

	GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS		Código	FO-GS-15
			VERSIÓN	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	03/04/2017
			PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): MAYRA SIRLEY APELLIDOS: FERREIRA GRIMALDOS

NOMBRE(S): FELIPE LEONARDO APELLIDOS: BENITEZ PICON

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA DE MINAS

DIRECTOR:

NOMBRE(S): GABRIEL APELLIDOS: PEÑA RODRIGUEZ

CO-DIRECTOR:

NOMBRE(S): NORBERTO JUNIOR APELLIDOS: PEREZ RAMÍREZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): SINTERIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS CERÁMICAS A PARTIR DE ARCILLAS, DIATOMITAS Y CENIZAS VOLANTES PARA EL TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES MINERAS

RESUMEN

El proyecto investigativo tiene como propósito la sinterización y caracterización de membranas cerámicas tomando como materias primas las arcillas, diatomitas y cenizas volantes, con el objetivo de determinar la eficiencia en los procesos de filtración a muestras de aguas residuales mineras y así mejorar la calidad de agua para posteriores usos mineros o vertimientos a corrientes de aguas superficiales. La metodología utilizada fue descriptiva, aplicada y experimental por tratarse de un estudio de laboratorio con análisis de variables. Se lograron sinterizar las cerámicas porosas a partir de residuos de diatomitas de la industria cervecera, cenizas volantes de la combustión del carbón y caolines para ser usados en procesos de tratamiento de aguas de la industria minera, lo cual aporta significativamente a la economía circular, dando valor agregado a los residuos industriales.

PALABRAS CLAVE: Filtración, aguas residuales mineras, membranas, diatomitas, cenizas volantes.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 146 PLANOS: ILUSTRACIONES: CD ROOM: 1

Copia No Controlada

SINTERIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS CERÁMICAS A PARTIR DE
ARCILLAS, DIATOMITAS Y CENIZAS VOLANTES PARA EL TRATAMIENTOS DE
AGUAS RESIDUALES MINERAS

MAYRA SIRLEY FERREIRA GRIMALDOS
FELIPE LEONARDO BENITEZ PICON

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA DE MINAS
SAN JOSE DE CUCUTA

2022

SINTERIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS CERÁMICAS A PARTIR DE
ARCILLAS, DIATOMITAS Y CENIZAS VOLANTES PARA EL TRATAMIENTOS DE
AGUAS RESIDUALES MINERAS

MAYRA SIRLEY FERREIRA GRIMALDOS

FELIPE LEONARDO BENITEZ PICON

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero de Minas

Director:

Ing. GABRIEL PEÑA RODRIGUEZ

Codirector:

Ing. NORBERTO JUNIOR PEREZ RAMÍREZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA DE MINAS

SAN JOSE DE CUCUTA

2022

ACTA DE SUSTENTACION DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: Cúcuta, 6 de mayo de 2022

HORA: 6:00 p.m.

LUGAR: AUDITORIO DE TERREOS

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA DE MINAS

TITULO DE LA TESIS: "SINTERIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS CERÁMICAS A PARTIR DE ARCILLAS, DIATOMITAS Y CENIZAS VOLANTES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MINERAS".

JURADOS: Ing. ISMAEL HUMBERTO GARCIA
Ing. PEDRO PABLO TORRES MEDINA
Ing. MARHA ISABEL MONSALVE

ENTIDAD: U. F. P. S.
ENTIDAD: U. F. P. S.
ENTIDAD: U. F. P. S.

DIRECTOR: Ing. GABRIEL PEÑA RODRIGUEZ
CO-DIRECTOR: Ing. NORBERTO JUNIOR PEREZ

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACIÓN	CALIFICACIÓN		
			NUMERO	LETRA	(A) (M) (L)
MAYRA SIRLEY FERREIRA G.	1181055	4.4	CUATRO,	CUARTRO	APROBADA
FELIPE LEONARDO BENITEZ	1181085	4.4	CUATRO,	CUARTRO	APROBADA

OBSERVACIONES:

FIRMA DE LOS JURADOS:



Vº. Bº. 
COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR

Contenido

	pág.
Introducción	16
1. Problema	20
1.1 Título	20
1.2 Planteamiento del Problema	20
1.3 Formulación del Problema	23
1.4 Objetivos	23
1.4.1 Objetivo general	23
1.4.2 Objetivos específicos	23
1.5 Justificación	24
1.5.1 Membranas usos, beneficios y estructuras, requerimiento o justificación de su uso	25
1.6 Alcance y Limitaciones	27
1.6.1 Alcances	27
1.6.2 Limitaciones	27
1.7 Delimitaciones	27
1.7.1 Delimitación espacial	27
1.7.2 Delimitación temporal	27
1.7.3 Delimitación conceptual	28
2. Marco Referencial	30
2.1 Antecedentes	30
2.1.1 Antecedentes internacionales	30
2.1.2 Antecedentes nacionales	31

2.2 Marco Teórico	32
2.2.1 Aguas residuales mineras y sus efectos ambientales	32
2.2.2 Importancia del tratamiento de las aguas	33
2.2.3 Membranas como mecanismos de filtración de agua residuales	34
2.2.4 Características del proceso de separación del material	34
2.2.4.1 Clasificación de las membranas	35
2.2.5 Membranas porosas	36
2.2.5.1 Síntesis de membranas cerámicas porosas	37
2.2.6 Membranas de intercambio iónico	37
2.2.7 Procesos de separación basados en membranas	37
2.2.7.1 Tipos de procesos de separación	39
2.2.8 Diferencias térmicas: destilación con membranas	39
2.3 Marco Conceptual	40
2.4 Marco Contextual	51
2.5 Marco Legal	53
3. Diseño Metodológico	55
3.1 Tipo de Investigación	55
3.2 Población y Muestra	58
3.2.1 Población	58
3.2.2 Muestra	58
3.3 Instrumentos para Recolección de Información	58
3.4 Técnica de Análisis y Procesamiento de datos	59
3.5 Presentación de Resultados	60

4. Fases del Proyecto	61
4.1 Fase 1. Caracterización de la Materia Prima	61
4.1.1 Obtención de materias primas y selección de muestra a utilizar	61
4.1.2 Caracterización previa de las muestras por estudios anteriores	61
4.1.2.1 Cenizas volantes	61
4.1.2.2 Diatomitas	62
4.1.2.3 Caolín	63
4.2 Fase 2. Elaboración de las Membranas Cerámicas	64
4.2.1 Preparación de la barbotina	64
4.2.1.1 Caolín	65
4.2.1.2 Diatomitas	65
4.2.1.3 Cenizas volantes	65
4.2.2 Adición de agua y defloculante	67
4.2.2.1 Calculo de densidad	70
4.2.2.2 Cálculo de viscosidad	70
4.2.3 Elaboración de membranas	72
4.2.3.1 Proceso de secado a temperatura ambiente	72
4.2.3.2 Proceso de cocción en mufla eléctrica	73
4.2.3.3 Posterior al proceso de cocción	75
4.2.4 Técnicas de caracterización	76
4.2.4.1 Calculo de volumen y desviación estándar	77
4.2.4.2 Calculo de densidad	77
4.2.4.3 Calculo de la contracción	77
4.2.4.4 Cálculo del porcentaje de adsorción en agua	78

4.2.4.5 Análisis de microscopía óptica	79
4.3 Fase 3. Proceso de Filtración con los Prototipos de Membranas Cerámicas	80
4.3.1 Recolección de Muestras de agua residual minera	80
4.3.2 Montaje de los filtros	81
4.3.3 Proceso de filtrado	82
4.3.4 Proceso de filtración con papel de filtro	83
4.3.5 Caracterización de propiedades físicas y químicas	83
5. Discusión de Resultados	85
5.1 Fase 1: Caracterización de la Materia Prima	85
5.1.1 Cenizas volantes	85
5.1.2 Diatomitas	88
5.1.3 Caolín	89
5.2 Fase 2: Elaboración de las Membranas Cerámicas	90
5.2.1 Barbotina	90
5.2.1.1 Densidad	90
5.2.1.2 Viscosidad	91
5.2.2 Membrana	93
5.2.2.1 Densidad y volumen	93
5.2.2.2 Contracción, diámetro membrana seca y diámetro membrana cocida	94
5.2.2.3 Porcentaje de absorción	95
5.2.2.4 Microscopía óptica	95
5.3 Fase 3. Evaluación del Filtrado con las Membranas	99
5.3.1 Agua residual de la mina coopselva 2	99
5.3.2 Características de las membranas posfiltrado	99

5.3.3 Evaluación del diseño experimental	103
5.3.3.1 Análisis con respecto al pH	104
5.3.3.2 Análisis con respecto al resistividad	105
5.3.3.3 Análisis con respecto al TDS	107
5.3.3.4 Análisis con respecto a la conductividad	108
5.3.3.5 Análisis con respecto a la turbidez	109
5.3.3.6 Análisis con respecto a la DQO	110
5.3.3.7 Análisis con respecto a la DBO5	111
6. Conclusiones	114
7. Recomendaciones	115
Referencias Bibliográficas	116
Anexos	122

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Ventajas y desventajas de las membranas cerámicas	34
Figura 2. Representación esquemática de las diferentes clasificaciones de membranas sintéticas	35
Figura 3. Esquema de una membrana asimétrica	36
Figura 4. Esquema del proceso de separación mediante el uso de membranas	38
Figura 5. Foto bocamina COOPSELVA 2	52
Figura 6. Coordenadas de la mina COOPSELVA 2	52
Figura 7. Proceso Metodológico	57
Figura 8. Foto de las materias primas	64
Figura 9. Foto de la mezcla de materias primas en seco	66
Figura 10. Tipología de membranas cerámicas en estudio	66
Figura 11. Fotos del proceso de elaboración de la barbotina	67
Figura 12. Foto del proceso cálculo de densidad	70
Figura 13. Fotos del proceso de secado y vertido	72
Figura 14. Secado en la mufla eléctrica Ney VULCAN D-130	73
Figura 15. Curva de cocción temperatura versus tiempo	75
Figura 16. Foto de una probeta pulida	76
Figura 17. Foto de probeta llevada al microscopio	80
Figura 18. Foto de muestras de agua recolectadas	81
Figura 19. Membrana cerámica dentro del embudo buchner	81
Figura 20. Montaje para filtración completo	82
Figura 21. Proceso de filtración	82

Figura 22. Análisis de pH	83
Figura 23. Multiparámetro SI Analytics HandyLab 680	84
Figura 24. Microfotografía usando MEB a 500X de polvos de ceniza	86
Figura 25. Espectro de dispersión de energía de rayos X	87
Figura 26. Membrana tipo A a 5x	96
Figura 27. Membrana tipoA 10X	96
Figura 28. Membrana tipo B a 5x	97
Figura 29. Membrana tipo B a 10x	97
Figura 30. Membrana tipo C a 5x	98
Figura 31. Membrana tipo C a 10x	98
Figura 32. Fotos de filtración de agua residual membran tipo A	100
Figura 33. Fotos de filtración de agua residual membrana tipo B	101
Figura 34. Fotos de filtración de agua residual membran tipo C	102
Figura 35. Medias de valores de pH de los tratamientos con respecto a los controles	104
Figura 36. Medias de valores de pH de los tratamientos	105
Figura 37. Medias de valores de resistividad de los tratamientos con respecto a los controles	106
Figura 38. Medias de valores de TDS de los tratamientos con respecto a los controles	107
Figura 39. Medias de valores de conductividad de los tratamientos con respecto a los controles	108
Figura 40. Medias de valores de turbidez de los tratamientos con respecto a los controles	109
Figura 41. Medias de valores de DQO de los tratamientos con respecto a los controles	110
Figura 42. Medias de valores de DBO5 de los tratamientos con respecto a los controles	111

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1 Configuración habitual de membranas cerámicas porosas para diferentes aplicaciones	37
Tabla 2. Mercado mundial de membranas inorgánicas (millones \$ dolares)	40
Tabla 3. Diseño experimental del proceso de filtrado con membranas cerámicas y su porcentaje de materias primas utilizadas	55
Tabla 4. Composición porcentual de los elementos constitutivos de las membranas cerámicas	64
Tabla 5. Cantidad de silicato de sodio	68
Tabla 6. Cálculo de proporcionalidad de materias primas para la membrana cerámica Tipo A	69
Tabla 7. Cálculo de proporcionalidad de materias primas para la membrana cerámica Tipo B	69
Tabla 8. Cálculo de proporcionalidad de materias primas para la membrana cerámica Tipo C	69
Tabla 9. Cocción	75
Tabla 10. Peso de muestras en gramos	76
Tabla 11. Propiedades Físicas De Las Cenizas Volantes	88
Tabla 12. Características de las diatomitas	88
Tabla 13. Propiedades físicas del caolín	89
Tabla 14. Densidad promedio de cada barbotina	91
Tabla 15. Relación entre volumen y tiempo de caída para barbotina tipo A	91
Tabla 16. Relación entre volumen y tiempo de caída para barbotina tipo B	92

