

1-1-2018

Evaluación del biochar elaborado a partir de bagazo de caña en filtros con retro lavado para la adsorción y desorción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos) en aguas potenciadas

Angie Vanessa Cantor Forero
Universidad de La Salle, Bogotá

Laura Sofía Castañeda Domínguez
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria

Citación recomendada

Cantor Forero, A. V., & Castañeda Domínguez, L. S. (2018). Evaluación del biochar elaborado a partir de bagazo de caña en filtros con retro lavado para la adsorción y desorción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos) en aguas potenciadas. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/746

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

EVALUACIÓN DEL BIOCHAR ELABORADO A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA EN
FILTROS CON RETRO LAVADO PARA LA ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DE ANIONES
(FOSFATOS, SULFATOS Y NITRATOS) EN AGUAS POTENCIADAS.

ANGIE VANESSA CANTOR FORERO

LAURA SOFIA CASTAÑEDA DOMINGUEZ

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTÁ, COLOMBIA

2018

EVALUACIÓN DEL BIOCHAR ELABORADO A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA EN
FILTROS CON RETRO LAVADO PARA LA ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DE ANIONES
(FOSFATOS, SULFATOS Y NITRATOS) EN AGUAS POTENCIADAS.

ANGIE VANESSA CANTOR FORERO

LAURA SOFIA CASTAÑEDA DOMINGUE

Trabajo de Grado para optar al Título de:

Ingeniero Ambiental y Sanitario

DIRECTOR

JAIRO VANEGAS GORDILLO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTÁ, COLOMBIA

2018

Nota de aceptación:

Jairo Vanegas

Director

Jurado 1.

Jurado 2.

Bogotá, Febrero de 2018.

DEDICATORIA

Laura Sofia Castañeda Dominguez

A Dios por que ha sido mi guía espiritual, y me ha permitido tener buena salud, paciencia, sabiduría, alegrías, permitiéndome cumplir una meta más en mi vida.

A mi papi Pedro José Castañeda Q.E.P.D, que ha sido una razón más para culminar mis estudios, para que, desde el cielo, pueda ver que me convertí en una profesional como siempre quiso y por ser mi guía y uno de mis angelitos de la guardia, que siempre está presente y cuidándome de todo mal; a mi mami Elena Dominguez por que en los momentos más difíciles ha sido mi apoyo y la mayor razón para seguir adelante y nunca desfallecer en el camino. A los dos en general por brindarme su apoyo económico, por formarme a mí y a mis hermanos con los mejores principios y valores para ser personas exitosas y de bien.

A mis hermanos porque, aunque nunca faltan las peleas y muchas veces no se encuentren cerca, siempre están presentes sin importar nada, brindándome su apoyo incondicional y su cariño.

A Javier Torres por que ha estado presente en los peores y mejores momentos de mi vida, convirtiéndose en una de las personas más importantes de mi existencia y me ha brindado todo su apoyo, cariño y comprensión, en cada situación.

A mi compañera y amiga de carrera y de trabajo de grado Angie Cantor por aguantar mi genio y mis malos ratos, por ser incondicional y por brindarme su confianza y permitirme elaborar en conjunto nuestro trabajo de grado.

Angie Vanessa Cantor Forero

A Dios, porque es quien ilumina mi camino, me regala a diario la oportunidad de vivir y en el siempre encontrare la paz y la alegría.

A mis padres, Alvaro Cantor y Constanza Forero, por ser el motor de mi vida, por el amor que me brindan, por ser mi ejemplo por seguir, por tenerme tanta paciencia y ser la fortaleza de mi vida, por ser mi motivo principal para salir adelante y ser mis amores más grandes, porque a través de ellos se lo que es realmente el amor y el cariño. A ellos, que con sus esfuerzos y sacrificios me dieron la oportunidad de estudiar y poder ser profesional, a ellos quienes me forjaron y me enseñaron el valor de la vida y me permitieron ser quien soy.

A mi hermana, Natalia Cantor, por ser mi cómplice de vida y mi amor pequeño, por ayudarme siempre en lo que necesito, por ser mi compañera de aventuras y que, a pesar de las discusiones, la amo con todo mi corazón y siempre estaré para ayudarla y apoyarla en su camino.

A mi novio, Sebastian Vanegas, por convertirse en una de las personas más importantes en mi vida y mi mayor bendición, por hacer parte de mi camino, por darme todo su amor, cariño y ternura y ser mi apoyo incondicional, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, por hacerme ser mejor persona y por impulsarme a hacer hasta lo imposible.

A mi compañera y amiga, Sofía Castañeda, por ser parte de este proyecto y hacerlo posible, por ser una gran amiga y persona, por recorrer junto a mí este camino y a quien le deseo los mejores éxitos y bendiciones en su vida

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecemos a Dios por permitirnos culminar esta etapa de aprendizaje, por brindarnos la fuerza, paciencia, salud, sabiduría, y por ser nuestra guía espiritual en toda nuestra carrera y en este proyecto final.

Le damos las gracias a nuestro tutor de proyecto Jairo Vanegas Gordillo, por guiarnos en todo el desarrollo de este proyecto, por confiar en nosotras y nuestros conocimientos y por ayudarnos en poder culminar nuestras carreras.

A nuestras familias y compañeros de vida por brindarnos siempre su apoyo incondicional y darnos la fuerza para seguir adelante día a día, por darnos lo mejor de sí mismos y enseñarnos a crecer como personas respetuosas, amorosas y luchadoras.

A nuestros compañeros y amigos que estuvieron en los buenos y malos momentos de nuestras carreras, con quienes compartimos muchas experiencias y fueron nuestro apoyo, para adquirir y desarrollar nuestros conocimientos, con el fin de formarnos como profesionales en Ingeniería Ambiental y Sanitaria, y quienes nos brindaron su confianza y amistad.

A nuestros maestros que nos dieron clases durante toda la carrera, por compartimos todos sus conocimientos con el fin de convertirnos en excelentes profesionales, y por su paciencia a la hora de enseñarnos.

Al equipo de apoyo del laboratorio de Ciencias Básicas, por su buena disposición y colaboración en la etapa experimental de este proyecto.

CONTENIDO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | ACRONIMOS..... | 13 |
| 2. | GLOSARIO..... | 14 |
| 3. | RESUMEN..... | 17 |
| 4. | INTRODUCCIÓN | 19 |
| 5. | OBJETIVOS..... | 22 |
| 5.1. | Objetivo General..... | 22 |
| 5.2. | Objetivos Específicos | 22 |
| 6. | JUSTIFICACIÓN..... | 23 |
| 7. | MARCO DE REFERENCIA | 24 |
| 7.1. | Marco Teórico | 24 |
| 7.1.1. | Pirólisis..... | 24 |
| 7.1.2. | Biochar | 26 |
| 7.1.3. | Filtración | 28 |
| 7.1.4. | Medios granulares | 29 |
| 7.1.5. | Mecanismos de remoción de un filtro..... | 30 |
| 7.1.6. | Sistemas de filtración | 31 |
| 7.1.7. | Retro lavado | 32 |
| 7.1.8. | Filtros con retro lavado | 33 |
| 7.1.9. | Sistemas adsorbentes..... | 33 |
| 8. | DESARROLLO METODOLÓGICO | 36 |
| 8.1. | Pre tratamiento de residuos..... | 37 |
| 8.1.1. | Recolección y selección de materia prima | 37 |
| 8.1.2. | Determinación de humedad..... | 37 |
| 8.1.3. | Acondicionamiento del bagazo de caña | 37 |
| 8.2. | Producción y caracterización del Biochar | 38 |
| 8.2.1. | Producción de Biochar | 38 |
| 8.2.2. | Tamizado de Biochar | 38 |
| 8.2.3. | Caracterización..... | 39 |
| 8.3. | Diseño de filtros con retro lavado por medio de parámetros de diseño y variables experimentales..... | 40 |

| | | |
|---------|--|----|
| 8.4. | Evaluación de la eficiencia de remoción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos) | 42 |
| 8.4.1. | Curva de calibración de sulfatos. | 42 |
| 8.4.2. | Curva de calibración de nitratos..... | 43 |
| 8.4.3. | Metodología para fosfatos..... | 44 |
| 8.4.4. | Obtención de eficiencias | 45 |
| 8.4.5. | Desorción | 46 |
| 9. | RESULTADOS | 47 |
| 9.1. | Pre tratamiento de residuos..... | 47 |
| 9.1.1. | Recolección y selección del material | 47 |
| 9.1.2. | Caracterización del bagazo de caña | 47 |
| 9.1.3. | Determinación de humedad del bagazo de caña | 49 |
| 9.2. | Producción y caracterización de Biochar | 51 |
| 9.2.1. | Producción de Biochar | 51 |
| 9.2.2. | Tamizado del Biochar | 53 |
| 9.2.3. | Caracterización del Biochar elaborado a partir del bagazo de caña..... | 55 |
| 9.3. | Diseño de filtros con retro lavado por medio de parámetros de diseño y variables experimentales..... | 57 |
| 9.3.1. | Dimensionamiento y Construcción de filtros piloto | 57 |
| 9.4. | Evaluación de la eficiencia de remoción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos) | 60 |
| 9.4.1. | Curvas de calibración | 60 |
| 9.4.2. | Concentraciones y Eficiencias | 64 |
| 9.5. | Desorción..... | 77 |
| 9.5.1. | Sulfatos..... | 77 |
| 9.5.2. | Nitratos | 78 |
| 9.5.3. | Fosfatos | 79 |
| 10. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 80 |
| 10.1. | Caracterización del bagazo de caña y Biochar | 80 |
| 10.2. | Evaluación de eficiencias para remoción de aniones..... | 81 |
| 10.2.1. | Sulfatos | 81 |
| 10.2.2. | Nitratos | 84 |
| 10.2.3. | Fosfatos..... | 86 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 10.2.4. | Aguas potenciadas con sulfatos, nitratos y fosfatos | 87 |
| 10.3. | Desorción de aniones en filtros con retro lavado..... | 88 |
| 11. | CONCLUSIONES | 90 |
| 12. | RECOMENDACIONES | 92 |
| 13. | FUENTES BIBLIOGRÁFICAS | 94 |
| 14. | REGISTRO FOTOGRAFICO | 99 |
| 14.1. | Producción de Biochar | 99 |
| 14.2. | Construcción de filtros piloto..... | 102 |
| 14.3. | Filtración de aniones en los filtros | 103 |
| 14.4. | Retrolavado de aniones en los filtros | 104 |
| 15. | ANEXOS..... | 106 |
| 15.1. | Anexo 1. Método HACH para la determinación de fosfatos. | 106 |
| 15.2. | Anexo 2. Propiedades técnicas del carbón activado de hulla bituminosa 800..... | 112 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Diferentes tipos de procesos térmicos, con sus respectivos valores en diferentes parámetros para generar un respectivo producto</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabla 2. Variables principales diseño de filtros.</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabla 3. Mecanismos de remoción en un filtro.</i> | <i>31</i> |
| <i>Tabla 4. Tamiz de Ensayo Estándar Americano.</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabla 5 Variables utilizadas para el diseño de filtros con retro lavado.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tabla 6. Análisis elemental del bagazo de caña</i> | <i>48</i> |
| <i>Tabla 7. Análisis próximo del bagazo de caña</i> | <i>48</i> |
| <i>Tabla 8. Pesos necesarios para la determinación de humedad del bagazo de caña</i> | <i>49</i> |
| <i>Tabla 9. Producción de Biochar</i> | <i>52</i> |
| <i>Tabla 10. Tamizado y pesaje de Biochar</i> | <i>54</i> |
| <i>Tabla 11. Análisis elemental del Biochar producido</i> | <i>55</i> |
| <i>Tabla 12. Resultados análisis próximo de Biochar producido a partir de bagazo de caña y carbón activado comercial.</i> | <i>55</i> |
| <i>Tabla 13. Dimensionamiento filtros piloto para las pruebas de eficiencia de remoción de aniones.</i> | <i>59</i> |
| <i>Tabla 14. Cantidad de Biochar y carbón activado necesario para los filtros piloto.</i> | <i>60</i> |
| <i>Tabla 15. Resultados de la absorbancia de los patrones preparados para la elaboración de la curva de calibración para sulfatos.....</i> | <i>61</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 16. Resultados de la absorbancia de los patrones preparados para la elaboración de la curva de calibración para nitratos.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabla 17. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 45 cm.</i> | <i>65</i> |
| <i>Tabla 18. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 45 cm.</i> | <i>65</i> |
| <i>Tabla 19. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Biochar a altura de 45 cm.</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabla 20. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 55 cm.</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabla 21. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 55 cm.</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabla 22. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Biochar a altura de 55 cm.</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabla 23. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Carbón activado de 45 cm.</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabla 24. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Carbón Activado de 45 cm.</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabla 25. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Carbón Activado a altura de 45 cm.</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabla 26. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Carbón activado de 55 cm.</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabla 27. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Carbón Activado de 55 cm.</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla 28. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Carbón Activado a altura de 55 cm.</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla 29. Resultados de filtración de nitratos en altura de Biochar de 45 cm.</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla 30. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Biochar de 45 cm.</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla 31. Eficiencia de remoción de nitratos en el Biochar a altura de 45 cm.</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla 32. Resultados de filtración de nitratos en altura de Biochar de 55 cm.</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla 33. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Biochar de 55 cm.</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabla 34. Eficiencia de remoción de nitratos en el Biochar a altura de 55 cm.</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabla 35. Resultados de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 45 cm.</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 36. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 45 cm.</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 37. Eficiencia de remoción de nitratos en el Carbón Activado a altura de 45 cm.</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 38. Resultados de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 55 cm.</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 39. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 55 cm.</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 40. Eficiencia de remoción de nitratos en el Carbón Activado a altura de 55 cm.</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 41. Resultados de filtración y tiempos de filtración de fosfatos.</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 42. Eficiencia de remoción de fosfatos en Biochar y Carbón activado.</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 43. Resultados de filtración de sulfatos en Biochar.</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabla 44. Eficiencia de remoción de sulfatos en Biochar.</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabla 45. Resultados de filtración de nitratos en Biochar.</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabla 46. Eficiencia de remoción de nitratos en Biochar.</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 47. Resultados de filtración de fosfatos en Biochar.</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 48. Eficiencia de remoción de fosfatos en Biochar.</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 49. Resultados de filtración de sulfatos en Carbón Activado.</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 50. Eficiencia de remoción de sulfatos en Carbón Activado.</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 51. Resultados de filtración de nitratos en Carbón Activado.</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 52. Eficiencia de remoción de nitratos en Carbón Activado.</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 53. Resultados de filtración de fosfatos en Carbón Activado.</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 54. Eficiencia de remoción de fosfatos en Carbón Activado.</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 55. Resultados desorción de sulfatos en Biochar en altura de 45 cm.</i> | <i>77</i> |

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 56. Resultados desorción de sulfatos en Biochar en altura de 55 cm.</i> | 77 |
| <i>Tabla 57. Resultados desorción de nitratos en Biochar en altura de 45 cm.</i> | 78 |
| <i>Tabla 58. Resultados desorción de nitratos en Biochar en altura de 55 cm.</i> | 78 |
| <i>Tabla 59. Resultados desorción de nitratos en Carbón Activado en altura de 45 cm.</i> | 78 |
| <i>Tabla 60. Resultados desorción de nitratos en Carbón Activado en altura de 55 cm.</i> | 78 |
| <i>Tabla 61. Resultados de desorción de fosfatos en Biochar y Carbón Activado.</i> | 79 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| <i>Gráfica 1. Curva de Calibración de Sulfatos.</i> | 61 |
| <i>Gráfica 2 Curva de Calibración de Nitratos.</i> | 63 |
| <i>Gráfica 3. Concentraciones de sulfatos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 45 cm.</i> | 65 |
| <i>Gráfica 4. Concentraciones de sulfatos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 55 cm.</i> | 66 |
| <i>Gráfica 5. Concentraciones de nitratos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 45 cm.</i> | 69 |
| <i>Gráfica 6. Concentraciones de nitratos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 55 cm.</i> | 70 |
| <i>Gráfica 7. Concentraciones de nitratos en Carbón Activado a diferentes volúmenes en altura de 45 cm.</i> | 71 |
| <i>Gráfica 8. Concentraciones de nitratos en Carbón Activado a diferentes volúmenes en altura de 55 cm.</i> | 72 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| <i>Ilustración 1. Proceso de pirólisis de biomasa.</i> | 24 |
| <i>Ilustración 2. Beneficios del Biochar aplicado como un adsorbente efectivo para el tratamiento de aguas residuales.</i> | 27 |
| <i>Ilustración 3. Diagrama de flujo de la metodología planteada para la realización del proyecto.</i> | 36 |
| <i>Ilustración 4 Recolección, separación y selección de bagazo de caña.</i> | 47 |
| <i>Ilustración 5 Bagazo de caña para obtención de humedad.</i> | 49 |
| <i>Ilustración 6. Peso final de Bagazo de Caña.</i> | 50 |
| <i>Ilustración 7. Transformación térmica de Bagazo de caña a Biochar.</i> | 53 |
| <i>Ilustración 8 Secado y almacenaje de Biochar.</i> | 53 |
| <i>Ilustración 9 Proceso de tamizado del Biochar.</i> | 54 |
| <i>Ilustración 10 Filtros piloto.</i> | 60 |
| <i>Ilustración 11 mecanismos de adsorción de contaminantes orgánicos.</i> | 83 |
| <i>Ilustración 12. Acondicionamiento del bagazo de caña.</i> | 99 |
| <i>Ilustración 13. Resultado del acondicionamiento del bagazo de caña.</i> | 99 |

| | |
|---|-----|
| <i>Ilustración 14. Ingreso del bagazo de caña al proceso de pirólisis en la mufla Vulcan A-550 ..</i> | 100 |
| <i>Ilustración 15. Biocarbón obtenido después del proceso de pirólisis</i> | 100 |
| <i>Ilustración 16. Biochar producido</i> | 101 |
| <i>Ilustración 17. Biochar producido en el desecador</i> | 101 |
| <i>Ilustración 18. Almacenamiento del bochar producido en bolsas ziploc.</i> | 102 |
| <i>Ilustración 19. Construcción de filtros piloto</i> | 102 |
| <i>Ilustración 20. Instalación de filtros piloto.....</i> | 103 |
| <i>Ilustración 21. Filtración de agua impacta en los filtros piloto</i> | 103 |
| <i>Ilustración 22. Recolección de muestra.</i> | 104 |
| <i>Ilustración 23. Toma de muestras de retrolavado</i> | 104 |
| <i>Ilustración 24. Toma de muestra de retrolavado</i> | 105 |

1. ACRONIMOS

ac : Acuoso

Ba: Bario

$BaSO_4$: Sulfato de Bario

HCl: Ácido Clorhídrico

KNO_3 : Nitrato de Potasio

NaCl: Cloruro de Sodio

Na_2SO_4 : Sulfato de Sodio

s : Solución

SO_4 : Sulfato

UV: Ultravioleta

2. GLOSARIO

Adsorción: La adsorción consiste en la retención selectiva de uno o más componentes (adsorbatos) de un gas o un líquido en la superficie de un sólido poroso (adsorbente). La adsorción es un fenómeno dinámico, de forma que las moléculas de adsorbato están continuamente chocando con la superficie del sólido adsorbente, adsorbiéndose parte de ellas. A su vez, continuamente se están desorbiendo las moléculas adsorbidas, por lo que, llega un momento en que cuantitativamente el número de moléculas que se adsorben por unidad de tiempo es igual al de las que se desorben, llegando, de esta forma, al estado de equilibrio dinámico (Pau Gamarra, 1994).

Agua residual no Domestica: Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domesticas-ARD (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Anión: Un anión es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica negativa, esto es, con exceso de electrones. Los aniones se describen con un estado de oxidación negativo (Hernandez, 2004).

Biochar: Es un residuo de carbono poroso derivado de la conversión térmica de la biomasa de residuos bajo condiciones limitadas de oxígeno o condiciones anaerobias (Inyang & Dickenson, 2015).

Carbón activado: Forma altamente adsorbente del carbón usado para remover olores y sustancias tóxicas de líquidos o emisiones gaseosas. En el tratamiento del agua este carbón se utiliza para remover materia orgánica disuelta del agua residual (Gonzalez Briceño & Niño Castañeda, 2006).

Calidad del agua: Es el resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con el contenido de las normas que regulan la materia (Ministerio de La Protección Social, 2007).

Cuerpos de agua: Sistema de origen natural o artificial localizado, sobre la superficie terrestre, conformado por elementos físicos-bióticos y masas o volúmenes de agua, contenidas o en movimiento (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Desorción: Lo contrario a la adsorción; la eliminación de materia desde un medio adsorbente, usualmente para recuperar material (Manuel Valiente & Gonzalo, 2004).

Filtración: La filtración es el proceso de retiro de sólidos suspendidos del agua mediante el paso del agua a través de una tela permeable o una cama de materiales porosos, es hacer pasar el agua por un lecho poroso para separar las partículas y microorganismos objetables que no han quedado retenidos en el proceso de sedimentación (Pérez, 1981)

Interacción electrostática: Si los granos del medio filtrante tienen carga contraria a los sólidos suspendidos, se genera entre ellos una fuerza de atracción. Si los granos del medio filtrante son negativos y los sólidos son neutros, en ese caso la barrera de energía ha desaparecido y todo contacto puede producir retención (Pérez, 1981).

Lecho de filtración: Medio constituido por material granular poroso por el que se hace percolar un flujo (Gonzalez Briceño & Niño Castañeda, 2006).

Léntico: se refiere a las aguas tranquilas. Medios acuáticos estancados como lagos, lagunas, ciénagas, esteros y humedales (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación & (ICONTEC), 1995).

Lótico: se refiere a aguas corrientes. Medio acuático continental cuyo líquido fluye o corre, como ríos, quebradas y caños (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación & (ICONTEC), 1995).

Pirólisis: Proceso termoquímicos que produce Biochar como un producto sólido, además de bioaceites y gas de síntesis (Inyang & Dickenson, 2015). La pirólisis es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en combustible útiles, con un alto rendimiento, mediante

calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno. Por su capacidad de tratamiento, es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables (Pinedo, 2013)

Pirólisis lenta: La pirólisis convencional tiene lugar a con una velocidad de calentamiento lenta, alcanzando una temperatura máxima entre 500-600°C. En estas condiciones, se obtienen tres productos: sólidos, líquidos y gases, en proporciones significativas (Pinedo, 2013).

