



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

TRABAJO DE GRADO

**UTILIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA ELIMINAR LOS
METALES PESADOS EN EL AGUA TRATADA POR LA PTAR EL SALITRE.**

(MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN)

PRESENTADO POR:

PEDRO EDUARDO PLAZAS CLAVIJO

VIVIANA ANDREA GARCIA ROCHA

BOGOTÁ D.C. 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

TRABAJO DE GRADO

**UTILIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA ELIMINAR LOS
METALES PESADOS EN EL AGUA TRATADA POR LA PTAR EL SALITRE.**

(TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL)

PRESENTADO POR:

NOMBRE: PEDRO EDUARDO PLAZAS CLAVIJO – CÓDIGO: 506439

NOMBRE: VIVIANA ANDREA GARCIA ROCHA – CÓDIGO – 506519

DOCENTE ASESOR:

PhD. WILFREDO MARIMON BOLÍVAR

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA, BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SEPTIEMBRE 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.



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. septiembre de 2020



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil

DEDICATORIA

A Laura Andrea mi novia por su amor, apoyo, comprensión y su presencia en cada paso.

A mi madre María por su amor y formación.

A mis amigos que me acompañaron y ayudaron en cada momento.

A mi mejor amiga Viviana, por ser mi equipo durante la carrera y la tesis, su dedicación, inteligencia, su apoyo y el de su familia hicieron esta tesis posible.

- PEDRO EDUARDO PLAZAS CLAVIJO

A mis padres Ismael y Fanny por su amor, confianza y apoyo incondicional durante este proceso.

A mi hermana Vanessa, por ser mi mejor amiga, consejera y ejemplo a seguir.

A Claudia, por nuestras tardes de sándwich con limonada, estudiando saneamiento.

Y especialmente a Pedro, mi amigo y compañero de tesis por su cariño e infinita paciencia.

- VIVIANA ANDREA GARCÍA ROCHA



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil

AGRADECIMIENTOS

Culminar este proceso no hubiera sido posible sin el apoyo profesional de nuestro tutor Wilfredo Marimon, a quien le estamos profundamente agradecidos, no solo por su tiempo, constante apoyo y orientación, sino también por permitirnos formar parte de su semillero de investigación. Al profesor Daniel López, más que un docente un gran amigo, que sin alguna responsabilidad con nosotros nos aconsejó y guió. A la ingeniera Marisol Nemocón por cada una de sus ideas y enseñanzas que aportaron significativamente a nuestra vida académica. A todo el equipo de laboratoristas de la Universidad Católica de Colombia que siempre estuvieron acompañándonos y compartiendo sus conocimientos.

A la Universidad Católica de Colombia por acompañar nuestro proceso de formación a lo largo de estos años. También queremos agradecer especialmente a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Salitre, por abrirnos sus puertas y brindarnos toda la información requerida para el desarrollo de esta tesis, y finalmente a la Universidad Sergio Arboleda por permitirnos hacer uso de sus laboratorios.

“Thousands have lived without love, not one without water.”

W. H. AUDEN (*First Things First – 1957*)



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

RESUMEN

En Colombia tan solo el 48% de los municipios cuenta con un sistema de saneamiento, generalmente es inadecuado o poco eficiente, las regulaciones impuestas en estos procesos son demasiado laxas, llevando a que los cauces terminen recibiendo cargas contaminantes (concentraciones de metales pesados, DBO, DQO, entre otros). Además, un porcentaje de las aguas contaminadas de estos ríos es empleada en actividades de riego y consumo humano, representando un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente.

Esta investigación se enfoca en sintetizar nanopartículas de magnetita, capaces de adsorber metales pesados, seleccionando a la PTAR Salitre como objeto de estudio, se desarrolla un modelado y simulación del estado actual de la planta en el programa GPS-X, considerado las características de una muestra de agua representativa de siete meses, una vez emulados los procesos y contrastados los resultados teóricos con los reales, se optimiza el diseño a través de un conjunto de filtros de arena, que remueve DBO₅, DQO, SST y SSV, y funciona como un proceso alternativo al tratamiento secundario. Finalmente se implementa al proceso con el Software FAST 2.1 una columna de adsorción cuyo lecho se compone por el material sintetizado, se realizan aproximadamente 15 iteraciones que permiten proponer el diseño más adecuado para la Planta.

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de la columna remueve los metales pesados, cationes, y otros contaminantes que representan un riesgo para la salud al reusar las aguas en principales actividades agrícolas desarrolladas en la Sabana de Bogotá y las zonas aledañas al efluente del río. Se cumplen los criterios de calidad químicos y físicos para el reúso de aguas residuales en cultivos alimenticios del decreto 1207 de 2014, las recomendaciones de concentraciones de metales pesados de la EPA, y los parámetros y rangos límite permisibles en efluentes, de la Resolución 0631 de 2015.



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. PREGUNTA PROBLEMA	16
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	17
2.1. ANTECEDENTES	17
2.2. JUSTIFICACIÓN.....	20
3. OBJETIVOS	22
3.1. GENERAL.....	22
3.2. ESPECÍFICOS.....	22
4. MARCO DE REFERENCIA	23
4.1. MARCO TEÓRICO	23
4.1.1. CALIDAD DEL AGUA	23
4.1.2. IRRIGACIÓN O RIEGO.....	26
4.1.3. GENERALIDADES DEL RIO BOGOTÁ	26
4.1.4. TRATAMIENTO REALIZADO A LAS AGUAS RESIDUALES POR LA PTAR SALITRE ...	27
4.1.5. TÉCNICAS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE METALES PESADOS	29
4.1.6. NANOPARTÍCULAS	34
4.1.7. MODELACIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO: GPS-X.....	36
4.1.8. MODELACIÓN DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN: FAST 2.1	39
4.2. ESTADO DEL ARTE	41
4.3. MARCO LEGAL.....	47
4.3.1. CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA 1991	47
4.3.2. LEY 373 DE 1997	48



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

4.3.3. DECRETO 1207 DE 2014.....	49
4.3.4. RESOLUCIÓN 0631 DE 2015	50
4.3.5. AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS – US EPA	51
4.4. MARCO CONCEPTUAL	52
5. METODOLOGÍA	53
5.1. SOLICITUD DE MUESTRAS, CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA POR LA PTAR SALITRE Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LOS PROCESOS EN LA PLANTA	54
5.2. MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE GPS-X HIDROMANTIS	59
5.3. OPTIMIZACIÓN DE LA PTAR SALITRE FASE 1:	62
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	68
6.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA POR LA PTAR SALITRE Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN RECOPIADA SOBRE LOS PROCESOS EN LA PLANTA	68
6.2. MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE GPS-X HIDROMANTIS	71
6.3. OPTIMIZACIÓN DE LA PTAR SALITRE FASE 1:	75
7. CONCLUSIONES	81
8. RECOMENDACIONES.....	82
LISTA DE REFERENCIAS.....	83



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

LISTA DE IMÁGENES

Ilustración 1: Agentes contaminantes del agua	24
Ilustración 2: Rio Bogotá	27
Ilustración 3: Proceso de la PTAR el Salitre en el tratamiento de aguas.....	28
Ilustración 4: Filtración por membranas	30
Ilustración 5: Nanofiltración	30
Ilustración 6: Ultrafiltración.....	31
Ilustración 7: Electrodialisis.....	31
Ilustración 8: Adsorción	32
Ilustración 9: Coagulación - Floculación	33
Ilustración 10: Nanopartícula a escala.....	34
Ilustración 11: Efecto de un campo magnético externo en fluidos ferromagnéticos.....	35
Ilustración 12: De derecha a izquierda: Microscopia electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) y Microscopia electrónica de escaneo de emisiones de campo (FESEM) - nanopartículas de magnetita ..	36
Ilustración 13: Eliminación de metales pesados con nanopartículas de magnetita con ácido húmico	36
Ilustración 14: Influyente aguas residuales	37
Ilustración 15: Dosificación química	37
Ilustración 16: Cámara de arena.....	37
Ilustración 17: Clarificador primario.....	37
Ilustración 18: Filtro de arena	38
Ilustración 19: Descarga.....	38
Ilustración 20: Simulación científica.....	38
Ilustración 21: Marco conceptual	52
Ilustración 22: Visita a la PTAR Salitre	55
Ilustración 23: Tornillos de Arquímedes PTAR Salitre	56



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Ilustración 24: De derecha a izquierda: Cribado grueso y Cribado fino PTAR Salitre	56
Ilustración 25: Extracción de grasas y arenas PTAR Salitre	57
Ilustración 26: De derecha a izquierda: Dosificador de coagulante – floculante y proceso de coagulación en el desarenador PTAR Salitre	58
Ilustración 27: De derecha a izquierda: Trampa de grasas y clarificador primario PTAR Salitre.....	59
Ilustración 28: Modelo número uno de la PTAR Salitre (empleando ocho clarificadores), programa GPS-X .	60
Ilustración 29: Modelo número dos de la PTAR Salitre (empleando un clarificador), programa GPS-X.....	62
Ilustración 30: Optimización PTAR Salitre con un clarificador en el programa GPS-X	63
Ilustración 31: Síntesis del carbón.....	65
Ilustración 32: Preparación de la solución de cloruro férrico (FeCl_3)	65
Ilustración 33: Preparación de la solución de Sulfato ferroso (FeSO_4)	65
Ilustración 34: Síntesis del carbón.....	66
Ilustración 35: Resultados finales síntesis del carbón	76

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. De izquierda a derecha: Efecto del pH en la eliminación de Pb(II) y Cr(III), y Efecto de la dosis de biocarbono en la eliminación de Pb(II) y Cr(III) utilizando BC a 28°C	42
Gráfica 2: Análisis de sensibilidad – Caudal.....	73
Gráfica 3: Análisis de sensibilidad – 1 clarificador y 8 clarificadores	73
Gráfica 4: Análisis de sensibilidad – Dosis y concentración de cloruro férrico	75
Gráfica 5: Variación de caudal	77
Gráfica 6: Variación de los diámetros comerciales de carbón	78
Gráfica 7: Variación de la porosidad del lecho	78
Gráfica 8: Tiempo de contacto – columna de adsorción	79



LISTA DE TABLAS

Tabla I. Eficiencia de eliminación de iones de metales pesados para las membranas capa por capa fabricadas	43
Tabla II. Análisis de las aguas residuales de textiles de algodón antes y después de la remoción	44
Tabla III. Características de las aguas superficiales y residuales antes y después del tratamiento	45
Tabla IV. Criterios de calidad para el reúso de aguas residuales para cultivos alimenticios	49
Tabla V. Parámetros fisicoquímicos a monitorear en efluentes para uso agrícola	51
Tabla VI. Concentraciones máximas para riego	51
Tabla VII. Criterios recomendados de calidad del agua para riego	52
Tabla VIII. Listado de Variables	54
Tabla IX. parámetros influente de aguas residuales	61
TABLA X. PARÁMETROS DOSIFICACIÓN QUÍMICA	61
TABLA XI. PARÁMETROS CÁMARA DE ARENA	61
TABLA XII. PARÁMETROS CLARIFICADOR PRIMARIO CIRCULAR	62
TABLA XIII. VARIACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS - FAST 2.1	67
Tabla XIV. Parámetros de calidad generales – valores promedio mensuales (junio 2019-diciembre 2019)	68
Tabla XV. Parámetros químicos de calidad – valores promedio mensuales (junio 2019-diciembre 2019)	69
Tabla XVI. Parámetros microbiológicos de calidad – valores promedio mensuales (junio 2019-diciembre 2019)	70
Tabla XVII. Parámetros químicos de calidad – valores promedio mensuales (junio 2019-diciembre 2019)....	70
Tabla XVIII. Simulación con el software GPS-X	72
TABLA XIX. OPTIMIZACIÓN CON EL SOFTWARE GPS-X	75
TABLA XX. PROPIEDADES DEL CARBÓN SINTETIZADO	76
TABLA XXI. CARACTERÍSTICAS FINALES DEL DISEÑO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN	80



INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico en las últimas décadas ha generado que los recursos hídricos para el uso humano se reduzcan considerablemente, principalmente por la sobreexplotación y la contaminación del agua, el retiro promedio mundial es del 70% para la agricultura, incluyendo las actividades de riego, ganadería y acuicultura, seguida por el sector industrial que registra un 19% de la extracción y por el consumo doméstico municipal con un 12% (Food and Agriculture Organization of the United Nations 2016)

Esta situación es aún más preocupante si se tiene en cuenta que el 2,5% del agua en el planeta es dulce, y tan solo el 0.003% es agua dulce no contaminada (Gleick 2011), por esta razón es tan importante reducir la influencia antropogénica, tratando las aguas residuales, para así disminuir la contaminación de ríos y ecosistemas. En Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es la entidad responsable de definir políticas nacionales relacionadas con los recursos naturales, entre ellas velar por la calidad de los cuerpos hídricos (antes y después de su uso); en el año 2015 presentó la “Norma de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Aguas y a los Sistemas de Alcantarillado” y en 2017 el “Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS”, con el fin de controlar las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua. Procedimientos como el “Plan de Saneamiento y Recuperación del Río Bogotá” desarrollado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), en conjunto con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Salitre, PTAR, buscan impedir que toneladas de basura lleguen al río Bogotá y así lograr su descontaminación. Según la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (ARD), y de las Aguas Residuales no Domésticas (ARND) realizado por la PTAR Salitre incluye cribado fino y grueso, remoción de grasas, material flotante y arenas, decantación primaria, y tratamiento primario químicamente asistido – TPQA utilizado como coagulante el Cloruro Férrico (FeCl_3) y como ayudante de floculación, el polímero Aniónico poliacrilamida de alto peso y carga – FLOPAM AN 934. (Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá. 2012), sin embargo, el proceso no incluye tratamiento de metales pesados (Plegable técnico PTAR el Salitre, 2019), considerados como cualquier catión con un peso atómico superior 23, peso atómico del sodio (Sette 1996), por esta razón las aguas residuales tratadas por la PTAR Salitre liberan aguas tratadas con presencia de diversos elementos como níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio, entre otros., haciendo que estos lleguen al río Bogotá, que desemboca en el Magdalena y

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

posteriormente en el mar Caribe (Restrepo 2005), contaminando a su paso las aguas superficiales, penetrando en el suelo y contaminando las aguas subterráneas, además al entrar en contacto con las plantas los metales son absorbidos por estas, y en consecuencia se van acumulando en sus tejidos (Bautista 1999), igualmente los seres humanos, animales marinos y terrestres que se alimentan de estas fuentes contaminadas almacenan los metales pesados en su organismo, generando diversos trastornos bioquímicos y efectos biotóxicos. En el cuerpo humano la alta exposición a estos metales puede causar malformaciones, procesos degenerativos neurológicos, trastornos gastrointestinales, cáncer y la muerte (Duruibe 2007), es por esto que en la presente investigación se han modelado dos versiones de la primera fase de la PTAR Salitre en el programa “GPS-X”, la primera de ellas es la versión actual de la planta y la segunda es una versión optimizada que remueve un mayor porcentaje de componentes microbiológicos, optimizando el proceso y permitiendo que al entrar a la columna de adsorción diseñada en el programa “FAST 2.1”, dicha columna emplea nanopartículas magnéticas de carbón activado, a base de magnetita para eliminar los metales pesados en el agua tratada, mejorando la calidad del agua y permitiendo así su reutilización en el sector primario, específicamente para el riego de plantas, el trabajo se desarrolló basándose en la metodología de síntesis verdes de nanopartículas magnéticas “Ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas” (Marimon 2018).

La nanotecnología en el tratamiento de aguas podría ser la solución para optimizar los tratamientos realizados en las plantas de aguas residuales, si se diseñan partículas sintetizables, que actúen como medios de separación o reacción para diferentes contaminantes, debido a que los procesos actuales son muy costosos, consumen una alta cantidad de energía y no realizan una total remoción de partículas (Vílchez et al. 2016).



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los recursos hídricos disponibles para el consumo humano se ven cada vez más afectados por influencia antrópica, las principales ciudades de los países más desarrollados afrontan problemas para suministrar agua potable, gestionar residuos sólidos o líquidos y asegurar la calidad de los alimentos para sus poblaciones. Dos tercios de las aguas residuales generadas en las ciudades del planeta no reciben ningún tratamiento, en la mayoría de los casos estas son vertidas en los ríos, lagos u océanos. Las instalaciones para el tratamiento de aguas tienen precios muy elevados e inclusive si los recursos están disponibles no existe ninguna garantía de que mejore la situación, y algunas de las plantas de tratamiento de aguas residuales no funcionan óptimamente (Gleick 2011) (Raschid, Ranawaka and van der 2011).

La reutilización del agua residual en la agricultura es una excelente alternativa, ya que estas aguas podrían verse como un recurso, brindando la oportunidad de mejorar la seguridad alimentaria en áreas urbanas y beneficiar a la población, ya que es un método que soluciona el problema de la disposición de aguas residuales, disminuye la contaminación de las aguas superficiales y proporciona un suministro de agua confiable para los agricultores. Bajo esta premisa la contaminación por metales pesados presentes en el agua llama la atención mundial por su toxicidad ambiental, cantidad y permanencia. Los metales pesados se han dispuesto en cuerpos de agua del planeta, esto se debe al crecimiento exponencial de la población, la expansión de sectores industriales y agrícolas, los cuales no realizan un tratamiento adecuado al vertimiento de químicos y metales a aguas residuales (Marimon 2018).

Los metales pesados depositados en aguas afectan los ecosistemas y dan lugar a respuestas físicas, químicas y biológicas. Estas respuestas se dividen en dos categorías: la primer categoría efectos del medio ambiente sobre el metal la cual destaca que las aguas receptoras de estos metales en diferentes condiciones pueden conducir a un cambio en las propiedades de especiación y toxicidad de los metales. La segunda categoría es la respuesta biológica en la que dependiendo de las condiciones ambientales pueden tener cambios en la densidad, diversidad y composición de las especies o de las poblaciones, la naturaleza y el cambio depende en una medida mayor de la concentración de metales pesados presentes en el agua (Sierra 2011).



En Colombia la contaminación ambiental ha aumentado significativamente por el vertimiento de químicos tóxicos, aguas residuales sin tratar, uso de compuestos relacionados con industrias y actividades agrícolas inadecuadas, acrecentando así la concentración de metales pesados en diversas especies y ecosistemas, como se puede evidenciar en la cuenca del río Magdalena y en ciénagas del sur del departamento de Bolívar, donde los estudios realizados muestran altos niveles de contaminación por actividades industriales como es la extracción de minerales. Actualmente la calidad del río Bogotá se ve afectada por las curtiembres ubicadas a 5 kilómetros del nacimiento, el depósito de residuos domésticos e industriales, la disposición de basuras, residuos industriales con metales pesados y los vertimientos de Salitre, Fucha y Tunjuelo. El 80% de la contaminación es producida por aguas domésticas incluidas las de la población de Bogotá, mientras que el 20% restante es generada por las industrias, minería y escombros. El agua del río nace en el nororiente del municipio de Villapinzón a 3.300 msnm, al entrar en Bogotá posee un nivel de contaminación de 4 y al recibir la primera descarga del río Salitre aumenta a nivel 8 permaneciendo así aguas abajo (**Silva et al. 2010**).

1.2. PREGUNTA PROBLEMA

Es por esto que la investigación se orientará a responder si ***¿Es factible la remoción de los metales pesados presentes en el agua residual tratada por la PTAR Salitre, a través de una columna de adsorción utilizando carbón activado modificado con nanopartículas de magnetita, para que cumpla con los requisitos de la RAS y de la US EPA de metales pesados para el riego?***, Ya que la presencia de metales pesados presentes en el agua después del proceso realizado en la planta de tratamiento Salitre afecta el ecosistema y la población que aprovecha los recursos aguas abajo del río Bogotá.



2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

2.1. ANTECEDENTES

La nanotecnología aplicada en el tratamiento de aguas residuales brinda la posibilidad de eliminar eficazmente contaminantes y gérmenes, ofreciendo resultados más efectivos debido al gran área superficial que abarcan, en comparación con otros métodos de tratamiento que son más costosos y demandan mayor energía (Frimmel and Niessner 2010). En la actualidad se utilizan para localizar y eliminar diferentes sustancias entre ellas metales pesados como plomo, níquel, mercurio, cobre, cadmio, zinc, entre otros, y nutrientes en forma de fosfato, nitrato, nitrito amoniacado y cianuro, también pueden encontrar compuestos orgánicos como algas con toxinas cianobacterias, virus, bacterias y parásitos (Dhermendra, Behari and Prasenjit 2008; Marimón-Bolívar and González 2018).

Para la remoción de metales pesados presentes en el agua los científicos Shalini Rajput, Charles U. Pittman Jr, y Dinesh Mohan, usaron nanopartículas magnéticas sintetizadas por precipitación química para retirar elementos tales como el cromo (Cr^{6+}) y el plomo (Pb^{2+}). Las cuales cumplieron su propósito de adsorción acuosa de estos metales. Cada experimento se investigó por lotes sistemáticamente analizando la influencia del pH, tiempo de contacto, temperatura y concentración del adsorbato vs el adsorbente en la concentración de (Cr^{6+}) y (Pb^{2+}). La eliminación máxima de los metales se pudo evidenciar con un pH 2.0 para el (Cr^{6+}) y pH 5 para el (Pb^{2+}). Se descubrió que las capacidades máximas de adsorción de Langmuir fueron 34.87 (Cr^{6+}) y 53.11 (Pb^{2+}) mg/g a 45° Celsius. Se llegó a la conclusión de que las partículas de Magnetita (Fe_3O_4) son adsorbentes potenciales para la eliminación de iones metálicos en el tratamiento de aguas residuales (Shalini, Charles and Dinesh 2016).

En otro experimento para tratar el agua residual producida por instrumentos de prueba de demanda química de oxígeno (DQO), un grupo de investigadores sintetizaron nanopartículas magnéticas funcionalizadas con cisteína, esta agua tenía índices muy altos de metales pesados y un pH muy bajo. El MNPs-Cys sintetizado como adsorbente para la separación de metales pesados se investigó sistemáticamente. Se ajustó a las isoterms de Langmuir con una capacidad de adsorción máxima de 76,96 mg/g para cobre Cu^{2+} . Este adsorbente con un pretratamiento adecuado, podría llegar hacer que el cromo Cr^{3+} , Mercurio Hg^{2+} , y plata Ag^{1+} , en el agua residual

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

del medidor de DQO se elimine casi en su totalidad, con una eficiencia superior al 99%. Esta investigación da una perspectiva del rendimiento que pueden tener las nanopartículas para el tratamiento de aguas residuales con metales pesados (CAI et al. 2014).

Otra evidencia de la eliminación de metales pesados se dio en una solución acuosa mediante nanopartículas magnéticas reformadas con polímeros, esta se preparó con nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 , modificadas con aminopropiltrióxido de silano, copolímeros de ácido acrílico y ácido crotonico. Se midió la capacidad de adsorción de las nanopartículas con la variedad de polímeros a diferentes pH en solución, la capacidad de adsorción de iones metálicos en función del tiempo y la concentración de los iones, se analizó isoterma de adsorción cinética y termodinámica para comprender el mecanismo de la nanopartícula. Se encontró que las nanopartículas son excelentes en procesos de eliminación de metales pesados como Cd^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} y Cu^{2+} en la solución acuosa. Además, estos pueden eliminar eficazmente iones metálicos con una alta capacidad de adsorción máxima a pH 5,5 y podrían usarse como un adsorbente reutilizable (Fei et al. 2014).