Tabla 17. Relación entre volumen y tiempo de caída para barbotina tipo C	92
Tabla 18. Viscosidad de las membranas filtrantes	92
Tabla 19. Valores de densidad y volumen de las membranas	93
Tabla 20. Porcentaje de contracción de las membranas filtrantes	94
Tabla 21. Porcentaje adsorción de agua en las membranas	95
Tabla 22. Muestra de agua sin filtrar	99
Tabla 23. Reporte de análisis físicos	103
Tabla 24. Reporte de análisis químicos	103
Tabla 25. Cuadro Resumen afectividad de las membranas	112

Lista de Anexos

	pág.
Anexo 1. Composición química por Absorción Atómica	123
Anexo 2. Calculo de densidad para cada tipo de barbotina	124
Anexo 3. Calculo de la viscosidad para cada tipo de barbotina	125
Anexo 4. Reporte densidad muestra tipo A	126
Anexo 5. Reporte densidad muestra tipo B	127
Anexo 6. Reporte densidad muestra tipo C	128
Anexo 7. Reporte porcentaje de contracción muestra tipo A	129
Anexo 8. Reporte porcentaje de contracción muestra tipo B	130
Anexo 9. Reporte porcentaje de contracción muestra tipo C	131
Anexo 10. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto al pH	132
Anexo 11. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto al resistividad	135
Anexo 12. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto al TDS	137
Anexo 13. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la conductividad	139
Anexo 14. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la turbidez	141
Anexo 15. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la DQO	143
Anexo 16. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la DBO5	145

Resumen

El proyecto investigativo tiene como propósito la sinterización y caracterización de membranas cerámicas tomando como materias primas las arcillas, diatomitas y cenizas volantes, con el objetivo de determinar la eficiencia en los procesos de filtración a muestras de aguas residuales mineras y así mejorar la calidad de agua para posteriores usos mineros o vertimientos a corrientes de aguas superficiales. La metodología utilizada fue descriptiva, aplicada y experimental por tratarse de un estudio de laboratorio con análisis de variables. Para el estudio se tomó una mina de carbón con título minero, ubicada en la Donjuana del municipio de Bochalema de Norte de Santander. Se lograron sinterizar las cerámicas porosas a partir de residuos de diatomitas de la industria cervecera, cenizas volantes de la combustión del carbón y caolines para ser usados en procesos de tratamiento de aguas de la industria minera. Lo anterior aporta significativamente a la economía circular, dando valor agregado a los residuos industriales.

Introducción

El agua cuya molécula está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, puede encontrarse en estado líquido, sólido y gaseoso. El agua cubre el 72% de la superficie terrestre, se localiza principalmente en los océanos, donde se concentra el 96,5 % del agua total. A los glaciares y casquetes polares les corresponde el 1,74 %, mientras que los depósitos subterráneos (acuíferos) concentran el 1,72 %. El restante 0,04 % se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos (EcuRed, 2021). Alrededor del 70% del agua dulce se utiliza para agricultura, para la industria el 20% y el consumo doméstico el 10% restante (Gómez, Danglot & Vega, 2010).

Por mucho tiempo Colombia se consideraba una potencia hídrica. Con seis nevados, lo que corresponde al 44% de los páramos de Sudamérica, adicionalmente cuenta con cinco vertientes hidrográficas, 30 grandes ríos, 1277 lagunas y más de 1.000 ciénagas, todo esto indica que el agua es una de las mayores riquezas del país. En Colombia, el agua se constituye como un recurso fundamental para la fauna y flora de la nación, siendo el segundo país con mayor diversidad de peces (1.533 especies) y de anfibios (763 especies); por otra parte, es necesaria para la producción de energía, encontrando que el 70% de la energía que se consume proviene de las hidroeléctricas (Fondo Mundial para la Naturaleza, 2021).

Cada año los ríos reciben 918.670 toneladas de materia orgánica no biodegradable esto es por parte de la expansión ganadera, la agrícola y la minería que consume enormes cantidades de agua, haciendo que el cambio climático agote este recurso y en la actualidad ya varios ríos estén desapareciendo (Fondo Mundial para la Naturaleza, 2021).

Colombia es un país minero en crecimiento, la minería es una actividad en la que constantemente hay presencia de agua, tanto en las áreas de explotación las cuales tocan los niveles freáticos como en los procesos de beneficio y transporte que contaminan las corrientes superficiales más cercanas.

El agua residual minera (ARM) si no pasa por un proceso de tratamiento puede generar contaminación en afluentes hídricos cercanos con metales pesados como el plomo, el estaño, el hierro, el cadmio, el mercurio, cromo, vanadio, entre otros y se genera cambio en el pH, contaminación con agentes químicos y microorganismos, los cuales afectan la fauna, la flora y las comunidades que consumen este líquido.

Aunque el gobierno ha creado leyes y entidades que actualmente regulan el problema de la contaminación ambiental, en minería todavía hay varias empresas que no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, debido al costo que este puede llegar a generar dependiendo del método escogido.

Para el tratamiento de aguas residuales existen varios métodos entre ellos están: la filtración, la fitorremediación, tanques de sedimentación, biorremediación, procesos con cal, procesos con peróxido de Hidrogeno, entre otros. (Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales - SPENA GROUP Tratamiento de Aguas Residuales, n.d.). Muchos de estos tratamientos no brindan los resultados esperados y se utilizan solo por cumplir un requisito legal.

En algunas minas se han implementados métodos para el tratamiento de aguas tales como:

Tanques de sedimentación: su objetivo es remover la materia en suspensión por gravedad las cuales se asientan en el fondo del tanque (Dodane & Bassan, s,f).

Fitorremediación: es una alternativa de tratamiento de agua sostenible con el ecosistema este reduce la contaminación del agua por procesos biológicos de las plantas acuáticas y los microorganismos asociados a ellas (Delgadillo, González, Villagómez & Acevedo, 2011).

Biorremediación: Es un proceso en el que se utiliza microorganismos como hongos y bacterias para eliminar y neutralizar un contaminante ambiental (Pontificia Universidad Javeriana, 2021).

Cal (Reactivos): Se usa para regular el pH, eliminación de bacterias, sedimentación de sólidos suspendidos y clarificación en tratamientos de aguas.

Peróxido de hidrogeno: actúa como un oxidante potente y ecológico, ya que al reaccionar se descompone en agua y oxígeno. Se utiliza para abatir arsénico, cianuro y sulfuro de modo limpio y sustentable.

Filtración: Cuando se realiza una filtración, el líquido que ingresa en contacto con la superficie de la membrana es obligado a pasar a través de ella. Algunos sólidos y componentes quedarán retenidos por la membrana mientras el resto pasará al otro lado (Alfa Laval, 2021).

Actualmente los procesos de filtración han mostrado buenos resultados en muchos países, pero en Colombia en la industria minera, son poco implementados, Estudios realizados anteriormente por Álvaro L. Malvesti, Marcelo L. Mignoni, Robison P. Scherer, Fábio G. Penha e Sibeles B. C. Pergher, del departamento de química de la Universidad Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões en Brazil han demostrado la capacidad de absorción de las cenizas volantes y la porosidad de las diatomitas haciendo de estas una excelente materia prima para la realización de membranas filtrantes.

Con el desarrollo de la propuesta se lograron resultados promisorios que sirven como punto de partida para una posible implementación por el gremio minero, de igual manera, estos resultados sirvan como punto de partida para el desarrollo de nuevas investigaciones. En este punto, esta propuesta buscó no solo mitigar la contaminación de las ARM, sino de los subproductos de la industria como lo son las cenizas volantes y las diatomitas.

1. Problema

1.1 Título

SINTERIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS CERÁMICAS A PARTIR DE ARCILLAS, DIATOMITAS Y CENIZAS VOLANTES PARA EL TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES MINERAS.

1.2 Planteamiento del Problema

Gracias a su diversidad de ambientes, Colombia dispone de una variada oferta de productos mineros, entre los que se incluyen carbón, oro, platino, níquel, esmeraldas y caliza, así como la de otros que se producen en menor escala, principalmente: sal, roca fosfórica, arcillas, arenas silíceas, minerales de cobre y manganeso, magnesita, barita, yeso y varios tipos de rocas ornamentales. En cuanto a la extracción de estos recursos mineros, se aprecia un panorama con dos componentes generales: el primero, con una actividad minera formal y de gran escala; el segundo, por una actividad minera que se desarrolla a escalas menores en forma tradicional y artesanal, con una reconocida carencia de tecnología adecuada y definida, en muchos casos, por la informalidad y el carácter de subsistencia, lo que la hace insegura, poco rentable, no competitiva y ambientalmente no sostenible (Güiza, 2011).

Adicionalmente, la extendida explotación aurífera de aluvión en varias regiones del país, en donde se usan de manera antitécnica y desmedida agentes químicos como el mercurio y el cianuro para la recuperación del oro, ha traído nocivas e irrecuperables consecuencias sobre la salud humana y el ambiente, a tal punto que varios estudios como los realizaos por Veiga (2010) han demostrado que en los municipios de Segovia, Remedios y Zaragoza, del departamento de

Antioquia, se encuentran concentraciones de mercurio en el aire y en las fuentes hídricas, 1000 veces superiores a las permitidas por los estándares internacionales (Güiza, 2011).

La minería en Colombia produce grandes afectaciones a las fuentes hídricas debido a que la mayoría de minas no realizan tratamientos de aguas residuales, por el costo que implica este proceso y la falta de reglamentación en el tema. Provocando que las fuentes hídricas se ven seriamente afectadas debido a los residuos sólidos que son vertidos durante la actividad minera. Dando como resultado un mayor contenido de sedimentos, lo que causa que los ríos sean desviados de sus cauces naturales generando inundaciones y cambios en el paisaje, así como afectaciones a las comunidades, quienes algunas veces se ven expuestas a perder sus cultivos, y además por el nivel de contaminación no pueden consumir agua de estos afluentes (López, López & Medina, 2017).

Cuando las grandes cantidades de roca que contienen sulfuros o sulfatos, son excavadas en tajo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico. Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria llamada *Acidithiobacillus ferrooxidans*, se reproduce en estos ambientes y en su metabolismo procesa el azufre produciendo sulfato ferroso y férrico para después producir ácido sulfúrico, lixiviando aún más los residuos de metales de desecho (Ruiz, 2016).

El ácido es transportado desde la mina por el agua o por corrientes superficiales, y posteriormente depositado en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El drenaje ácido minero DAM degrada severamente la calidad del agua y puede inhibir la vida acuática, así como volver el agua inservible (Terán, 2017).

La contaminación por metales pesados es causada cuando algunos metales como el arsénico, el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, el oro, la plata y el zinc, contenidos en las rocas o expuestos en vetas en una mina subterránea, entran en contacto con el agua. Los metales son lixiviados por la solución acida y llevados ríos abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa. Aunque los metales pueden ser movidos en condiciones de pH neutral, la lixiviación es particularmente acelerada en condiciones de pH bajo, tales como las creadas por el drenaje ácido de la minería (Terán, 2017).

La contaminación química ocurre cuando algunos agentes químicos (tales como el cianuro y el ácido sulfúrico, utilizados por compañías mineras para la separación del material deseado, del mineral en bruto) se derraman, gotean, o se trasladan del sitio minero a un cuerpo de agua cercano. Estos químicos pueden ser también altamente tóxicos para los humanos y la fauna (Revilla, 2018).

En Norte de Santander, la mayoría de las actividades extractivas de minerales se realizan de manera artesanal y bajo nivel tecnológico utilizando métodos mineros, que no permiten optimizar el aprovechamiento de los recursos. En general, la minería a pequeña escala tiende a producir más efecto sobre el medio ambiente por unidad de producción (Ayala, Cabrera, Cadena, Castaño, Contreras Díaz et al., 2019).

Según los inventarios mineros nacionales realizados por INGEOMINAS, hoy servicio geológico colombiano, entre 1999 y 2000 los impactos ambientales en Norte de Santander fueron inestabilidad y erosión producida por cárcavas y derrumbes, descapote sin recuperación, alteración de cauces por aporte de sólidos que generan sedimentación y modificación de dinámica hídrica (Ayala et al., 2019).

Con el fin de preservar los recursos hídricos no renovables se crean nuevas alternativas con mayor eficiencia para el tratamiento de aguas residuales mineras como: la filtración, la fitorremediación, tanques de sedimentación, biorremediación, procesos con cal, procesos con peróxido de Hidrogeno, entre otros. Por consiguiente, lograr que las entidades mineras y empresas mineras mejoren la calidad de sus tratamientos, obteniendo una minería sostenible y que reduzca los impactos ambientales producidos. Por lo tanto, se propuso la realización de filtros cerámicos a base de cenizas volantes, diatomitas y caolines de la región, lo que ayudo a mejorar la calidad del agua y la reutilización de esta para otras labores mineras, dando fin a grandes problemas ambientales.