Retrolavado: Es la operación en que se suspende la filtración en una de las unidades y se invierte en ella el sentido del flujo con una velocidad tal que se produzca una expansión del lecho, suficiente para que los granos se froten entre sí y desprendan todo el material que ha quedado retenido en ellos durante la operación de filtrado (Pérez, 1981).

Sustancias potencialmente tóxicas: Son aquellas de origen natural o sintético que pueden ocasionar efectos nocivos a organismos con los cuales entran en contacto. Incluye sustancias utilizadas en actividades domésticas, producción de bienes o servicios y plaguicidas, que pueden estar presentes en el agua para consumo humano (Ministerio de La Protección Social, 2007)

Tratamiento: Es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales (Gonzalez Briceño & Niño Castañeda, 2006).

Vertimiento: Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

3. RESUMEN

La contaminación por vertimientos industriales provenientes de procesos que generan componentes aniónicos como cloruros, sulfatos y nitratos, se derivan de sectores productivos de textiles, pinturas, perfumes, detergentes y aceites de palma, y prácticas agrícolas, estos vertimientos industriales con alta concentración de estos iones necesitan el debido tratamiento para minimizar el impacto ambiental que puede producir en los recursos agua y suelo y en la salud humana. El objetivo de este estudio fue determinar la capacidad de adsorción y desorción del Biochar, obtenido a partir de la pirólisis lenta del bagazo de caña, en condiciones de un 10 % de humedad en el residuo, el cual se lleva a un pirolizador con temperatura de 450°C expuesto en un tiempo de una (1) hora a una velocidad de calentamiento de 10°C/min y una atmosfera controlada, una vez producido el Biochar se realizaron pruebas en filtros de 4" de diámetro y a una variación de altura de medio de 45 y 55 cm, con concentraciones de aniones entre 400 a 436 mg/L cada uno y calculando las concentraciones finales con la técnica de espectrofotometría de luz UV utilizando Espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYSM5 y HACH DR 3800. Las características de la superficie, como el área superficial, estructura porosa y superficie enriquecida con grupos funcionales que generan interacciones electrostáticas, muestran efectos significativos sobre la adsorción y desorción de estos aniones en el Biochar, ya que partiendo de concentraciones iniciales de 436 ppm para sulfatos, 400 ppm para nitratos y 400 ppm de fosfatos, los resultados de remoción para una altura de 45cm del medio dan valores de 208,13 ppm para SO_4^{-2} , 87,82 ppm para NO_3^- y 11,52 ppm para PO_4^{3-} , obteniendo así eficiencias de 52,26%, 78,04% y 97,12% respectivamente y para una altura del medio de 55 cm dan valores de 219,38 ppm para SO_4^{-2} , 20,97 ppm para NO_3^- y 10,56 ppm para PO_4^{3-} , obteniendo así eficiencias de 49,68%, 94,69% y 97,36% respectivamente, de igual manera al generar una mezcla de los contaminantes se obtienen resultados de 369,83 ppm para SO_4^{-2} ,

166,48 ppm para NO_3^- y 8,35 ppm para PO_4^{3-} , con eficiencias de 15,18%, 58,37% y 97,92% correspondientemente, lo que permite concluir que el Biochar tiene una alta eficiencia de remoción para los fosfatos, en seguida presenta una buena adsorción de nitratos y finalmente este medio presenta una baja retención de sulfatos, así mismo se comprueba que a alturas más grandes de medio la eficiencia de remoción aumenta y su selectividad de remoción se enfoca en los aniones fosfatos debido a las cargas que influyen en la atracción electrostática. En el caso de desorción, los resultados de concentraciones iniciales para nitratos, sulfatos y fosfatos comprueban la adsorción de aniones en el Biochar con valores altos obtenidos y las concentraciones finales, después de ejecutado el retrolavado, garantizan una limpieza del medio.

Palabras clave: Adsorción, Biochar, contaminantes aniónicos, filtro con retro lavado, pirólisis lenta.

4. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación del agua por productos químicos orgánicos ha venido preocupando y alertando, tanto a los gobiernos como a las comunidades afectadas a diario por el agotamiento del recurso hídrico. Los vertimientos industriales con descargas de componentes aniónicos como cloruros, sulfatos y nitratos tienen un impacto ambiental que repercute en los recursos agua y suelo y en la salud humana; las industrias de detergentes, textiles, tintes, pinturas, perfumes y aceites de palma y el campo de la agricultura son las principales fuentes de esta contaminación. La dificultad en la remoción de estos compuestos, se debe a la persistencia del contaminante al pasar por tratamientos de agua convencionales, transformándose en productos recalcitrantes, que al tener una estructura muy estable químicamente se resiste al ataque de los microorganismos o de cualquier mecanismo de degradación sea biológico o químico (Inyang & Dickenson, 2015).

Por otra parte, la inadecuada disposición del residuo sólido orgánico (bagazo de caña) a través de quemadas incontroladas que emiten a la atmósfera monóxido de carbono, hidrocarburos y óxido de azufre, genera gases que inciden directamente en el aumento de enfermedades como bronquitis crónica, enfisema pulmonar y asma bronquial, entre otras, que afectan a la población colindante y que contribuyen de manera activa al efecto invernadero, al aumento del calentamiento global y a la contaminación en cuerpos de agua, contaminación en los suelos y en el deterioro de la calidad del aire. En Colombia, la quema y la requema del monocultivo de caña de azúcar se ha venido realizando en valle geográfico del río Cauca a partir de la década de los 70; contribuye en gran medida con el deterioro de la calidad del aire, ya que se liberan gran cantidad de contaminantes a la atmósfera por cada 450 Ha que se queman a diario (Madriñan, 2002).

Recientemente, el Biochar se ha considerado como la alternativa de solución a estos problemas y como un buen sustituto del carbón activado en la remediación ambiental y el tratamiento de aguas debido a su bajo costo, abundancia relativa y la capacidad de adsorción de diferentes contaminantes. El Biochar se caracteriza por ser un compuesto rico en carbono, con estructura porosa, con grupos funcionales de oxígeno y con grupos aromáticos presentes en su superficie; de igual forma exhibe diferentes propiedades físicas y químicas, dependiendo de la materia prima y la tecnología de pirólisis empleada (Beesley et al., 2011). Las propiedades específicas del Biochar tales como el área de superficie, la carga superficial y funcionalidad química son factores influyentes que controlan la sorción de contaminantes orgánicos (Zhu et al., 2014); adicionando a esto, los grupos funcionales que enriquecen su superficie y componentes minerales hacen que sea posible para ser utilizado como adsorbente en la eliminación de los contaminantes presentes en soluciones acuosas.

Como un adsorbente, el Biochar tiene estructura porosa similar al carbón activado, el cual cabe mencionar es el comúnmente empleado en los tratamientos de agua y que presente buena eficiencia para la eliminación de diversos contaminantes del agua en todo el mundo (Tan et al., 2015). Sin embargo, el Biochar en comparación con el carbón activado, llega ser una nueva alternativa de bajo costo, con potencial de remoción eficaz y en cuanto a la producción del mismo es más barato con menores requerimientos de energía y con poca necesidad de tener proceso de activación adicional (Ahmad et al., 2012).

La presente investigación evaluó la eficiencia del Biochar como medio filtrante en la adsorción y desorción de nitratos, sulfatos y fosfatos mediante sistemas de filtros con retro lavado, a partir de datos experimentales que demuestran la capacidad de retención que tiene el material producido y que es aplicado en aguas potenciadas con una concentración ya preestablecida de los compuestos aniónicos. Por lo tanto, este estudio también (1) realizó la producción del Biochar a través del

procesamiento térmico de pirólisis lenta de biomasa en donde la materia prima utilizada fue el bagazo de caña, (2) diseño filtros con retro lavado para obtener valores de concentraciones de remoción y (3) comprobó la desorción en el Biochar a través de retro lavado para obtener un valor de retención de compuestos aniónicos en el mismo.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia del Biochar como medio filtrante en la adsorción y desorción de nitratos, sulfatos y fosfatos, mediante sistemas de filtros con retro lavado.

5.2. Objetivos Específicos

- Verificar y estandarizar las variables de producción del Biochar usadas en la pirólisis lenta.
- Diseñar a partir de parámetros específicos y variables experimentales los filtros con retro lavado para la correspondiente evaluación de remoción.
- Evaluar la eficiencia de retención del Biochar comparado con la eficiencia del carbón activado en la remoción de aniones, tales como fosfatos, sulfatos y nitratos.
- Comprobar la desorción mediante los filtros con retro lavado para obtener la concentración de retención de aniones en el Biochar.

6. JUSTIFICACIÓN

Debido al inadecuado manejo del residuo sólido bagazo de caña, subproducto generado en el cultivo de azúcar, y a la creciente contaminación del recurso hídrico por continuos vertimientos industriales de contaminantes aniónicos en la elaboración de perfumes, pinturas, tintes, textiles, detergentes y aceites de palma sumado a las descargas de aguas contaminadas por actividades agrícolas a cuerpos de agua, se tiene la necesidad de implementar una tecnología que permita el aprovechamiento y transformación de este residuo y a su vez incorpore una manera eficiente de emplear este material sólido en la filtración de aguas residuales y específicamente en la retención de aniones.

El presente proyecto busca proponer el Biochar como una alternativa económica y sostenible para la remoción de contaminantes aniónicos presentes en aguas residuales, este material adsorbente obtenido mediante el proceso de pirólisis lenta del bagazo de caña será empleado en sistemas de filtración con retro lavado con el fin de evaluar las eficiencias de adsorción y desorción de fosfatos, sulfatos y nitratos del agua, ya que la gran mayoría de este tipo de vertimientos contienen cargas contaminantes altas de estos aniones que al no ser tratadas adecuadamente degeneran el recurso hídrico y posteriormente afectan en la salud humana de las poblaciones que tienen contacto con el cuerpo de agua contaminado, de igual manera los vertimientos que si llegan a ser tratados no son rentables por los altos costos que acarrear y por la poca eficiencia de remoción que presentan. Este material además de ser una alternativa para el tratamiento de aguas es un método para reducir los impactos en el suelo y el aire que genera la mala disposición del residuo, mitigando implícitamente los impactos ambientales y sociales tanto de los vertimientos industriales como de las disposiciones de residuos agroindustriales en el medio ambiente.

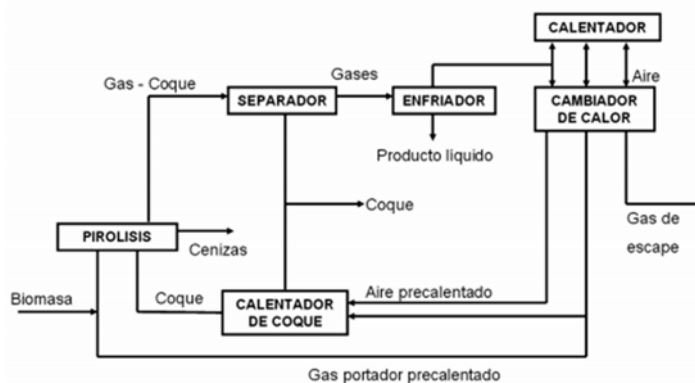
7. MARCO DE REFERENCIA

7.1. Marco Teórico

7.1.1. Pirólisis

Pirólisis es el procesamiento térmico de biomasa en ausencia total de oxígeno, en este proceso se utiliza combustible externo para poder conducir las reacciones en este tipo de ambiente, antiguamente se describía este proceso como carbonización. Muchas veces es confundido con el proceso de gasificación en el cual la biomasa se convierte en gas con un control cuidadoso en la cantidad de oxígeno (Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, n.d.). Existen diferentes tipos de pirólisis, con diferentes condiciones de temperatura, presión, tiempo de residencia y velocidad de calentamiento, en el proceso que ayudan a la generación de diferentes productos.

Ilustración 1. Proceso de pirólisis de biomasa.



Fuente: (Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, n.d.)

7.1.1.1. Pirólisis lenta o convencional

La pirólisis convencional puede efectuarse a baja temperatura, o a temperatura media. Los procesos a baja temperatura son hasta los 550°C, y se emplean para la producción de aceites y alquitranes; en tanto que los procesos de temperatura media se llevan entre los 550°C a 800°C, con lo cual se

obtiene la producción de metano e hidrocarburos superiores(Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, n.d.). Este tipo de pirólisis se ha llevado a cabo durante miles de años para producir carbón vegetal, revisándose los conocimientos sobre la producción y el conocimiento del carbón vegetal acumulados durante los últimos 38 milenios. (Mohan, Sarswat, Sik, & Pittman, 2014) Este proceso térmico, se ha utilizado desde hace poco para la transformación de biomasa en Biochar y para llegar este tipo de producto se deben tener en cuenta las siguientes condiciones: una temperatura de 500-600°C a una velocidad de calentamiento lenta y un tiempo de residencia que varía entre horas y segundos, teniendo en cuenta una atmosfera controlada. (Mohan et al., 2014)

7.1.1.2.Pirólisis rápida

La pirólisis rápida requiere materia prima seca (<10% en peso de humedad), transferencia de calor rápida, aumento rápido de temperatura calentando pequeñas partículas de biomasa (1-2 mm) a 400-500 ° C y tiempos de residencia de vapor de 1 s (máximo 5 s) (Mohan et al., 2014). Este es un proceso con una alta velocidad de transferencia de calor a la alimentación y un corto tiempo de residencia del vapor caliente en la zona de reacción. A nivel comercial este tipo de proceso ha alcanzado un importante éxito, en especial en la producción de sustancia químicas y combustibles líquidos. (Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, n.d.)

Los resultados de la pirólisis dependen principalmente de condiciones de operación, en las cuales los parámetros que se tienen más presentes son:

- Velocidad de calentamiento
- Tipo de reactor
- Tiempo de residencia del gas y de las partículas
- Temperatura
- Presión

En la siguiente tabla se encuentran algunos de los anteriores parámetros a los cuales se deben encontrar para poder llevar a cabo ya sea una pirólisis convencional, rápida y otros procesos térmicos como la torrefacción, la gasificación y la carbonización hidrotermal.

Tabla 1. Diferentes tipos de procesos térmicos, con sus respectivos valores en diferentes parámetros para generar un respectivo producto

| Procesos térmicos | Rango de temperatura (°C) | Velocidad de calentamiento | Tiempo de residencia | Producto |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Pirólisis lenta | 500-600 | Lenta, (<10°C/min) | Horas-segundos | Biochar |
| Torrefacción | 200-300 | Lenta, (<10°C/min) | Minutos-horas | Biomasa estabilizada |
| Pirólisis rápida | 400-500 | Muy rápida, (1000°C/s) | Segundos | Bioaceites |
| Gasificación | 700-1500 | Moderada-muy rápida | Segundos-minutos | Syngas/producción de gas |
| HTC | 175-250 | Lenta | Horas | Hydrochar |
| Ultrarrápida | 1000 | Muy rápida | <0,5 segundos | Químicos y gas |
| Vacío | 400 | Media | 2-30 segundos | Bioaceites |
| Hidropirólisis | <500 | Rápida | <10 segundos | Bioaceites |
| Metanopirólisis | >700 | Rápida | <10 segundos | Químicos |

Fuente: (Pinedo, 2013)(Mohan et al., 2014)

7.1.2. Biochar

El Biochar es un producto cuya obtención se puede generar a partir de residuos sólidos que contengan una biomasa disponible. Este material tiene una composición química muy similar a la del carbón natural, sin embargo, el Biochar contiene más oxígeno e hidrógeno, compuestos que son obtenidos por medio de un procesamiento térmico de biomasa, llamado pirólisis. El Biochar se considera que posee componentes de carbono altamente recalcitrantes, lo que le ayuda a resistir

una oxidación tanto química como biológica, obteniendo un tiempo de residencia mayor que el de la materia orgánica del suelo. Al ser este material adicionado al suelo, este ayuda a actuar como un sumidero potencial de carbono, ayudando a mitigar el exceso de CO₂ en la atmosfera. Otros de las características que se han encontrado en los Biochar son un pH medio de 8,1 considerándolos como material básico, en la escala para este parámetro, en cuanto a su capacidad de intercambio catiónico este varía dependiendo de su química superficial y puede llegar a ser de 40 cmol Kg⁻¹, también presenta una mayor capacidad de adsorber aniones debido a su área superficial, su carga negativa y su densidad de carga, aunque su adsorción tiende a ser de compuestos con carga eléctrica positiva, este también retiene compuestos con carga negativa o comúnmente llamados aniones, esto debido a que en ocasiones la carga superficial del Biochar tiende a ser positiva. Con respecto a su composición física, el Biochar es un sólido carbonoso, de color negro, con superficie intrincada y desordenada, posee una alta porosidad, cuyos poros van de <2 nm, 2-5 m y >50nm y son llamados micro, meso y macro poros, respectivamente. (Postgraduados, 2013)

Ilustración 2. Beneficios del Biochar aplicado como un adsorbente efectivo para el tratamiento de aguas residuales



Fuente: (Tan et al., 2015)

El Biochar es un material sólido obtenido de la carbonización de la biomasa. Se puede agregar a los suelos con la intención de mejorar las funciones del suelo y reducir las emisiones de la biomasa que de otro modo se degradarían naturalmente a los gases de efecto invernadero. Biochar también tiene un valor apreciable de secuestro de carbono. Estas propiedades son mensurables y verificables en un esquema de caracterización, o en un protocolo de compensación de emisiones de carbono (Initiative, s.f.). Se produce por medio de se produce a través de pirólisis, proceso que calienta la biomasa en ausencia (o bajo reducción) de oxígeno. (International Biochar Initiative , 2006)

La producción de Biochar tiene su origen en la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica (pirólisis) de cualquier tipo de biomasa natural. Este tipo de combustión parcial ha sido utilizado de manera tradicional en España (artigueo, rozas, carboneras) para la obtención de cenizas, biomasa carbonizada y carbón vegetal que se utilizaban como abono de cultivos y fuente de energía (Mazoyer y Roudard, 1998, Major 2010 review). Actualmente, la industria destinada a la producción de gas sintético (syngas) y biocombustibles, que utiliza como materia prima biomasa natural, son las principales actividades productoras de Biochar. A menudo, se desecha el Biochar producido, pero la salida de esta material llega a ser totalmente distinta en el momento que es utilizado en el tratamiento de adsorción de diferentes tipos de contaminantes que se encuentran tanto en el medio suelo como en el recurso hídrico. Japón tiene el mercado más desarrollado en los subproductos de la pirólisis, pues aproximadamente 15000 t/año de Biochar son comercializadas para usos en el suelo (Paco Abenza, 2012)

7.1.3. Filtración

Es un proceso de separación de partículas sólidas de un líquido utilizando un material poroso. Tiene como objetivo separa partículas y microorganismos objetables, los cuales no han sido retenidos en procesos químicos, este proceso puede llevarse a cabo de diferentes maneras, entre ellas se

encuentran los filtros rápidos, filtros lentos, pastas arcillosas, papel de filtro, arena, antracita, entre otros. (Arboleda, 1992)

7.1.3.1.Filtración lenta

Este es un proceso de purificación del medio agua, este consiste en realizar una circulación del agua por medio de un lecho poroso de un medio filtrante, mejorando la calidad del agua reduciendo microorganismos como bacterias, virus, quistes, entre otros, material suspendido y materia coloidal. En esta técnica se genera una película biológica que ayuda a descomponer materia orgánica, mientras que por medio de acción física la materia orgánica en suspensión queda retenida. (Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental)

7.1.3.2.Filtros rápidos

Es un mecanismo parecido al de los filtros lentos mencionados anteriormente, tienen el mismo principio, en lo que se diferencian es en el tipo de carga superficial que, en ellos, la cual se refiere a la velocidad de sedimentación teórica, es este caso los filtros rápidos utilizan una carga superficial alta. En estos filtros se usa arena gruesa con granos a una escala de 0.4-1.2 mm, con un ritmo de filtración más alto, aproximadamente de $(120-360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día})$. (Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental)

7.1.4. Medios granulares

Son un conjunto de partículas macroscópicas que interaccionan entre sí mediante fuerzas de contacto. El tamaño de los granos que constituyen este tipo de materiales abarca desde milímetros hasta metros. Para el caso de la filtración los medios granulares más utilizados son la Arena con un tamaño de entre 0,35 y 0,07mm y Antracita con un tamaño efectivo de 0,70mm o mayor. (Romero Rojas, 2000)

La filtración depende de una combinación de mecanismos complejos tanto físicos como químicos y a su vez también depende de variables de diseño, las cuales son necesarias tener en cuenta a la hora de llevar a cabo la construcción de los diferentes tipos de filtros. (Romero Rojas, 2000)

Tabla 2. Variables principales diseño de filtros.

| Variables principales en el diseño de filtros | | |
|--|--|--|
| | Variable | Significado |
| Características del medio filtrante | Tamaño del grano | Afecta la eficiencia de remoción de partícula y el incremento en pérdida de carga |
| | Distribución granulométrica | |
| | Forma, densidad y composición del grano | |
| | Carga del medio | |
| | Porosidad del lecho filtrante | Determina de la cantidad de sólidos que pueden almacenarse en el filtro. |
| | Profundidad del lecho filtrante | Afecta la pérdida de carga y la duración de la carrera. |
| | Tasa de filtración | Determina el área requerida y la pérdida de carga. Afecta la calidad del efluente. |
| | Pérdida de carga disponible | Variable de diseño. |
| Características del afluente | Concentración de sólidos suspendidos | Afectan las características de remoción del filtro |
| | Tamaño y distribución del floc | |
| | Resistencia del floc | |
| | Carga eléctrica del floc | |
| | Propiedades del fluido. | |

Fuente: (Romero Rojas, 2000)

7.1.5. Mecanismos de remoción de un filtro

Los mecanismos generalmente son aquellos elementos que ayudan a transmitir o transformar fuerzas, en este caso en particular en el cual los filtros mantienen las fuerzas de las partículas removidas de la suspensión adheridas a las superficies de los granos del medio filtrante activadas en distancias pequeñas, los mecanismos de remoción de un filtro se pueden clasificar en dos, El mecanismo de transporte y el mecanismo de adherencia, complementándose uno al otro para poder llevar a cabo el proceso de filtración. (Willy & Escobar, 2001)

Tabla 3. Mecanismos de remoción en un filtro.

| <i>Mecánismo</i> | | <i>Descripción</i> |
|------------------------------|--------------------------------------|--|
| <i>Cribado</i> | Mecánico | Partículas más grandes que los poros del medio son retenidas mecánicamente |
| | Oportunidad de contacto | Partículas más pequeñas que los poros del medio son retenidas por oportunidad de contacto |
| <i>Sedimentación</i> | | Las partículas se sedimentan sobre el medio filtrante, dentro del filtro |
| <i>Impacto inercial</i> | | Las partículas pesadas no siguen las líneas de corriente |
| <i>Intersección</i> | | Muchas partículas que se mueven a lo largo de una línea de corriente son removidas cuando entran en contacto con la superficie del medio filtrante |
| <i>Adhesión</i> | | Las partículas floculentas se adhieren a la superficie del medio filtrante. Debido a la fuerza de arrastre del agua, algunas son arrastradas antes de adherirse fuertemente y empujadas más profundamente dentro del filtro. A medida que el lecho se taponan, la fuerza superficial aumenta hasta un límite para el cual no hay remoción adicional. |
| <i>Adsorción química</i> | Enlace de Interacción química | Una vez que una partícula ha entrado en contacto en la superficie del medio filtrante o con otras partículas, la adsorción, física y, o, química, permite su retención sobre dichas superficies. |
| | <i>Adsorción física</i> | Fuerzas electrostáticas Fuerzas electrocinéticas Fuerzas de Vander Waals |
| <i>Floculación</i> | | Partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes |
| <i>Crecimiento Biológico</i> | | Reducen el volumen del poro y puede promover la remoción de partículas. |

Fuente: (Romero Rojas, 2000)

7.1.6. Sistemas de filtración

El tratamiento de las aguas residuales es realizado con el propósito de evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica y radioactiva de los cursos y cuerpos de agua receptores. De un modo general, el tratamiento persigue evitar daños a los abastecimientos públicos, privados e industriales de suministro de agua, a las aguas destinadas a la recreación y el esparcimiento, a las actividades piscícolas, perjuicios a la agricultura y depreciación del valor de la tierra y el impacto

al entorno ecológico. A lo largo del tiempo se han diseñado y propuesto distintos sistemas de filtración, pero entre esos se ha llegado a realizar una clasificación de 5 aspectos, reflejados descritos a continuación. (Romero Rojas, 2000)

- **Dirección de flujo:** De acuerdo con la dirección de flujo, los filtros pueden ser flujo hacia abajo, hacia arriba, o de flujo dual.
- **Tipo de lecho filtrante:** Usualmente solo se utiliza un medio filtrante, la arena o la antracita, en un medio dual ambos y en un lecho mezclado, arena, antracita y granate.
- **Fuerza impulsora:** Con respecto a la fuerza impulsora que utiliza el medio filtrante para vencer la resistencia friccional, los filtros se pueden clasificar en dos, en filtro por gravedad el cual es el más usado en plantas de purificación y, en filtro a presión, usado en la filtración de aguas para piscinas.
- **Tasa de infiltración:** este aspecto se encuentra directamente relacionado con la carga hidráulica disponible y la resistencia del filtro.
- **Método de control de la tasa de filtración:** el control de la tasa de filtración se puede realizar por medio de 4 métodos: Pérdida de carga constante, filtración de tasa constante; Pérdida de carga variable, filtración de nivel constante; filtración con afluente igualmente distribuido y Pérdida de carga variable, nivel variable, tasa declinante con vertedero de control.