En otra pesquisa efectuada por Wilfredo Marimon, Lesly Tejada y Adriana Herrera se estudió la adsorción de mercurio empleando nanopartículas magnéticas funcionalizadas con aminopropilsilano, peptona y biomasa de cáscara de ñame. Durante la investigación se realizó una espectroscopía FTIR, que permitió identificar la presencia de grupos químicos en las nanopartículas, posteriormente estas fueron caracterizadas, para analizar finalmente la remoción de mercurio al variar el pH, se obtuvo una adsorción del 94% para la muestra de nanopartículas magnéticas con aminopropilsilano (pH 7.0), 87% en nanopartículas magnéticas funcionalizadas con peptona (pH 7.0), y 75 % para las nanopartículas con cascara de ñame (pH 8,0). (Marimón Bolívar, Tejada Benítez and Herrera 2018)

Una de las investigaciones realizadas por Mateu del Rio Clar consistió en la aplicación de nanopartículas para la remoción de mercurio presente en el agua, la muestra presentaba altos niveles de toxicidad, perjudiciales para el ser humano, la remoción de este elemento en los cuerpos de agua no era sencilla de realizar. Por lo que creo nanopartículas magnéticas de óxido de hierro fusionándolas con escuaramidas, las cuales adiciono a viales con agua con diferentes concentraciones de nanopartículas, comprobó cualitativamente la alta eficiencia del material ya que eliminó con una cantidad mínima la gran mayoría del mercurio en las muestras de 20 ppm de concentración de Hg, Car llegó a la conclusión de que el material es muy efectivo para hacer remociones de

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

metales pesados y tóxicos presentes en el agua, e ideó la fabricación de filtros selectivos para la eliminación de mercurio en el agua (Mateu del Rio 2013).

Sofia Filipe Pereira en su investigación “Modelling of a wastewater treatment plant using GPS-X” modela la Planta de Portucel Soporcel, ubicada en el complejo industrial de Setúbal Portugal, su tesis se centra en modelar el proceso de tratamiento de Planta de aguas residuales industriales, implementando el software GPS-X, donde a través de modelos matemáticos convierte un proceso gráfico en ecuaciones de balance de materiales, permitiendo así la descripción cinética del proceso de tratamiento en la PTAR. El afluente contiene fibras (sólidos), lignina, colorantes, ácidos, resinas, fenoles y almidón. La coloración del agua es marrón debido a la presencia de lignina, posee una DBO cercana a los $1.095 \text{ g O}_2/\text{m}^3$. La planta utiliza el proceso de lodos activados con aireación extendida, permitiendo una remoción adecuada de los organismos, minimizando la producción de lodos. Para realizar la modelación se utilizaron datos históricos de los últimos tres años con el fin de tener una adecuada caracterización del afluente, posteriormente se realizaron diferentes simulaciones variando distintos parámetros. Las simulaciones arrojaron como resultado que la concentración de nitrógeno en el efluente final disminuye significativamente con la reducción del caudal de urea, lo que puede ser óptimo para el ambiente. (Pereira 2014)

Para la síntesis de un nuevo material capaz de separar el vanadio presente en el agua, Hakimeh, Mansoored y Francesco, adhirieron nanopartículas de hierro a un tipo de carbón activado comercial, formando un adsorbente llamado nanocompuesto de carbón activado con hierro. En su investigación estudiaron los efectos de varios parámetros de operación de los cuales destacan la concentración del contaminante en la entrada, la cantidad de adsorbente y el caudal volumétrico respecto al rendimiento de separación de vanadio. El procedimiento consistió en comparar el rendimiento de los adsorbentes en tres ciclos de adsorción/desorción, los cuales fueron realizados utilizando el modelo de difusión de película poro-superficie, permitiendo reconocer los diferentes parámetros de transferencia. El resultado del modelado y los ensayos determinaron que el nanocompuesto tiene un rendimiento mayor en la eliminación de vanadio en comparación con el Carbón activado, el análisis de sensibilidad realizado en el modelaje demostró que la difusión de poros, la superficie, la transferencia de masa externa y la dispersión axial son determinantes en la separación de vanadio usando el nuevo nanocompuesto. (Sharififard, Soleimani and Pepe 2017)



2.2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la contaminación por el vertimiento de aguas con metales pesados es un grave problema que incide sobre las fuentes hídricas afectando los ecosistemas y los suelos (Eldon et al. 2017), en Colombia se han realizado investigaciones sobre organismos acuáticos destinados para el consumo humano, provenientes del río Magdalena donde se ha registrado la presencia de metales tóxicos, los resultados han demostrado que varias especies de pescado presentan concentraciones altas de mercurio, plomo y cadmio, entre otras (Lara and Bonilla 2010). Estos estudios son relevantes debido a que el pescado es una de las proteínas más consumidas en el país, y su alto consumo genera daños en la salud de la población. Otras investigaciones desarrolladas sobre la Sabana de Bogotá, relacionadas con el sector agrícola revelan que algunas hortalizas, el agua de riego y los suelos destinados para el cultivo, reportan altos niveles de Arsénico, Cadmio, Mercurio y Plomo, entre otros, estas concentraciones de metales se asocian con la presencia de los mismos en el agua del río Bogotá utilizada para el riego, atribuyéndose como el principal contaminante el río y sus afluentes, los cuales están altamente contaminados por efluentes de las zonas industriales y urbanas de la ciudad de Bogotá. (Sánchez and Corredor 2011)

Para mejorar la calidad del agua en Bogotá se implementó el plan de saneamiento y recuperación del Río Bogotá, que consiste principalmente en construir la Fase II de la PTAR Salitre aumentando la capacidad de tratamiento de 4 m³ por segundo a 7m³ por segundo, la Planta es un complejo tecnológico fundamental para el saneamiento del Río Bogotá, allí se tratan aguas residuales del norte de la ciudad, la cuenca del río Salitre, humedal Torca y humedal La Conejera, generadas por millones de bogotanos, principalmente de hogares, oficinas, colegios y universidades, entre otros. De esta manera, se asegura que las aguas residuales vertidas al Río Bogotá tras el tratamiento contribuyan al saneamiento del principal afluente de la ciudad (CAR | Corporaciones Autónomas Regionales y de desarrollo sostenible 2018). Esto será decisivo para lograr la descontaminación del Río Bogotá, sin embargo, en ninguna de las Fases se contempló un tratamiento para remover los metales pesados del agua residual.

Las técnicas convencionales de remoción de metales pesados en aguas residuales, son precipitación y coagulación química, métodos electroquímicos, zeolita, técnicas de membrana y ultrafiltración, estos son procesos poco eficientes o muy costosos y además generan residuos, por ejemplo, la *precipitación química*, es un

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

proceso sencillo y económico, pero produce gran cantidad de lodos con metales pesados, que son difíciles de tratar o desechar (Sakhi et al. 2019), la *coagulación química* es un método costoso que requiere gran cantidad de químicos (Sharma and Sanghi 2012), mientras que el *intercambio iónico* es una técnica con alta regeneración del material, pero es muy selectiva y solo trata un número reducido de metales (Bashir et al. 2018), los *métodos electroquímicos* brindan la posibilidad de recuperar metales puros, pero son muy costosos ya que se debe pagar un alto costo de inversión y mantenimiento (Yunusov and Zakharov 2012), el *tratamiento con Zeolita* aunque puede remover la mayoría de los metales y es relativamente económico, es ineficiente (Mendoza-Barrón et al. 2011), los *procesos de membrana y ultrafiltración* generan pocos desechos, demandan baja cantidad de químicos y tienen una eficiencia superior al 95%, pero su costo es muy elevado (Mungray, Kulkarni and Mungray 2012), el *carbón activado* tiene una eficiencia de más del 90%, removiendo la mayoría de los metales pesados, su rendimiento depende sobre todo del adsorbente (Erto et al. 2013), la modificación del carbón activado con nanopartículas es una técnica relativamente reciente, en la que se atraen muchos metales de cargas positivas, por este motivo es tan importante realizar esta investigación, con ella se contribuirá a implementar nuevas tecnologías, como el uso de columnas de adsorción que contengan *nanopartículas de Magnetita (Fe_3O_4) modificadas con carbón activado* en la remoción de metales pesados después del tratamiento realizado por la PTAR Salitre, beneficiando así la Planta, el ecosistema, la fauna y flora, el río Bogotá, Magdalena y el mar Caribe donde finalmente desemboca.



3. OBJETIVOS

Los objetivos generales y específicos de la investigación se presentan a continuación:

3.1. GENERAL

Implementar una columna de adsorción con nanopartículas de Magnetita modificadas con carbón activado para la remoción de metales pesados en aguas residuales tratadas por la PTAR Salitre.

3.2. ESPECÍFICOS

- Sintetizar nanopartículas modificadas con carbón activado, propicias para la remoción de metales pesados en aguas.
- Modelar el proceso de tratamiento de aguas residuales llevado a cabo en la PTAR Salitre bajo las condiciones actuales.
- Evaluar la efectividad de las nanopartículas magnéticas modificadas en la remoción de metales pesados presentes en las aguas tratadas por la PTAR Salitre.



4. MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se presenta el marco teórico donde se definen los conceptos que han sido abordados a lo largo del informe, el marco legal donde se consignarán las normas, leyes y reglamentaciones consideradas para el desarrollo de la presente investigación, el estado del arte donde se exponen algunos de los estudios más relevantes encontrados, y el marco conceptual donde se presentará una Imagen general de la relación entre los términos más importantes.

4.1. MARCO TEÓRICO

4.1.1. CALIDAD DEL AGUA

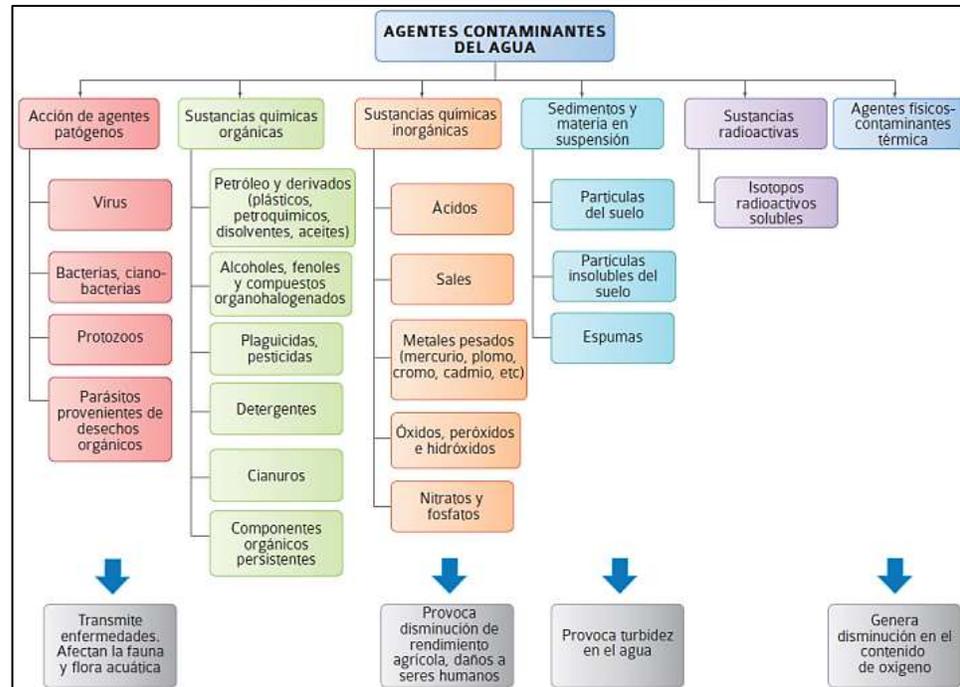
Se define como una serie de características y parámetros que pueden ser medidos a través de aspectos físicos, químicos y biológicos, la calidad presenta variaciones espaciales y temporales por causas naturales propias del cuerpo de agua o factores externos, que a su vez son el resultado del proceso del ciclo hidrológico y la influencia antropogénica, en la ilustración 1 se observan los principales agentes contaminantes del agua y sus posibles afectaciones en la salud, la contaminación de un ambiente acuático significa la introducción de sustancias o energía, la cual resulta en problemas tales como daños en organismos vivos, deficiencias en la salud de los humanos, e impedimento de actividades acuáticas y económicas (Boyd 2000).

Se puede realizar una descripción de la calidad del agua de dos formas, primero midiendo variables físicas (turbiedad, sólidos totales, entre otros), variables químicas (pH, acides, alcalinidad, entre otras) o biológicas en los que destacan los bioensayos; y segundo utilizando un índice de calidad del agua (Goncharuk, Kovalenko and Zlatskii 2012). Ambas formas pueden ser válidas y las mediciones que se requieren se realizan in situ o en el laboratorio, produciendo así varios datos que son necesarios interpretar. Antes de analizar las propiedades y características del agua, se puede analizar la calidad de acuerdo con su estado; haciendo una distinción entre el agua cruda, agua residual y agua tratada (Sharma and Sanghi 2012).

La calidad del agua de un recurso hídrico obedece al uso para el cual se quiera disponer, estando determinada por los diferentes parámetros que caracterizan su calidad, los criterios en el uso del agua para la agricultura están relacionados principalmente con la salinidad, los metales pesados,

los nutrientes, los sólidos suspendidos y los patógenos (Food and Agriculture Organization of the United Nations 2016).

ILUSTRACIÓN 1: AGENTES CONTAMINANTES DEL AGUA



IDEAM. (2019). ALTERACIÓN DE LA CALIDAD HÍDRICA [IMAGEN].

Para efectuar un estudio efectivo de los parámetros fisicoquímicos es necesario determinar la cantidad de soluto o de una sustancia específica presente en el fluido, es importante hablar en términos de concentración, esta mide el peso del soluto por unidad de volumen y se puede expresar de las siguientes maneras:

Miligramos por litro (mg/L): Esta expresión logra enmarcar el peso de una sustancia presente en un litro de agua.

Partes por millón (ppm): En este caso la concentración se expresa en unidades peso/peso. Esta unidad se refiere al peso del soluto sobre el peso equivalente a un litro de agua.

Las aguas que ya han sido empleadas para diversas actividades se conocen como aguas residuales, entre estas destacan las domésticas, industriales y urbanas, su principal característica es la cantidad de agentes contaminantes y potencialmente peligrosos para el medio ambiente (von Sperling 2007), los parámetros de medición más relevantes para determinar la calidad de estas aguas son:



SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST): Este parámetro indica la presencia de sales disueltas y partículas en suspensión ya sean orgánicas o inorgánicas, además aporta relaciones de DBO y de DQO ayudando a predecirlos, ya que ensayos como la DBO pueden durar hasta 7 días en dar resultados. Los sólidos suspendidos generan inconvenientes estéticos, depósitos de lodo, adsorción de polución, protección de patógenos y consumo de oxígeno disuelto (Sierra 2011).

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO): Es el parámetro que se utiliza para cuantificar el contenido de materia orgánica en una muestra de agua, se mide determinando la cantidad de oxígeno que requieren microorganismos para estabilizar, degradar, oxidar, entre otros la materia orgánica. La prueba DBO₅ Consiste en la cantidad de oxígeno que se emplea en 5 días a 20° C por una población variada de microorganismos en un medio sub aeróbico. Su control es fundamental debido a que puede agotar el oxígeno generando condiciones sépticas y mortalidad en el ambiente acuático (Sierra 2011).

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica a través de una sustancia química oxidante en una solución, midiendo así la carga de contaminantes producida por los desechos domésticos e industriales. El ensayo consiste en cuantificar el oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica del agua residual produciendo CO₂, agua y amoníaco (Sierra 2011).

NUTRIENTES: En los nutrientes se pueden encontrar variables como el nitrógeno, fósforo, potasio, zinc, boro y azufre, estos pueden llegar a generar vida acuática indeseable, toxicidad para los peces, enfermedades en niños y contaminación de las aguas subterráneas, provocando altos niveles de nitratos al ser dispuestos en el suelo. Los nutrientes son esenciales para el crecimiento de plantas y tienen un valor agregado si están presentes en el agua destinada para riego (Sierra 2011).

FÓSFORO TOTAL: Este Indicador determina la cantidad de detergentes sintéticos presentes en el agua residual, ya que estos contienen cerca del 12 al 13% de fósforo en su composición total (Sierra 2011).

NITRÓGENO: Este compuesto se divide en nitratos y nitritos; los nitratos pueden causar metahemoglobina al transformarse en nitritos en el sistema digestivo, los nitritos forman ácido nitroso



al reaccionar con soluciones ácidas, además se pueden mezclar con aminas produciendo nitrosaminas, sustancias potencialmente cancerígenas. La presencia de nitrógeno amoniacal y orgánico es un indicador de contaminación reciente que genera un problema de salud pública (Sierra 2011).

CATIONES: La presencia de metales pesados en los cuerpos de aguas es causada principalmente por los vertimientos de aguas residuales industriales y comerciales, estos elementos se van acumulando con el tiempo en el ambiente y su problema radica en los altos niveles de toxicidad, inhibición al tratamiento biológico y contaminación de aguas subterráneas (Sierra 2011).

4.1.2. IRRIGACIÓN O RIEGO

Los criterios de calidad del agua para utilizarla en riego se deben determinar no solamente en los efectos directos sobre las plantas y los efectos sobre el consumidor, sino también en las consecuencias sobre el suelo; se debe tener en cuenta que el agua destinada para agricultura, en muchos lugares, no recibe ningún tratamiento antes de ser aplicada a los cultivos. El agua de irrigación o riego debe contener diferentes micronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, cuando estos micronutrientes están en exceso pueden llegar a ser tóxicos para las plantas y sus consumidores (Marimon 2018). El uso del agua en la irrigación se puede clasificar en dos categorías según Carlos Alberto Sierra Ramírez. La primera, el riego restringido que se refiere a productos agrícolas que no son comestibles como las flores, zonas verdes, productos de la ganadería como pastos o productos alimenticios que tienen un procesamiento comercial o que habitualmente se consumen cocidos. La segunda categoría tiene relación con el uso del agua para riego no restringido, y son aquellos cultivos de alimentos que se consumen directamente (crudos) o que simplemente no tienen ningún procesamiento comercial como es el caso de las hortalizas (Sierra 2011).

4.1.3. GENERALIDADES DEL RIO BOGOTÁ

El río Bogotá está ubicado en el altiplano cundiboyacense y nace en el nororiente del municipio de Villapinzón a 3.300 msnm, es muy importante para la ciudad ya que sus aguas recorren de noreste a sureste zonas aledañas, donde se desarrollan las principales actividades económicas como la agricultura, producción pecuaria e industrial, además entre su cuenca alta y media habitan más de 30 especies de aves y gran variedad de aves acuáticas, en general el río tiene una influencia de unas

589.143 hectáreas desde su nacimiento hasta su desembocadura a la altura del municipio de Girardot a unos 280 msnm en el río Magdalena, como se observa en la ilustración 2, (CAR | Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible 2018).

ILUSTRACIÓN 2: RIO BOGOTÁ

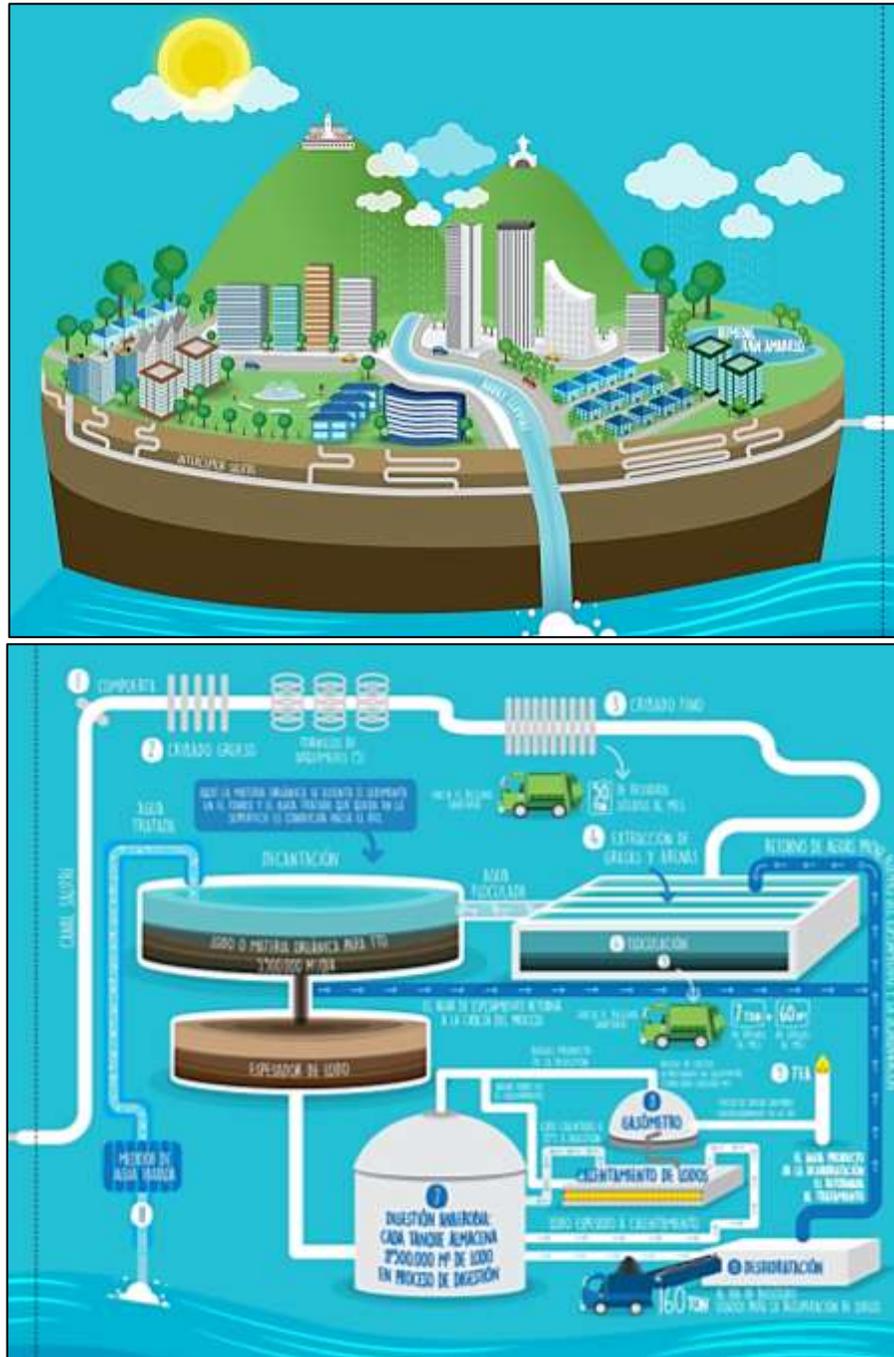


CAR. (2019). BIODIVERSIDAD [IMAGEN].

4.1.4. TRATAMIENTO REALIZADO A LAS AGUAS RESIDUALES POR LA PTAR SALITRE

El proceso aplicado en la Planta es un Tratamiento Primario Químicamente Asistido, logrando remociones del 40 por ciento de materia orgánica y un 60 por ciento de sólidos suspendidos totales. Consiste en realizar un pretratamiento en el cual se retiene y remueve el material de gran tamaño, residuos sólidos, arenas y grasas, los cuales pueden interferir en el sistema u obstaculizar la maquinaria en el proceso de tratamiento, las aguas residuales pasan a tanques clarificadores donde se mueven lentamente permitiendo que los cúmulos de materia orgánica, lodos primarios y flóculos biológicos se depositen en el fondo y sean extraídos por decantación, mientras que el material flotante es removido por la trampa de grasas, produciendo agua tratada con bajos niveles de materia orgánica y materia suspendida. De manera simultánea se le realiza un proceso a los lodos en el que son clasificados y aireados, para ser enviados a grandes digestores que inician un proceso para transformarlos en un biosólido, el cual es usado como abono.