1.3 Formulación del Problema

¿Qué tan eficiente será el uso por filtración de membranas cerámicas sinterizadas a base de cenizas volantes, diatomitas y caolines en la mejora de la calidad de aguas residuales mineras?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general. Determinar la eficiencia de las membranas cerámicas sinterizadas a partir de arcillas, diatomitas y cenizas volantes de la región, en el tratamiento de aguas residuales mineras.

1.4.2 Objetivos específicos. Los objetivos específicos se plantean a continuación:

Sinterizar y caracterizar las membranas cerámicas elaboradas a partir de arcillas, diatomitas y cenizas volantes de la región.

Analizar los parámetros pH, TDS, resistividad, DQO y DBO5 de las muestras de aguas antes y después del proceso de filtración a través de las membranas cerámicas.

Evaluar la eficiencia de las membranas cerámicas sinterizadas en el tratamiento de aguas residuales mineras.

1.5 Justificación

Este proyecto tiene como finalidad el diseño y elaboración de membranas cerámicas a partir de arcillas, diatomitas y cenizas volantes para el tratamiento de aguas residuales mineras, debido a la gran contaminación que estas presentan por procesos de acidificación cuando reaccionan los minerales sulfúricos con el agua o el oxígeno, e incluso por partículas en suspensión, grasas, aceites combustibles de la maquinaria usada en minería, explosivos no quemados como los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno y otros productos químicos.

Las fuentes hídricas se ven seriamente afectadas debido a las aguas residuales que la actividad minera genera. El impacto generado se traduce en un mayor contenido de sedimentos, lo que causa que los ríos sean desviados de sus cauces naturales generando inundaciones y cambios en el paisaje, así como afectaciones a las comunidades (Red de Desarrollo Sostenible, 2017). Los cambios de pH en especial los pH ácidos de ríos y lagos producen un incremento del contenido de iones metálicos, como el ion Aluminio (Curo & Rojas, 2017). Ciertas especies de peces y anfibios presentan una elevada sensibilidad a esta acidificación, en humanos el consumo de estas aguas produce un incremento de enfermedades infecciosas como la gastroenteritis, sin contar múltiples afectaciones en la piel como hongos y patógenos bacterianos produciendo afectaciones en la salud de los trabajadores y comunidades cercanas (Espinosa, 2019).

Las membranas cerámicas propuestas no solo mitigará el problema de las aguas residuales producto de la minería por medio de la filtración, donde habría separación de metales pesados, agentes contaminantes y mejoramiento del pH, si no que al ser elaboradas con materiales

reutilizados de la región también ayudan a resolver otros problemas ambientales como el alto impacto en el ambiente por la contaminación que generan los productos de cenizas volantes y las diatomitas producto de la industria cervecera.

1.5.1 Membranas usos, beneficios y estructuras, requerimiento o justificación de su uso.

“Los procesos de separación en membranas se clasifican en: filtración (diámetros de poro de más de 104 nm), microfiltración (entre 102 y 104 nm), ultrafiltración (entre 1 y 102 nm) y ósmosis inversa (con diámetros de poro menores de 1nm)” (Benito, Conesa & Rodríguez, 2004, p.1).

Para que una membrana sea útil debe ser altamente permeable y selectiva, resistente mecánicamente, con estabilidad química y térmica, a la hora de operar, con poco índice de obstrucción, económica, eficiente en su tarea y significativamente mejor a la hora de realizar el proceso de separación (Benito et al., 2004).

En cuanto las membranas inorgánicas, se están realizando pruebas para su perfeccionamiento, como opción de solución que poseen las poliméricas en algunas condiciones de trabajo. Pues las membranas inorgánicas poseen una gran ventaja a la hora de realizar separaciones a altas temperaturas, donde se presentan grandes esfuerzos mecánicos, separaciones en medios agresivos, donde se pueden dar también ataques de microorganismos, etc (Benito et al., 2004).

Una desventaja de las membranas cerámicas que debe ser resuelta, es la fragilidad frente a esfuerzos de tracción (sobre todo en soportes), delaminación, ya que no cuenta con la resistencia que exigen los procesos mecanizados y la gran inversión que estos exigen (Benito et al., 2004).

Para ejecución de la propuesta se utilizaron diatomitas procedentes de la industria cervecera, además, se usaron cenizas volantes producto de la combustión del carbón de la empresa

Termotasajero S.A y arcillas caoliníticas de la región. En el caso de las cenizas volantes no generaría utilización de recursos económicos y se redujo la contaminación producto de éstas. Las diatomitas son materiales que por sí solos se consideran altamente contaminantes ya que son residuos de los procesos de filtración en la industria cervecera, por lo que se aprovechó todo este potencial para generar un beneficio al medio ambiente y a la comunidad. Las arcillas nortesantandereanas son privilegiadas por la excelente calidad de las formaciones arcillosas presentes, brindando propiedades como alta capacidad de absorción. La utilización de estas arcillas impactaría positivamente a la comunidad en general y al gremio ayudando al crecimiento comercial de la región debido al aumento de las ventas.

Otro material utilizado para la elaboración de membranas filtrantes son las cenizas volantes, es un material muy versátil debido a las propiedades físicas y químicas que las componen, las cuales podrán beneficiar al proceso de filtración entre ellas se encuentran el tamaño de grano, y sus propiedades mecánicas. Las diatomitas poseen cualidades que ayudan al proceso de tratamiento de aguas las cuales son: alta porosidad, volumen de muy baja densidad, capacidad para absorber líquidos muy alta.

Este proyecto es viable por muchos factores uno de ellos es su bajo costo debido a la reutilización de las materias primas subproducto de otros procesos industriales, es fácil de instalar en campo y adaptar de acuerdo a la escala de la mina que lo adquiera y la cantidad de agua residual que genere la misma. Causaría un impacto favorable en el medio ambiente al evitar la contaminación de fuentes hídricas, ayudaría a la comunidad al mejorar la calidad del agua potable que se consumen las viviendas cercanas a las empresas mineras. Adicionalmente, tiene muchas aplicaciones en minería y sobre todo generaría un cambio significativo en la minería sostenible a la cual está apuntando actualmente el país.

Por estas razones este proyecto estudió a escala de laboratorio, el efecto de las membranas cerámicas en el tratamiento de las aguas residuales mineras, y así, crear conciencia de la importancia de recuperar los efluentes, para lograr minimizar el grado de contaminación en los afluentes hídricos, que afectan la fauna, la flora y las comunidades cercanas.

1.6 Alcance y Limitaciones

1.6.1 Alcances. El presente estudio evaluó la eficiencia de las membranas cerámicas elaboradas por colado a base de cenizas volantes, diatomitas y caolines para el tratamiento de agua residuales mineras a escala de laboratorio.

1.6.2 Limitaciones. El proyecto se realizará a nivel de laboratorio, por lo que existieron limitaciones de costos en el eventual escalamiento de un proceso continuo o reactor a nivel real en la mina.

Se limitó el análisis de las muestras de agua a la caracterización de las aguas residuales de una mina de la región, para su análisis y determinación de agentes contaminantes que esta contiene.

1.7 Delimitaciones

1.7.1 Delimitación espacial. El diseño del método de tratamiento de aguas residuales mineras por medio de membranas cerámicas a base de cenizas volantes, diatomitas y arcillas, se desarrollará en el laboratorio de física de GIFIMAC ubicado en la Universidad Francisco de Paula Santander y el agua estudiada será tomada de una mina de la región.

1.7.2 Delimitación temporal. La investigación tuvo una duración de 15 meses por tiempo de pandemia.

1.7.3 Delimitación conceptual. A continuación se presenta la delimitación conceptual:

- Aguas residuales mineras.
- Adsorción.
- Absorción.
- Agentes contaminantes.
- Agua contaminada.
- Aguas sulfurosas.
- Aprovechamiento de aguas.
- Caolín.
- Cenizas volantes.
- Contaminación.
- Diatomitas.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DB05).
- Drenaje minero.
- Ecosistema.
- Fuentes hídricas.
- Filtración.
- Impacto socio-ambiental.
- Labores mineras.

- Membrana cerámica.
- Método.
- pH.
- Sólidos en suspensión.
- Sólidos totales disueltos (TDS).
- Sinterizar.
- Sulfatos.
- Turbidez.
- Variables.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes internacionales. Padaki, Surya, Abdullah, Misdan, Moslehyani, Kassim et al. (2015). Membrane technology enhancement in oil–water separation. Estudios recientes han demostrado que el agua puede ser separada de aguas residuales aceitosas utilizando procesos de membrana. Con el fin de controlar el tamaño de poro de la membrana y el grosor, el material polímero se ha convertido en una buena elección bajo ciertas condiciones experimentales (Padaki et al., 2015).

Brown, Proum & Sobsey (2009). Sustained use of a household-scale water filtration device in rural Cambodia. Los métodos de purificación como la cloración y la filtración a gran escala, no pueden ser aplicados por muchos nigerianos, especialmente por la población rural que vive por debajo de los niveles de pobreza. el filtro de agua de cerámica se ha convertido en un método barato y eficiente para purificar el agua en las zonas rurales, ya que todos los materiales necesarios están disponibles localmente y tienen una vida útil relativamente larga de 2 a 3 años. La filtración es uno de los procesos de agua más simples. Se han realizado trabajos previos para probar la eficiencia de los filtros cerámicos en el tratamiento de aguas (Brown et al., 2009).

Taylor, Rieger, Steinberger, Pelz, Haseneder & Härtel (2013). Mine water treatment by membrane filtration processes - Experimental investigations on applicability. El Departamento de térmica, Medio Ambiente y Productos Naturales en Ingeniería de Procesos de TU Bergakademie Freiberg investigó la aplicabilidad de filtración de membrana usando nanofiltración (Alfa Laval NF99) y ósmosis membranas (Alfa Laval RO98pHt) inversa. Estos experimentos cubrieron estudios de parámetros a largo plazo para determinar la aplicabilidad de la teoría de filtración de

membrana y la apariencia de escalamiento (precipitación de solutos inorgánicos). Los resultados sugieren la aplicabilidad de la desalinización por filtración de membrana, así como la aparición de escalado debido a la fuerte disminución del flujo durante los estudios a largo plazo para algunas condiciones experimentales (Taylor et al., 2013).

2.1.2 Antecedentes nacionales. Peña, Hans, Becerra, Caballero & Dulce (2019). Utilización de tierras diatomáceas recicladas de la industria cervecera como medio de transporte de macronutrientes. La aplicación de la tierra de diatomeas es amplia, utilizada desde complemento en la industria alimentaria, aplicaciones en el sector agrícola, hasta nanopartículas en la medicina avanzada, siendo la clarificación de cerveza una de sus principales aplicación, quinta bebida más consumida en el mundo, dejando este proceso como residuo lodo de diatomita, con sus frústulas y poros tapados por materia orgánica y agua, mezcla que tiene grandes implicaciones ambientales, sanitarias y económicas generadas por la gran cantidad de tierra diatomácea usada como elemento filtrante. Sus propiedades filtrantes han sido mejoradas mediante tratamientos térmicos a temperaturas entre los 1000 °C y 1400°C. Durante el proceso de producción de la cerveza, la diatomita se utiliza como elemento filtrante. Para la producción de un litro de cerveza, en promedio se utilizan entre 1-2 g de diatomita calcinada y se producen al final de este proceso 17,14 gramos de residuos sólidos. Al año se producen en promedio en una cervecera 2.3 millones de hectolitros de cerveza que generan 3.942.200 kg de residuos sólidos de torta de diatomita (Peña et al., 2019).

Carreño, Ferrer & Peña (2019). Zeolitas Sódicas y Potásicas a partir de Cenizas Volantes Provenientes de la Combustión del Carbón de la Termoeléctrica Termotasajero S.A.S. Las cenizas volantes presentan composición química de acuerdo a la literatura, en mayor proporción óxidos de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de calcio (CaO), en menor

proporción, generalmente al 5%, óxido de magnesio (MgO), sulfatos (SO_4^{2-}), carbono elemental (C) y álcalis (Na_2O y KO_2), y otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio, etc. Lo que convierte a las cenizas volantes en un subproducto eficaz del cual se pueden obtener zeolitas de alto contenido de pureza. Las zeolitas se definen como aluminosilicatos cristalinos, micro porosos, constituidas de un entramado tridimensional de aniones tetraédricos de $(\text{SiO}_4)^{-4}$ y $(\text{AlO}_4)^{-5}$, que se unen por compartición de átomos de oxígeno y moléculas de H_2O , los que son fácilmente intercambiables, en los poros huecos de la estructura, las diferentes coordinaciones de los tetraedros, así como la relación Silicio/Aluminio originan los diferentes tipos de zeolitas. Dependiendo de las condiciones a las cuales se sometan las CV y el tratamiento que se aplique en el proceso de zeolitización se pueden obtener zeolitas de diferentes tipos con aplicaciones de gran interés a nivel industrial y ambiental (Carreño et al., 2019).