7.1.7. Retro lavado

El retro lavado o comúnmente llamado lavado a contracorriente de filtros se realiza regularmente con el fin de mantener la eficiencia del tratamiento de aguas residuales eliminando el exceso de biomasa y reduciendo la compactación de la cama del lecho filtrante. (Feng et al., 2017). Este es utilizado comúnmente en procesos de incrustación en ultrafiltración y micro filtración, al igual que

también se incorpora para la eliminación de exceso de lodo que hubiese podido quedar acumulado en filtros TDE-BAF al realizar un tratamiento de aguas junto con procesos que incluyan punción de aire. Como todo mecanismo este tiene sus ventajas y desventajas, entre ellas se encuentran que mejora el flujo de permeado disminuyendo el ensuciamiento de poro interno del lecho filtrante y es considerado menos eficiente, a la hora de compararlo con una limpieza química o una sonicación. Este lavado a contracorriente tiene como función a la hora de aplicarlo en filtros, es ayudar a comprobar la desorción que posee el Biochar en cuanto a la retención de aniones y a su vez poder comprobar la vida útil de este medio, al utilizarlo como medio de adsorción de contaminantes en aguas residuales. (Akhondi et al., 2017)

7.1.8. Filtros con retro lavado

El lavado de filtros consiste, en hacer pasar agua ascensionalmente a través del lecho filtrante a una velocidad en la cual los granos de los lechos se fluidicen a través de un flujo ascensional, limpiándose los depósitos del contaminante retenido en los granos, por medio de frote de uno contra otros. La fluidización es un proceso que consiste en la suspensión de pequeñas partículas sólidas por una corriente de un fluido que se dirige de abajo hacia arriba venciendo el peso de las mismas. Este proceso contiene diferentes tipos de regímenes, que corresponden a burbujeante, de burbujas grandes y turbulento; estos son generados por diferentes factores que se producen en las partículas de los lechos filtrantes, como: el tamaño de la partícula y densidad, presión y temperatura, velocidad de fluidización, profundidad del lecho, diámetro de lecho y construcción de la rejilla que alimenta el fluido. (Fan, 1989)

7.1.9. Sistemas adsorbentes

En estos sistemas de adsorción el material adsorbido es retenido físicamente sin demasiada fuerza y puede ser liberado (desorbido) de manera relativamente fácil ya sea por calor o al vacío. Por

medio de estos sistemas de adsorción es posible llevar a cabo el tratamiento de aguas contaminadas, por medio del uso de medios que posean una superficie porosa, entre estos se encuentran, las zeolitas, polímeros adsorbentes y el más usado de todos es el carbón activado el cual es obtenido del carbón mineral, la madera, la corteza de un árbol, entre otros; por medio de un proceso térmico llamado pirólisis lenta el cual se realiza a temperaturas relativamente bajas.

Existen dos sistemas de adsorción que, a comparación de los anteriormente mencionados, no son tan utilizados estos son, el tratamiento por alúmina activada y el intercambio iónico. El primero de estos se usa esencialmente para la atracción y eliminación de contaminantes que posean iones con carga negativa, es decir, los comúnmente llamados aniones, este sistema posee no solo grandes costos de implementación, sino que, también posee altos costos de mantenimiento, lo que hace que la accesibilidad a este sea muy escasa. El segundo sistema ayuda a eliminar específicamente contaminantes inorgánicos solubles que se encuentran cargados, algunos de estos son el arsénico, cromo, nitratos, radio, uranio y el fluoruro en exceso, el intercambio iónico funciona por medio de un intercambio de estos iones por iones inocuos cargados en la superficie de la resina que es utilizada en el proceso de adsorción. (EPA, 1999)

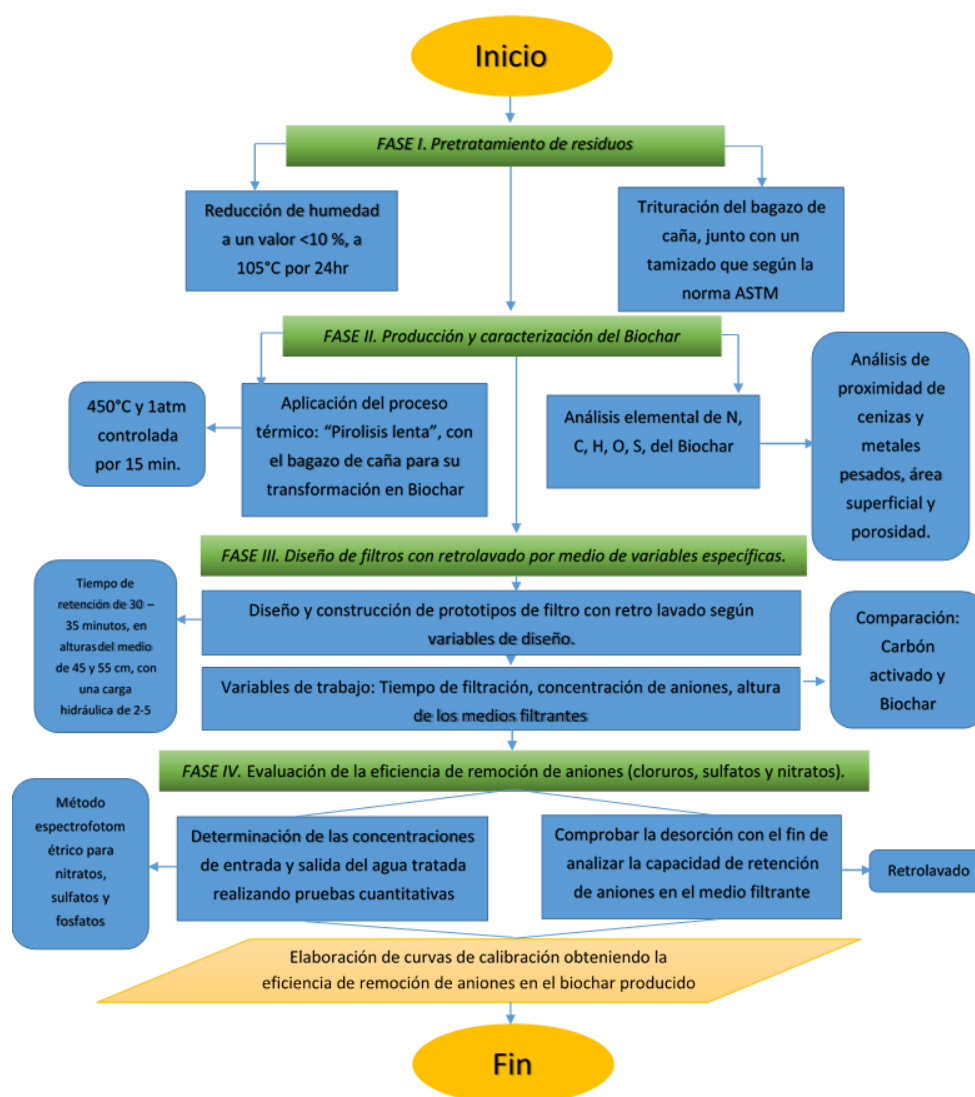
El mecanismo de adsorción del Biochar se comporta de manera diferente dependiendo del tipo de contaminante que se esté tratando o que se quiera retener, es decir si son metales pesados, contaminantes orgánicos, entre otros. Se consideran diferentes ya que estos mecanismos están correlacionados con las propiedades de los contaminantes. Aparte de estos, el mecanismo de adsorción también puede depender de las diversas propiedades del Biochar, incluyendo grupos funcionales de superficie, área superficial específica, estructura porosa y componentes minerales. En estudios anteriormente realizados se determinó que los mecanismos de adsorción del Biochar como lo son, la atracción electrostática, el intercambio iónico, la adsorción física y el enlace químico son aquellos mecanismos predominantemente responsables de la unión de los

contaminantes del agua con las partículas del medio filtrante en este caso el Biochar. (Tan et al., 2015)

8. DESARROLLO METODOLÓGICO

Con el fin de darle desarrollo al proyecto se implementó una metodología con diferentes procedimientos con el fin de evaluar la eficiencia del Biochar producido a partir del bagazo de caña como medio filtrante para la remoción de compuestos aniónicos como lo son los nitratos, sulfatos y fosfatos. La metodología desarrollada cuenta con cuatro fases, en las cuales se realizaron diferentes actividades, como se muestra a continuación: (Ver Ilustración 3).

Ilustración 3. Diagrama de flujo de la metodología planteada para la realización del proyecto.



Fuente: Autores

8.1. Pre tratamiento de residuos

En esta fase se llevó a cabo el tratamiento de secado y trituración al bagazo de caña para la elaboración del Biochar, con el fin de preparar la materia prima a las condiciones adecuadas para la obtención de un buen producto, con el cual se realizaron las pruebas experimentales del proyecto.

8.1.1. Recolección y selección de materia prima

Como primera actividad fue necesario realizar una recolección y selección del material mediante un muestreo simple aleatorio en el municipio de Jamundí, puntualmente en un puesto de venta de jugo de caña, permitiendo así que la heterogeneidad y la diversidad del tamaño de los residuos sea totalmente mezclado para la posterior realización de un cuarteo uniforme, obteniendo así una muestra representativa y manejable que servirá de biomasa para la realización del Biochar.

8.1.2. Determinación de humedad

Se llevó a cabo la determinación de humedad del bagazo de caña a un valor $<10\%$, para esto se utilizó un método gravimétrico en donde se pusieron cinco gramos (5g) del bagazo en una capsula de porcelana previamente secada en una mufla a 110°C en un tiempo de 1 hora. Esta capsula se ingresó a una estufa para secar el bagazo a una temperatura de 105°C durante 24 horas, transcurrido el tiempo, se dejó enfriar la capsula para previamente obtener por medio de una balanza analítica el peso final. (American Society for Testing And Materials, 1898)

8.1.3. Acondicionamiento del bagazo de caña

Fue necesario generar una trituración manual del bagazo de caña, con el fin de que al momento de llevar a cabo el proceso térmico se obtuviera un tamaño de poro aproximadamente de entre 200 a 300 μm .

8.2. Producción y caracterización del Biochar

En esta fase se elaboró la transformación del bagazo de caña en Biochar a la cual se le realizará una caracterización detallada.

8.2.1. Producción de Biochar

Para la producción del Biochar se empleó el proceso térmico llamado pirólisis lenta en una mufla Vulcan A-550, con atmósfera controlada a una temperatura de 450°C en un tiempo de 15 minutos, además de las condiciones necesarias para este proceso, se tuvieron a la vez en cuenta parámetros como la densidad del material y peso total del Biochar a utilizar como lecho filtrante en los filtros pilotos. En total se realizaron 66 procesos, en los cuales se tomaron aproximadamente 200 g de bagazo de caña y se hicieron pasar por la mufla para su transformación por pirólisis lenta; posteriormente el material obtenido fue puesto en un desecador hasta enfriar completamente, para ser pesado y almacenado en bolsas ziploc.

8.2.2. Tamizado de Biochar

Una vez el Biocarbón producido fue obtenido se desarrolló un análisis granulométrico para tener homogeneidad en el tamaño de partícula que iba a ser utilizada en los filtros. Para obtener la distribución de tamaños, se emplearon tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

Tabla 4. Tamiz de Ensayo Estándar Americano.

| <i>Descripción</i> | <i>Diámetro</i> | <i>N°</i> | <i>Luz</i> |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|------------|
| <i>Tamices Norma ASTM E - 11/95</i> | 8" | ¼" | 6,30mm |
| <i>Tamices Norma ASTM E - 11/95</i> | 8" | 10 | 2,00mm |

| | | | |
|-------------------------------------|----|-----|---------|
| <i>Tamices Norma ASTM E - 11/95</i> | 8" | 20 | 0,850mm |
| <i>Tamices Norma ASTM E - 11/95</i> | 8" | 40 | 0,425mm |
| <i>Tamices Norma ASTM E - 11/95</i> | 8" | 60 | 0,250mm |
| <i>Tamices Norma ASTM E - 11/95</i> | 8" | 200 | 0,075mm |
| <i>Tamices Norma ASTM E - 11/95</i> | 8" | 400 | 0,038 |

Fuente: DIRIMPEX.

8.2.3. Caracterización

Gracias al estudio realizado por (Martínez Villalba & Bohórquez León, 2017), el análisis elemental de carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y azufre obtenido es el mismo para el Biochar producido en esta investigación, ya que la producción de biomasa a partir de bagazo de caña siguió la metodología y utilizó la misma materia prima de elaboración de Biochar, referenciada en la monografía “Evaluación del uso de Biochar producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para retención de fenoles en agua residual”.

El análisis próximo de cenizas y metales volátiles del Biocarbón se tomó como dato teórico proporcionado en el estudio de (Vacca et al., 2012), el cual realizó en porcentaje de Cenizas siguiendo la metodología de la norma ASTM D2866-94 de Biochar producido a partir de bagazo de caña a una temperatura de pirólisis 500 °C durante una hora. Finalmente para el cálculo del área superficial, se aplicó la metodología descrita por (McCabe, Smith, & Harriott, 1991) para determinar área superficial a través de ecuación del método de tamaño de partícula.

8.3. Diseño de filtros con retro lavado por medio de parámetros de diseño y variables experimentales.

En esta fase se diseñaron y construyeron dos prototipos de filtro con retro lavado según parámetros establecidos que garantizaran un tiempo de retención de 30-35 minutos a partir de alturas del medio de 45 y 55 cm y una carga hidráulica de 2 a 5 m³/m²h; de estos parámetros se partió para establecer las variables experimentales de diseño tales como caudal, área y altura total del filtro y tiempo de retención del medio (Romero, 2000); para facilidad en la construcción de los filtros se estableció un diámetro de 0,10 m, una medida encontrada en tubería pvc sanitaria de cuatro pulgadas (4"). Para esto, se formula la tabla N°4, en la cual se establecen los valores de parámetros anteriormente descritos y se hace el cálculo respectivo de las demás variables a partir de las siguientes ecuaciones matemáticas.

Tabla 5 Variables utilizadas para el diseño de filtros con retro lavado

| Diseño de filtros | | | | |
|-------------------------|------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Parámetro | Convención | Unidad | Valores para altura de 45 cm | Valores para altura de 55 cm |
| Caudal | Q | L/h | | |
| | | L/s | | |
| | | m ³ /h | | |
| Velocidad de Filtración | Vf | m ³ /m ² *h | 2,000 | 2,000 |
| Area | A | m ² | | |
| Diametro | D | m | 0,100 | 0,100 |
| Altura Carbon | ha | m | 0,45 | 0,55 |
| Altura Fondo | hf | m | 0,08 | 0,08 |
| Altura 1/2 | H | m | | |
| Altura Total | HT | m | | |
| Volumen | V | m ³ | | |
| Tiempo de Retención | Tr | minutos | | |

Fuente: Autoras 2018

A partir del diámetro de 10 cm, se calculó el área correspondiente del filtro

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

Ya que se estableció una velocidad de filtración, se prosiguió a calcular el caudal de agua correspondiente, así:

$$Q = v * A$$

Para conocer la altura del filtro, se determinó a partir de la suma de altura del medio junto con la altura de fondo, conocido como falso fondo, cuya función se basa en dejar espacio en la parte inferior del filtro que recoge toda el agua de filtrado de manera uniforme y que al realizar retro lavado permite distribuir el agua de lavado con una presión uniforme, el cual se le dio un valor de 8 cm. Es decir que la altura total (h_T), se estimó así:

$$h_M + h_F = h_{1/2}$$

$$h_T = 2(h_{1/2})$$

Es importante recalcar, que las alturas del medio establecidas inicialmente para el proyecto eran de 25 y 30 cm, las cuales ya habían sido evaluadas con el mismo medio y cumplían con el tiempo de retención requerido, sin embargo por la estructura y dimensionamiento de los filtros realizados en este estudio y para un buen cumplimiento del tiempo de retención, los cálculos de diseño dieron como resultado un aumento en las alturas a valores de 45 y 55 cm para cumplir con el rango de tiempo de 20 a 30 minutos que permitiera un contacto óptimo entre el Biochar y el agua contaminada.

Finalmente, para el cálculo del volumen total del filtro y el tiempo de retención del medio, se emplearon las ecuaciones

$$V = A * h_T$$

$$t_R = \frac{V}{Q}$$

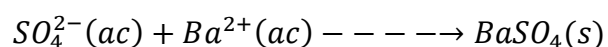
Los filtros se construyeron con dos tuberías sanitarias de 4" las cuales se cortaron a la altura respectiva, sin embargo, para la altura de falso fondo se cortó esta tubería a los 8 cm, se instaló una malla más pequeña del tamaño de poro del Biochar y se empleó una unión de la respectiva tubería para realizar el acople total de filtro. Uno de estos filtros fue evaluado con carbón activado y el otro con Biochar como medios filtrantes, para evaluar de los dos las eficiencias de remoción de los compuestos aniónicos.

8.4. Evaluación de la eficiencia de remoción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos)

Para calcular la eficiencia de la remoción de aniones fue necesario generar como primera medida una curva de calibración para sulfatos y nitratos, los cuales se midieron a través de métodos espectrofotométricos con el espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYSTM 5. Mientras que para la medición del anión fosfato se realizó por medio del espectrofotómetro HACH DR 3800.

8.4.1. Curva de calibración de sulfatos.

Esta se llevó a través del método espectrofotométrico UV que se basa en la precipitación del ion sulfato en forma coloidal en un método acético con cloruro de bario, creando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme, como se muestra en la siguiente ecuación (America, 2017):



Para llevar a cabo esta metodología es necesario preparar las siguientes disoluciones:

- Disolución acondicionadora: en un beaker de 500 ml es necesario adicionar 12 ml de HCl concentrado, 120 mL de agua destilada, 40 mL de alcohol etílico y 30 g de NaCl, homogenizar la mezcla y por último agregar 20 mL de glicerina.

- Disolución Stock de SO_4^{2-} : pesar en una balanza analítica 0,1479g de Na_2SO_4 anhídrido y disolver en 50 mL de agua des ionizada en un beaker, diluir en un balón aforado de 1000 mL hasta el aforo, y homogenizar.

El siguiente paso es preparar los patrones con los cuales se elabora la curva de calibración, para esto es necesario adicionar a un Erlenmeyer 10 mL de la disolución stock en diferentes concentraciones (5, 20, 40, 50, 200, 300 ppm), 1 mL de la disolución acondicionadora, 0,5g de cloruro de bario, y agitar en una plancha de agitación magnética durante 2 minutos. Una vez preparados los patrones, se genera la medición de cada uno de los patrones en celdas, a una longitud de onda de 420 nm en el espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYSTM 5. De este mismo modo se prepara el blanco y cada una de las muestras a analizar. (America, 2017)

Para realizar la curva de calibración se tomaron las concentraciones de los patrones como eje x y la absorbancia como eje y, una vez generada la curva de calibración se calcula la concentración de sulfatos en mg/L.

8.4.2. Curva de calibración de nitratos.

Para esta curva de calibración se utilizó el método de espectrofotometría UV, la cual mide la absorbancia del anión nitrato a una longitud de onda de 220 nm y ayuda a la rápida determinación de NO_3^- en el monitoreo de aguas, obedeciendo la ley de Beer entre 0.03 y 5 mg NO_3^- - N/L. para realizar esta metodología es necesario preparar:

- Solución patrón de nitrato: Es necesario dejar secar Nitrato de sodio $NaNO_3$ al 99% a una temperatura de 105 °C durante 24h, disolver 0,1805 de este en 250mL de agua destilada, y preservar con 0,5 mL de $CHCl_3$ /L. (Elena & Solano, n.d.)