ILUSTRACIÓN 3: PROCESO DE LA PTAR EL SALITRE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS



EMPRESA DE ACUEDUCTO, ALCANTARILLADO Y ASEO DE BOGOTÁ. (2019). PLEGABLE GENERAL PTAR SALITRE [IMAGEN].

El agua pasa a reactores biológicos en los cuales se usan microorganismos aeróbicos que tienen la capacidad de asimilar la materia orgánica y nutrientes disueltos en el agua residual, posteriormente se obtiene el agua en mejores condiciones para ser devuelta al medio ambiente, lo que hace posible



que el Río Bogotá se recupere como cuerpo vivo, en general el proceso se puede dividir en dos partes, como se observa en la ilustración 3, el tratamiento de aguas residuales (1-6) y el tratamiento de lodos (8-10) (Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá. 2012).

La planta PTAR Salitre Fase I, entró en operación en el año 2000 y trata 4m³ de aguas residuales por segundo. La Fase II es un proyecto de gran importancia para la comunidad y el medio ambiente, ya que tratará un volumen de 7.0 m³ de agua por segundo e impedirá que un promedio de 450 toneladas mensuales de basuras llegue al río (CAR | Corporaciones Autónomas Regionales y de desarrollo sostenible 2018).

4.1.5. TÉCNICAS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE METALES PESADOS

La remoción de metales pesados varía de muy pequeña a 90%, obedeciendo a las propiedades del suelo y de la especiación de los metales influyentes. Hay indicios de que una vez que los metales pesados se adsorben, no se desorben fácilmente. La desorción puede depender en parte de la capacidad de amortiguación, la concentración de sal y el potencial de oxido-reducción de desinfección. Estos productos químicos incluyen oxidantes, alcoholes, fenoles, compuestos fenólicos, sales y metales pesados. Las técnicas de tratamiento de aguas residuales convencionales, que se usan usualmente para la reducción o eliminación de contaminantes son las siguientes:

FILTRACIÓN POR MEMBRANA

Este proceso tiene una alta eficiencia, no requiere de un amplio espacio para ejecutarse, posee una fácil operación y no es selectiva, entre las desventajas esta la generación de una gran cantidad de lodos los cuales contienen metales, las membranas se utilizan para procesos de tratamiento de agua potable, aguas servidas, industriales y aguas residuales domésticas en una menor proporción.

En la ilustración 4 se observa un ejemplo de filtración por membrana, y en la Imagen 5 se muestran diferentes filtraciones por membranas. Estas se clasifican según su peso molecular de corte, material de la composición de la membrana, permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, entre otros, este proceso se puede emplear para tratar y recuperar sales metálicas de residuos

generados en procesos galvanoplásticos, reciclaje de aceites, explotación y producción de hidrocarburos (Ivan et al. 2015).



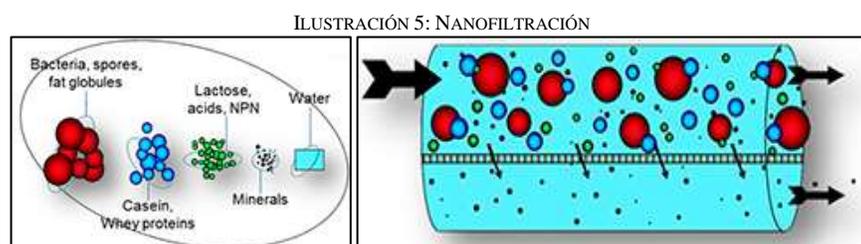
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (2019). PROCESOS DE MEMBRANA [IMAGEN].

OSMOSIS INVERSA

Este es el desarrollo de permeación a través de membrana para la separación por difusión controlada o cribado. Tiene la capacidad de seleccionar elementos de tan solo 0.0001mm, lo que otorga amplias capacidades de tratamiento, en la parte izquierda de la ilustración 4 se observa este proceso, y en la Imagen 6 se muestra una comparación con otros métodos, donde se da una idea del tamaño de partículas que se pueden retener (Gunatilake SK 2015).

NANOFILTRACIÓN

Esta técnica, utiliza membranas con poros pequeños menores a un nanómetro, la cual requiere presiones de funcionamiento.



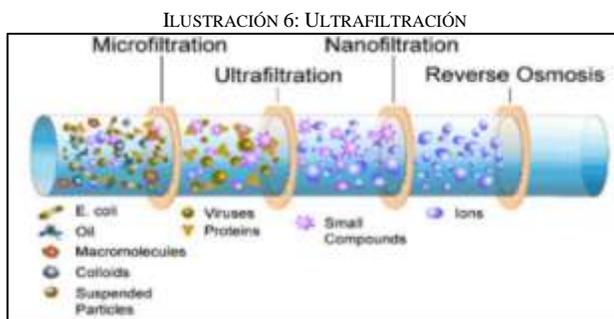
AQWA. (2019). NANOFILTRACIÓN [IMAGEN].

Las membranas empleadas en nanofiltración tienen la capacidad de retener especies neutras con un peso molecular entre 200 a 300 g/mol, y también posee la capacidad de rechazar iones inorgánicos, al utilizar un mecanismo de exclusión por tamaño en combinación con interacciones electroestáticas entre los iones y la membrana cargada como se muestra en la ilustración 5, presenta un mayor

rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes, la presión de funcionamiento es más baja, posee un mayor flujo y un menor consumo de energía en comparación con la osmosis inversa. (Ivan et al. 2015).

ULTRAFILTRACIÓN

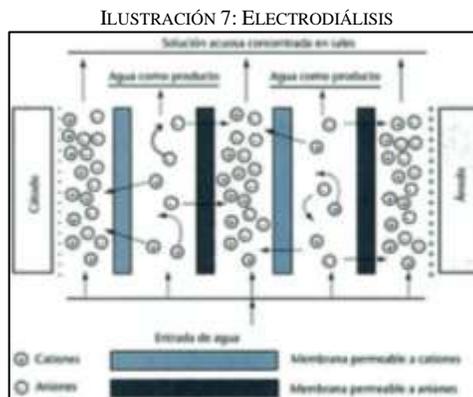
Este es un proceso de fraccionamiento selectivo utilizando presiones de hasta 145 psi, concentra los sólidos en suspensión y solutos que tienen un peso molecular mayor a 10000 umas, este proceso se evidencia en el segundo filtro de la ilustración 6, (Gunatilake SK 2015). La ultrafiltración es utilizada en el fraccionamiento de leche y suero proteico.



AQWA. (2019). NANOFILTRACIÓN [IMAGEN].

ELECTRODIÁLISIS

Esta técnica puede remover componentes iónicos de soluciones acuosas las cuales emplean membranas permeables selectivas a través de un campo eléctrico constante, como se muestra en la ilustración 7. Esta práctica tiene la capacidad de remover iones cargados hasta con $0,0001 \mu\text{m}$, mediante láminas porosas de resinas de intercambio iónico, las cuales tienen una baja permeabilidad “relativa” para el agua (Ivan et al. 2015).



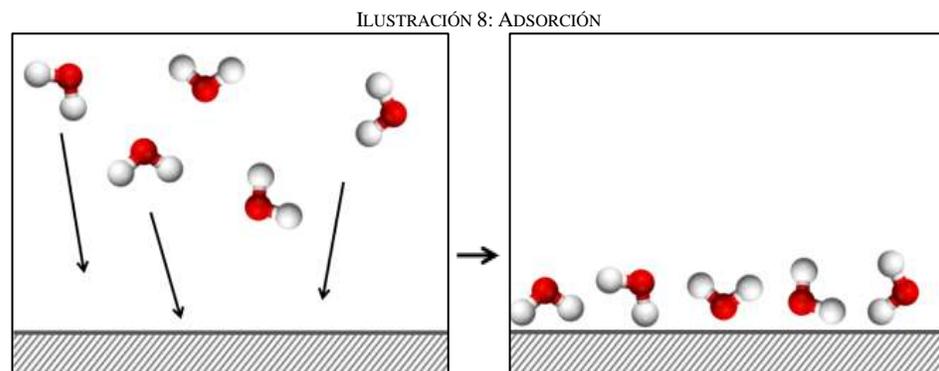
TECSUP - INSTITUTO DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN PERÚ. (2019). TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES [IMAGEN].

INTERCAMBIO IÓNICO

Los iones de solución se transfieren a una matriz sólida, la cual libera iones de un tipo diferente, pero de una carga igual. Este intercambio iónico es un proceso de separación física donde los iones intercambiados no se modifican químicamente. Tiene ventajas en la recuperación de metales, selectividad, un menor volumen de lodos producidos y la reunión de especificaciones de descarga estrictas (Ivan et al. 2015).

ADSORCIÓN

La adsorción es un fenómeno en el que un sólido o líquido atrae y retiene en su superficie otras sustancias como líquidos, gases, vapores u otros cuerpos disueltos, como se observa en la ilustración 8, tiene una amplia remoción de varios contaminantes, posee una cinética rápida y posiblemente selectiva esto dependiendo del adsorbente y de su rendimiento. Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice, entre otros son algunos de los adsorbentes, sus procesos pueden ser variados modificándolos químicamente, estos se emplean para la eliminación de colorantes iónicos, metales pesados, materiales radiactivos, generados por diferentes tipos de industrias (Gunatilake SK 2015).



CHEMBAM - CHEMISTRY RESEARCHERS (2017). ADOSORTIO VS ABSORTION [IMAGEN].

PRECIPITACIÓN QUÍMICA

Es una técnica altamente utilizada ya que tiene una operación sencilla, económica y selectiva, una de sus desventajas se encuentra en el mantenimiento ya que es costoso debido a la generación de lodos. También se emplea la precipitación con sulfuros presentándose solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, por esta razón se pueden obtener rendimientos altos (Gunatilake SK 2015).

COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

Mediante este se logra desestabilizar el coloide y aglomerarlo posteriormente. En la primera parte la coagulación elimina la capa eléctrica que caracteriza a los coloides, en la segunda parte con la floculación se aglomeran los coloides atrayendo las partículas mediante aglutinamiento de los floculantes, en la ilustración 9 se muestra un ejemplo de este proceso. Es indispensable tener en cuenta la dosis química apropiada, su efecto energético en la mezcla y el tiempo empleado para realizar la mezcla (Gunatilake SK 2015).



NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (2019). TRATAMIENTO [IMAGEN].

Electro coagulación: La electrocoagulación aplica los principios en coagulación floculación en un reactor electrolítico. Este consiste en un recipiente que ha recibido una descarga eléctrica, con varios electrodos que se encargan de aportar iones los cuales desestabilizan partículas coloidales, reemplazando así las funciones de compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional. Induciendo así corriente en el agua por medio de placas metálicas ya sean de hierro o aluminio (Ivan et al. 2015).

Electro floculación: Esta consiste en un proceso químico con adición electrolítica de iones metálicos. Posee una alta eficiencia en la remoción de contaminantes, se debe a que son arrastrados por burbujas de gas producidas en el sistema, haciendo que salgan a flote en la superficie (Gunatilake SK 2015).

FLOTACIÓN

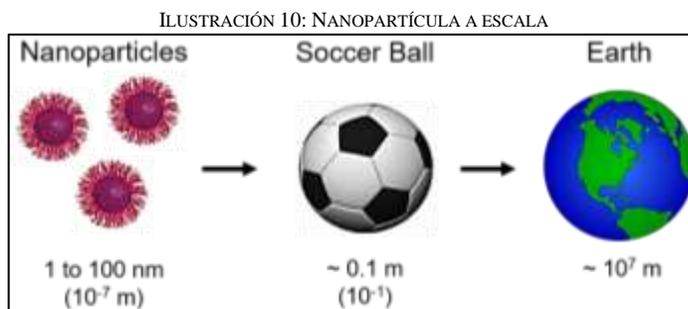
Este se basa en impartir especies iónicas de metales en las aguas residuales, a través de diferentes agentes activos presentes en la superficie, finalmente se realiza la eliminación de estas especies por medio de burbujas de aire (Gunatilake SK 2015).

FOTOCATÁLISIS

Es una transferencia de carga a través de la interfaz de un semiconductor y el cuerpo de agua contaminado. La conductividad aumenta con la temperatura, generando así un electrón-hueco, donde se da la adsorción de los fotones y la distribución de variados estados electrónicos en la superficie, degradando moléculas orgánicas colorantes y metales pesados (Schimmelpfennig and Sperlich 2011).

4.1.6. NANOPARTÍCULAS

Un nano-objeto es un elemento físico que tiene al menos 1nm de dimensión, sus características físicas clave están dictadas por los nano-objetos que contienen. Cuando hablamos de nanopartículas, las propiedades magnéticas y otras propiedades físicas dependen del tamaño, en la ilustración 10 se puede observar una nanopartícula a escala, por esta razón las partículas que no tienen tamaños comparables, con tamaños de dominios magnéticos en los materiales a granel correspondientes, son las más interesantes desde el punto de vista científico. Los nanomateriales tienen una clasificación en materiales compactos y nano-dispersiones.



ESCIENCE INSTITUTE. (2019). NANOPARTICLES ON THE SCALE [IMAGEN].

Los materiales compactos incluyen los nanoestructurados, son componentes isotrópicos en su composición macroscópica, estos consisten en contactar unidades de tamaño nanométrico como elementos estructurales repetitivos.

Las nano-dispersiones poseen un medio de esparcimiento homogéneo e inclusiones nanométricas dispersas en el medio donde se encuentran aisladas unas de otras. La distancia entre los nano-objetos puede variar en una amplia gama de límites desde decenas de nanómetros hasta fracciones de nanómetro.

NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Las nanopartículas magnéticas metálicas tienen una mayor magnetización a comparación de los óxidos metálicos, pero estas no son estables en contacto con el aire y se oxidan fácilmente, lo que produce un cambio en la propiedad de magnetización, en la ilustración 11 se muestra el efecto de un campo magnético de origen atómico sobre un fluido ferromagnético.

El hierro es un gran material ferromagnético, que posee una alta densidad de momento magnético, aproximadamente 220 emu/g, es magnéticamente blando. La preparación de estas nanopartículas es una tarea complicada, ya que muchas veces estas contienen óxidos, carburos e impurezas. Los óxidos de hierro tienen una atención cada vez mayor debido a sus numerosas aplicaciones. Existe una amplia variedad de estructuras y estados de hidratación, hasta hace poco se ha tenido conocimiento de los detalles estructurales, termodinámica y la reactividad que poseen los óxidos de hierro. Además, las propiedades físicas y químicas varían por el tamaño de la partícula y el grado de hidratación. Estas tienen una clasificación según su tamaño en partículas de óxido de hierro súper magnético, las cuales muestran diámetros mayores a 30 nm y partículas de óxido de hierro super magnéticas ultra pequeñas ya que tienen un diámetro menor 30 nm.

ILUSTRACIÓN 11: EFECTO DE UN CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO EN FLUIDOS FERROMAGNÉTICOS

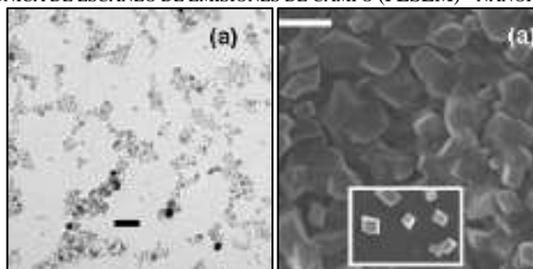


SCIELO. (2014). QUÍMICA NOVA - NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS [IMAGEN].

FE304 (MAGNETITA)

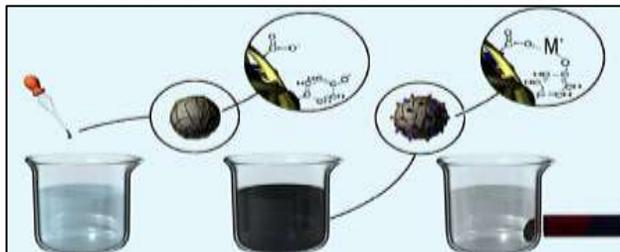
La magnetita posee propiedades increíbles ya que tiene cationes de hierro en dos estados de valencia Fe^{+2} Fe^{+3} , en la estructura de espinela inversa, la estabilización en los cuerpos de agua es apta para las bio-aplicaciones y la extracción de metales pesados, en la ilustración 12 se observa en detalle su microscopía electrónica, y en la Imagen 13 el esquema de eliminación de metales pesados con nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 recubiertas de ácido húmico.

ILUSTRACIÓN 12: DE DERECHA A IZQUIERDA: MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN (HRTEM) Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE ESCANEADO DE EMISIONES DE CAMPO (FESEM) - NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA



ESCIENCE INSTITUTE. (2019). NANOPARTÍCULAS A ESCALA [IMAGEN].

ILUSTRACIÓN 13: ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS CON NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA CON ÁCIDO HÚMICO



AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. (2008). APLICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA AL TRATAMIENTO DE AGUAS [IMAGEN].

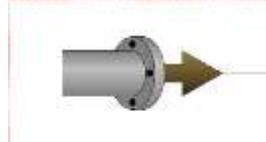
4.1.7. MODELACIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO: GPS-X

El modelado de la PTAR Salitre se realizó en el programa GPS-X Hidromantis, este es un simulador dinámico de plantas de tratamiento de aguas residuales, y su interfaz permite modelar matemáticamente, controlar, optimizar y gestionar las plantas de tratamiento, además permite realizar análisis de sensibilidad y administrar escenarios. En general el programa cuenta con una amplia gama de procesos y actividades para modelar los tratamientos de aguas residuales, a continuación, se enlistarán los objetos empleados para la simulación de la PTAR Salitre.

Influente de aguas Residuales:

En este objeto se realiza la descripción y caracterización matemática que presentan las aguas residuales, con el fin de predecir el comportamiento dinámico de la planta.

ILUSTRACIÓN 14: INFLUENTE AGUAS RESIDUALES

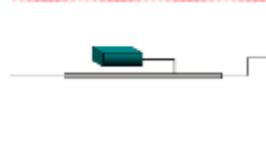


GPS-X HIDROMANTIS (2020).

Dosificación Química en Línea:

Se emplea para simular el proceso de coagulación y floculación, para eliminar los componentes solubles y coloidales presentes en el agua a tratar, las variables de entrada operacional son el coagulante, la concentración y dosificación del mismo.

ILUSTRACIÓN 15: DOSIFICACIÓN QUÍMICA

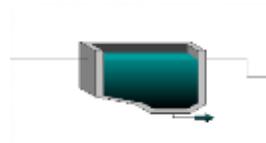


GPS-X HIDROMANTIS (2020).

Cámara de arena:

Separa los sólidos en suspensión de las aguas residuales, este proceso basa en la diferencia de peso específico que existe entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, para su simulación es necesario ingresar la cantidad de arena producida por flujo.

ILUSTRACIÓN 16: CÁMARA DE ARENA



GPS-X HIDROMANTIS (2020).

Clarificador primario circular:

Se basa en los principios de separación mecánica e hidráulica, produciendo un líquido homogéneo capaz de ser tratado biológicamente y un lodo que se puede tratar por separado. Los parámetros físicos de entrada son la profundidad y el diámetro de los clarificadores, mientras que los parámetros operacionales son la eficiencia de remoción y el flujo bombeado por el clarificador.

ILUSTRACIÓN 17: CLARIFICADOR PRIMARIO

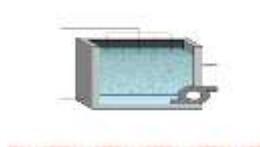


GPS-X HIDROMANTIS (2020).

Filtro de arena:

Su objetivo es retener los sólidos suspendidos presentes en el agua que no fueron eliminados en procesos anteriores, y pueden constituir una parte significativa de la DBOs, los datos a son el flujo y el porcentaje de sólidos retenidos en el lavado.

ILUSTRACIÓN 18: FILTRO DE ARENA

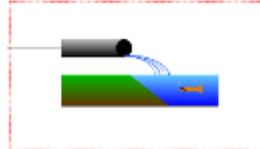


GPS-X HIDROMANTIS (2020).

Descarga:

Entrega los resultados finales de la simulación, sus parámetros de funcionamiento son los límites de calidad, sin embargo, para realizar una simulación se recomienda no introducir variables de entrada con el fin de no alterar los resultados.

ILUSTRACIÓN 19: DESCARGA



GPS-X HIDROMANTIS (2020).

La simulación consiste en una técnica numérica la cual diseña y desarrolla un experimento en una computadora digital. Al correr un modelo se desarrollan diferentes tipos de relaciones matemáticas y lógicas, fundamentales para describir el comportamiento de sistemas complejos de un entorno real a través de intervalos de tiempo, con el fin de evaluar y comprender el comportamiento del sistema y poner en práctica parámetros para operar el mismo.

ILUSTRACIÓN 20: SIMULACIÓN CIENTÍFICA



ELABORACIÓN PROPIA (2020).



4.1.8. MODELACIÓN DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN: FAST 2.1

El software empleado para modelar y simular la columna de adsorción fue FAST, por sus siglas en inglés Fixed-bed Adsorption Simulation Tool. Esta herramienta permite predecir el comportamiento de las curvas de avance generadas por los filtros de adsorción de lecho fijo empleadas en el tratamiento del agua. La concentración de efluente del filtro de lecho fijo se puede representar en función del tiempo de funcionamiento, del volumen tratado y del volumen tratado por masa (Sperlich et al. 2008). Para la simulación se debe seleccionar el modelo e ingresar los parámetros operacionales, cinéticos y adimensionales, a continuación, se explica en detalle cada elemento:

PARÁMETROS OPERACIONALES:

EBCT - Empty Bed Contact Time: El tiempo de contacto del lecho vacío en términos matemáticos representa el volumen de los poros por el volumen del lecho que ocupa el adsorbente, divididos entre el caudal¹ (Sperlich et al. 2008).

m – Mass of adsorbent: La masa del adsorbente representa la cantidad de masa del material capaz de retener sobre su superficie el componente que se desea eliminar, y se expresa en términos de peso seco o húmedo¹ (Sperlich et al. 2008).

ϵ_B - Bed Porosity: La porosidad del lecho se define como la relación entre el vacío y el volumen total en una capa del filtro, por cuestiones prácticas se recomienda calcular este parámetro a partir de la densidad del lecho del filtro y la densidad de la partícula adsorbente¹ (Sperlich et al. 2008).

ρ_B – Bed density: La densidad del lecho este parámetro hace referencia a la densidad aparente del adsorbente en el lecho fijo, y se puede calcular al dividir la masa del adsorbente entre el volumen de la cama del filtro¹ (Sperlich et al. 2008).

d_p – Particle diameter: El diámetro de la partícula hace referencia al diámetro efectivo o en su defecto al diámetro promedio del grano adsorbente (Sperlich et al. 2008).

¹ La relación de dependencia entre las variables hace que solo sea necesario ingresar uno de los valores EBCT o m y ϵ_B o ρ_B al programa



C_0 – Influent concentratio: La concentración de influente determina la concentración constante del adsorbato presente en el agua (Sperlich et al. 2008).

Q – Flow rate: La tasa de flujo expresa el caudal constante dirigido al absorbedor (Sperlich et al. 2008).

BV – Bed Volume: El volumen del lecho es la relación de la masa y la densidad de los adsorbentes, incluyendo la porosidad. Este parámetro es utilizado para verificar las dimensiones del filtro (Durán Vera 2019).

EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN Y PARÁMETROS CINÉTICOS:

K_F and n – Freundlich isotherm coefficients: La isoterma de adsorción se define como la cantidad de adsorbato adsorbido en función de la concentración. Esta describe el equilibrio de la columna cuando la concentración del contaminante remanente presente en la solución se encuentre estabilizado dinámicamente con la presente en la superficie del sólido (Rubens Sette Ramalho 2003).