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Aguas residuales mineras y sus efectos ambientales. Los vertimientos generados en la explotación carbonífera de las Unidades Productoras Mineras, poseen grandes concentraciones de sólidos suspendidos, metales pesados, entre otros. Estas características fisicoquímicas en las aguas residuales de las minas de carbón, pueden generar impacto negativo en la fuente receptora (Ministerio de Minas y Energía & Universidad de Córdoba, 2015).

En el proceso de extracción minera de carbón, es frecuente observar la presencia de metales pesados tóxicos que generan una gran contaminación en las fuentes hídricas y en las aguas residuales, que representa un gran riesgo para la salud pública, ya que es un evento de alto flujo y de difícil control de impacto, con un alto nivel de toxicidad que a partir de su acumulación en los

organismos vivos y prosigue en la cadena alimentaria (Salas, 2020).

2.2.2 Importancia del tratamiento de las aguas. Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la puesta en uso de un sistema de tratamiento orientados que permitan la implementación de la normatividad establecida para los límites permisibles de vertimientos para la minería de carbón que formula la Resolución basado en la aplicación de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, que se caracterizan por generar una estrategia económica, caracterizada por permitir recuperación, reúso, operación y mantenimiento fáciles. Para el tratamiento de aguas residuales en la producción carbonífera, se plantean acciones mecánicas (físicos), biológicos y químicos para reducir parcial o totalmente los contaminantes existentes en el agua residual (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Las aguas residuales que produce la minería de carbón, provienen del interior de la mina, su recuperación debería ser total para poder ser llevadas a los cuerpos receptores, ya que estas en el proceso se cargan de materiales en suspensión, que generan turbiedad, donde se pueden presentar metales pesados, alteraciones de pH, requiriendo filtrar elementos suspendidos en el agua residual (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Es así que la presencia del zinc produce problemas de constipación crónica, el cobre genera bioacumulación con efectos tóxicos, la exposición a altos niveles de cobre genera una rara enfermedad conocida como la enfermedad de Wilson y se caracteriza por la excesiva retención del cobre en el hígado, el plomo es tóxico para muchos órganos y tejidos, incluidos corazón, huesos, intestinos, riñones, sistemas nervioso y reproductivo y el cadmio puede manifestarse en síndromes, como hipertensión, disfunción renal, defectos óseos, lesiones hepáticas, daño pulmonar y efectos reproductivos. (Salas, 2020, p.1)

2.2.3 Membranas como mecanismos de filtración de agua residuales. Son barreras delgadas que cuentan con dos fases, mediante las cuales, por acción de una fuerza (con variaciones de presión o de concentración), se realiza un transporte. Se caracterizan por dar lugar a capilares, fenómenos de adsorción y la carga superficial, que permiten retenciones y separaciones. Son mecanismos importantes en procesos de separación (Benito et al., 2004).

2.2.4 Características del proceso de separación del material. Muchas de las aplicaciones industriales de los procesos membranarios demandan estabilidad del proceso, alta disponibilidad, bajos requerimientos de tratamientos preliminares y un mantenimiento mínimo. Las membranas cerámicas poseen unas propiedades de resistencia térmica, química y mecánica que las hacen óptimas para su aplicación en numerosos procesos. Se muestra un resumen de las propiedades de las membranas cerámicas, que se explican en detalle en la figura 1 (Llorente, 2017).

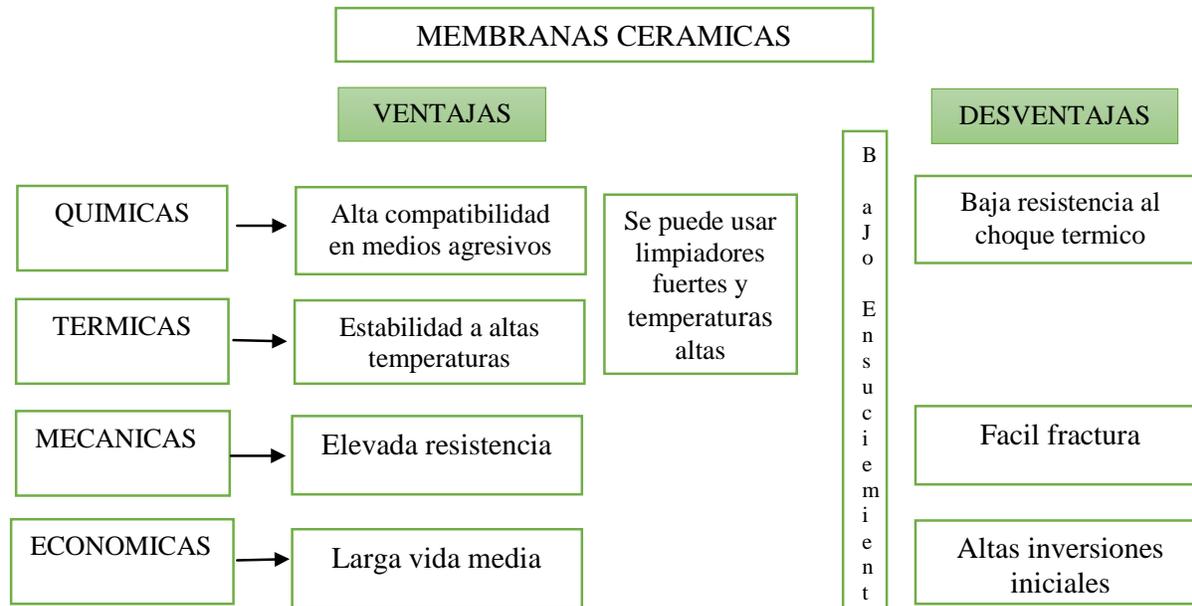


Figura 1. Ventajas y desventajas de las membranas cerámicas

Fuente: Llorente, 2017.

2.2.4.1 Clasificación de las membranas. Por la gran variedad de membranas que existen, su clasificación atiende a diferentes parámetros. Uno de ellos es diferenciar las membranas biológicas y sintéticas.

Por su estructura, las membranas pueden ser simétrica (la estructura es constante en la sección transversal de la membrana) o asimétrica (la estructura varía a lo largo de la sección transversal de la membrana). Las membranas asimétricas pueden ser compuestas (partes densas y porosas) o porosas. Los materiales que más se utilizan en la preparación de membranas pueden ser polímeros, cerámicas, vidrios, metales o líquidos. También pueden ser neutros o cargados eléctricamente. La geometría de la membrana puede ser plana, tubular, espiral, en forma de fibras huecas, etc (Llorente, 2017).

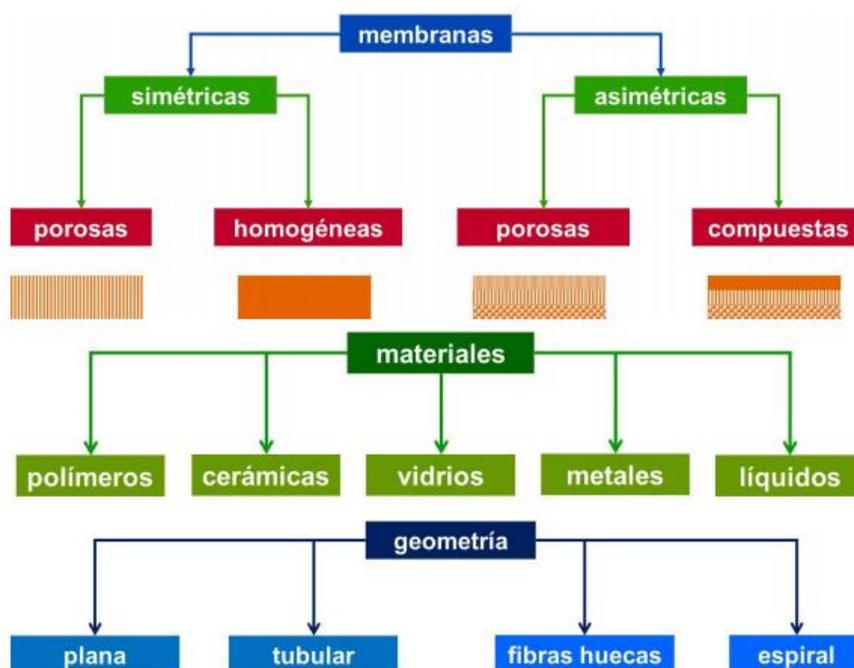


Figura 2. Representación esquemática de las diferentes clasificaciones de membranas sintéticas

Fuente: Llorente, 2017.

Su clasificación se puede dar también por su proceso de separación que definirían en porosas y/o de intercambio iónico (ver figura 2).

2.2.5 Membranas porosas. Las membranas porosas consisten en una matriz sólida donde se encuentran un gran número de poros o huecos con diámetros que van desde tamaños inferiores a 1 nm a superiores a 10 μm , y se clasifican según su tamaño de poro, ya que éste es definitivo para su elección en la separación de una determinada especie (Lorente, 2019).

Las membranas cerámicas más comunes son porosas, no obstante, también existen algunos estudios referentes a la investigación de membranas cerámicas densas. Las membranas cerámicas porosas son habitualmente de varias capas de uno o más materiales cerámicos. Por lo general constan de un soporte macro poroso, una o varias capas intermedias meso porosas y una capa superior microporosa. Regularmente, el soporte proporciona resistencia mecánica, mientras que las membranas intermedias hacen de puente entre el soporte y la capa superior, todo estos con el fin de reducir gradualmente el tamaño de los poros: la capa superior es la capa selectiva, donde tiene el lugar el proceso de separación ver figura 3 (Llorente, 2017).

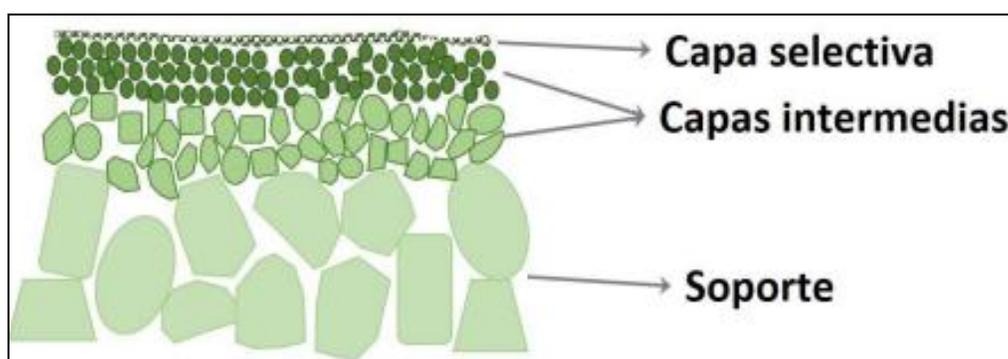


Figura 3. Esquema de una membrana asimétrica

Fuente: Llorente, 2017.

2.2.5.1 Síntesis de membranas cerámicas porosas. La estructura típica de una membrana porosa cerámica corresponde a una configuración multicapa, tal y como se ha comentado anteriormente. Estas configuraciones son asimétricas y constan de un soporte poroso, una o varias capas intermedias y una capa selectiva, que se obtienen en orden decreciente de tamaño de poro, tal y como se detalla en la tabla 1 (Llorente, 2017).

Tabla 1 Configuración habitual de membranas cerámicas porosas para diferentes aplicaciones

Aplicación	Estructura	dp habitual	Capa Selectiva
Microfiltración	1 capa	5 μ m	Macroporosa
	2 capas	0.25 μ m	Macroporosa
	3 capas	0.10 μ m	Macroporosa
Ultrafiltración	4 capas	5nm	Mesoporosa
Nanofiltración/ Separación de gases/ Pervaporación	5 capas	10 Å	Microporosa

Fuente: Llorente, 2017.

2.2.6 Membranas de intercambio iónico. Las membranas de intercambio iónico contienen grupos cargados, que se clasifican en dos grandes grupos: catiónicas (contienen grupos cargados negativamente) y aniónicas (contienen grupos cargados positivamente). De este modo, ceden el paso de iones de diferente carga, mientras que impiden el paso de iones con igual carga a través de ellas. Tanto los grupos como la matriz pueden tener naturaleza orgánica (polímeros) o inorgánica (cerámica, bentonitas, zeolitas, etc.,) (Lorente, 2019).

2.2.7 Procesos de separación basados en membranas. Una membrana es, según la Sociedad Europea de Membranas, una fase intermedia que separa dos fases y/o actúa como una barrera pasiva o activa al transporte de materia entre las fases.