- Solución intermedia de nitrato: Se deben diluir 100 mL de la solución patrón de nitrato en un balón aforado de 1000 mL con agua destilada.

Después de generar las soluciones anteriores se deben preparar los patrones, el blanco y la muestra de la siguiente manera. Para esto es necesario 9 mL de patrón, agua destilada o muestra, 1 mL de agua destilada, 1 mL de HCl, después de preparar la mezcla es posible realizar la medición en celdas de cuarzo, a una longitud de onda de 220 nm en el espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYSTM 5. (Elena & Solano, n.d.)

Para realizar la curva de calibración se tomaron las concentraciones de los patrones como eje x y la absorbancia como eje y, una vez generada la curva de calibración se calcula la concentración de nitratos en mg/L.

8.4.3. Metodología para fosfatos

Para medir las concentraciones de fosfatos en las muestras obtenidas, se llevó a cabo el método 8048 de la USEPA Phosphorus, Reactive (Orthophosphate) con un espectrofotómetro HACH DR3800, el cual mide concentraciones entre 0,02 a 2,50 mg/L PO_4^{3-} . A continuación, se encuentra la metodología realizada (Ascorbic & Method, 1900) o ver Anexo 1. Método HACH para la determinación de fosfatos.:

- Prender el espectrofotómetro y seleccionar el programa 490 P React. PV
- Agregar 10 ml de la muestra a una celda HACH
- Adicionar el contenido del sobre con el reactivo PhosVer 3 phosphate y agitar vigorosamente por 30 segundos.
- Esperar 2 minutos para que reaccione el reactivo.
- Preparar el blanco en otra celda HACH adicionar 10 mL de la muestra.

- Limpiar la celda e introducir en el espectrofotómetro.
- Seleccionar la opción Zero.
- Después de transcurrido el tiempo de reacción, limpiar la celda y medir la concentración.
- Los resultados se muestran en mg/L PO_4^{3-}

8.4.4. Obtención de eficiencias

Se elaboraron aguas potenciadas con concentraciones de entrada de 400 ppm para los contaminantes aniónicos fosfatos y nitratos y una concentración de entrada de 436 ppm para el contaminante aniónico sulfato, para cada uno de los contaminantes se prepararon 8 litros con las concentraciones correspondientes, y de estos fueron filtrados solo 5 litros a través de los filtros construidos, ya que las bombas con las que fue impulsada el agua requerían de tres 3 litros adicionales para mantenerse sumergida y evitar daños en ellas. En primera instancia el volumen de agua fue impactado con cada uno de los aniones, en este caso, sulfatos, nitratos y fosfatos, respectivamente, en seguida se filtraron los 5 litros de cada una de las mezclas en los filtros construidos y con las diferentes alturas establecidas, en este caso 45 y 55 cm, se recolectaron 3 muestras, la primera muestra se tomó una vez filtrado 1 litro, la segunda muestra en los 2,5 litros filtrados y la otra al haberse filtrados los 5 litros, también se tomó una muestra del agua filtrada total, a cada una de estas muestras se les determino midió la absorbancia por espectrofotometría para el análisis de nitratos, fosfatos y sulfatos. Además, se determinarán las concentraciones por medio de la ecuación de la recta de las curvas de calibración, con los datos de absorbancia obtenidas en los laboratorios, y a su vez se realizarán los respectivos cálculos para obtener las eficiencias de remoción de aniones en el Biochar producido.

Adicionalmente, se realizó una mezcla de agua con concentración de 436 ppm de sulfatos y concentración de 400 ppm de nitratos y fosfatos, la cual se filtró con el fin de determinar si existe alguna afinidad de retención del medio filtrante por alguno de estos tres aniones.

Es imponte mencionar que para las muestras de fosfatos fue necesario realizar una dilución 1:8, ya que el método de medición por el espectrofotómetro HACH DR3800 posee un rango de medida entre 0,02 a 2,5 mg/l de PO_4^{3-} , es así como a los valores de concentraciones se les multiplico por 8 para obtener el valor real.

8.4.5. Desorción

Se comprobó la desorción mediante el retro lavado con el fin de analizar la capacidad de retención de aniones en el medio filtrante (Biochar). Para realizar la desorción de aniones se hicieron pasar 8 litros de agua en forma ascendente por cada uno de los filtros; el agua se impulsó a través de bombas de agua sumergibles con una potencia de 17W y un caudal de 800 L/h que supera el caudal de entrada y de esta manera garantiza una fluidización completa del medio, pasado el tiempo de retro lavado se tomaron dos muestras de 10 ml para ser analizadas mediante , a la mitad del proceso y una vez pasaran 5 litros de agua; se efectuaron filtraciones al vacío para no presentar interferencias y se calcularon la concentraciones de nitratos, sulfatos y fosfatos por los métodos anteriormente descritos. El procedimiento de hacer pasar 5 litros de agua se ejecutó con el fin de que la muestra final tuviera una mínima concentración de los aniones ya retenidos, asegurando así la máxima desorción y limpieza completa de cada anión en el Biochar.

9. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del proyecto se presentan según cada una de las cuatro fases metodológicas aplicadas al proyecto.

9.1. Pre tratamiento de residuos

9.1.1. Recolección y selección del material

Los residuos de bagazo de caña para la producción de los Biochar se seleccionaron mediante un esparcimiento y mezcla total del material como se muestra en la imagen 1, en donde posteriormente se toman muestras de manera aleatoria asegurando que toda la cantidad de residuos sean reunidos para un cuarteo uniforme, de donde se tomaron muestras representativas de 200 g cada una. La recolección de la Biomasa se realizó en un punto de venta de jugo de caña de azúcar ubicado en Jamundí, Valle del Cauca, en donde se adquirieron 2 bultos de bagazo de caña.

Ilustración 4 Recolección, separación y selección de bagazo de caña.



Fuente: Autores

9.1.2. Caracterización del bagazo de caña

El análisis elemental de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre se tomó a partir de datos teóricos extraídos del estudio “Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal” , con el

fin de comparar las propiedades elementales de la materia prima antes y después de transformada, los resultados que se obtuvieron en este estudio fueron los siguientes:

Tabla 6. Análisis elemental del bagazo de caña

Análisis elemental del bagazo de caña

| <i>Numero de muestras</i> | <i>Porcentaje (%) de elementos</i> | | | | |
|---------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| | <i>Carbono (C)</i> | <i>Hidrógeno (H)</i> | <i>Oxígeno (O)</i> | <i>Nitrógeno (N)</i> | <i>Azufre (S)</i> |
| <i>1</i> | 42,9500 | 5,5643 | 51,2564 | 0,2293 | 0 |
| <i>2</i> | 39,8883 | 5,1552 | 54,7289 | 0,2259 | 0 |
| <i>3</i> | 43,8004 | 5,7042 | 50,2678 | 0,2276 | 0 |
| <i>Promedio</i> | 42,2129 | 5,4746 | 52,0844 | 0,2276 | 0 |

Fuente: (Manals-cutiño, Penedo-medina, & Salas-tort, 2015)

En cuanto al análisis próximo de cenizas y material volátil, el autor cita el estudio de (Asadullah et al., 2007) quien obtuvo biocombustibles a partir del bagazo de caña producido por pirólisis en un rango de temperatura de (300°C a 600°C), y que realizo un análisis previo al bagazo de caña, con los resultados presentes a continuación.

Tabla 7. Análisis próximo del bagazo de caña

| <i>Parámetro</i> | <i>Valor</i> |
|------------------------|--------------|
| <i>Humedad (%)</i> | 7,6 * |
| <i>Densidad (g/cc)</i> | 0,12 |
| <i>Volátil (%)</i> | 68 – 70 |
| <i>Cenizas (%)</i> | 1,26 |
| <i>Carbón fijo (%)</i> | 28,7 – 30,7 |

Fuente: (Manals-cutiño et al., 2015).

**La humedad del bagazo de caña fue hallada por los autores por el procedimiento descrito en este documento.*

9.1.3. Determinación de humedad del bagazo de caña

La humedad es una de las variables consideradas a la hora de llevar a cabo el proceso térmico, la pirólisis lenta, ya que es necesario que la biomasa a tratar tenga una humedad inferior al 10%, es por esto que fue necesario hallar el valor de la humedad de la materia prima a usar, según la norma ASTM C566 (ASTM International, 2004), para esto fue necesario tener en cuenta el valor inicial de la capsula sin el bagazo de caña a disponer en la estufa a 105°C, el valor final de la capsula después de pasadas 24 h y la cantidad de bagazo puesto en la capsula, como se muestra a continuación:

Tabla 8. Pesos necesarios para la determinación de humedad del bagazo de caña

| <i>Pesos</i> | <i>Valor</i> | <i>Variables</i> |
|--|--------------|------------------|
| <i>Peso de la capsula</i> | 87,17 | W_C |
| <i>Peso de la capsula con bagazo de caña</i> | 92,17 | |
| <i>Peso del bagazo de caña</i> | 5 | W_{Bg} |
| <i>Peso final de la capsula con bagazo de caña</i> | 91,7871 | W_{Cf} |

Fuente: Autores

Ilustración 5 Bagazo de caña para obtención de humedad.



Fuente: Autores.

Ilustración 6. Peso final de Bagazo de Caña.



Fuente: Autores

Con estos datos se buscó hallar el peso final del bagazo ingresado, para esto se utiliza la siguiente ecuación

$$W_{bf} = W_{cf} - W_{ci}$$

Reemplazando los valores y teniendo en cuenta que W_{bf} hace referencia a el peso del bagazo al finalizar el proceso de secado, a las condiciones de temperatura y tiempo ya mencionadas, se obtiene:

$$W_{bf} = 91,7871 \text{ g} - 87,17 \text{ g}$$

$$W_{bf} = 4,6171 \text{ g}$$

Con este valor ya hallado, se procedió a calcular la humedad con la siguiente ecuación:

$$H(g) = W_{bi} - W_{bf}$$

$$H(g) = 5 \text{ g} - 4,6171 \text{ g}$$

$$H(g) = 0,3829 \text{ g}$$

Teniendo en cuenta el valor de humedad en gramos, se procedió a hallar el porcentaje de humedad el cual corresponde a:

$$H\% = \frac{H(g) * 100}{W_{bi}}$$

$$H\% = \frac{0,3829 \text{ g} * 100}{5 \text{ g}}$$

$$H\% = 7,658 \%$$

Se determinó que el porcentaje de humedad que corresponde a 7,658% es inferior a 10%, no era necesario llevar a cabo ningún proceso de secado previo a la biomasa a utilizar en la producción del Biochar, ya que se encuentra en el rango adecuado para poder llevar a cabo el proceso térmico, permitiendo un mayor rendimiento a la hora de la producción, sin que este se vea afectado en su elaboración.

9.2. Producción y caracterización de Biochar

9.2.1. Producción de Biochar

Para la producción del Biochar, se priorizo la cantidad de material carbonoso necesario para cumplimiento de las alturas y las dimensiones presentes en los filtros piloto, la cual se estimó a partir del volumen necesario a ocupar y la densidad del lecho filtrante, dando como resultado alrededor de 300 gramos para una altura de 45 cm y alrededor de 350 g para una altura de 55 cm, por lo que el total de Biochar necesario a producir se aproximó a 400 g, sin embargo se elaboraron 1.7 kg de Biochar a partir de aproximadamente 120 kg de bagazo de caña que se seleccionaron y recolectaron. Para obtener el dato del rendimiento de Biochar producido por cada proceso de

pirólisis realizado se realizaron tres pruebas, de las cuales se pesó la cápsula vacía (W_C), la capsula con el bagazo agregado (W_{Bg}) y de la capsula Biochar (W_B), una vez obtenidos estos datos se calculó el total de gramos de Biochar (B) producidos con la siguiente ecuación

$$\text{Biochar } (B) = W_B - W_C$$

Teniendo en cuenta que la cantidad exacta de bagazo de caña es

$$Bg = W_{Bg} - W_C$$

Junto con esto, se calculó el rendimiento con

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{B(g)}{Bg(g)} \times 100$$

Obteniendo los siguientes resultados

Tabla 9. Producción de Biochar

| PRUEBA | W_C (g) | W_B (g) | W_B (g) | BG (g) | B (g) | RENDIMIENTO (%) |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| 1 | 260,20 | 290,90 | 267,41 | 30 | 7,21 | 24,03 |
| 2 | 288,78 | 328,85 | 297,31 | 40,07 | 8,53 | 21,28 |
| 3 | 315,48 | 365,58 | 326,78 | 50 | 11,3 | 22,6 |

Fuente: Autores.

Ya que la cantidad necesaria para el proyecto era más grande, los siguientes 66 procedimientos se realizaron colocando una cantidad aproximada de 200 g de bagazo de caña para la obtención de 40-50 g de Biochar cada 15 minutos, dando una proporción de 160 gramos cada hora.

Ilustración 7. Transformación térmica de Bagazo de caña a Biochar



Fuente: Autores

Ilustración 8 Secado y almacenaje de Biochar.



Fuente: Autores

9.2.2. Tamizado del Biochar

Al realizar el tamizado del Biochar producido, se obtuvieron los siguientes pesos según el tamaño de partícula.

Tabla 10. Tamizado y pesaje de Biochar

| <i>N° de Tamiz</i> | <i>Diámetro de la partícula (mm)</i> | <i>Masa retenida (g)</i> |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| <i>¼"</i> | <i>6,30mm</i> | <i>345,02</i> |
| <i>10</i> | <i>2,00mm</i> | <i>506,47</i> |
| <i>20</i> | <i>0,850mm</i> | <i>108,93</i> |
| <i>40</i> | <i>0,425mm</i> | <i>43,06</i> |
| <i>60</i> | <i>0,250mm</i> | <i>544,34</i> |
| <i>200</i> | <i>0,075mm</i> | <i>81,35</i> |
| <i>400</i> | <i>0,038</i> | <i>45,70</i> |
| <i>Plato</i> | <i>-</i> | <i>30,25</i> |
| | <i>Total</i> | <i>1705,12</i> |

Fuente: Autores.

A partir de los pesos obtenidos se decidió utilizar el Biocarbón con tamaño de partícula de 6,30 mm, 2,00 mm y 0,250 mm, ya que fueron los de mayor proporción en cuanto a cantidad de material pues sus pesos son los necesarios para los filtros pilotos diseñados.

Ilustración 9 Proceso de tamizado del Biochar



Fuente: Autores

9.2.3. Caracterización del Biochar elaborado a partir del bagazo de caña

Para la caracterización elemental del Biochar elaborado a partir del bagazo de caña, se tomaron datos teóricos, en base a otro estudio titulado “Evaluación del uso de Biochar producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para retención de fenoles en agua residual”, realizado con el mismo tipo de biomasa y las condiciones de pirólisis lenta aquí presentadas, los datos obtenidos fueron:

Tabla 11. Análisis elemental del Biochar producido

Análisis elemental

| <i>Parámetro</i> | Valores base húmeda (%) |
|----------------------|-------------------------|
| <i>Carbono (C)</i> | 75,34 |
| <i>Hidrógeno (H)</i> | 4,50 |
| <i>Oxígeno (O)</i> | 13,48 |
| <i>Nitrógeno (N)</i> | 0,48 |
| <i>Azufre (S)</i> | 0,16 |

Fuente: (Martínez Villalba & Bohórquez León, 2017)

Para el análisis próximo se tomaron datos teóricos de Biochar producido a partir de bagazo de caña a una temperatura de pirólisis 500 °C durante una hora según el estudio realizado por (Vacca et al., 2012), en donde se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 12. Resultados análisis próximo de Biochar producido a partir de bagazo de caña y carbón activado comercial.

| <i>Parámetro</i> | <i>Biochar a partir de Bagazo de caña</i> | <i>Carbón activado de hulla bituminosa*</i> |
|------------------------|---|---|
| <i>Humedad (%)</i> | 2,7 | 3 |
| <i>Densidad (g/cc)</i> | 0,087* | 0,52 |

| | | |
|--|--------|-----|
| Cenizas (%) | 17,5 | 4 |
| Volátil (%) | 22,3 | - |
| Volumen total de poros (cm ³ /g) | 1440 | 0,8 |
| Área superficial (m ² /g) | 249,8* | 950 |

Fuente: (Vacca et al., 2012).

*Nota: * La densidad del Biochar fue hallada experimentalmente en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad de La Salle. El valor del área superficial aquí descrito es hallado en el siguiente ítem de esta investigación mediante la ecuación de tamaño de partícula. Es importante resaltar que los parámetros de carbón activado no son los presentes en la referencia mencionada, sino que son obtenidos de la tabla de propiedades técnicas (Anexo 2. Propiedades técnicas del carbón activado de hulla bituminosa 800) del carbón comercial que se adquirió para la finalidad de filtración de aguas.*

9.2.3.1. Cálculo del área superficial del Biochar

Después del análisis granulométrico realizado en el Biochar, se efectuó el cálculo del área superficial del material a través de la aplicación de la metodología descrita por (McCabe et al., 1991), usando la siguiente ecuación:

$$A = \frac{6m}{\Phi_s \rho_p D_p}$$

Donde

A: área superficial

M: masa total

ρ_p : densidad de las partículas

Φ_s^* : factor de esfericidad de las partículas

D_p : Diámetro de la partícula

Nota: * Como el factor de esfericidad varia de 0,6 a 0,8, se tomó un valor de referencia de 0,6 para el carbón ya que proviene de un material triturado (McCabe et al., 1991).

En los resultados de tamizado la mayor cantidad de Biochar obtenido hace parte de un tamaño de partícula de 250 μm , este es el valor de diámetro de partícula tomado para el cálculo del área superficial de este material.

Entonces el Área superficial para el Biochar fue:

$$A_w = \frac{6 * (544,34\text{g})}{(0,6) * \left(0,08714 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) * (0,025\text{cm})} = 2.498.691,76 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

Para calcular el dato de área superficial en unidades del sistema internacional se multiplica en 0,0001 para pasar a unidades de $\frac{\text{m}^2}{\text{g}}$

$$A_w = 2.498.691,76 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} * \left(\frac{0,0001 \text{ m}^2}{1 \text{ cm}^2}\right) = 249,8 \frac{\text{m}^2}{\text{g}}$$

9.3. Diseño de filtros con retro lavado por medio de parámetros de diseño y variables experimentales.

9.3.1. Dimensionamiento y Construcción de filtros piloto

Una vez establecidos como parámetros de diseño la velocidad de filtración, el diámetro del filtro, las alturas en las que se pasaría el agua y el lapso que debe cumplir el contacto del agua con el Biochar, se inició calculando el área del filtro con

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

$$A = \pi \left(\frac{0,10m}{2} \right)^2$$

$$A = 0,00785m^2$$

Una vez calculada el área se estableció el caudal que debía pasar por los filtros, teniendo en cuenta que la velocidad de filtración se fijó como $2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ el caudal es

$$Q = v * A$$

$$Q = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2\text{h}} * 0,00785m^2$$

$$Q = 0,0157 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Como la altura de fondo se estableció de 0,08 m y las alturas del medio se establecieron de 0,45 m y 0,55 m, una muestra del cálculo para la altura media a partir de la altura del lecho de 0,45 m debe ser:

$$h_M + h_F = h_{1/2}$$

$$h_{\frac{1}{2}} = 0,08m + 0,45m$$

$$h_{\frac{1}{2}} = 0,53m$$

Para obtener la altura total del filtro, se empleó la ecuación:

$$h_T = 2(h_{1/2})$$

$$h_T = 2(0,53m) = 1,06m$$

Finalmente, para hallar el volumen total del filtro se tiene que:

$$V = A * h_T$$

$$V = 0,00785m^2 * 0,53m = 0,008m^3$$

Con el fin de comprobar el tiempo de retención, se realizó el cálculo con:

$$t_R = \frac{V}{Q}$$

$$t_R = \frac{0,008m^3}{0,0157 \frac{m^3}{h}} = 0,509 h * \frac{60 min}{1 h}$$

$$t_R = 31,8 min$$

Tabla 13. Dimensionamiento filtros piloto para las pruebas de eficiencia de remoción de aniones.

| Diseño de filtros | | | | |
|-------------------------|------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Parámetro | Convención | Unidad | Valores para altura de 45 cm | Valores para altura de 55 cm |
| Caudal | Q | L/h | 15,708 | 15,708 |
| | | L/s | 0,004 | 0,004 |
| | | m ³ /h | 0,016 | 0,016 |
| Velocidad de Filtración | Vf | m ³ /m ² *h | 2,000 | 2,000 |
| Area | A | m ² | 0,00785 | 0,00785 |
| Diametro | D | m | 0,100 | 0,100 |
| Altura Carbon | ha | m | 0,45 | 0,55 |
| Altura Fondo | hf | m | 0,08 | 0,08 |
| Altura 1/2 | H | m | 0,53 | 0,63 |
| Altura Total | HT | m | 1,06 | 1,26 |
| Volumen | V | m ³ | 0,008 | 0,010 |
| Tiempo de Retención | Tr | minutos | 31,800 | 37,800 |

Fuente: Autores.

Adicionalmente, se realizó el cálculo de la cantidad de Biochar y carbón activado necesario según el volumen del filtro que debía contener medio filtrante y la altura a la que se evaluó la filtración, teniendo como resultados:

Tabla 14. Cantidad de Biochar y carbón activado necesario para los filtros piloto.

| Cantidad de Biochar | | | | |
|------------------------------------|----|-------------------|---------|---------|
| Densidad | p | Kg/m ³ | 87,146 | 87,146 |
| Volumen | Va | m ³ | 0,00353 | 0,00432 |
| Masa | ma | Kg | 0,308 | 0,376 |
| Cantidad de Carbon Activado | | | | |
| Densidad | p | Kg/m ³ | 520,000 | 520,000 |
| Volumen | Va | m ³ | 0,00353 | 0,00432 |
| Masa | ma | Kg | 1,838 | 2,246 |

Fuente: Autores.