La isoterma de Freundlich es una ecuación empírica, empleada para describir datos de adsorbentes no homogéneos. En esta ecuación se evidencia que las constantes K_F y n dependen de diversos factores ambientales, donde n representa la capacidad de adsorción y es adimensional, mientras que K_F se compone por unidades de masa y concentración del afluente.(Cubillas Terreros 2015)

K_L - Film diffusion coefficient: El coeficiente de transferencia de masa se asume como un valor proporcional al área de la superficie y la diferencia existente en la concentración de la solución a granel con la superficie adsorbente (Cubillas Terreros 2015).

D_s – Surface diffusion coefficient: El coeficiente de masa en fase sólida describe como el transporte de masa en el grano adsorbente es similar a una difusión superficial homogénea, y el modelado es realizado con base la segunda ley de Fick (Durán Vera 2019).

PARÁMETROS ADIMENSIONALES:

D_g – Solute distribution parameter: El parámetro de distribución del soluto se define como el equilibrio de adsorción, matemáticamente representa la relación entre el soluto adsorbido por el grano adsorbente y el de la fase líquida (Durán Vera 2019).



Bi – Biot number: El número de Biot es adimensional y representa la relación entre la tasa de transferencia de masa de fase líquida a sólida (Durán Vera 2019).

St – Stanton number: El número de Stanton es un coeficiente adimensional y representa la transferencia de masa en fase líquida (Asamblea Nacional Constituyente 1991).

4.2. ESTADO DEL ARTE

Además de los procesos implicados en la eliminación de metales pesados convencionales ya mencionados en el marco de teórico (Técnicas convencionales de remoción de metales pesados). Se mencionarán algunos de estudios relevantes para el desarrollo de esta investigación:

ELIMINACIÓN FÁCIL, RÁPIDA Y EFICIENTE DE METALES PESADOS DEL LABORATORIO Y AGUAS RESIDUALES REALES UTILIZANDO NANOESTRUCTURAS DE HIERRO ELECTRO CRISTALIZADO

Se realizó una investigación sobre el efecto de la electro-oxidación del hierro para la eliminación de cobalto y cadmio. Esta pesquisa se efectuó inicialmente con muestras de laboratorio y luego se estudiaron aguas residuales reales de dos ríos en Irán. Primero se aplicó un voltaje entre 5 a 25 V, en tiempos de contacto de 10 a 60 min, el agua residual tenía una concentración de metales pesados de 50 a 500 ppm, además de aditivos orgánicos, posteriormente se efectuó una caracterización de las muestras de agua y lodo antes y después del tratamiento.

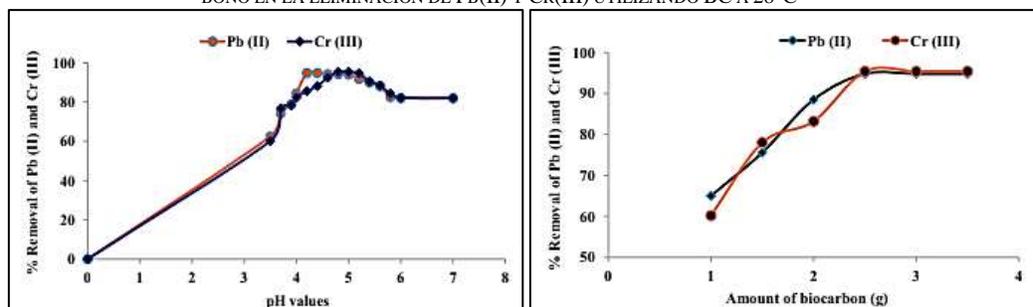
Los resultados de la espectroscopia de absorción atómica mostraron que el porcentaje de eliminación de las especies con exposiciones menores a 25 V, tiempos de reacción de 60 min, concentraciones de cobalto con 220 ppm y cadmio con 100 ppm eran aproximadamente del 100%; este estudio también implementó nanopartículas de magnetita electro-cristalizadas modificadas con tiourea y butanoato de sodio, estas tienen un tamaño de partícula aproximado de 20 a 95 nm, para la adsorción de antimonio del agua residual. Los resultados de ICO-MS confirmaron que se modificaron superficialmente las nanopartículas de magnetita debido al grupo de amina producida, proporcionando funcionalidades específicas que permiten mejorar la capacidad de las partículas para la absorción de Sb en procesos de tratamiento de aguas residuales (Mosivand, Kazeminezhad and Fathabad 2019).

ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS TÓXICOS DE AGUAS RESIDUALES SINTÉTICAS USANDO UNA NUEVA TECNOLOGÍA DE BIOCARBONO

En esta investigación se implementaron un conjunto de técnicas ecológicas, en las que se generó bicarbonato a partir de una planta medicinal de caléndula, para esto se consideraron los parámetros influyentes para la biosorción de metales pesados implícitos en el pH, el tiempo de contacto, concentración inicial de iones metálicos y la dosis de biocarbono. Los experimentos se llevaron a cabo a una temperatura de $28^{\circ} \pm 2^{\circ}$ Celsius. El porcentaje de eliminación de iones metálicos fue cerca del 95% en el agua residual sintética.

Los resultados arrojaron que la dosis óptima de biocarbono es de 2.5 g, con un tiempo de contacto de 150 min, la eliminación de iones de metales pesados en el agua residual tenía una mayor influencia por parte del pH en el agua a tratar y de la concentración del biosorbente, los mecanismos predominantes fueron las interacciones iónicas, el intercambio iónico y la adsorción de superficie en el material biosorbente (Singanan and Peters 2013).

GRÁFICA 1. DE IZQUIERDA A DERECHA: EFECTO DEL pH EN LA ELIMINACIÓN DE Pb(II) Y Cr(III), Y EFECTO DE LA DOSIS DE BIOCARBONO EN LA ELIMINACIÓN DE Pb(II) Y Cr(III) UTILIZANDO BC A 28°C



ELSEVIER. (2013). REVISTA DE INGENIERÍA QUÍMICA AMBIENTAL [GRÁFICA].

UNA NUEVA MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE CATION HETEROGÉNEA CAPA POR CAPA PARA LA EXTRACCIÓN DE IONES METÁLICOS PESADOS DEL AGUA

Durante esta pesquisa se prepararon membranas de intercambio catiónico capa por capa con el objetivo de eliminar iones de metales pesados presentes en el agua mediante diálisis, además se elaboraron membranas con una capa recubierta de nanopartículas de carbono coactivadas con quitosano, y membranas de intercambio catiónico heterogéneas basadas en cloruro de polivinilo. Se realizó una mejora en la adherencia a través de la reticulación de glutaraldehído, se estudió la hidrofilia de la



superficie de la membrana, el flujo, el potencial, super selectividad, y finalmente se demostró que las membranas con nanopartículas carbono coactivado con quitosano tenían una buena capacidad en la eliminación de iones de metales pesados (Hosseini et al. 2020)

TABLA I. EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE IONES DE METALES PESADOS PARA LAS MEMBRANAS CAPA POR CAPA FABRICADAS

The removal efficiency of heavy metal ions for the fabricated LBL membranes.			
Membrane	Cu removal (%)	Ni removal (%)	Pb removal (%)
LBL (CS)	47.12	33.64	29.97
LBL (CS-0.001ACNs)	80.81	56.50	50.22
LBL (CS-0.005ACNs)	98.35	84.12	62.42
LBL (CS-0.01ACNs)	88.05	42.61	37.65
LBL (CS-0.05ACNs)	76.08	58.49	51.86
LBL (CS-0.1ACNs)	78.99	59.01	56.84

ELSEVIER. (2020). DIARIO DE MATERIALES PELIGROSOS [GRÁFICA].

VALORIZACIÓN DE CENIZAS MOSCALES DE CARBÓN PARA ELIMINACIÓN POTENCIAL DE METALES PESADOS DEL SISTEMA ÚNICO Y MULTICONTAMINADO

En esta investigación se estudió la adsorción de cadmio, cobre y níquel, utilizando cenizas volantes de carbón (CFFA), a través de un sistema único multi contaminado. Para el sistema contaminado se analizaron parámetros físicos de optimización, y se empleó el diseño de experimentos de Box-Behnken y de Plackett Burman, para metales pesados en diferentes niveles, variando la concentración inicial ente 10 a 50 mg/L, en los dos casos mencionados, CFFA mostro gran potencial eliminando los metales pesados (Kumar et al. 2019).

CARACTERIZACIÓN DEL ÓXIDO DE NANO-ZIRCONIO DESNUDO Y MODIFICADO (ZRO2) Y SUS APLICACIONES COMO ADSORBENTES PARA LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS BIVALENTES

Esta investigación se centra en la remoción de Cd^{+2} , Cu^{+2} y Ni^{+2} en medios acuosos utilizando dos tipos de nanopartículas ZrO_2 y una modificación de la misma, empleando ácido húmico ZrO_2 -H. El estudio se realizó mediante análisis de adsorción por lotes, variando el tiempo de contacto aplicado, la concentración inicial del metal, el pH de la solución, la dosis de sorbente y la temperatura. Las nanopartículas y las nanopartículas modificadas se caracterizan por difracción de rayos X en polvo, permitiendo determinar la clase, el tamaño medio del grano, la morfología, los compuestos superficiales elementales y los grupos funcionales. Se concluye que el pH y la temperatura controlan la adsorción



de los iones metálicos, además las nanopartículas ZrO_2 y ZrO_2 -H son adsorbentes efectivos para eliminar Cd^{+2} , Cu^{+2} y Ni^{+2} del ambiente acuoso (Mahdavi et al. 2017).

ELIMINACIÓN DE BACALAO, COLOR, ANIONES Y METALES PESADOS DE AGUAS RESIDUALES DE TEXTIL DE ALGODÓN MEDIANTE NANOCOMPOSITOS DE POLIANILINA Y POLIPIRROL REVESTIDOS EN CÁSCARA DE ARROZ

El propósito de esta investigación fue analizar la aplicación de polipirrol y de polianilina sintetizados químicamente en presencia de cloruro férrico y yodato de potasio como oxidante, estos compuestos se recubrieron con ceniza de cascarilla de arroz. Para estudiar su efectividad se midió la eliminación de metales pesados, aniones, color y DQO de las aguas residuales de algodón, además se repitió y comparó el proceso al emplear polianilina, polipirrol y sus mezclas y nanocompuestos con ceniza de cáscara de arroz. Se determinó que estos compuestos son eficaces removiendo aniones, metales pesados, color y DQO de las aguas residuales de textiles de algodón (Ghorbani and Eisazadeh 2013).

TABLA II. ANÁLISIS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE TEXTILES DE ALGODÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA REMOCIÓN

Analyze of cotton textile wastewater before and after removal.			
Compound	Concentration in waste water before removal (mg/l)	Removal efficiency of PAn/RHA (%)	Removal efficiency of PPy/RHA (%)
Cl^-	2625	83.3	86.12
S^{-2}	25	84.28	89.41
SO_3^{-2}	19	82.83	86.58
Fe	1.53	88.27	95.33
Total N (NO_3^{-1} , NO_2^{-1})	38	85.42	88.82
Cu	0.94	89.02	96.43
Color (adsorbance, at 600 nm)	0.394	87.95	97.54
COD	2550	92.50	97.15
Cd	0.28	89.63	92.37

ELSEVIER. (2013). COMPUESTOS: PARTE B [GRÁFICA].

INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS

En esta investigación se estudia un método para la producción de nanopartículas magnéticas funcionalizadas y eficientes para el tratamiento de aguas residuales, eliminando los metales pesados y



analizando principalmente el mercurio en hidrosistemas contaminados. Se evalúa la capacidad de remoción de iones de mercurio del material obtenido en las aguas contaminadas, identificando parámetros que favorezcan la adsorción como pH, la capacidad máxima de adsorción, tiempo y competitividad con otros metales e iones. Adicionalmente se determina la estabilidad de las nanopartículas y su interacción con sustancias presentes en los cuerpos de agua sintéticas y reales.

TABLA III. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y RESIDUALES ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO

	pH	Oxígeno disuelto (mg/L)	DQO (mg/L)	Conductividad $\mu S/cm$	Sulfatos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Hg total (ppb)	Remoción
<i>Rio Bogotá</i>	6.30	1.07	58	272	5.0	0.1	1928 246	87.23%
<i>Humedal</i>	7.63	4.9	45	501	11	0.1	1067 153	85.66%
<i>Rio San Francisco</i>	5.99	6.3	143	681	1	NA	1116 156	86.00%
<i>Humedal Jaboque</i>	6.82	5.1	68	41.4	1	2.5	74.5 9.6	87.05%
<i>PTAR</i>	6.05	4.01	459	303	6	0.1	582 78	88.45%
<i>Sur de Bolívar</i>	5.32	1.5	50	747	8.0	0.3	984 565	42.56%

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. (2018). INGENIERÍA DE NANOPARTICULAS MAGNETICAS [GRÁFICA].

Los resultados de esta investigación mostraron que el nanomaterial es adecuado para la remoción de iones de mercurio en medio acuoso, con una capacidad y adsorción de 34.88 mg/g para concentraciones iniciales de 1 ppm en aguas sintéticas, y una reducción promedio de un 85% en aguas superficiales reales, además las nanopartículas no representan un impacto significativo de toxicidad en el modelo animal (Marimon 2018).

FUNCIONALIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO MAGNÉTICO PARA ELIMINACIÓN DE IONES DE COBRE DE SOLUCIÓN ACUOSA

Durante la investigación se fabricaron nanopartículas de carbón magnético activado, con el fin de emplearlas como adsorbentes y eliminar los iones de Cobre (Cu) presentes en el agua. El procedimiento consistió en realizar una síntesis, a través del método de coprecipitación, y caracterizar los adsorbentes propios del carbón activado magnético, se emplearon los modelos de adsorción de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich con el fin de validar las isotermas, para finalmente



evidenciar la eficiencia de remoción. Se demostró que la adición de nanopartículas magnéticas de FE_3O_4 optimizan la capacidad de adsorción, siendo un factor sobresaliente en la remoción de los iones de cobre, ya que aumentan la eficiencia de regeneración de partículas magnéticas de carbón activado (Gu et al. 2019a).

ESCALA PILOTO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN EXTENDIDA DE CICLO INTERMITENTE (ICEAS PS) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULACIÓN DE PROCESOS

En esta investigación se estudió el efecto del tiempo de retención de lodos y el patrón de aireación, en el desempeño de una escala piloto del sistema de aireación extendido con ciclo intermitente para tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente se realizó la simulación del proceso mediante el software GPS-X, utilizando el análisis de sensibilidad del programa para determinar los parámetros cinéticos más sensibles que afectan el ciclo intermitente de la escala piloto.

Luego de analizar cerca de 50 parámetros cinéticos, se determinó que las variables cinéticas más sensibles son: YH, bH, μ_A , Ko, bA, Ka y μ_{PAO} , ya que tienen un impacto significativo en la eliminación de nitrógeno y fósforo, adicionalmente el patrón de aireación intermitente logró un mayor rendimiento en comparación con otros patrones de aireación, aireación/anóxico y anóxico/aireación. (Latif et al. 2020)

USO DE MODELOS MATEMÁTICOS DINÁMICOS PARA MEJORAR LOS DISEÑOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ACTUALIZADAS

En este artículo se emplean modelos matemáticos y simulaciones para la optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales. Se plantean dos casos enfocados en el tratamiento terciario, con el objetivo de reducir concentraciones de nitrógeno total y fósforo total en el efluente. Las simulaciones demostraron que se presentan reducciones en el rendimiento mejorado de la planta, estas reducciones ayudaron a corregir los diseños de la misma, además se presentó un caso donde el volumen total de los reactores incrementó, mientras que en otro escenario se propuso un control de desnitrificación más estricto, y un tratamiento adicional en el agua que no cumplía los parámetros de calidad.



Los resultados indicaron que los modelos matemáticos, son herramientas valiosas para complementar procedimientos establecidos en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, mediante la simulación de la operación en condiciones dinámicas se obtienen ventajas, como la caracterización precisa de las aguas residuales, el ajuste de parámetros estequiométricos y cinéticos para la operación de una PTAR específica. (Hvala et al. 2017)

4.3. MARCO LEGAL

En esta sección se presentan los diferentes artículos, decretos, reglamentaciones y recomendaciones tenidos en cuenta para el desarrollo de la presente investigación:

4.3.1. CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA 1991

A continuación, se presentan los principales artículos de la Constitución Política de Colombia de 1991 relacionados con el medio ambiente, manejo de recursos hídricos y el saneamiento.

TITULO I. DE LOS PRINCIPIOS FUNDAMENTALES - ARTÍCULO 8: “Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.” (Asamblea Nacional Constituyente 1991)

TITULO II. DE LOS DERECHOS, LAS GARANTÍAS Y LOS DEBERES - CAPITULO 3. DE LOS DERECHOS COLECTIVOS Y DEL AMBIENTE - 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.” (Asamblea Nacional Constituyente 1991)

TITULO II. DE LOS DERECHOS, LAS GARANTÍAS Y LOS DEBERES - CAPITULO 3. DE LOS DERECHOS COLECTIVOS Y DEL AMBIENTE - 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.” (Asamblea Nacional Constituyente 1991)



TITULO XII. DEL RÉGIMEN ECONÓMICO Y DE LA HACIENDA PUBLICA - CA-

PITULO 4. DE LA DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS Y DE LAS COMPETENCIAS - AR-

TÍTULO 356: “<Inciso modificado por el artículo 1 del Acto Legislativo 4 de 2007. El nuevo texto es el siguiente:> Los recursos del Sistema General de Participaciones de los departamentos, distritos y municipios se destinarán a la financiación de los servicios a su cargo, dándoles prioridad al servicio de salud, los servicios de educación, preescolar, primaria, secundaria y media, y servicios públicos domiciliarios de agua potable y saneamiento básico, garantizando la prestación y la ampliación de coberturas con énfasis en la población pobre.” (Asamblea Nacional Constituyente 1991)

TITULO XII. DEL RÉGIMEN ECONÓMICO Y DE LA HACIENDA PUBLICA - CA-

PITULO 5. DE LA FINALIDAD SOCIAL DEL ESTADO Y DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

- 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.” (Asamblea Nacional Constituyente 1991)

4.3.2. LEY 373 DE 1997

A continuación, se referencian los artículos de la Ley 373 de 1997 relevantes para el presente estudio por su relación con el medio ambiente, manejo de recursos hídricos y el saneamiento.

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 acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico.” (Congreso de la República de Colombia 1997)

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 socio-económico y las normas de calidad ambiental. El Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Desarrollo Económico reglamentarán en un plazo máximo de (6) seis meses, contados a partir de la vigencia de la presente ley, los casos y los tipos de proyectos en los que se deberá reutilizar el agua.” (Congreso de la República de Colombia 1997)

4.3.3. DECRETO 1207 DE 2014

El Decreto 1207 de 2014 dicta las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas, en su Artículo 6° estipula los posibles usos del agua para el riego y en el Artículo 7° Los criterios de calidad que deben cumplir dichas aguas.

TABLA IV. CRITERIOS DE CALIDAD PARA EL REÚSO DE AGUAS RESIDUALES PARA CULTIVOS ALIMENTICIOS

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
FÍSICOS		
pH	Unidades de pH	6,0 a 9,0
Conductividad	µS/cm	1500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	1,0*E(+5)
Estreptococos Fecales	NMP/100ml	1,0*E(2)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
Salmonella sp	NMP/100ml	1,0
QUÍMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Iones		
Cianuro Libre	mg CN/L	0,2
Cloruros	mg Cl/L	300,0
Fluoruros	mg F/L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
Metaloides		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
No Metales		
Selenio	mg Se/L	0,02
Otros Parámetros		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	5,0

EDITADA DE MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (2014). DECRETO 1207.



ARTÍCULO 6°: “De los usos establecidos para agua residual tratada. Las aguas residuales

tratadas se podrán utilizar en los siguientes usos:

Uso Agrícola. Para el riego de:

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos
- Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- Jardines en áreas no domiciliarias.” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2014)

ARTÍCULO 7°: Criterios de Calidad: El uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los criterios de calidad dispuestos en las tablas XX (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2014).

4.3.4. RESOLUCIÓN 0631 DE 2015

La resolución 0631 de 2015 estipula los parámetros y rangos límite permisibles en efluentes, alcantarillados públicos y vertimientos puntuales, a continuación, se presentan las gráficas **xx** del Artículo 9° donde se encuentran los “Parámetros físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades productivas de agroindustria” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MINAMBIENTE 2015)



TABLA V. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS A MONITOREAR EN EFLUENTES PARA USO AGRÍCOLA

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS	BENEFICIO DE CAFÉ**	
			PROCESO ECOLÓGICO	PROCESO TRADICIONAL
Generales				
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	5,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00	3000	650
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00		400
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	800	400
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	10	10
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	30	10
Compuestos de Fósforo				
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Otros parámetros para Análisis y Reporte				
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
* Hortaliza, frutas, legumbres, raíces y tubérculos.				
** Clasificación de la Federación Nacional de Cafeteros - FNC/CENICAFE.				

EDITADA DE MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (2015). RESOLUCIÓN 0631

4.3.5. AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS – US EPA

La regulación a nivel nacional e internacional no es lo suficientemente estricta para conseguir que los parámetros en la medición de metales pesados del agua residual tratada empleada en el riego sean uniformes, sin embargo, La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), propuso en el año 2012 la Guía Para La Reutilización del Agua y ha sido ampliamente aceptada en diferentes geografías, por este motivo, será utilizada en la presente investigación como referente para definir los valores parametrizados en la revisión de pH, DBO, turbiedad, materia fecal y cloro residual, según el uso, dependiendo del tipo de cultivo, y los límites para metales pesados, entre otros elementos. (Epa et al. 2004)

TABLA VI. CONCENTRACIONES MÁXIMAS PARA RIEGO

PARÁMETRO	CONCENTRACIONES MÁXIMAS PARA RIEGO	PARÁMETRO	CONCENTRACIONES MÁXIMAS PARA RIEGO
Aluminio	5,00	Hierro	5,00
Arsénico	0,10	Plomo	5,00
Berilio	0,10	Litio	2,50
Boro	0,75	Manganeso	0,20
Cadmio	0,01	Moibdeno	0,01
Cromo	0,10	Níquel	0,20
Cobalto	0,05	Selenio	0,02
Cobre	0,20	Estaño, Tungsteno y Titanio	-
Fluoruro	1,00	Vanadio	0,10
Hierro	5,00	Zinc	2,00

EDITADA DE US EPA (2012). GUÍA PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA



5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se estableció una metodología enfocada en la investigación teórica y experimental, primero se solicitaron y recolectaron muestras de aguas residuales tratadas por la PTAR Salitre, adicionalmente se recopiló información sobre la caracterización del agua y los procesos de la planta, permitiendo así modelar, simular y realizar un análisis de sensibilidad de la PTAR a través del Software GPS-X Hidromantis, posteriormente con el fin de remover los metales pesados y optimizar la Planta se sintetizó el carbón activado para desarrollar las nanopartículas magnéticas, y con los datos obtenidos del Software y de la caracterización de las nanopartículas se diseñó la columna de adsorción.

FUENTES DE INFORMACIÓN:

Fuente primaria: La principal fuente de información para el desarrollo de esta tesis fue la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Salitre, de donde se extrajeron muestras y caracterizaciones de aguas residuales; el método de coprecipitación para la síntesis de las nanopartículas se tomó de la investigación “Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas residuales” desarrollada por Wilfredo Marimon; y los demás datos sobre la síntesis se obtuvieron al realizar los respectivos ensayos en los laboratorios de la Universidad Sergio Arboleda y de la Universidad Católica de Colombia.