En los últimos años el uso de membranas en procesos químicos va en aumento, siendo ilimitado la cantidad de aplicaciones en las que se puede usar este proceso de separación. La membrana al tener la capacidad de controlar la velocidad de permeación de determinadas especies químicas a través de ella. Por tal motivo, sus campos de aplicación van desde la medicina hasta los procesos de separación en diferentes industrias. En ejecución, una membrana es una barrera moderadora de la permeación de especies que entran en contacto con ella. La interface semipermeable puede ser orgánica o inorgánica, homogénea o heterogénea, orgánica o inorgánica, líquida o sólida. Una fuerza impulsadora transporta materia de una fase a otra como se muestra en la figura 4. Finalmente, la unidad que contiene la membrana y las fases de trabajo se denomina módulo.

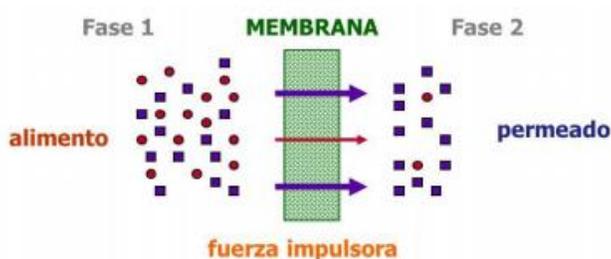


Figura 4. Esquema del proceso de separación mediante el uso de membranas

Fuente: Llorente, 2017.

Hoy en día se están masificando los procesos en que tecnología de membranas puede ser aplicada. En la industria los procesos de separación más desarrollados que hacen usos de las membranas son microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis (Llorente, 2017).

2.2.7.1 Tipos de procesos de separación. Los procesos de separación por medio de membranas pueden agruparse dependiendo del tipo de fuerza impulsora que preside la separación:

Presión hidrostática: ósmosis inversa, nano, ultra y microfiltración, separación de gases, etc.

Gradientes de concentración o potencial químico: diálisis, etc.

Potencial eléctrico: electrodiálisis.

2.2.8 Diferencias térmicas: destilación con membranas. Existen las membranas inorgánicas, consideradas tamices moleculares, esto es que sirven para realizar el proceso de separación por tamaño, también pueden definirse como “materiales asimétricos y porosos formados por un soporte macroporoso seguido de una o varias capas delgadas sucesivas depositadas sobre él”. Estas pueden ser membranas densas, que pueden ser de metales, híbridas inorgánicas-orgánicas o de óxidos mixtos y membranas porosas. Estas según IUPAC se clasifican en: macroporos $\varphi > 50$ nm, mesoporos $2 \text{ nm} < \varphi < 50$ nm y microporos $\varphi < 2$ nm, como también según los materiales que las forman, en: cerámicas, metálicas, de carbono, vítreas y zeolíticas (Benito et al., 2004).

Una forma de analizar la tendencia de uso de las membranas inorgánicas es el valor de mercado mundial en su comercialización ver tabla 2.

Tabla 2. Mercado mundial de membranas inorgánicas (millones \$ dolares)

Tipo	1992	1996	1997	2002	% Crecimiento esperado 1997-2002
Cerámicas	15	44	51	104	15
Metálicas	13	39	43	68	10
Compuestas de carbono	4	6	6	8	6
Vítreas	1	1	1	1	0
Otras (zeolíticas)	0	1	1	1	0
Total	33	91	102	182	31

Fuente: Benito et al., 2004.

De acuerdo a esto, las membranas cerámicas son las membranas inorgánicas más comercializadas en los últimos años, por su habilidad de uso en entornos químicamente agresivos, a altas temperaturas y presiones y su bajo costo de fabricación, que es más alto que las membranas poliméricas, pero resulta económico por su uso a largo plazo (Benito et al., 2004) .

2.3 Marco Conceptual

Adsorción. Es el proceso no destructivo utilizado para remover contaminantes, para lo que se utiliza materiales como carbón activado y otros materiales que ofrezcan resistencia mecánica y reutilización posterior a su desorción, dentro de los que se propone el uso de arcilla roja, para la sinterización de cerámica que se utiliza en como adsorbente de metales pesados (Salas, 2020).

Absorción. Penetración física de una fase en la otra (Viades, 2013).

Acidificación. El agua, rica en oxígeno al entrar en contacto con la pirita y otros minerales inestables de azufre inestables presentes en los estériles de los yacimientos, sufre un proceso acelerado de oxidación, que da como resultado final la acidificación del agua que entre en contacto con estos compuestos (Unidad de Planeación Minero-Energética, 1998).

Ácido. Solución que contiene una alta concentración de iones hidrogeno ($\text{ph} < 7$) (UPME, 1998)

Acuífero. Formación geológica constituida por materiales permeables o fisurados capaz de almacenar y transportar un flujo significativo de agua (UPME, 1998).

Aerobio. Proceso químico físico que únicamente se produce en presencia de oxígeno (UPME, 1998).

Afloramiento. Parte del estrato de roca, veta filón o capa que sobresale del terreno o se encuentra recubierta de depósitos superficiales (UPME, 1998).

Agentes contaminantes. Sustancia que genera contaminación al agua saliente de la mina (Revilla, 2018).

Agua contaminada. Agua con presencia de sustancias causante de daños a la población y ecosistema (Revilla, 2018).

Aguas sulfurosas. Agua contaminada con presencia de sulfuros (Revilla, 2018).

Aprovechamiento de aguas. Reutilización de aguas subterráneas para actividades dentro de la mina (Revilla, 2018).

Agotamiento. Las fallas o fracturas en la roca inducidas por la minería pueden causar que las aguas subterráneas o freáticas que alimentan manantiales de aguas superficiales, encuentren senderos entre las diferentes capas freáticas presentándose sitios de afluencia parcial o total de éstas aguas hacia la mina, haciendo disminuir o desaparecer estos manantiales (UPME, 1998).

Aguas ácidas. Se forman por meteorización de minerales sulfurosos, simultáneamente a la acción catalizadora de bacterias (UPME, 1998).

Aguas ácidas. Se forman por meteorización de minerales sulfurosos, simultáneamente a la acción catalizadora de bacterias (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Alcalino. Solución que tiene cualidades de base ($\text{pH} > 7$) (UPME, 1998).

Ambiente. Entorno en el que opera una organización, que incluye aire, suelo, agua, recursos naturales, seres humanos y su interrelación (UPME, 1998).

Anaerobio. Proceso químico físico que únicamente tiene lugar en ausencia de oxígeno (UPME, 1998).

Antrópico. Relacionado con la actividad humana (UPME, 1998).

Area carbonífera. Es una superficie, de significado geográfico y geológico, que comprende uno o más sectores carboníferos, donde se aprecian acentuadas variaciones faciales laterales y verticales y donde los rasgos estructurales indican estructuras individuales (UPME, 1998).

Biótico. Relativo a los seres vivos (UPME, 1998).

Buzamiento. Sentido en el que se inclina una capa o un filón (UPME, 1998).

Carbón activado. Carbón tratado especialmente para obtener una gran capacidad de absorción de gases o vapores. En sustancias líquidas se usa como agente decolorante y para retirar impurezas (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Carbón. Es una roca sedimentaria de color negro a negro castaño, combustible, que contiene más del 50 % en peso, y más del 70 % en volumen, de material carbonoso, comprendida la humedad inherente. Se formó de restos de plantas que han sido compactadas, endurecidas, químicamente alteradas y carbonificadas por calor y presión durante el tiempo geológico (UPME, 1998).

Clausura. Acto de cerrar cualquier labor minera, generalmente subterránea, cuando finalizan las labores extractivas, con el fin de evitar riesgos de accidentes y facilitar la recuperación de los terrenos (UPME, 1998).

Compactación. Proceso mediante el cual un suelo disminuye el volumen y aumenta la densidad, al reducir su índice de poros (UPME, 1998).

Compuestos en solución. El drenaje minero subterráneo generalmente contiene componentes orgánicos como grasas, aceites y solventes, que provienen en su mayoría de maquinas y equipos utilizados en la actividad minera, y componentes químicos disueltos como sales, ácidos minerales y metales, que pueden presentar algún grado de toxicidad, y que no degradan naturalmente, pudiendo contaminar las fuentes de agua (UPME, 1998).

Contaminación. Descarga artificial de sustancias o energía en una concentración tal que produce efectos perjudiciales sobre el medio, incluido el hombre (UPME, 1998).

Cuenca visual. Porción de terreno visible desde un punto o recíprocamente, conjunto de puntos desde los que se ve un punto (UPME, 1998).

Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO5). Cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para descomponer las sustancias orgánicas en cinco días a veinte grados

centígrados de temperatura. Es una medida de la capacidad contaminante de un agua residual que indica la cantidad de oxígeno consumido en 5 días por los microorganismos en la degradación aeróbica de la materia orgánica que contiene (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO5). Es una medida de la capacidad contaminante de un agua residual que indica la cantidad de oxígeno consumido en 5 días por los microorganismos en la degradación aeróbica de la materia orgánica que contiene (UPME, 1998).

Desarrollo sostenible. Se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y el bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades (UPME, 1998).

Dique. Cuerpo tabular de roca ígnea intrusiva, relativamente larga y delgada, que rellena una fisura o una fractura profunda en rocas más antiguas, y las corta discordantemente (que corta a la estratificación de las capas). A veces pueden aparecer varios diques dispuestos paralelamente entre sí. Cuando son afectados por erosión pueden dar lugar a relieves descalzados, al ser los materiales del dique más resistentes que los circundantes, o formar una depresión en forma de fosa en el caso contrario (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

DQO. Demanda química de oxígeno. Cantidad de oxígeno empleado en la oxidación química de la materia (orgánica e inorgánica) presente en el agua (UPME, 1998).

Drenaje ácido de mina. Descarga de agua con un pH inferior a 7 que produce como resultado la oxidación natural de minerales sulfurosos contenidos en las rocas, cuando son expuestas al aire

y al agua (UPME, 1998).

Drenaje. Proceso de descarga de agua mediante corrientes superficiales o conductos subterráneos (UPME, 1998).

E.I.A Evaluación de Impacto Ambiental. Conjunto de técnicas y metodologías encaminadas a valorar los impactos que sobre el medio producen determinadas obras, instalaciones y actividades (UPME, 1998).

Erosión. Conjunto de procesos físicos y químicos por los que los materiales rocosos o los suelos son agrietados, disueltos o arrastrados de cualquier parte de la corteza terrestre (UPME, 1998).

Estéril. Se define así al suelo inorgánico y todos los sedimentos y rocas que cubren el subafloramiento de carbón; en este caso toma el nombre de "estéril de cobertura u overburden". Igual definición tienen las rocas que separan dos mantos de carbón, en este caso toman el nombre de estéril de "entremantos o interburden" (UPME, 1998, p.1).

Estudio de impacto ambiental. Documento técnico que debe presentar el titular del proyecto del cual se efectuará la declaración de impacto ambiental (UPME, 1998).

Exploración. Trabajos efectuados desde la superficie terrestre, con el propósito de determinar la localización, cantidad o calidad de un depósito mineral. Pueden consistir en excavaciones de zanjas, sondeos, etc (UPME, 1998).

Filtración. Separación de las partículas sólidas de un fluido, haciendo pasar la mezcla por un medio filtrante en el que se retienen los sólidos (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Floculación. Aglomeración de partículas finas suspendidas en un líquido, por métodos químicos o físicos (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Gestión ambiental. Conjunto de acciones encaminadas a lograr la máxima racionalidad en el proceso de decisión relativo a la conservación, defensa, protección y mejora del medio ambiente, basándose en una coordinada información multidisciplinar y en la participación ciudadana (UPME, 1998).

Hidrometalurgia. Rama de la metalurgia extractiva que estudia la obtención de metales o compuestos a partir de minerales o fuentes secundarias mediante procesos que tienen lugar a bajas temperaturas en medio acuoso u orgánico.

Impacto ambiental. Efecto que las actuaciones humanas producen en el medio. La intensidad de la alteración esta relacionada con la capacidad de asimilación del entorno donde se desarrolla la actividad impactante (UPME, 1998).

Impermeable. Material que no es capaz de permitir el paso del agua, o que solo lo permite con dificultad (UPME, 1998).

Infiltración. Acto o proceso de pasar una sustancia a través de otra (UPME, 1998).

Labores de preparación. Se refiere a los trabajos previos en una mina de carbón, para su extracción, mediante la construcción de socavones, guías, sobreguías, tambores, pozos verticales, inclinados, cruzadas, vías de transporte o mediante remoción del estéril de cobertura y minería parcial (UPME, 1998).

Lixiviación (beneficio). Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mina, por medio de una solución acuosa que

contiene un reactivo químico apropiado.

Macrófita. Formas macroscópicas de vegetación acuática. Comprenden las macroalgas, las pteridofitas (musgos, helechos) adaptadas a la vida acuática y las angiospermas. Teniendo en cuenta la morfología y fisiología, se clasifican en Macrófitos fijas al sustrato y Macrófitos flotantes.

Medio ambiente. Conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas que rodean a un organismo (UPME, 1998).