Ilustración 10 Filtros piloto



Fuente: Autores

9.4. Evaluación de la eficiencia de remoción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos)

9.4.1. Curvas de calibración

9.4.1.1. Curva de calibración de sulfatos

Se estableció una curva de calibración, con el fin de conocer la concentración de sulfatos presente en el agua después de su paso por cada filtro, teniendo en cuenta patrones con concentraciones de 5, 20, 40, 50, 200, 300 y 436 ppm, por medio de método espectrofotométrico UV, en el cual se midieron absorbancias a una longitud de onda de 440nm, y a partir de estos se obtuvieron los siguientes resultados:

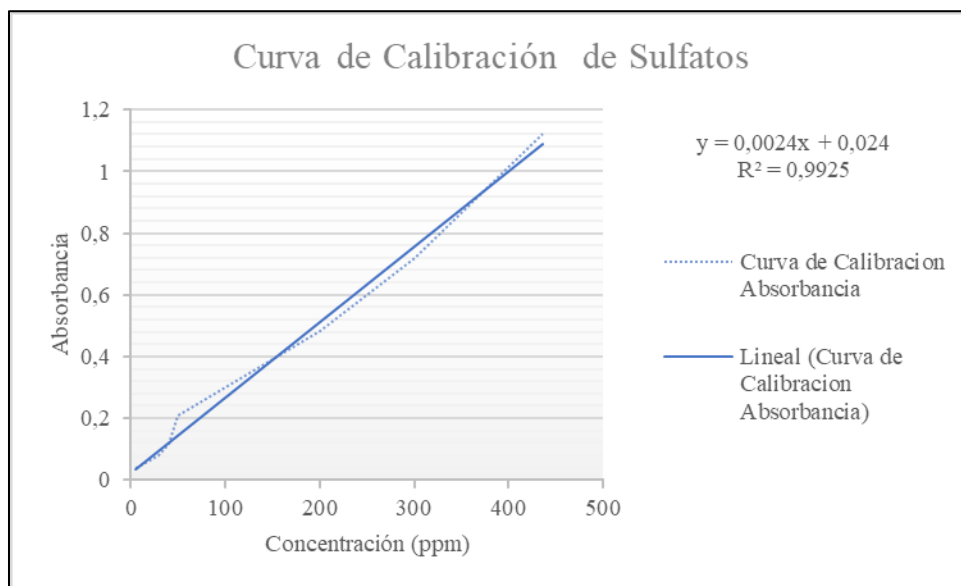
Tabla 15. Resultados de la absorbancia de los patrones preparados para la elaboración de la curva de calibración para sulfatos.

| Curva de Calibración | |
|-----------------------------|--------------------|
| Concentración (ppm) | Absorbancia |
| 5 | 0,04 |
| 20 | 0,063 |
| 30 | 0,078 |
| 40 | 0,116 |
| 50 | 0,21 |
| 200 | 0,483 |
| 300 | 0,719 |
| 436 | 1,123 |

Fuentes: Autores

Teniendo en cuenta los datos anteriores se realizó la curva de concentración vs absorbancia que se encuentra a continuación:

Gráfica 1. Curva de Calibración de Sulfatos.



Fuente: Autores

En la gráfica 1 se observa la corrección de la curva por medio de una regresión lineal con el fin de establecer que el coeficiente de correlación es aproximado a 1, lo cual corresponde a lo descrito ya

que el coeficiente encontrado corresponde a 0,9925, lo que indica que es una buena linealidad y la ecuación de la recta es adecuada para hallar la concentraciones de las muestras a analizar, con una pendiente positiva y siendo totalmente dependiente una variable de la otra. A partir de esto se obtuvo la siguiente ecuación:

$$A = 0,0024 C + 0,024$$

Donde A es Absorbancia y C concentración y despejando de la ecuación la concentración se obtiene:

$$C = \frac{A - 0,024}{0,0024}$$

9.4.1.2. Curva de calibración de nitratos

Se estableció una curva de calibración, con el fin de conocer la concentración de nitratos presente en el agua después de su paso por cada filtro, teniendo en cuenta patrones con concentraciones de 25, 50, 100, 200, 300, 400 y 500 ppm, por medio de método espectrofotométrico UV, en el cual se midieron absorbancias a una longitud de onda de 220nm, y a partir de estos se obtuvieron los siguientes resultados:

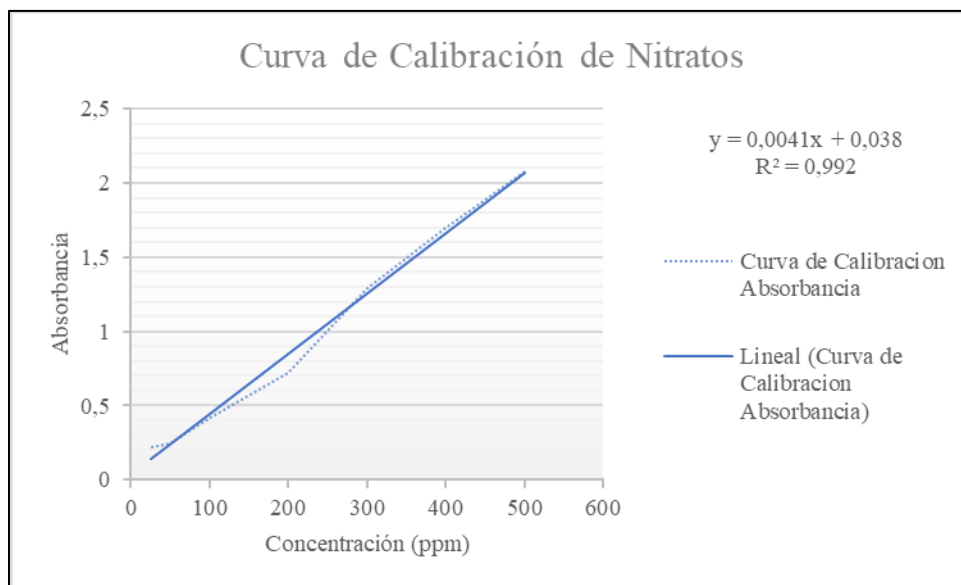
Tabla 16. Resultados de la absorbancia de los patrones preparados para la elaboración de la curva de calibración para nitratos

| Curva de Calibración | |
|-----------------------------|--------------------|
| <i>Concentración (ppm)</i> | <i>Absorbancia</i> |
| 500 | 2,08 |
| 400 | 1,696 |
| 300 | 1,295 |
| 200 | 0,722 |
| 100 | 0,415 |
| 50 | 0,246 |
| 25 | 0,221 |

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta los datos anteriores se realizó la curva de concentración vs absorbancia que se encuentra a continuación:

Gráfica 2 Curva de Calibración de Nitratos.



Fuente: Autores

En la Gráfica 2 Curva de Calibración de Nitratos. se observa la corrección de la curva por medio de una regresión lineal con el fin de establecer que el coeficiente de correlación es aproximado a 1, lo cual corresponde a lo descrito ya que el coeficiente encontrado corresponde a 0,992, lo que indica que es una buena linealidad y la ecuación de la recta es adecuada para hallar la concentraciones de las muestras a analizar, con una pendiente positiva y siendo totalmente dependiente una variable de la otra . A partir de esto se obtuvo la siguiente ecuación:

$$A = 0,0041 C + 0,038$$

Donde A es Absorbancia y C concentración y despejando de la ecuación la concentración se obtiene:

$$C = \frac{A - 0,038}{0,0041}$$

9.4.2. Concentraciones y Eficiencias

A continuación, se muestran los resultados de concentraciones y eficiencias de remoción de sulfatos, nitratos y fosfatos obtenidos a partir de la metodología descrita, utilizando los dos medios filtrantes (Biochar y Carbón activado) en los filtros con retro lavado a diferentes alturas (45 y 55 cm).

De igual manera, se encontrará el tiempo de filtración de agua impactada, considerándose como el tiempo que tardan en pasar los 5 litros a través del filtro.

Para el cálculo de las eficiencias a continuación descritas, se empleó a ecuación

$$E(\%) = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100$$

Donde

E : Eficiencia

C_i : Concentración inicial

C_f : Concentración Final

9.4.2.1.Sulfatos

Para esto fue necesario impactar 8 litros con sulfatos de los cuales solo se filtraron 5 litros por lo cual se halló la cantidad necesaria de sulfatos a adicionar al agua destilada, con el fin de que su concentración inicial fuese de 436 ppm, es por esto que se lleva a cabo la siguiente operación:

$$436 \frac{\text{ppm}}{\text{L}} \text{SO}_4^{-2} * \frac{142\text{mg Na}_2\text{SO}_4}{96 \text{mgSO}_4^{-2}} * 8\text{L} = 5159 \text{mg} * \frac{1\text{mg}}{1000\text{mg}} = 5,16\text{g Na}_2\text{SO}_4$$

- **Biochar**

Después de filtrados los 5 litros de agua impactada con sulfatos a través del filtro con el Biochar como medio filtrante, a las dos alturas se obtuvieron las concentraciones de 3 muestras y las eficiencias correspondientes, para así generar la gráfica de variación de la concentración a partir del volumen recolectado.

a) *Altura de 45 cm*

Tabla 17. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 45 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 45 cm | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------|----------|-------------------|---------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración ppm | Volumen |
| | 1 | 2 | Promedio | | |
| 1 | 0,048 | 0,052 | 0,050 | 10,83 | 1 |
| 2 | 0,059 | 0,065 | 0,062 | 15,83 | 2,5 |
| 3 | 0,390 | 0,409 | 0,399 | 156,45 | 5 |
| T | 0,528 | 0,519 | 0,523 | 208,13 | |

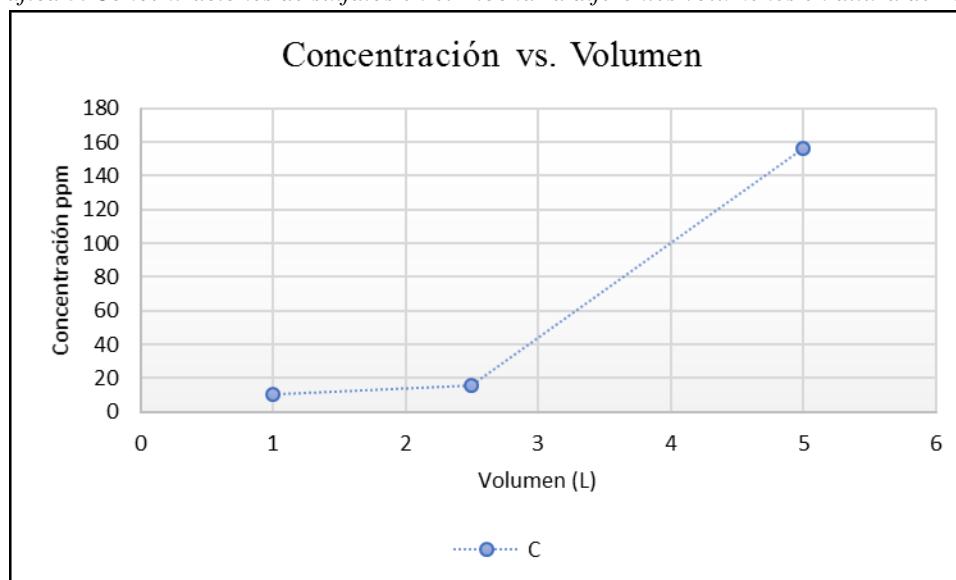
Fuente: Autores.

Tabla 18. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 45 cm.

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| TIEMPO DE FILTRACIÓN | 1 hr 24 min 23 seg |
|-----------------------------|--------------------|

Fuente: Autores.

Gráfica 3. Concentraciones de sulfatos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 45 cm.



Fuente: Autores.

Tabla 19. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Biochar a altura de 45 cm.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 97,52 |
| 2 | 96,37 |
| 3 | 64,12 |
| T | 52,26 |

Fuente: Autores

b) Altura de 55 cm

Tabla 20. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 55 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 55 cm | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------|----------|-------------------|-------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración ppm | Volumen (L) |
| | 1 | 2 | Promedio | | |
| 1 | 0,094 | 0,097 | 0,095 | 29,79 | 1 |
| 2 | 0,067 | 0,068 | 0,067 | 18,13 | 2,5 |
| 3 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 10,01 | 5 |
| T | 0,556 | 0,545 | 0,550 | 219,38 | |

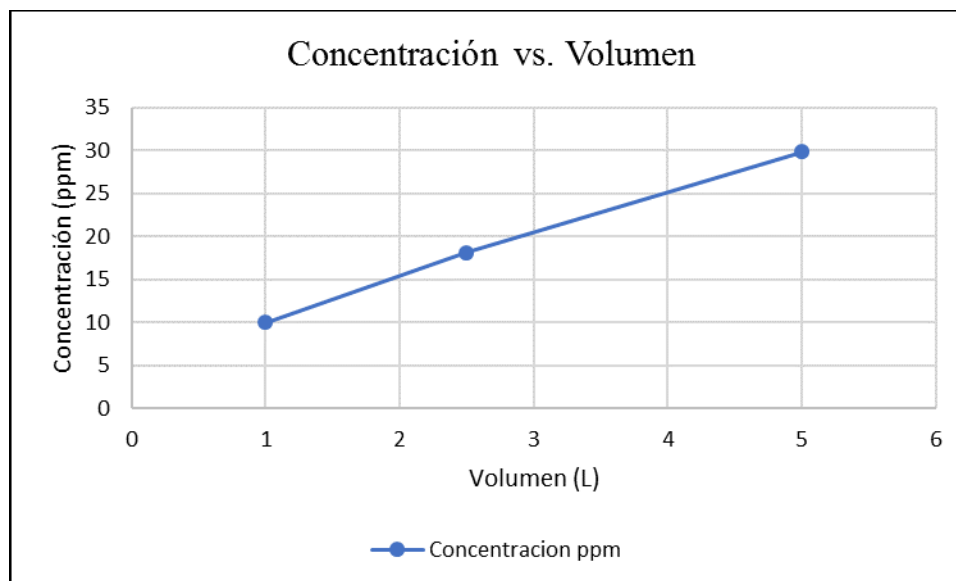
Fuente: Autores

Tabla 21. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Biochar de 55 cm.

| TIEMPO DE FILTRACIÓN | |
|-----------------------------|--------------------|
| | 1 hr 25 min 07 seg |

Fuente: Autores

Gráfica 4. Concentraciones de sulfatos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 55 cm.



Fuente: Autores

Tabla 22. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Biochar a altura de 55 cm.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 97,71 |
| 2 | 95,84 |
| 3 | 93,17 |
| T | 49,68 |

Fuente: Autores

- **Carbón activado**

Después de filtrados los 5 litros de agua impactada a través del filtro con el carbón activado como medio filtrante, a las dos alturas se obtuvieron los siguientes resultados:

a) **Altura de 45 cm**

Tabla 23. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Carbón activado de 45 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 45 cm | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------|----------|-------------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración ppm |
| | 1 | 2 | Promedio | |
| 1* | 1,005 | 1,025 | 1,015 | 412,92 |

Fuente: Autores.

Tabla 24. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Carbón Activado de 45 cm.

| | |
|-----------------------------|---------------|
| TIEMPO DE FILTRACIÓN | 29 min 18 seg |
|-----------------------------|---------------|

Fuente: Autores

Tabla 25. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Carbón Activado a altura de 45 cm.

| Numero de Muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 5,29 |

Fuente: Autores

b) **Altura de 55 cm**

Tabla 26. Resultados de filtración de sulfatos en altura de Carbón activado de 55 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 55 cm | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------|----------|-------------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración ppm |
| | 1 | 2 | Promedio | |
| 1* | 1,015 | 1,009 | 1,012 | 411,66 |

Fuente: Autores

Tabla 27. Tiempo de filtración de sulfatos en altura de Carbón Activado de 55 cm.

| | |
|-----------------------------|---------------|
| TIEMPO DE FILTRACIÓN | 24 min 12 seg |
|-----------------------------|---------------|

Fuente: Autores

Tabla 28. Eficiencia de remoción de sulfatos en el Carbón Activado a altura de 55 cm.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 5,58 |

Fuente: Autores

*Solo se tomó una muestra total de agua filtrada, ya que los resultados de absorbancia y concentración indican que el carbón activado no tenía eficiencia de remoción de sulfatos, razón por la cual no se presenta grafica de concentración a diferentes volúmenes.

9.4.2.2.Nitratos

Para esto fue necesario impactar 8 litros con nitratos de los cuales solo se filtraron 5 litros por lo cual se halló la cantidad necesaria de nitratos a adicionar al agua destilada, con el fin de que su concentración inicial fuese de 400 ppm, es por esto que se lleva a cabo la siguiente operación:

$$400 \frac{\text{ppm}}{\text{L}} \text{NO}_3^- * \frac{85 \text{ mg NaNO}_3}{62 \text{ mg NO}_3^-} * 8\text{L} = 4387,39 \text{ mg} * \frac{1\text{mg}}{1000\text{mg}} = 4,39\text{g NaNO}_3$$

- **Biochar**

Después de filtrados los 5 litros de agua impactada con nitratos a través del filtro con el Biochar como medio filtrante, a las dos alturas se obtuvieron las concentraciones de 3 muestras y las eficiencias correspondientes, para así generar la gráfica de variación de la concentración a partir del volumen recolectado.

a) Altura de 45 cm

Tabla 29. Resultados de filtración de nitratos en altura de Biochar de 45 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 45 cm | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | Absorbancia | Concentración ppm | Volumen (L) |
| | | | |

| Numero de muestra | 1 | 2 | Promedio | | |
|-------------------|-------|-------|----------|-------|-----|
| 1 | 0,135 | 0,132 | 0,1335 | 23,29 | 1 |
| 2 | 0,242 | 0,242 | 0,242 | 49,75 | 2,5 |
| 3 | 0,277 | 0,277 | 0,277 | 58,29 | 5 |
| T | 0,398 | 0,398 | 0,398 | 87,82 | |

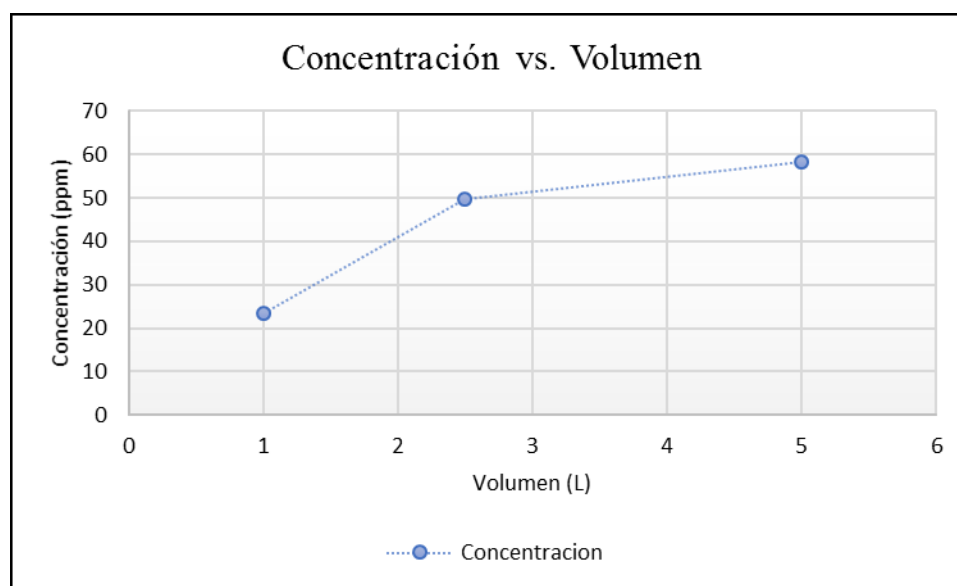
Fuente: Autores

Tabla 30. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Biochar de 45 cm.

| | |
|-----------------------------|---------------|
| TIEMPO DE FILTRACIÓN | 59 min 45 seg |
|-----------------------------|---------------|

Fuente: Autores

Gráfica 5. Concentraciones de nitratos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 45 cm



Fuente: Autores

Tabla 31. Eficiencia de remoción de nitratos en el Biochar a altura de 45 cm.

| Numero de Muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 94,17 |
| 2 | 87,56 |
| 3 | 85,42 |
| T | 78,04 |

Fuente: Autores

b) *Altura de 55 cm.*

Tabla 32. Resultados de filtración de nitratos en altura de Biochar de 55 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 55 cm | | |
|--------------------------------------|-------------|-------------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | Concentración ppm |
| | | |

| | 1 | 2 | Promedio | | Volumen (L) |
|---|-------|-------|----------|-------|-------------|
| 1 | 0,365 | 0,367 | 0,366 | 80,01 | 1 |
| 2 | 0,373 | 0,373 | 0,373 | 81,70 | 2,5 |
| 3 | 0,381 | 0,379 | 0,380 | 83,41 | 5 |
| T | 0,123 | 0,125 | 0,124 | 20,97 | |

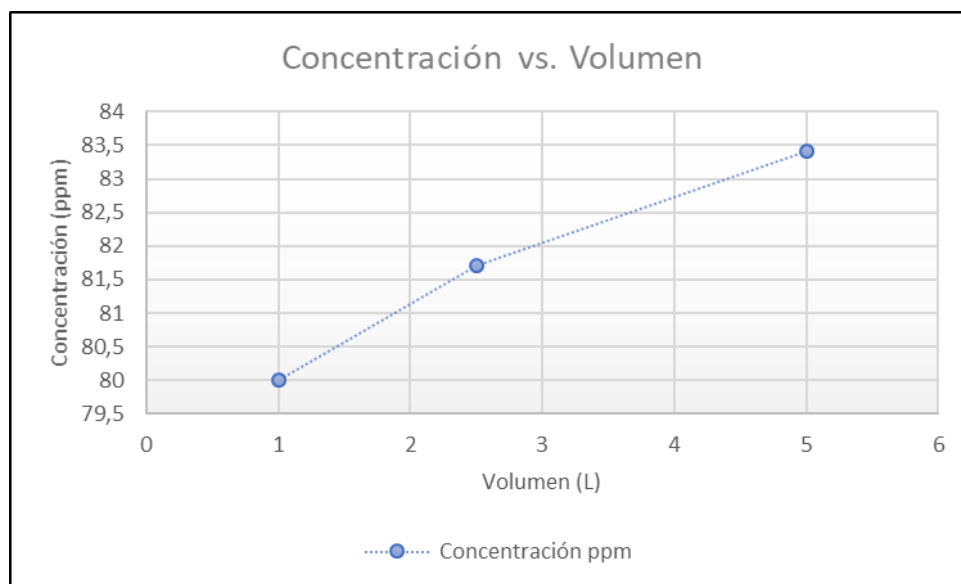
Fuente: Autores

Tabla 33. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Biochar de 55 cm.

| | |
|-----------------------------|---------------|
| TIEMPO DE FILTRACIÓN | 57 min 23 seg |
|-----------------------------|---------------|

Fuente: Autores

Gráfica 6. Concentraciones de nitratos en el Biochar a diferentes volúmenes en altura de 55 cm



Fuente: Autores

Tabla 34. Eficiencia de remoción de nitratos en el Biochar a altura de 55 cm.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 80,01 |
| 2 | 79,55 |
| 3 | 79,14 |
| T | 94,69 |

Fuente: Autores

- **Carbón activado**

Después de filtrados los 5 litros de agua impactada a través del filtro con el carbón activado como medio filtrante, a las dos alturas se obtuvieron los siguientes resultados:

a) *Altura de 45 cm*

Tabla 35. Resultados de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 45 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 45 cm | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------|----------|---------------|-------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración | Volumen (L) |
| | 1 | 2 | Promedio | | |
| 1 | 0,569 | 0,569 | 0,569 | 129,51 | 1 |
| 2 | 0,256 | 0,257 | 0,256 | 53,29 | 2,5 |
| 3 | 0,580 | 0,580 | 0,580 | 132,19 | 5 |
| T | 0,795 | 0,795 | 0,795 | 184,74 | |

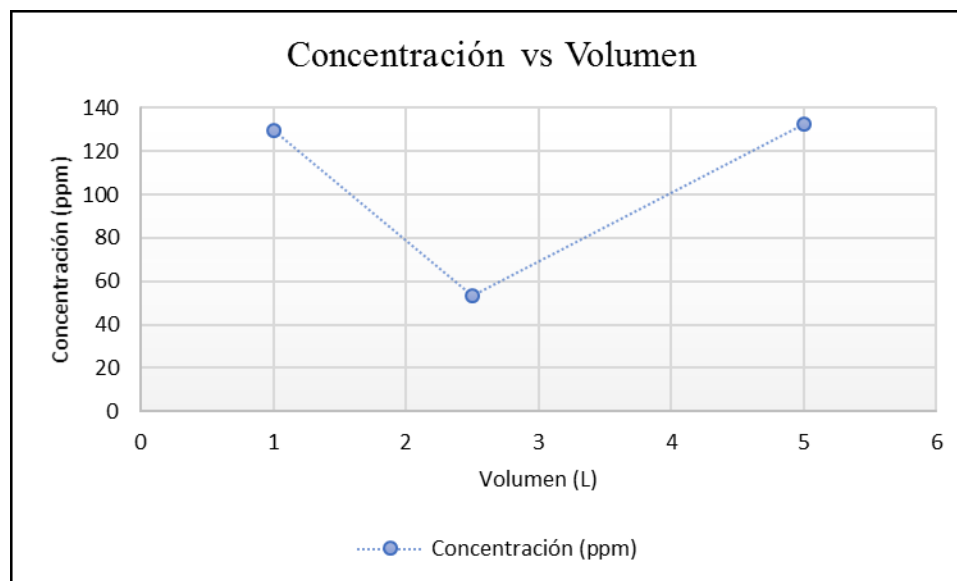
Fuente: Autores

Tabla 36. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 45 cm.