Fuente de información secundaria: Las bases de datos consultadas para extraer información alterna fueron ScienceDirect (Elsevier), Ebooks (SpringerLink), Science Database (ProQuest) y Google Scholar.

VARIABLES:

Las variables independientes fueron aquellas que se manipularon, influyendo directamente sobre los resultados de la investigación, afectando a los datos dependientes, desde otro punto de vista los valores intervinientes no podían ser medidos o modificados, aunque alteraran teóricamente a las variables dependientes, la información de control se mantuvo registrada y neutralizada para eliminar posibles alteraciones en los demás parámetros. A continuación, se presenta a detalle el listado de variables y sus respectivas unidades de medida:



TABLA VIII. LISTADO DE VARIABLES

TIPO	VARIABLE	UNIDAD
INDEPENDIENTE	ρ_B Densidad del carbón activado	kg/m ³
	ρ_{op} Densidad del lecho	kg/m ³
	d_p Diámetro del carbón activado	mm
	m Masa del adsorbente	g
	Porcentaje coagulante	%
	e_B Porosidad del lecho	-
	EBCT Tiempo de contacto del lecho	s
	BV Volumen del lecho	mL
DEPENDIENTE	Catión	mg/L
	Compuestos de Nitrógeno	mg/L
	c_0 Concentración influyente	mg/m ³
	Conductividad	μ S/cm
	DBO ₅ Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L
	DQO Demanda Química de Oxígeno	mg/L
	PT Fósforo total	mg/L
	Grasas y Aceites	mg/L
	Iones	mg/L
	Metales y metaloides	mg/L
	Organismos microbiológicos	-
	SST Sólidos Suspendidos Totales	mg/L
	SSV Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L
	ST Sólidos Totales	mg/L
	STV Sólidos Totales Volátiles	mg/L
	SAAM Sustancias Activas al Azul de Metileno	mg/L
	Turbiedad	UNT
INTERVINIENTES	pH Potencial de hidrógeno	Unidades de pH
	Producción de arena por flujo	mg/L
	T Temperatura	°C
CONTROL	Q Caudal	m ³ /s
	Clarificador - Área superficial	m ²
	Clarificador - Eficiencia de remoción	%
	Clarificador - Profundidad	m

ELABORACIÓN PROPIA

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN:

A continuación, se detalla cada parte del proceso, cada ítem está en función de los objetivos específicos:

5.1. SOLICITUD DE MUESTRAS, CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA POR LA PTAR SALITRE Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LOS PROCESOS EN LA PLANTA

La solicitud de muestras se realizó el día **28 de enero de 2020**, a través de una carta dirigida al Director de la Red Troncal de Alcantarillado Yamid García Zúñiga, donde se solicitaron dos muestras de 19 litros cada

una, de agua residual tratada por la PTAR Salitre, con un lapso de tiempo de 20 días entre las tomas. El día **11 de marzo de 2020**, una vez realizados todos los trámites administrativos y luego de firmar el acuerdo de confidencialidad exigido por la Entidad, se realizó la visita a la planta (Ilustración 22) y la toma de muestras.

ILUSTRACIÓN 22: VISITA A LA PTAR SALITRE



ELABORACIÓN PROPIA

Debido a la coyuntura generada por el SARS-CoV-2 los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia fueron cerrados, y las muestras de agua recolectadas no fueron caracterizadas, motivo por el cual se optó por trabajar con el informe “Calidad afluente y efluente FQ-Microbiol” proporcionado por el laboratorio de la PTAR Salitre (ANEXO 1), en él se consigna la información del monitoreo fisicoquímico de los afluentes y efluentes mes a mes durante siete meses, desde el 24 de junio de 2019 hasta el 03 de diciembre de 2019; los datos obtenidos se emplearon para modelar la Planta, así que por practicidad se promediaron y dividieron en parámetros de calidad generales, microbiológicos y químicos.

Durante la visita a la PTAR se recopiló información sobre el tratamiento realizado en la Planta, prestando especial atención a las características físicas y operacionales, el proceso se detalla a continuación:

CAPTACIÓN:

El canal El Salitre forma parte del tramo final del sistema de alcantarillado de la zona norte de la ciudad de Bogotá, la PTAR Salitre capta una parte de las aguas residuales a través de una compuerta ubicada en dicho canal, controlando el nivel hidráulico, y permitiendo la entrada a la Planta de un caudal de 4 m³/s de las aguas residuales, y el paso de crecientes superiores hacia el río Bogotá (Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá. 2012).

TORNILLOS DE ARQUÍMEDES:

Una vez el agua residual entra a la PTAR pasa por un primer filtro llamado cribado grueso, donde se eliminan los sólidos de mayor tamaño, el agua filtrada es elevada por cinco Tornillos de

Arquímedes, dichos tornillos son máquinas helicoidales que transportan fluidos aguas arriba (Gunatilake SK 2015), de las cinco unidades solo operan dos alternadamente, la capacidad máxima de los tornillos es de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, las dimensiones de dichos tornillos son: (Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá. 2012)

- Diámetro Hélice: 3.1 m
- Longitud Hélice: 18 m
- Altura geométrica: 9,5 m
- Capacidad de elevación: $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Capacidad máxima: $10 \text{ m}^3/\text{s}$
- Velocidad de rotación: 23 RPM

ILUSTRACIÓN 23: TORNILLOS DE ARQUÍMEDES PTAR SALITRE

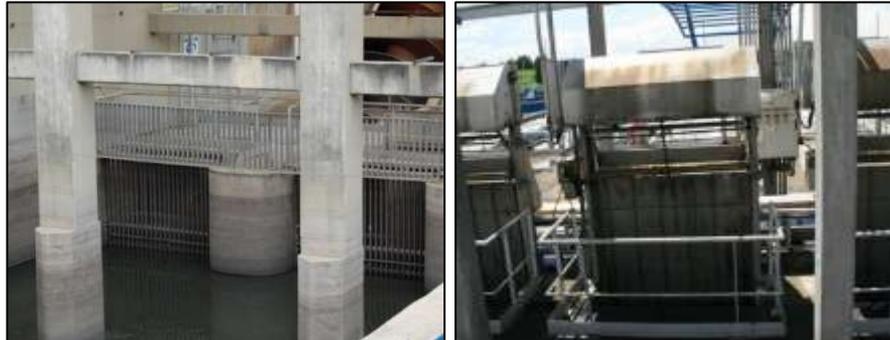


ELABORACIÓN PROPIA

CRIBADO:

El cribado es un proceso en el que se emplean rejillas para retener los sólidos en suspensión presentes en el agua residual que fluye a través de la PTAR Salitre.

ILUSTRACIÓN 24: DE DERECHA A IZQUIERDA: CRIBADO GRUESO Y CRIBADO FINO PTAR SALITRE



CAR (2011). CRIBADO Y ESTUDIOS HIDRÁULICOS DE CÁMARA DE LLEGADA [IMAGEN].

Allí se realizan dos tipos de cribado, el primero es el cribado grueso de limpieza manual, que se efectúa en un punto previo a la succión de las bombas de tipo tornillo donde las barras de las rejillas tienen una separación de 10 cm cada una, el fin es remover los sólidos suspendidos de mayor tamaño que pueden dañar los equipos de tratamiento; el segundo tipo es el cribado fino, la Planta dispone de

4 unidades automáticas, localizadas después de los tornillos de Arquímedes y antes de las cámaras desarenadoras, cada rejilla tiene 2 m de ancho por 2,5 m altura y el espaciamiento entre barras de 2,54 cm (Koei 2011).

EXTRACCIÓN DE GRASAS Y ARENAS:

Para este proceso se usan canales, retirando la grasa por medio de flotación y arenas por decantación. Estos canales tienen dimensiones de 4 m x 30 m y una profundidad de 4.35 m, contando con un tiempo de retención de 7.9 min. Este desarenador se compone por tres puentes los cuales cuentan con raspadores de grasas y bombas para la succión de arenas. El sistema cuenta con cuatro unidades de inyección de aire los cuales generan un flujo helicoidal haciendo más eficiente el proceso de remoción de grasas y arenas.

ILUSTRACIÓN 25: EXTRACCIÓN DE GRASAS Y ARENAS PTAR SALITRE



ELABORACIÓN PROPIA

COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN:

El proceso de coagulación consiste en la desestabilización de un coloide, esto ocurre debido a la eliminación de las dos capas eléctricas que rodean las partículas coloidales, formando núcleos microscópicos. Por otro lado, la floculación consiste en la aglomeración de las partículas desestabilizadas inicialmente en microflóculos, tiempo después forma aglomerados voluminosos llamados flóculos.

Estos procesos se enfocan en eliminar sólidos dispersos, líquidos dispersos (emulsiones) y materia orgánica bien sea microbios o bacterias (Andía Cárdenas 2000).

ILUSTRACIÓN 26: DE DERECHA A IZQUIERDA: DOSIFICADOR DE COAGULANTE – FLOCULANTE Y PROCESO DE COAGULACIÓN EN EL DESARENADOR PTAR SALITRE



ELABORACIÓN PROPIA

La PTAR Salitre para este proceso agrega **cloruro férrico ($FeCl_3$)** como coagulante y **poli electrolito aniónico** como floculante. La adición del coagulante se realiza en los canales del desarenador y trampa de grasas, mientras que el polímero se adiciona al final de los canales (Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá. 2012).

Cantidades:

$$\text{Coagulante: } \frac{22g FeCl_3}{m^3}$$

$$\text{Floculante: } \frac{0,36g}{m^3}$$

SEDIMENTACIÓN PRIMARIA:

El tratamiento primario se basa en los principios de separación mecánica e hidráulica, este es un tratamiento operativo sencillo y relativamente económico, sin embargo, su eficiencia es baja. El sistema debe ser operado con una frecuencia suficiente para evitar acumulación excesiva y arrastre de lodos, pero no lo suficientemente alta como para causar una sobrecarga hidráulica en el sistema de lodos (Rubens Sette Ramalho 2003). La PTAR Salitre cuenta con ocho clarificadores primarios, este tipo de estructuras son diseñadas para realizar una separación aproximada del 40% al 60% de los sólidos en suspensión presentes en el agua, efectuando un tipo de sedimentación con floculación que consiste en la aglomeración de partículas, simultáneamente se realizan variaciones en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. Los ocho clarificadores para sedimentación cuentan con un raspador en el fondo cónico para los sedimentos y un raspador superficial para eliminar las grasas (Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá. 2012). Las principales características de estos elementos clarificadores:



TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

- Altura: 4m
- Diámetro: 43m
- Tiempo de retención: 3 h

ILUSTRACIÓN 27: DE DERECHA A IZQUIERDA: TRAMPA DE GRASAS Y CLARIFICADOR PRIMARIO PTAR SALITRE



ELABORACIÓN PROPIA

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN LA LÍNEA DE AGUAS:

En el interior de la planta el agua se distribuye a través de vasos comunicantes.

ENTREGA DE AGUAS TRATADAS:

La entrega de las aguas residuales tratadas se realiza por efecto de la gravedad a través de canales que llegan al Río Bogotá. En algunos casos cuando la precipitación en la cuenca alta o media supera el nivel de entrega se activan 4 bombas axiales listas para entrar en funcionamiento, cada bomba cuenta con una capacidad nominal de 2,6 m³/s.

5.2. MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE GPS-X HIDROMANTIS

Para modelar el tratamiento de aguas residuales de la PTAR Salitre se empleó el programa GPS-X Hidromantis, la captación se simula utilizando el objeto “Influente de aguas residuales”, los tornillos de Arquímedes y el cribado no se implementaron en el modelo, debido a que no existen objetos que realicen estos procesos, sin embargo, los tornillos se pueden despreciar ya que solo tienen la función de elevar agua por el cambio de cotas en la infraestructura, y el cribado se puede obviar pues se conoce la concentración de sólidos después de este proceso; la coagulación y floculación es efectuada por el elemento “Dosificación química en

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería

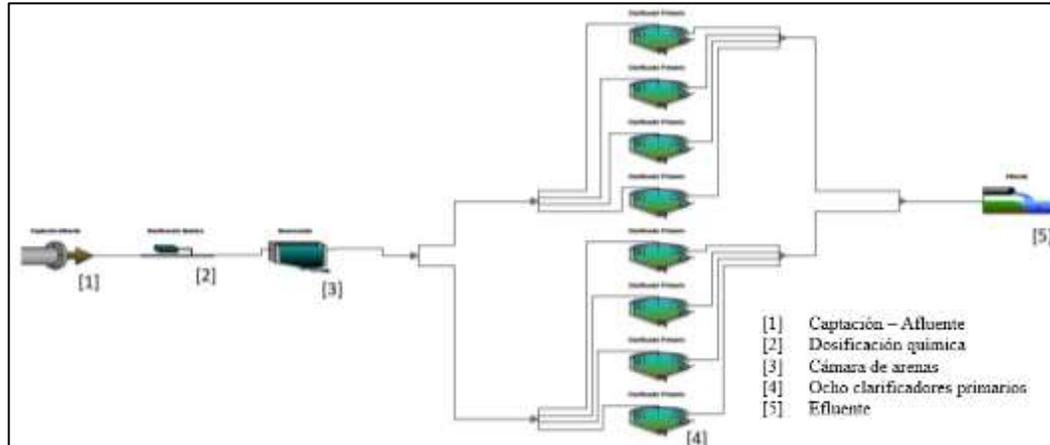
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

línea”, mientras que la extracción de grasas y arenas se incorpora con la “Cámara de arena”, la sedimentación primaria se efectúa por medio del “Clarificador primario”, el sistema de distribución de aguas es representado por las líneas de flujo que conectan cada proceso y la entrega de aguas tratadas se imita con el “Efluente”.

ILUSTRACIÓN 28: MODELO NÚMERO UNO DE LA PTAR SALITRE (EMPLEANDO OCHO CLARIFICADORES), PROGRAMA GPS-X



ELABORACIÓN PROPIA

El modelo solicita ingresar diferentes variables físicas, químicas y operacionales, que le permiten emular el proceso de tratamiento, los parámetros estandarizados se encuentran predefinidos por el programa, a continuación, se desglosa cada elemento con sus respectivos datos:

INFLUENTE DE AGUAS RESIDUALES:

Los parámetros de entrada en este proceso son principalmente químicos, pues el objetivo es ingresar la caracterización del agua a tratar. La demanda química de oxígeno, el nitrógeno total, proporción de sólidos volátiles sobre sólidos suspendidos totales, cantidad de cationes y fósforo total son las variables más representativas, sin embargo, también se deben ingresar las concentraciones de iones precipitables, los compuestos de fósforo y nitrógeno entre otros compuestos inorgánicos. Los datos ingresados deben ser coherentes ya que el modelo se bloquea si los resultados generados por las relaciones matemáticas presentan alguna inconsistencia.

TABLA IX. PARÁMETROS INFLUENTE DE AGUAS RESIDUALES

PROCESO	PARÁMETROS QUÍMICOS	VALOR	PARÁMETROS OPERACIONALES	VALOR
Influyente de aguas Residuales				
	DQO Total [g DQO/m ³]	497,3	Flujo de influente [m ³ /s]	4
	NTK Total [g N/m ³]	71		
	Fósforo Total [g P/m ³]	6,93		
	Cationes [eq/m ³]	5,52		
	Proporción SSV/SST [g SSV/g SST]	0,83		

ELABORACIÓN PROPIA

DOSIFICACIÓN QUÍMICA:

En este proceso se ingresan los parámetros químicos relacionados con la coagulación, la floculación no se considera ya que se encuentra estandarizada por el programa.

TABLA X. PARÁMETROS DOSIFICACIÓN QUÍMICA

PROCESO	PARÁMETROS QUÍMICOS	VALOR
Dosificación Química en Línea		
	Tipo de químico	FeCl ₃
	Porcentaje de Cloruro Férrico [%]	90
	Dosis de químico [kg/d]	5184
	Modo de dosificación	Masa

ELABORACIÓN PROPIA

CÁMARA DE ARENA:

Este proceso solo requiere establecer la remoción de por flujo, los parámetros estandarizados se relacionan con la temperatura.

TABLA XI. PARÁMETROS CÁMARA DE ARENA

PROCESO	PARÁMETROS OPERACIONALES	VALOR
Cámara de arena		
	Producción de arena por flujo [mg/L]	0,34

ELABORACIÓN PROPIA

CLARIFICADOR PRIMARIO:

Para emular el proceso en la Planta primero se implementaron ocho clarificadores de fondo cónico, considerando el área superficial, profundidad total, eficiencia de remoción y el flujo removido en el proceso, posteriormente se sumaron los valores de área superficial y profundidad para elaborar un nuevo modelo de

la planta², en el que solo trabaja un tanque de sedimentación equivalente, permitiendo así efectuar un análisis de sensibilidad del conjunto de clarificadores.

TABLA XII. PARÁMETROS CLARIFICADOR PRIMARIO CIRCULAR

PROCESO	PARÁMETROS FÍSICOS	VALOR	PARÁMETROS OPERACIONALES	VALOR
Clarificador primario circular				
	Área superficial [m ²]	1452,2	Eficiencia de remoción [%]	50
	Área superficial [m ²]*	11617,6		
	Profundidad [m]	4	Flujo bombeado [m ³ /d]	10
	Profundidad [m]*	32		

*Considerando el trabajo conjunto de los ocho clarificadores en un solo clarificador

ELABORACIÓN PROPIA

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es una técnica que permite determinar el impacto de una variable dependiente sobre un modelo, en este caso uno de los parámetros considerados fue el flujo del influente, ya que puede afectar la carga de contaminantes y por ende la cantidad de coagulante requerida, también se estudió la concentración de cloruro férrico, para determinar si su impureza tiene un efecto importante sobre la cantidad de sólidos suspendidos totales, a su vez se analizó la dosis química del coagulante, esperando ver su influencia sobre la remoción de contaminantes, finalmente se evaluó la eficiencia de remoción de un clarificador primario, y del conjunto de clarificadores esperando obtener fluctuaciones significativas en la cantidad de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, DQO y DBO.

ILUSTRACIÓN 29: MODELO NÚMERO DOS DE LA PTAR SALITRE (EMPLEANDO UN CLARIFICADOR), PROGRAMA GPS-X



ELABORACIÓN PROPIA

5.3. OPTIMIZACIÓN DE LA PTAR SALITRE FASE 1:

La PTAR Salitre fase 1 realiza un tratamiento primario (página 27), que mejora la calidad del agua residual significativamente, se propone la implementación de un tratamiento terciario, conformado por un filtro

² El segundo modelo de la PTAR tiene como único fin efectuar un análisis de sensibilidad que permita evaluar la eficiencia de remoción del conjunto de clarificadores.

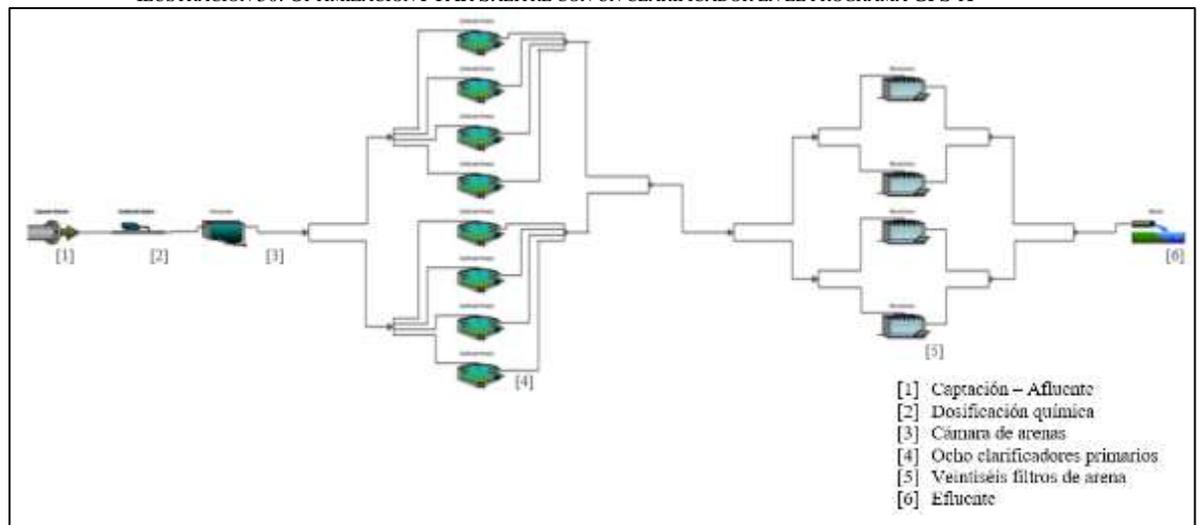
de arena y una columna de adsorción con nanopartículas de magnetita, con el fin de remover los metales pesados potencialmente dañinos para el medio ambiente, que no logran ser removidos por la Planta en la página 39).

El diseño del tratamiento terciario para optimizar la Planta se compone de tres fases, primero se propone la implementación de un filtro de arena que disminuya la concentración de sólidos suspendidos en el agua, evitando la saturación prematura del lecho de adsorción, posteriormente se efectúa la síntesis del carbón activado, que finalmente servirá para modelar la columna de adsorción en el programa FAST 2.1; a continuación, se detalla cada etapa del proceso:

IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO DE ARENA

Para establecer la cantidad de filtros necesarios en la PTAR se empleó la fórmula de Morrill y Wallace, obteniendo un total de 26 filtros rápidos de arena, la implementación de los filtros se realizó en el programa GPS-X Hidromantis.

ILUSTRACIÓN 30: OPTIMIZACIÓN PTAR SALITRE CON UN CLARIFICADOR EN EL PROGRAMA GPS-X



ELABORACIÓN PROPIA

A partir del primer modelo elaborado en el programa, adicionalmente se implementó un regulador de flujo para controlar el caudal y realizar el respectivo retro lavado y mantenimiento, para la modelación se optó por trabajar con una remoción de sólidos del 75%, considerando que un filtro rápido de arena puede

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

remover hasta un 100% de coliformes fecales y alrededor de un 80% de la turbiedad (Park, Gokhake and Colinco 2017).