Metales pesados. Elementos químicos del grupo de los metales, con densidad superior a 4.5 g/cm³ y masa atómica alta, como cadmio, cobre, cromo, mercurio, plomo, etc. Como contaminantes, son un grupo de sustancias que se metabolizan mal y que presentan toxicidad para los seres vivos, incluido el hombre (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Mina. Excavación realizada para extraer del subsuelo sustancias minerales útiles ; la mina puede ser subterránea o a cielo abierto. El termino se aplica también al conjunto de labores e instalaciones para la explotación de los yacimientos de minerales o rocas de interés industrial (UPME, 1998).

Mineral. Sustancia natural que tiene una composición química determinada y que siempre se presenta bajo la misma forma cristalina (UPME, 1998).

Minería de carbón. Todos los métodos para extraer carbón, o sus subproductos, de la corteza terrestre (UPME, 1998).

Minería subterránea. Es la extracción de carbón o de sus subproductos, por métodos subterráneos, tales como cámaras y pilares, tajo largo, etc (UPME, 1998).

Minería. Técnicas y actividades dirigidas al descubrimiento y explotación de yacimientos de minerales (UPME, 1998).

Neutralización. Adición de un material ácido o alcalino al agua o al suelo para ajustar su ph hasta alcanzar el valor de 7 (Neutro) (UPME, 1998).

Nivel freático. Limite superior, no estático, de la zona saturada de agua en el subsuelo (UPME, 1998).

Oxidación. Alteración química de una sustancia por perdida de electrones, o en presencia de oxígeno (UPME, 1998).

Permeabilidad. Capacidad de un material para transmitir fluidos (UPME, 1998).

pH. Medida química que indica la concentración de iones hidrogeno. Un valor igual a 7 corresponde a una solución neutra, mientras que si es menor es ácida y si es superior es básica (UPME, 1998).

Pulpa. Mezcla de mineral molido o pulverizado con agua o una solución acuosa. Vertedero tipo Sutro: es un dispositivo que ayuda a controlar la velocidad de los líquidos (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Región o zona carbonífera. Es una superficie que abarca una o mas áreas carboníferas, geográficamente correspondiente a cada una de las regiones en que esta subdividido el país (UPME, 1998).

Rehabilitación. Acciones destinadas a devolver a los terrenos degradados la posibilidad de soportar uno o más usos del suelo, sin perjuicio del medio ambiente (UPME, 1998).

Restauración. Acciones destinadas a devolver al terreno las condiciones de uso existentes con anterioridad a la actividad impactante (UPME, 1998).

Sedimentación. Deposición de sedimentos en el fondo de los lagos, ríos u otros cursos de agua, así como en la propia tierra (UPME, 1998).

Sedimento. Partícula de tierra o material rocoso que ha sido erosionado (UPME, 1998).

Sólidos en suspensión. Además de las partículas de carbón, los drenajes mineros arrastran partículas de otros compuestos, que aumentan la turbidez de las aguas receptoras, alterando los procesos fotosintéticos de las plantas acuáticas, especialmente en ambientes lacustres (UPME, 1998).

Sólidos suspendidos. Partículas sólidas que pueden retirarse de un líquido mediante filtración (UPME, 1998).

Sólidos Totales Disueltos (TDS). DS es una medida de la materia en una muestra de agua, más pequeñas de 2 micrones (2 millonésimas de un metro) y no pueden ser removidos por un filtro tradicional. TDS es básicamente la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltas en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua. TDS es clasificado como un contaminante secundario por la Agencia de Protección Ambiental de los EU (USEPA) y se sugiere un máximo de 500 mg/L en agua potable. Este estándar secundario se establece porque TDS elevado proporciona al agua una apariencia turbia y disminuye el sabor en ésta. Personas no acostumbradas al agua con alto contenido de TDS pueden experimentar irritación gastrointestinal al beber ésta. TDS también pueden interferir con equipos de tratamiento y es importante considerarlo al instalar un sistema de tratamiento de agua. Tratamiento de agua por TDS puede

lograrse por ósmosis reversa o destilación. (Sigler & Bauder, 2014)

Subsidencia. Hundimiento progresivo del fondo de una fosa o depresión que se desarrolla paralelamente a la sedimentación depositada en ella (UPME, 1998).

Suelo. Parte de los materiales incoherentes que recubre a las rocas y que es capaz de sostener vida vegetal (UPME, 1998).

Talúd. Inclinación natural o artificial de la superficie del terreno (UPME, 1998).

Techo. Capa geológica situada sobre un yacimiento, superficie superior de un estrato (UPME, 1998).

Turbidez. Disminución de la transparencia del agua causada por la presencia de partículas sólidas en suspensión (UPME, 1998).

Vertimiento puntual. Es el que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo. (Ministerio de minas y energía y Universidad de Córdoba, 2015)

Vertimiento. Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido (MinMinas & UniCórdoba, 2015).

Yacimiento. Es una concentración o un depósito de mineral presente de forma natural, en la corteza terrestre, explotable económicamente en el momento actual (UPME, 1998).

2.4 Marco Contextual

Norte de Santander es uno de los 32 departamentos que forman la República de Colombia. Su capital es Cúcuta. Está ubicado al noreste del país, limitando al norte con Venezuela, al sur con Boyacá, al suroeste con Santander y al oeste con Cesar. Cuenta con 40 municipios, 2 provincias y un área metropolitana. Presenta una temperatura alrededor de los 38° C, altura de 2283 m s.n.m, población de 1.492.366 habitantes (Centro Educativo Cristiano Jireth, 2010).

La economía del departamento es la duodécima quinta más grande de Colombia se soporta en la explotación de sus recursos naturales como el carbón y la exportación se dirige a países vecinos como Venezuela y Ecuador. Las formaciones geológicas de Los Cuervos y Carbonera son de donde se extrae el carbón en Norte De Santander y pertenecen a la edad Paleoceno-Eoceno.

Norte de Santander cuenta con entidades protectores del medio ambiente como es el caso de CORPONOR, entidad encargada de la vigilancia y control de las normas medio ambientales. En el caso objeto de estudio se ve la necesidad de realizar acciones de mejoramiento y protección ambiental en cuanto a la explotación minera de carbón subterránea, que frecuentemente generan aguas residuales mineras, cuyo manejo puede conllevar daños ambientales, si no se realiza de forma asertiva. Por tanto, surge la necesidad de implementar mecanismos de reducción del impacto mediante la filtración de aquellos componentes que deterioren la fauna y flora en la región principalmente.

Es así como se determina realizar la investigación acerca del uso de membranas cerámicas a partir de arcillas, diatomitas y cenizas volantes en tratamientos de aguas residuales que se generan en la mina COOPSELVA 2, ubicada en el municipio de Bochalema, corregimiento de La

Donjuana, cuya ubicación se presenta a continuación en la figura 5.



Figura 5. Foto bocamina COOPSELVA 2



Figura 6. Coordenadas de la mina COOPSELVA 2

Cabe señalar que La mina Coopselva 2 se encuentra ubicada en la vereda La Selva, municipio Bochalema, departamento Norte de Santander. Pertenece al consorcio La Zorzana, la mina se encuentra en la formación geológica Los Cuervos, en ella se hace uso del método de explotación de ensanche tambores, su acceso es por medio de niveles. El carbón que se extrae en la mina es de tipo coquizable y de mezcla.

2.5 Marco Legal

El presente proyecto está regido por la siguiente base normativa:

Constitución Política de Colombia. En su Artículo 8, que dicta lo siguiente. Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.

Constitución Política de Colombia. En su Artículo 79, que dicta lo siguiente. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Ley 685 del 2001. Código de minas, Artículo 67. Área en corrientes de agua. El área de la concesión cuyo objeto sea la exploración y explotación de minerales en el cauce de una corriente de agua, estará determinada por un polígono de cualquier forma que dentro de sus linderos abarque dicho cauce continuo en un trayecto máximo de dos (2) kilómetros, medidos por una de sus márgenes.

Guía minero ambiental. Manejo de aguas residuales mineras se plantean como sistemas de tratamiento la utilización de un tanque séptico con campo de infiltración, un filtro en grava u otro sistema que permita el manejo adecuado de aguas residuales.

Decreto 475 de 1998. Normas técnicas reguladoras de las actividades relacionadas con la calidad del agua potable para el consumo humano. Artículo 8. características expresadas como valor admisible mg/L Aluminio Al 0.2, Antimonio Sb 0.005, Arsénico As 0.01, Bario Ba 0.5, Boro B 0.3, Cadmio Cd 0.003, Cianuro libre y disociable CN- 0.05, Cianuro total CN- 0.1,

Cloroformo CHCl_3 0.03, Cobre Cu 1.0 Cromo Hexavalente $\text{Cr}^{(+6)}$ 0.01, Fenoles totales Fenol 0.001, Mercurio Hg 0.001, Molibdeno Mo 0.07, Níquel Ni 0.02 Nitritos $\text{NO}^{(2)}$ 0.1, Nitratos $\text{NO}^{(3)}$ 10, Plata Ag 0.01, Plomo Pb 0.01, Selenio Se 0.01, Sustancias activas al azul de metileno ABS 0.5, Grasas y aceites - Ausentes Trihalometanos Totales THMs 0.1.

Decreto 605 de 1996. Reglamenta los procedimientos de potabilización y suministro de agua para consumo humano.

Resolución 0631 de 2015. En su artículo 10, donde aparecen los valores máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos de aguas residuales mineras.

Ley 23 de 1973. Principios fundamentales sobre la prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.

Decreto 1886 de 2015. Ministerio de Minas. Reglamento de Seguridad en las labores mineras subterráneas. Título XI Desagüe, Capítulo I Aguas superficiales y aguas subterráneas

Artículo 231 Evacuación de las aguas el titular de derecho minero, el explotador minero y el empleador minero, tienen la obligación de evacuar las aguas acumuladas en el interior de la mina y realizar los procedimientos establecidos por la normatividad ambiental para neutralizarlas y poderlas verter en la superficie. Igualmente estará obligado a realizar las labores necesarias para evitar que las aguas de la labor subterránea, inunden minas o labores mineras subterráneas vecinas.

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

Según el objetivo es una investigación descriptiva, ya que se encarga de puntualizar las características de la población en estudio, es decir, describe el tema de la investigación sin cubrir por qué ocurre.

Según el propósito es una investigación aplicada, dado que se lleva a la práctica las teorías generales, para resolver las necesidades concretas que se plantea el hombre en su cotidianidad, mejorando algunos aspectos de su realidad social.

Según la estrategia es una investigación experimental, se trata de un estudio de laboratorio, donde se tiene una hipótesis del trabajo que se pretende comprobar y en base a esto se plantean una serie de variables.

Tabla 3. Diseño experimental del proceso de filtrado con membranas cerámicas y su porcentaje de materias primas utilizadas

Muestras	% (en peso)		
	Arcilla	Diatomitas	Cenizas volantes
3	60%	20%	20%
3	50%	20%	30%
3	40%	30%	30%
Total 9			

Las variables evaluadas son las siguientes:

- Se caracterizaron las membranas por microscopía óptica, diámetro seco, diámetro húmedo, contracción y porcentaje de absorción.

- Se calculó la densidad y la viscosidad de la barbotina
- Las ARM filtradas se caracterizaron por pH, conductividad, turbidez, DB05, DQO, TDS.
- El diseño experimental utilizado fue 31 es decir, un factor a 3 niveles como se muestra en la tabla 3. Las diferentes proporciones de las arcillas, diatomitas y cenizas volantes corresponden al factor MEZCLA, cuyos niveles serian: mezcla 1 (60, 20,20); mezcla 2 (50, 20,30) y mezcla 3 (40, 30,30) lo que da un total de 3 tratamientos. Al realizarse tres replicas a cada tratamiento da un total de 9 observaciones.