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| TIEMPO DE FILTRACIÓN | <i>21 min 9 seg</i> |
|-----------------------------|---------------------|

Fuente: Autores

Gráfica 7. Concentraciones de nitratos en Carbón Activado a diferentes volúmenes en altura de 45 cm



Fuente: Autores

Tabla 37 Eficiencia de remoción de nitratos en el Carbón Activado a altura de 45 cm

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 67,62 |
| 2 | 86,67 |
| 3 | 66,95 |
| T | 53,81 |

Fuente: Autores

b) *Altura de 55 cm.*

Tabla 38. Resultados de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 55 cm.

| MUESTRA PROBLEMA ALTURA 55 cm | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|-------|----------|-------------------|-------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración ppm | Volumen (L) |
| | 1 | 2 | Promedio | | |
| 1 | 0,411 | 0,415 | 0,413 | 91,46 | 1 |
| 2 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 25,46 | 2,5 |
| 3 | 0,278 | 0,142 | 0,278 | 58,46 | 5 |
| T | 0,406 | 0,406 | 0,406 | 89,75 | |

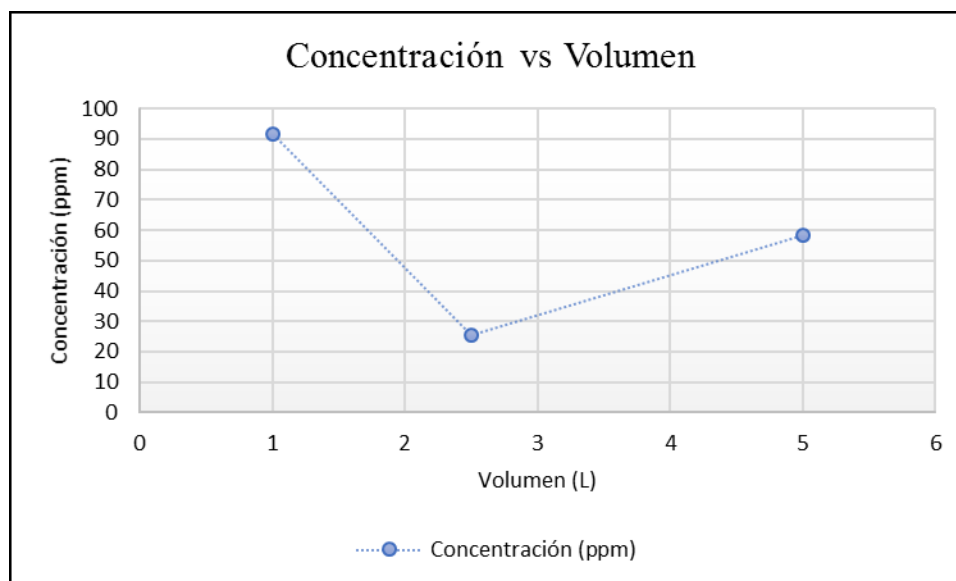
Fuente: Autores

Tabla 39. Tiempo de filtración de nitratos en altura de Carbón Activado de 55 cm.

| | |
|-----------------------------|---------------|
| TIEMPO DE FILTRACIÓN | 19 min 23 seg |
|-----------------------------|---------------|

Fuente: Autores

Gráfica 8. Concentraciones de nitratos en Carbón Activado a diferentes volúmenes en altura de 55 cm



Fuente: Autores

Tabla 40. Eficiencia de remoción de nitratos en el Carbón Activado a altura de 55 cm.

| <i>Numero de muestra</i> | <i>Eficiencia (%)</i> |
|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 77,13 |
| 2 | 93,63 |
| 3 | 85,38 |
| T | 77,56 |

Fuente: Autores

9.4.2.3.Fosfatos

Para esto fue necesario impactar 8 litros con fosfatos de los cuales solo se filtraron 5 litros por lo cual se halló la cantidad necesaria de fosfatos a adicionar al agua destilada, con el fin de que su concentración inicial fuese de 400 ppm, es por esto que se lleva a cabo la siguiente operación:

$$400 \frac{\text{ppm}}{\text{L}} \text{PO}_4^{3-} * \frac{138\text{mg Na H}_2\text{PO y H}_2\text{O}}{95 \text{ mgPO}_4^{3-}} * 8\text{L} = 4648,42 \text{ mg} * \frac{1\text{mg}}{1000\text{mg}} = 4,65\text{gNa}_3\text{PO}_4$$

Los resultados se compilaron en la siguiente tabla:

Tabla 41. Resultados de filtración y tiempos de filtración de fosfatos.

| <i>Altura del medio</i> | <i>Medio filtrante</i> | <i>Concentración</i> | <i>Tiempo de filtración</i> |
|-------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 45 cm | Biochar | 11,52 | 1hr 9 min 30 seg |
| | Carbón Activado | 11,76 | 21 min 57 seg |
| 55 cm | Biochar | 10,56 | 1h 16 min 44 seg |
| | Carbón Activado | 11,28 | 21 min 18 seg |

Fuente: Autores

Tabla 42. Eficiencia de remoción de fosfatos en Biochar y Carbón activado.

| <i>Altura del medio</i> | <i>Medio filtrante</i> | <i>Eficiencias (%)</i> |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 45 cm | Biochar | 97,12 |
| | Carbón Activado | 97,06 |
| 55 cm | Biochar | 97,36 |
| | Carbón Activado | 97,18 |

Fuente: Autores

9.4.2.4. Aguas potenciadas con sulfatos, nitratos y fosfatos

Los siguientes resultados se obtuvieron al hacer pasar 5 litros de agua impactada una mezcla de sulfatos, nitratos y fosfatos con concentraciones de 436, 400 y 400 ppm respectivamente, a través del medio filtrante Biochar y Carbón Activado a una sola altura de 45 cm.

- **Biochar**

Se tomaron 3 muestras de las que se analizaron por separado los contaminantes, con los siguientes resultados encontrados:

a) Sulfatos

Tabla 43. Resultados de filtración de sulfatos en Biochar.

| MUESTRA PROBLEMA SULFATOS | | | |
|----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|
| <i>Muestra</i> | Absorbancia | Concentración (ppm) | Volumen (L) |
| <i>1</i> | 0,122 | 40,83 | 1 |
| <i>2</i> | 0,630 | 252,50 | 2,5 |
| <i>3</i> | 0,589 | 235,42 | 5 |
| <i>T</i> | 0,912 | 369,83 | |

Fuente: Autores

Tabla 44. Eficiencia de remoción de sulfatos en Biochar.

| <i>Numero de muestra</i> | <i>Eficiencia (%)</i> |
|--------------------------|-----------------------|
| <i>1</i> | 90,63 |
| <i>2</i> | 42,09 |
| <i>3</i> | 46,01 |
| <i>T</i> | 15,18 |

Fuente: Autores

b) Nitratos

Tabla 45. Resultados de filtración de nitratos en Biochar.

| MUESTRA PROBLEMA NITRATOS | | | |
|----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|
| <i>Muestra</i> | Absorbancia | Concentración (ppm) | Volumen (L) |
| <i>1</i> | 0,126 | 21,46 | 1 |
| <i>2</i> | 0,548 | 124,39 | 2,5 |
| <i>3</i> | 0,448 | 100,00 | 5 |
| <i>T</i> | 0,721 | 166,48 | |

Fuente: Autores

Tabla 46. Eficiencia de remoción de nitratos en Biochar.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 94,63 |
| 2 | 68,90 |
| 3 | 75,00 |
| T | 58,37 |

Fuente: Autores

c) Fosfatos*

Tabla 47. Resultados de filtración de fosfatos en Biochar.

| MUESTRA PROBLEMA FOSFATOS | | |
|----------------------------------|---------------------|----------|
| Muestra | Concentración (ppm) | Promedio |
| 1 | 8,352 | 8,35 |
| | 8,352 | |
| | 8,352 | |

Fuente: Autores.

Tabla 48. Eficiencia de remoción de fosfatos en Biochar.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|-------------------|----------------|
| 1 | 97,92 |

Fuente: Autores

*Solo se tomó una muestra de fosfatos por el análisis espectrofotométrico que se realizó para cuantificación de este contaminante.

- **Carbón activado**

Para el caso de filtración de la mezcla aniónica en carbón activado, se tomaron 2 muestras del agua filtrada y se analizaron individualmente cada uno de los compuestos aniónicos.

a) Sulfatos

Tabla 49. Resultados de filtración de sulfatos en Carbón Activado.

| MUESTRA PROBLEMA SULFATOS | | | |
|----------------------------------|-------------|---------------------|---------|
| Muestra | Absorbancia | Concentración (ppm) | Volumen |
| 1 | 1,068 | 435,00 | 1 |
| 2 | 1,062 | 432,50 | 2,5 |
| 3 | 1,059 | 431,25 | 5 |
| T | 1,063 | 432,92 | |

Fuente: Autores

Tabla 50. Eficiencia de remoción de sulfatos en Carbón Activado.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 0,2 |
| 2 | 0,8 |
| 3 | 1,1 |
| T | 0,7 |

Fuente: Autores

b) Nitratos

Tabla 51. Resultados de filtración de nitratos en Carbón Activado.

| MUESTRA PROBLEMA NITRATOS | | | |
|----------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------|
| Muestra | Absorbancia | Concentración (ppm) | Volumen |
| 1 | 0,593 | 135,37 | 1 |
| 2 | 0,720 | 166,34 | 2,5 |
| 3 | 0,598 | 136,59 | 5 |
| T | 1,05 | 246,83 | |

Fuente: Autores

Tabla 52. Eficiencia de remoción de nitratos en Carbón Activado.

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 66,16 |
| 2 | 58,41 |
| 3 | 65,85 |
| T | 38,29 |

Fuente: Autores

c) Fosfatos

Tabla 53. Resultados de filtración de fosfatos en Carbón Activado.

| MUESTRA PROBLEMA FOSFATOS | | |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------|
| Muestra | Concentración (ppm) | Promedio |
| 1 | 2,48 | 2,66 |
| | 2,848 | |

Fuente: Autores

Tabla 54. Eficiencia de remoción de fosfatos en Carbón Activado

| Numero de muestra | Eficiencia (%) |
|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 99,33 |

Fuente: Autores

9.5.Desorción

Las pruebas de desorción se realizaron una vez filtrada el agua impactada a través del retro lavado diseñado en los filtros; como se mencionó anteriormente se hicieron pasar 5 litros de agua en forma ascendente, se tomaron 2 muestras al inicio del retro lavado, a la mitad del volumen total y una finalizando el paso del volumen completo de agua, para así, analizar a través de los métodos de medición la concentración del contaminante correspondiente.

9.5.1. Sulfatos

- **Biochar**

a) *Altura de 45 cm*

Tabla 55. Resultados desorción de sulfatos en Biochar en altura de 45 cm.

| RETROLAVADO ALTURA: 45 cm | | |
|----------------------------------|-------------|-------------------|
| <i>Numero de muestra</i> | Absorbancia | Concentración ppm |
| <i>1</i> | 0,052 | 11,66 |
| <i>2</i> | 0,556 | 221,66 |
| <i>T</i> | 0,976 | 396,66 |

Fuente: Autores

b) *Altura de 55 cm*

Tabla 56. Resultados desorción de sulfatos en Biochar en altura de 55 cm.

| RETROLAVADO ALTURA: 55 cm | | | | | |
|----------------------------------|-------------|-------|-------|----------|-------------------|
| <i>Numero de muestra</i> | Absorbancia | | | | Concentración ppm |
| | 1 | 2 | 3 | Promedio | |
| <i>1</i> | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 2,5 |
| <i>2</i> | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 21,25 |
| <i>T</i> | 0,661 | 0,633 | 0,415 | 0,56 | 227,3 |

Fuente: Autores

- **Carbón activado**

El retrolavado de sulfatos en el carbón activado no se realizó, pues a partir de los datos de filtración se comprobó que este medio no tiene ningún efecto de retención de este anión y la concentración

inicial de agua impactada tiene el mismo valor en la concentración de agua filtrada, por lo tanto, no es necesaria hacer una limpieza del medio.

9.5.2. Nitratos

- **Biochar**

a) *Altura de 45 cm.*

Tabla 57. Resultados desorción de nitratos en Biochar en altura de 45 cm.

| RETROLAVADO ALTURA: 45 cm | | | | |
|----------------------------------|-------------|-------|----------|-------------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración ppm |
| | 1 | 2 | Promedio | |
| 1 | 0,124 | 0,125 | 0,125 | 21,09 |
| 2 | 0,376 | 0,376 | 0,376 | 82,43 |
| T | 0,785 | 0,786 | 0,785 | 182,31 |

Fuente: Autores

b) *Altura de 55 cm.*

Tabla 58. Resultados desorción de nitratos en Biochar en altura de 55 cm.

| RETROLAVADO ALTURA:55 cm | | | | | |
|---------------------------------|-------------|-------|-------|----------|-------------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | | Concentración ppm |
| | 1 | 2 | 3 | Promedio | |
| 1 | 0,337 | 0,337 | 0,337 | 0,337 | 72,93 |
| 2 | 0,431 | 0,431 | 0,433 | 0,431 | 96,02 |
| T | 0,719 | 0,724 | 0,725 | 0,722 | 166,99 |

Fuente: Autores

- **Carbón activado**

a) *Altura de 45 cm.*

Tabla 59. Resultados desorción de nitratos en Carbón Activado en altura de 45 cm.

| RETROLAVADO | | | | |
|--------------------|-------------|-------|----------|-------------------|
| Numero de muestra | Absorbancia | | | Concentración ppm |
| | 1 | 2 | Promedio | |
| 1 | 0,08 | 0,079 | 0,08 | 10,12 |
| 2 | 0,345 | 0,352 | 0,35 | 75,73 |
| T | 0,202 | 0,201 | 0,20 | 39,89 |

Fuente: Autores

b) *Altura de 55 cm.*

Tabla 60. Resultados desorción de nitratos en Carbón Activado en altura de 55 cm.

| RETROLAVADO ALTURA: 55cm | | |
|---------------------------------|-------------|-------------------|
| | Absorbancia | Concentración ppm |
| | | |

| <i>Numero de muestra</i> | 1 | 2 | 3 | Promedio | |
|--------------------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| <i>1</i> | 0,005 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 8,29 |
| <i>2</i> | 0,343 | 0,342 | 0,330 | 0,338 | 73,25 |
| <i>T</i> | 0,258 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 53,49 |

Fuente: Autores

9.5.3. Fosfatos

Tabla 61. Resultados de desorción de fosfatos en Biochar y Carbón Activado.

| <i>Altura del medio</i> | <i>Medio filtrante</i> | <i>Concentración ppm</i> |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| <i>45 cm</i> | Biochar | 12,32 |
| | Carbón Activado | 9,2 |
| <i>55 cm</i> | Biochar | 9,28 |
| | Carbón Activado | 11,2 |

Fuente: Autores

10. ANALISIS DE RESULTADOS

10.1. Caracterización del bagazo de caña y Biochar

A partir del análisis químico y físico realizado por (Manals-cutiño et al., 2015), se identifica que el bagazo de caña posee un alto contenido de oxígeno, cuyo valor está en un porcentaje del 52,08%, es decir que este elemento químico corresponde a más de la mitad de su composición, lo sigue el carbono con un porcentaje de 42,21%, y el hidrógeno con un porcentaje de 5,47% , y por último tiene un contenido de nitrógeno muy pequeño y de azufre nulo, lo que lo hace ser un excelente material con pocos carbonatos, es decir que el carbono contenido es básicamente carbono orgánico. Un porcentaje de 68 a 70% de material volátil indica que el material realiza fácilmente la combustión y es más susceptible a degradarse, por su parte el contenido de cenizas de 1,26% del material es bajo, y al poseer una humedad de 7,6% se garantiza la no formación de depósitos en las paredes del pirolizador, mínimos costos de operación del equipo, un proceso de pirólisis más efectivo y un mayor rendimiento de producción de biomasa.

Ahora bien, comparando los resultados expuestos anteriormente del bagazo de caña y los resultados de la biomasa transformada (Biochar), se evidencia que el contenido de carbono es de 75,34% lo que da en un aumento en el porcentaje de carbono del 33% al obtenido en el bagazo de caña, siendo un contenido de carbono alto en comparación con otros elementos que podría deberse a la presencia de grupos funcionales que contienen carbono tales como carboxílico y que proviene de la carbonización, la cual provoca la remoción de la mayoría de átomos no carbonosos como Ca, Mg, K, que se mantienen en la materia original y que también se justifica como razón para un aumento en la proporción relativa de carbono. Se encontró que el carbono estaba presente en cantidades más altas debido a que el bagazo de caña fue expuesto a temperaturas entre 400 a 500 °C, lo que influye en una disminución de hidrógeno y oxígeno, con resultados de 4,50% y 13,48% respectivamente;

en cuanto al nitrógeno y azufre se observa un aumento muy pequeño con respecto a los valores iniciales antes de la transformación del bagazo de caña.

En cuanto a los datos de análisis próximo para el Biochar el porcentaje de cenizas aumento aproximadamente en un 16% después de la transformación térmica del bagazo de caña, debido a la posible presencia de minerales inorgánicos, en cambio el porcentaje de material volátil disminuyo en un 46%, ya que hay menor cantidad de productos gaseosos que se desprenden durante el calentamiento de la biomasa.

Es importante para la adsorción de aniones, hablar acerca de las propiedades superficiales del Biochar, en el estudio “Eliminación de nitrato de la solución acuosa mediante Biochar de bagazo de caña de azúcar” se evaluó la capacidad de intercambio catiónico (CEC) y la capacidad de intercambio aniónico (ACE) con resultados de 12.90 cmol/kg y 10.21 cmol/kg, respectivamente (Divband Hafshejani et al., 2016). Lo que conlleva a asegurar que los grupos funcionales de superficie (principalmente grupos que contienen oxígeno, por ejemplo, -Carboxilato, COOH e hidroxilo, -OH) existen en la superficie del Biochar, que puede tener interacciones fuertes con aniones y cationes, como atracción electrostática, intercambio iónico y compleción superficial. Esos enlaces de C-O y C-H gobiernan la estabilidad del Biochar y son usados para medir su grado de aromaticidad (Hammes et al., 2006).

10.2. Evaluación de eficiencias para remoción de aniones.

10.2.1. Sulfatos

Según los resultados obtenidos en los procesos de filtración de sulfatos, con los dos tipos de medios filtrantes y en cada una de las alturas, se observan que al utilizar el Biochar a una altura de 45 cm se obtuvo una eficiencia de retención de sulfatos de un 52,26% con un tiempo de retención de

1,24hr y a una altura de 55 cm un porcentaje de adsorción de 49,68% en un tiempo de 1,25hr, mientras que para el carbón activado se obtuvieron eficiencias de 5,29 % y 5,58% en las alturas de 45 y 55cm respectivamente, con tiempos de 29,18 min y 24,12 min, para cada altura. Por lo cual se puede determinar que los sulfatos tienden a tener una mayor afinidad por el Biochar que por el carbón activado y mayores eficiencias de retención en alturas pequeñas. En este caso los tiempos obtenidos en la filtración con el Biocarbón son altos comparados con los que se obtuvieron en la filtración con carbón activado, lo cual se debe al tamaño de poro que contiene la partícula del medio filtrante, ya que el área superficial del poro del Biochar se considera menor al del carbón activado, es por esto que los tiempos obtenidos son considerablemente diferentes.

En cuanto al comportamiento que se ve reflejado en las gráficas Gráfica 3 y Gráfica 4, que corresponde a la retención de sulfatos a través que pasa cierto volumen, se observa que al primer litro que se filtra se encuentra el mayor nivel de adsorción, expresando que después de esto al seguir pasando más flujo de agua impactada no hay más partículas que se atraigan entre sí, empezando así a crearse una repulsión por el aumento de las cargas negativas en la superficie del Biochar junto con las cargas negativas de los sulfatos, a lo que se considera como el punto de saturación del Biocarbón.

