Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Ambiental y Sanitaria | Facultad de Ingeniería

2021

Estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita para la remoción de nitrógeno amoniacal en lixiviados de un relleno sanitario

Diego Gerardo Gerardo Gualteros Velásquez
Universidad de La Salle, Bogotá, dgualteros09@unisalle.edu.co

Sebastián Darío Piñeros Cáceres
Universidad de La Salle, Bogotá, spineros54@unisalle.edu.co

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

Citación recomendada

Gualteros Velásquez, D. G., & Piñeros Cáceres, S. D. (2021). Estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita para la remoción de nitrógeno amoniacal en lixiviados de un relleno sanitario. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1956

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.

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA **FACULTADE DE INGENIERIA**

ll-2021

Estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita para la remoción de nitrógeno amoniacal en lixiviados de un relleno de sanitario.

Diego Gerardo Gualteros Velásquez

Sebastián Darío Piñeros Cáceres

Bogotá D.C, Colombia

ll - 2021

Estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita para la remoción de nitrógeno amoniacal en lixiviados de un relleno de sanitario.

Diego Gerardo Gualteros Velásquez
Sebastián Darío Piñeros Cáceres

Tesis o trabajo de investigación presentada (o) como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director:
Ing. Roberto Balda Ayala
Magister en Ingeniería Sanitaria

Universidad de La Salle

Facultad de ingeniería

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Bogotá D.C, Colombia

ll - 2021

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Ing. Roberto Balda Ayala
Magister en Ingeniería Sanitaria
Director

_____

Ing. Carlos Andrés Peña Guzmán
Jurado

Bogotá D.C, Colombia

ll – 2021

DEDICATORIA

En primer lugar, agradezco a Dios y a la vida por la oportunidad que me han brindado de estar acá y ahora. Este trabajo lo quiero dedicar especialmente a mis padres y hermanos por su incondicionalidad en cada una de las etapas del desarrollo de mi proyecto de vida. A Roberto Balda, por guiarme con sus conocimientos a través del final de este proceso tan importante para mí. Finalmente, a todas las personas que estuvieron presentes de alguna manera en este camino y me incentivaron a seguir adelante llevándome a donde me encuentro ahora.

DIEGO

Agradezco a Dios por darme la sabiduría y el entendimiento para afrontar esta etapa de mi vida, este trabajo se lo dedico a mis abuelos y padres que con su humildad y experiencia han logrado formar una gran persona, les doy gracias por cada consejo y enseñanza que me dieron en lo buenos y en lo malos momentos, a una persona muy especial que estuvo hasta casi el final de esta etapa y que me apoyo y me levanto cada vez que lo necesite, a Roberto Balda por su gran sabiduría por su conocimientos que hicieron que se lograra este objetivo tan importante en mi vida; final mente, a todos mis amigos y compañeros que estuvieron presentes en todo este proceso educativo y con los que se disfrutó y se sufrió pero que ahora se ven los frutos.

SEBASTIAN

AGRADECIMIENTOS

A Agradecemos a Dios por permitirnos estar cumpliendo esta meta en nuestras vidas, por darnos sabiduría para poder sacar adelante este estudio.

A nuestros familiares y su infinito amor incondicionalidad y creencia hacia nosotros que llevaron a la obtención de este logro.

A Roberto Balda que con sus conocimientos, destreza y apoyo dirigió esta tesis; la cual es reflejo del esfuerzo y dedicación conjunta entre estudiantes y tutor, las cuales son plasmadas en este documento.

A amigos y compañeros que estuvieron presentes en este largo camino y nos ayudaron en diferentes momentos.

A los profesores de la Universidad de La Salle, de los cuales aprendimos y recibimos grandes enseñanzas y consejos para nuestra vida profesional y personal

A Celta Brasil por brindarnos las herramientas y asesoría necesaria en cuestiones técnicas. Al equipo técnico del laboratorio CTAS de la universidad de La Salle por su apoyo y asesoría.

Resumen

Unos de los principales problemas ambientales generados en Colombia son producidos por la contaminación de residuos sólidos; las disposiciones de estos residuos generan emisiones de metano, alteraciones paisajísticas, generación de vectores como roedores, gallinazos, zancudos; los impactos negativos más significativos están relacionados con la contaminación de aguas superficiales por lixiviados, debido a la disposición final que se le dan en los rellenos sanitarios. Estos líquidos contienen grandes concentraciones de contaminantes, los cuales tienen efecto sobre el deterioro ambiental, la salud humana y la calidad de vida de futuras generaciones.

Es así como el interés de promover nuevas alternativas en el tratamiento para los lixiviados ha aumentado, en pro de la consecución de tecnologías que sean amigables con el ambiente y a muy bajo costo de operación, pero siempre buscando porcentajes altos en la eficiencia de remoción de los contaminantes que los caracterizan.

De esta forma, este estudio, buscó comparar la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita en contacto con el nitrógeno amoniacal contenido en el lixiviado de un relleno sanitario, esta comparación se logró realizar mediante la elaboración de isotermas de adsorción, las cuales establecieron la capacidad que tenía el carbón activado y la zeolita de adsorber el nitrógeno amoniacal; se realizó una prueba inicial con el fin de determinar la capacidad de adsorción con las que partían estos minerales, luego se realizaba esta prueba después de cada corrida o jornada de trabajo, esto para observar el comportamiento a través de su uso.

La experimentación y toma de muestras se logró gracias a la elaboración de dos prototipos de filtros piloto, los cuales estaban elaborados en PVC de 4 pulgadas y 3 pulgadas, a estos se les adaptó una regadera interna en el tapón superior con el fin de distribuir de manera uniforme el agua dentro de las unidades y evitar la erosión de los materiales adsorbentes.

Se realizaron siete jornadas de trabajo cada una con una duración de ocho horas, de esta forma se tomaron dos muestras por cada jornada, es decir, una muestra cada cuatro horas, con las cuales se determinaron las concentraciones iniciales y finales. Se realizaron pruebas con lixiviado y con agua impactada con nitrógeno amoniacal, esta con el fin de verificar las eficiencias y determinar la posible existencia de interferencias que tuvieran los otros contaminantes presentes en el lixiviado. Con los resultados de las concentraciones definidas, se calculó el porcentaje de remoción de nitrógeno amoniacal. Se estableció la relación costo-beneficio, donde se incluyó el gasto económico de los insumos, el de las estructuras, el gasto energético y la mano de obra del personal técnico que realizaría el mantenimiento, con este valor se logró obtener el valor del costo del metro cubico de lixiviado.

La zeolita al igual que el carbón activado demostraron ser eficientes a diferentes cargas de nitrógeno amoniacal presente en el agua de lixiviado. La zeolita no presentó mayor variación en las eficiencias comparado con el carbón activado.

Finalmente, se concluyó que, en el proceso de remoción de nitrógeno amoniacal, los materiales adsorbentes agotaban su capacidad de adsorción. La zeolita demostró al finalizar los ensayos mayor remoción del contaminante en estudio, esta comparada con la remoción del carbón activado; para el mismo número de ensayos, tanto para el caso del agua de lixiviado como para el agua impactada.

Palabras clave

Nitrógeno amoniacal, Carbón Activado, Zeolita, Adsorción, lixiviado.

Abstract

Some of the main environmental problems generated in Colombia are caused by solid waste contamination; the disposal of these wastes generates methane emissions, landscape alterations, generation of vectors such as rodents, hens, mosquitoes; the most significant negative impacts are related to the contamination of surface water by leachates, due to the final disposal in sanitary landfills. These liquids contain high concentrations of contaminants, which influence environmental deterioration, human health, and the quality of life of future generations.

Thus, the interest in promoting new alternatives in the treatment of leachate has increased, to achieve environmentally friendly technologies at very low operating costs, but always seeking high percentages in the removal efficiency of the pollutants that characterize them.

Thus, this study sought to compare the adsorption capacity of activated carbon and zeolite in contact with the ammoniacal nitrogen contained in the leachate from a sanitary landfill, this comparison was achieved through the development of adsorption isotherms, which established the capacity of activated carbon and zeolite to adsorb ammoniacal nitrogen; An initial test was carried out in order to determine the adsorption capacity of these minerals, then this test was carried out after each run or workday, in order to observe the behavior through their use.

The experimentation and sampling were achieved thanks to the elaboration of two pilot filter prototypes, which were made of 4-inch and 3-inch PVC, to which an internal sprinkler was adapted in the upper cap to distribute the water uniformly inside the units and avoid erosion of the adsorbent materials.

Seven working days were carried out, each with a duration of eight hours, and two samples were taken each day, that is, one sample every four hours, with which the initial and final concentrations were determined. Tests were carried out with leachate and with water impacted with ammoniacal nitrogen, to verify the efficiencies and determine the possible existence of interferences from other contaminants present in the leachate. With the results of the defined concentrations, the percentage of ammoniacal nitrogen removal was calculated. The cost-benefit ratio was established, which included the economic cost of the inputs, the cost of the structures, the energy cost and the labor cost of the technical personnel who would carry out the maintenance; with this value, the cost per cubic meter of leachate was obtained.

Zeolite as well as activated carbon proved to be efficient at different ammonia nitrogen loads present in the leachate water. Zeolite did not show a greater variation in efficiency compared to activated carbon.

Finally, it was concluded that, in the ammonia nitrogen removal process, the adsorbent materials exhausted their adsorption capacity. At the end of the tests, zeolite showed a higher removal of the pollutant under study, compared to the removal of activated carbon, for the same number of tests, both for the leachate water and for the impacted water.

Keywords:

Ammonia Nitrogen, Activated Carbon, Zeolite, Adsorption, Leachate.

CONTENIDO

Resumen **6**
Palabras clave 7
Abstract **8**
Keywords: 9
1. Introducción **17**
2. Planteamiento del Problema **19**
3. Objetivos **21**
3.1. Objetivo General 21
3.2. Objetivos Específicos 21
4. Alcance y Justificación **22**
5. Lixiviados de un Relleno Sanitario **24**
5.1. Relleno Sanitario 24
5.2. Compuestos Nitrogenados 25
5.2.1. Nitrógeno orgánico. 25
5.2.2. Amoniaco. 26
5.2.3. Nitrito. 26
5.2.4. Nitrato. 27
5.2.5. Nitrógeno amoniacal. 27
5.3. Lixiviados 29
5.4. Tratamiento de Lixiviados 30
5.4.1. Coagulación – Floculación. 31
5.4.2. Air Stripping. 31
5.4.3. Filtración por membrana. 32
5.4.4. Osmosis inversa. 32
5.4.5. Nanofiltración. 32
5.4.6. Tratamiento Biológico. 33
5.4.7. Lodos activados. 33
5.4.8. Tratamiento anaerobio. 34
6. Adsorción **35**
6.1. Fisisorción y Quimi sorción 37
6.2. Adsorción en una Solución. 38
Concentración de adsorción. 38
Temperatura. 38

pH......38
Superficie de adsorbente..... 38
6.3. Isotermas de Adsorción...... 38
6.3.1. Clasificaciones isotermas de adsorción...... 39
6.3.2. Isoterma de Langmuir. 41
6.3.3. Isoterma de Freundlich...... 42
6.3.4. El modelo de Langmuir-Freundlich. 43
Sistemas de adsorción Solido / Liquido 43
6.4. MEDIOS ADSORBENTES 44
6.4.2. **Carbón Activado.**..... 44
Adsorción carbón activado. 45
6.4.3. Zeolita. 45
Adsorción zeolita..... 46
Intercambio iónico zeolita. 47
7. Metodología..... 49
7.1. Fase 1. Actividades Preliminares 50
7.2. Fase 2. Selección del Tipo de Carbón Activado y la Zeolita. 51
7.3. Fase 3. Experimentación 53
7.3.1. Fase 3.1. Diseño y construcción de las columnas de filtración a escala laboratorio. 53
7.3.2. Fase 3.2. Elaboración de Isotermas de Adsorción 57
7.3.3. Fase 3.3. Trabajo de campo, Impactación de agua potable, caracterización fisicoquímica del lixiviado y el agua impactada...... 59
Trabajo de campo. 59
Impactación de agua..... 59
Caracterización fisicoquímica del lixiviado y el agua impactada. 61
7.4. Fase 4 Estudio de la eficiencia de remoción del nitrógeno amoniacal 65
7.5. **Fase 5. Descripción del procedimiento del análisis de resultados.** 67
7.5.1. Fase 5.1. Procedimiento para el análisis de resultados. 67
7.5.2. Fase 5.2. Procedimiento para el análisis estadístico ANOVA...... 67
8. Resultados. 69
8.1. Resultados 69
8.1.1. Pruebas con lixiviado. 69
8.1.2. Resultados de pruebas con lixiviado. 72
8.1.3. Pruebas con agua impactada...... 75

8.1.4. Resultados de pruebas con Agua impactada...... 76

8.2. Prueba estadística ANOVA 80

8.3. Relación costo/ beneficio de la implementación de un sistema de tratamiento de agua de lixiviado a escala real con un sistema de filtración de zeolita y uno de carbón activado.. 84

8.5.1. Descripción de las alternativas 84

8.5.2. Costos de inversión. 85

8.5.3. Costos de insumos..... 86

Costos energéticos...... 87

8.5.4. **Costos de mano de obra.** 88

8.5.5. **Costos de metro cúbico de agua tratada.**..... 89

8.5.6. Cálculo de la relación beneficio/costo. 90

9. Análisis de Resultados..... 93

10. Conclusiones..... 97

11. Recomendaciones..... 99

12. Anexos..... 101

13. Bibliografía..... 139

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1: Clasificación de isotermas IUPAC..... 39

Ilustración 2: Carbón Activado Seleccionado. 51

Ilustración 3: Zeolita Seleccionada. 52

Ilustración 4: Elementos de unidades de filtración..... 55

Ilustración 5: Unidades de filtración. 56

Ilustración 6: Materiales laboratorio de isotermas de adsorción. 57

Ilustración 7: Materiales laboratorio de isotermas de adsorción. 58

Ilustración 8: Titulación muestras de medios adsorbentes. 58

Ilustración 9: Muestreo en el Relleno Sanitario. 59

Ilustración 10: Ausencia de cloruros en muestras analizadas..... 61

Ilustración 11: Ausencia de Cloro en muestras analizadas..... 62

Ilustración 12: Materiales laboratorio determinación de nitrógeno amoniacal. 62

Ilustración 13: Equipo de destilación de muestras para determinación de nitrógeno amoniacal. 63

Ilustración 14: Titulación de muestras para determinación de Nitrógeno Amoniacal. 64

Ilustración 15: Esquema de filtración y jornadas de trabajo. 66

Ilustración 16: Isoterma de adsorción inicial para la zeolita. 70

Ilustración 17: Isoterma de adsorción inicial para el carbón activado. 71

Ilustración 18: Isotermas de adsorción primera corrida con lixiviado. 73

Ilustración 19: Isotermas de adsorción segunda corrida con lixiviado..... 73

Ilustración 20: Isotermas de adsorción tercera corrida con lixiviado. 73

Ilustración 21: Isotermas de adsorción cuarta corrida con lixiviado. 74

Ilustración 22: Isotermas de adsorción quinta corrida con lixiviado..... 74

Ilustración 23: Isotermas de adsorción sexta corrida con lixiviado..... 74

Ilustración 24: Isotermas de adsorción séptima corrida con lixiviado. 75

Ilustración 25: Isotermas de adsorción primera corrida con agua impactada..... 77

Ilustración 26: Isotermas de adsorción segunda corrida con agua impactada. 77

Ilustración 27: Isotermas de adsorción tercer corrida con agua impactada. 77

Ilustración 28: Isotermas de adsorción cuarta corrida con agua impactada. 78

Ilustración 29: Isotermas de adsorción quinta corrida con agua impactada. 78

Ilustración 30: Isotermas de adsorción sexta corrida con agua impactada..... 78

Ilustración 31: Isotermas de adsorción séptima corrida con agua impactada..... 79

Ilustración 32: Hipótesis de la prueba. 80

Ilustración 33: Análisis de varianza. 80

Ilustración 34: Resumen del modelo. 81

Ilustración 35: Información descriptiva con intervalos de confianza del 95%..... 81

Ilustración 36: Método de comparación de Tukey. 82

Ilustración 37: Gráfica de caja, análisis ANOVA. 83

Listado de Tablas

Tabla 1: Caracterización de lixiviados. 29

Tabla 2: Parámetros de diseño de unidades de filtración. 53

Tabla 3: Resultados pruebas de adsorción inicial para la zeolita. 70

Tabla 4: Resultados pruebas de adsorción inicial para el carbón activado..... 71

Tabla 5: Porcentajes de remoción promedio de nitrógeno amoniacal obtenidos con lixiviado. 72

Tabla 6: Porcentajes de remoción promedio de nitrógeno amoniacal obtenidos con agua impactada..... 76

Tabla 7: Características técnicas de las alternativas propuestas para el estudio..... 85

Tabla 8: Costos de inversión utilizados en la implementación de las unidades. 86

Tabla 9: Valores de insumos utilizados para la regeneración o cambio de los medios filtrantes..... 87

Tabla 10: Costos energéticos..... 88

Tabla 11: Valor del metro cúbico de agua tratada..... 89

Tabla 12: Parámetros a considerar para la relación beneficio - costo 92

Tabla 13: Porcentajes de remoción con lixiviado..... 114

Tabla 14: Datos de adsorción de la zeolita en la primera corrida – lixiviado. 116

Tabla 15: Datos de adsorción de carbón activado en la primera corrida – lixiviado..... 116

Tabla 16: Datos de adsorción de la zeolita en la segunda corrida – lixiviado..... 117

Tabla 17: Datos de adsorción de carbón activado en la segunda corrida – lixiviado. 117

Tabla 18: Datos de adsorción de la zeolita en la tercera corrida – lixiviado. 118

Tabla 19: Datos de adsorción de carbón activado en la tercera corrida – lixiviado. 118

Tabla 20: Datos de adsorción de la zeolita en la cuarta corrida – lixiviado. 119

Tabla 21: Datos de adsorción de carbón activado en la cuarta corrida – lixiviado. 119

Tabla 22: Datos de adsorción de la zeolita en la quinta corrida – lixiviado..... 120

Tabla 23: Datos de adsorción del carbón activado en la quinta corrida – lixiviado..... 120

Tabla 24: Datos de adsorción de la zeolita en la sexta corrida – lixiviado..... 121

Tabla 25: Datos de adsorción del carbón activado en la sexta corrida -lixiviado. 121

Tabla 26: Datos de adsorción de la zeolita en la séptima corrida – lixiviado. 122

Tabla 27: Datos de adsorción del carbón activado en la séptima corrida – lixiviado. 122

Tabla 28: Porcentajes de remoción con agua impactada. 124

Tabla 29: Datos de adsorción de la zeolita en la primera corrida - agua impactada. 127

Tabla 30: Datos de adsorción del carbón activado en la primera corrida - agua impactada. 127

Tabla 31: Datos de adsorción de la zeolita en la segunda corrida - agua impactada..... 128

Tabla 32: Datos de adsorción del carbón activado en la segunda corrida - agua impactada..... 128

Tabla 33: Datos de adsorción de la zeolita en la tercera corrida - agua impactada. 129

Tabla 34: Datos de adsorción del carbón activado en la tercera corrida - agua impactada. 129

Tabla 35: Datos de adsorción de la zeolita en la cuarta corrida - agua impactada. 130

Tabla 36: Datos de adsorción del carbón activado en la cuarta corrida - agua impactada. 130

Tabla 37: Datos de adsorción de la zeolita en la quinta corrida - agua impactada..... 131

Tabla 38: Datos de adsorción del carbón activado en la quinta corrida - agua impactada..... 131

Tabla 39: Datos de adsorción de la zeolita en la sexta corrida - agua impactada..... 132

Tabla 40: Datos de adsorción del carbón activado en la sexta corrida - agua impactada..... 132

Tabla 41: Datos de adsorción de la zeolita en la séptima corrida - agua impactada. 133

Tabla 42: Datos de adsorción del carbón activado en la séptima corrida - agua impactada. 133

1. Introducción

En Colombia, la manera más sencilla de realizar la disposición final de residuos sólidos se efectúa mediante los rellenos sanitarios, lugares técnicamente adaptados para realizar esta labor. A pesar de la creciente conciencia sobre la necesidad de Reducir, Reusar y Reciclar, el aumento de volumen y de kilogramos de residuos que son dispuestos en estos lugares ha ido aumentando.

Una vez estos residuos son depositados y enterrados en los rellenos sanitarios, es necesario minimizar los impactos de esta práctica. Para empezar, el agua que ha entrado en contacto con los residuos recoge gran cantidad de las sustancias que originalmente estaban dentro del residuo, quedando de esa manera altamente contaminada. Esta agua se denomina lixiviado y es uno de los líquidos más contaminados y contaminantes que se conozcan. De no recolectarse adecuadamente y luego tratarse, el lixiviado puede contaminar a su vez aguas subterráneas, cuerpos de agua superficiales y suelos.

La contaminación causada por el lixiviado generado, se debe principalmente al alto contenido de sólidos solubles y en suspensión, en forma orgánica e inorgánica, partículas como: metales pesados, compuestos xenobióticos e iones de amonio. Hoy en día, el lixiviado en general se caracteriza por un alto DQO (6.000-60.000 mg/L), DBO (4.000-13.000 mg/L), NH_4-N (500-2.000 mg / L) y relación variable BOD / COD (0.1-0.7). (WAPP Rathayake, 2018), valores que dependen de si el lixiviado es joven o maduro; por esta razón, y para evitar que esto ocurra, los rellenos sanitarios se impermeabilizan, se drenan apropiadamente y los lixiviados son recolectados por estos drenes, para ser tratados.

Uno de los contaminantes que incluye el lixiviado es el nitrógeno amoniacal. En condiciones normales, la fuente de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales proviene de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza. Es uno de los componentes transitorios en el agua, porque es parte del ciclo del nitrógeno, y se ve influido por la actividad biológica.

Los aportes adicionales de nitrógeno amoniacal que alteran las concentraciones normales de este nutriente implican una alteración perjudicial del medio al cual son vertidos, provocando entre otras consecuencias la disminución de los niveles de oxígeno disuelto de los ríos; el cual es consumido en los procesos de degradación bacteriana de nitrógeno; provocando un ambiente anóxico y desencadenándose así una serie de reacciones químicas y microbianas que dan como resultado la disminución de la calidad del agua, muerte de especies que habitan en el sitio, entre otras consecuencias.

Por tal razón, esta investigación buscó efectuar un estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal presente en aguas de lixiviados procedentes de un relleno sanitario; ya que la utilización de materiales adsorbentes de bajo costo, como lo es el carbón activado y la zeolita se convierten económicamente atractivos; y ya que el valor de adquisición es menor, al compararlo con otros sistemas de tratamiento, además, es factible y efectivo para la remoción de nitrógeno amoniacal proveniente de lixiviados.

Se logró determinar la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita en contacto con nitrógeno amoniacal procedente de un lixiviado y así mismo de agua impactada con el mismo contaminante mediante isotermas de adsorción; estableciendo la eficiencia de remoción de este contaminante a través de un filtro a escala laboratorio; de esta formar se pudo realizar el análisis costo beneficio del uso de estos minerales en la utilización en tratamiento de lixiviados.

2. Planteamiento del Problema.

Se estima que, en Colombia, la generación de residuos sólidos se acerca a los 12 millones de toneladas de basura al año (Revista SEMANA, 2020), residuos que son eliminados de residencias, instituciones, establecimientos comerciales e industriales, lo que indica un aumento en la producción de lixiviados. Este es generado por la descomposición biológica del componente orgánico o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación. (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005), a causa de la disposición de residuos sólidos en los rellenos sanitarios.

Un importante impacto ambiental de los rellenos sanitarios es la contaminación causada por el lixiviado generado; éste generalmente suele contener sólidos solubles y en suspensión, en forma de orgánicos e inorgánicos disueltos y en partículas, incluidos metales pesados, compuestos xenobióticos e iones de amonio, haciendo que el tratamiento sea un gran desafío de ingeniería, hoy en día el lixiviado en general se caracteriza por un alto DQO (6.000-60.000 mg/L), DBO (4.000-13.000 mg/L), NH_4-N (500-2.000 mg/L) y relación variable BOD / COD (0.1-0.7). (WAPP Rathayake, 2018), valores que dependen de si el lixiviado es joven o maduro.

En ese sentido, se han venido desarrollando estudios que contribuyan al desarrollo de técnicas de tratamiento de lixiviados, con el fin de reducir y/o eliminar las concentraciones de sustancias que deterioran el recurso hídrico; entre esas se encuentra el nitrógeno amoniacal, el cual disminuye los niveles de oxígeno disuelto indispensable para el desarrollo de procesos de degradación bacteriana generando ambientes anóxicos, acidificados, eutrofizados y en ocasiones tóxicos que, de no tratarse de manera adecuada, se ven perjudicados los ecosistemas acuáticos presentes en los cuerpos de agua donde se realizan los vertimientos, afectando la calidad de vida de las comunidades; por lo cual, se ha venido

implementando métodos fisicoquímicos, menos complejos que los biológicos, como en el caso de la filtración, microfiltración, ultrafiltración, nano filtración y osmosis inversa siendo una de las técnicas con mejores resultados en la eficiencia de remoción de este compuesto. También se han utilizado las resinas de intercambio iónico, pero estas requieren un alto nivel de adquisición, sobre todo si se han de manejar caudales elevados con concentraciones altas de contaminantes.

En virtud de lo anterior, la utilización de materiales adsorbentes de bajo costo, como lo es el carbón activado y la zeolita se convierten económicamente atractivo ya que el valor de adquisición es menor, al compararlo con otros sistemas de tratamiento, además es factible y efectivo para la remoción de nitrógeno amoniacal proveniente de lixiviados.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Efectuar un estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal presente en aguas de lixiviados procedentes de un relleno sanitario.

3.2. Objetivos Específicos

Determinar, a escala laboratorio, la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita al contacto con lixiviados procedentes de un relleno sanitario, mediante isotermas de adsorción antes y después de su corrida.

Establecer la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal del carbón activado y de la zeolita en contacto con lixiviados procedentes de un relleno sanitario, a través de un filtro a escala laboratorio.

Analizar la relación costo – beneficio del uso del carbón activado granular y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal para determinar la viabilidad de su uso en el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios.

4. Alcance y Justificación

El lixiviado es un agua que se ha contaminado por componentes de los residuos cuando se infiltra a través de un sitio de disposición de residuos sólidos. Contiene constituyentes de desecho que son solubles, que no son retenidos por el suelo y que no son degradados química y bioquímicamente. Algunos de los constituyentes potencialmente dañinos del lixiviado son producto de transformaciones químicas o bioquímicas de los residuos. (Manahan, 2007).

Existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante, usualmente los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos. (Giraldo, 2016).

El tratamiento de agua de lixiviado busca la disminución de sólidos, materia orgánica, patógenos y el exceso de algunos nutrientes de interés, principalmente del nitrógeno amoniacal debido a las consecuencias ambientales y sanitarias de su presencia en el recurso hídrico como aumento de la acidez, eutrofización y toxicidad de los ecosistemas acuáticos, que afectan sobrevivencia, crecimiento y capacidad reproductiva de algunos animales. (Calvachi & Ortiz., 2013).

Los aportes adicionales que genera el nitrógeno amoniacal generan alteraciones las cuales implican una alteración perjudicial del medio al cual son vertidos, provocando entre otras consecuencias, la disminución de los niveles de oxígeno disuelto de los ríos, el cual es consumido en los procesos de degradación bacteriana de nitrógeno amoniacal. Provocando un ambiente anóxico, desencadenándose así una serie de reacciones químicas y microbianas que dan como resultado la disminución de la calidad del agua, muerte de especies que habitan en el sitio, entre otras consecuencias. (Lourdes, 2013).

Los métodos de remoción que se han venido desarrollando los últimos años frente a la remoción de este tipo de contaminantes en el recurso hídrico ha ido avanzando con rapidez; el diseño de filtros ha sido uno de las tecnologías con mejores resultados en la reducción de estos compuestos provenientes de aguas residuales, su eficiencia de remoción, en gran medida depende de los medios filtrantes que estos utilicen, siendo las membranas de intercambio iónico en la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración la que mejores resultados obtienen, pero la adquisición de estas generan grandes costos.