ECUACIÓN 1 – FORMULA DE MORRILL Y WALLACE PARA CALCULAR EL NÚMERO DE FILTROS

$$n = 0,044 \sqrt{Q_d}$$

$$n = 0,044 \sqrt{345600 \text{ m}^3/\text{d}} = 25,87 \text{ Filtros} \approx 26 \text{ Filtros}$$

SÍNTESIS DEL CARBÓN ACTIVADO MODIFICADO CON NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

La síntesis del carbón se basó en una modificación al método de coprecipitación (Marimon 2018), a partir de una solución de cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) hexahidrato al 97%, e hierro (II) Sulfato $7\text{H}_2\text{O}$ 99% ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sabiendo que la concentración de Fe^{+3} en el primer reactor es de 0,1 mol y que su volumen es de 250 g se realizó la siguiente relación:

ECUACIÓN 2

$$\text{moles } \text{Fe}^{+3} = 0,025 \times 0,1 \text{ moles de } \text{Fe}^{+3} \rightarrow 0,0125 \text{ mol } \text{Fe}^{+2}$$

A partir de esta relación es posible determinar las cantidades de masa a emplear para preparar las soluciones necesarias:

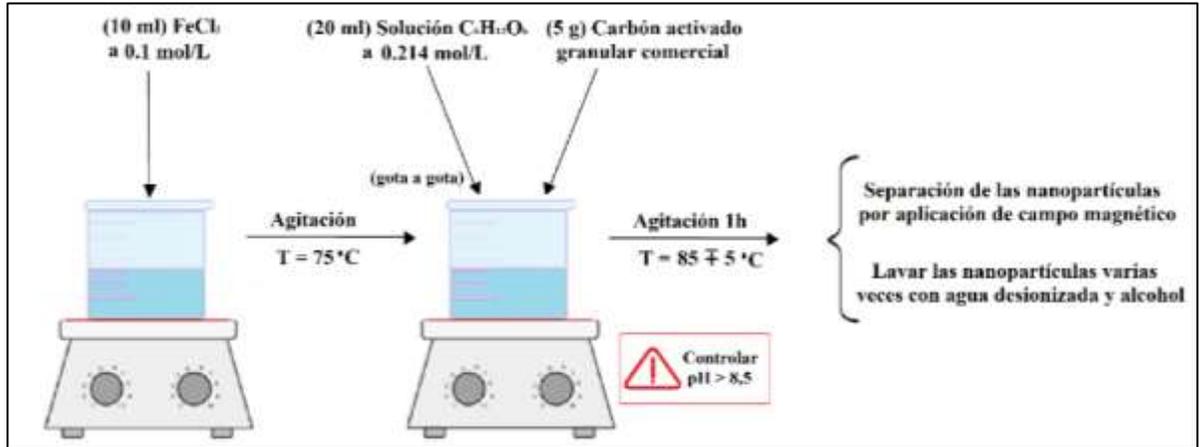
ECUACIÓN 3

$$0,025 \text{ mol } \text{Fe}^{+3} \times \frac{1 \text{ mol React}^{+3}}{1 \text{ mol } \text{Fe}^{+3}} \times \frac{270,30 \text{ g}}{1 \text{ mol React}^{+3}} = 6,76 \text{ g}$$

ECUACIÓN 4

$$0,0125 \text{ mol } \text{Fe}^{+2} \times \frac{1 \text{ mol React}^{+2}}{1 \text{ mol } \text{Fe}^{+2}} \times \frac{278,02 \text{ g}}{1 \text{ mol React}^{+2}} = 3,47 \text{ g}$$

ILUSTRACIÓN 31: SÍNTESIS DEL CARBÓN



ELABORACIÓN PROPIA

A las masas obtenidas se agregaron y disolvieron 20 ml de agua respectivamente para obtener las soluciones necesarias en la síntesis, como se muestra en las ilustraciones 32 y 33.

ILUSTRACIÓN 32: PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CLORURO FÉRRICO (FeCl_3)



ELABORACIÓN PROPIA

ILUSTRACIÓN 33: PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE SULFATO FERROSO (FeSO_4)



ELABORACIÓN PROPIA

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

En un vaso de precipitados se depositó 10 ml de la solución de sulfato ferroso (FeSO_4), y se calentó hasta alcanzar una temperatura de 70°C , se agregó hidróxido de sodio (NaOH) hasta obtener un pH superior a 9, la temperatura se elevó nuevamente y esta vez se mantuvo en $85^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ durante 60 minutos mezclando continuamente, con el fin de tener una distribución de tamaño uniforme como se muestra en la ilustración 34; en el primer lapso de 30 minutos se adicionó la solución de cloruro férrico (FeCl_3), que generó una coloración oscura en la mezcla, confirmando así la formación de magnetita, el pH se reguló con glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), y en el segundo lapso de tiempo se agregó el carbón activado.

ILUSTRACIÓN 34: SÍNTESIS DEL CARBÓN



ELABORACIÓN PROPIA

Finalmente se aplicó un campo magnético para separar las nanopartículas, estas se lavaron varias veces con agua desionizada y alcohol, para su posterior secado al horno por 24 horas a 50°C . (ver ilustración 35)

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN: FAST 2.1

La simulación se efectuó en el programa FAST 2.1, midiendo el impacto al variar diferentes parámetros operativos, como el caudal a tratar, el diámetro del carbón activado y la porosidad del lecho, los valores empleados se consignan en la tabla XIII, finalmente se obtienen las gráficas de saturación, que permiten determinar los valores óptimos para implementar en el diseño final de la columna de adsorción con nanopartículas magnéticas. Los valores semilla empleados se presentan a continuación:

PARÁMETROS OPERATIVOS:

Flow rate [Q]: Caudal 4m³/s

Empty bed contact time [EBTC]: Tiempo de contacto del lecho 20 s

Bed porosity [eB]: Porosidad carbón activado 35%, variación admisible entre el 20% y 50%

Particle density [ρ_P]: Densidad del carbón activado 475 kg/m³, variación admisible entre 450 kg/m³ y 500 kg/m³

Particle diameter [dp]: Diámetro del carbón activado granular comercial 4 mm (Desotec 2020)

Influent concentration [c₀]: Concentración de cationes y aniones en la PTAR Salitre 11,04 mg/m³

VARIABLES CINÉTICAS Y DE EQUILIBRIO – CARBÓN ACTIVADO

Langmuir max. Loading [q_{max}]: Exponente de Langmuir 20,075 (Gu et al. 2019b)

Langmuir constant [KL]: Constante de Langmuir 0,002 (Gu et al. 2019b)

Film diffusion coefficient [kL]: Coeficiente de difusión de la película 1x10⁻³, variación admisible entre 1x10⁻⁵ a 1x10⁻¹

Surface diffusion coefficient [Ds]: Coeficiente de difusión superficial , variación admisible entre 1x10⁻⁸ a 1x10⁻³

TABLA XIII. VARIACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS - FAST 2.1

VARIACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS:					
PARÁMETRO	VALOR BAJO	VALOR BAJO	VALOR MEDIO	VALOR ALTO	UNIDADES
Caudal	4	4	4	4	m ³ /s
dp	20	20	20	20	mm
eB	20	20	20	20	%

ELABORACIÓN PROPIA

VARIABLES CINÉTICAS Y DE EQUILIBRIO - CARBÓN ACTIVADO CON NANOPARTÍCULAS

Langmuir max. Loading [q_{max}]: Exponente de Langmuir 162,61 (Liu et al. 2019)

Langmuir constant [KL]: Constante de Langmuir 0,265 (Liu et al. 2019)

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al seguir el proceso metodológico, se explican e interpretan los datos obtenidos, es importante resaltar que cada ítem guarda relación con cada punto descrito en el numeral anterior.

6.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA POR LA PTAR SALITRE Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN RECOPIADA SOBRE LOS PROCESOS EN LA PLANTA

Los valores y las concentraciones de diferentes parámetros generales, microbiológicos y químicos importantes para determinar la calidad residual en el afluente y el efluente de la PTAR Salitre, se presentan a continuación:

TABLA XIV. PARÁMETROS DE CALIDAD GENERALES – VALORES PROMEDIO MENSUALES (JUNIO 2019-DICIEMBRE 2019)

PARÁMETROS GENERALES			
VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR AFLUENTE	VALOR EFLUENTE
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidades de pH	7,329	7,329
Conductividad	µS/cm	917,86	914,57
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	497,29	384,14
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	242,86	168,29
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	216,57	108,29
Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV)	mL/L	180,71	82,14
Sólidos Totales	mg/L	668,29	532,14
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mL/L	298,43	206,00
Grasas y Aceites	mg/L	53,71	32,43
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	0,29	1,85
Turbiedad	UNT	124,57	61,00

EDITADA DE "CALIDAD AFLUENTE Y EFLUENTE FQ-MICROBIOL" (2020). PTAR SALITRE

Análisis: El pH en el afluente y efluente de la PTAR Salitre es neutro, la conductividad, aunque no disminuye significativamente se mantiene dentro de un rango seguro para el reúso de las aguas en cultivos³, desde otro punto de vista, la DQO se reduce casi un 20% y la DBO₅ un 30% clasificándose como aguas fuertemente contaminadas⁴, ya que la Planta no realiza un tratamiento secundario es comprensible que la disminución

³ Normativa 1207 – El valor límite para conductividad es 1500 µS/cm

⁴ Tablas de clasificación: Comisión Nacional del Agua México (CONAGUA 2015)

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

de la demanda química y bioquímica de oxígeno sea tan pequeña, sus valores superan el límite recomendado en vertimientos de aguas residuales en lugares de procesamiento de hortalizas, frutas, legumbres, raíces y tubérculos, sin embargo, son aptas para actividades de beneficio de café en procesos tradicionales⁵, mientras que el contenido de grasas aceites es tan alto que no es factible el empleo del agua en estas dos actividades mencionadas, la reducción de SST hace que el agua pasa de ser contaminada a aceptable⁴, los SST, SSV y ST no cumplen los criterios de calidad para la reutilización agrícola en ningún tipo de cultivo⁶.

TABLA XV. PARÁMETROS QUÍMICOS DE CALIDAD – VALORES PROMEDIO MENSUALES (JUNIO 2019-DICIEMBRE 2019)

PARÁMETROS QUÍMICOS			
VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR AFLUENTE	VALOR EFLUENTE
Alcalinidad Total	mg/L	261,157	253,843
Fenoles Totales	mg/L	0,454	0,520
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	0,843	0,677
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	0,012	0,020
Nitrógeno Amoniacal (NH ₃ -N)	mg/L	50,571	49,857
Nitrógeno Total (N)	mg/L	71,000	67,286
Iones			
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	72,143	82,286
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	52,429	46,286
Otros Compuestos			
Cianuro (CN ⁻)	mg/L	0,001	0,001

EDITADA DE "CALIDAD AFLUENTE Y EFLUENTE FQ-MICROBIOL" (2020). PTAR SALITRE

Análisis: Nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, son importantes debido a que generan vida acuática indeseable, toxicidad para los peces y enfermedades en infantes, sin embargo, pueden ser beneficiosos y aprovechables en actividades de riego, Colombia no cuentan con un control riguroso, únicamente solicita el análisis y reporte de los mismos.

⁵ Resolución 0631 – El valor límite de DQO es 50 mg/L en procesamiento de alimentos y 400 mg/L para café

⁶ Regulación EPA – El valor límite para SST es de 30 mg/L



TABLA XVI. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS DE CALIDAD – VALORES PROMEDIO MENSUALES (JUNIO 2019-DICIEMBRE 2019)

PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS			
VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR AFLUENTE	VALOR EFLUENTE
Coliformes Fecales	UFC/100ml	36 x 10 ⁶	10 x 10 ⁶
Coliformes Totales	NMP/100ml	3.712 x 10 ⁶	339 x 10 ⁶
E Coli	NMP/100ml	9 x 10 ⁶	5 x 10 ⁶
Huevos de Helmintos	HH/L	11,6	3,7
Salmonella sp	NMP/100ml	685,0	1319,7

EDITADA DE “CALIDAD AFLUENTE Y EFLUENTE FQ-MICROBIOL” (2020). PTAR SALITRE

Análisis: Los huevos de helminto tienen una remoción cercana al 32%, los coliformes totales y la salmonela por el contrario aumentan significativamente en la Planta⁷, haciendo que el aprovechamiento del agua en actividades agrícolas no sea seguro y represente un problema para la salud. Las razones por las que estos parámetros crecen significativamente en la PTAR, se deben a que no se cuenta con ningún tratamiento biológico o de desinfección del agua, su proceso es insuficiente para remover estos parámetros y además genera condiciones favorables de temperatura (entre 6 a 60° C) y tiempo (superior a 30 min) para la reproducción de estos parásitos y bacterias.

TABLA XVII. PARÁMETROS QUÍMICOS DE CALIDAD – VALORES PROMEDIO MENSUALES (JUNIO 2019-DICIEMBRE 2019)

PARÁMETROS QUÍMICOS			
VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR AFLUENTE	VALOR EFLUENTE
Metales			
Aluminio	mg Al/L	0,934	0,514
Bario	mg Ba/L	0,073	0,054
Cadmio*	mg Cd/L	0,004	0,003
Calcio	mg Ca/L	18,754	16,777
Cobre	mg Cu/L	0,059	0,044
Cromo*	mg Cr/L	0,009	0,009
Cromo Hexavalente	mg Cr/L	0,007	0,026
Hierro	mg Fe/L	1,610	4,622
Magnesio	mg Mg/L	2,767	2,701
Manganeso	mg Mn/L	0,000	0,000
Mercurio*	mg Hg/L	0,003	0,002
Níquel*	mg Ni/L	0,004	0,004
Plata*	mg Ag/L	0,004	0,007
Plomo*	mg Pb/L	0,008	0,040

⁷ Decreto 1207 – El valor máximo de concentración para coliformes es de 1x10⁵ NMP/100ml, para salmonela es de 1x10² NMP/100ml



PARÁMETROS QUÍMICOS			
VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR AFLUENTE	VALOR EFLUENTE
Potasio	mg K/L	23,261	23,176
Sodio	mg Na/L	81,020	83,484
Zinc*	mg Zn/L	0,157	0,136
Metaloides			
Arsénico*	mg As/L	0,004	0,019
Boro*	mg B/L	0,131	0,141
No Metales			
Fósforo	mg P/L	6,929	5,714
Selenio	mg Se/L	0,007	0,010

*Metales pesados

EDITADA DE “CALIDAD AFLUENTE Y EFLUENTE FQ-MICROBIOL” (2020). PTAR SALITRE

Análisis: Los metales presentes en el agua requieren un mayor control debido a su toxicidad, aunque según la norma las concentraciones de los mismos no son altas en el afluente de la PTAR Salitre, no existe ningún proceso para su eliminación. El tiempo utilizado en el desarenador de la planta es de 7 minutos, en este proceso se llevan a cabo simultáneamente los procesos de coagulación y floculación; el coagulante utilizado es “Cloruro férrico (FeCl₃)”, este no cuenta con el tiempo de contacto necesario para la desestabilización de las partículas, estimado en 10 minutos como mínimo, mientras que el floculante requiere un tiempo de 15 minutos de contacto, por esta razón se observa un incremento significativo del hierro, por otro lado el mercurio está en el rango límite⁸.

6.2. MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL SOFTWARE GPS-X HIDROMANTIS

La simulación con el software GPS-X hidromantis, es efectiva debido a que los resultados teóricos arrojados por el modelo son similares a los valores reales obtenidos en el tratamiento de la PTAR, la variación final es producto de la discrepancia provocada al asumir datos anteriores y posteriores a cada proceso.

⁸ Decreto 1207 – El valor límite para el mercurio es de 0,002 mg/L



TABLA XVIII. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE GPS-X

MONITOREO FÍSICO QUÍMICO EFLUENTE					
PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	PROMEDIO AFLUENTE	PROMEDIO EFLUENTE	SIMULACIÓN 1 y 2*	
				GPS-X	σ
Alcalinidad Total	mg/L	261,16	253,84	285,00	22,03
Amonio	mg/L	-	49,86	50,57	0,50
DBO ₅	mg/L	242,86	168,29	180,00	8,28
DQO Total	mg/L	497,29	384,14	332,80	36,30
Fósforo total	mg/L	6,93	5,71	5,38	0,24
Nitratos	mg/L	0,84	0,68	0,84	0,11
Nitritos	mg/L	0,01	0,05	0,02	0,02
NKT	mg/L	71,00	67,29	63,38	2,76
pH	Unidades de pH	7,33	7,33	7,00	0,23
Solidos suspendidos totales	mg/L	216,57	108,29	124,00	11,11
Solidos suspendidos volátiles	mg/L	180,71	82,14	98,66	11,68
Catión	mg/L	5,52	5,67	5,93	0,19

*Primera y segunda simulación con 1 y 8 Clarificadores respectivamente

ELABORACIÓN PROPIA

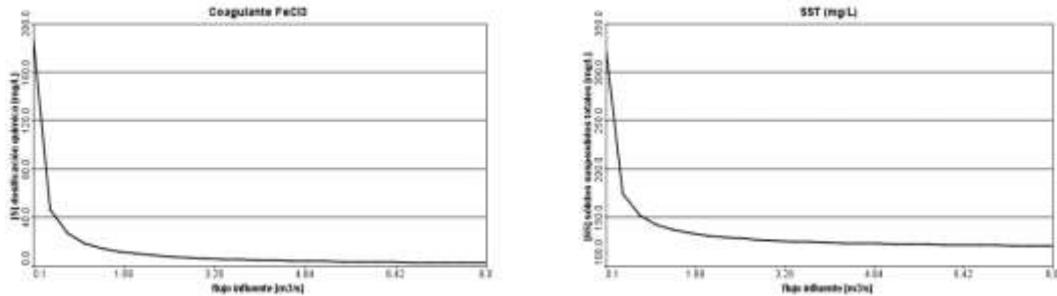
Análisis simulación 1 y 2: La variación entre resultados más significativa se da en la concentración de DQO, y se explica por el inadecuado proceso de coagulación, esto también se ve reflejado en los SST y SSV.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad empleado determinar el impacto del flujo influente, dosis de coagulante y eficiencia de remoción de los clarificadores sobre el modelo, los resultados se presentan a continuación:

Flujo del influente: El análisis de sensibilidad del caudal no fue satisfactorio, debido a que en la simulación el programa asumió que el flujo de entrada variaba, pero la carga de contaminantes propia de la caracterización de la muestra se mantenía constante, esto se ve reflejado al disminuir la cantidad de agua, pues la concentración de SST y cantidad de coagulante requerido crecía, o al aumentar la cantidad de agua ya que se presentó un comportamiento inverso. Aunque se obtuvo el resultado esperado, no es concluyente y la muestra no es representativa porque no conserva la relación con los parámetros de entrada.

GRÁFICA 2: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – CAUDAL



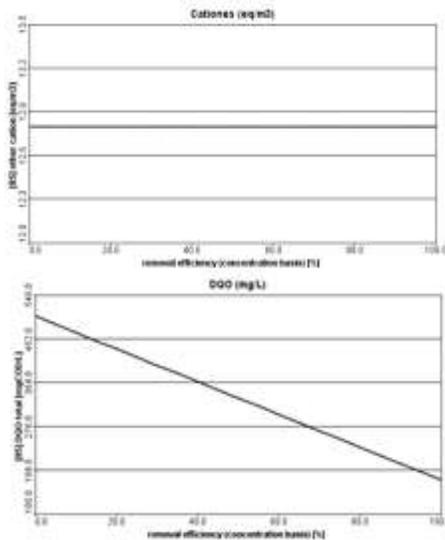
ELABORACIÓN PROPIA

Remoción clarificadores primarios: Al ejecutar el modelo se obtienen eficiencias de remoción de hasta el 100%, con concentraciones de contaminantes considerablemente bajas, sin embargo, estos son valores teóricos y no pueden ser emulados en la realidad, ya que los clarificadores sólo trabajan con porcentajes de remoción del 40 al 60%.

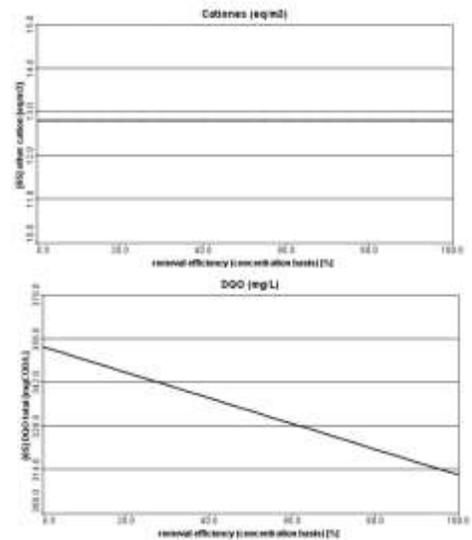
Las gráficas ubicadas a la derecha representan la influencia de un clarificador equivalente a los ocho sedimentadores primarios, mientras que las gráficas de la izquierda muestran la influencia de un solo clarificador; se puede deducir que, aunque en las gráficas de un clarificador equivalente se tengan valores de remoción más altos, es más efectivo el trabajo conjunto de los ocho sedimentadores en la PTAR.

GRÁFICA 3: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – 1 CLARIFICADOR Y 8 CLARIFICADORES

1 CLARIFICADOR:

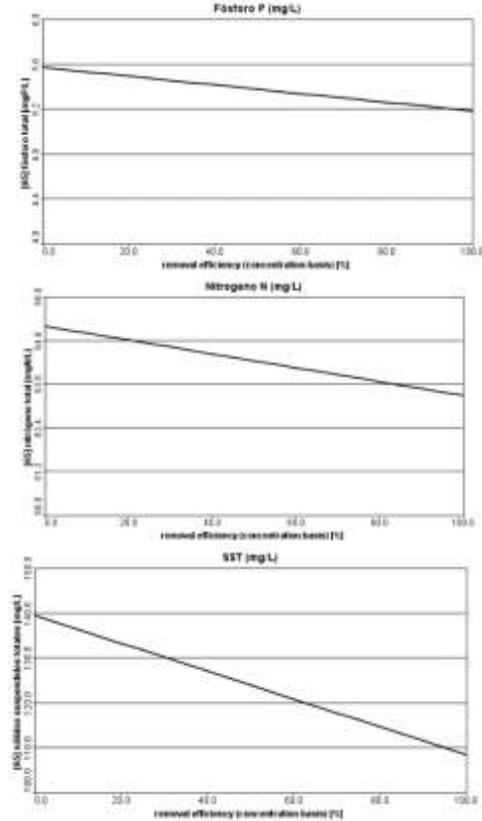
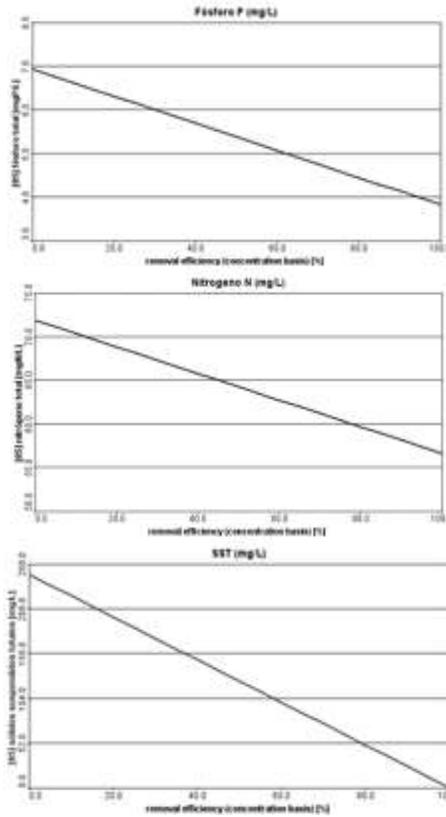


8 CLARIFICADORES:



1 CLARIFICADOR:

8 CLARIFICADORES:

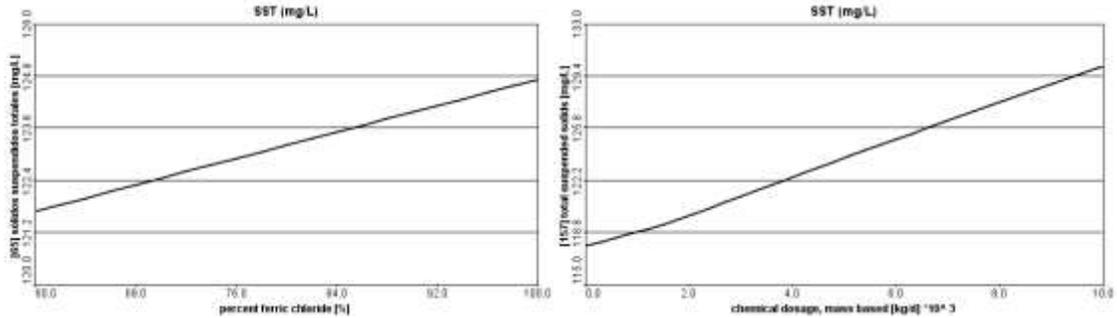


ELABORACIÓN PROPIA

Adicionalmente en el análisis de sensibilidad se deduce que la concentración de cationes no varía durante el paso de las aguas residuales por la Planta, debido a que la PTAR realiza un proceso primario, y para la remoción de estos elementos es necesario efectuar un tratamiento terciario como la implementación de una columna de adsorción

Dosis y concentración de cloruro férrico: La tasa de crecimiento entre SST, dosis y porcentaje de pureza del cloruro férrico es proporcional, y se debe a que el coagulante genera una desestabilización de las partículas, causando un crecimiento de polución aparente en el medio, que se reduce al formar flóculos en el proceso posterior. El análisis es efectivo y permite concluir que al aumentar la cantidad y pureza del compuesto químico se solidifican una mayor cantidad de sustancias disueltas en el líquido.