Con respecto al comportamiento de la afinidad entre el carbón activado y los sulfatos, se demuestra que es mínima ya que las cantidades retenidas van entre 24 y 25 ppm, en tiempos de filtración cortos, por lo tanto, no se presenta una atracción entre las cargas del medio filtrante y las cargas negativas de sulfatos que se encuentran presente en el volumen de agua filtrado que puede deberse a características superficiales del carbón, sin embargo en el desarrollo del presente proyecto no se cuenta con una caracterización detallada del medio.

El mecanismo de adsorción para sulfatos se encuentra relacionado con el fenómeno de atracción electrostática, la cual se da entre las cargas eléctricas opuestas. Por estudios anteriores se sabe que el Biochar en su superficie está cargado negativamente, sin embargo, en sus enlaces los iones H (+) aunque no se encuentran en una cantidad mayor se tiene una proporción considerable de sitios con carga positiva en la superficie del sorbente como se muestra en la Ilustración 4, generando una mayor adsorción de iones aniónicos. De igual manera, recordando que para la impactación de las aguas se realiza a partir de sales de sodio de cada contaminante (Na^+), se genera una activación del Biocarbón por la desprotonación de los enlaces polares y adherencia de cargas positivas en su superficie, lo que hace que haya una variación de la cantidad de adsorción del SO_4^{2-} y una mayor capacidad de adsorción del anión sulfato.

Ilustración 11 mecanismos de adsorción de contaminantes orgánicos



Fuente: (Tan et al., 2015)

La sorción de SO_4^{2-} en Biochar a base de bagazo de caña se produce principalmente a través de interacciones electrostáticas, no es posible asegurar que se debe en buena parte a su área superficial, como lo hace (Kanjanaarong et al., 2017), ya que al área manejada para el medio filtrante es sola una en este estudio.

10.2.2. Nitratos

Con respecto a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en la filtración de agua impactada con nitratos, obtuvieron eficiencias de 78,04% para la altura de 45 cm y 94,67 % en la altura de 55 cm, con un tiempo de filtración de 59,45 min y 57,23min respectivamente, utilizando como medio filtrante el Biochar producido a partir del bagazo de caña, utilizando el carbón activado se obtuvieron valores de eficiencias de 53,81% en un tiempo de 21,9 min y una eficiencia de 77,59 % con un tiempo de filtración de 19,23 min, en las alturas ya establecidas. Estos resultados determinan que, aunque el comportamiento de adsorción de nitratos en el Biochar es similar al comportamiento del carbón activado, el Biochar tiene una mayor eficiencia y afinidad a la hora de adsorber este tipo de contaminante. También se analiza que es más eficiente cuando hay una altura de lecho mayor, es este caso la altura de 55 cm es la más eficiente, en cuanto a las alturas utilizadas.

Respecto a los tiempos obtenidos en estos ensayos, el tiempo de filtración entre el Biochar y el carbón activado varía aproximadamente entre 30 y 40 min, siendo el tiempo de filtración con el Biocarbón el mayor, considerando que el tamaño del área superficial del poro es menor que la del carbón activado y que al haber una mayor afinidad hacia la atracción de las cargas negativas que posee el anión nitrato, es por esto que se obtiene un mayor tiempo de filtración con el Biochar como medio filtrante. Aunque comparando con el tiempo con respecto a las eficiencias obtenidas, ya que las mayores son las obtenidas con el Biochar, las que se obtuvieron con el carbón activado

al doble de tiempo que se obtuvo con este medio filtrante podría igualar o superar la eficiencia en la retención de este contaminante en el mismo tiempo que se realizó la filtración con el Biochar.

En las gráficas 5 y 6, se encuentra reflejado el comportamiento del Biochar producido a través del bagazo de caña, en la adsorción de aniones nitratos a través del paso de cierto volumen; estas gráficas muestra que la mayor adsorción se encuentra cuando ha pasado el primer litro a una altura de 45 cm, indicando que este es el punto de saturación en donde la superficie del Biochar se empieza a quedar sin cargas positivas, por lo cual se empieza a crear una repulsión entre las cargas, haciendo que estas no se queden adheridas al medio filtrante y no se genere más adsorción.

En cuanto a las gráficas Gráfica 7 y Gráfica 8, reflejan el comportamiento de la adsorción de nitratos usando el carbón activado como medio filtrante, en estas graficas se observa que al inicio de la prueba este no tiene afinidad con las cargas que posee la solución y a medida que va pasando el flujo va aumentando la atracción entre las cargas tanto del medio filtrante como de la solución y se llega al punto de saturación se encuentra cuando ya ha pasado la mitad del flujo a tratar, es decir a los 2,5 litros, en donde ya no quedan en la superficie del carbón activado cargas positivas que atraigan las cargas negativas de los nitratos, y es por eso que se ve la disminución de la adsorción hasta que termina de pasar el flujo de los 5 litros.

Como se mencionó anteriormente, la carga superficial variable del Biochar y su capacidad de intercambio de aniones puede ser causada por la protonación de grupos funcionales que pueden verse por la solución acuosa que se hace pasar a través del medio. Es así, como la adsorción de nitrato en la superficie del Biochar se debe principalmente a la interacción electrostática (mecanismo de adsorción superficial) y, en menor medida, al mecanismo de intercambio iónico. Sin embargo, como se refleja en los resultados de adsorción de nitratos, a medida que pasa el

tiempo la competencia por sitios de sorción entre las cargas de los iones aumentan, lo que puede dificultar la adsorción y retención del anión en lapsos de filtración largas, es decir si bien la adsorción de nitratos y sulfatos aumentaba con la concentración inicial, la eficiencia de la adsorción (es decir, relación de eliminación) disminuía posiblemente debido a la menor cantidad de sitios de adsorción activos disponibles en el Biochar.

10.2.3. Fosfatos

Según los resultados obtenidos en la filtración del agua impactada con fosfatos, se obtuvieron eficiencias muy altas tanto en la filtración con Biochar y carbón activado, para el primero de estos se obtuvo una eficiencia de 97,12% y 97,36% en las alturas de 45 y 55 cm respectivo con tiempos superiores a 1 hr, mientras que con el carbón activado las eficiencias fueron de 97,06% y 97,18% con tiempos de alrededor de los 22 minutos, en las alturas ya nombradas. Con respecto a esto se establece que, al estar las eficiencias de filtración de los dos medios en el mismo rango, cualquiera de estos materiales es eficiente a la hora de la retención del anión fosfato, en cualquier altura, con respecto al tiempo, el más eficiente correspondería al carbón activado, ya que cumple con la misma función del Biochar en un menor tiempo.

La capacidad de intercambio de aniones y la química de superficie influyen en la retención de aniones, para el caso del ion fosfato en diferentes literaturas se asegura que la capacidad de adsorción de este anión en el Biochar aumenta con niveles crecientes de iones metálicos, es decir cuando se tiene un contenido alto de cenizas se tendrán mayores capacidades de adsorción de fosfato; en ese estudio el contenido de cenizas es alto por lo que es una de las razones para validar los resultados experimentales.

De igual manera, la mayor eficiencia de remoción del ion fosfato en Biochar se justifica por medio de atracción electrostática, que como ya se explicó para sulfatos, este mecanismo se presenta en el Biochar que al estar cargado positivamente atrae con mayor facilidad al fosfato y su enlace es más fuerte debido a las tres cargas negativas del ion en cuestión. La influencia del área de superficie del Biochar en la adsorción PO_4 no está clara, pero algunos estudios sugieren que su influencia puede ser menor en comparación con el mecanismo de interacción electrostática.

10.2.4. Aguas potenciadas con sulfatos, nitratos y fosfatos

Para esta prueba solo se realizó una filtración con los dos medios filtrantes a una altura de 45 cm, por lo cual de la filtración con Biochar se obtuvieron unas eficiencias de sulfatos de 15,18%, de nitratos de 58,37 y de fosfatos de 97,92 %, al realizar la filtración con el carbón activado se generaron valores de 0,7%, 38,29% y 99,33% correspondientes a sulfatos, nitratos y por último a fosfatos. Al analizar estos resultados se encuentran que existe una afinidad de los dos medios filtrantes hacia los nitratos y fosfatos, ya que sus porcentajes de eficiencias son más altas que las que corresponden a sulfatos, aun así, también se puede observar que el Biochar para cualquiera de los tres aniones analizados, tiene mayor adsorción tanto en sulfatos, nitratos y fosfatos.

Al hacer pasar la mezcla de contaminantes aniónicos, se observa que la selectividad del Biochar se debe a las cargas de cada anión, por ejemplo, la disminución en la sorción de nitrato puede deberse a la preferencia de los sitios de sorción hacia aniones con carga negativa más alta, tales como el fosfato, de igual forma esta adsorción pueden deberse a su mayor área superficial que conlleva a una mayor capacidad de sorción. Lo mismo sucede al analizar los valores de adsorción de sulfatos, ya que llegan a ser muy pequeños tanto en el Biochar como en el Carbón activado, ya que su carga negativa es la menor de los tres aniones estudiados.

El ion fosfato por su parte, tiene mayor atracción electrostática entre los medios evaluados, y se puede justificar con la carga negativa que posee, ya que es la más alta en comparación con los nitratos y los sulfatos.

10.3. Desorción de aniones en filtros con retro lavado

Para la obtención de los resultados de desorción fue necesario realizar un retrolavado con el fin de eliminar los contaminantes que fueron adsorbidos en los procesos anteriores, al finalizar esto se obtuvieron los siguientes resultados, para sulfatos con el Biochar en las dos alturas el comportamiento es de completa desorción ya que se obtuvieron en la altura de 45 cm empezando a retirar concentraciones de 11,66 ppm y por último la concentración de 396,66 ppm removiendo y en la altura de 55 cm empezando con remoción de 2,5 y finalizado el retrolavado con una concentración de 227,3 ppm, para el caso del carbón activado, no fue necesario realizar un retrolavado ya que en la filtración se observó que este no retenía nada de lo que pasaba, por lo cual se concluyó que no había nada por desorber.

En el caso de los nitratos el comportamiento que tomo la desorción en el retrolavado para el caso del Biochar en las alturas fue similar que en los sulfatos iniciando desorbiendo cantidades mínimas y a medida que pasaba el flujo de agua el valor de desorción iba aumentando, en la altura de 45 cm la concentración inicial fue de 21,09 ppm y la final fue de 182,31 ppm y en la altura de 55 cm la concentración inicial fue de 72,92 ppm y 166,99 ppm como concentración final. En cuanto al carbón activado este tiene un comportamiento distinto ya que empieza desorbiendo cantidades mínimas llega a un punto de saturación y vuelve a bajar la desorción. Como se ve en los resultados a la altura de 45 cm inicial 10,12 ppm, intermedio 75,73 ppm y 39,89 ppm y para la altura de 55 cm empezó con una desorción de 8,29 ppm, con una concentración intermedia de 73,25 ppm y con una concentración final de 53,49 ppm, lo que indica que para este medio filtrante el comportamiento

que se lleva a cabo en la desorción no es adecuado, para llevar a cabo una adecuada limpieza en el filtro, con el fin de eliminar todo el contaminante que fue adsorbido por el lecho filtrante.

En cuanto a los fosfatos este lleva un comportamiento en la desorción muy baja ya que los valores obtenidos no alcanzan a ser mayores a 20 ppm teniendo en cuenta que este contaminante fue adsorbido casi en su totalidad en el proceso de filtración, según esto el proceso de desorción de fosfatos es mínimo y no es factible a la hora de generar una adecuada limpieza del medio filtrante, sin importar si es Biochar o Carbón activado.

A medida que la concentración inicial de los iones disminuye, la desorción de estos también disminuye, comprobando finalmente una limpieza total del medio. Si se analizan las concentraciones tomadas para retrolavado, se tiene que a una mayor concentración de cualquiera de estos compuestos puede traducirse en una menor energía de enlace y más iones intercambiables (compuestos más fácilmente desorbidos). Cuando los resultados empiezan con concentraciones pequeñas a concentraciones altas, se puede hablar de una baja desorción que se justifica en un fuerte enlace entre los iones y las cargas del medio y en donde la fuerza de retrolavado debía ser mayor para tener un adecuado movimiento del medio generando desorción.

En este estudio, los retro lavados garantizaron una limpieza del medio, pues los resultados de concentraciones finales para nitratos, sulfatos y fosfatos son pequeñas; sin embargo, para tener resultados óptimos de desorción se debe hacer pasar un volumen más grande de agua con potencias impulsadoras más grandes.

11. CONCLUSIONES

Los resultados demuestran un fuerte potencial de adsorción del Biochar, elaborado a partir de bagazo de caña, en la eliminación o remoción de contaminantes aniónicos como el nitrato, sulfato y fosfatos de la solución acuosa. Se observó que la capacidad de sorción del Biocarbón depende de las propiedades de superficie de este como lo es su área superficial y carga superficial presente, junto con la presencia de iones competitivos con alto potencial negativo que se filtren a través de este.

El estudio de las características de la superficie del medio es esencial para comprender el potencial del Biochar en la remoción de contaminantes aniónicos, ya que conociendo estas propiedades se puede establecer el mecanismo de adsorción que influye en la eliminación de contaminantes.

En la eficiencia de remoción de aniones en la filtración por medio de Biochar a una altura de 45 cm arrojan resultados de 52,26% para SO_4^{-2} , 78,04% para NO_3^- y 97,12% para PO_4^{3-} y a una altura de 55 cm dan valores de 49,68% para SO_4^{-2} , 94,69% para NO_3^- y 97,36% para PO_4^{3-} , permitiendo demostrar que el Biochar tiene mejores resultados en alturas del medio más grandes y para todos los aniones una eliminación significativa.

Los grupos funcionales en la superficie del Biochar se someten a disociación (desprotonación) con las sales agregadas, dando un tipo de activación al medio que lo carga positivamente y permiten la interacción electrostática entre las partículas negativas de los aniones y la carga positiva de la superficie del Biochar.

El Biochar, posee una mayor afinidad, en cuentan a la atracción electroestática, hacia los aniones nitratos y fosfatos, según los resultados obtenidos, ya que se obtuvieron mayores eficiencias en

cuanto a la remoción de estos contaminantes, demostrando que entre mayor es la carga negativa, mayor adsorción habrá, a la hora de hacer la filtración.

La comparación entre los medios de filtración muestra que el Biochar tiene mejores resultados de remoción de aniones tales como nitratos, sulfatos y fosfatos, que el Carbón activado pues las eficiencias son menores y los tiempos de contacto disminuyeron en mayor proporción, lo que permite afirmar que para este tipo de contaminantes la mejor alternativa es la implementación de Biochar como medio filtrante.

La desorción en el Biochar se comprobó en los sulfatos y nitratos al obtener concentraciones mayores una vez iniciado el retrolavado, es decir que había una menor energía de enlace y más iones intercambiables que permitieron esta desorción, los fosfatos por su parte presentan una baja desorción que se evidencia en un fuerte enlace entre los iones y las cargas del medio.

12. RECOMENDACIONES

En estudios posteriores, se recomienda el análisis de la influencia que tiene el área superficial del Biochar en la retención de aniones, ya que en la presente investigación solo se manejó un tamaño de partícula y una única área superficial, y al comparar los resultados con literaturas referenciadas se explica que uno de los mecanismos de adsorción de contaminantes orgánicos se debe a esta propiedad.

Es recomendable, evaluar a través de metodologías más específicas las cargas superficiales del Biochar, comprobando así, a través de valores numéricos la capacidad de intercambio aniónico que presenta el medio antes, durante y después de realizada la filtración.

Este estudio no se enfocó en conocer a detalle la vida útil del material sino su capacidad de desorción, por eso se propone estudiar la eficiencia de remoción del Biochar una vez realizado el retrolavado y a medida que avanza el envejecimiento del Biocarbón como es el equilibrio entre las cargas negativas y positivas.

Los grupos funcionales oxigenados de Biochar experimentan reacciones de protonación y desprotonación a medida que cambia el pH de la solución acuosa (Divband Hafshejani et al., 2016), esta afirmación debe ser evaluada en próximos estudios, en donde se estudie otro parámetro incidente en la retención de aniones como lo es el pH, que pasa cuando este aumenta o disminuye, como cambian las cargas en superficie del Biochar, cuáles son las reacciones de protonación y atracción electrostática a diferentes valores de pH.

Se recomienda para próximos proyectos, tener como parámetro determinante las concentraciones de filtración a través de intervalos de tiempo, para conocer a detalle el comportamiento de adsorción de aniones a diferentes volúmenes junto con el tiempo que tardó en llegar a ese volumen.

Si se implementara el Biochar en plantas de tratamiento de agua residuales, se recomienda tener filtros en serie que permitan una menor saturación en el medio y mejores capacidades de remoción de aniones, y de igual manera a partir de la selectividad del Biochar por los aniones, se recomienda emplear el medio para concentraciones altas de fosfatos, pero bajas en sulfatos.

Es importante y recomendable probar la eficiencia de remoción de aniones (nitratos, sulfatos y fosfatos) en la filtración de aguas residuales industriales reales y no a partir de aguas impactadas, con el fin de ver el comportamiento del medio filtrante en aguas residuales de determinadas industrias.

13. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, *118*, 536–544.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.042>

Akhondi, E., Zamani, F., Law, A. W. K., Krantz, W. B., Fane, A. G., & Chew, J. W. (2017).

Influence of backwashing on the pore size of hollow fiber ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, *521*, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.08.070>

America, F. U. de. (2017). *Guías de Laboratorio*.

American Society for Testing And Materials. (1898). *D2216: Test Method for laboratory*

Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock.

Asadullah, M., Rahman, M. A., Ali, M. M., Rahman, M. S., Motin, M. A., Sultan, M. B., &

Alam, M. R. (2007). Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel*, *86*(16), 2514–2520. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.007>

Ascorbic, P., & Method, A. (1900). Phosphorus , Reactive (Orthophosphate), 3, 1–8.

ASTM International. (2004). ASTM C566-97, Standard Test Method for Total Evaporable Moisture

Content of Aggregate by Drying. West Conshohocken, Pennsylvania.

Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., & Sizmur, T.

(2011). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, *159*(12), 3269–3282.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.023>

Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación. (n.d.). PIRÓLISIS.

Divband Hafshejani, L., Hooshmand, A., Naseri, A. A., Mohammadi, A. S., Abbasi, F., & Bhatnagar, A. (2016). Removal of nitrate from aqueous solution by modified sugarcane bagasse biochar. *Ecological Engineering*, 95, 101–111.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.035>

Elena, M., & Solano, D. (n.d.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

EPA. (1999). Seleccionando un sistema de adsorción para COV: ¿Carbon, Zeolita o Polimeros? *Boletín Técnico*, (Epa-456/F-00-001), 26.

Fan, L.-S. (1989). Principios de fluidización, 16–36.

Feng, Y., Li, X., Song, T., Fan, L., Yu, Y., Qi, J., & Wang, X. (2017). Effect of backwashing on the microbial community structure and composition of a three dimensional particle electrode coupled with biological aerated filter reactor (TDE-BAF). *Ecological Engineering*, 101, 21–27. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.011>

Gonzalez Briceño, M., & Niño Castañeda, K. (2006). *ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO PARA LA OPTIMIZACION DE LAS PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE LOS MUNICIPIOS PERTENECIENTES A LA CUENCA UBATÉ – SUÁREZ*. Universidad de La Salle.

Hammes, K., Smernik, R. J., Skjemstad, J. O., Herzog, A., Vogt, U. F., & Schmidt, M. W. I. (2006). Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw (*Oryza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Organic Geochemistry*, 37(11), 1629–1633.

<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.07.003>

Hernandez, C. M. (2004). *Analisis cualitativo de aniones*. Universidad Central de Venezuela.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, & (ICONTEC). Gestión ambiental.

Calidad de agua. Muestreo. Técnicas generales de muestreo para estudios biológicos (1995).

Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere*, 134, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>

Kanjanarong, J., Giri, B. S., Jaisi, D. P., Oliveira, F. R., Boonsawang, P., Chaiprapat, S., ...

Khanal, S. K. (2017). Removal of hydrogen sulfide generated during anaerobic treatment of sulfate-laden wastewater using biochar: Evaluation of efficiency and mechanisms.

Bioresource Technology, 234(2016), 115–121.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.009>

Madriñan, C. (2002). Compilacion y analisis sobre contaminacion del aire producida por la quema y la requema de la caña de azucar; *Saccharum officinarum* L, en el valle geografico del rio cauca., 1–110.

Manals-cutiño, E. M., Penedo-medina, M., & Salas-tort, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal, (2), 179–193.

Manuel Valiente, A. M., & Gonzalo. (2004). *Estudio de procesos de Adsorcion/Desorcion de iones en resinas encapsuladas. Aplicaciones a la remineralizacion de tejidos dentales*.

Universitat Autonoma de Barcelona.

Martínez Villalba, A. C., & Bohórquez León, L. D. (2017). Evaluación de la eficiencia de biochar

producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para la retención de fenoles en ametriz acuosa.

McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (1991). *Unit operations of chemical engineering*.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Decreto 3930 de 2010. Bogotá D.C.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015. Bogotá D.C.

Ministerio de La Protección Social. (2007). Decreto No. 1575 de 2007. *Diario Oficial*, 2007(Mayo 9), 1–14.

Mohan, D., Sarswat, A., Sik, Y., & Pittman, C. U. (2014). Bioresource Technology Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar , a renewable , low cost and sustainable adsorbent – A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>

Paco Abenza, D. (2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta, 111.

Pau Gamarra, J. (1994). Equilibrio De Adsorción De Mezclas Gaseosas En Tamices Moleculares.

Pérez, J. A. (1981). TRATAMIENTO DE AGUAS. In *Tratamiento de aguas* (pp. 136–166). Bogotá D.C.: Universidad Nacional.

Pinedo, A. U. (2013). Obtención de Biocarbónes y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual, 83. Retrieved from
http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBÓNES_CENIM_CSIC.pdf

Postgraduados, C. D. E. (2013). BIOCARBÓNES (BIOCHARS), CARACTERIZACIÓN Y

EFECTO EN LA BIOMASA Y NUTRICIÓN DE N P K.

Romero, J. A. (2000). *Purificación del Agua*. (E. C. de Ingeniería, Ed.).

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, *125*, 70–85.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>

Vacca, V. J., Colina, G., Rincón, N., Díaz, A., Behling, E., Marín, J., ... Fernández, N. (2012).

Adsorption for the removal of phenolic compounds from the effluent of a biologic reactor .