Los resultados obtenidos permitieron conocer un estudio comparativo entre el carbón activado y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal en aguas de lixiviados provenientes del relleno sanitario Doña Juana, logrando determinar su capacidad de adsorción en la remoción de este contaminante mediante corridas en unidades de filtración de donde se pudo obtener un análisis para relación costo beneficio del uso del carbón activado y la zeolita en la remoción de este y así poder determinar su viabilidad de uso en el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios.

5. Lixiviados de un Relleno Sanitario

5.1. Relleno Sanitario

Es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final. (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005).

El relleno sanitario, de acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), es una "técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestia o peligro para la salud y seguridad pública. Este método utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable, y cubriendo la basura allí depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria al fin de cada jornada" (Carlos Eduardo, 2004). Básicamente consta de celdas previamente impermeabilizadas donde una vez depositados, compactados y nivelados los residuos sólidos, estos son cubiertos con tierra u otro material inerte, al menos una vez al día. (Katia M. Noguera ;Jesús T. Olivero, 2010).

5.2. Compuestos Nitrogenados

El nitrógeno es un elemento indispensable para todas las formas de vida. Su química es versátil y junto con el oxígeno le dan el carácter y variedad a los compuestos orgánicos que se diferencian de los hidrocarburos. El nitrógeno es parte esencial tanto de las proteínas como de los ácidos nucleicos y su proporción en masa en la materia orgánica es sólo superada por el oxígeno y el carbono. (Industrial, 2017).

El nitrógeno presente en las aguas residuales urbanas generalmente se encuentra en forma de amonio, urea, ácido úrico, proteínas, azúcares aminados y aminas, entre otros. (Andres Miguel Zornaza; Liz Avendaño Villafranca; Luis Borras Falomir; Daniel Aguado Garcia; Jose Luis Alsonso, 2014).

5.2.1. Nitrógeno orgánico. Inicialmente, cuando se descarga un agua residual cruda o desechos orgánicos sólidos, el nitrógeno está presente asociado a moléculas orgánicas como las proteínas, los ácidos nucleicos o metabolitos finales como la urea y el ácido úrico. Esta forma se denomina nitrógeno orgánico: aunque no tiene un efecto químico característico, como materia orgánica está sujeta al consumo por parte de microrganismos, los cuales eventualmente procesarán y transformarán el nitrógeno presente en amoniaco. (Industrial, 2017).

El nitrógeno orgánico es transformado a ion amonio por la actividad microbiana. Los microorganismos proteolíticos degradan las proteínas hasta aminoácidos que, a su vez, son degradados a amonio por los organismos amonificantes reintroduciendo de esta forma el amoniaco o el amonio en el ciclo del nitrógeno. (Andres Miguel Zornaza; Liz Avendaño Villafranca; Luis Borras Falomir; Daniel Aguado Garcia; Jose Luis Alsonso, 2014).

5.2.2. Amoniaco. El nitrógeno presente en forma de amoniaco se denomina nitrógeno amoniacal. Una característica particular es que su comportamiento depende del pH: a pH ácido permanece disuelto en el agua como ion amonio mientras a pH alcalino se transforma en gas amoniaco el cual es susceptible de volatilizarse al ambiente. (Microlab Industrial, 2017).

La urea, el compuesto orgánico con más nitrógeno, es hidrolizada por la enzima ureasa hasta amoníaco y anhídrido carbónico. Por tanto, la generación de amoniaco comienza a producirse antes de llegar las aguas residuales a la estación depuradora. (Andres Miguel Zornaza; Liz Avendaño Villafranca; Luis Borras Falomir; Daniel Aguado Garcia; Jose Luis Alsonso, 2014).

5.2.3. Nitrito. El nitrito es la forma de nitrógeno que resulta de la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal. Este proceso, denominado nitrificación, es llevado a cabo por un grupo selecto de bacterias (Nitrosomonas) cuyo crecimiento y metabolismo es relativamente lento, por lo que una alteración súbita de las condiciones de operación de un ecosistema o una planta tratadora que afecte a estas bacterias ocasiona un pico en la concentración del nitrógeno amoniacal. Irónicamente, el nitrito en sí es una especie química cuya toxicidad aguda es incluso peor que la del amoniaco, pero no se volatiliza y se oxida rápidamente a nitrato por acción microbiológica. (Industrial, 2017).

Para completar el ciclo, los iones nitrato y nitrito son convertidos al estado gaseoso N_2 o N_2O mediante la acción de las bacterias desnitrificantes. (Andres Miguel Zornaza; Liz Avendaño Villafranca; Luis Borras Falomir; Daniel Aguado Garcia; Jose Luis Alsonso, 2014).

5.2.4. Nitrato. El nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno y a diferencia de las formas anteriores es mucho menos tóxico, por lo que puede acumularse y descargarse más fácilmente sin alterar los ecosistemas o la salud pública. De aquí, hay dos paraderos finales: el primero es su asimilación por plantas y algas, que pueden tomar tanto amoniaco como nitrato del ambiente y de manera que ingresa nuevamente a la cadena trófica.

El segundo es que sea transformado nuevamente en gas nitrógeno que regresa a la atmósfera: las bacterias llamadas desnitrificantes pueden reducirlo a nitrito y luego metabolizarlo a gas nitrógeno, aunque para ello requieren condiciones anaerobias. (Industrial, 2017).

5.2.5. Nitrógeno amoniacal. En condiciones normales la fuente de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales proviene de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza. Es uno de los componentes transitorios en el agua, porque es parte del ciclo del nitrógeno, y se ve influido por la actividad biológica. En ambos casos el nitrógeno amoniacal, se origina de la degradación del nitrógeno orgánico y, este a su vez, por acción bacteriana, se va oxidando gradualmente a nitritos y finalmente a nitratos. (Lourdes, 2013).

El nitrógeno amoniacal se produce por descomposición de la urea, compuesto siempre presente en las aguas residuales sanitarias, por hidrólisis enzimática. Esta descomposición da como productos NH_3 (amoníaco disuelto) y NH_4+ (ion amonio). La hidrólisis es rápida, por lo que la urea raramente está presente en aguas residuales que no sean muy recientes. De hecho, la edad de un agua residual puede medirse en función de la proporción de amoníaco presente.

El amoníaco está en equilibrio con el anión amonio, en función del pH de la solución, de acuerdo con la ecuación (1):

$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^-$ (1)

A niveles de pH superiores a 7, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda, mientras que a valores de pH inferiores a 7 el NH_4^+ es predominante.

El nitrógeno amoniacal es entonces el resultado de la hidrólisis de la urea, según la ecuación química (2), así como de otras sustancias proteínicas presentes en el agua residual.

$(NH_2)2CO + H_2O \rightarrow CO_2 + 2NH_3$ (2)

La hidrólisis de la urea se ve favorecida por un pH alcalino, entre 8,2 y 9,0, y el avance de la hidrólisis origina a su vez un aumento del pH del medio. Como se ha indicado, el proceso es rápido y produce una cantidad excesiva de amoníaco, que sobrepasa los requerimientos de los microorganismos para la síntesis proteica, con la consecuente pérdida de nitrógeno en el medio y posible peligro de toxicidad. Las aguas superficiales no deben contener amoníaco y, en general, la presencia de amoníaco libre o ion amonio es considerado como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa. (Esther Siles Fernández, 2008).

5.3. Lixiviados

Líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación. (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2005).

La variabilidad de estos líquidos se puede clasificar en tres tipos. Tipo I (Lixiviados Jóvenes), tipo II (Lixiviados intermedios) y tipo III (Lixiviados viejos) (Ver Tabla 1) Los lixiviados tipo I se caracterizan por poseer una alta concentración de materia orgánica biodegradable (ácidos grasos volátiles), que disminuye conforme incrementa la edad del relleno, a causa de la descomposición anaeróbica.

Otra característica es que poseen alta demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO), que determinan el índice de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) del lixiviado. (CANTO, 2014).

Tabla 1: Caracterización de lixiviados.

Tipo de Lixiviado	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (Años)	< 5	5 – 10	> 10
pH	< 6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
DBO_5 / DQO	> 0.5	0.1 – 0.5	< 0.1
DQO	> 15000	5000 – 15000	< 5000
N-NH_3 (mg/L)	< 400	-	> 400
Metales Pesados(mg/L)	> 2	< 2	< 2

Fuente: (CANTO, 2014).

5.4. Tratamiento de Lixiviados

Los lixiviados se generan a partir del agua que traen los residuos, como producto de la percolación del agua de lluvia a través del relleno y por los procesos bioquímicos al interior de las células (Renou et al., 2008). Los lixiviados pueden contener grandes cantidades de materia orgánica, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales (S. Renou aJ.G. Givaudan a, 2008)Las características químicas de los lixiviados varían de manera significativa en función de numerosos factores como son: el clima, la edad del relleno, la composición de la basura y la geología del terreno (Dogan Karadag. a,Sema Tok, Eda Akgul, Mustafa Turan, Mustafa Ozturk, ,Ahmet Demir , 2008).

Existen diferentes técnicas de tratamiento para los lixiviados tales como el tratamiento fisicoquímico. Cuando el lixiviado contiene una gran cantidad de compuestos orgánicos no biodegradables y alta concentración de materiales bio-tóxicos, los métodos fisicoquímicos deben usarse junto con el tratamiento biológico. Se sabe que ninguno de los métodos fisicoquímicos por sí solo puede lograr una efectividad universal o ideal para la eliminación completa de todos los contaminantes del lixiviado estabilizado.

Lixiviados viejos o lixiviados jóvenes tratados biológicamente, se caracterizan por tener una DQO alta, DBO baja, NH_4-N relativamente alto, un alto potencial de oxidación-reducción de la alcalinidad y eliminación de amoníaco; se pueden tratar utilizando métodos fisicoquímicos como la coagulación floculación, precipitación química, ósmosis inversa, carbón activado, evaporación, filtración por membrana (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.1. Coagulación – Floculación. La coagulación - floculación es un método de pretratamiento eficaz en términos de eliminación de DQO y metales pesados. Las desventajas asociadas a este proceso son el alto consumo de químicos que aumenta el costo operativo. Además, a causa de la alta dependencia del pH se suele presentar dificultad en el mantenimiento sumado al exceso en la producción de lodos. (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.2. Air Stripping. Una de las alternativas más eficaces en cuanto a remoción de nitrógeno es el Air scripting o extracción de aire, es un método exitoso que se utiliza para reducir el contenido de NH_3 en el lixiviado. Cuando el pH está llegando a 11, todas las formas de NH_3 se convierten en gas el cual se disuelve en aguas residuales. Manteniendo el pH alrededor de 11 en el separador y agregando NaOH, el NH_3 disuelto puede ser liberado de las aguas residuales. El fundamento principal de la técnica se debe principalmente a la desorción a través de la superficie del agua.

El principal inconveniente de la extracción de aire es la contaminación ambiental debido al NH_3 liberando a la atmósfera. Por lo tanto, se necesita un tratamiento adicional para los gases de escape. Además, aunque la extracción de aire es efectiva en la eliminación de NH_3, se presenta una baja eficiencia de eliminación de materia orgánica. Sin embargo, se descubrió que la extracción de aire es el método alternativo más económico y rentable para la alta eliminación de amoníaco en comparación con otros métodos como la filtración por membrana. (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.3. Filtración por membrana. La filtración por membrana es un método muy eficaz en la eliminación casi completa de materia orgánica, microorganismos, metales pesados y otros materiales inorgánicos contenido en lixiviados. La microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa son los cuatro tipos de métodos de filtración por membrana. (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.4. Osmosis inversa. La ósmosis inversa utiliza una membrana semipermeable para purificar el agua. Dicha técnica no es proceso natural por lo que necesita de energía, la cual es empleada para "empujar" el agua a través de la membrana aplicando presión que permite el paso de esta mientras retiene casi todos los contaminantes. La osmosis inversa puede eliminar el 99% de iones disueltos, orgánicos, metales pesados, partículas coloidales y bacterias. (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.5. Nanofiltración. La nanofiltración también funciona como el sistema osmosis inversa, la teoría del tratamiento de la nano filtración se fundamenta básicamente en su estructura de membrana que tiene carga superficial, rechazando partículas cargadas con un diámetro menor al de los poros de su membrana. La ventaja de la nano filtración en comparación con la ósmosis inversa y la ultrafiltración es que es posible separar las sustancias orgánicas de ciertos tipos de sales, por lo que la nano filtración resulta eficaz en el tratamiento de lixiviados con altas concentraciones de sal. (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.6. Tratamiento Biológico. El tratamiento biológico del lixiviado es el método de tratamiento más utilizado en el mundo en comparación con los métodos fisicoquímicos. Los métodos biológicos son ambientalmente amistosos. El tratamiento biológico puede ser aeróbico, anaeróbico o natural. Con un análisis adecuado y control ambiental, casi todos los contaminantes pueden ser eliminados biológicamente. (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.7. Lodos activados. El sistema de lodos activados es un proceso de tratamiento biológico que implica la conversión de materia orgánica y otros componentes del agua residual en gases y tejido celular de microorganismos por una gran masa de microbios mantenidos en suspensión mediante mezcla y aireación. El sistema de lodos activados es un proceso de crecimiento suspendido, que contiene tres componentes básicos. Un reactor en el cual los microorganismos responsables del tratamiento son mantenidos en suspensión y aireados, una unidad de separación líquido-sólido que puede ser un tanque de sedimentación y un sistema de reciclaje para devolver los sólidos eliminados por la unidad de separación de regreso al reactor. Se ha demostrado que los lodos activados son un método prometedor para el tratamiento de lixiviados. (WAPP Rathayake, 2018).

Este sistema tiene muchas ventajas en el tratamiento de lixiviados. Se disminuyen los problemas asociados al olor, también el lodo generado puede usarse como acondicionador del suelo a menos que contenga metales pesados. La acumulación de lodos y la formación de espuma son los principales problemas asociados. La deficiencia de nutrientes también afecta la actividad biológica en el reactor y podría ser necesaria la adición de fósforo. El lodo debe desecharse como residuo peligroso porque puede contener muchos materiales desconocidos. (WAPP Rathayake, 2018).

5.4.8. Tratamiento anaerobio. El tratamiento anaerobio se conoce como el método más adecuado para aguas residuales altamente concentradas como el lixiviado. Requieren de menos energía, existe una menor producción de lodos biológicos, menos requerimiento de nutrientes, tiene una operación inferior en costos y en producción de metano. Éstas son las principales ventajas de tratamiento anaerobio. (WAPP Rathayake, 2018).

Un tiempo de inicio más prolongado, el requisito de adición de alcalinidad es incapaz de eliminar nutrientes biológicos, es altamente sensible a bajas temperaturas en las velocidades de reacción y la necesidad de un tratamiento aeróbico adicional son las desventajas del tratamiento anaeróbico. El proceso anaeróbico de alta velocidad, como la capa de lodo anaeróbico de flujo ascendente, es uno de los métodos de tratamiento anaeróbico más frecuentemente probados y utilizados. (WAPP Rathayake, 2018).

6. Adsorción

La adsorción es un método común en el tratamiento de aguas residuales donde los contaminantes se transportan desde medios acuosos a una superficie sólida. Cuando el líquido entra en contacto con una superficie altamente porosa, los contaminantes se unen a la superficie por las fuerzas intermoleculares de la superficie del líquido y se depositan en la superficie sólida.

Debido a la alta relación área/volumen, propiedades físicas características como la estructura microporosa y la reactividad de la superficie, el carbón activado es el material de adsorción más utilizado recientemente. Está comprobado que la naturaleza química de la superficie, como la cantidad de grupos funcionales que contienen oxígeno también se contabiliza en determinar la capacidad de adsorción del carbón activado. El carbón activado granular (GAC) y el carbón activado en polvo (PAC) son dos tipos de carbón activado, que se utilizan considerablemente en el tratamiento de lixiviados (WAPP Rathayake, 2018).

La adsorción es la acumulación de una sustancia en una interfase. Se presenta en todos los tipos de interfase, desatacando la interfase, gas-solido, disolución – solido. Se distinguen dos principales tipos de adsorción: la adsorción física, que es rápida, reversible y no especifica, en la adsorción está reteniendo en la superficie solo por las fuerzas de dispersión y polarización, mientras que la quimi adsorción es sencillamente la formación de compuestos bidimensionales, por ejemplo, lo que ocurre cuando los gases se ponen en contacto con superficies metálicas limpias. (Levitt, 1997).

La cantidad de sustancias adsorbidas sobre cualquier superficie decrece al aumentar la temperatura, porque todos los procesos de adsorción son exotérmicos, a temperatura constante, la cantidad adsorbida aumenta con la concentración absorbible (en la fase gaseosa o en la disolución) y la relación fundamental entre la cantidad absorbida (x) y la concentración (c) se conoce como isoterma de adsorción. (Levitt, 1997).

Generalmente, para un mismo sistema en iguales condiciones, la adsorción es proporcional a la superficie del adsorbente. Este hecho origina un potencial de atracción perpendicular a la superficie del sólido, que es, en definitiva, el responsable de las propiedades de adsorción. (Sánches, 2018).

La capacidad de adsorción es una de las características más importantes de un adsorbente. Se define como la cantidad de adsorbato que puede retenerse en el adsorbente por unidad de masa o volumen. La capacidad de adsorción se relaciona directamente con la superficie específica del material y con su volumen de poros, así como con el tamaño de poro promedio del material. ¨Capitulo 2 Adsorción¨ (s.f.)

Se supone que el adsorbente dispone de un número finito de sitios de adsorción, estando parte de ellos ocupados por moléculas de adsorbato y otras partes libres. La velocidad de adsorción depende de la presión y del número de sitios libres, mientras que la velocidad de desorción es dependiente del número de sitios ocupados. El estado de equilibrio se obtiene cuando ambas velocidades de adsorción y desorción se igualan, para cierto valor de presión y proporción de sitios libres.

6.1. Fisisorción y Quimi sorción

La naturaleza de las fuerzas involucradas en el proceso de adsorción puede ser muy diversa; convencionalmente se habla de fisisorción y quimisorción, según aquéllas sean más débiles (fuerzas de Van del Waals) o impliquen enlaces químicos (fuerzas de enlace). La diferencia fundamental entre ambas es que, en el caso de la fisisorción, tanto la especie adsorbida (fisisorbida) como el adsorbente conservan su naturaleza química, mientras que, durante la Quimi sorción, la especie adsorbida (Quimi sorbida) sufre una transformación, generalmente acompañada de cambio químico del adsorbente, más o menos intensa, para dar lugar a especies distintas. (Sánches, 2018).

Existen otras diferencias entre fisisorción y quimisorción, por ejemplo:

- En la fisisorción, las moléculas se adsorben formando capas sucesivas (adsorción en multicapas), mientras que, en el caso de la quimisorción, y debido al enlace químico que existe entre la superficie del sólido y el adsorbato, la adsorción queda restringida a una única monocapa.
- En la quimisorción ocurre una transformación química, y, como consecuencia, la energía de adsorción es importante, alcanzando valores característicos de las energías de reacción (pueden ir desde 50 hasta 800 kJ/mol), pudiendo ser éstas exotérmicas o endotérmicas. Por el contrario, la fisisorción es más débil y siempre exotérmica. Debido a esto, la energía de desorción de las especies fisisorbidas es generalmente menor que la de las especies quimisorbidas (del orden de 8 a 70 kJ o menos por mol de sustancia adsorbida).
- En la fisisorción la molécula adsorbida mantiene su identidad, y se establece un equilibrio de adsorción que es reversible. La fisisorción es un fenómeno general con un grado de especificidad relativamente bajo. Si una molécula es quimisorbida experimenta reacción o disociación, pierde su identidad y no puede recuperarse por desorción.

6.2. Adsorción en una Solución. El grado de adsorción de una solución depende de vario factores:

Concentración de adsorción. Si aumenta la conservación de soluto, aumentará el grado de adsorción de que se produce en equilibrio hasta que se alcance un valor limitante. Conviene señalar que, en la mayoría de los casos de adsorción de una solución, la cantidad relativa de soluto que se elimina es mayor en las soluciones diluidas. (Aulton, 2004).

Temperatura. La adsorción suele ser exotérmica; por consiguiente, al aumentar la temperatura disminuye la adsorción. (Aulton, 2004).

pH. El pH suele modificar la ionización del soluto y su influencia dependerá de los materiales que sean más adsorbidos. (Aulton, 2004).

Superficie de adsorbente. Si aumenta el área superficial reduciendo el tamaño de las partículas o usando un material poroso, aumentara el grado de adsorción. (Aulton, 2004).

6.3. Isotermas de Adsorción.

Cada adsorbente tiene una capacidad de adsorción a la que se le conoce como isoterma de adsorción; el estudio de adsorción puede realizarse mediante la identificación de la forma y la curvatura de las isotermas de adsorción y mediante su formulación matemática. La forma de las isotermas depende, en gran medida, del tipo de adsorbente y el adsorbato, por tanto, las mismas serán diferentes para cada tipo de estos. Las isotermas de adsorción experimentales se dividen, por lo general, en seis categorías, según la clasificación de la IUPAC, pero solo se utilizan las cinco primeras (Ver Ilustración 1). (Garrido, Sosa, Ramírez, & Fonseca, 2018). (Rouquerol F, Rouquerol J, Sing KSW, Llewellyn P, Maurin G, 2014).

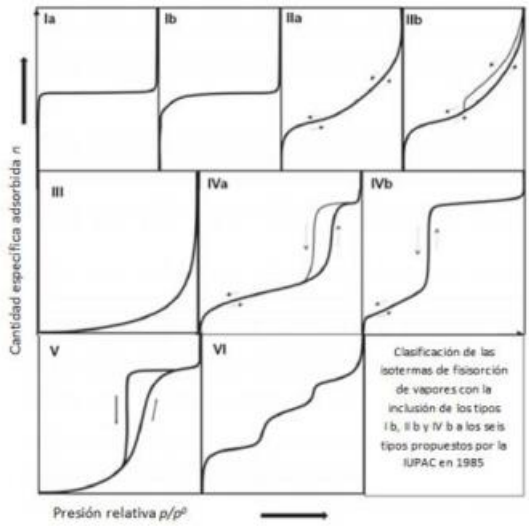


Ilustración 1: Clasificación de isotermas IUPAC

Fuente: *(Jean, Rouquerol; Françoise, Rouquerol, Philip, Llewellyn; Guillaume, Maurin; Kenneth S.W. Sing, 2014)*

6.3.1. Clasificaciones isotermas de adsorción.

La isoterma tipo Ia, representada matemáticamente por la ecuación de Langmuir, es característica de procesos de quimisorción, llenado de microporos, o adsorción física en superficies muy homogéneas. Son cóncavas respecto al eje de las abscisas, y su pendiente aumenta rápidamente a presiones relativas bajas, hasta alcanzar un valor constante. La isoterma tipo Ib es una variante donde los microporos son microporos anchos, y por ello la concavidad es mucho más marcada en este caso que la anterior, llegando igualmente a su posterior zona de valor constante.

La isoterma IIa corresponde a adsorción en mono-multicapas, en sólidos no porosos o macroporosos, que presentan heterogeneidad superficial. Son isotermas cóncavas respecto al eje de las abscisas a presiones relativas bajas, y convexas para valores elevados. Se caracteriza, además, porque la isoterma de desorción se superpone exactamente sobre la de adsorción, la adsorción-desorción es totalmente reversible. El tipo IIb es típica de agregados no rígidos, como cementos o pigmentos. La desorción origina un ciclo de histéresis, a presiones relativas altas y aparece un bucle tipo H, generalmente debido a condensación interparticular.

El tipo III se relaciona con procesos de adsorción en solidos macroporosos o no porosos con una interacción adsorbato/adsorbente de carácter débil. El estudio de estos procesos es difícil, puesto que no existe prácticamente una interacción superficial sólido-gas.

La isoterma tipo IVa se caracteriza por la presencia de ciclos de histéresis, y se considera típica de sólidos mesoporosos. Es similar al tipo IIa en la zona de presiones bajas e intermedias, si bien a presiones medias comienza la condensación capilar en los mesoporos. La forma y extensión del bucle de histéresis depende del adsorbato y del adsorbente. La isoterma tipo IVb, por el contrario, no presenta ese bucle, presentando un único escalón en la adsorción y en la desorción. Se obtiene en sólidos mesoporosos ordenados.

El tipo V indica adsorción débil al principio, seguida de condensación capilar. Son poco comunes, y de difícil interpretación debido a que la afinidad del adsorbente por el adsorbato es baja. Es característica de adsorción de vapor de agua en carbones activados, en vidrios, etc.

Finalmente, las isotermas de tipo VI son características de procesos de adsorción en multicapa de gases nobles sobre superficies muy homogéneas, donde cada capa empieza a formarse cuando la anterior está ya prácticamente completa. Cada una de las capas se adsorbe dentro de un cierto rango de presiones, correspondiendo cada escalón al llenado de una capa, hasta un total de 2 o 3 capas. Se trata de procesos de adsorción cooperativa, en la que cada capa contribuye positivamente a la formación de la siguiente mediante interacciones laterales de las propias moléculas. No es muy habitual. (Jean, Rouquerol; Françoise, Rouquerol, Philip, Llewellyn; Guillaume, Maurin; Kenneth S.W. Sing, 2014).

Para el análisis de los datos experimentales se han desarrollado diversos modelos matemáticos, siendo los más utilizados el de Langmuir, Freundlich y Langmuir-Freundlich. Aunque existen otros modelos como el de Redlinch-Peterson, Toth, Tempkin, entre otros. (Garrido, Sosa, Ramírez, & Fonseca, 2018).

6.3.2. Isoterma de Langmuir. Este modelo considera que la superficie está idealmente limpia y homogénea. La adsorción ocurre en sitios específicos del adsorbente y todos son idénticos. Solo un adsorbato ocupa cada sitio y una vez formada la monocapa cesa la adsorción. El modelo puede ser descrito por la ecuación:

$$Qads = \frac{K_L .(N_m .C_{eq})}{1 + K_L . C_{eq}}$$

Donde:

Q ads: Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (mol/g).

Nm: Capacidad máxima de adsorción (mol/g).

KL: Constante de saturación (mol/L).

C eq: Concentración del adsorbato en la disolución en el equilibrio (mol/L).

Las características esenciales del modelo de Langmuir pueden ser expresadas en términos del factor de separación (RL), el cual está definido por la ecuación:

$$R_{L=} \frac{1}{1+ K_L \, . \, C_{eq}}$$

De acuerdo con el valor de RL la forma de la isoterma puede ser interpretada de la siguiente forma: (Garrido, Sosa, Ramírez, & Fonseca, 2018).

RL > 1: Adsorción no favorable.

RL = 1: Adsorción lineal.

0 < RL < 1: Adsorción favorable.

RL = 0: Adsorción irreversible.

6.3.3. Isoterma de Freundlich. Este modelo fue establecido empíricamente y se basa en que la adsorción es de naturaleza física, no hay asociación de las moléculas adsorbidas y la superficie del adsorbente es heterogénea. Es un modelo útil para determinar la adsorción en soluciones líquidas, y riguroso para los casos que ocurren en superficies heterogéneas. El modelo clásico de Freundlich está descrito por la ecuación, (Garrido, Sosa, Ramírez, & Fonseca, 2018):

$$Qads = \; K_f \, . C_{eq}{}^{1/n}$$

Donde:

Q ads: Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (mol/g).

1/n: Coeficiente de Freundlich (1<n<10).

kF: Constante de Freundlich (mol/g).

C eq: Concentración del adsorbato en la disolución en el equilibrio (mol/L).

6.3.4. El modelo de Langmuir-Freundlich. Es una combinación de estos, por lo que representa una adsorción mediante una combinación de mecanismos sobre materiales heterogéneos. La siguiente ecuación describe este modelo. (Garrido, Sosa, Ramírez, & Fonseca, 2018).

$$Qads = \frac{K \,.\, {C_{eq}}^{1/n}}{1 + b \,.\, {C_{eq}}^{1/n}}$$

Donde:

Q ads: Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (mol/g).