GRÁFICA 4: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – DOSIS Y CONCENTRACIÓN DE CLORURO FÉRRICO



ELABORACIÓN PROPIA

6.3. OPTIMIZACIÓN DE LA PTAR SALITRE FASE 1:

A continuación, se detallan los resultados de la propuesta de optimización de la PTAR Salitre

IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO DE ARENA

La primera optimización corresponde a una simulación del peor escenario de remoción, para esta se asumió una eficiencia del 75%, la segunda optimización representa las condiciones ideales de trabajo con una eficiencia del 80%, a continuación, se presentan los resultados obtenidos:

TABLA XIX. OPTIMIZACIÓN CON EL SOFTWARE GPS-X

MONITOREO FÍSICO QUÍMICO EFLUENTE							
PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	PROMEDIO AFLUENTE	PROMEDIO EFLUENTE	OPTIMIZACIÓN 1*		OPTIMIZACIÓN 2**	
				GPS-X	σ	GPS-X	σ
Alcalinidad Total	mg/L	261,16	253,84	285,00	22,03	285,00	22,03
Amonio	mg/L	-	49,86	50,57	0,50	50,57	0,50
DBO ₅	mg/L	242,86	168,29	123,10	31,95	119,20	34,71
DQO Total	mg/L	497,29	384,14	210,20	123,00	201,80	128,94
Fósforo total	mg/L	6,93	5,71	4,22	1,06	4,14	1,11
Nitratos	mg/L	0,84	0,68	0,84	0,11	0,84	0,11
Nitritos	mg/L	0,01	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
NKT	mg/L	71,00	67,29	57,70	6,78	57,31	7,05
pH	Unidades de pH	7,33	7,33	7,00	0,23	7,00	0,23
Sólidos suspendidos totales	mg/L	216,57	108,29	31,62	54,21	25,30	58,68
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	180,71	82,14	25,17	40,29	20,13	43,85
Catión	mg/L	5,52	5,67	5,93	0,19	5,93	0,19

* Primera optimización de la PTAR con 8 Clarificadores y filtro rápido de arena con eficiencia del 75%

** Segunda optimización de la PTAR con 8 Clarificadores y filtro rápido de arena con eficiencia del 80%

ELABORACIÓN PROPIA

Análisis optimización 1 y 2: La implementación del filtro de arenas es bastante eficiente ya que removió gran parte de la carga contaminante que podría causar una saturación prematura en la columna de adsorción, al observar los resultados es evidente que la DQO y DBO₅, implícitos en los SST y SSV son los parámetros que más disminuyen.

SÍNTESIS DEL CARBÓN ACTIVADO MODIFICADO CON NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

El resultado de la síntesis del carbón activado fue satisfactorio ya que las nanopartículas de magnetita se adhirieron al carbón (Ilustración 35), esto se evidenció al crear un campo magnético acercando un imán, sin embargo, la caracterización del nanomaterial no fue posible debido al cierre de los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia y de la Universidad Sergio Arboleda.

TABLA XX. PROPIEDADES DEL CARBÓN SINTETIZADO

PROPIEDADES DEL MATERIAL MODIFICADO:		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Magnetización de saturación	85,4	emu/g
Diámetro magnético	12,8	nm
Potencial Zeta	-35	mV
Mejor pH de magnetización	7	Unidades de pH

ELABORACIÓN PROPIA

Los valores teóricos de caracterización, necesarios para el diseño de la columna de adsorción, se tomaron de la investigación “Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas” (Marimon 2018), y se presentan en la siguiente tabla:

ILUSTRACIÓN 35: RESULTADOS FINALES SÍNTESIS DEL CARBÓN

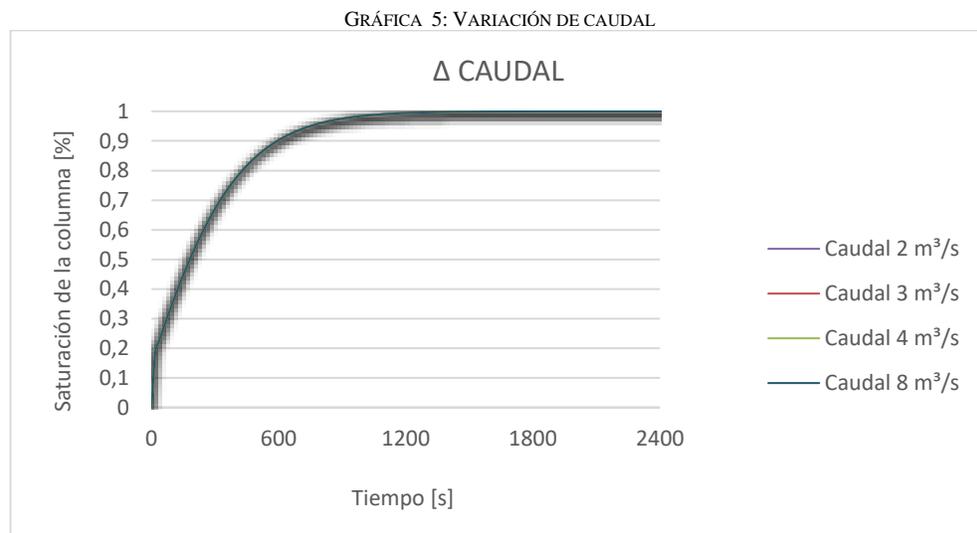


ELABORACIÓN PROPIA

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LAS COLUMNAS DE ADSORCIÓN: FAST 2.1

Para establecer los parámetros óptimos de diseño de las columnas de adsorción, se efectuaron aproximadamente 15 iteraciones, midiendo el porcentaje de saturación al variar el caudal, el diámetro de las partículas, la porosidad del lecho y los tiempos de contacto. Los resultados al efectuar las respectivas simulaciones se presentan a continuación:

VARIACIÓN DE CAUDAL:



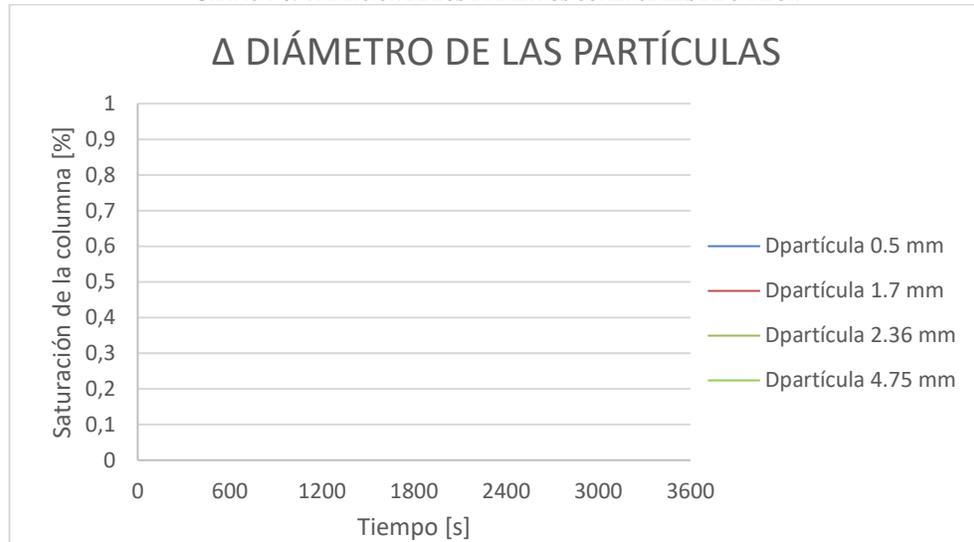
ELABORACIÓN PROPIA

Análisis: Las variaciones de caudal no causan impacto alguno sobre la saturación de las columnas, esto se debe a que el programa trabaja con densidades, porcentajes, masas, pero no con dimensiones en las que el tamaño de la estructura pueda verse afectada por cantidad de agua a tratar.

VARIACIÓN DE DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS:

Análisis: Al tener diámetros menores de carbón activado se obtienen saturaciones prematuras, esto se explica porque las partículas tienen una menor área superficial para adsorber contaminantes, y por ende se saturan más rápido. Por lo tanto, se empleó para el diseño final un diámetro comercial de 4.75 mm, esperando así disminuir costos operacionales de mantenimiento, una vida útil más larga, ya que las partículas demasiado pequeñas pueden ser eliminadas en el retro lavado.

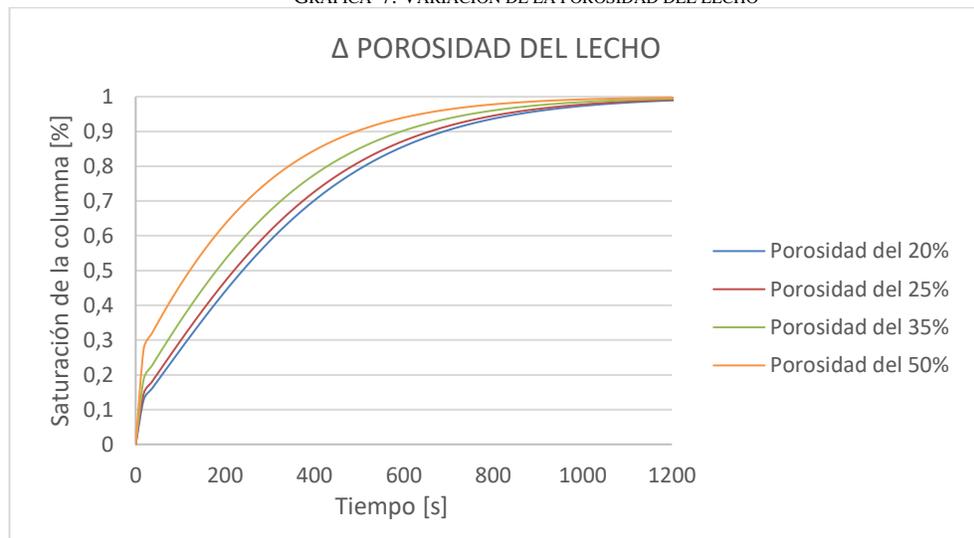
GRÁFICA 6: VARIACIÓN DE LOS DIÁMETROS COMERCIALES DE CARBÓN



ELABORACIÓN PROPIA

VARIACIÓN DE LA POROSIDAD DEL LECHO:

GRÁFICA 7: VARIACIÓN DE LA POROSIDAD DEL LECHO

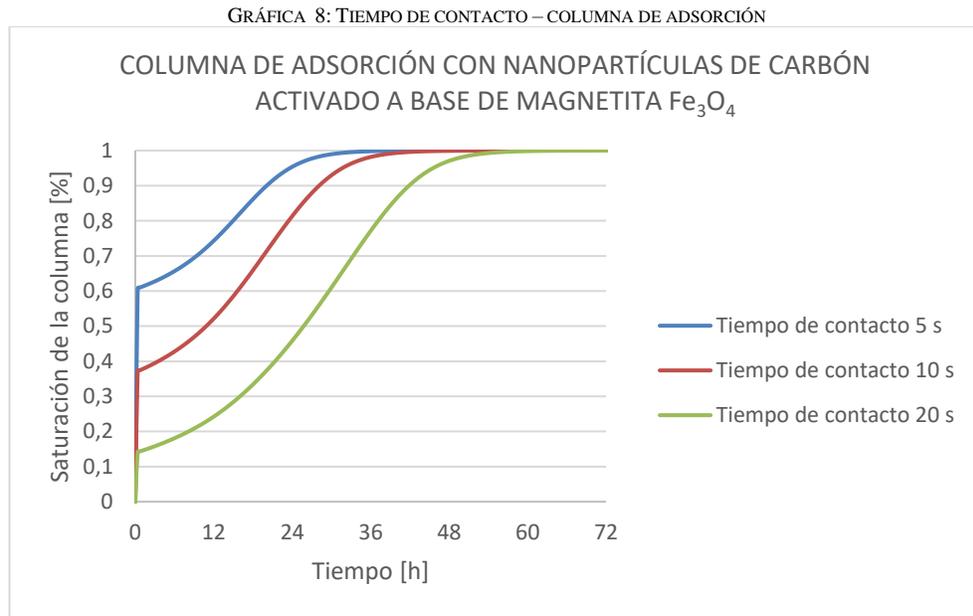


ELABORACIÓN PROPIA

Análisis: Cuando el material tiene una mayor porosidad, los contaminantes entran más fácilmente al interior de las partículas, aunque esto sea deseable en términos de remoción de carga contaminante operacionalmente es más costoso, por ende, se decidió emplear una porosidad del 20%.

DISEÑO FINAL DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN:

La implementación de nanopartículas magnéticas en las columnas de adsorción es vital, ya que el lecho con carbón activado se satura muy rápidamente, esto implicaría efectuar un retro lavado cada hora, en términos prácticos y económicos no es viable, a continuación, se presentan los resultados al implementar las partículas sintetizadas anteriormente:



ELABORACIÓN PROPIA

Análisis: Al disminuir el tiempo de contacto entre el agua a tratar y el lecho, se aumenta el porcentaje de saturación ya que se obliga al sistema a eliminar la carga contaminante rápidamente, esto se traduce en periodos de trabajo menores, pues para su funcionamiento es necesario realizar la respectiva limpieza. Los tiempos de contacto mayores implican una infraestructura más robusta y de mayor tamaño para alojar mayores cantidades de agua, acrecentando el periodo útil de la columna y reduciendo los costos por mantenimiento. Por lo tanto, para el diseño de las columnas se empleara un tiempo de contacto de 20 s.

Los parámetros operativos del diseño final de las columnas de adsorción se consignan en la siguiente tabla:



TABLA XXI. CARACTERÍSTICAS FINALES DEL DISEÑO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN

PARÁMETROS OPERATIVOS:		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Caudal	4	m ³ /s
Densidad del carbón activado	475	kg/m ³
Diámetro del carbón activado	4,75	mm
Porosidad carbón activado	20	%
Tiempo de contacto del lecho	20	s

ELABORACIÓN PROPIA

Para determinar las dimensiones de cada columna se relacionó el caudal de agua tratar, con el tiempo de contacto, la profundidad del lecho y la sección transversal. Se asumió un diámetro de 4 m y se obtuvo un área de 12 m², un volumen de 80 m³ y una profundidad de 6,7 m.

ECUACIÓN 5

$$\text{Sección transversal de la columna} = \frac{\pi}{4} \phi^2$$

$$\text{Área} = \frac{\pi}{4} 4^2 = 12 \text{ m}^2$$

ECUACIÓN 6

$$\text{Profundidad del lecho} = \frac{\text{Caudal a tratar} \times \text{Tiempo de contacto}}{\text{Sección transversal}}$$

$$\text{Profundidad del lecho} = \frac{\frac{4 \text{ m}^3}{\text{s}} \times 20 \text{ s}}{12 \text{ m}^2} = 6,7 \text{ m}$$

Finalmente se propone la implementación de dos columnas de adsorción que trabajen de forma alterna, con el fin de permitir un tratamiento continuo, cuando se requiera mantenimiento en una de las columnas.

Los resultados obtenidos al realizar las simulaciones del estado actual de la planta, la implementación de los filtros de arena y las columnas de adsorción, permitieron determinar que al implementar estos dos últimos procesos en PTAR Salitre, el agua residual tratada, cumpliría con lo estipulado por la Resolución 0631 y sería segura para el reúso en actividades productivas agroindustriales, como el procesamiento de hortalizas, frutas, legumbres, raíces y tubérculos, o en actividades de beneficio del café. Es importante recordar que estos son los principales productos producidos en la Sabana de Bogotá, y en las zonas aledañas por donde fluyen las aguas residuales entregadas por la PTAR Salitre.

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

7. CONCLUSIONES

- La PTAR Salitre cumple con las normativas vigentes (EPA, RAS) relacionadas con concentraciones de metales pesados, sin embargo, no cuenta con ningún proceso que remueva estos elementos que pueden representar un riesgo para la salud, sobre todo si el agua residual tratada es reusada en actividades de riego, por lo tanto, se justifica la construcción de la columna de adsorción.
- Las concentraciones de organismos microbiológicos en el efluente de la planta son relativamente altos, debido a que la PTAR no cuenta con tratamiento secundario, adicionalmente por la temperatura y el tiempo que pasan las aguas por la Planta hace que estos organismos proliferen.
- La simulación realizada de la PTAR Salitre fue satisfactoria, ya que los resultados teóricos y reales son similares
- Es más eficiente trabajar con ocho clarificadores que con clarificador equivalente, esto se ve reflejado en los resultados totales de remoción de contaminantes.
- La implementación de filtros de arena es necesaria para remover DBO₅, DQO, SST y SSV que pueden causar la saturación prematura de la columna de adsorción, además funciona como un proceso alternativo al tratamiento secundario.
- Para la construcción de las columnas de adsorción, es esencial implementar nanopartículas magnéticas, de no emplear este material y trabajar con carbón activado los tiempos de trabajo de cada lecho pasan de 72 horas a 1 hora, adicionalmente es necesario trabajar con los mayores diámetros comerciales de carbón activado encontrados en el mercado, para el diseño se recomienda emplear un diámetro mínimo de 4,75 mm, y porosidades del 20 %.

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

8. RECOMENDACIONES

El proceso de coagulación y floculación no cuentan con el tiempo de contacto necesario, para que se generen las desestabilizaciones y posteriores formaciones de flóculos por lo tanto es necesario rediseñar esta parte del proceso, teniendo en cuenta los tiempos de reacción de 10 y 15 minutos respectivamente, además de las dimensiones de la estructura para retener el líquido durante el proceso.

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

LISTA DE REFERENCIAS

- ACUEDUCTO AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ., 2012. Plegable Técnico PTAR EL SALITRE. *Ebook*, vol. 1, pp. 2–4.
- ANDÍA CÁRDENAS, Y., 2000. *TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN*. 2000. Lima: s.n.
- ASAMBLEA NACIONAL CONSTITUYENTE, 1991. *Constitución Política de Colombia 1991* [en línea]. 1991. S.l.: s.n. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html.
- BASHIR, A., MALIK, L.A., AHAD, S., MANZOOR, T., BHAT, M.A., DAR, G.N. and PANDITH, A.H., 2018. Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods. *Environmental Chemistry Letters*. 2018.
- BAUTISTA, F., 1999. *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados* [en línea]. 1. S.l.: s.n. [Consulta: 21 September 2019]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=yE2Jq3z7ex4C&printsec=frontcover&dq=contaminacion+metales+pesados&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKE-wicgZCrheXkAhXC1lkKHW7DX4Q6AEIKTAA#v=onepage&q=contaminacion%20metales%20pesados&f=false>.
- BOYD, C.E., 2000. *Water Quality* [en línea]. Boston, MA: Springer US. [Consulta: 8 September 2019]. ISBN 978-1-4613-7021-5. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-4485-2>.
- CAI, B., GU, P., ZENG, L., ZHOU, Y., LIU, Q., YUAN, L., HE, Y. and LI, X., 2014. Highly Efficient Co-removal of Heavy Metals in Wastewater from Chemical Oxygen Demand Testing Instrument by Cysteine-functionalized Magnetic Nanoparticles. *Chem. Res. Chin. Univ.*, vol. 472–479.
- CAR | CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES Y DE DESARROLLO SOSTENIBLE, 2018. PTAR El Salitre un complemento para la descontaminación del Río Bogotá. [en línea]. [Consulta: 26 September 2019]. Disponible en: https://www.car.gov.co/rio_bogota/vercontenido/9.
- CAR | CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES Y DE DESARROLLO SOSTENIBLE, 2018. Río Bogotá. [en línea]. S.l.: [Consulta: 28 August 2019]. Disponible en: https://www.car.gov.co/rio_bogota/vercontenido/4.
- CONAGUA, 2015. MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA. .Ciudad de México
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA, 1997. *LEY 373 - 1997* [en línea]. 1997. S.l.: s.n. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0373_1997.html.
- CUBILLAS TERREROS, G.P., 2015. *UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA*. S.l.: s.n.

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

- DESOTEC, 2020. *Activated carbon size* [en línea]. 2020. Roeselare: s.n. Disponible en: <https://www.desotec.com/es/carbonology/carbonology-academy/activated-carbon-size>.
- DHERMENDRA, K., BEHARI, J. and PRASENJIT, S., 2008. Application of Nanoparticles in Waste Water Treatment. *World Applied Sciences Journal*, vol. 417–433.
- DURÁN VERA, I., 2019. *DISEÑO DE PROCESOS CÍCLICOS DE ADSORCIÓN PARA LA CAPTURA DE CO2 EN EL CONTEXTO DE UNA PLANTA DE GESTIÓN DE RESIDUOS*. S.l.: s.n.
- DURUIBE, J., O.M. and E.J., 2007. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*, vol. 2 (5).
- ELDON, R., E, S., ALISON, L. and P, L., 2017. *Sustainable Heavy Metal Remediation. Environmental Chemistry for a Sustainable World* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 28 September 2019]. ISBN 978-3-319-58621-2. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-58622-9>.
- EPA, U., SUPPLY, W., RESOURCES DIVISION, W. and SMITH, C., 2004. 2012 Guidelines for Water Reuse. S.l.:
- ERTO, A., GIRALDO, L., LANCIA, A. and MORENO-PIRAJÁN, J.C., 2013. A comparison between a low-cost sorbent and an activated carbon for the adsorption of heavy metals from water. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 224, no. 4. DOI 10.1007/s11270-013-1531-3.
- FEI, G., MENG-MENG, L., HUI, Y. and BAO-XIANG, Z., 2014. Effective removal of heavy metal ions Cd²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ from aqueous solution by polymer-modified magnetic nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 211–212, 366–372.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2016. AQUASTAT - FAO's Information System on Water and Agriculture. [en línea]. S.l.: [Consulta: 21 September 2019]. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm.
- FRIMMEL, F.H. and NIESSNER, R., 2010. *Nanoparticles in the water cycle: Properties, analysis and environmental relevance*. S.l.: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 9783642103179.
- GHORBANI, M. and EISAZADEH, H., 2013. Removal of COD, color, anions and heavy metals from cotton textile wastewater by using polyaniline and polypyrrole nanocomposites coated on rice husk ash. *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 1–7. ISSN 13598368. DOI 10.1016/j.compositesb.2012.09.035.
- GLEICK, P.H., 2011. *The World's Water Volume 7: The Biennial Report on Freshwater Resources* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 21 September 2019]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=5Y8tmugb-EoC&pg=PA45&dq=quantity+of+water+in+world&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiw7KHc8OTkAhXhRd8KHU0wAqsQ6AEIKTAA#v=onepage&q=quantity%20of%20water%20in%20world&f=false>.
- GONCHARUK, V. v., KOVALENKO, V.F. and ZLATSKII, I.A., 2012. Comparative analysis of drinking water quality of different origin based on the results of integrated bioassay. *Journal of Water Chemistry and Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 61–64. DOI 10.3103/S1063455X12010092.