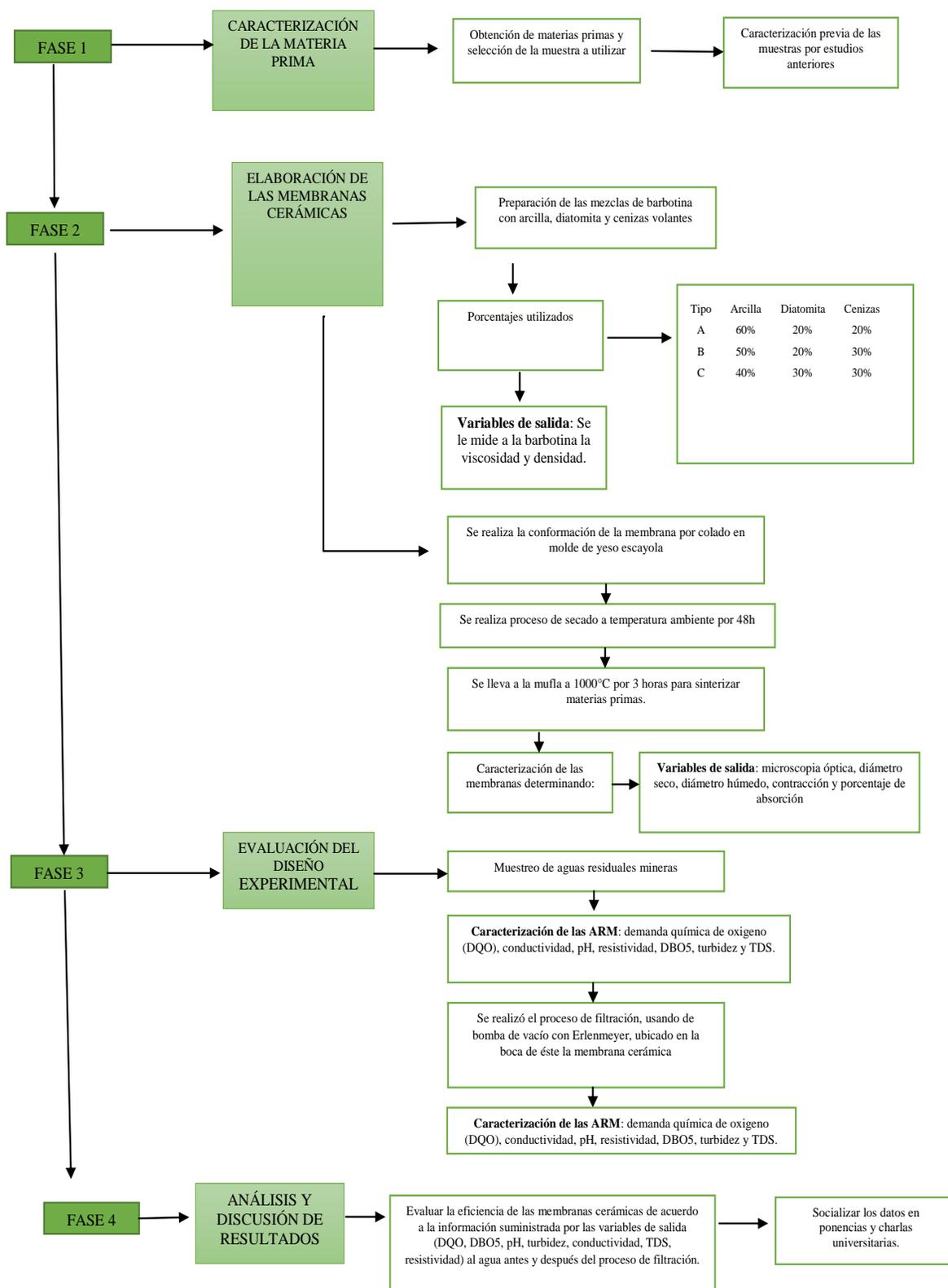


Figura 7. Proceso Metodológico

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población. Está formada por las Minas de Norte de Santander que generan aguas ácidas, en estado contaminado por azufre y sólidos en suspensión.

N = 623 títulos mineros en Norte de Santander.

También se encuentra conformado por el caudal de agua de la mina COOPSELVA 2, el cual es de 5 litros por segundo diariamente.

3.2.2 Muestra. Se hace uso del método de selección aleatorio simple, donde se considera que las unidades de muestreo se escogen de manera individual, ya que todas ellas tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas.

Para el caso objeto de estudio se determina que la Mina de carbón COOPSELVA 2, con título minero a nombre de la Sociedad Comercializadora Carbones CARBONORA S.A.S, ubicada en la Donjuana, Municipio de Bochalema, Norte de Santander, es el espacio para realizar la investigación.

n=1

La cantidad de agua que se tomó de muestra fue de 12 litros. Se tomaron 6 recipientes plásticos cada uno de una capacidad de 2 litros. Dicha muestra se obtuvo en cunetas de recolección de aguas que se encuentran en el interior de la mina COOPSELVA 2.

3.3 Instrumentos para Recolección de Información

Como fuentes primarias de información se tienen en cuenta las siguientes herramientas: Formato para reporte de porcentaje adsorción de agua (ver anexo 1), Formato para reporte

porcentaje de contracción (ver anexo 2), Formato para reporte de densidad (ver anexo 3), Formato para reporte de análisis físicos (ver anexo 4) y Formato para reporte de análisis químicos (ver anexo 5), que se alimentan de la información aportada por análisis documental, observación directa, informes y reportes de laboratorio realizadas por los autores o por terceros, registros fotográficos.

Para el desarrollo de la investigación también se tienen en cuenta las fuentes secundarias de información, como son las bases de datos scienceDirect, scopus, web of science, donde se encontraron tesis, libros, artículos y documentos relacionados con el tema objeto de estudio. Entre los más significativos se tiene el artículo “Zeolitas Sódicas y Potásicas a partir de Cenizas Volantes Provenientes de la Combustión del Carbón de la Termoeléctrica Termotasajero S.A.S” de Edgar Farid Carreño-Flórez, Gabriel Peña-Rodríguez, Martha Yasmid Ferrer Pacheco. El libro de “Purificación del agua”; de Jairo Alberto Romero, 2002 y por último el artículo “Evaluation of the mixtures of clay, diatomite, and sawdust for production of ceramic pot filters for water treatment interventions using locally sourced materials” de U.E. Ekpunobia, S.U. Agboa, V.I.E. Ajiwe de 2019.

3.4 Técnica de Análisis y Procesamiento de datos

En el tratamiento de los datos se aplicó la técnica estadística de correlación de Pearson y regresión lineal, se tabulan las tablas en Excel a fin de presentar las gráficas que permiten evaluar, interpretar y optimizar las variables en estudio.

3.5 Presentación de Resultados

Descripción de la caracterización de las barbotinas y posteriormente de las membranas cerámicas ya sinterizadas, representación del comportamiento de cada una de las variables, capacidad filtrante, elección de la membrana más eficiente, contaminantes del agua residual minera antes y después de pasar por las membranas.

4. Fases del Proyecto

4.1 Fase 1. Caracterización de la Materia Prima

4.1.1 Obtención de materias primas y selección de muestra a utilizar. Las materias primas utilizadas en el proyecto fueron; caolín, diatomitas y cenizas volantes.

Estas se obtuvieron de la siguiente manera:

- Caolín. Se adquirió en establecimientos comerciales, debido a es un producto fácil de conseguir y económico. De este material se obtuvo una cantidad de 1000g.
- Diatomitas. Este material se recicló de la industria cervecera, puesto que es utilizado en las tortas de filtración; este material se obtuvo conforme a estudios previos realizados por el Dr. Gabriel Peña, se proporcionó una cantidad de 1000g que se consideró necesaria para el desarrollo del proyecto.
- Cenizas volantes. Este material se obtiene como resultado de la combustión de carbón. Al realizar el proyecto de la mano del semillero de investigación “SIFIMAC”, adscrito al departamento de física de la universidad Francisco de Paula Santander, se suministró 1000g de este material procedente de la empresa Termotasajero, ubicada en el municipio de San Cayetano, Norte de Santander.

4.1.2 Caracterización previa de las muestras por estudios anteriores. Como se evidencia a continuación:

4.1.2.1 Cenizas volantes. La preparación de la muestra se realizó por medio de tamizado, se empleó un tamiz ASTM 325, teniendo un tamaño de diámetro de 0,040 (mm). La ceniza pasante

fue almacenada en una porta muestra conservándose para futuros análisis.

La muestra se caracterizó en el microscopio electrónico de barrido (MEB), donde se analizó la morfología de las cenizas volantes y la distribución de la granulometría, se empleó el software libre “Image Tool” versión 3.0. Para analizar la distribución del tamaño de partículas, se midieron los diámetros de cada una de ella, de forma horizontal, vertical y diagonal.

Con la ayuda del EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) se realizó el microanálisis químico, el cual se realizó para las partículas de cenizas volantes y las partículas de inquemados que se presentaron en la muestra (Peña & Ortega, 2014).

De estos análisis se obtuvo dicha información que fue de gran importancia, ya que definió ciertas características y el uso de estos polvos para la elaboración de membranas cerámicas a base de cenizas volantes.

4.1.2.2 Diatomitas. Las diatomitas o tierras diatomeas son utilizadas en diversos campos, como la industria agrícola, hasta su uso como nano partículas en la medicina avanzada; pero uno de sus mayores campos de acción es la clarificación de la cerveza, por ser una de las bebidas más consumidas del mundo, lo que al usarse deja esta materia prima como un residuo, el lodo de diatomita con sus frústulas y poros tapados por materia orgánica y agua, es una mezcla que tiene grandes implicaciones ambientales, sanitarias y económicas generadas por la gran cantidad de tierra diatomácea usada como elemento filtrante (Fillaudeau, Blanpain & Daufin, 2006).

Las propiedades filtrantes de las diatomitas han sido mejoradas en tratamientos térmicos, a temperaturas que van de los 1000 °C hasta los 1400 °C, también pasaron por un proceso de limpieza para así eliminar todas las impurezas y residuos generados en el proceso de producción

de cerveza.

Para la producción de un litro de cerveza se utiliza alrededor de 1 o 2 gramos de diatomita calcinada.

Para la caracterización de la tierra diatomea, se usó espectroscopia de absorción atómica, utilizándose como aglutinante carboximetilcelusosa y fécula de maíz como humectante, mediante la normativa ASTM D424-59.

La morfología y microanálisis de las muestras óptimas se estudió mediante imágenes superficiales por microscopia electrónica de barrido (MEB), y por espectroscopia de rayos X de energía dispersa (EDS). Lo anterior se llevó a cabo mediante el MEB FEI Quanta™ 650 FEG (Peña et al., 2019).

4.1.2.3 Caolín. El caolín también es conocido como caolinita y se define como una arcilla blanca. El caolín se forma del silicato de aluminio hidratado y de la descomposición del feldespato por la acción del agua y el dióxido de carbono; la descomposición se debe a los efectos a largo plazo de la erosión (Serral, 2019).

Al caolín utilizado en la elaboración de este proyecto no se realizó ningún tratamiento especial, el cual fue utilizado con las propiedades químicas y físicas del mismo.

4.2 Fase 2. Elaboración de las Membranas Cerámicas

4.2.1 Preparación de la barbotina. A continuación se muestra la preparación de la barbotina:



Figura 8. Foto de las materias primas

Se toma como base de la preparación una cantidad de 300 gramos de cada materia prima (caolín, cenizas volantes y diatomitas) como se puede evidenciar en la figura 8. Los porcentajes de cada materia prima para la preparación de la barbotina se pueden ver en la tabla 4.

Tabla 4. Composición porcentual de los elementos constitutivos de las membranas cerámicas

Membranas	Arcilla	Diatomitas	Cenizas volantes
Tipo A	60%	20%	20%
Tipo B	50%	20%	30%
Tipo C	40%	30%	30%

Se tomo como base para la producción de la barbotina 300g de masa seca. Es decir:

4.2.1.1 Caolín. Membranas tipo A:

$$(300 \text{ g} * 60\%) = 180 \text{ g de caolín}$$

Membranas tipo B:

$$(300 \text{ g} * 50\%) = 150 \text{ g de caolín}$$

Membranas tipo C:

$$(300 \text{ g} * 20\%) = 120 \text{ g de caolín}$$

4.2.1.2 Diatomitas. Membranas tipo A y B:

$$(300 \text{ g} * 20\%) = 60 \text{ g de diatomitas}$$

membranas tipo C:

$$(300 \text{ g} * 30\%) = 90 \text{ g de diatomitas}$$

4.2.1.3 Cenizas volantes. Membranas tipo A:

$$(300 \text{ g} * 20\%) = 60 \text{ g de cenizas volantes}$$

Membranas tipo B y C:

$$(300 \text{ g} * 30\%) = 90 \text{ g de cenizas volantes}$$

Posteriormente, se procedió a pesar en la gramera cada elemento, se mezcló y homogenizó en una bolsa ziploc obteniendo finalmente 300g de la mezcla (ver figura 9).



Figura 9. Foto de la mezcla de materias primas en seco

En la figura 10 se pueden ver la tipología de las mezclas de polvos (cenizas volantes, diatomitas y caolín) según sus porcentajes en peso. Las cuales son tipo A, B y C.



Figura 10. Tipología de membranas cerámicas en estudio

4.2.2 Adición de agua y defloculante. Las mezclas uniformes se vertieron en un recipiente de aluminio y se colocaron en la mezcladora a 500rpm (mezcladora DLAB OS20-S) y se adicionó agua destilada proporcionalmente para homogenizar la mezcla en una proporción de 1:1.27, 1:1.22 y 1:1.17 respectivamente, a una temperatura promedio de 18 °C.

Esta proporción de agua se empleó después de varias pruebas con relación 1:1 que no daban la fluidez necesaria en la barbotina.

En las siguientes imágenes se puede observar como se va adicionando proporcionalmente cada gota de silicato de sodio a la mezcla (ver figura 11).



Figura 11. Fotos del proceso de elaboración de la barbotina

En la tabla 5 se muestra la cantidad de gotas de silicato de sodio agregadas durante la homogenización de la barbotina, este proceso se realiza con el fin de deflocular la pasta cerámica hasta obtener la viscosidad adecuada.