1/n: Coeficiente de Freundlich (1<n<10).

K, b: Constantes empíricas del modelo de Langmuir.

C eq: Concentración del adsorbato en la disolución en el equilibrio (mol/L).

***Sistemas de adsorción Solido / Liquido*.** La adsorción de mayor interés es la de un soluto en una solución a un sólido. Las ecuaciones más utilizadas para interpretar los datos son la de Langmuir y de Freundlich. Las presiones son sustituidas por las concentraciones, de manera que la ecuación de Langmuir queda así:

$$\frac{x}{m} = \frac{abC}{1 + bC}$$

Donde x es la cantidad de soluto adsorbido por un peso m de adsorbente, C es la concentración de la solución en equilibrio y b y a son constantes. (Aulton, 2004).

6.4. MEDIOS ADSORBENTES

6.4.2. **Carbón Activado.** El carbón activado es un mineral de origen orgánico constituido básicamente por el carbón, se trata de un material poroso que se obtiene por carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos y turbas, con el fin de obtener un alto grado de porosidad y una importante superficie intraarticular. (Martín M., 2014).

Este posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 1,500 (m^2/g de carbón), metros cuadrados, por gramo de carbón, con esta superficie el carbón activado podrá adsorber (retener sobre su superficie). La elevada superficie específica, facilita la adsorción física de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquidos. (Universidad de Sevilla, 2006).

A partir de la información recolectada, se encontraron dos clases de carbón activado, con altos porcentajes de remoción en contaminantes provenientes de las aguas residuales: el carbón activado bituminoso y el lignítico, de carácter granular. El carbón activado de origen bituminoso suele tener un área superficial mayor que el de origen lignítico, pero el lignítico tiene una mayor proporción de microporos – diámetro mayor a 500 m^2 / g; esta superficie interna hace que el carbón activado granular lignítico tenga una adsorción ideal en el tratamiento de aguas residuales (LENNTECH, 2020).

Adsorción carbón activado. Las moléculas en fase gas o de líquido serán unidas físicamente a una superficie, en este caso la superficie es de carbón activado. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- Macrotransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de microporos del carbón activado.
- Microtransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de microporos del carbón activado.
- Adsorción: Adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activado en los mesoporos y microporos del carbón activado.

El nivel de actividad de la adsorción depende de la concentración de la sustancia en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar (o lo que es lo mismo soluble en agua) no puede ser eliminada o es mal eliminada por el carbón activado. (Manual de carbón activado, Dante, Castillo).

6.4.3. Zeolita. La zeolita es un mineral volcánico, es un aluminosilicatos altamente cristalino que al deshidratarse desarrolla una estructura porosa con diámetros entre los 3 y los 10 angstroms. En su estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento que permiten el intercambio iónico y la deshidratación reversible. (Bosch & Schifter, 1997).

Teniendo en cuenta que las zeolitas son minerales de aluminosilicatos hidratados con una estructura tipo jaula que, alberga grandes áreas tanto externa como internamente y además poseen una estructura de carga negativa debido a la sustitución iso-mórfica de cationes en el mineral de forma natural, por lo que tiene una gran afinidad a adsorber cationes, como metales pesados, amoniaco o moléculas orgánicas. (Alcivar, Pérez, & Gámez, 2017).

Las zeolitas se encuentran, tanto en rocas sedimentarias como en volcánicas y metamórficas. Se suele utilizar como absorbente, como en la coloración de líquidos y gases y en el control de la contaminación mediante un intercambio iónico, estos se llevan a cabo a través de una solución acuosa, por lo cual se utiliza para ablandar aguas duras residuales, de modo que al pasar el líquido a través de ella se logre atrapar y reemplazar los iones que se encuentran en la solución por otros que disminuyan las propiedades de dureza (Martín M., 2014).

Para este estudio se estableció la Cli-noptilolita, que es una zeolita de origen natural muy abundante y por lo tanto, es un material económico; su estructura altamente porosa captura las partículas contaminantes de hasta 4 micras y su alta carga negativa hace de ésta una alternativa efectiva y asequible en el tratamiento de aguas residuales, ya que en su estructura es capaz de adsorber los elementos más comunes de las aguas residuales como son: amoniaco, ácido sulfhídrico, metales pesados, entre otros; además de la retención de ciertas colonias de microorganismos, nocivos para la salud. (Montes, López, Mercado, Camacho, & León, 2017).

Adsorción zeolita. La alta capacidad de adsorción de las zeolitas es debida a la elevada superficie específica como resultado de la presencia de canales y cavidades en su interior. Esta superficie es accesible a diferentes adsorbatos a través de los microporos. De manera que las zeolitas pueden actuar como tamices moleculares ya que el proceso de adsorción es selectivo al tamaño y forma del adsorbato. (Sánches, 2018).

Adicionalmente, la composición química de la zeolita determina las características de hidrofobicidad (la cual aumenta al aumentar la relación Si/Al) e hidrofilicidad (que aumenta al disminuir la relación Si/Al o aumentar la presencia de defectos en forma de grupos SiOH). El control de la composición química de la zeolita puede dar lugar a procesos de adsorción selectiva. Por ejemplo, las zeolitas de bajo contenido en sílice poseen alta selectividad a la adsorción de moléculas hidrófilas. Las zeolitas con alto contenido de sílice poseen alta selectividad a la adsorción de moléculas hidrófobas. A medida que aumenta la relación Si/Al, el número de centros ácidos disminuye, pero su fortaleza aumenta, y también disminuye la concentración de cationes y la capacidad de intercambio iónico (proporcional al contenido de aluminio). (Sánches, 2018).

Finalmente, las zeolitas son materiales microporosos que además de ser cristalinos poseen una elevada estabilidad física y química. Todas estas propiedades hacen que las zeolitas sean de gran utilidad como adsorbentes. (Sánches, 2018) (Iganacio , Ezpinoza , Gallego ; Cesar, Symonds,Arguelles, 2009).

Intercambio iónico zeolita. Por procedimientos clásicos de intercambio catiónico de una zeolita se puede describir como la sustitución de los iones de las cavidades por cationes de otros tamaños y otra carga. Esta es una de las características esenciales de las zeolitas. En efecto, así se consigue modificar considerablemente las propiedades y ajustar la zeolita a los usos más diversos. (Iganacio , Ezpinoza , Gallego ; Cesar, Symonds,Arguelles, 2009).

El intercambio de iones de una zeolita depende de:

- La naturaleza de las especies catiónicas como las de la familia de la laumontita, chabazita, herschelita, levyne.
- La temperatura.
- La concentración de las especies catiónicas en solución.
- El solvente (La mayor parte de los intercambios se lleva a cabo en solución acuosa, aunque también algo se hace con solventes orgánicos).
- Las características estructurales de la zeolita en particular.

7. Metodología

El proyecto comparativo entre el carbón activado y la zeolita está dividido en 4 fases; las cuales cumple con la finalidad de comparar las propiedades de adsorción para la remoción de nitrógeno amoniacal presente en el lixiviado proveniente del relleno sanitario.

Este estudio consideró dos tipos de corridas por los filtros, una con lixiviado y el otro con agua impactada de nitrógeno amoniacal, ya que al tener diferentes características fisicoquímicas los resultados podrían presentar variaciones.

7.1. Fase 1. Actividades Preliminares

Este estudio tiene como interés principal, la comparación entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal presente en aguas de lixiviados procedentes de un relleno sanitario.

En esta fase, se diseñaron procedimientos y unidades para evaluar la capacidad de adsorción de cada uno de los medios filtrantes los cuales fueron puestos en contacto con el lixiviado y con agua impactada.

Durante esta primera etapa, se tuvo en cuenta fuentes bibliográficas como artículos, revistas científicas, conceptos técnicos de expertos en el tratamiento de aguas residuales y teóricos de empresas encargadas de la distribución y comercialización de medios filtrantes además de contar con el apoyo de sus técnicos y profesionales encargados de hacer estudios con estos materiales; con esto se adquirió información de gran valor para determinar la metodología más eficiente en el uso de los materiales adsorbentes para la remoción del nitrógeno amoniacal.

7.2. Fase 2. Selección del Tipo de Carbón Activado y la Zeolita.

En el mercado nacional e internacional existen un gran número de medios filtrantes derivados del carbón activado y la zeolita utilizados en la remoción de contaminantes en aguas residuales; de esta forma se realizó una preselección consultando fuentes bibliográficas como estudios previos, fichas técnicas de proveedores en el mercado, y a partir de esa información, se logró identificar el carbón activado de tipo lignítico y la zeolita con cli-noptilolita como dos materiales con gran afinidad en la remoción de nitrógeno amoniacal.

En el caso del carbón activado de tipo lignítico, fue seleccionado ya que tiene una mayor proporción de microporos -diámetro mayor a 500 m^2 /g; esta superficie interna hace que el carbón activado granular lignítico tenga una adsorción ideal en el tratamiento de aguas residuales (LENNTECH, 2020).

Ilustración 2: Carbón Activado Seleccionado.

Por otro lado, la zeolita fue seleccionada por ser un medio de origen natural, abundante y económico; su porcentaje de cli-noptilolita mayor al 80% (Ver anexo A). Su estructura altamente porosa captura las partículas contaminantes de hasta 4 micras y su alta carga negativa hace de ésta una alternativa efectiva y asequible en el tratamiento de aguas residuales, ya que en su estructura es capaz de adsorber los elementos más comunes de las aguas residuales como son: amoniaco, ácido sulfhídrico, metales pesados, entre otros; además de la retención de ciertas colonias de microorganismos, nocivos para la salud. (Montes, López, Mercado, Camacho, & León, 2017).

Ilustración 3: Zeolita Seleccionada.

7.3. Fase 3. Experimentación

7.3.1. Fase 3.1. Diseño y construcción de las columnas de filtración a escala laboratorio.

Para este estudio, las unidades de filtración fueron fundamentales, pues fueron éstas las que soportaron el medio filtrante que entró en contacto con el lixiviado y con el agua impactada; para su diseño se tuvieron en cuenta los parámetros contemplados en la (tabla 2).

Todos estos valores se fueron ajustando a partir de diámetros de tubería comercial adoptados por los investigadores, los cuales fueron de 3 y 4 pulgadas respectivamente. Este diseño fue también soportado bajo parámetros definidos en estudios probados experimentalmente, donde las dimensiones obtenidas brindaron a estas unidades las condiciones solicitadas para el estudio; además el valor de los parámetros fue ajustado de acuerdo con los requerimientos de los materiales adsorbentes y a los valores que se querían experimentar.

Tabla 2: Parámetros de diseño de unidades de filtración.

Parámetro	***Unidades***	***Carbón Activado***	***Zeolita***
Diámetro adoptado	***in***	4	3
	m	0,102	0,076
Área	***m2***	0,008	0,005
Velocidad	***m3/m2.h***	2,8	5
Caudal	***m3/h***	0,023	0,023
	L/h	22,7	22,8
Tiempo de Retención	***min***	15	15
	h	0,25	0,25
Volumen	***m3***	0,006	0,006
Altura (material de relleno)	***m***	0,7	1,25
Altura malla de soporte	***m***	0,117	0,208
Altura total	***m***	1,317	1,792

Como se puede apreciar en la (tabla 2) se quiso demostrar que la zeolita, a pesar de haber trabajado con una mayor velocidad que la del carbón, su eficiencia no iba a ser determinada por esta variable como si se ha visto en otros estudios con el carbón activado donde la velocidad influye en la capacidad de adsorción (Efrain, Duarte; Carlos Mario, Vizcaino, 2015) Esta afirmación puede tener una razón y es que la zeolita funciona mejor como un mecanismo de intercambio iónico (ver numeral 6.3.2.). Sin embargo, como se explicará más adelante durante el proyecto se manejaron tres velocidades con el fin de experimentar como estas afectaban los resultados de la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal para luego tener en cuenta los valores y las condiciones que proporcionaban una mejor eficiencia.

Las velocidades de filtración se mantuvieron mediante el aforo continuo del caudal de entrada a los filtros diseñados, dicho aforo fue realizado de manera volumétrica utilizando un frasco ámbar, cuando se presentaba la más mínima variación en el caudal se manipulaban las válvulas de entrada al filtro con la finalidad de mantener constante el valor de caudal que se quería experimentar.

Para la construcción de los prototipos se realizó el siguiente procedimiento: Se tomaron 2 tubos de PVC sanitario, uno con un diámetro de 3 pulgadas y otro de 4 pulgadas; se cortaron a 1.8 metros y 1.4 metros respectivamente, en los extremos fueron colocados tapones de PVC, en caso de presurizarse, en los tapones superiores se adecuaron adaptadores y una regadera con la que se buscó reducir al máximo la presencia de puntos muertos dentro de las unidades; en la parte inferior se adaptó una malla tipo angeo, que sirvió de falso fondo y además como soporte para el material filtrante, finalmente se adicionó un tapón al cual se le realizó un orificio de salida.

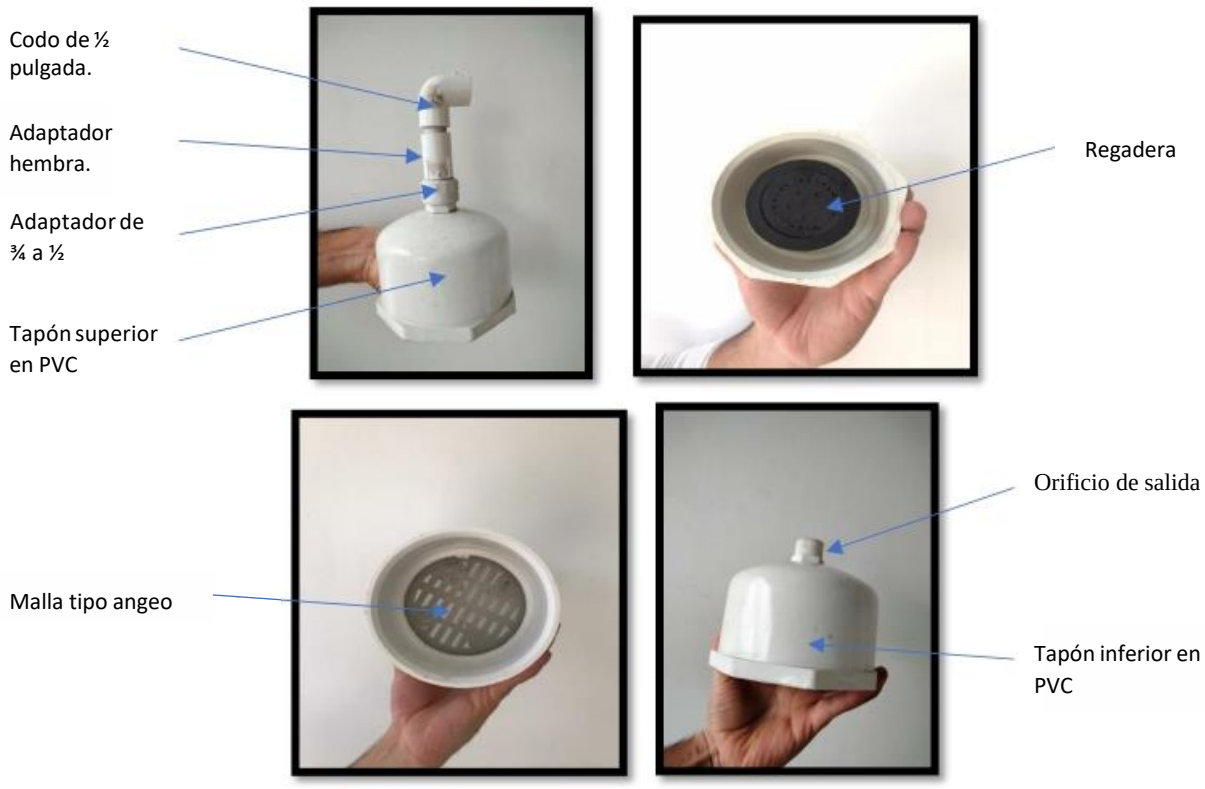


Ilustración 4: Elementos de unidades de filtración.

Para la construcción de los soportes de los prototipos, se utilizaron 4 varas de madera de 20 cm de largo, las cuales fueron ensambladas a una tabla de 50 cm de ancho por 50 cm de largo, a la cual se le abrieron 2 orificios para colocar los prototipos de filtro, adicionalmente estos fueron asegurados a una columna para darle mayor soporte y estabilidad a las unidades.

A la entrada y salida de las unidades se acondicionaron adaptadores PVC para acoplar la tubería proveniente de los contenedores que abastecían de agua a las unidades, además de una válvula de bola con la que se regulaba el caudal.

Ilustración 5: Unidades de filtración.

Cabe mencionar que, según las fichas técnicas de los medios filtrantes, estos no necesitaban medios de soporte como grava o arena por lo cual la zeolita y el carbón activado fueron depositados directamente en los filtros.

7.3.2. **Fase 3.2. Elaboración de Isotermas de Adsorción**.

Inicialmente se realizaron las isotermas de adsorción para los dos medios cuando éstos no habían tenido ningún tipo de contacto con el lixiviado o el agua impactada, esto se estableció con el fin de observar la capacidad de adsorción con la que partían estos materiales y de este modo ir observando a través del proceso la variación en cuanto a la capacidad adsorción, se propuso entonces

A partir de la propuesta mencionada se realiza un seguimiento riguroso al comportamiento de la adsorción en los medios, por los que procedió a la elaboración de las isotermas después de cada jornada de trabajo.

La construcción de estas isotermas se realizó bajo los modelos de Langmuir y Freundlich, por el método de titulación, el cual llevo el siguiente proceso:

Inicialmente se pesaron 16 gramos de zeolita y 16 gramos de carbón activado; estos fueron depositados en 8 botellas color ámbar de a dos 2 gramos aproximadamente. Luego fue agregado el ácido acético a una concentración de 0.2 N y agua destilada hasta llegar a concentraciones de normalidad conocidas.

Ilustración 6: Materiales laboratorio de isotermas de adsorción.

Las muestras fueron selladas y llevadas a un *shaker* en donde se agitaron durante 2 horas. Luego fueron recolectadas y se dejaron en reposo por 15 minutos; se tomaron 10 ml de cada una de las muestras que pasaron, tanto por el carbón activado como por la zeolita, para su posterior filtración con papel filtro tipo *Whatman* de 11 micras en *beakers*, despreciando los primeros 10 mL.

Ilustración 7: Materiales laboratorio de isotermas de adsorción.

Se volvieron a filtrar las muestras tomando 10 ml de cada una. A continuación, se agregaron 2 gotas de fenolftaleína por muestra. Éstas fueron llevadas a titulación con hidróxido de sodio 0.2N. La titulación se realizó con hidróxido de sodio hasta virar la muestra a un color rosado. Finalmente se registró el valor del volumen consumido por cada muestra.

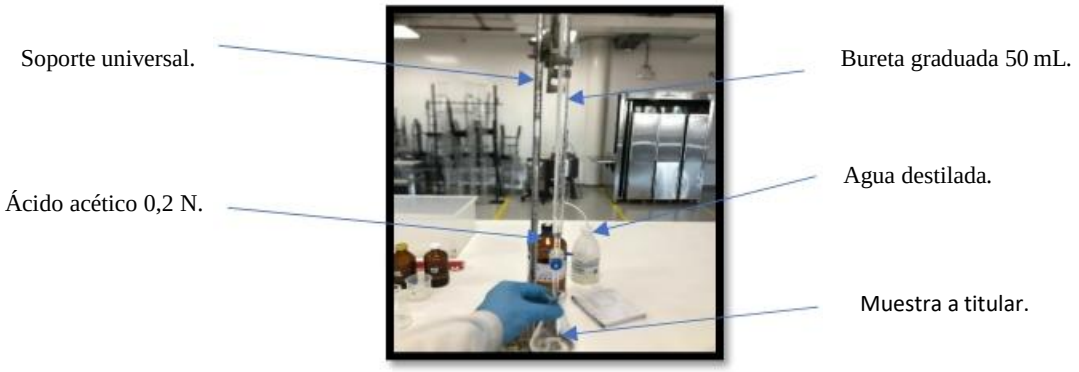


Ilustración 8: Titulación muestras de medios adsorbentes.

Con los valores obtenidos, se procedió a construir en tablas de cálculo las gráficas correspondientes a las isotermas de Langmuir y Freundlich.

7.3.3. Fase 3.3. Trabajo de campo, Impactación de agua potable, caracterización fisicoquímica del lixiviado y el agua impactada.

Trabajo de campo. El muestreo del lixiviado fue realizado en la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana; se ejecutó de manera manual y puntual ya que la planta contaba con pondajes o unidades de amortización de los caudales y cargas contaminantes, lo que hacía fácil de efectuar la toma de muestras y la conservación de estas. Se empleó el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales establecida por el IDEAM, en donde se presentan y describen los requerimientos, instrucciones y cuidados que se deben tener en cuenta para la toma de muestras.

Ilustración 9: Muestreo en el Relleno Sanitario.

Impactación de agua. Como primera medida se dejó reposar la muestra de agua a impactar hasta garantizar la ausencia de cloro. La impactación se realizó con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos planteados, los cuales parten de la verificación de eficiencias y la determinación de las posibles interferencias por causa de otros contaminantes que pueda tener el lixiviado; debido a esto fue necesario considerar este procedimiento, donde se realizó el cálculo del reactivo que aportara el amonio, y para este caso fue el acetato de amonio. De esta forma se estableció la concentración de nitrógeno amoniacal promedio que se ajustara a los valores cercanos a los encontrados en el lixiviado.

El cálculo correspondiente se muestra a continuación.

PARA EL CASO DE 50 mg/L

Masa molar del acetato de amonio ($C_2H_7NO_2$): 77,08 g/mol.

Masa de amonio (NH_4): 18 g

Pureza del reactivo: 98%

$$50 * \left(\frac{1}{1000}\right) = 0{,}05$$

$$0{,}05 \quad NH4 * \left(\frac{77{,}08}{18}\right) = 0{,}214 \text{ g}$$

$$0{,}214 * \frac{100}{98} = 0{,}218 \longrightarrow \text{gramos de acetato de amonio por cada litro de agua.}$$

PARA EL CASO DE 100 mg/L

Masa molar del acetato de amonio ($C_2H_7NO_2$): 77,08 g/mol.

Masa de amonio (NH_4): 18 g

Pureza del reactivo: 98%

$$100 * \left(\frac{1}{1000}\right) = 0{,}1$$

$$0{,}1 \quad NH4 * \left(\frac{77{,}08}{18}\right) = 0{,}428 \text{ g}$$

$$0{,}428 * \frac{100}{98} = 0{,}436 \longrightarrow \text{gramos de acetato de amonio por cada litro de agua.}$$

Caracterización fisicoquímica del lixiviado y el agua impactada. La determinación de la concentración de nitrógeno amoniacal se realizó con base en el método *Kjeldahl* para Nitrógeno Amoniacal STANDARD METHODS (2010).

Inicialmente, se descartó que las muestras presentaran rastros de cloro o cloruros que afectaran la lectura real del nitrógeno amoniacal, por lo que se realizó un testeo inicial.

Para determinar la presencia de cloruros se adaptó el método de nitrato de plata (Ver Anexo B). Sin embargo, ninguna muestra indicó presencia de los mismos.

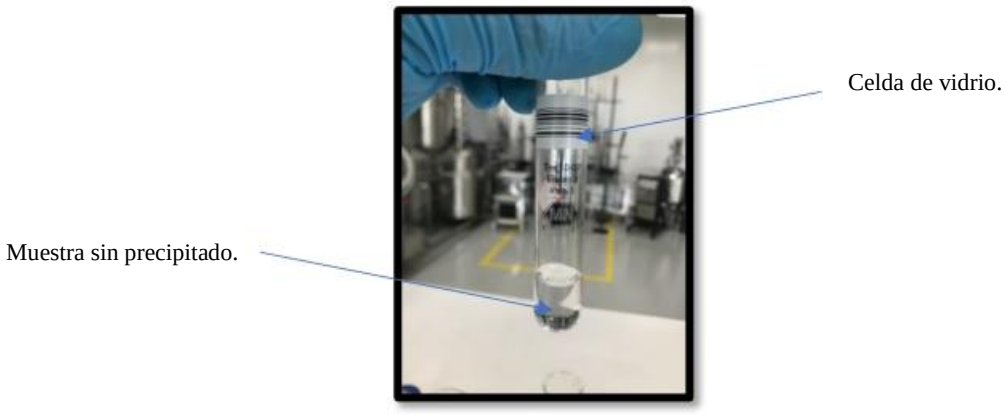


Ilustración 10: Ausencia de cloruros en muestras analizadas.

Para el caso del cloro se aplicó el método colorimétrico DPD (Ver Anexo C). Sin embargo, ninguna muestra indicó presencia de éste.

. *Ilustración 11: Ausencia de Cloro en muestras analizadas.*

Descartando la presencia de cloro y cloruros en las muestras; se tomaron 4 *Erlenmeyer*, cada uno de 1000 ml y cuatro tubos del equipo *Kjeldahl*, los cuales fueron lavados y purgados con agua destilada. (Ver ilustración 12).

Tanto los *Erlenmeyer* como los tubos del equipo fueron marcados e identificados acorde al contenido de este. La identificación se hizo por medio de números y un indicativo con el nombre de blanco.

A los tubos marcados con 1, 2, y 3, se les agregó 10 ml de la muestra a analizar; al tubo identificado como blanco se le agregó 10 ml de agua destilada. Luego, a cada Erlenmeyer se le adicionó 20 ml de ácido bórico al 4% y 5 gotas de indicador t-shiro.

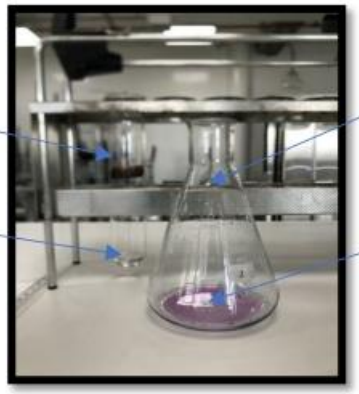


Ilustración 12: Materiales laboratorio determinación de nitrógeno amoniacal.

Las muestras contenidas en los tubos del equipo *Kjeldahl* fueron trasladadas al destilador y ubicadas de la siguiente manera: *Erlenmeyer* marcado como blanco con su correspondiente tubo marcado como blanco. Se repitió este paso con cada tubo y *Erlenmeyer*.

El equipo fue ajustado con un tiempo de 15 minutos para la destilación, cabe aclarar que el equipo dentro de sus funciones tenía la opción de agregar los reactivos de forma automática, siendo los reactivos, agua destilada e hidróxido de sodio (NaOH) 32%, de esta forma se daba inicio al proceso de destilación.

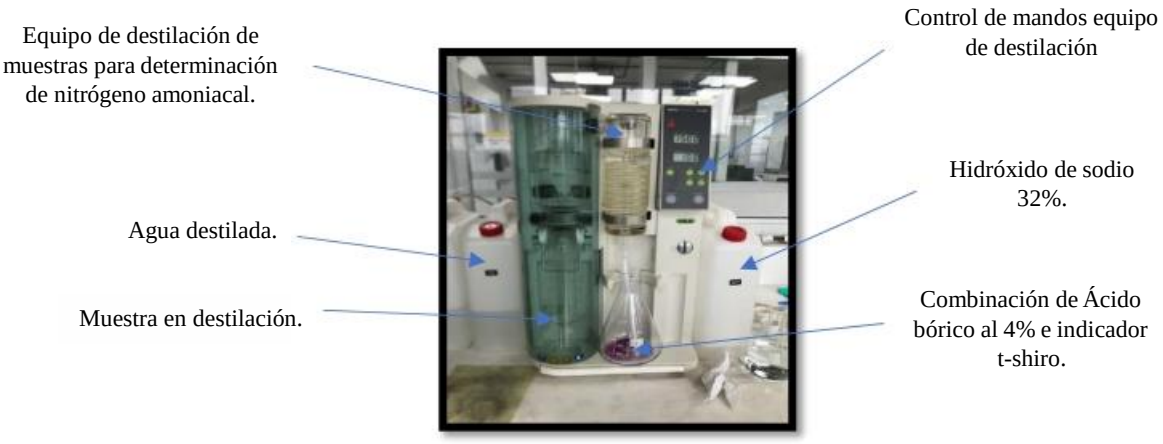


Ilustración 13: Equipo de destilación de muestras para determinación de nitrógeno amoniacal.