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

- GU, S.Y., HSIEH, C. te, GANDOMI, Y.A., YANG, Z.F., LI, L., FU, C.C. and JUANG, R.S., 2019a. Functionalization of activated carbons with magnetic Iron oxide nanoparticles for removal of copper ions from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, vol. 277, pp. 499–505. ISSN 01677322. DOI 10.1016/j.molliq.2018.12.018.
- GU, S.Y., HSIEH, C. te, GANDOMI, Y.A., YANG, Z.F., LI, L., FU, C.C. and JUANG, R.S., 2019b. Functionalization of activated carbons with magnetic Iron oxide nanoparticles for removal of copper ions from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, vol. 277, pp. 499–505. ISSN 01677322. DOI 10.1016/j.molliq.2018.12.018.
- GUNATILAKE SK, 2015. Methods of Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)* [en línea]. S.l.: Disponible en: www.jmess.org.
- HOSSEINI, S.M., ALIBAKHSHI, H., JASHNI, E., PARVIZIAN, F., SHEN, J.N., TAHERI, M., EBRAHIMI, M. and RAFIEI, N., 2020. A novel layer-by-layer heterogeneous cation exchange membrane for heavy metal ions removal from water. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 381. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.120884.
- HVALA, N., VREČKO, D., LEVSTEK, M. and BORDON, C., 2017. The use of dynamic mathematical models for improving the designs of upgraded wastewater treatment plants. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 15–31. ISSN 18489257. DOI 10.13044/j.sdewes.d5.0130.
- IVAN, D., RUBIO, C., ADOLFO, R., CALDERÓN, M., PERDOMO GUALTERO, A., RODRÍGUEZ ACOSTA, D., JAVIER, I. and ROJAS, S., 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión Treatments for Removal of Heavy Metals Commonly Found in Industrial Wastewater. A Review. *Revista Ingeniería y Región*. S.l.:
- KOEI, N., 2011. CRIBADO Y ESTUDIOS HIDRÁULICOS DE CÁMARA DE LLEGADA Producto Final-Anexo No. 3 Cribado y Estudios Hidráulicos de la Cámara de Llegada. . Bogotá:
- KUMAR, M., GOSWAMI, L., SINGH, A.K. and SIKANDAR, M., 2019. Valorization of coal fired-fly ash for potential heavy metal removal from the single and multi-contaminated system. *Heliyon*, vol. 5, no. 10. ISSN 24058440. DOI 10.1016/j.heliyon.2019.e02562.
- LARA, R. and BONILLA, H., 2010. Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo . ,
- LATIF, E.F., ELMOLLA, E.S., MAHMOUD, U.F. and SALEH, M.M., 2020. Intermittent cycle extended aeration system pilot scale (ICEAS-PS) for wastewater treatment: experimental results and process simulation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 3261–3270. ISSN 17352630. DOI 10.1007/s13762-020-02653-9.
- LIU, X., TIAN, J., LI, Y., SUN, N., MI, S., XIE, Y. and CHEN, Z., 2019. Enhanced dyes adsorption from wastewater via Fe₃O₄ nanoparticles functionalized activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 373, pp. 397–407. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.03.103.
- MAHDAVI, S., AMINI, N., MERRIKHPOUR, H. and AKHZARI, D., 2017. Characterization of bare and modified nano-zirconium oxide (ZrO₂) and their applications as adsorbents for the removal of bivalent

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

- heavy metals. *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 234–244. ISSN 02561115. DOI 10.1007/s11814-016-0259-3.
- MARIMÓN BOLÍVAR, W., TEJEDA BENÍTEZ, L. and HERRERA, A.P., 2018. Removal of mercury (II) from water using magnetic nanoparticles coated with amino organic ligands and yam peel biomass. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, vol. 10, pp. 486–493. DOI 10.1016/j.enmm.2018.10.001.
- MARIMON, W., 2018. Ingeniería de Nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- MARIMÓN-BOLÍVAR, W. and GONZÁLEZ, E.E., 2018. Study of agglomeration and magnetic sedimentation of glutathione@Fe₃O₄ nanoparticles in water medium. *DYNA (Colombia)* [en línea], vol. 85, no. 205, pp. 19–26. [Consulta: 1 September 2020]. ISSN 00127353. DOI 10.15446/dyna.v85n205.68245. Disponible en: <http://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.68245>.
- MATEU DEL RIO, C., 2013. Aplicación de nanopartículas magnéticas de hierro a la eliminación de mercurio del agua. *Universitat de les Illes Balears*, vol. 1.
- MENDOZA-BARRÓN, J., JACOBO-AZUARA, A., LEYVA-RAMOS, R., BERBER-MENDOZA, M.S., GUERRERO-CORONADO, R.M., FUENTES-RUBIO, L. and MARTÍNEZ-ROSALES, J.M., 2011. Adsorption of arsenic (V) from a water solution onto a surfactant-modified zeolite. *Adsorption*, vol. 17, no. 3, pp. 489–496. DOI 10.1007/s10450-010-9307-1.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2014. *Resolución 1207* [en línea]. 2014. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/Imagens/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE - MINAMBIENTE, 2015. *RESOLUCIÓN No. 0631* [en línea]. 2015. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/Imagens/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf.
- MOSIVAND, S., KAZEMINEZHAD, I. and FATHABAD, S.P., 2019. Easy, fast, and efficient removal of heavy metals from laboratory and real wastewater using electrocrystallized iron nanostructures. *Microchemical Journal*, vol. 146, pp. 534–543. DOI 10.1016/j.microc.2019.01.052.
- MUNGRAY, A.A., KULKARNI, S. v. and MUNGRAY, A.K., 2012. *Removal of heavy metals from wastewater using micellar enhanced ultrafiltration technique: A review*. February 2012. S.l.: s.n.
- PARK, S., GOKHAKE, S. and COLINCO, K., 2017. Constructing slow sand filters: Engineering students' experiences in San José de Playón. *purdue journal of service-learning and international engagement*, vol. 4.
- PEREIRA, S.F., 2014. Modelling of a wastewater treatment plant using GPS-X. . S.l.:
- RASCHID, L., RANAWAKA, M. and VAN DER, W., 2011. Wastewater Reuse in Agriculture in Vietnam: Water Management, Environment.

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

- RESTREPO, J., 2005. *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 21 September 2019]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=HKV1j3wKT2wC&printsec=frontcover&dq=rio+magdalena&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiv4KL5hOXkAhVRuVvKkHSEzCJEQ6AEIL-jAB#v=onepage&q=rio%20magdalena&f=false>.
- RUBENS SETTE RAMALHO, 2003. *R-S-Ramalho Tratamiento de Aguas Residuales*. S.l.: Editorial Reverté, S.A.
- SAKHI, D., RAKHILA, Y., ELMCHAOURI, A., ABOURI, M., SOUABI, S. and JADA, A., 2019. Optimization of coagulation flocculation process for the removal of heavy metals from real textile wastewater. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. S.l.: Springer Verlag, pp. 257–266. ISBN 9783030118808. DOI 10.1007/978-3-030-11881-5_22.
- SÁNCHEZ, F. and CORREDOR, S., 2011. *Metales tóxicos en Colombia: presencia, origen, distribución y contaminación en componentes bióticos y abióticos*. S.l.: s.n.
- SCHIMMELPFENNIG, S. and SPERLICH, A., 2011. Fixed-bed Adsorption Simulation Tool - FAST. *Documentation* [en línea]. [Consulta: 23 July 2020]. Disponible en: <http://www.fast-software.de/documentation.html>.
- SETTE, R., 1996. *Tratamiento de aguas residuales* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 21 September 2019]. Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=30etGjzPXyWC&pg=PA578&dq=metales+pesados+en+aguas+residuales&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjgiuHI_-TkAhUxTt8KHTVqB70Q6AEIUjAG#v=onepage&q=metales%20pesados%20en%20aguas%20residuales&f=false.
- SHALINI, R., CHARLES, U.P.J. and DINESH, M., 2016. Magnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb²⁺) and chromium (Cr⁶⁺) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 334–346.
- SHARIFIFARD, H., SOLEIMANI, M. and PEPE, F., 2017. Vanadium separation with activated carbon and iron/activated carbon nanocomposites in fixed bed column: experimental and modelling study. *Research on Chemical Intermediates*, vol. 43, no. 4, pp. 2253–2272. ISSN 15685675. DOI 10.1007/s11164-016-2760-z.
- SHARMA, S.K. and SANGHI, R., 2012. *Advances in water treatment and pollution prevention*. S.l.: Springer Netherlands. ISBN 9789400742048.
- SIERRA, C., 2011. *Calidad Del Agua*. S.l.: s.n.
- SILVA, L., BONILLA GUTIERREZ, R., REMEDIACIÓN, H.: and CONTAMINADO, S., 2010. Remedición de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. . S.l.:
- SINGANAN, M. and PETERS, E., 2013. Removal of toxic heavy metals from synthetic wastewater using a novel biocarbon technology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 884–890. ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2013.07.030.

TESIS

Código: CT13014 – Trabajo de Grado
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

-
- SPERLICH, A., SCHIMMELPFENNIG, S., BAUMGARTEN, B., GENZ, A., AMY, G., WORCH, E. and JEKEL, M., 2008. Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters. *Water Research*, vol. 42, no. 8–9, pp. 2073–2082. DOI 10.1016/j.watres.2007.12.019.
- VÍLCHEZ, A., FERNÁNDEZ-ROSAS, E., GONZÁLEZ-GÁLVEZ, D. and VÁZQUEZ-CAMPOS, S., 2016. *Indoor and Outdoor Nanoparticles*. S.l.: s.n. ISBN 9783319239187.
- VON SPERLING, M., 2007. *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. London: IWA Publishing. ISBN 1 84339 161 9.
- YUNUSOV, K.B. and ZAKHAROV, S.L., 2012. Development of integrated water deep cleaning methods based on baromembrane processes and electrochemical technology. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no. 1–2, pp. 54–59. DOI 10.1007/s10556-012-9574-7.

ANEXOS:

ANEXO I: “CALIDAD AFLUENTE Y EFLUENTE FQ-MICROBIOL”

MONITOREO FISICOQUIMICO AFLUENTE								
PARÁMETRO	04-jun-2019	03-jul-2019	02-ago-2019	03-sep-2019	02-oct-2019	06-nov-2019	03-dic-2019	PROMEDIO
Alcalinidad (mg/L)	209,00	274,10	251,10	271,90	292,00	269,00	261,00	261,16
Aluminio total (mg/L)	0,34	1,43	1,24	1,12	1,01	0,69	0,71	0,93
Nitrogeno Amoniacal (mg/L)	40,00	52,00	51,00	55,00	52,00	55,00	49,00	50,57
Arsenico (mg/L)	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bario (mg/L)	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,07	0,07	0,07
Boro (mg/L)	0,04	0,08	0,12	0,19	0,12	0,18	0,19	0,13
Cadmio (mg/L)	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcio (mg/L)	13,55	18,21	0,00	37,91	19,26	19,09	23,26	18,75
Carbamatos (µg/L)								
Cianuro (mg/L)	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cloruros (mg/L)	58,00	86,00	80,00	78,00	52,00	86,00	65,00	72,14
Cobre (mg/L)	0,04	0,16	0,07	0,04	0,03	0,04	0,03	0,06
Conductividad (Us/cm)	817,00	895,00	1000,00	949,00	923,00	935,00	906,00	917,86
Cromo total (mg/L)	0,05	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
Cromo hexavalente (mg/L)	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
DBO ₅ (mg/L)	168,00	255,00	274,00	267,00	252,00	236,00	248,00	242,86
DQO Total (mg/L)	380,00	237,00	785,00	556,00	513,00	606,00	404,00	497,29
Fenoles Totales (mg/L)	0,46	0,42		1,09	0,52	0,20	0,49	0,53
Fósforo total (mg/L)	5,20	6,80	7,20	6,60	7,10	9,10	6,50	6,93
Hierro total (mg/L)	0,88	1,60	2,40	1,92	1,61	1,40	1,46	1,61
Magnesio (mg/L)	2,12	2,45	1,44	4,67	2,08	3,21	3,40	2,77
Mercurio (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Niquel (mg/L)	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitratos (mg/L)	0,70	0,70	0,80	1,60	1,40	0,40	0,30	0,84
Nitritos (mg/L)	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01
NKT (mg/L)	61,00	75,00	81,00	75,00	71,00	73,00	61,00	71,00
pH	7,20	7,20	7,00	7,30	7,10	7,60	7,90	7,329
PCB's totales (µg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Plaguicidas Organoclorados Totales(mg/L)								
Plaguicidas OrganofosforadosTotales(mg/L)								
Plata (mg/L)	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Plomo (mg/L)	0,02	0,0100	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Potasio (mg/L)	11,64	17,94	38,05	27,81	21,63	22,31	23,45	23,26
SAAM (mg/L)						0,54	1,51	1,03
Sodio (mg/L)	38,05	44,87	182,14	123,99	55,03	62,63	60,43	81,02
Solidos Suspendidos Totales (mg/L)	138,00	288,00	270,00	220,00	230,00	162,00	208,00	216,57
Solidos Suspendidos Volatiles (mg/L)	115,00	326,00	210,00	154,00	162,00	132,00	166,00	180,71
Solidos Totales Volatiles (mg/L)	249,00	212,00	346,00	321,00	397,00	234,00	330,00	298,43
Solidos Totales (mg/L)	567,00	685,00	701,00	724,00	759,00	591,00	651,00	668,29
Selenio (mg/L)	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01
Sulfatos (mg/L)	57,00	26,00	55,00	60,00	55,00	51,00	63,00	52,43
Turbiedad UNT	90,00	120,00	140,00	140,00	130,00	90,00	162,00	124,57
Aceites y Grasas	54,00	37,00	57,00	39,00	66,00	65,00	58,00	53,71
Zinc Total	0,00	0,11	0,21	0,24	0,15	0,19	0,20	0,16
MICROBIOLÓGICOS								
Coliformes Fecales (UFC/100 ml)		14136000,00	4611000,00	15531000,00	6867000,00	173290000,00	6488000,00	36820500,00
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	81640000,00	1986300000,00	61310000,00	129970000,00	129970000,00	104620000,00	104620000,00	371204285,71
E. Coli (NMP/100 ml)	1510000,00	7701000,00	675000,00	8164000,00	2613000,00	6131000,00	38733000,00	9361000,00
Salmonella (NMP/100 ml)	1237,00	1660,00	134,00	976,00	103,00	613,00	72,00	685,00
Huevos de Helminto (HH /L)	1,00	30,00	5,00	25,00	10,00	5,00	5,00	11,57
Huevos de Helminto (HH viable/2g de ST)								

PTAR SALITRE (2020). CALIDAD AFLUENTE Y EFLUENTE FQ-MICROBIOL

MONITOREO FISICOQUIMICO EFLUENTE								
PARÁMETRO	04-jun-2019	03-jul-2019	02-ago-2019	03-sep-2019	02-oct-2019	06-nov-2019	03-dic-2019	PROMEDIO
Aceites y Grasas	30,00	29,00	34,00	36,00	36,00	32,00	30,00	32,43
Alcalinidad Total (mg/L)	222,00	243,70	260,70	272,50	287,00	252,00	239,00	253,84
Aluminio total	0,15	1,25	0,47	0,48	0,38	0,34	0,53	0,51
Amonio	43,00	55,00	53,00	62,00	60,00	54,00	22,00	49,86
Arsenico Total (mg/L)	0,02	0,	0,	0,	0,	0,	0,11	0,07
Bario	0,04	0,07	0,04	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
Boro	0,05	0,07	0,18	0,16	0,13	0,09	0,31	0,14
Cadmio	0,02	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,02
Calcio	13,00	14,76	0,	34,45	16,76	17,03	21,44	19,57
Carbamatos (µg/L)								
Cianuro total (mg/L)	0,	0,	0,	0,01	0,	0,	0,01	0,01
Cloruros (mg/L)	72,00	90,00	96,00	88,00	73,00	68,00	89,00	82,29
Cobre Total (mg/L)	0,04	0,09	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
Conductividad (uS/cm)	824,00	865,00	975,00	955,00	930,00	924,00	929,00	914,57
Cromo Hexavalente (mg/L)	0,01	0,16	0,	0,	0,	0,	0,01	0,06
Cromo total	0,05	0,	0,	0,	0,01	0,	0,01	0,02
DBO5 (mg/L)	130,00	167,00	163,00	203,00	175,00	143,00	197,00	168,29
DQO Total (mg/L)	309,00	365,00	422,00	393,00	362,00	416,00	422,00	384,14
Fenoles Totales (mg/L)	0,47	0,42	0,36	1,04	0,47	0,43	0,45	0,52
Fósforo soluble								
Fósforo total	3,70	5,00	6,20	4,70	5,80	7,90	6,70	5,71
Hierro	2,47	2,95	7,22	6,19	3,20	5,23	5,09	4,62
Magnesio	2,00	2,26	1,63	4,51	2,32	2,87	3,32	2,70
Manganeso								
Mercurio Total (mg/L)	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Niquel Total (mg/L)	0,02	0,	0,	0,	0,	0,	0,01	0,02
Nitratos	0,54	0,30	1,00	1,40	0,70	0,50	0,30	0,68
Nitritos	0,	0,	0,	0,	0,04	0,03	0,08	0,05
NKT	59,00	67,00	83,00	65,00	64,00	64,00	69,00	67,29
PCB's totales (µg/L)	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,00
pH	7,20	6,70	7,00	7,40	7,10	8,00	7,90	7,329
Plaguicidas organoclorados totales (mg/L)								
Plaguicidas organofosforados totales (mg/L)								
Plata	0,02	0,	0,	0,	0,	0,	0,03	0,03
Plomo Total (mg/L)	0,02	0,19	0,	0,05	0,	0,	0,02	0,07
Potasio	11,99	17,12	38,28	27,73	22,28	20,99	23,84	23,18
SAAM (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	3,18	0,53
Selenio (mg/L)	0,02	0,	0,	0,01	0,	0,02	0,02	0,02
Sodio	41,44	45,42	185,06	125,08	60,22	62,63	64,54	83,48
Solidos suspendidos totales (mg/L)	88,00	108,00	116,00	116,00	114,00	92,00	124,00	108,29
Solidos suspendidos volatiles (mg/L)	67,00	84,00	88,00	80,00	98,00	70,00	88,00	82,14
Solidos Totales (mg/L)	505,00	533,00	535,00	579,00	549,00	492,00	532,00	532,14
Solidos Totales Volatiles (mg/L)	189,00	208,00	215,00	219,00	242,00	158,00	211,00	206,00
Sulfatos	63,00	27,00	53,00	64,00	16,00	47,00	54,00	46,29
Turbiedad UNT	45,00	60,00	65,00	75,00	75,00	42,00	65,00	61,00
Zinc	0,	0,24	0,17	0,16	0,07	0,14	0,17	0,16
MICROBIOLÓGICOS								
r	4611000,00	19863000,00	6867000,00	10462000,00	8164000,00	9804000,00	10462000,00	10033285,71
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	72700000,00	1732900000,00	68670000,00	57940000,00	155310000,00	92080000,00	198630000,00	339747142,86
E. Coli (NMP/100 ml)	1780000,00	10462000,00	742000,00	7701000,00	3873000,00	5794000,00	6488000,00	5262857,14
Salmonella (NMP/100 ml)	349,00	2357,00	95,00	15,00	56,00	6310,00	56,00	1319,71
Huevos de Helminto (HH /L)		6,00	2,00	2,00	3,00	8,00	1,00	3,67
Huevos de Helminto (HH viable/2g de ST)								

PTAR SALITRE (2020). CALIDAD AFLUENTE Y EFLUENTE FQ-MICROBIOL

ANEXO 2: “CONSTANTES DE LANGMUIR PARA CARBÓN ACTIVADO”

Table 2

Langmuir, Freundlich, and D-R parameters, together with correlation coefficients, for adsorption of Cu ions on bare AC and MACP adsorbents at 30 °C.

Sample ID	Langmuir model			Freundlich model			D-R model		
	q_{∞} (mg g ⁻¹)	K_L (L mg ⁻¹)	R^2	n	K_F (mg ^{1-(1/n)} (L ^{1/n} g ⁻¹))	R^2	q_{0e} (mg g ⁻¹)	E (kJ mol ⁻¹)	R^2
AF1	23.9	0.003	0.971	1.94	0.520	0.987	41.6	7.99	0.982
AF2	20.7	0.002	0.982	1.63	0.191	0.985	35.7	7.26	0.985
AF3	15.5	0.001	0.976	1.55	0.121	0.976	27.1	7.07	0.975
AC	20.2	0.002	0.981	1.96	0.455	0.990	35.5	7.98	0.991

Remark:

1. Langmuir model: $q_e = \frac{q_{\infty} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$, where q_e is the maximal adsorption capacity and K_L is the Langmuir constant.
2. Freundlich model: $q_e = K_F C_e^{1/n}$, where K_F and n are the Freundlich constants, respectively.
3. D-R model: $q_e = q_{0e} \exp[-R C_e]$ with $E = RT \ln(1 + \frac{q_{0e}}{C_e})$, where q_{0e} is the theoretical saturation capacity, R is the gas constant, T is the absolute temperature, and K_{DR} is the D-R constant, related to the adsorption energy.

JOURNAL OF MOLECULAR LIQUIDS (2018). FUNCTIONALIZATION OF ACTIVATED CARBONS WITH MAGNETIC IRON OXIDE NANOPARTICLES FOR REMOVAL OF COPPER IONS FROM AQUEOUS SOLUTION [TABLA].

ANEXO 3: “CONSTANTES DE LANGMUIR PARA CARBÓN ACTIVADO CON MAGNETITA”

Table 2

The fitting parameters of adsorption isotherms for RhB or MO adsorption by Fe₃O₄/AC composite. K_F^* (mg g⁻¹ (mg L⁻¹)^{-1/n}).

dye	Adsorption isotherm	Fitting parameters	298 K	303 K	313 K	323 K	
RhB	Langmuir	R_{adj}^2	0.986	0.987	0.993	0.985	
		SD	2.88	2.71	1.91	1.94	
		Q_{max} (mg g ⁻¹)	172.80	162.45	152.68	126.51	
	Freundlich	K_L (L mg ⁻¹)	0.41	0.31	0.24	0.12	
		R_{adj}^2	0.92	0.94	0.92	0.89	
		SD	6.70	5.62	6.54	5.27	
		K_F^*	95.59	86.29	76.50	60.79	
		n_F	0.13	0.14	60.79	0.15	
		R_{adj}^2	0.995	0.997	0.993	0.985	
	Liu	SD	0.55	1.23	1.89	1.92	
		Q_{max} (mg g ⁻¹)	182.48	172.55	156.64	130.70	
		K_g (L mg ⁻¹)	0.45	0.32	0.25	0.13	
n_g		0.73	0.72	0.86	1.26		
MO		Langmuir	R_{adj}^2	0.980	0.983	0.968	0.971
			SD	2.84	1.97	2.07	2.22
	Q_{max} (mg g ⁻¹)		144.13	124.90	120.48	119.83	
	Freundlich	K_L (L mg ⁻¹)	0.54	0.42	0.19	0.11	
		R_{adj}^2	0.89	0.92	0.81	0.84	
		SD	6.50	4.32	5.10	5.19	
		K_F^*	89.06	77.58	68.32	55.10	
		n_F	0.11	0.10	0.11	0.15	
		R_{adj}^2	0.991	0.988	1.000	0.985	
	Liu	SD	1.91	1.64	0.05	1.57	
		Q_{max} (mg g ⁻¹)	150.35	129.32	115.50	113.73	
		K_g (L mg ⁻¹)	0.63	0.50	0.13	0.09	
n_g		0.73	0.73	1.63	1.50		

JOURNAL OF HARDOUS MATERIALS (2019). ENHANCED DYES ADSORPTION FROM WASTEWATER VIA FE3O4 NANOPARTICLES FUNCTIONALIZED ACTIVATED CARBON [TABLA].