Adsorción Para La Remoción de Compuestos Fenólicos Presentes En El Efluente de Un Reactor Biológico, *35*(3), 252–260.

Willy, F., & Escobar, C. (2001). Descripción Hidráulica de la Batería de Filtros de Planta No. 1 de La Atarjea ., (1), 22.

Zhu, X., Liu, Y., Zhou, C., Luo, G., Zhang, S., & Chen, J. (2014). A novel porous carbon derived from hydrothermal carbon for efficient adsorption of tetracycline. *Carbon*, *77*, 627–636.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.05.067>

14. REGISTRO FOTOGRAFICO

14.1. Producción de Biochar

Ilustración 12. Acondicionamiento del bagazo de caña



Fuente: Autores

Ilustración 13. Resultado del acondicionamiento del bagazo de caña



Fuente: Autores

Ilustración 14. Ingreso del bagazo de caña al proceso de pirólisis en la mufla Vulcan A-550



Fuente: Autores

Ilustración 15. Biocarbón obtenido después del proceso de pirólisis



Fuente: Autores

Ilustración 16. Biochar producido



Fuente: Autores

Ilustración 17. Biochar producido en el desecador



Fuente: Autores

Ilustración 18. Almacenamiento del bochar producido en bolsas ziploc.



Fuente: Autores

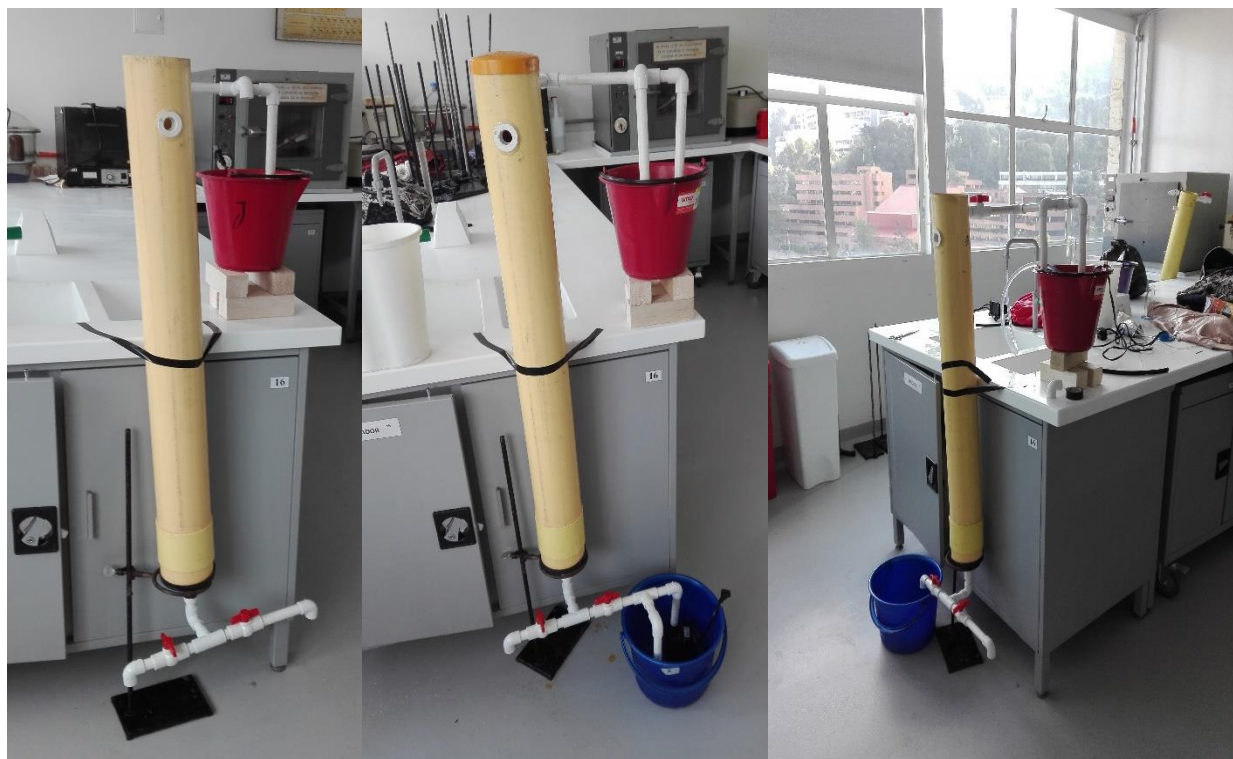
14.2. Construcción de filtros piloto

Ilustración 19. Construcción de filtros piloto



Fuente: Autores

Ilustración 20. Instalación de filtros piloto



Fuente: Autores

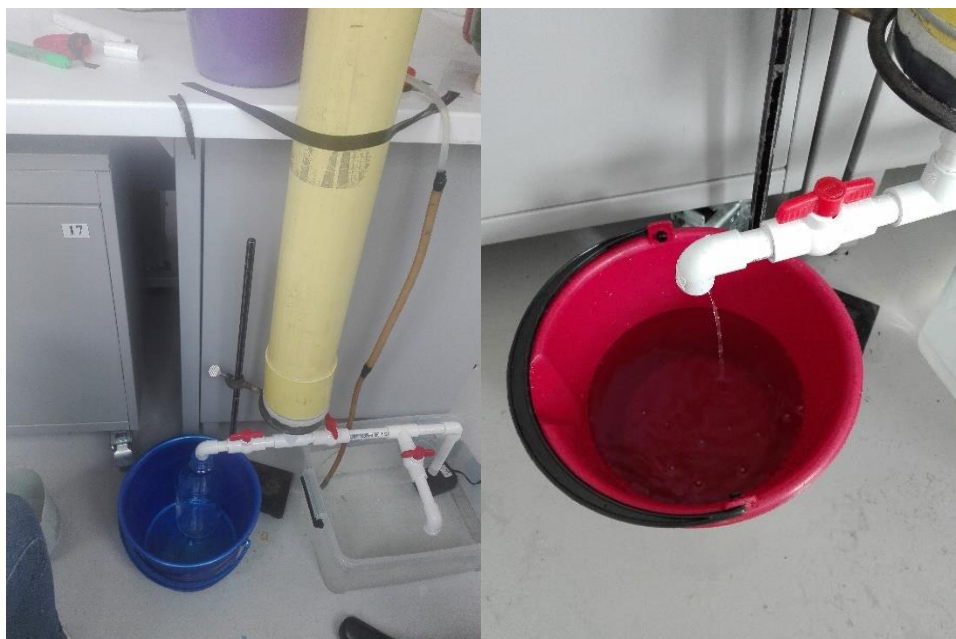
14.3. Filtración de aniones en los filtros

Ilustración 21. Filtración de agua impacta en los filtros piloto



Fuente: Autores

Ilustración 22. Recolección de muestra.



Fuente: Autores

14.4. Retrolavado de aniones en los filtros

Ilustración 23. Toma de muestras de retrolavado



Fuentes: Autores

Ilustración 24. Toma de muestra de retrolavado



Fuente: Autores

15. ANEXOS

15.1. Anexo 1. Método HACH para la determinación de fosfatos.

Phosphorus, Reactive (Orthophosphate)

DOC316.53.01119

USEPA^{1,2} PhosVer 3[®] (Ascorbic Acid) Method³
0.02 to 2.50 mg/L PO₄³⁻

Method 8048

Powder Pillows or AccuVac[®] Ampuls

Scope and application: For drinking water, wastewater and seawater.

¹ USEPA Accepted for reporting for wastewater analyses. Procedure is equivalent to USEPA and Standard Method 4500-P-E for wastewater.

² USEPA Accepted for reporting for drinking water analysis. Procedure is an acceptable version of EPA Method 365.1, approved at 40 CFR part 141 NPDWR compliance monitoring.

³ Adapted from Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.



Test preparation

Instrument-specific information

Table 1 shows sample cell and orientation requirements for reagent addition tests, such as powder pillow or bulk reagent tests. Table 2 shows sample cell and adapter requirements for AccuVac Ampul tests. The tables also show all of the instruments that have the program for this test.

To use the table, select an instrument, then read across to find the applicable information for this test.

Table 1 Instrument-specific information for reagent addition






| Instrument | Sample cell orientation | Sample cell |
|---|--|--|
| DR 6000 DR 3800 DR 2800 DR 2700 DR 1900 | The fill line is to the right. | 2495402  |
| DR 5000 DR 3900 | The fill line is toward the user. | |
| DR 900 | The orientation mark is toward the user. | 2401906  |

Table 2 Instrument-specific information for AccuVac Ampuls

| Instrument | Adapter | Sample cell |
|------------|------------------------|--|
| DR 6000 | — | 2427606  |
| DR 5000 | | |
| DR 900 | | |
| DR 3900 | LZV846 (A) | 2122800  |
| DR 1900 | 9609900 or 9609800 (C) | |
| DR 3800 | LZV584 (C) | 2122800  |
| DR 2800 | | |
| DR 2700 | | |

Before starting

Install the instrument cap on the DR 900 cell holder before ZERO or READ is pushed.

For the best results, measure the reagent blank value for each new lot of reagent. Replace the sample with deionized water in the test procedure to determine the reagent blank value. Subtract the reagent blank value from the sample results automatically with the reagent blank adjust option.

Review the Safety Data Sheets (MSDS/SDS) for the chemicals that are used. Use the recommended personal protective equipment.

Dispose of reacted solutions according to local, state and federal regulations. Refer to the Safety Data Sheets for disposal information for unused reagents. Refer to the environmental, health and safety staff for your facility and/or local regulatory agencies for further disposal information.

Items to collect

Powder pillows

| Description | Quantity |
|--|----------|
| PhosVer [®] 3 Phosphate Reagent powder pillow, 10-mL | 1 |
| Sample cells. (For information about sample cells, adapters or light shields, refer to Instrument-specific information on page 1.) | 2 |

Refer to [Consumables and replacement items](#) on page 6 for order information.

AccuVac Ampuls

| Description | Quantity |
|---|----------|
| PhosVer [®] 3 Phosphate Reagent AccuVac [®] Ampul | 1 |
| Beaker, 50-mL | 1 |
| Sample cells (For information about sample cells, adapters or light shields, refer to Instrument-specific information on page 1.) | 1 |
| Stopper for 18-mm tubes and AccuVac Ampuls | 1 |




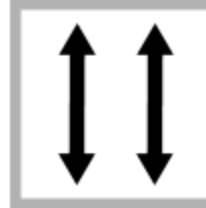




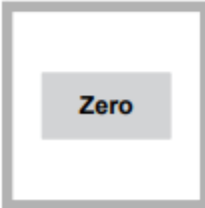



Refer to [Consumables and replacement items](#) on page 6 for order information.

Sample collection and storage

- Collect samples in clean glass or plastic bottles that have been cleaned with 6 N (1:1) hydrochloric acid and rinsed with deionized water.

- Do not use a detergent that contains phosphate to clean the sample bottles. The phosphate in the detergent will contaminate the sample.
- Analyze the samples as soon as possible for best results.
- If immediate analysis is not possible, immediately filter and keep the samples at or below 6 °C (43 °F) for a maximum of 48 hours.
- Let the sample temperature increase to room temperature before analysis.

Powder pillow procedure

| | | | |
|--|---|--|---|
|  |  |  |  |
| <p>1. Start program 490 P React. PP. For information about sample cells, adapters or light shields, refer to Instrument-specific information on page 1.</p> | <p>2. Prepare the sample: Fill a sample cell with 10 mL of sample.</p> | <p>3. Add the contents of one PhosVer 3 Phosphate Reagent Powder Pillow to the cell. A blue color develops if phosphorus is in the sample.</p> | <p>4. Immediately close the sample cell. Shake vigorously for 20–30 seconds.</p> |
|  |  |  |  |
| <p>5. Start the instrument timer. A 2-minute reaction time starts. If the sample was digested using the Acid Persulfate digestion, a 10-minute reaction period is necessary.</p> | <p>6. Prepare the blank: Fill a second sample cell with 10 mL of sample.</p> | <p>7. When the timer expires, clean the blank sample cell.</p> | <p>8. Insert the blank into the cell holder.</p> |
|  |  |  |  |
| <p>9. Push ZERO. The display shows 0.00 mg/L PO_4^{3-}.</p> | <p>10. Clean the prepared sample cell.</p> | <p>11. Insert the prepared sample into the cell holder.</p> | <p>12. Push READ. Results show in mg/L PO_4^{3-}.</p> |

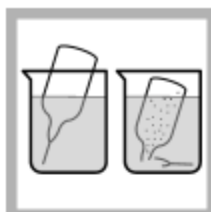
AccuVac Ampul procedure



1. Start program 492 P React. PV AV. For information about sample cells, adapters or light shields, refer to [Instrument-specific information](#) on page 1.



2. Prepare the blank: Fill the sample cell with 10 mL of sample.



3. Prepare the sample: Collect at least 40 mL of sample in a 50-mL beaker. Fill the AccuVac Ampul with sample. Keep the tip immersed while the AccuVac Ampul fills completely.



4. Close the AccuVac Ampul. Shake for approximately 30 seconds. Accuracy is not affected by undissolved powder.



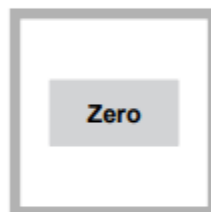
5. Start the instrument timer. A 2-minute reaction time starts. If the sample was digested using the Acid Persulfate digestion, a 10-minute reaction period is necessary.



6. When the timer expires, clean the blank sample cell.



7. Insert the blank into the cell holder.



8. Push ZERO. The display shows 0.00 mg/L PO_4^{3-} .



9. Clean the AccuVac Ampul.



10. Insert the prepared sample AccuVac Ampul into the cell holder.



11. Push READ. Results show in mg/L PO_4^{3-} .

Interferences

| Interfering substance | Interference level |
|--|--|
| Aluminum | More than 200 mg/L |
| Arsenate | Interferes at any level |
| Chromium | More than 100 mg/L |
| Copper | More than 10 mg/L |
| Hydrogen Sulfide | Interferes at any level |
| Iron | More than 100 mg/L |
| Nickel | More than 300 mg/L |
| Highly buffered samples or extreme sample pH | Can prevent the correct pH adjustment (of the sample) by the reagents. Sample pretreatment may be necessary. A pH range of 2–10 is recommended. |
| Silica | More than 50 mg/L |
| Silicate | More than 10 mg/L |
| Turbidity or color | Samples with a high amount of turbidity can give inconsistent results. The acid in the reagents can dissolve some of the suspended particles and variable desorption of orthophosphate from the particles can occur. |
| Zinc | More than 80 mg/L |

Accuracy check

Standard additions method (sample spike)

Use the standard additions method (for applicable instruments) to validate the test procedure, reagents and instrument and to find if there is an interference in the sample.

Items to collect:

- Phosphate standard solution, 50 mg/L PO_4^{3-} ampule
- Ampule breaker
- Pipet, TenSette®, 0.1–1.0 mL and tips
- Mixing cylinders, 25-mL (3)

1. Use the test procedure to measure the concentration of the sample, then keep the (unspiked) sample in the instrument.
2. Go to the Standard Additions option in the instrument menu.
3. Select the values for standard concentration, sample volume and spike volumes.
4. Open the standard solution.
5. Prepare three spiked samples: use the TenSette pipet to add 0.1 mL, 0.2 mL and 0.3 mL of the standard solution, respectively, to three 10-mL portions of fresh sample. Mix well.
6. Use the test procedure to measure the concentration of each of the spiked samples. Start with the smallest sample spike. Measure each of the spiked samples in the instrument.
7. Select **Graph** to compare the expected results to the actual results.

Note: For AccuVac® Ampuls, add 0.2 mL, 0.4 mL and 0.6 mL of the standard solution to three 50-mL portions of fresh sample.

Note: If the actual results are significantly different from the expected results, make sure that the sample volumes and sample spikes are measured accurately. The sample volumes and sample spikes that are used should agree with the selections in the standard additions menu. If the results are not within acceptable limits, the sample may contain an interference.

Standard solution method

Use the standard solution method to validate the test procedure, the reagents and the instrument.

Items to collect:

- 50 mg/L phosphate standard solution
- 100-mL volumetric flask, Class A
- 4-mL volumetric pipet, Class A and pipet filler safety bulb
- Deionized water

1. Prepare a 2.00-mg/L phosphate standard solution as follows:
 - a. Use a pipet to add 4.00 mL of a 50-mg/L phosphate standard solution into the volumetric flask. (Alternately, use one of the available mixed parameter standards. These standards contain 2.0 mg/L phosphate.)
 - b. Dilute to the mark with deionized water. Mix well. Prepare this solution daily.
2. Use the test procedure to measure the concentration of the prepared standard solution.
3. Compare the expected result to the actual result.

Note: The factory calibration can be adjusted slightly with the standard adjust option so that the instrument shows the expected value of the standard solution. The adjusted calibration is then used for all test results. This adjustment can increase the test accuracy when there are small variations in the reagents or instruments.

Method performance

The method performance data that follows was derived from laboratory tests that were measured on a spectrophotometer during ideal test conditions. Users can get different results under different test conditions.

| Program | Standard | Precision (95% Confidence Interval) | Sensitivity Concentration change per 0.010 Abs change |
|---------|---|--|--|
| 490 | 2.00 mg/L PO ₄ ³⁻ | 1.98–2.02 mg/L PO ₄ ³⁻ | 0.02 mg/L PO ₄ ³⁻ |
| 492 | 2.00 mg/L PO ₄ ³⁻ | 1.98–2.02 mg/L PO ₄ ³⁻ | 0.02 mg/L PO ₄ ³⁻ |

Summary of method

Orthophosphate reacts with molybdate in an acid medium to produce a mixed phosphate/molybdate complex. Ascorbic acid then reduces the complex, which gives an intense molybdenum blue color. The measurement wavelength is 880 nm for spectrophotometers (DR 1900: 710 nm) or 610 nm for colorimeters.

Consumables and replacement items**Required reagents**

| Description | Quantity/Test | Unit | Item no. |
|---|---------------|---------|----------|
| PhosVer® 3 Phosphate Reagent Powder Pillow ¹ , 10 mL | 1 | 100/pkg | 2106069 |
| OR | | | |
| PhosVer® 3 Phosphate Reagent AccuVac® Ampul | 1 | 25/pkg | 2508025 |

Required apparatus

| Description | Quantity/Test | Unit | Item no. |
|---|---------------|-------|----------|
| Beaker, 50 mL | 1 | each | 50041H |
| Stoppers for 18-mm tubes and AccuVac Ampuls | 2 | 6/pkg | 173106 |

Recommended standards

| Description | Unit | Item no. |
|--|--------|----------|
| Phosphate Standard Solution, 10-mL Voluette® Ampule, 50 mg/L as PO ₄ | 16/pkg | 17110 |
| Phosphate Standard Solution, 50 mg/L as PO ₄ ³⁻ | 500 mL | 17149 |
| Phosphate Standard Solution, 1 mg/L as PO ₄ ³⁻ | 500 mL | 256949 |
| Drinking Water Standard, Mixed Parameter, Inorganic for F ⁻ , NO ₃ -N, PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ | 500 mL | 2833049 |
| Wastewater Effluent Standard Solution, Mixed Parameter, for NH ₃ -N, NO ₃ -N, PO ₄ ³⁻ , COD, SO ₄ ²⁻ , TOC | 500 mL | 2833249 |
| Water, deionized | 4 L | 27256 |

Optional reagents and apparatus

| Description | Unit | Item no. |
|--|----------|----------|
| AccuVac® Drainer | each | 4103600 |
| AccuVac® Ampul Snapper | each | 2405200 |
| AccuVac® Ampul vials for sample blanks | 25/pkg | 2677925 |
| Ampule Breaker, 10-mL Voluette® Ampules | each | 2196800 |
| Bottle, sampling, with cap, low density polyethylene, 250 mL | 12/pkg | 2087076 |
| Mixing cylinder, graduated, 50 mL | each | 189641 |
| Flask, volumetric, Class A, 100 mL, glass | each | 1457442 |
| Hydrochloric Acid Solution, 6.0 N (1:1) | 500 mL | 88449 |
| Paper, pH, 0–14 pH range | 100/pkg | 2601300 |
| Phosphate Treatment Powder Pillows | 100/pkg | 1450199 |
| Phosphate Standard Solution, 10 mg/L as PO ₄ | 946 mL | 1420416 |
| Phosphate Standard Solution, 15-mg/L as PO ₄ ³⁻ | 100 mL | 1424342 |
| Phosphate Standard Solution, 100-mg/L as PO ₄ | 100 mL | 1436832 |
| Phosphate Standard Solution, 10-mL ampule, 500 mg/L as PO ₄ | 16/pkg | 1424210 |
| Phosphate Standard Solution, 500-mg/L as PO ₄ | 100 mL | 1424232 |
| Pipet, TenSette®, 0.1–1.0 mL | each | 1970001 |
| Pipet, TenSette®, 1.0–10.0 mL | each | 1970010 |
| Pipet tips for TenSette® Pipet, 0.1–1.0 mL | 50/pkg | 2185696 |
| Pipet tips for TenSette® Pipet, 0.1–1.0 mL | 1000/pkg | 2185628 |
| Pipet tips for TenSette® Pipet, 1.0–10.0 mL | 50/pkg | 2199796 |
| Pipet tips for TenSette® Pipet, 1.0–10.0 mL | 250/pkg | 2199725 |
| Pipet, volumetric, Class A, 4.00 mL | each | 1451504 |

15.2. Anexo 2. Propiedades técnicas del carbón activado de hulla bituminosa 800

| CARBON ACTIVADO DE HULLA BITUMINOSA 800 | | |
|---|---------------------|-------------------|
| Datos Técnicos | Valor | Norma que cumple |
| Número de Iodo (mg l/g de CAG) | 800 | ASTM D-4607 |
| PH | 8 | ASTM D-3838 |
| Granulometría | 8 x 30 12 x 40 | |
| Mayor que malla | 8 5% 12 5% | ANSI/AWWA B604-90 |
| Menor que malla | 30 5% 40 5% | |
| Dureza | 85 | ASTM D-3802 |
| Cenizas Totales | 4% | ASTM D-2866 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 0.52 | ASTM D-2854 |
| Humedad al empacar | 3% max. | ASTM D-2867 |
| Número de melazas | 210 min. | |
| Área superficial (método N Bet. M/gr) | 950 | ASTM D-3037 |
| Diámetro promedio del poro (Amstrong) | 30 | ASTM D-3037 |
| Volumen del poro (ml/g de CAG) | 0.80 | ASTM D-3037 |