Posterior al proceso de destilación, la muestra era llevaba a titulación, en donde se agregaba ácido sulfúrico 0.02N, a medida que la titulación se llevaba a cabo la muestra pasaba de un color verde esmeralda a un color rosa pálido (Ver ilustración 14); en ese momento se registró el volumen de ácido sulfúrico consumido por la muestra y por el blanco; con estos valores se procedió a realizar el respectivo cálculo.

Ilustración 14: Titulación de muestras para determinación de Nitrógeno Amoniacal.

Para la determinación de la concentración de nitrógeno amoniacal de cada muestra se utilizó la siguiente ecuación:

$$- \quad {}_3/ \quad = \frac{(\mathrm{A} - \mathrm{B}) * 280}{\mathrm{mL\ de\ muestra}}$$

Donde:

A: volumen de ácido sulfúrico consumido por muestra (ml)

B: volumen de ácido sulfúrico consumido por el blanco (ml)

7.4. Fase 4 Estudio de la eficiencia de remoción del nitrógeno amoniacal. Con las dos unidades de filtración construidas y con los medios filtrantes dentro de ellas; se procedió a realizar la respectiva corrida de los filtros con el lixiviado. Éste se puso en contacto con el carbón activado y la zeolita durante siete jornadas; cada jornada estaba comprendida por 8 horas de trabajo continuo. En intervalos de cuatro horas se recolectaba una muestra por filtro (filtro de carbón activado y filtro con zeolita) completando así cuatro muestras por jornada de trabajo. Dichas muestras posteriormente fueron llevadas al laboratorio de la Universidad de La Salle donde se determinó la concentración de nitrógeno amoniacal, y de esta manera poder realizar el análisis correspondiente a la eficiencia de remoción de este contaminante.

Cabe mencionar que el muestreo se realizó tanto para lixiviado como para agua impactada con acetato de amonio; este con el fin de verificar las eficiencias y determinar las posibles interferencias que tuvieran otros contaminantes contenidos en el lixiviado, por lo que se montaron dos columnas para cada uno de estos medios expuestos. Dicho procedimiento se puede apreciar en la ilustración 15.

En la ilustración 15 y anexo (E) se muestra la disposición que se tuvo para la toma de muestras con sus respectivas jornadas de trabajo.

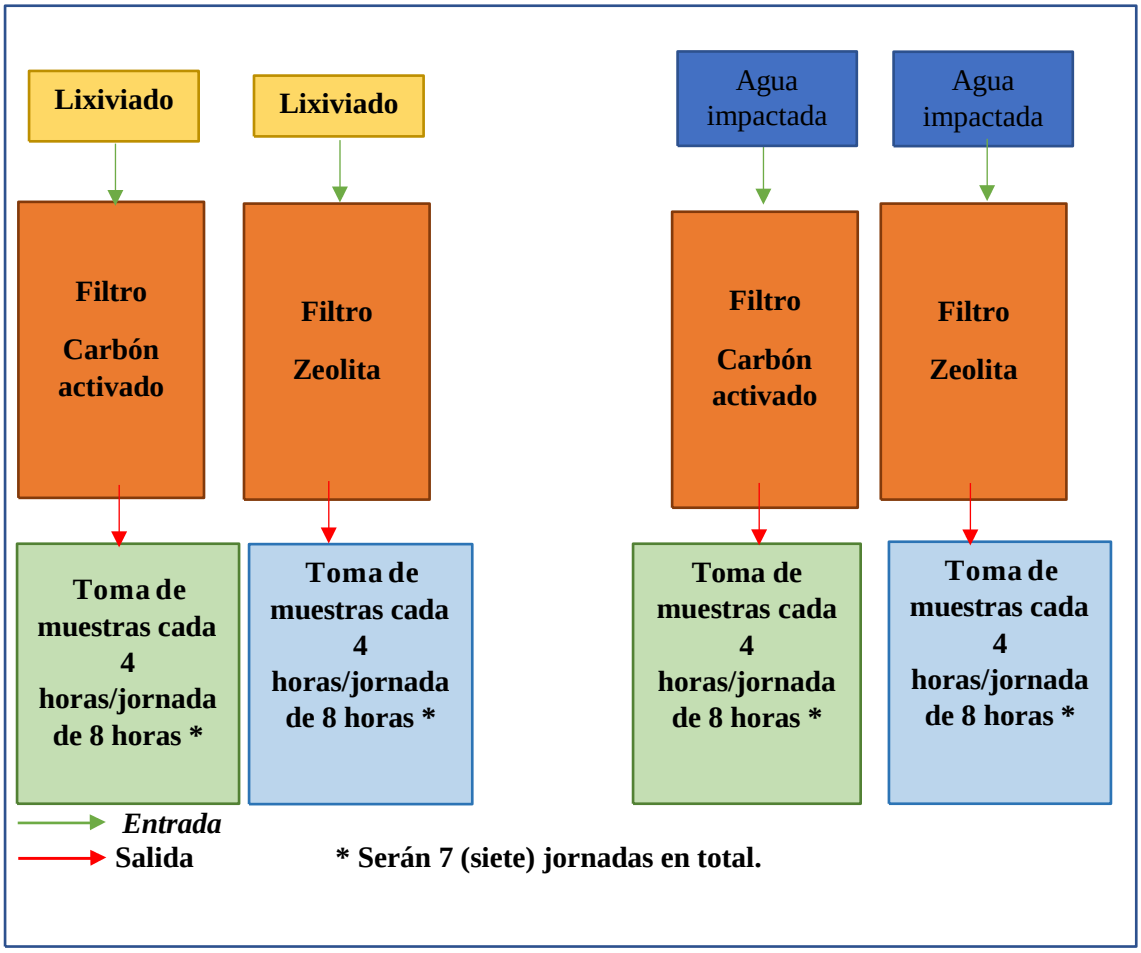


Ilustración 15: Esquema de filtración y jornadas de trabajo.

7.5. Fase 5. Descripción del procedimiento del análisis de resultados.

A continuación, se dará una breve descripción de la manera en que se llevó a cabo el análisis de los procesos contemplados en la metodología.

7.5.1. Fase 5.1. Procedimiento para el análisis de resultados. Con los datos obtenidos se realizó un análisis donde se tuvo en cuenta los resultados de las isotermas de adsorción y los resultados del análisis de laboratorio de la concentración de nitrógeno amoniacal; de esta forma se determinó la eficiencia respectiva a la remoción del contamínate en cuestión y así se pudo establecer la relación costo beneficio del tratamiento de lixiviados en los rellenos sanitarios con este tipo de medios filtrantes.

7.5.2. Fase 5.2. Procedimiento para el análisis estadístico ANOVA. Luego de tener los resultados se realizó un análisis estadístico comparativo de tipo ANOVA, también denominado análisis de varianza, el cual permitió determinar si existía o no una diferencia significativa entre las medias poblacionales estudiadas, para finalmente hacer un análisis más profundo y establecer de manera acertada una optimización de los procesos, materiales y variables que son fundamentales en la experimentación.

El tratamiento estadístico de los resultados obtenidos durante estos estudios se hizo en apoyo con el *software Minitab 19*. El análisis permitió determinar la condición en que se hace más efectiva la remoción de nitrógeno amoniacal teniendo en cuenta el tipo de agua (lixiviado o agua impactada) y el medio adsorbente (Zeolita o Carbón Activado), compartiendo como un factor común la eficiencia obtenida en cada caso.

El procedimiento para obtener el análisis estadístico ANOVA mediante el *software Minitab 19.* fue el siguiente:

Se organizaron los datos de las eficiencias correspondientes a todas las filtraciones, tanto del lixiviado como del agua impactada, con los medios adsorbentes. Dichos datos se ingresaron a un arreglo matricial diseñado en el *software*; posteriormente se procedió a configurar los parámetros a evaluar y se realizó el análisis.

Se determinó si las diferencias entre las medias de los grupos eran estadísticamente significativas, para esto se planteó inicialmente dos hipótesis, una hipótesis nula, que hace referencia a que todas las medias son iguales, es decir, las eficiencias de remoción no varían en función del material adsorbente (Zeolita y Carbón Activado) ni del tipo de agua (Lixiviado o Agua impactada); por otro lado se planteó la hipótesis alternativa que hace referencia a que no todas las medias son iguales, es decir, al menos una eficiencia de remoción demostró ser diferente en comparación con las otras eficiencias de remoción en función del material adsorbente y el tipo de agua.

De acuerdo con la regla de decisión que se basa en la comparación del nivel de significancia y el valor p, se permite descartar o no la hipótesis nula y dar continuidad en el estudio de la hipótesis alternativa, para el caso particular de este estudio, la regla de decisión permitió descartar la hipótesis nula en el análisis realizado.

Se realizó el análisis de los valores estadísticos arrojados por el software tales como R_2 comparaciones de grupos entre otras con la finalidad de brindar un resultado adecuado y conciso.

8. Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas y su correspondiente análisis.

8.1. Resultados

8.1.1. Pruebas con lixiviado. En este capítulo se puede observar el comportamiento del carbón activado y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal al tener contacto con el lixiviado.

Inicialmente se realizaron las isotermas de adsorción con los minerales seleccionados sin haber sido puesto en contacto con el lixiviado y el agua impactada, identificados para este caso como minerales vírgenes. Los resultados correspondientes se evidencian en las tablas 3 y 4 e ilustraciones 16 y 17 respectivamente.

En el (anexo F), se muestran los resultados de las concentraciones iniciales y finales de nitrógeno amoniacal del lixiviado, el pH y las velocidades de filtración manejadas para este estudio.

Teniendo en cuenta que, y según la metodología establecida, se efectuaría la toma de dos (2) muestras por jornada de trabajo, siendo cada jornada de 8 horas, la primera muestra fue tomada 4 horas después de haber iniciado la filtración y la segunda muestra a las 8 horas, finalizando así una jornada de trabajo con esta toma.

En la tabla 5 se presentan las eficiencias de remoción promedio de nitrógeno amoniacal obtenidas por jornada de trabajo.

Tabla 3: Resultados pruebas de adsorción inicial para la zeolita.

Muestras	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético(mol/L)	Volumen titulante (L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,0070	0,2	0,1400	0,0360	1,660	0,0217	7,142	0,0217
2	0,09	0,01	0,045	0,0060	0,2	0,1200	0,0480	1,751	0,0274	8,333	0,0274
3	0,08	0,02	0,04	0,0055	0,2	0,1100	0,0540	1,815	0,0298	9,090	0,0298
4	0,07	0,03	0,035	0,0047	0,2	0,0940	0,0637	1,926	0,0330	10,638	0,0330
5	0,06	0,04	0,03	0,0043	0,2	0,0860	0,0685	1,959	0,0349	11,627	0,0349
6	0,05	0,05	0,025	0,0033	0,2	0,0660	0,0805	1,998	0,0403	15,151	0,0403
7	0,04	0,06	0,02	0,0029	0,2	0,0580	0,0853	1,996	0,0427	17,241	0,0427
8	0,03	0,07	0,015	0,0028	0,2	0,0560	0,0865	2,008	0,0430	17,857	0,0430

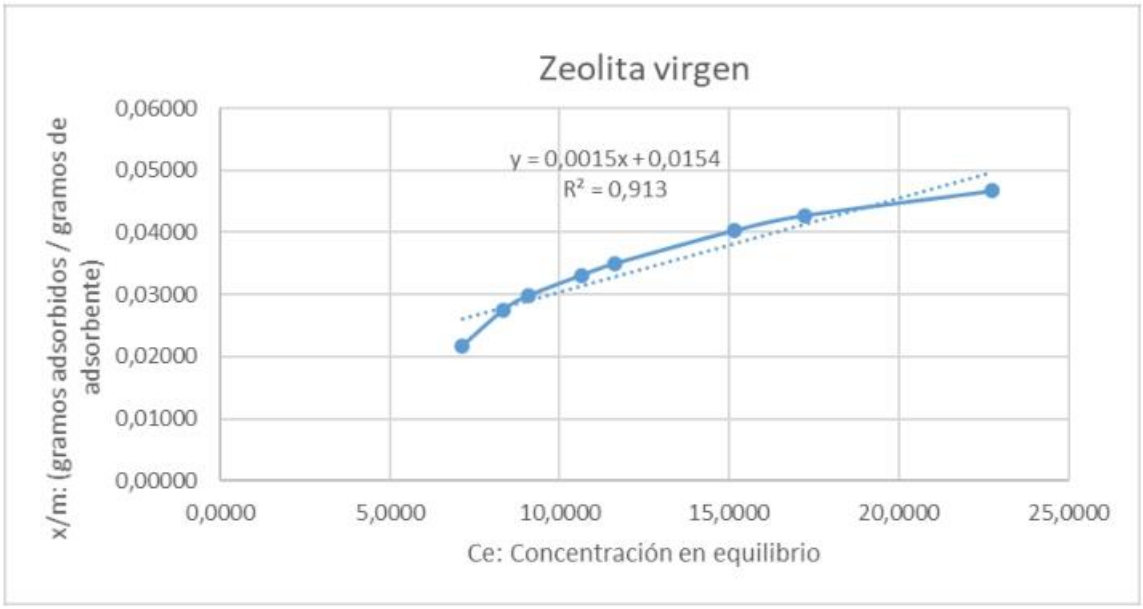


Ilustración 16: Isoterma de adsorción inicial para la zeolita.

Tabla 4: Resultados pruebas de adsorción inicial para el carbón activado.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,0070	0,2	0,1400	0,0360	1,427	0,0252	7,1429	0,0252
2	0,09	0,01	0,045	0,0065	0,2	0,1300	0,0420	1,5615	0,0269	7,6923	0,0269
3	0,08	0,02	0,04	0,0060	0,2	0,1200	0,0480	1,6011	0,0300	8,3333	0,0300
4	0,07	0,03	0,035	0,0050	0,2	0,1000	0,0601	1,6389	0,0366	10,0000	0,0366
5	0,06	0,04	0,03	0,0045	0,2	0,0900	0,0661	1,6935	0,0390	11,1111	0,0390
6	0,05	0,05	0,025	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	1,6284	0,0516	16,6667	0,0516
7	0,04	0,06	0,02	0,0024	0,2	0,0480	0,0913	1,6139	0,0566	20,8333	0,0566
8	0,03	0,07	0,015	0,0020	0,2	0,0400	0,0961	1,6774	0,0573	25,0000	0,0573

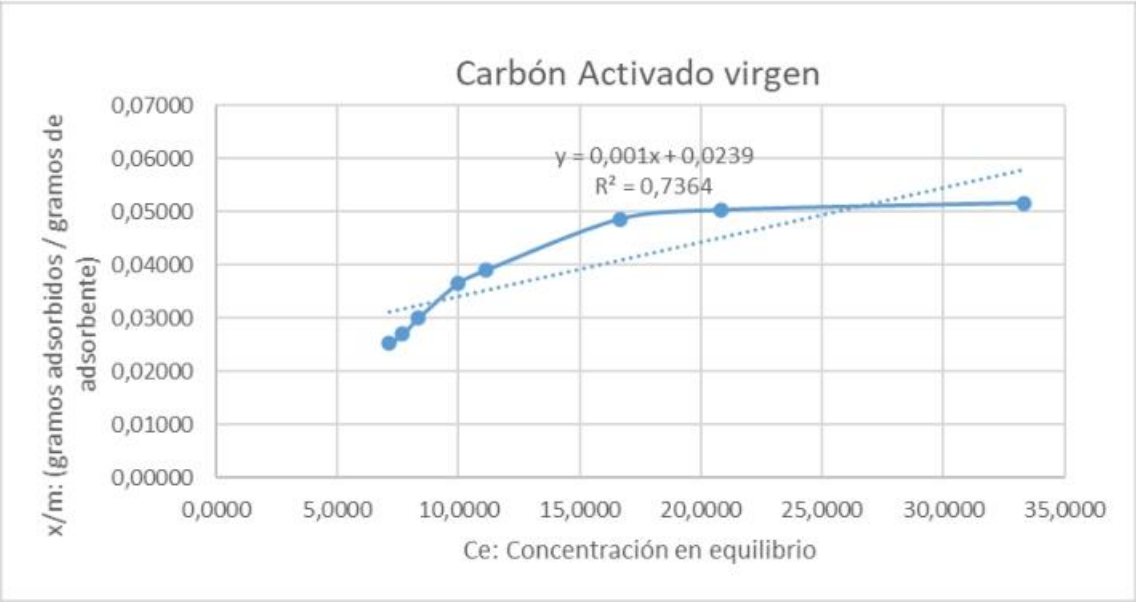


Ilustración 17: Isoterma de adsorción inicial para el carbón activado.

8.1.2. Resultados de pruebas con lixiviado.

Tabla 5: Porcentajes de remoción promedio de nitrógeno amoniacal obtenidos con lixiviado.

Pruebas con Lixiviado		
Corrida	*Mineral*	*% remoción de N-NH_3*
1	Zeolita	29%
	Carbón Ac	32%
2	Zeolita	*37%*
	Carbón Ac	*49%*
3	Zeolita	*66%*
	Carbón Ac	*64%*
4	Zeolita	*62%*
	Carbón Ac	*37%*
5	Zeolita	*67%*
	Carbón Ac	*45%*
6	Zeolita	*67%*
	Carbón Ac	*60%*
7	Zeolita	*66%*
	Carbón Ac	*61%*

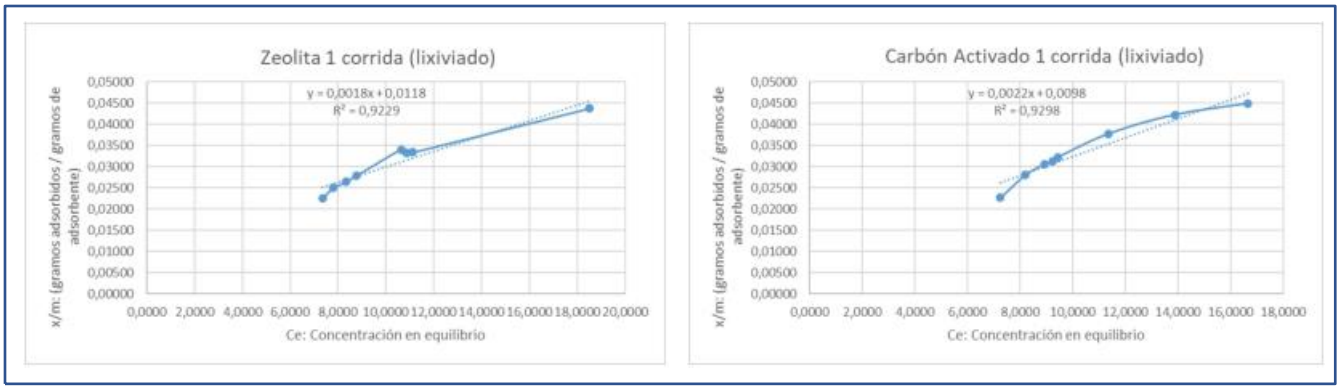


Ilustración 18: Isotermas de adsorción primera corrida con lixiviado.

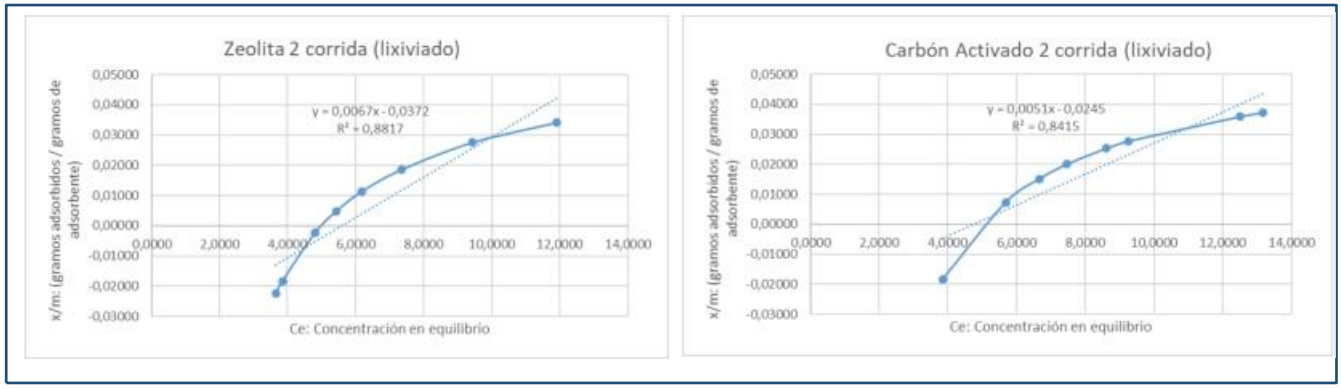


Ilustración 19: Isotermas de adsorción segunda corrida con lixiviado.

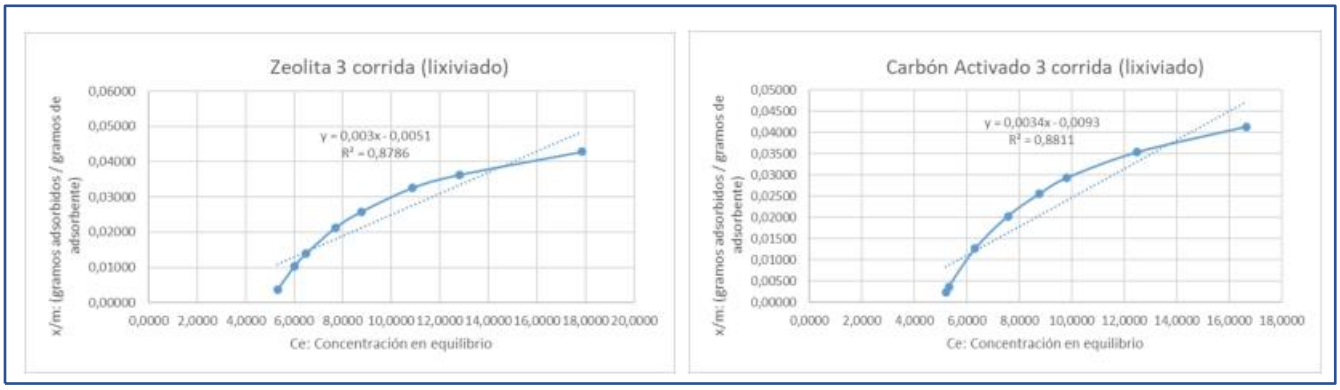


Ilustración 20: Isotermas de adsorción tercera corrida con lixiviado.

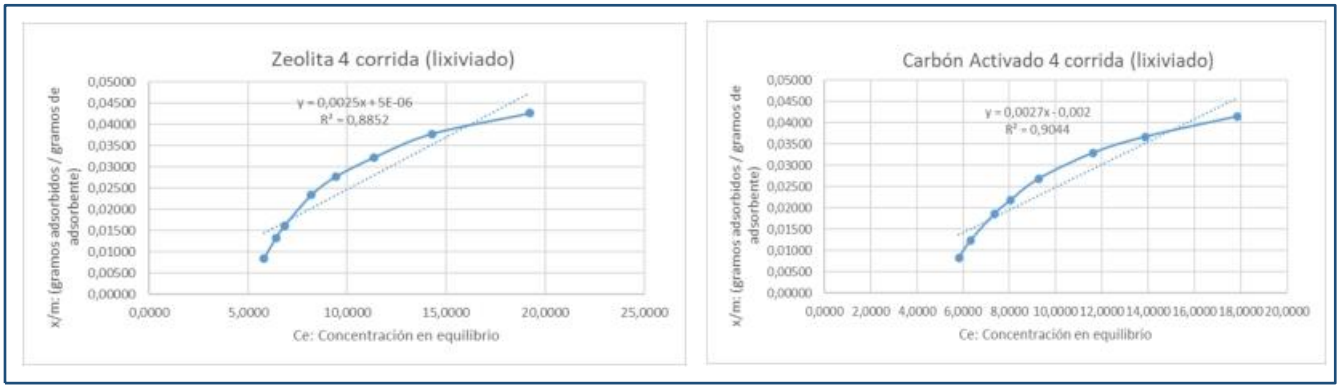


Ilustración 21: Isotermas de adsorción cuarta corrida con lixiviado.

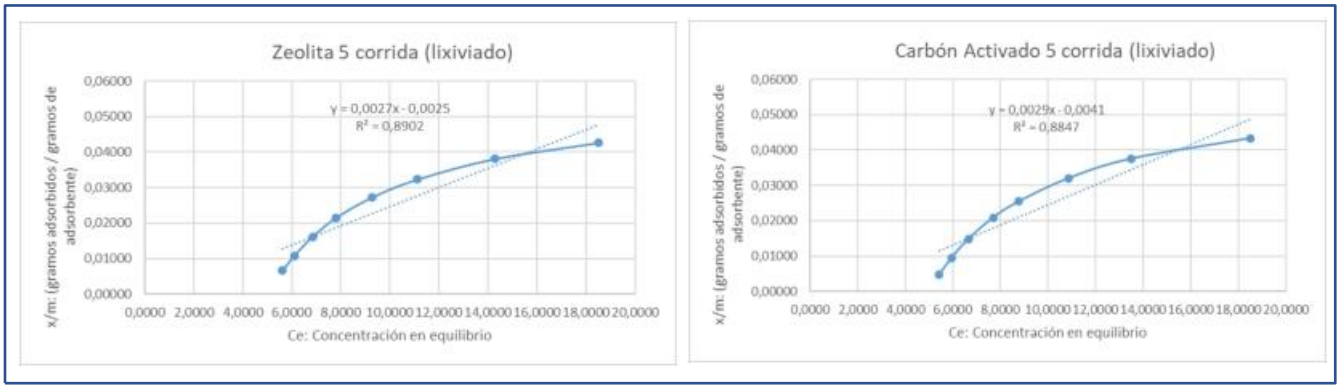


Ilustración 22: Isotermas de adsorción quinta corrida con lixiviado.

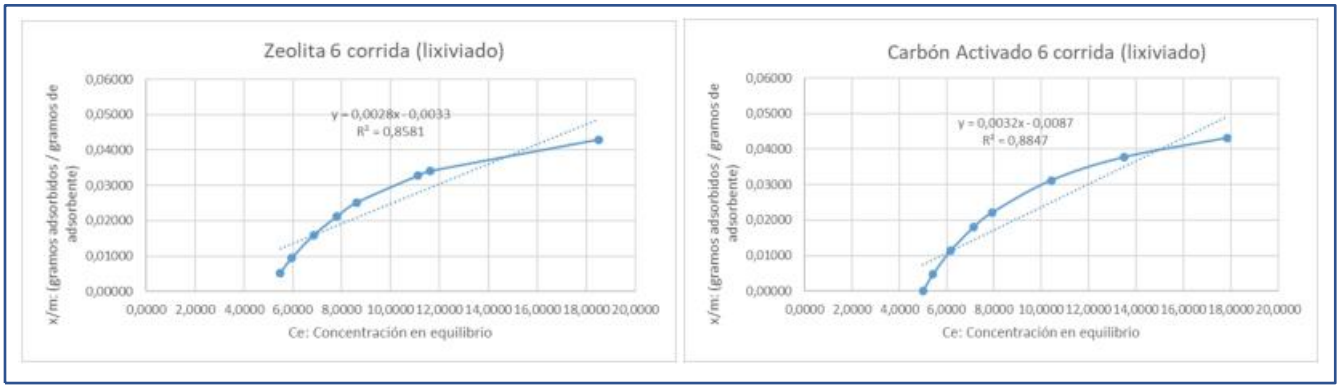


Ilustración 23: Isotermas de adsorción sexta corrida con lixiviado.

