trabajar con un caudal de 10 m³/día o 7 litros/minuto por un periodo de exposición de 60 minutos, empezando a reducir el contenido de contaminante inicial a partir del minuto 35 aproximadamente, teniendo parámetros fijos y constantes tales como el pH, la velocidad de flujo y la temperatura, con lo que permite realizar estudios variando las biomasas modificadas utilizadas por biomasas de con características similares como tamaño y densidad, también variando los tipos de carbón utilizado y las dimensiones de altura y tamaño de la columna, para así mejorar su

efectividad o calcular el diseño de columnas paralelas simultaneas para potenciar el trabajo o flujo de concentración a trabajar.

Este diseño es concordante con otros estudios tales como el mostrado en: "Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa", donde la columna de adsorción fue sometida a tres modelos matemáticos diferentes, diseñando una columna de altura 1000 mm, diámetro de la columna de 240 mm y un caudal de 4.2 litros/minuto. También se hizo la comparación con el diseño mostrado en "Diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo de adsorción con dos columnas a escala de laboratorio", donde obtuvieron un diseño de una columna de 1400 mm de altura, diámetro interno de 88 mm y un caudal de 15 litros/minuto.

10. CONCLUSIONES

A partir de datos recolectados de las diferentes investigaciones, se pudieron establecer los parámetros físico-químicos del agua residual inicial a ser tratados en el modelo de estudio y así se pudo establecer satisfactoriamente un diseño conceptual de columna de adsorción basado en 3 diferentes modelos de biomasa modificadas con nanopartículas para dar un reúso al agua residual textil en el sistema de redes contra incendio, dando como resultado el diseño de un sistema piloto fundamentado en la implementación de carbón activado granular.

Basados en la información de las simulaciones a través del software FAST, se pudo determinar que el modelo era óptimo para eliminar la concentración inicial de compuestos a remover a través de la implementación de la columna y dado que al cumplir con los parámetros mínimos exigidos por la legislación colombiana, el agua residual es apta para ser reutilizada en sistemas de redes contra incendio, pudiendo dar cabida a un proyecto de implementación novedoso dentro de las empresas textiles para su propio beneficio y el beneficio del medio ambiente, ayudando a evitar propagar la contaminación de afluentes de agua.

El modelo de diseño que mejor se ajustó a las condiciones de trabajo, fue el modelo de isoterma de Freundlich, el cual se usa ampliamente para describir la adsorción de soluciones acuosas, sobre carbón activado, y a su vez definiendo un intervalo adecuado en concentraciones intermedias de uso, como lo fue nuestro caso de estudio.

El tiempo de exposición en el modelo final fue de 60 minutos y cuando la concentración empezó a cambiar, fue de aproximadamente a los 35 minutos, siendo la cascarilla de arroz la biomasa que mejor comportamiento tuvo frente a la implementación dentro del lecho fijo filtrante, este tiempo no es el tiempo más óptimo para el trabajo de la columna, pero en el tiempo restante de exposición se logró alcanzar un 99% de reducción de la concentración inicial, logrando un resultado óptimo para el diseño.

El dimensionamiento de la columna de adsorción está en función principalmente del modelo matemático en el cual se haya diseñado, variando así sus condiciones de diseño, de uso y de exposición. Los principales agentes actuantes en el diseño de la columna fueron la masa y el caudal de diseño y el que menos influyó en el diseño fue la porosidad de la capa, pero este teniendo una restricción, donde el caudal no puede superar los 10 m³/día.

La implementación de la columna de adsorción en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia puede ser un proyecto viable y de un costo no tan alto para ser construida y así trabajar en diferentes modelos y usos de biomasa modificadas con nanopartículas y así lograr encontrar diferentes productos