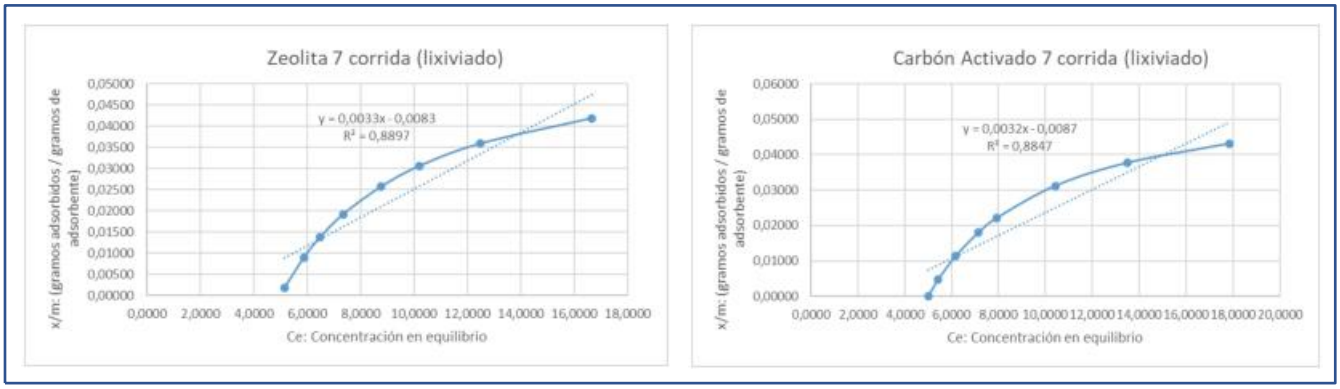


Ilustración 24: Isotermas de adsorción séptima corrida con lixiviado.

8.1.3. Pruebas con agua impactada. En este apartado se puede observar el comportamiento que presentó el carbón activado y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal al tener contacto con el agua impactada. Cabe resaltar que este proceso adicional, se realizó con el fin de observar las posibles interferencias presentes en el lixiviado las cuales podrían afectar la remoción del nitrógeno amoniacal; de esta forma se procedió a impactar agua potable con acetato de amonio y así establecer la concentración de nitrógeno amoniacal para realizar el estudio comparativo.

En el (anexo H) se muestran los resultados de las concentraciones iniciales de nitrógeno amoniacal del agua impactada, logrando establecer concentraciones de 50 mg NH_3–N/ L y 100 mg NH_3–N/ L, así mismo el pH y las velocidades de filtración empleadas para esta parte del estudio.

Así como se planteó con el lixiviado, teniendo en cuenta que, y según la metodología establecida, se efectuaría la toma de dos (2) muestras por jornada de trabajo, siendo cada jornada de 8 horas, la primera muestra fue tomada 4 horas después de haber iniciado la filtración y la segunda muestra a las 8 horas, finalizando así una jornada de trabajo con esta toma.

En la (tabla 6) se presentan las eficiencias de remoción promedio de nitrógeno amoniacal obtenidas por jornada de trabajo.

8.1.4. Resultados de pruebas con Agua impactada.

Tabla 6: Porcentajes de remoción promedio de nitrógeno amoniacal obtenidos con agua impactada.

Pruebas con Agua Impactada		
Corrida	*Mineral*	*% remoción de N-NH_3*
1	Zeolita	75%
	Carbón Activado	61%
2	Zeolita	71%
	Carbón Activado	48%
3	Zeolita	85%
	Carbón Activado	52%
4	Zeolita	75%
	Carbón Activado	33%
5	Zeolita	74%
	Carbón Activado	59%
6	Zeolita	82%
	Carbón Activado	52%
7	Zeolita	84%
	Carbón Activado	56%

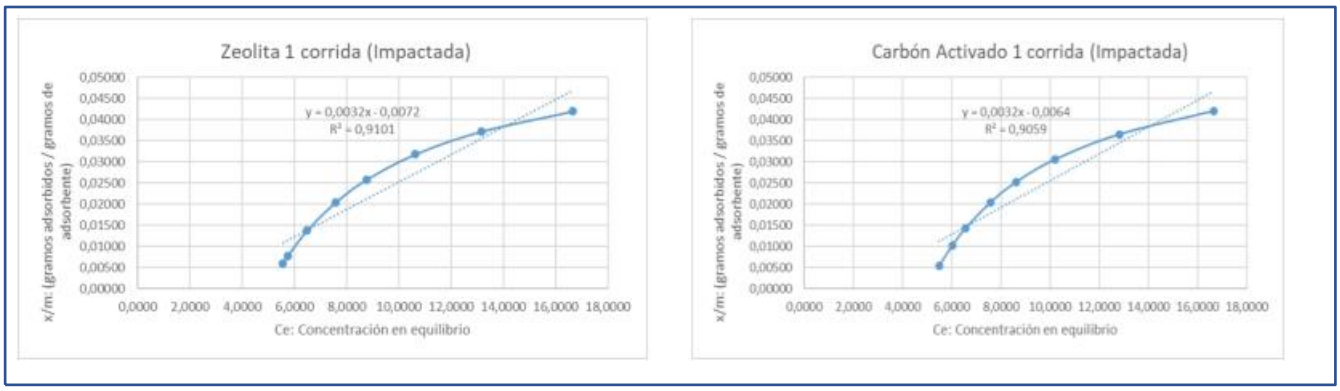


Ilustración 25: Isotermas de adsorción primera corrida con agua impactada.

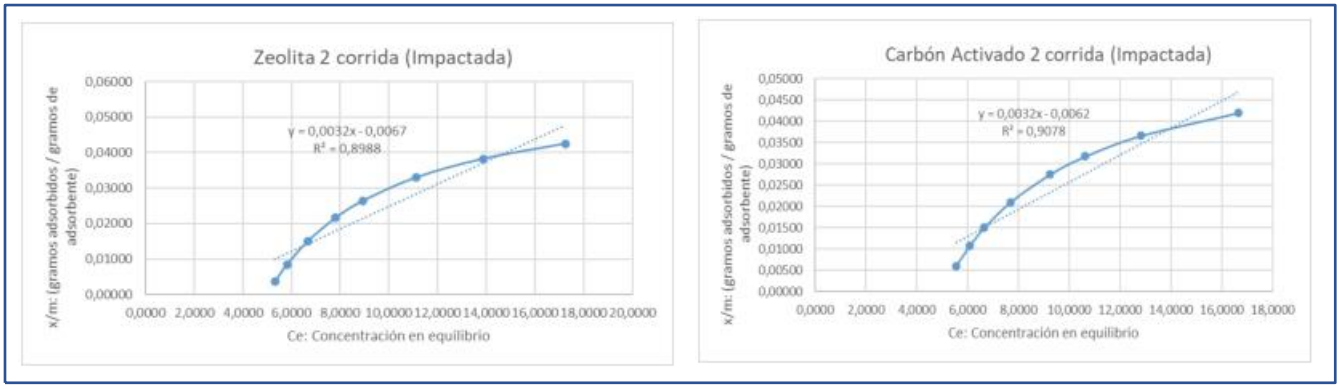


Ilustración 26: Isotermas de adsorción segunda corrida con agua impactada.

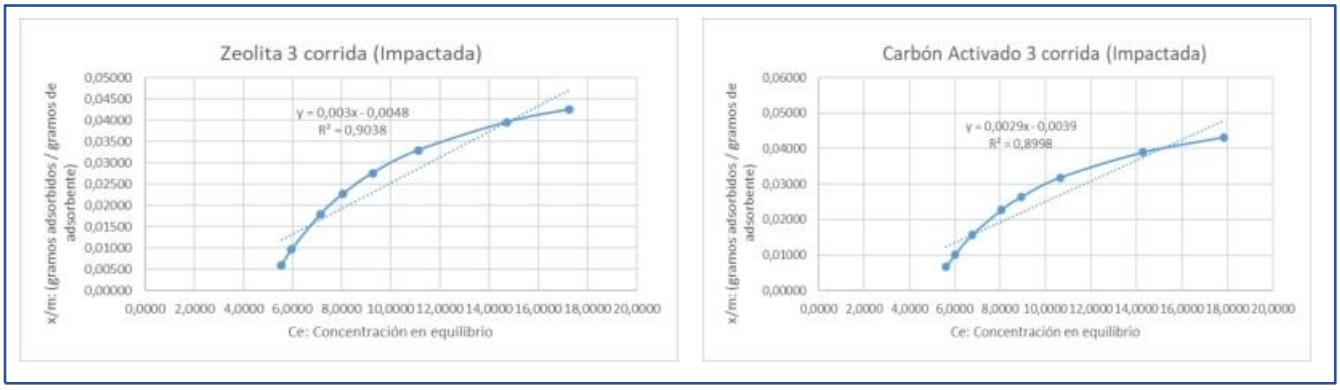


Ilustración 27: Isotermas de adsorción tercer corrida con agua impactada.

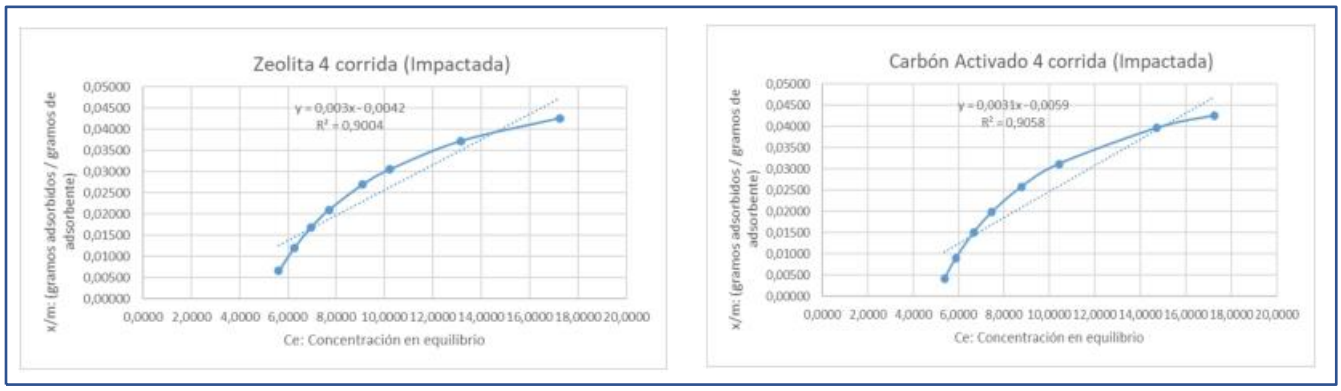


Ilustración 28: Isotermas de adsorción cuarta corrida con agua impactada.

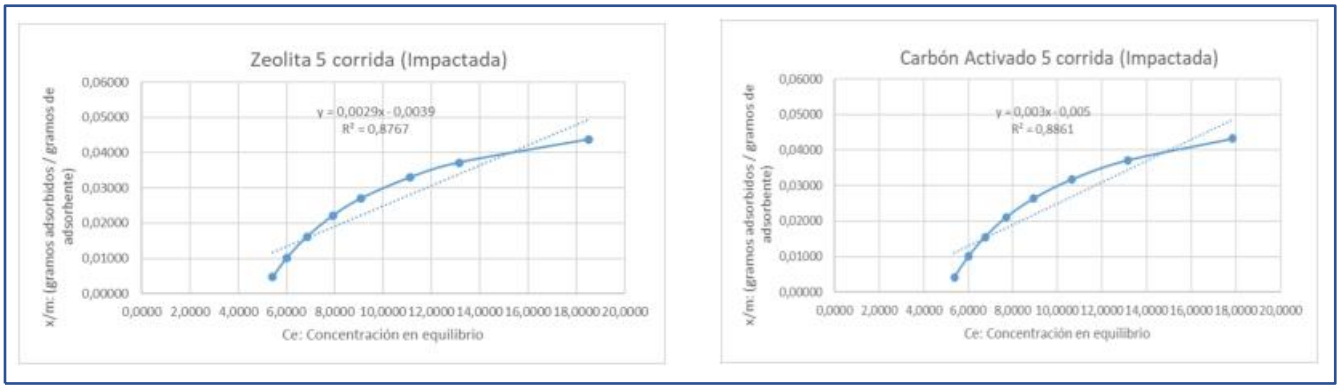


Ilustración 29: Isotermas de adsorción quinta corrida con agua impactada.

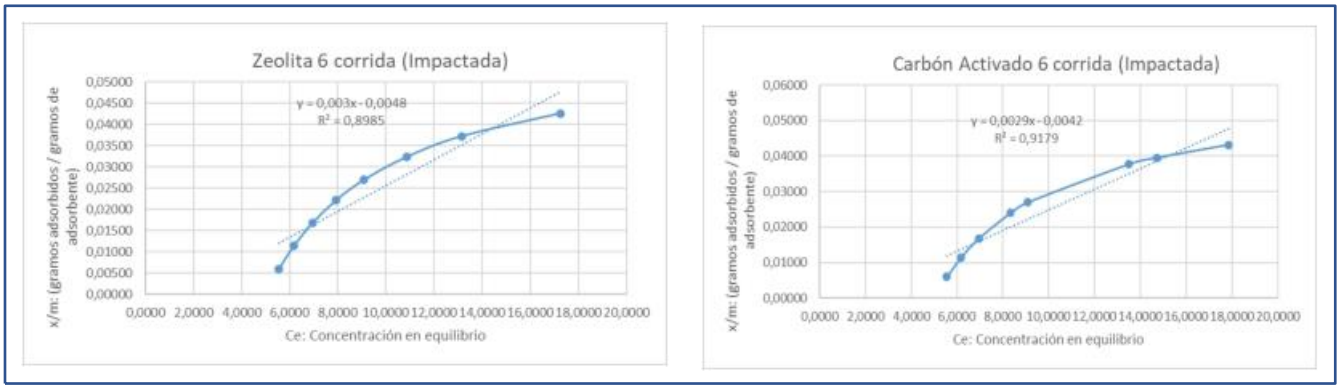


Ilustración 30: Isotermas de adsorción sexta corrida con agua impactada.

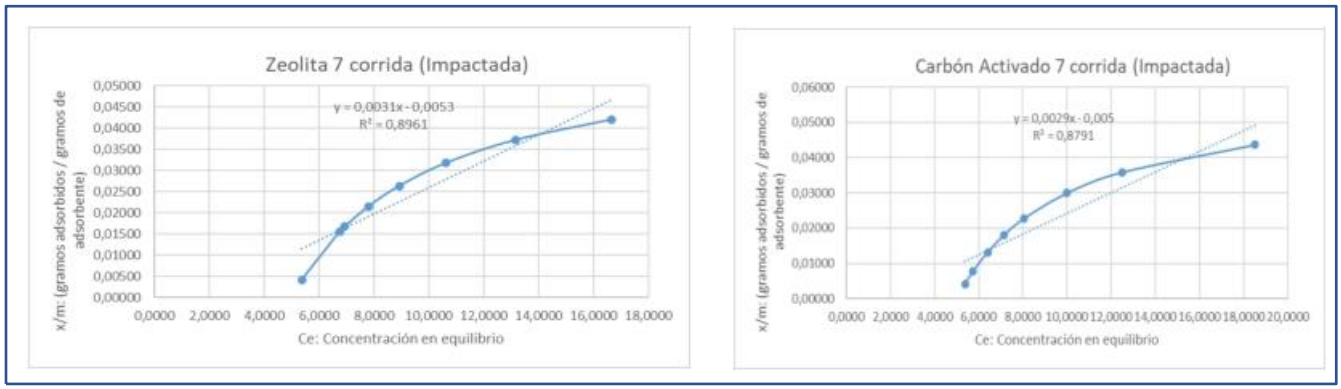


Ilustración 31: Isotermas de adsorción séptima corrida con agua impactada.

8.2. Prueba estadística ANOVA

Los resultados resumidos a continuación se muestran en su totalidad en el anexo (D)

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0,05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Ilustración 32: Hipótesis de la prueba.

Fuente: Minitab 19.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	6896	2298,6	8,48	0,000
Error	52	14089	270,9		
Total	55	20985			

Ilustración 33: Análisis de varianza.

Fuente: Minitab 19.

Inicialmente se plantearon dos hipótesis, una hipótesis nula y una hipótesis alterna, una de ellas fue rechazada de acuerdo con la regla de decisión que está dada por la comparación de los valores del nivel de significancia y el valor P, en este caso como el resultado del valor P o valor de probabilidad (0,000) es menor que el resultado del nivel de significancia (0,05) se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que no todas las medias poblacionales suministradas por el modelo son iguales, es decir que no existe una relación. Se asume que al menos un valor de eficiencia es diferente.

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
16,4601	32,86%	28,99%	22,14%

Ilustración 34: Resumen del modelo.

Fuente: Minitab 19.

El resumen del modelo suministró información acerca de los diferentes tipos de correlación existentes entre el modelo y los datos, el R^2 indicó el porcentaje de variación en la respuesta que es explicado por el modelo, más específicamente el ajuste del modelo a los datos. Aunque no es un valor significativo se puede decir que se ajusta en cierto modo a los supuestos del modelo.

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Eff Zeolita (L)	14	56,17	19,00	(47,35; 65,00)
Eff Carbón Activado (L)	14	49,92	16,46	(41,09; 58,75)
Eff Zeolita (I)	14	77,66	13,23	(68,83; 86,49)
Eff Carbón Activado (I)	14	51,65	16,64	(42,82; 60,48)

Desv.Est. agrupada = 16,4601

Ilustración 35: Información descriptiva con intervalos de confianza del 95%.

Fuente: Minitab 19.

En el apartado de medias se puede apreciar los intervalos con un 95% de nivel de confianza para el valor de media correspondiente a cada factor. Con base en esto, el modelo hace inferencia y se determina un intervalo de confianza que sería un intervalo en el cual estará oscilando el valor de la media, estos valores hacen referencia al porcentaje de remoción de nitrógeno amoniacal agrupado por el tipo de agua con el que se experimentó Lixiviado (L) y Agua impactada (I). En este apartado se puede ver que en efecto la media es diferente para cada uno de los factores lo que confirma que existe una diferencia significativa en la remoción promedio de los factores evaluados.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Eff Zeolita (I)	14	77,66	A
Eff Zeolita (L)	14	56,17	B
Eff Carbón Activado (I)	14	51,65	B
Eff Carbón Activado (L)	14	49,92	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Ilustración 36: Método de comparación de Tukey.

Fuente: Minitab 19.

El método Tukey lo que hace es comparar cada una de las eficiencias que fueron objeto de estudio en el modelo, en la tabla se organizan de mayor a menor las eficiencias promedio con su respectivo indicativo, si fue de agua impactada (I) o Lixiviado (L), como se puede apreciar en esta comparación la zeolita demuestra ser más eficiente en comparación con el carbón activado, además, se puede aseverar que los minerales tienen mejor porcentaje de remoción para el caso del agua impactada. Por otro lado, se muestra una agrupación denotada por las letras A y B, las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. En otras palabras, lo que indica es que la eficiencia de la Zeolita con agua impactada posee una eficiencia significativamente mayor en comparación con las otras eficiencias las cuales se encuentran en un intervalo de 49% - 57% aproximadamente.

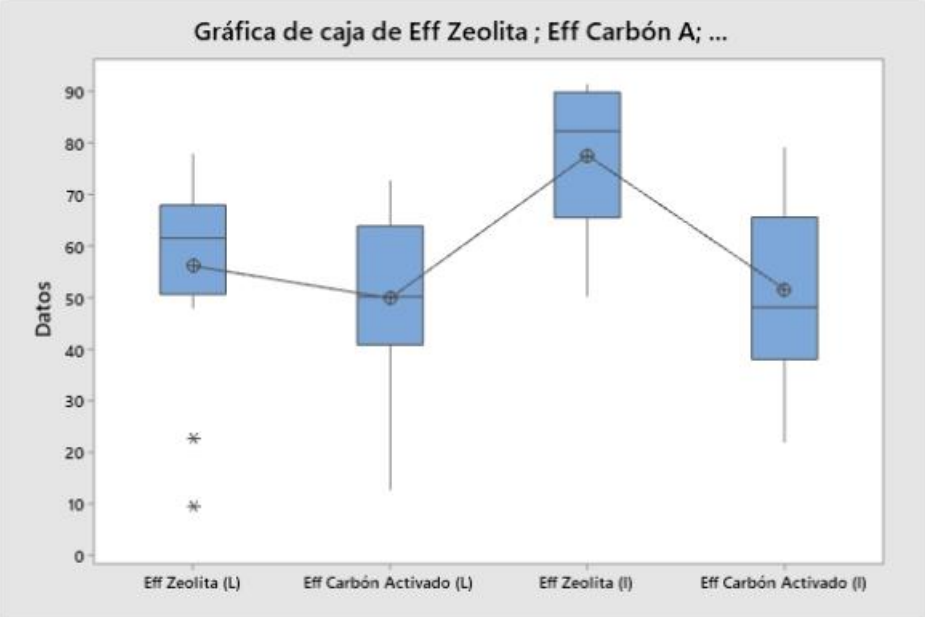


Ilustración 37: Gráfica de caja, análisis ANOVA.

Fuente: Minitab 19.

La gráfica de caja es una herramienta visual, que basado en la media de los datos proporciona el valor promedio de cada proceso y permite determinar la eficiencia en relación con el material adsorbente y el tipo de agua (impactada o lixiviado), como es una herramienta comparativa por agrupación de información, tiene similitud con el análisis de Tukey que ratifica un comportamiento de mayor remoción para el caso del uso de la zeolita. Con el uso de esta herramienta se puede apreciar de manera estadística que el uso de zeolita para remoción de nitrógeno amoniacal es una mejor opción comparada con el uso del carbón activado.

8.3. Relación costo/ beneficio de la implementación de un sistema de tratamiento de agua de lixiviado a escala real con un sistema de filtración de zeolita y uno de carbón activado.

El análisis costo/ beneficio, contempla dos alternativas de tratamiento para la remoción de nitrógeno amoniacal proveniente de lixiviado de un relleno sanitario, como los costos que difieren en cada alternativa. También se plantea una base cálculo de un litro por segundo (1 L/s) que equivale a, 3.6 metros cúbicos por hora (3.6 m^3/h) de agua a tratar, además se realizó el análisis con un periodo de tiempo de un mes, donde se tendrán en cuenta los costos de operación y de personal requerido para este, con el fin de obtener cifras que se aproximen a la realidad.

Cabe resaltar, que las unidades presentadas en esta sección son unidades que podrían ser utilizadas en una planta de tratamiento, en donde se podrán tratar lixiviados con caudal máximo de 1L/s; caudal que se tuvo en cuenta en el diseño de los dos sistemas de filtración propuestos. Para este ejemplo se utilizó un sistema de 3 filtros en paralelo con el fin de facilitar su lavado en contracorriente: con dos filtros en operación se retrolava el tercer filtro.

8.3.1. Descripción de las alternativas

Con el fin de reducir la concentración de nitrógeno amoniacal presente en el lixiviado proveniente de un relleno sanitario, se plantean dos sistemas de filtración; cada uno con un mineral natural diferente: el primer sistema de filtración contiene zeolita (alternativa 1) y el segundo sistema contiene carbón activado de tipo lignítico (alternativa 2); ambas alternativas se describen a continuación. (Ver Tabla 7).

Tabla 7: Características técnicas de las alternativas propuestas para el estudio.

CARACTERÍSTICAS	***ALTERNATIVA 1***	***ALTERNATIVA 2***
	FILTRO DE ZEOLITA	***FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO***
Tipo de soporte	*Gravas ubicadas sobre falso fondo perforado*	*Gravas ubicadas sobre falso fondo perforado*
Medio de adsorción	*Zeolita*	*Carbón Activado*
Material de la columna	*Lámina*	*Lámina*
Diámetro de la columna	*1 m*	*1,20 m*
Número de filtros	*3*	*3*
Área superficial del filtro	*0,79 m^2*	*0,94 m^2*
Altura de medio adsorbente	*0,81 m*	*0,53 m*
Volumen medio adsorbente	*1,92 m^3*	*1,8 m^3*
Densidad del medio	*980 Kg/m^3*	*450 Kg/m^3*
Altura total con borde libre	*1.80 m*	*2 m*
Cantidad de mineral utilizado	*1882 kg*	*810 kg*

Entre las dos alternativas se comparten parámetros de diseño como tiempo de retención, que para estas unidades es de 30 min y el caudal de 1 L/s. Como se puede apreciar en la (tabla 7) las áreas de cada una de las unidades difieren toda vez que se requieren tanto velocidades de operación diferentes, como de cargas hidráulicas para el retro lavado de las unidades. (Ver anexo J).

8.3.2. Costos de inversión.

Los costos estipulados en esta sección se relacionan directamente con las unidades que alojarán los minerales en estudio, los valores relacionados en la (tabla 8) fueron adquiridos mediante el diseño un filtro a escala real; unidad que deberá tratar un litro de lixiviado por segundo (1L/s). Además de tener en cuenta el valor del volumen de los medios adsorbentes que requieren los filtros para su funcionamiento.

Los precios de los materiales y de las unidades con sus accesorios, fueron suministrados por una empresa con experiencia en el mantenimiento y construcción de unidades de tratamiento de aguas residuales y potable; de esta manera se logró acercar el costo a uno real que se tendría en la actualidad para implementar estos sistemas de filtración.

Tabla 8: Costos de inversión utilizados en la implementación de las unidades.

COSTOS DE INVERSIÓN		
Elementos	***zeolita***	***Carbón activado***
Accesorios	*$1.000.000*	*$1.000.000*
Bombas sumergibles	*$3.800.000*	*$3.800.000*
Bombas centrifugas	*$6.300.000*	*$6.300.000*
Filtros	*$6.908.000*	*$9.152.000*
Mineral	*26.348.000*	*3.888.000*
Total	*$44.356.000*	*$24.140.000*

8.3.3. Costos de insumos

Con el fin de establecer los costos generados para la implementación de cada una de las alternativas; se referencia los valores y los insumos que las unidades deberían contemplar para su regeneración o cambio del medio.

Los valores expuestos en la (tabla 9) fueron tomados del mercado local de Bogotá D.C. El precio de los minerales utilizados fue aportado por empresas comercializadoras de estos sustratos; precios que se encuentran en los mercados locales, nacionales e internacionales; los valores acá expuestos se establecen para el 30 de enero de 2021, fecha en la que se realizó la compra de los insumos para las unidades pilotos.

Conforme a la experiencia de los proveedores de zeolita y carbón activado para aguas residuales complejas como los lixiviados de un relleno sanitario se recomienda que para el caso de la zeolita ésta sea reemplazada con una frecuencia entre 12 y 24 meses; para el caso del carbón activado será reemplazado con una frecuencia entre 2 a 3 meses. Vale la pena recordar que el agua a tratar correspondió al permeado de las membranas de osmosis inversa.

Tabla 9: Valores de insumos utilizados para la regeneración o cambio de los medios filtrantes.

Insumos	***COSTOS DE ISUMOS***					
	Zeolita			***Carbón activado***		
	Cantidad	***Valor unitario COP***	***Valor total COP***	***Cantidad***	***Valor unitario COP***	***Valor total COP***
Cloruro de sodio	*1693 kg de NaCl*	*1.920/ Kg*	*$3.252.000*	*N/A*		
Consumo de agua (m_3)	*14,2 m_3 H2O*	*17.373/ m_3*	*$246.696*	*108 m_3/h*	*17.373/ m_3*	*$1.876.284*
Consumibles por recambio	*157 Kg*	*14.000 Kg*	*2.195.666*	*4.860 Kg*	*4.800 Kg*	*23.328.000*
COSTO TOTAL MENSUAL			*$5.694.362*			*$25.204.284*
Caudal Mensual		***2.592 m_3/ mes***				
Costo por $m_3$de agua tratada			*$2.197*			*$9.724*

- El cálculo anterior se hizo con base en una jornada de trabajo de 24 horas. Así como los cálculos que se presentan en las siguientes secciones del capítulo 8.5.

Costos energéticos. En el estudio realizado, como en la posible implementación de estos sistemas de tratamiento a escala real, se hace necesario adquirir bombas sumergibles y bombas centrifugas, con las que se pueda asegurar un caudal de tratamiento adecuado y constante; además de un caudal con el cual se pueda realizar: retro lavados como mantenimiento preventivo a los medios filtrantes o bien una regeneración de los medios. Como la energía eléctrica es imprescindible para llevar a cabo el proceso de tratamiento, esta tendrá un valor representativo en el análisis de costo beneficio, valores que se pueden observar en la (tabla 10).

Tabla 10: Costos energéticos.

COSUMO Y COSTOS ENERGÉTICOS			
EQUIPOS	***CONSUMO (kW/h)***	***COSTO CONSUMO***	***TOTAL, MENSUAL***
Bombas Centrifugas	*1,92*	*$210*	*$630*
Bomba sumergible	*0,55*	*$ 1848*	*$55.440*
Costo total mensual			*$56.070*
Costo por metro cúbico de agua tratada			*$22*

8.3.4. Costos de mano de obra. Este aspecto se tomó a consideración, ya que se hace necesario que una persona capacitada realice los cambios de medios filtrantes y ejecute los retro lavados en el tiempo que los minerales se encuentren saturados; esto según lo estipulado por los tiempos de pérdida de carga y lo recomendado por los proveedores de los minerales.

En virtud de lo anterior se tuvo en cuenta el salario mínimo vigente para el año 2021 en Colombia, el cual se encuentra en $908.526, más el auxilio de transporte equivalente a $106.454; para un total de $1.014.980; este valor le será remunerado al personal técnico que realice las labores de mantenimiento a las unidades de filtración.

De esta manera, el valor equivalente al metro cúbico de agua tratada; de acuerdo con mano de obra sería: $391. No obstante el operario no dedicará 24 horas consecutivas a la operación de estos sistemas, si no de ocho (8) horas aproximadamente, a nuestra consideración, por lo que el costo de metro cúbico de agua tratada equivaldrá a una tercera parte de ese valor, es decir, $130.

8.3.5. Costos de metro cúbico de agua tratada. En relación con los costos mencionados anteriormente, (Ver tablas 9 y 10) y costos de mano de obra se puede deducir los costos netos por metro cúbico de agua tratada, sería de $2.610 para la zeolita y de $9.724 para la alternativa con carbón activado (Ver tabla 11).

Tabla 11: Valor del metro cúbico de agua tratada.

COSTOS METRO CÚBICO AGUA TRATADA		
Costos	***zeolita***	***Carbón activado***
Insumos	*$2.197*	*$9.724*
Energéticos	*$22*	*$22*
Mano de obra	*$130*	*$130*
Total	*$2.349*	*$9.876*

8.3.6. Cálculo de la relación beneficio/costo.

Teniendo en cuenta los impactados generados por vertimientos de lixiviados a cuerpos de agua, se desarrolla el análisis costo beneficio, en donde el beneficio se relaciona directamente con prevenir sanciones o multas que puedan ser impuestas por la autoridad ambiental, donde se desarrollan criterios que permite ejercer por parte de la autoridad ambiental su función sancionatoria, procurando el cumplimiento de las condiciones establecidas y fomentando un cambio en el comportamiento ambiental en las actividades productivas que ejercen las empres o personas en el territorio nacional

De esta forma, la autoridad nacional ambiental reconoce en el planteamiento de metodologías, el principio de la de legalidad con base en un conjunto de parámetros legales y constitucionales que permitan salvaguardar el control legal de su ejercicio. Es importante tener presente que la multa es una sanción de tipo administrativo que actúa como un disuasivo del mal comportamiento e incumplimiento al normatividad ambiental y social en el país; buscando reducir los incentivos a no cumplir con las normas y las reglas establecidas por estas.

Con esto, la implementación de alternativas que generen la reducción de los impactos negativos al ambiente se hace de gran importancia, así mismo el poder evitar este tipo de sanciones por parte de las autoridades ambientales, de manera la relación costo beneficio planteada en este estudio se relaciona directamente con la prevención de sanciones, dándole a este el espacio directo al beneficio así como también las eficiencias que se lograron obtener en el estudio, ya que estas soportan la legalidad y el buen manejo que se le da a la generación de los lixiviados, ahora, la relación estrecha con la parte de costos se ve reflejada en la implementación de los sistemas de filtración impuestos por las dos alternativas comparadas en este estudio, opciones con las cuales se evitaría un futura sanción o multa por la autoridad ambiental.

Según (Taylor, 1995), la relación beneficio/costo es el cálculo del cociente entre el valor presente de los beneficios sobre el valor presente de los costos, como se plasma en la siguiente formula:

/ = /

Donde:

B/C= Relación beneficio/costo

VPB= Valor presente de los beneficios

VPC= Valor presente de los costos.

La fórmula de la relación de B/C genera los dos criterios que guían las decisiones de aceptación o rechazo de proyectos:

- Si el B/C es cero o positivo, el proyecto debe aceptarse.
- Si el B/C es negativo, el proyecto debe rechazarse.

Para el presente proyecto, el VPB será la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal obtenida en el estudio en cada alternativa propuesta para la investigación (tratamiento con zeolita y tratamiento con carbón activado). El VPC serán los costos generados en el proyecto correspondientes al Capex (costos de inversión) y al Opex (costos de operación y mantenimiento). Ver tabla 12.

Tabla 12: Parámetros a considerar para la relación beneficio - costo

Parámetro	Zeolita	Carbón Activado	Comentarios
Opex	$ 2.349,00	$ 9.876,00	Ver tabla (11)
Capex	$ 44.356.000,00	$ 24.140.000,00	Ver tabla (8)
Relación Opex	24%	420%	Relación de mineral 1 entre mineral 2: será el porcentaje de los costos de operación y mantenimiento del mineral 1 entre el mineral 2
Relación Capex	184%	54%	Relación de mineral 1 entre mineral 2: será el porcentaje de los costos de inversión del mineral 1 entre el mineral 2
Eficiencia Remoción	56%	50%	Beneficio adoptado
Relación B/C (Opex)	2,35	0,12	
Relación B/C (Capex)	0,30	0,92	
Sumatoria B/C	2,66	1,04	

Como se puede apreciar en la tabla 12. La alternativa de la zeolita resulta ser la que mayor beneficio aporta en el proyecto tomando en cuenta la lógica propuesta para establecer el valor de la relación Beneficio / Costo. Esto se debe principalmente a que los costos de operación para la alternativa de la zeolita son menores en comparación con los mismos costos para el caso del carbón activado.

Como se mencionó anteriormente la razón del costo de operación en la zeolita es menor ya que requiere cambios del medio en un periodo de tiempo mucho más largo.

Según los criterios de (Taylor, 1995) la alternativa con zeolita debe ser aceptada frente a la de carbón activado.

9. Análisis de Resultados.

Según los porcentajes de eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal, en agua de lixiviado, se estableció que la eficiencia promedio de remoción de la zeolita fue de 56.17% y del carbón activado de 49.91%; mostrando que el comportamiento de los minerales es similar. Al observar el comportamiento del carbón activado se evidencia que hay una variación en la remoción del contaminante en cada una de las corridas realizadas, de esta forma, la zeolita evidencia un comportamiento más constante en la remoción de nitrógeno amoniacal mostrando uniformidad en adsorción de este contaminante; esto se debe en gran parte por su estructura altamente porosa y gran afinidad por el contaminante.

De la misma forma, se observa un comportamiento similar en las pruebas con agua impactada, con un porcentaje promedio de remoción para la zeolita de 77.66%, y para el carbón activado un porcentaje promedio de remoción de 51.65%.

Al observar el comportamiento de remoción de nitrógeno amoniacal en la zeolita, para la prueba con lixiviado y con agua impactada, ésta mantiene porcentajes de eficiencia significativos en el trascurso de las corridas, lo cual da indicios de poder ser una alternativa prometedora en el tratamiento de aguas residuales, demostrando que su estructura es capaz de adsorber compuestos como el nitrógeno amoniacal, a pesar de las interferencias presentes en aguas de esta naturaleza como los lixiviados. sin embargo, como se mencionará más adelante el hecho de presentar una capacidad de adsorción menor que el carbón activado, se infiere que el mecanismo mediante el cual se logra más altas eficiencias en remoción de nitrógeno amoniacal que el carbón activado se debe a su capacidad de intercambio iónico.

Esta similitud en las eficiencias de la zeolita en las pruebas con lixiviado y con el agua impactada, expone que las interferencias de otros contaminantes en el lixiviado estarían afectando la remoción específica del nitrógeno amoniacal, con lo que se comprobaría que a pesar de la presencia de interferencias la zeolita retiene el contaminante en cuestión.

El carbón activado alcanzó una eficiencia máxima de remoción del nitrógeno amoniacal del 61% en las pruebas realizadas (lixiviado y agua impactada), lo cual indica que aunque existe una atracción entre las cargas del adsorbato y el adsorbente, estas no son lo suficientemente fuertes si se comparan con la zeolita, demostrando que existe mayor afinidad del nitrógeno amoniacal; esto debido a que las fuerzas de enlaces químicos (atracción entre iones opuestos) prima en el caso de la zeolita, ya que este se comporta mejor como intercambiador de iones. El carbón activado actúa mediante la fisisorción atrayendo partículas a su superficie con la ayuda de las fuerzas de Vander Walls.

Partiendo de información recolectada y de acuerdo con el dato suministrado en las isotermas de adsorción de la generación de la monocapa, se escogió el modelo de Langmuir para determinar el comportamiento de adsorción de la zeolita y del carbón activado. Con este modelo se logró obtener un valor promedio de generación de monocapa inicial para la zeolita de 0,042 gramos adsorbidos por gramos de adsorbente y para el carbón activado de 0,055 gramos adsorbidos por gramos de adsorbente; esto indica que el carbón activado tiende a adsorber mayor cantidad antes de generar una monocapa y empezar a ¨decrecer¨ su capacidad de adsorción, ya que de acuerdo con la teoría, se sabe que cuando el adsorbente se ha saturado de adsorbato, la cantidad que recubre su superficie corresponde al llenado de la monocapa.

De acuerdo con la clasificación de las isotermas propuestas por la IUPAC, las isotermas de esta experimentación se puede clasificar como isotermas de tipo IV. La parte inicial de la isoterma se atribuye a la adsorción en monocapa. Este tipo de isoterma se presenta en los materiales adsorbentes mesoporosos.

Para establecer una correcta interpretación del comportamiento de la isoterma hace falta potenciar los datos, es decir, se hace necesario tomar más muestras y exponerlas a diferentes concentraciones para tener no solo una parte de la gráfica sino una gráfica completa Ver anexo (Ver capítulo 8 ilustraciones 16 a 31). Cabe resaltar que con esta primera aproximación de la gráfica total se puede hacer una clara idea del tipo de isoterma y sus características.

La isoterma presenta un ciclo de histéresis y se debe a que el proceso de llenado de los mesoporos está gobernado por el fenómeno de condensación capilar y por las propiedades percolativas del sólido. La condensación capilar hace referencia al fenómeno de sorción que ocurre dentro de los poros del mineral.

La generación de la monocapa para el caso de la zeolita, sin tener contacto con el lixiviado o el agua impactada, se dio aproximadamente en el valor de adsorción de 0,0420, mientras que para el carbón se dio al valor de adsorción de 0,0551.

Las isotermas muestran una tendencia a permanecer en el valor de adsorción promedio de 0,0355 para el caso de la zeolita y 0,0365 para el carbón activado, esto para la experimentación con lixiviado.

Para la experimentación con agua impactada los valores son de 0,0375 y 0,0374 respectivamente; en ese punto se termina la adsorción y se propicia la formación de monocapa, se puede entonces decir que los minerales se colmatan con mayor facilidad en el caso del lixiviado, esto debido a la presencia de otros iones y partículas contenidas en el mismo.

Los materiales al ser mesoporosos, tienen la característica de hacer el proceso de sorción dentro de los poros, para el caso de la zeolita, es posible que el intercambio de cationes se haga dentro de los poros y por eso sea similar la gráfica de la isoterma, pero más efectiva la remoción del nitrógeno amoniacal.

Basados en la información anterior, se puede apreciar una disminución en la adsorción de los materiales; apoyados en la teoría, se puede creer que esta disminución en la adsorción está basada en la ocupación del espacio disponible en los poros por cationes y otras moléculas presentes en las aguas de estudio; dentro de las cuales se encuentran moléculas de nitrógeno amoniacal. Además, se puede observar que, para el caso del lixiviado, la monocapa se generó más rápido en comparación con el agua impactada, esto debido a la cantidad de moléculas, sustancias y cationes presentes en el lixiviado; parámetros que no fueron objeto de estudio en esta experimentación.

No obstante, el comportamiento de las isotermas indica que se podía seguir con el proceso de filtración, pues la variación en las cargas era soportada por los minerales como se demuestra con las isotermas, además, se puede suponer que los minerales aún en la última corrida contaban con espacios disponibles para generar el proceso de sorción.

En cuanto al beneficio que estos sistemas de tratamiento pueden llegar a generan en la remoción del contaminante, se logró observar que los dos traerían remociones significativas. Al realizar la relación con el costo que acarrearía la implementación de estos en las líneas de tratamiento, estas dos alternativas resultan ser atractivas. Debido a que la literatura fundamenta que los proyectos son viables, (Si el B/C es cero o positivo, el proyecto debe aceptarse). En esta oportunidad se resalta el tratamiento que involucra la zeolita debido a su mayor valor comparado con el valor obtenido para la alternativa con carbón activado.

10. Conclusiones.

El presente trabajo, efectuó un estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita en la remoción de nitrógeno amoniacal presente en aguas de lixiviados procedentes de un relleno sanitario. Así, se estableció que la capacidad de adsorción de los minerales puestos a prueba tiene un comportamiento de adsorción ideal debido a la porosidad de los materiales adsorbentes.

Se logro determinar, a escala laboratorio, la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita al contacto con lixiviados procedentes de un relleno sanitario; esto, mediante isotermas de adsorción donde la zeolita demostró una mayor capacidad de adsorción de nitrógeno amoniacal comparado con el carbón activado; así mismo, se observó que el carbón activado suele presentar una mayor variación en cuanto la adsorción de ese contaminante. A pesar de haber trabajado los prototipos con tiempos de retención menores a los establecidos en las fichas técnicas, las eficiencias resultaron ser satisfactorias.

Se consiguió establecer la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal del carbón activado y de la zeolita en contacto con lixiviados procedentes de un relleno sanitario, esta, a través de un filtro a escala laboratorio, donde se evidenció que el mayor porcentaje de remoción lo obtuvo la zeolita con un 67% para la prueba con lixiviado y un 85% para la prueba de agua impactada, demostrando ser una opción a considerar para la implementación de un sistema con dicho mineral en plantas de tratamiento de lixiviados.

Se podría pensar que debido a que la velocidad de filtración, que no es un parámetro relevante para el diseño de los filtros de zeolita, toda vez que los resultados de remoción de nitrógeno amoniacal fueron más altos en comparación con el filtro de carbón activado; esto no es del todo la razón del por qué la zeolita fue más efectiva. Debido a que la zeolita presenta una mayor afinidad con el amoniaco, otra razón por la cual se generó esta afinidad es que el intercambio iónico que se lleva a cabo a velocidades de reacción más rápido que las de adsorción.

En la relación costo – beneficio del uso del carbón activado y la zeolita, en la remoción de nitrógeno amoniacal para determinar la viabilidad de su uso en el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios,

se logró observar que las dos alternativas obtuvieron un valor favorable para la aceptación de las mismas en el desarrollo del proyecto en caso de llegarse a ejecutar.

El diseño planteado para la elaboración de las unidades de filtración, la utilización y distribución de los accesorios hidráulicos durante las pruebas permitió cumplir con el correcto funcionamiento de este, logrando establecer de esta manera la eficiencia de remoción del nitrógeno amoniacal y el comportamiento de adsorción que presenta la zeolita y el carbón. El filtro de zeolita se diseñó con un diámetro menor que el del carbón activado puesto que la primera trabaja a mayores velocidades de filtración según otras investigaciones y trabajos similares (Efrain, Duarte; Carlos Mario, Vizcaino, 2015).

La comparación entre la zeolita y el carbón activado como medios de filtración, demostraron ser una buena opción en el tratamiento de nitrógeno amoniacal en lixiviados, siendo la zeolita, el mineral con mejores resultados en la eficiencia de remoción del nitrógeno amoniacal comparado con la del carbón activado.

Las eficiencias de la zeolita a través del tiempo no presentan mayor variación lo cual indica que los sitios activos de la zeolita mientras no sean ocupados en su totalidad la eficiencia no se va a alterar.

11. Recomendaciones

Esta experimentación sirve para definir que el carbón activado es mejor adsorbente que la zeolita, pero, la zeolita es más eficiente en la remoción del contaminante en estudio por el intercambio iónico que ella presenta; sin embargo, si se quisiera profundizar con el uso de los minerales en todas sus fases de operación incluyendo retrolavados, regeneración, entre otros, valdría la pena hacerlo con el fin de identificar el grado de agotamiento de los mismos y también estudiar la calidad de agua generada durante esos procesos para su correcta disposición.

Se recomienda en una futura experimentación la determinación del tiempo exacto en que los medios se colmatan y se requiera una regeneración de la zeolita o un cambio del medio al hablar del carbón activado.

Se lograron los objetivos y el alcance del proyecto. Sin embargo, este estudio puede dar paso a otro tipo de investigación donde se logre llevar el proyecto a una escala mayor, midiendo otros parámetros y extendiendo tiempos de operación y vida útil de los minerales.

En posibles estudios futuros basados en esta investigación sería importante trabajar con diferentes tiempos de retención y velocidades de filtración, puesto que esto ayudaría a definir los parámetros de diseño que resulten técnico y económicamente viables en una aplicación a escala real.

Se recomienda realizar una isoterma de adsorción inicial a cada medio filtrante, tomando un mayor número de muestras para generar una gráfica más detallada de la isoterma y así poder identificar posibles características que no fueron percibidas en este estudio; igualmente una isoterma al final de los ensayos para establecer la adsorción y el comportamiento final del medio.

Establecer la misma cantidad de parámetros a evaluar para cada tipo de agua con la finalidad de potenciar los datos obtenidos y así tener mayor claridad en el comportamiento de los medios adsorbentes.

Procurar que la velocidad de filtración sea la misma en los filtros sin importar las características de los medios adsorbentes.

Realizar un análisis comparativo más extenso, incluyendo resinas de intercambio iónico y otros medios.

12. Anexos.

A. ANEXO: Ficha técnica zeolita.

1. ¿Qué es Watercel ZS?

Watercel ZS es un medio adsorbente, granular, de alta calidad, utilizado en la remoción de amoniaco del agua para abastecimiento de efluentes.

2. Características físicas

Punto de fusión	1.300°C
Densidad aparente	0,98 g/cm³
Área superficial	40 m²/g
Color	Verde claro
Granulometría	0,4 a1,0 mm 1,0 a3,0 mm 3,0 a8,0 mm

3. Aplicación

Tasa de flujo: ≤ 5 m³/m².h

Tasa de retro lavado: 25 a 35 m³/m².h

Tiempo de residencia: mínimo de 15 minutos

Altura del lecho: mínimo de 0,8 m.

pH Ideal: 4,5 a 7,0

Lecho: Watercel ZS 0,4 – 1,0 mm

Soporte del lecho: Utilizar Watercel ZS de granulometría 1,0–3,0 mm o 3,0–8,0 mm

Densidad aparente: 0,98 kg/l (g/cm³)

Capacidad: 2% en peso del lecho (en promedio)

GROWING TOGETHER!

Watercel ZS
Ficha Técnica

Rev.2
16/01/2019

4. Mantenimiento

Cambio del lecho cuando saturado o regeneración utilizando Cloruro de Sodio

5. Dimensionamiento del producto

Se debe utilizar como agente pulidor en tratamientos de agua. Siga los datos técnicos orientados en el punto 3 (Aplicación).

6. Suministro

Watercel ZS se suministra en bolsas de 25 Kg.

B. Metodología para la determinación de cloruros en agua.

DETERMINACION DE CLORUROS

- Acondicionamiento de la muestra: dejar aclimatar la muestra si ha estado refrigerada.
- Utilizar un volumen de muestra de 100 mL o una porción adecuada diluida a 100 mL.
- Si la muestra se encuentra altamente coloreada, añadir 3ml de la suspensión de hidróxido de aluminio
- Al (OH)3 Mezclar, dejar sedimentar y filtrar.
- Agregar 1 ml de H2O2 y agitar durante 1 minuto. Para evitar las interferencias de sulfuro, sulfito o tiosulfato.
- Ajustar el pH entre 7 y 10 utilizando hidróxido de sodio (NaOH), o Ácido sulfúrico (H2SO4) de concentraciones 1N o 0,1N.
- Medir un volumen de 100 mL de agua tipo I (Blanco), estándares de control, matriz fortificada, duplicado de la matriz fortificada, muestra, o una porción adecuada de muestra en un Erlenmeyer de 250ml.
- Agregar 1 mL de peróxido de hidrogeno a las muestras para eliminar las interferencias.
- Verificar el pH a blanco, estándares y muestras, en un rango de 7 a 10. Si no se encuentra el pH en el rango ajústelo.
- Agregar 1,0 mL de solución indicadora de K2CrO4; la muestra presentara un color amarillo brillante.
- Valorar el titulante de AgNO3 cada vez que se realice el análisis.
- Valorar la muestra, utilizando la bureta automática que contiene el titulante de AgNO3, hasta un punto final rojo ladrillo o naranja-rojizo.

INSTRUCTIVO DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CLORUROS 4500-Cl- B MÉTODO ARGENTOMETRICO

C. Metodología para la determinación de cloro en el agua.

DETERMINACION DE CLORO

El mejor método para poder realizar esta comprobación es el denominado DPD (dietil-p-fenilen diamina), que obtiene una reacción de coloración roja proporcional a la concentración de CRL usando un pH=6.2-6.5. y que puede valorarse teniendo en cuenta la tonalidad de dicha reacción. En un paso siguiente, se añade a la muestra ioduro potásico para medir el CRC.

Estos son exactamente los pasos por ejecutar para la medida del CRL:

- Colocar en un matraz de 250 mL, 5 Ml de tampón fosfato y 5 mL de solución de DPD.
- Añadir 100 mL del agua problema y esperar dos minutos hasta comprobar la presencia o no de CRL.
- Colocar el matraz sobre el agitador magnético en agitación hasta el final de determinación.
- Titular rápidamente con una solución de sulfato ferroso amoniacal hasta la decoloración y anotar la cantidad gastada de esta sustancia.

D. Análisis estadístico ANOVA.

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	α = 0,05

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	6896	2298,6	8,48	0,000
Error	52	14089	270,9		
Total	55	20985			

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	Eff Zeolita (L); Eff Carbón Activado (L); Eff Zeolita (I); Eff Carbón Activado (I)

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
16,4601	32,86%	28,99%	22,14%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Eff Zeolita (L)	14	56,17	19,00	(47,35; 65,00)
Eff Carbón Activado (L)	14	49,92	16,46	(41,09; 58,75)
Eff Zeolita (I)	14	77,66	13,23	(68,83; 86,49)
Eff Carbón Activado (I)	14	51,65	16,64	(42,82; 60,48)

Desv.Est. agrupada = 16,4601

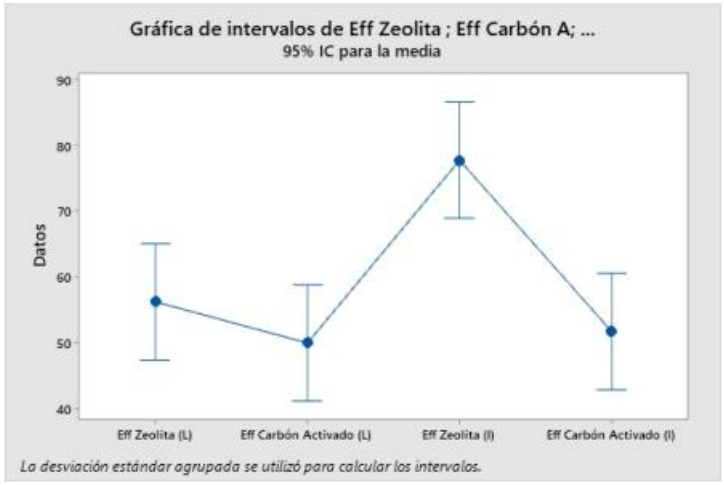
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

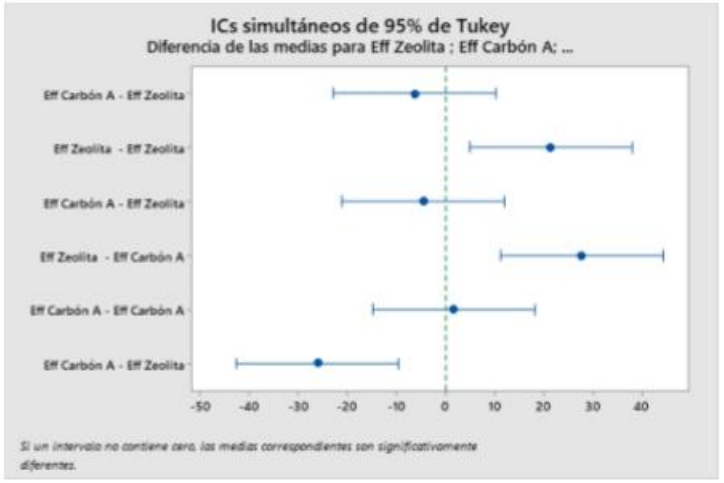
Factor	N	Media	Agrupación
Eff Zeolita (I)	14	77,66	A
Eff Zeolita (L)	14	56,17	B
Eff Carbón Activado (I)	14	51,65	B
Eff Carbón Activado (L)	14	49,92	B

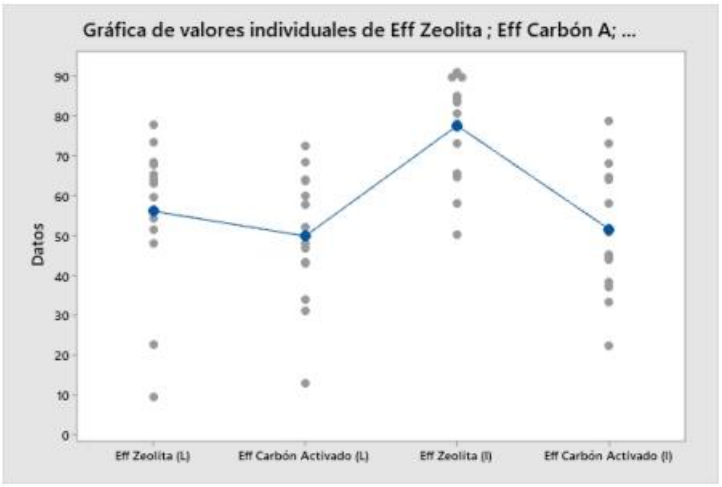
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

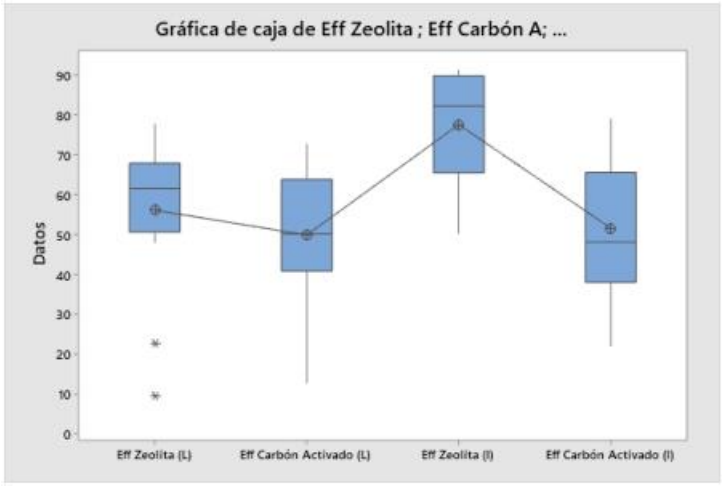
Eff Zeolita (L)	Eff Carbón Activado (L)	Eff Zeolita (I)	Eff Carbón Activado (I)
9,41	12,84	58	58
48,19	52,13	91,04	64,16
22,61	34,06	50,44	45,28
51,47	64,27	91,32	51
54,46	60,18	83,76	37
77,85	68,64	85,16	68,36
59,69	31,07	64,72	22,16
64,17	43,26	84,6	44
59,87	43,14	65,84	44,56
73,59	46,8	80,96	73,12
65,5	48,23	73,12	38,4
67,84	72,68	89,92	64,72
63,27	57,78	78,44	33,36
68,5	63,79	89,92	79

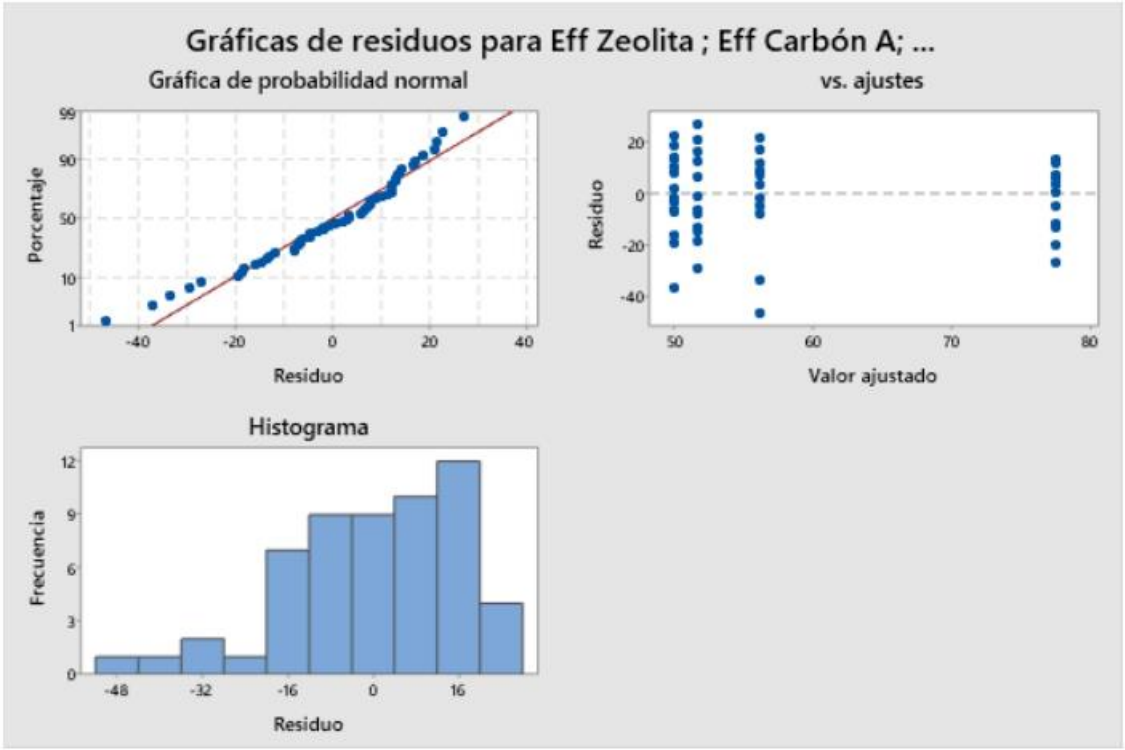
Arreglo matricial hecho en *software minitab 19*


Gráfica de intervalos de Eff Zeolita ; Eff Carbón A; ...
95% IC para la media
Datos
Eff Zeolita (L)
Eff Carbón Activado (L)
Eff Zeolita (I)
Eff Carbón Activado (I)
La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.