funcionales para la descontaminación de las aguas residuales de diferentes afluentes.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- 1) ¿Qué Es El Desbaste?' <<https://www.ceupe.com/blog/que-es-el-desbaste.html>> [accessed 5 June 2020]
- 2) Adewumi, J. R., A. A. Ilemobade, and J. E. Van Zyl, 'Treated Wastewater Reuse in South Africa: Overview, Potential and Challenges', *Resources, Conservation and Recycling*, 55.2 (2010), 221–31 <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.012>>
- 3) Al-Ghouti, Mohammad A., Maryam A. Al-Kaabi, Mohammad Y. Ashfaq, and Dana Adel Da'na, 'Produced Water Characteristics, Treatment and Reuse: A Review', *Journal of Water Process Engineering*, 28 (2019), 222–39 <<https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2019.02.001>>
- 4) Alonso, Mendoza López Francisco, Garría Aragón Juan Antonio, Salinas Tapia Humberto, and Díaz Delgado Carlos, 'Experimental Estimation of Structures Impact Pressure of a Granular Debris Flow', *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34.1 (2018), 157–61 <<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>>
- 5) Asociación Española de Empresas de Tratamiento y Control del Agua., Asociación Española de Empresas de Tratamiento y Control del, 'Guía Técnica de Recomendaciones Para El Reciclaje de Aguas Grises En Edificios', 2016
- 6) 'Carbon Footprint of the Textile Industry | O ECOTEXTILES' <<https://oecotextiles.wordpress.com/2009/05/25/carbon-footprint-of-the-textile-industry/>> [accessed 8 June 2020]
- 7) Castelló Torre, Lirios, 'Diseño de Un Sistema de Adsorción Para La Eliminación de Colorantes Presentes En Disolución Acuosa', 2017, 65 <[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/93468/CASTELLÓ - Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disol....pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/93468/CASTELLÓ%20-%20Diseño%20de%20un%20sistema%20de%20adsorción%20para%20la%20eliminación%20de%20colorantes%20presentes%20en%20disol....pdf?sequence=1)>
- 8) Chikazumi, Sōshin, C. D. (Chad D.) Graham, and Sōshin Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism* (Oxford University Press, 2009)
- 9) Colombia, *Constitución Política de Colombia*, 1991
- 10) Congreso de Colombia, *Ley 373*, 2003
- 11) Coral, Diego F, and Jenny A Mera, 'Ingeniería y Ciencia', *Ing. Cienc*, 13.26 (2017), 207–32 <<https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.8>>

- 12) Eckhard, Worch, and Walter de Gruyter GmbH & CO, *Adsorption Technology in Water Treatment. Fundamentals, Processes, and Modeling*, 1st edn (Berlin/Boston, 2012) <<https://doi.org/10.1515/9783110240238>>
- 13) Fernández Carrasco, Pedro, 'Estudio Del Impacto Del Cambio Climático Sobre Los Recursos Hídricos. Aplicación En Diecinueve Pequeñas Cuencas En España', 2002
- 14) Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 'AGUAS RESIDUALES':, *METODOS DE TRATAMIENTO, VENTA | Definiciones FYN Ingenieria En Agua*, 2018
- 15) GONZÁLEZ ESCOBAR, ANYI CAROLINA; LINAREZ GARCÍA, CRISTIAN, 'OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON NANOMATERIALES PARA LA MEJORA DE LOS INDICES DE CALIDAD DEL AGUA', *Nanotechnology*, 27.9 (2019), 3505–15 <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.020>><<http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.08.019>><<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2016.12.015>>
- 16) Hartley, Troy W., 'Public Perception and Participation in Water Reuse', *Desalination*, 187.1–3 (2006), 115–26 <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.072>>
- 17) Kantanoleon, Nektarios, Leonidas Zampetakis, and Thrassyvoulos Manios, 'Public Perspective towards Wastewater Reuse in a Medium Size, Seaside, Mediterranean City: A Pilot Survey', *Resources, Conservation and Recycling*, 50.3 (2007), 282–92 <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.006>>
- 18) Lara, José, Candelaria Tejada, Ángel Villabona, Alfonso Arrieta, and Clemente Granados Conde, 'Adsorción de Plomo y Cadmio En Sistema Continuo de Lecho Fijo Sobre Residuos de Cacao Adsorption of Lead and Cadmium in Continuous of Fixed Bed on Cocoa Waste Adsorção de Chumbo e Cádmio No Sistema de Leito Fixo Contínua Relativa Aos Resíduos de Cacau', 29.2 (2016), 113–24 <<https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>>
- 19) M. D. Tenev, G. L. Fontana, C. M. Torre, C. Mansilla, K. Ayala, M. Franco y S. P., and Boeykens, *Efecto Del PH En La Adsorción Del Azul de Metileno Con Chips de Quebracho Agotado*, 2018
- 20) Marimón-Bolívar, Wilfredo, and Edgar E. González, 'Green Synthesis with Enhanced Magnetization and Life Cycle Assessment of Fe₃O₄ Nanoparticles', *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 9 (2018), 58–66 <<https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2017.12.003>>
- 21) Marimón-Bolívar, Wilfredo, Lesly Tejada-Benítez, and Adriana P. Herrera, 'Removal of Mercury (II) from Water Using Magnetic Nanoparticles Coated with Amino Organic Ligands and Yam Peel Biomass', *Environmental Nanotechnology*,

Monitoring & Management, 10 (2018), 486–93
<<https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2018.10.001>>

22) Marimon Bolivar, Wilfredo, *Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas Para La Remoción de Metales Pesados En Aguas*, 2018

23) Marks, June S., 'Taking the Public Seriously: The Case of Potable and Non Potable Reuse', *Desalination*, 187.1–3 (2006), 137–47
<<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.074>>

24) MARTINEZ, ERICSON DE AVILA, ELDER DAVID PUELLO PÁJARO, and PEDRO LUIS CASTILLA BOSSIO, 'DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN EQUIPO DE ADSORCIÓN CON DOS COLUMNAS A ESCALA DE LABORATORIO', 2, 2019 <<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>>

25) Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 'Resolución Número 1207', 2014.julio 25 (2014), 9
<http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf>

26) Moreno, Harol, and Julián Romero, 'IMPLEMENTACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ARCILLA MODIFICADA MAGNÉTICAMENTE PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA PROVENIENTE DEL RÍO CUJA', *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53.9 (2019), 1689–99

27) Muñoz, Amílcar, 'Caracterización y Tratamiento de Aguas Residuales', *Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería*, 2008, 114
<http://cvonline.uaeh.edu.mx/Cursos/Especialidad/Modulo1_PDF/Gen12/ESTEM01T01E08.pdf>

28) Nadoll, Patrick, Thomas Angerer, Jeffrey L. Mauk, David French, and John Walshe, 'The Chemistry of Hydrothermal Magnetite: A Review', *Ore Geology Reviews*, 61 (2014), 1–32 <<https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2013.12.013>>

29) 'Nanotechnology for Water Purification: Applications of Nanotechnology Methods in Wastewater Treatment', 2017, 33–74 <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804300-4.00002-2>>

30) Nikoee, Naeme, and Ehsan Saljoughi, 'Preparation and Characterization of Novel PVDF Nanofiltration Membranes with Hydrophilic Property for Filtration of Dye Aqueous Solution', *Applied Surface Science*, 413 (2017), 41–49
<<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.029>>

31) Núñez Bautista, Sandra Sofía ; Victoria Rueda, Tania Judith, 'TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL UTILIZANDO NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS@BIOMASA RESIDUAL COMO

TRATAMIENTO Terciario', 21.1 (2020), 1–9

32) OSPINA, NATALIA HENAO, and STEVEN RAMIREZ BETANCUR, 'TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SECTOR TEXTIL MEDIANTE PROCESO ACOPLADO ELECTRO-COAGULACIÓN-ELECTRO-OXIDACIÓN', *Revista Brasileira de Ergonomia*, 9.2 (2016), 10 <<https://www.infodesign.org.br/infodesign/article/view/355%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/731%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/269%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/106>>

33) Pal, Parimal, and Parimal Pal, 'Nanotechnology in Water Treatment', *Industrial Water Treatment Process Technology*, 2017, 513–36 <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810391-3.00007-2>>

34) Patanjali, Pooja, Rajeev Singh, Amit Kumar, and Pratibha Chaudhary, 'Nanotechnology for Water Treatment: A Green Approach', *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles*, 2019, 485–512 <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00021-6>>

35) Patricia Restrepo Mejía, Ana, Álvaro Arango Ruiz, and Luis Fernando Garcés Giraldo, *Electrocoagulation: Challenges and Opportunities in Water Treatment Artículo de Revisión*, 2006

36) Pinheiro, H. M., E. Touraud, and O. Thomas, 'Aromatic Amines from Azo Dye Reduction: Status Review with Emphasis on Direct UV Spectrophotometric Detection in Textile Industry Wastewaters', *Dyes and Pigments*, 61.2 (2004), 121–39 <<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2003.10.009>>

37) Po, Murni, Juliane D Kaercher, and Blair E Nancarrow, *LITERATURE REVIEW OF FACTORS INFLUENCING PUBLIC PERCEPTIONS OF WATER REUSE*, 2003 <www.clw.csiro.au/ImageGallery/> [accessed 12 September 2019]

38) Romero López, Teresita, Humberto Rodríguez Fiallo, and Arquímedes Masó Mosqueda, 'Caracterización de Las Aguas Residuales Generadas En Una Industria Textil Cubana', *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37.3 (2016), 46–58

39) Sepúlveda, Juan, 'DISEÑO DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA TEXTIL (70m3/d) PARA LA ELIMINACION DE FIBRAS Y REUTILIZACION DEL AGUA', 2019, 119

40) Tyagi, Shweta, and Bhavtosh Sharma, 'Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index', *American Journal of Water Resources*, 2013 1 (3), Pp 34-38., 1.3 (2014), 34–38 <<https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>>

41) Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, 'Capítulo' <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/contenido/capitulo06.html>> [accessed 11 November 2020]

42) Vajnhandl, Simona, and Julija Volmajer Valh, 'The Status of Water Reuse in European Textile Sector', *Journal of Environmental Management* (Academic Press, 2014), 29–35 <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.014>>

43) Verma, Akshaya Kumar, Rajesh Roshan Dash, and Puspendu Bhunia, 'A Review on Chemical Coagulation/Flocculation Technologies for Removal of Colour from Textile Wastewaters', *Journal of Environmental Management* (Academic Press, 2012), 154–68 <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.012>>

44) 'Wastewater Treatment', *Conventional Wastewater Treatment Processes*, 2016