ICs simultáneos de 95% de Tukey
Diferencia de las medias para Eff Zeolita ; Eff Carbón A; ...
Eff Carbón A - Eff Zeolita
Eff Zeolita - Eff Zeolita
Eff Carbón A - Eff Zeolita
Eff Zeolita - Eff Carbón A
Eff Carbón A - Eff Carbón A
Eff Carbón A - Eff Zeolita
Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.


Gráfica de valores individuales de Eff Zeolita ; Eff Carbón A; ...
Datos
Eff Zeolita (L)
Eff Carbón Activado (L)
Eff Zeolita (I)
Eff Carbón Activado (I)

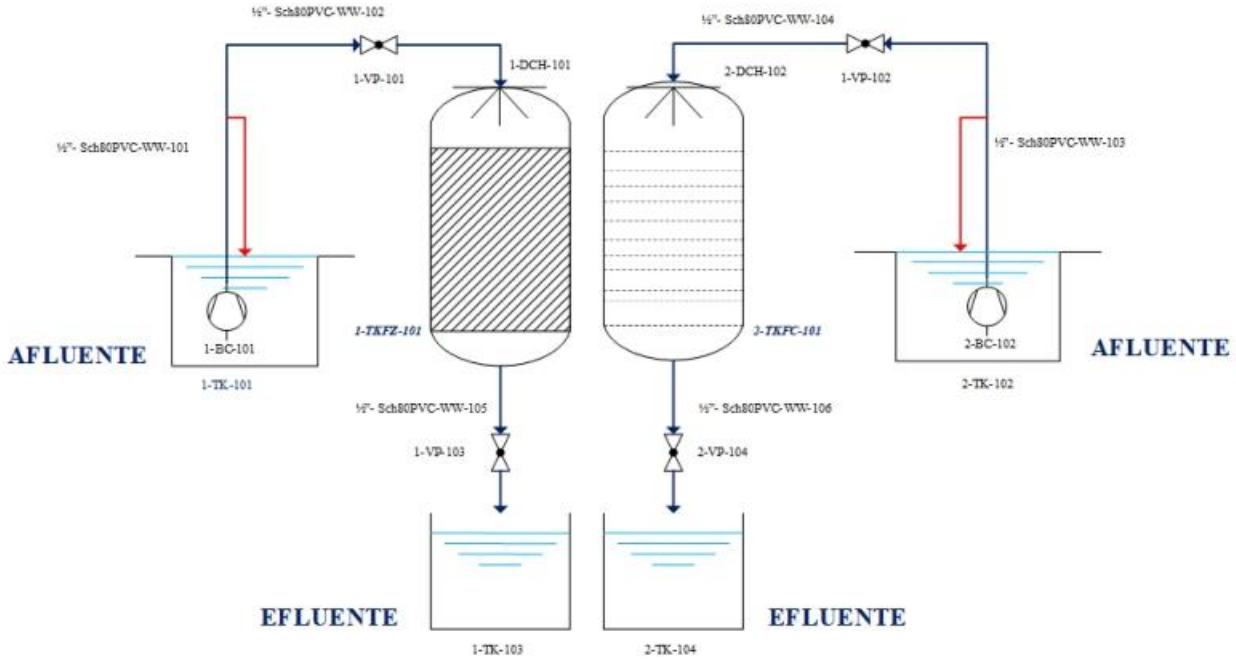

Gráfica de caja de Eff Zeolita ; Eff Carbón A; ...
Datos
Eff Zeolita (L)
Eff Carbón Activado (L)
Eff Zeolita (I)
Eff Carbón Activado (I)


Gráficas de residuos para Eff Zeolita ; Eff Carbón A; ...
Gráfica de probabilidad normal
Porcentaje
Residuo
vs. ajustes
Residuo
Valor ajustado
Histograma
Frecuencia
Residuo

E. P&ID Unidades de filtración de zeolita y carbón activado.

P&ID – UNIDADES DE FILTRACIÓN DE ZEOLITA Y CARBON ACTIVADO

26 de julio de 2021



Lista de Válvulas	Texto mostrado	1-VP-101	1-VP-103	2-VP-102	2-VP-104
	Descripción	Control de flujo	Control de flujo	Control de flujo	Control de flujo
	Clase de válvula	Globo	Globo	Globo	Globo

Lista de equipos	Texto mostrado	1-BC-101	1-TK-101	1-TK-103	1-TKFZ-101	1-DCH-101	2-BC-102	2-TK-102	2-TK-104	2-TKFC-101	2-DCH-102
	Descripción	Bomba sumergible	Tanque de almacenamiento	Tanque de recepción	Filtro de Zeolita	Sistema de dispersión de agua	Boba sumergible	Tanque de almacenamiento	Tanque de recepción	Filtro de Carbón activado	Sistema de dispersión de agua

UNIVERSIDAD DE LA SALLE	*FACULTADE DE INGENIERIA* *INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA*	*Estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita para la remoción de nitrógeno amoniacal en lixiviados de un relleno de sanitario.*	***ELABORADO POR :*** *Diego Gerardo Gualteros Velásquez* *Sebastián Darío Piñeros Cáceres*

F. ANEXO: Hoja de cálculo de porcentajes de remoción de nitrógeno amoniacal para pruebas con lixiviado.

Tabla 13: Porcentajes de remoción con lixiviado.

CORRIDA	*MINERAL*	*MUESTRA*	*CONCENTRACIÓN INICIAL (mg NH3-N/L)*	*CAUDAL (L/h)*	*VELOCIDAD (m3/m2*h)*	*pH*	*CONCENTRACIÓN FINAL (mg NH3-N/L)*	*EFICIENCIA (%)*	*% DE REMOCIÓN PROMEDIO*
1	**ZEOLITA**	**1**	40,8	22,8	5 5	9,08	36,96	9%	*29%*
		2			2,8	9,32	21,14	48%	
	CARBÓN ACTIVADO	**1**			2,8	8,92	35,56	13%	*32%*
		2				9,2	19,53	52%	
2	**ZEOLITA**	**1**	112,52	11,4	2,5	10,1	87,08	23%	*37%*
		2			2,5	9,58	54,6	51%	
	CARBÓN ACTIVADO	**1**			1,4	9,12	74,2	34%	*49%*
		2			1,4	8,9	40,2	64%	
3	**ZEOLITA**	**1**	112,52	11,4	2,5	9,74	51,24	54%	*66%*
		2			2,5	9,79	24,92	78%	
	CARBÓN ACTIVADO	**1**			1,4	8,98	44,8	60%	*64%*
		2			1,4	9,09	35,28	69%	
4	**ZEOLITA**	**1**	112,52	11,4	2,5	7,7	45,36	60%	*62%*
		2			2,5	7,8	40,32	64%	
	CARBÓN ACTIVADO	**1**			1,4	8,84	77,56	31%	*37%*
		2			1,4	8,9	63,84	43%	
5	**ZEOLITA**	**1**	214,2	22,8	5 5	9,72	85,96	60%	*67%*
		2			2,8	9,3	56,56	74%	
	CARBÓN ACTIVADO	**1**			2,8	8,99	121,8	43%	*45%*
		2				9,01	46,8	47%	
6	**ZEOLITA**	**1**	214,2	22,8	5 5	9,62	73,92	66%	*67%*
		2			2,8	9,43	68,88	68%	
	CARBÓN ACTIVADO	**1**			2,8	9,41	110,88	48%	*60%*
		2				9,45	58,52	73%	
7	**ZEOLITA**	**1**	214,2	22,8	5 5	9,15	78,68	63%	*66%*
		2			2,8	9,18	67,48	69%	
	CARBÓN ACTIVADO	**1**			2,8	9,22	90,44	58%	*61%*
		2				9,19	77,56	64%	

G. ANEXO: Hojas de cálculo, resultados de isotermas de adsorción para corridas con lixiviados.

Tabla 14: Datos de adsorción de la zeolita en la primera corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,0068	0,2	0,1360	0,0384	1,7095	0,0225	7,3529	0,0225
2	0,09	0,01	0,045	0,0064	0,2	0,1280	0,0432	1,7337	0,0249	7,8125	0,0249
3	0,08	0,02	0,04	0,0060	0,2	0,1200	0,0480	1,8222	0,0264	8,3333	0,0264
4	0,07	0,03	0,035	0,0057	0,2	0,1140	0,0516	1,8554	0,0278	8,7719	0,0278
5	0,06	0,04	0,03	0,0047	0,2	0,0940	0,0637	1,8701	0,0340	10,6383	0,0340
6	0,05	0,05	0,025	0,0046	0,2	0,0920	0,0649	1,949	0,0333	10,8696	0,0333
7	0,04	0,06	0,02	0,0045	0,2	0,0900	0,0661	1,9822	0,0333	11,1111	0,0333
8	0,03	0,07	0,015	0,0027	0,2	0,0540	0,0877	2,0059	0,0437	18,5185	0,0437

Tabla 15: Datos de adsorción de carbón activado en la primera corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,0069	0,2	0,1380	0,0372	1,643	0,0227	7,2464	0,0227
2	0,09	0,01	0,045	0,0061	0,2	0,1210	0,0474	1,6715	0,0284	8,2645	0,0284
3	0,08	0,02	0,04	0,0056	0,2	0,1116	0,0531	1,7299	0,0307	8,9606	0,0307
4	0,07	0,03	0,035	0,0054	0,2	0,1080	0,0552	1,7713	0,0312	9,2593	0,0312
5	0,06	0,04	0,03	0,0053	0,2	0,1060	0,0564	1,7532	0,0322	9,4340	0,0322
6	0,05	0,05	0,025	0,0044	0,2	0,0880	0,0673	1,7821	0,0377	11,3636	0,0377
7	0,04	0,06	0,02	0,0036	0,2	0,0720	0,0769	1,8209	0,0422	13,8889	0,0422
8	0,03	0,07	0,015	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	1,875	0,0448	16,6667	0,0448

Tabla 16: Datos de adsorción de la zeolita en la segunda corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,014	0,2	0,2740	-0,0444	1,983	-0,0224	3,6496	-0,0224
2	0,09	0,01	0,045	0,0130	0,2	0,2600	-0,0360	1,957	-0,0184	3,8462	-0,0184
3	0,08	0,02	0,04	0,0104	0,2	0,2080	-0,0048	2,008	-0,0024	4,8077	-0,0024
4	0,07	0,03	0,035	0,0092	0,2	0,1840	0,0096	2,0134	0,0048	5,4348	0,0048
5	0,06	0,04	0,03	0,0081	0,2	0,1620	0,0228	2,03	0,0112	6,1728	0,0112
6	0,05	0,05	0,025	0,0068	0,2	0,1360	0,0384	2,0722	0,0185	7,3529	0,0185
7	0,04	0,06	0,02	0,0053	0,2	0,1060	0,0564	2,0488	0,0276	9,4340	0,0276
8	0,03	0,07	0,015	0,0042	0,2	0,0840	0,0697	2,04	0,0341	11,904	0,0341

Tabla 17: Datos de adsorción de carbón activado en la segunda corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,013	0,2	0,2600	-0,0360	1,9616	-0,0184	3,8462	-0,0184
2	0,09	0,01	0,045	0,0088	0,2	0,1760	0,0144	1,973	0,0073	5,6818	0,0073
3	0,08	0,02	0,04	0,0075	0,2	0,1500	0,0300	1,9879	0,0151	6,6667	0,0151
4	0,07	0,03	0,035	0,0067	0,2	0,1340	0,0396	1,981	0,0200	7,4627	0,0200
5	0,06	0,04	0,03	0,0058	0,2	0,1160	0,0504	1,9961	0,0253	8,6207	0,0253
6	0,05	0,05	0,025	0,0054	0,2	0,1080	0,0552	1,9976	0,0277	9,2593	0,0277
7	0,04	0,06	0,02	0,0040	0,2	0,0800	0,0721	2,0095	0,0359	12,5000	0,0359
8	0,03	0,07	0,015	0,0038	0,2	0,0760	0,0745	2,0057	0,0371	13,1579	0,0371

Tabla 18: Datos de adsorción de la zeolita en la tercera corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1880	0,0072	1,9534	0,0037	5,3191	0,0037
2	0,09	0,01	0,045	0,0083	0,2	0,1660	0,0204	1,9584	0,0104	6,0241	0,0104
3	0,08	0,02	0,04	0,0077	0,2	0,1540	0,0276	1,9827	0,0139	6,4935	0,0139
4	0,07	0,03	0,035	0,0065	0,2	0,1300	0,0420	1,9811	0,0212	7,6923	0,0212
5	0,06	0,04	0,03	0,0057	0,2	0,1140	0,0516	2,001	0,0258	8,7719	0,0258
6	0,05	0,05	0,025	0,0046	0,2	0,0920	0,0649	1,992	0,0326	10,8696	0,0326
7	0,04	0,06	0,02	0,0039	0,2	0,0780	0,0733	2,0193	0,0363	12,8205	0,0363
8	0,03	0,07	0,015	0,0028	0,2	0,0560	0,0865	2,0203	0,0428	17,8571	0,0428

Tabla 19: Datos de adsorción de carbón activado en la tercera corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,010	0,2	0,1920	0,0048	1,9915	0,0024	5,2083	0,0024
2	0,09	0,01	0,045	0,0094	0,2	0,1880	0,0072	1,9746	0,0036	5,3191	0,0036
3	0,08	0,02	0,04	0,0079	0,2	0,1580	0,0252	1,998	0,0126	6,3291	0,0126
4	0,07	0,03	0,035	0,0066	0,2	0,1320	0,0408	2,0195	0,0202	7,5758	0,0202
5	0,06	0,04	0,03	0,0057	0,2	0,1140	0,0516	2,0267	0,0255	8,7719	0,0255
6	0,05	0,05	0,025	0,0051	0,2	0,1020	0,0589	2,0138	0,0292	9,8039	0,0292
7	0,04	0,06	0,02	0,0040	0,2	0,0800	0,0721	2,0408	0,0353	12,5000	0,0353
8	0,03	0,07	0,015	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	2,0334	0,0413	16,6667	0,0413

Tabla 20: Datos de adsorción de la zeolita en la cuarta corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1720	0,0168	1,9907	0,0084	5,8140	0,0084
2	0,09	0,01	0,045	0,0078	0,2	0,1560	0,0264	1,9914	0,0133	6,4103	0,0133
3	0,08	0,02	0,04	0,0073	0,2	0,1460	0,0324	2,013	0,0161	6,8493	0,0161
4	0,07	0,03	0,035	0,0061	0,2	0,1220	0,0468	2,007	0,0233	8,1967	0,0233
5	0,06	0,04	0,03	0,0053	0,2	0,1060	0,0564	2,04	0,0277	9,4340	0,0277
6	0,05	0,05	0,025	0,0044	0,2	0,0880	0,0673	2,089	0,0322	11,3636	0,0322
7	0,04	0,06	0,02	0,0035	0,2	0,0700	0,0781	2,067	0,0378	14,2857	0,0378
8	0,03	0,07	0,015	0,0026	0,2	0,0520	0,0889	2,085	0,0426	19,2308	0,0426

Tabla 21: Datos de adsorción de carbón activado en la cuarta corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1720	0,0168	2,031	0,0083	5,8140	0,0083
2	0,09	0,01	0,045	0,0074	0,2	0,1480	0,0312	2,04	0,0153	6,7568	0,0153
3	0,08	0,02	0,04	0,0068	0,2	0,1360	0,0384	2,068	0,0186	7,3529	0,0186
4	0,07	0,03	0,035	0,0062	0,2	0,1240	0,0456	2,087	0,0219	8,0645	0,0219
5	0,06	0,04	0,03	0,0054	0,2	0,1080	0,0552	2,061	0,0268	9,2593	0,0268
6	0,05	0,05	0,025	0,0043	0,2	0,0860	0,0685	2,079	0,0329	11,6279	0,0329
7	0,04	0,06	0,02	0,0036	0,2	0,0720	0,0769	2,094	0,0367	13,8889	0,0367
8	0,03	0,07	0,015	0,0028	0,2	0,0560	0,0865	2,085	0,0415	17,8571	0,0415

Tabla 22: Datos de adsorción de la zeolita en la quinta corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1780	0,0132	1,9987	0,0066	5,6180	0,0066
2	0,09	0,01	0,045	0,0082	0,2	0,1640	0,0216	1,999	0,0108	6,0976	0,0108
3	0,08	0,02	0,04	0,0073	0,2	0,1460	0,0324	2,0007	0,0162	6,8493	0,0162
4	0,07	0,03	0,035	0,0064	0,2	0,1280	0,0432	2,0075	0,0215	7,8125	0,0215
5	0,06	0,04	0,03	0,0054	0,2	0,1080	0,0552	2,0291	0,0272	9,2593	0,0272
6	0,05	0,05	0,025	0,0045	0,2	0,0900	0,0661	2,0462	0,0323	11,1111	0,0323
7	0,04	0,06	0,02	0,0035	0,2	0,0700	0,0781	2,0494	0,0381	14,2857	0,0381
8	0,03	0,07	0,015	0,0026	0,2	0,0520	0,0889	2,0559	0,0432	19,2308	0,0432

Tabla 23: Datos de adsorción del carbón activado en la quinta corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1840	0,0096	2,0091	0,0048	5,4348	0,0048
2	0,09	0,01	0,045	0,0084	0,2	0,1680	0,0192	2,0105	0,0096	5,9524	0,0096
3	0,08	0,02	0,04	0,0075	0,2	0,1500	0,0300	2,0157	0,0149	6,6667	0,0149
4	0,07	0,03	0,035	0,0065	0,2	0,1300	0,0420	2,0152	0,0209	7,6923	0,0209
5	0,06	0,04	0,03	0,0057	0,2	0,1140	0,0516	2,0299	0,0254	8,7719	0,0254
6	0,05	0,05	0,025	0,0046	0,2	0,0920	0,0649	2,243	0,0289	10,8696	0,0289
7	0,04	0,06	0,02	0,0037	0,2	0,0740	0,0757	2,0141	0,0376	13,5135	0,0376
8	0,03	0,07	0,015	0,0027	0,2	0,0540	0,0877	2,0224	0,0434	18,5185	0,0434

Tabla 24: Datos de adsorción de la zeolita en la sexta corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,009	*0,2*	*0,1820*	0,0108	2,0434	0,0053	5,4945	0,0053
2	0,09	0,01	0,045	0,0084	0,2	0,1680	0,0192	2,0343	0,0094	5,9524	0,0094
3	0,08	0,02	0,04	0,0073	0,2	0,1460	0,0324	2,0318	0,0160	6,8493	0,0160
4	0,07	0,03	0,035	0,0064	0,2	0,1280	0,0432	2,0361	0,0212	7,8125	0,0212
5	0,06	0,04	0,03	0,0058	0,2	0,1160	0,0504	2,0028	0,0252	8,6207	0,0252
6	0,05	0,05	0,025	0,0045	0,2	0,0900	0,0661	2,017	0,0328	11,1111	0,0328
7	0,04	0,06	0,02	0,0043	0,2	0,0860	0,0685	2,0095	0,0341	11,6279	0,0341
8	0,03	0,07	0,015	0,0027	0,2	0,0540	0,0877	2,0401	0,0430	18,5185	0,0430

Tabla 25: Datos de adsorción del carbón activado en la sexta corrida -lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,011	0,2	0,2140	-0,0084	1,9955	-0,0042	4,6729	-0,0042
2	0,09	0,01	0,045	0,0094	0,2	0,1880	0,0072	2,0022	0,0036	5,3191	0,0036
3	0,08	0,02	0,04	0,0084	0,2	0,1680	0,0192	2,0083	0,0096	5,9524	0,0096
4	0,07	0,03	0,035	0,0074	0,2	0,1480	0,0312	2,021	0,0155	6,7568	0,0155
5	0,06	0,04	0,03	0,0063	0,2	0,1260	0,0444	2,0287	0,0219	7,9365	0,0219
6	0,05	0,05	0,025	0,0050	0,2	0,1000	0,0601	2,01	0,0299	10,0000	0,0299
7	0,04	0,06	0,02	0,0043	0,2	0,0860	0,0685	2,0226	0,0338	11,6279	0,0338
8	0,03	0,07	0,015	0,0031	0,2	0,0620	0,0829	2,0557	0,0403	16,1290	0,0403

Tabla 26: Datos de adsorción de la zeolita en la séptima corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,010	0,2	0,1940	0,0036	2,004	0,0018	5,1546	0,0018
2	0,09	0,01	0,045	0,0085	0,2	0,1700	0,0180	2,0034	0,0090	5,8824	0,0090
3	0,08	0,02	0,04	0,0077	0,2	0,1540	0,0276	2,0056	0,0138	6,4935	0,0138
4	0,07	0,03	0,035	0,0068	0,2	0,1360	0,0384	2,0018	0,0192	7,3529	0,0192
5	0,06	0,04	0,03	0,0057	0,2	0,1140	0,0516	2,0093	0,0257	8,7719	0,0257
6	0,05	0,05	0,025	0,0049	0,2	0,0980	0,0613	2,0047	0,0306	10,2041	0,0306
7	0,04	0,06	0,02	0,0040	0,2	0,0800	0,0721	2,0077	0,0359	12,5000	0,0359
8	0,03	0,07	0,015	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	2,0089	0,0419	16,6667	0,0419

Tabla 27: Datos de adsorción del carbón activado en la séptima corrida – lixiviado.

Muestra	Ácido acético (L)	Agua destilada (L)	Concentración Á. acético (mol/L)	Volumen titulante(L)	Concentración NaOH (mol/L)	Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)	x	m(g)	x/m(g)	1/Ce	x/m
1	0,1	0	0,05	0,010	0,2	0,2000	0,0000	2,0008	0,0000	5,0000	0,0000
2	0,09	0,01	0,045	0,0092	0,2	0,1840	0,0096	2,0022	0,0048	5,4348	0,0048
3	0,08	0,02	0,04	0,0081	0,2	0,1620	0,0228	2,0063	0,0114	6,1728	0,0114
4	0,07	0,03	0,035	0,0070	0,2	0,1400	0,0360	2,0022	0,0180	7,1429	0,0180
5	0,06	0,04	0,03	0,0063	0,2	0,1260	0,0444	2,0058	0,0222	7,9365	0,0222
6	0,05	0,05	0,025	0,0048	0,2	0,0960	0,0625	2,0031	0,0312	10,4167	0,0312
7	0,04	0,06	0,02	0,0037	0,2	0,0740	0,0757	2,0067	0,0377	13,5135	0,0377
8	0,03	0,07	0,015	0,0028	0,2	0,0560	0,0865	2,0065	0,0431	17,8571	0,0431

H. ANEXO: Hoja de cálculo de porcentajes de remoción de nitrógeno amoniacal para pruebas con agua impactada.

Tabla 28: Porcentajes de remoción con agua impactada.

CORRIDA	*MINERAL*	*MUESTRA*	*CONCENTRACIÓN INICIAL (mg NH_3-N/L)*	*CAUDAL (L/h)*	*VELOCIDAD (m3/m2*h)*	*pH*	*CONCENTRACIÓN FINAL (mg NH_3-N/L)*	*EFICIENCIA (%)*	*% DE REMOCIÓN PROMEDIO*
1	ZEOLITA	1	50	22.8	5 5	8.33	2	58%	***75%***
		2			2,8	8.28	4.48	91%	
	CARBÓN ACTIVADO	1			2,8	7.31	21	58%	***61%***
		2				7.31	17.92	64%	
2	ZEOLITA	1	100	22.8	5 5	7.88	49.56	50%	***71%***
		2			2,8	7.72	8.68	91%	
	CARBÓN ACTIVADO	1			2,8	7.14	54.72	45%	***48%***
		2				7.13	49	51%	
3	ZEOLITA	1	100	22.8	5 5	7.93	16.24	84%	***85%***
		2			2,8	7.87	14.84	85%	
	CARBÓN ACTIVADO	1			2,8	7.23	63	37%	***52%***
		2				6.86	31	68%	
4	ZEOLITA	1	100	17.2	3,8	7.75	35.28	65%	***75%***
		2			3,8	7.65	15.40	85%	
	CARBÓN ACTIVADO	1			2,1	7.39	77.84	22%	***33%***
		2			2,1	6.98	56	44%	
5	ZEOLITA	1	50	17.2	3,8	7.96	17.08	66%	***74%***
		2			3,8	6.72	9.52	81%	
	CARBÓN ACTIVADO	1			2,1	7.21	27.72	45%	***59%***
		2			2,1	6.87	13.44	73%	
6	ZEOLITA	1	50	11.4	2,5	7.9	13.44	73%	***82%***
		2			2,5	7.7	5.04	90%	
	CARBÓN ACTIVADO	1			1,4	7.12	30.8	38%	***52%***
		2			1,4	7.10	7.10	65%	
7	ZEOLITA	1	100	11.4	2,5	7.32	21.56	75%	***84%***
		2			2,5	7.9	10.08	90%	
	CARBÓN ACTIVADO	1			1,4	7.13	66.64	34%	***56%***
		2			1,4	7.09	21	79%	

I. ANEXO: Hojas de cálculo, resultados de isotermas de adsorción para corridas con agua impactada.

Tabla 29: Datos de adsorción de la zeolita en la primera corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1800	0,0120	2,0012	0,0060	5,5556	0,0060
2	0,09	0,01	0,045	0,0087	0,2	0,1740	0,0156	2,0057	0,0078	5,7471	0,0078
3	0,08	0,02	0,04	0,0077	0,2	0,1540	0,0276	2,004	0,0138	6,4935	0,0138
4	0,07	0,03	0,035	0,0066	0,2	0,1320	0,0408	2,0052	0,0204	7,5758	0,0204
5	0,06	0,04	0,03	0,0057	0,2	0,1140	0,0516	2,0031	0,0258	8,7719	0,0258
6	0,05	0,05	0,025	0,0047	0,2	0,0940	0,0637	2,0021	0,0318	10,6383	0,0318
7	0,04	0,06	0,02	0,0038	0,2	0,0760	0,0745	2,0044	0,0372	13,1579	0,0372
8	0,03	0,07	0,015	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	2,0037	0,0420	16,6667	0,0420

Tabla 30: Datos de adsorción del carbón activado en la primera corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1820	0,0108	2,0035	0,0054	5,4945	0,0054
2	0,09	0,01	0,045	0,0083	0,2	0,1660	0,0204	2,0031	0,0102	6,0241	0,0102
3	0,08	0,02	0,04	0,0076	0,2	0,1520	0,0288	2,006	0,0144	6,5789	0,0144
4	0,07	0,03	0,035	0,0066	0,2	0,1320	0,0408	2,0054	0,0204	7,5758	0,0204
5	0,06	0,04	0,03	0,0058	0,2	0,1160	0,0504	2,0027	0,0252	8,6207	0,0252
6	0,05	0,05	0,025	0,0049	0,2	0,0980	0,0613	2,0066	0,0305	10,2041	0,0305
7	0,04	0,06	0,02	0,0039	0,2	0,0780	0,0733	2,0093	0,0365	12,8205	0,0365
8	0,03	0,07	0,015	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	2,0024	0,0420	16,6667	0,0420

Tabla 31: Datos de adsorción de la zeolita en la segunda corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1880	0,0072	2,0029	0,0036	5,3191	0,0036
2	0,09	0,01	0,045	0,0086	0,2	0,1720	0,0168	2,0038	0,0084	5,8140	0,0084
3	0,08	0,02	0,04	0,0075	0,2	0,1500	0,0300	2,0054	0,0150	6,6667	0,0150
4	0,07	0,03	0,035	0,0064	0,2	0,1280	0,0432	2,0044	0,0216	7,8125	0,0216
5	0,06	0,04	0,03	0,0056	0,2	0,1120	0,0528	2,0059	0,0263	8,9286	0,0263
6	0,05	0,05	0,025	0,0045	0,2	0,0900	0,0661	2,0052	0,0329	11,1111	0,0329
7	0,04	0,06	0,02	0,0036	0,2	0,0720	0,0769	2,0088	0,0383	13,8889	0,0383
8	0,03	0,07	0,015	0,0029	0,2	0,0580	0,0853	2,0069	0,0425	17,2414	0,0425

Tabla 32: Datos de adsorción del carbón activado en la segunda corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1800	0,0120	2,003	0,0060	5,5556	0,0060
2	0,09	0,01	0,045	0,0082	0,2	0,1640	0,0216	2,0024	0,0108	6,0976	0,0108
3	0,08	0,02	0,04	0,0075	0,2	0,1500	0,0300	2,0032	0,0150	6,6667	0,0150
4	0,07	0,03	0,035	0,0065	0,2	0,1300	0,0420	2,0044	0,0210	7,6923	0,0210
5	0,06	0,04	0,03	0,0054	0,2	0,1080	0,0552	2,0077	0,0275	9,2593	0,0275
6	0,05	0,05	0,025	0,0047	0,2	0,0940	0,0637	2,0066	0,0317	10,6383	0,0317
7	0,04	0,06	0,02	0,0039	0,2	0,0780	0,0733	2,0042	0,0366	12,8205	0,0366
8	0,03	0,07	0,015	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	2,0031	0,0420	16,6667	0,0420

Tabla 33: Datos de adsorción de la zeolita en la tercera corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1800	0,0120	2,004	0,0060	5,5556	0,0060
2	0,09	0,01	0,045	0,0084	0,2	0,1680	0,0192	2,0024	0,0096	5,9524	0,0096
3	0,08	0,02	0,04	0,0070	0,2	0,1400	0,0360	2,0065	0,0180	7,1429	0,0180
4	0,07	0,03	0,035	0,0062	0,2	0,1240	0,0456	2,0073	0,0227	8,0645	0,0227
5	0,06	0,04	0,03	0,0054	0,2	0,1080	0,0552	2,0024	0,0276	9,2593	0,0276
6	0,05	0,05	0,025	0,0045	0,2	0,0900	0,0661	2,0055	0,0329	11,1111	0,0329
7	0,04	0,06	0,02	0,0034	0,2	0,0680	0,0793	2,0049	0,0395	14,7059	0,0395
8	0,03	0,07	0,015	0,0029	0,2	0,0580	0,0853	2,0046	0,0425	17,2414	0,0425

Tabla 34: Datos de adsorción del carbón activado en la tercera corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1780	0,0132	2,0019	0,0066	5,6180	0,0066
2	0,09	0,01	0,045	0,0083	0,2	0,1660	0,0204	2,0072	0,0102	6,0241	0,0102
3	0,08	0,02	0,04	0,0074	0,2	0,1480	0,0312	2,0011	0,0156	6,7568	0,0156
4	0,07	0,03	0,035	0,0062	0,2	0,1240	0,0456	2,0074	0,0227	8,0645	0,0227
5	0,06	0,04	0,03	0,0056	0,2	0,1120	0,0528	2,0061	0,0263	8,9286	0,0263
6	0,05	0,05	0,025	0,0047	0,2	0,0940	0,0637	2,001	0,0318	10,6383	0,0318
7	0,04	0,06	0,02	0,0035	0,2	0,0700	0,0781	2,0059	0,0389	14,2857	0,0389
8	0,03	0,07	0,015	0,0028	0,2	0,0560	0,0865	2,0031	0,0432	17,8571	0,0432

Tabla 35: Datos de adsorción de la zeolita en la cuarta corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1780	0,0132	2,0013	0,0066	5,6180	0,0066
2	0,09	0,01	0,045	0,0080	0,2	0,1600	0,0240	2,006	0,0120	6,2500	0,0120
3	0,08	0,02	0,04	0,0072	0,2	0,1440	0,0336	2,0022	0,0168	6,9444	0,0168
4	0,07	0,03	0,035	0,0065	0,2	0,1300	0,0420	2,0022	0,0210	7,6923	0,0210
5	0,06	0,04	0,03	0,0055	0,2	0,1100	0,0540	2,0046	0,0270	9,0909	0,0270
6	0,05	0,05	0,025	0,0049	0,2	0,0980	0,0613	2,009	0,0305	10,2041	0,0305
7	0,04	0,06	0,02	0,0038	0,2	0,0760	0,0745	2,0004	0,0372	13,1579	0,0372
8	0,03	0,07	0,015	0,0029	0,2	0,0580	0,0853	2,0026	0,0426	17,2414	0,0426

Tabla 36: Datos de adsorción del carbón activado en la cuarta corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1860	0,0084	2,005	0,0042	5,3763	0,0042
2	0,09	0,01	0,045	0,0085	0,2	0,1700	0,0180	2,0048	0,0090	5,8824	0,0090
3	0,08	0,02	0,04	0,0075	0,2	0,1500	0,0300	2,0018	0,0150	6,6667	0,0150
4	0,07	0,03	0,035	0,0067	0,2	0,1340	0,0396	2,0041	0,0198	7,4627	0,0198
5	0,06	0,04	0,03	0,0057	0,2	0,1140	0,0516	2,0017	0,0258	8,7719	0,0258
6	0,05	0,05	0,025	0,0048	0,2	0,0960	0,0625	2,0047	0,0312	10,4167	0,0312
7	0,04	0,06	0,02	0,0039	0,2	0,0780	0,0733	2,0022	0,0366	12,8205	0,0366
8	0,03	0,07	0,015	0,0029	0,2	0,0580	0,0853	2,0042	0,0425	17,2414	0,0425

Tabla 37: Datos de adsorción de la zeolita en la quinta corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1840	0,0096	2,0033	0,0048	5,4348	0,0048
2	0,09	0,01	0,045	0,0083	0,2	0,1660	0,0204	2,0032	0,0102	6,0241	0,0102
3	0,08	0,02	0,04	0,0073	0,2	0,1460	0,0324	2,008	0,0161	6,8493	0,0161
4	0,07	0,03	0,035	0,0063	0,2	0,1260	0,0444	2,0047	0,0222	7,9365	0,0222
5	0,06	0,04	0,03	0,0055	0,2	0,1100	0,0540	2,0024	0,0270	9,0909	0,0270
6	0,05	0,05	0,025	0,0045	0,2	0,0900	0,0661	2,0039	0,0330	11,1111	0,0330
7	0,04	0,06	0,02	0,0038	0,2	0,0760	0,0745	2,0017	0,0372	13,1579	0,0372
8	0,03	0,07	0,015	0,0027	0,2	0,0540	0,0877	2,0033	0,0438	18,5185	0,0438

Tabla 38: Datos de adsorción del carbón activado en la quinta corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1860	0,0084	2,0033	0,0042	5,3763	0,0042
2	0,09	0,01	0,045	0,0083	0,2	0,1660	0,0204	2,0032	0,0102	6,0241	0,0102
3	0,08	0,02	0,04	0,0074	0,2	0,1480	0,0312	2,008	0,0156	6,7568	0,0156
4	0,07	0,03	0,035	0,0065	0,2	0,1300	0,0420	2,0047	0,0210	7,6923	0,0210
5	0,06	0,04	0,03	0,0056	0,2	0,1120	0,0528	2,0024	0,0264	8,9286	0,0264
6	0,05	0,05	0,025	0,0047	0,2	0,0940	0,0637	2,0039	0,0318	10,6383	0,0318
7	0,04	0,06	0,02	0,0038	0,2	0,0760	0,0745	2,0017	0,0372	13,1579	0,0372
8	0,03	0,07	0,015	0,0028	0,2	0,0560	0,0865	2,0033	0,0432	17,8571	0,0432

Tabla 39: Datos de adsorción de la zeolita en la sexta corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1800	0,0120	2,0056	0,0060	5,5556	0,0060
2	0,09	0,01	0,045	0,0081	0,2	0,1620	0,0228	2,001	0,0114	6,1728	0,0114
3	0,08	0,02	0,04	0,0072	0,2	0,1440	0,0336	2,0093	0,0167	6,9444	0,0167
4	0,07	0,03	0,035	0,0063	0,2	0,1260	0,0444	2,0059	0,0222	7,9365	0,0222
5	0,06	0,04	0,03	0,0055	0,2	0,1100	0,0540	2,006	0,0269	9,0909	0,0269
6	0,05	0,05	0,025	0,0046	0,2	0,0920	0,0649	2,0061	0,0323	10,8696	0,0323
7	0,04	0,06	0,02	0,0038	0,2	0,0760	0,0745	2,0018	0,0372	13,1579	0,0372
8	0,03	0,07	0,015	0,0029	0,2	0,0580	0,0853	2,0041	0,0425	17,2414	0,0425

Tabla 40: Datos de adsorción del carbón activado en la sexta corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1800	0,0120	2,0014	0,0060	5,5556	0,0060
2	0,09	0,01	0,045	0,0081	0,2	0,1620	0,0228	2,002	0,0114	6,1728	0,0114
3	0,08	0,02	0,04	0,0072	0,2	0,1440	0,0336	2,0031	0,0168	6,9444	0,0168
4	0,07	0,03	0,035	0,0060	0,2	0,1200	0,0480	2,0039	0,0240	8,3333	0,0240
5	0,06	0,04	0,03	0,0055	0,2	0,1100	0,0540	2,0028	0,0270	9,0909	0,0270
6	0,05	0,05	0,025	0,0037	0,2	0,0740	0,0757	2,0051	0,0377	13,5135	0,0377
7	0,04	0,06	0,02	0,0034	0,2	0,0680	0,0793	2,0048	0,0395	14,7059	0,0395
8	0,03	0,07	0,015	0,0028	0,2	0,0560	0,0865	2,0027	0,0432	17,8571	0,0432

Tabla 41: Datos de adsorción de la zeolita en la séptima corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1860	0,0084	2,0045	0,0042	5,3763	0,0042
2	0,09	0,01	0,045	0,0074	0,2	0,1480	0,0312	2,0058	0,0156	6,7568	0,0156
3	0,08	0,02	0,04	0,0072	0,2	0,1440	0,0336	2,0059	0,0168	6,9444	0,0168
4	0,07	0,03	0,035	0,0064	0,2	0,1280	0,0432	2,0086	0,0215	7,8125	0,0215
5	0,06	0,04	0,03	0,0056	0,2	0,1120	0,0528	2,0069	0,0263	8,9286	0,0263
6	0,05	0,05	0,025	0,0047	0,2	0,0940	0,0637	2,0031	0,0318	10,6383	0,0318
7	0,04	0,06	0,02	0,0038	0,2	0,0760	0,0745	2,0029	0,0372	13,1579	0,0372
8	0,03	0,07	0,015	0,0030	0,2	0,0600	0,0841	2,0014	0,0420	16,6667	0,0420

Tabla 42: Datos de adsorción del carbón activado en la séptima corrida - agua impactada.

Muestra	*Ácido acético (L)*	*Agua destilada (L)*	*Concentración Á. acético (mol/L)*	*Volumen titulante(L)*	*Concentración NaOH (mol/L)*	*Concentración en equilibrio (Ce) (mol/L)*	*x*	*m(g)*	*x/m(g)*	*1/Ce*	*x/m*
1	0,1	0	0,05	0,009	0,2	0,1860	0,0084	2,0034	0,0042	5,3763	0,0042
2	0,09	0,01	0,045	0,0087	0,2	0,1740	0,0156	2,0009	0,0078	5,7471	0,0078
3	0,08	0,02	0,04	0,0078	0,2	0,1560	0,0264	2,0014	0,0132	6,4103	0,0132
4	0,07	0,03	0,035	0,0070	0,2	0,1400	0,0360	2,0005	0,0180	7,1429	0,0180
5	0,06	0,04	0,03	0,0062	0,2	0,1240	0,0456	2,0027	0,0228	8,0645	0,0228
6	0,05	0,05	0,025	0,0050	0,2	0,1000	0,0601	2,0039	0,0300	10,0000	0,0300
7	0,04	0,06	0,02	0,0040	0,2	0,0800	0,0721	2,0077	0,0359	12,5000	0,0359
8	0,03	0,07	0,015	0,0027	0,2	0,0540	0,0877	2,0052	0,0437	18,5185	0,0437

J. ANEXO: Diseño unidades de filtración a escala real.

FILTROS DE CARBON ACTIVADO				
Parámetro	**Convenciones**	**Unidades**	**Valor**	**Observaciones**
Caudal	Q	(m^3/s)	0,001	Caudal en m^3/s
Caudal	Q	L/s	1,00	Caudal en m^3/h
Caudal	Q	(m^3/h)	3,6	Caudal en m^3/d
# de filtros	n	Adimensional	3	
Caudal por filtro	Qfil	(m^3/h)	1,20	fil=
Caudal por filtro	Qfil	(m^3/d)	28,8	
Velocidad de operación	VO	m/d	24	120 m^3/ m^2-d. (Romero)
Velocidad de operación	vO	m/h	1,00	
Area total	A	m^2	3,60	=
Area por filtro	AF	m^2	1,20	=
Carga hidráulica	Co	m^3/ m^2-h	1,00	=
Diámetro	d	m	1,24	$= \sqrt{\quad}$ 4
Diámetro adoptado	d	m	1,20	manualmente redondeando
Area nueva calculada	A	m^2	1,13	$= \sqrt{\quad}$ 4
Perímetro	P	m	3,8	P= *D
Tiempo de retención	tr	min	30	>10 Criterio de empresa
Tiempo de retención	tr	h	0,5	(Romero)
Volumen	V	m^3	0,60	= *
Altura calculada	h	m	0,53	=
Altura vacía de retro lavado	hR	m	0,93	$h = h * 0.5$
Altura total del tanque	ht	m	1,86	ht=hL+hl+hp+hR
altura del filtro	hf	m	2,00	manualmente redondeando
Altura del lecho más soporte	hl	m	0,93	Sumatoria de lecho de grava y arena

FILTRO ZEOLITA				
Parámetro	***Convenciones***	***Unidades***	***Valor***	***Observaciones***
Caudal	Q	(m3/s)	0,001	Caudal en m3/s
Caudal	Q	L/s	1,00	Caudal en m3/h
Caudal	Q	(m3/h)	3,6	Caudal en m3/d
# de filtros	n	Adimensional	3	-
Caudal por filtro	Qfil	(m3/h)	1,20	
Caudal por filtro	Qfil	(m3/d)	28,8	
Velocidad de operación	VO	m/d	40	120 m3/m2-d. (Ficha Técnica)
Velocidad de operación	vO	m/h	1,67	>5 m3/m2-h. (Ficha Técnica)
Area total	A	m2	2,16	=
Area por filtro	AF	m2	0,72	=
Carga hidráulica	Co	m3/m2-h	1,67	=
Diámetro	d	m	0,96	$= \sqrt{\quad}$ 4
Diámetro adoptado	d	m	1,00	manualmente redondeando
Área nueva calculada	A	m2	0,79	$= \sqrt{\quad}$ 4
Perímetro	P	m	3,1	P= *D
Tiempo de retención	tr	min	32	>10 Criterio de empresa
Tiempo de retención	tr	h	0,5	(Romero)
Volumen	V	m3	0,64	= *
Altura calculada del medio	h	m	0,81	$= -$ Este supera los 80 cm recomendado por el proveedor
Altura vacía de retro lavado	hR	m	0,40	$h = h * 0.5$
Altura total	ht	m	1,62	ht=hL+hl+hp+hR
altura del filtro	hf	m	1,50	manualmente redondeando
Altura total tanque	ht	m	1,81	altura total tanque = altura del medio / (1-%de vacío)
Altura del lecho más soporte	hl	m	1,21	Sumatoria de lecho de grava y arena

13. Bibliografía

Trabajos de grado

Alcivar, M. S., Pérez, A. V., & Gámez, M. R. (2017). LA ZEOLITA EN LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES. Ecuador. Recuperado el 21 de abril de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/328052604

CANTO, C. F. (14 de marzo de 2014). TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO: PROPUESTA Y. Recuperado el 23 de junio de 2021, de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152920/Tratamiento-de-lixiviados-de-un-relleno-sanitario-Propuesta-y-evaluaci%c3%b3n-de-un-sistema.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Duarte, E., & Vizcaíno, C. (2015). *Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial.* Bogotá: Universidad de LaSalle. Recuperado el 03 de abril de 2020

Garrido, M., Sosa, M., Ramírez, M., & Fonseca, E. (2018). *Remoción de iones hierro(II) en medio acuoso con una toba vítrea natural.* La Habana, Cuba. Recuperado el 15 de Abril de 2020

Iganacio , Ezpinoza , Gallego ; Cesar, Symonds,Arguelles. (ABRIL de 2009). *ZEOLITA NATURAL COMO FILTRO DE METALES PESADOS.* Recuperado el 23 de Julio de 2021

Montes, Lopez, Mercado, Camacho, & Leon. (2017). *Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca2+ por distintos métodos fisico-químicos para la posible aplicacion en procesor de separacion de gases.* Mexico. Recuperado el 21 de abril de 2020, de http://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v28n1/1665-3521-sv-28-01-00005.pdf

Sánches, L. Y. (Julio de 2018). *EMPLEO DE ZEOLITAS EN PROCESOS DE ADSORCIÓN Y SEPARACIÓN DE CADENA CORTA.* Recuperado el 23 de Julio de 2021, de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/107362/S%c3%81NCHEZ%20-%20Empleo%20de%20zeolitas%20en%20procesos%20de%20adsorci%c3%b3n%20y%20separaci%c3%b3n%20de%20hidrocarburos%20de%20cadena%20corta.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Libros

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION, AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20va ed. Washington: APHA.

Aulton, M. E. (2004). *Farmacia : La ciencia del diseño de las formas famaceuticas.* (Segunda Edición ed.). Leicester, Reino Unido : ELSEVIER. Recuperado el 04 de Abril de 2020, de https://books.google.com.co/books?id=r5k1fvgCi7IC&pg=PA68&dq=que+son+las+isotermas+de+adsorcion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwif4YTOo8_oAhWFUt8KHd17AAEQ6AEIYTAI#v=onepage&q=que%20son%20las%20isotermas%20de%20adsorcion&f=false

Bosch, P., & Schifter, I. (1997). *LA ZEOLITA UNA PIEDRA QUE HIERVE* (Segunda Edición ed., Vol. Volumen 1). México: Fondo de Cultura Económica. Recuperado el 30 de Marzo de 2020, de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_1.html

Girlado, E. (2016). *Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios.* Recuperado el 24 de Marzo de 2020

Jean, Rouquerol; Françoise, Rouquerol, Philip, Llewellyn; Guillaume, Maurin; Kenneth S.W. Sing. (2014). Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications (Vol. Segundo). San Diego: Elsevier. Recuperado el 23 de junio de 2021, de https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=UOE-ZscCYncC&oi=fnd&pg=PP1&dq=(Rouquerol+F,+Rouquerol+J,+Sing+KSW,+Llewellyn+P,+Maurin+G,+2014).&ots=0TXTDGtmiw&sig=MKnIjdoq8BE0YGh8CGO37SX78T8#v=onepage&q&f=false

Levitt, P. B. (1997). *Química Física Práctica de Findlay* (NOVENA EDICIÓN ed.). Londres: REVERTÉ, S.A. Recuperado el 02 de ABRIL de 2020, de https://books.google.com.co/books?id=RU-DGFei4e8C&pg=PA414&dq=que+es+la+adsorcion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi8juf0_MnoAhVIdt8KHW1wDQEQ6AEIKDAA#v=onepage&q=que%20es%20la%20adsorcion&f=false

Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental.* Mexico D.F. Recuperado el 24 de Marzo de 2020, de https://books.google.com.co/books?id=5NR8DIk1n68C&pg=PT1&dq=que+son+los+lixiviados&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjs0aXcsrPoAhWET98KHe3LAgIQ6AEIPzAD#v=onepage&q=que%20son%20los%20lixiviados&f=false

Martín, M. (2014). *El Carbon Vegental. Propiedades y Obtención.* España: Edicione Mundi-Prensa. Recuperado el 30 de Marzo de 2020, de https://www.todostuslibros.com/libros/el-carbon-vegetal-propiedades-y-obtencion_978-84-7114-229-0

MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. (23 de marzo de 2005). DECRETO NÚMERO 0838 Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Recuperado el 23 de junio de 2021, de https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Decretos/dec_0838_230305.pdf

Minitab. (2020). Introducción a Minitab 19 para Windows. Recuperado de https://www.minitab.com/content/dam/www/en/uploadedfiles/documents/getting-started/Minitab19GettingStarted_ESES.pdf

Taylor, G. (1995). Ingenieria Economica. Mexico: Limusa. Recuperado el 23 de junio de 2021

Revistas

Andres Miguel Zornaza; Liz Avendaño Villafranca; Luis Borras Falomir; Daniel Aguado Garcia; Jose Luis Alsonso. (2014). análisis de las correlaciones entre la abundancia de bacterias nitrificantes y los parámetros operacionales y fisicoquímicos relacionados con el proceso biológico de nitrificación en fangos activos. Valencia, España: Articulos Tecnicos. Recuperado el 23 de Julio de 2021, https://www.researchgate.net/publication/260228807_Analisis_de_las_correlaciones_entre_la_abundancia_de_bacterias_nitrificantes_y_los_parametros_operacionales_y_fisicoquimicos_relacionados_con_el_proceso_biologico_de_nitrificacion_en_fangos_activos

Calvachi, G. L., & Ortiz., I. A. (2013). *Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública.* Recuperado el 28 de Marzo de 2020, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007

Carlos Eduardo, M. (2004). Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos. Guatemala. Recuperado el 23 de junio de 2021, de https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/guia-practica-para-la-operacion-de-celdas-diarias-en-rellenos-sanitarios-pequenos-y-medianos/

Dogan Karadag. a,Sema Tok, Eda Akgul, Mustafa Turan, Mustafa Ozturk, ,Ahmet Demir . (01 de MAYO de 2008). Eliminación de amonio de lixiviados de rellenos sanitarios utilizando clinoptilolita natural de Gördes. ELSEVIER, 153(1 A 2), 60-66. Recuperado el 23 de junio de 2021, de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407011764

Esther Siles Fernández, J. M. (13 de febrero de 2008). Eliminación del nitrógeno amoniacal en aguas residuales sanitarias. *TÉCNICA INDUSTRIAL* . Recuperado el 02 de Marzo de 2020, de http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-355-eliminacion-nitrogeno-amoniacal-aguas-residuales-sanitarias.aspx

Industrial, M. (17 de marzo de 2017). *Las formas múltiples del Nitrógeno (amónio-nitrito-nitrato-nitrificación-desnitrificación.* WATERXPERT. Recuperado el 22 de Julio de 2021, de https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/las-formas-multiples-del-nitrogeno

Katia M. Noguera ;Jesús T. Olivero. (13 de Septiembre de 2010). LOS RELLENOS SANITARIOS EN LATINOAMÉRICA: CASO COLOMBIANO. *REV. ACAD. COLOMB. CIENC, XXXIV*. Recuperado el 23 de Julio de 2021, de https://www.accefyn.com/revista/Vol_34/132/347-356.pdf

Revista SEMANA . (01 de Marzo de 2020). El 78% de los hogares colombianos no recicla. *SEMANA SOSTENIBLE*. Recuperado el 15 de Abril de 2020, de https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/el-78-de-los-hogares-colombianos-no-recicla/44231

S. Renou aJ.G. Givaudan a, S. P. (11 de febrero de 2008). Tratamiento de lixiviados de vertederos: revisión y oportunidad. ELESEVIER, 468-493. Recuperado el 23 de junio de 2021, de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407013593

Cibergrafía

Karadag, D. (19 de agosto de 2007). *Ammonium removal from Sanitary Landfill Leachate using Natural Gördes Clinoptilolite, Journal of Hazardous Materials, doi:10.10106/j.jhazmat.2007.08.019*.

LENNTECH. (21 de abril de 2020). Obtenido de https://www.lenntech.es/adsorcion-carbon-activado.htm

Lourdes, G. (2013). *Nitrógeno Amoniacal, Imporntancia de su determinción.* Recuperado el 24 de Marzo de 2020

Primo, O., M.J. Rivero y I. Ortiz. (2007). Photo-Fenton Process as an Efficient Alternative to the Treatment of Landfill Leachates, Journal of Hazardous Materials, doi: 10.10.106/j.jhazmat.2007.09.053

Renou, S. (2008). Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity, Journal of Hazardous

Univeridad de Sevilla. (2006). *Manual del Carbon Activado.* España. Recuperado el 30 de Marzo de 2020, de http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf

Uygur, A. y Kargi, F.(14 de septiembre de 2004). *Biological Nutrient Removal from Pre-Treated Landfill Leachate in a Sequencing Batch Reactor, Journal of Environmental Management*

WAPP Rathayake, G. H. (2018). *A REVIEW OF LEACHATE TREATMENT TECHNIQUES.* Kandy, Sri Lanka. Recuperado el 13 de Abril de 2020