Tabla 5. Cantidad de silicato de sodio

Número de gotas	Peso de gotas (g)
1	0.054
10	0.59
Promedio = 0,056	
Σ gotas = 5,6 g	

Se realizó el siguiente cálculo:

$$\text{Promedio de gotas} = \Sigma \text{gotas} / \text{ngotas} = 5.6 / 10 = 0.56 \text{ g}$$

Se utilizó el valor del promedio de gotas con el número de gotas (7, 6 y 5 gotas respectivamente) para calcular el porcentaje de defloculante en peso (silicato de sodio) que debe ser utilizado para una mezcla de 300 gr de masa seca:

- Membrana tipo A:

$$0.56 \text{ g} * 7 \text{ gotas} = 3.92 \text{ g}$$

$$(3.92 \text{ g} * 100\%) / 300 \text{ g} = 1.31\% \text{ de defloculante en peso}$$

- Membrana tipo B:

$$0.56 \text{ g} * 6 \text{ gotas} = 3.36 \text{ g}$$

$$(3.36 \text{ g} * 100\%) / 300 \text{ g} = 1.12\% \text{ de defloculante en peso}$$

- Membrana tipo C:

$$0.56 \text{ g} * 5 \text{ gotas} = 2.8 \text{ g}$$

$$(2.8 \text{ g} * 100\%) / 300 \text{ g} = 0.93\% \text{ de defloculante en peso}$$

Las tablas 6, 7 y 8 muestran la proporcionalidad por elemento de cada una de las barbotinas, tomando como base 300 g de masa seca de cada materia prima y obteniendo así el valor utilizado tanto en porcentaje como en peso.

Tabla 6. Cálculo de proporcionalidad de materias primas para la membrana cerámica Tipo

A

Componente	Proporción por elemento	Total por elemento
Arcilla caolinítica	60%	180 g
Diatomitas	20%	60 g
Cenizas volantes	20%	60 g
Agua destilada	127%	381 ml
Silicato de sodio (Na_2SiO_3)	1.3%	3.92 g

Tabla 7. Cálculo de proporcionalidad de materias primas para la membrana cerámica Tipo

B

Componente	Proporción por elemento	Total por elemento
Arcilla caolinítica	50%	150 g
Diatomitas	20%	60 g
Cenizas volantes	30%	90 g
Agua destilada	122%	366 ml
Silicato de sodio (Na_2SiO_3)	1.12%	3.36 g

Tabla 8. Cálculo de proporcionalidad de materias primas para la membrana cerámica Tipo

C

Componente	Proporción por elemento	Total por elemento
Arcilla caolinítica	40%	120 g
Diatomitas	30%	90 g
Cenizas volantes	30%	90 g
Agua destilada	117%	351 ml
Silicato de sodio (Na_2SiO_3)	0.93%	2.8 g

4.2.2.1 Cálculo de densidad. Para calcular la densidad se utilizó un picnómetro de 50 cm³ el cual fue pesado con tapa estando en vacío, seguido de esto se pesó el picnómetro lleno de barbotina con tapa, retirando todo el exceso. Con los valores obtenidos para los 3 tipos de barbotinas se realiza la resta entre el peso final del picnómetro lleno y el peso inicial del picnómetro vacío (ver figura 12).

Se procede a utilizar la siguiente ecuación para el cálculo de la densidad:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

P: densidad.

m: masa.

V: volumen.



Figura 12. Foto del proceso cálculo de densidad

4.2.2.2 Cálculo de viscosidad. La viscosidad fue definida mediante caída por gravedad de cada una de las barbotinas desde una distancia específica. Se utilizaron diferentes tamaños de

picnómetros y se cronometró el tiempo que se demoraba cada barbotina en caer a una probeta de 250ml desde una altura de 0.10 m.

Se realizó un promedio del volumen y el tiempo de caída para cada tipo de barbotina

Después de esto se empleó la siguiente fórmula

$$\frac{v}{t} = \frac{pgh\pi r^4}{8ln}$$

Donde:

V=Volumen

t=tiempo

p=presión

g=gravedad

h=altura

r=radio de la probeta

l= longitud de la probeta

n= viscosidad

Se despejo la viscosidad

$$n = \frac{pgh\pi r^4 t}{8lv}$$

Como r, l, V son constantes para un tubo determinado, haciendo $K = \pi r^4 / (8lV)$ se tiene:

$$\eta = K\Delta p t$$

Si el líquido fluye únicamente por acción de la gravedad en un tubo situado verticalmente, la presión Δp es la que ejerce la columna de líquido, esto es, $\Delta p = \rho gh$, siendo ρ la densidad del líquido y h la altura de la columna.

Por tanto: $\eta = K\rho ght$

Se reemplazaron los datos y se calculó la viscosidad para cada una de las barbotinas.

4.2.3 Elaboración de membranas. Las membranas se elaboraron de las barbotinas anteriormente preparadas, estas barbotinas se vertieron en un molde de yeso escayola, el cual no modifica sus características y ayuda al secado de las muestras. Previamente, se colocaron hojas de papel absorbente para retirar fácilmente las muestras sin quebrarlas.

4.2.3.1 Proceso de secado a temperatura ambiente. Luego del vertido y moldeo, se secó a temperatura ambiente durante 48 horas, en un lugar sin presencia de humedad y con la luz del sol directa con la finalidad de acelerar el proceso. El proceso de secado y vertido se puede observar en la figura 13.



Figura 13. Fotos del proceso de secado y vertido

4.2.3.2 Proceso de cocción en mufla eléctrica. La cocción se llevó a cabo en una mufla eléctrica Ney VULCAN D-130 (ver figura 14). Sobre una base de ladrillo refractario se colocaron 10 membranas del tipo de muestra A, B o C. Para cada tipo de membrana el proceso de cocción se realizó por separado, pero se utilizó la misma curva de cocción, esto debido a que la base de ladrillo refractario solo permitía la cocción de 10 membranas y una vez finalizado el proceso de cocción las membranas se dejaron enfriar a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 9 horas.



Figura 14. Secado en la mufla eléctrica Ney VULCAN D-130

Las membranas se llevaron desde la temperatura ambiente (T_0), debido a que no se encontraban completamente secas, hasta una temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_1) a razón de $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para mantenerlas luego constantes durante 1 h , luego se llevaron a una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_2) a razón de $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y se mantuvo constante durante 30 min , las rampas de calentamiento aumentaron lentamente para evitar fracturas en las cerámicas, después se llevaron a una

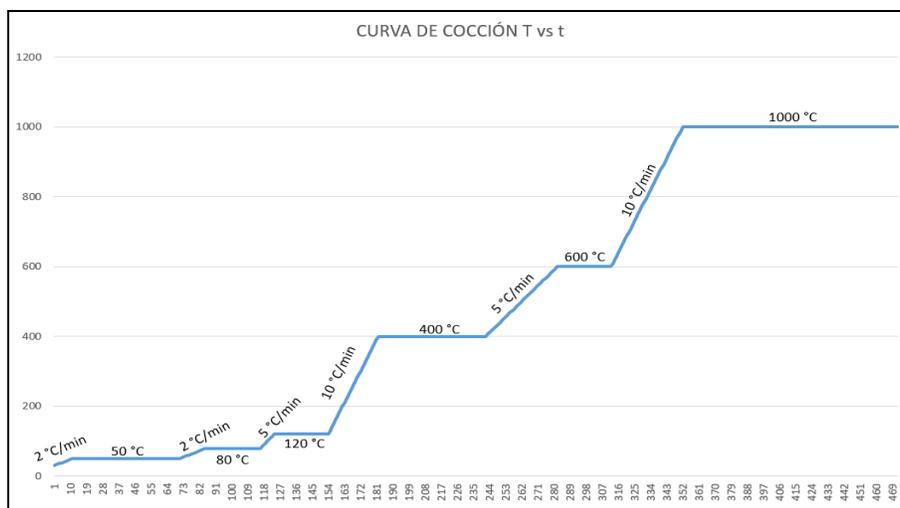
temperatura de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_3) a razón de $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para mantenerlas constantes 30 min , a partir de este punto las membranas ya se encontraban secas por lo tanto se pudo aumentar la rampa de calentamiento, se elevó la temperatura hasta los $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_4) a razón de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, pasada la hora, las membranas se llevaron a temperatura de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_5) a razón de $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para mantenerlas constantes durante 30 minutos, en este intervalo nuevamente se disminuyó la rampa de calentamiento para evitar la inversión del cuarzo alfa a beta que es aproximadamente a los $573\text{ }^{\circ}\text{C}$ y finalmente se alcanza una sinterización completa a una temperatura de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_6) a razón de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, donde se mantuvo constante durante 2 h .

Para el enfriamiento de las membranas se apagó la mufla y se dejaron las membranas hasta que se produjo todo el enfriamiento de manera lenta debido a que se debía garantizar en este proceso la inversión del cuarzo que es un proceso inverso es decir está presente tanto en cocción como en enfriamiento.

El proceso de cocción descrito anteriormente se puede observar en la tabla 9 y en la figura 15.

Tabla 9. Cocción

<i>Temperatura inicial (°C)</i>	<i>Temperatura final (°C)</i>	<i>Rampa de temperatura (°C/min)</i>	<i>Tiempo en mesa (min) (T = kte)</i>
T_0	50	2	60
50	80	2	30
80	120	5	30
120	400	10	60
400	600	5	30
600	1000	10	120

**Figura 15. Curva de cocción temperatura versus tiempo**

4.2.3.3 Posterior al proceso de cocción. Las probetas se lijaron con el objetivo de regular la forma cilíndrica. Se determinaron propiedades físicas como su masa, volumen y densidad (ver figura 16).



Figura 16. Foto de una probeta pulida

4.2.4 Técnicas de caracterización. La masa se determinó pesando en la gramera dos membranas cerámicas porosas de cada tipo como se puede observar en la tabla 10.

Tabla 10. Peso de muestras en gramos

Membrana	Muestra 1 (g)	Muestra 2 (g)
TIPO A	9,06	8,04
TIPO B	9,22	10,25
TIPO C	7,65	7,91

Para determinar el diámetro de una membrana se usó un calibrador pie de rey digital, donde se tomaron 10 medidas para el diámetro, con la herramienta PROMEDIO y DESVEST de Excel se determinó un diámetro promedio $\bar{\Phi} = 45.42 \text{ mm}$ y una desviación estándar $\Delta\bar{\Phi} = 0.49 \text{ mm}$, de igual manera se hizo con la altura, obteniéndose una altura promedio $\bar{h} = 5.16 \text{ mm}$ y una desviación estándar $\Delta\bar{h} = 0.10 \text{ mm}$. Este proceso se repitió para cada uno de los tipos de membrana.

La masa que se obtuvo de la probeta lijada fue de $\bar{m} = 8.98 \text{ g}$ con una desviación estándar $\Delta\bar{m} = 0.09 \text{ g}$

4.2.4.1 Calculo de volumen y desviación estándar. Se determino el volumen (V) y su desviación estándar (ΔV) con aplicaciones de la derivada:

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} \bar{\Phi}^2 \bar{h}$$

$$\Delta\bar{V} = \frac{\pi}{2} \bar{\Phi} d\bar{\Phi} \bar{h} + \frac{\pi}{4} \bar{\Phi}^2 d\bar{h} = \frac{\pi}{2} \bar{\Phi} \left(\Delta\bar{\Phi} \bar{h} + \frac{1}{2} \bar{\Phi} \Delta\bar{h} \right)$$

$$\Delta\bar{V} = \frac{\pi}{2} (45.42 \text{ mm}) \left(0.49 \text{ mm} * 5.16 \text{ mm} + \frac{45.42 \text{ mm} * 0.10 \text{ mm}}{2} \right) * \frac{1 \text{ cm}^3}{(10 \text{ mm})^3}$$

4.2.4.2 Calculo de densidad. Se determina la densidad $\bar{\rho}$ y su desviación estándar $\Delta\bar{\rho}$ con la aplicación de la derivada:

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{\bar{V}}$$

$$\Delta\bar{\rho} = \left| \frac{\bar{V} d\bar{m} - \bar{m} d\bar{V}}{\bar{V}^2} \right| = \left| \frac{\bar{V} \Delta\bar{m} - \bar{m} \Delta\bar{V}}{\bar{V}^2} \right|$$

4.2.4.3 Calculo de la contracción. Se determinó la contracción de cada una de las muestras empleando la ecuación.

$$\text{Contracción}_i = \left(\frac{D_{s,i} - D_{c,i}}{D_{s,i}} \right) * 100$$

Donde:

$D_{s,i}$: el diámetro seco para la muestra i (antes de la etapa de cocción).

$D_{c,i}$: el diámetro cocido para la muestra i (después de salido del horno).

Para determinar dicho valor se tomaron medidas de diámetros con el calibrador y se utilizó la herramienta Excel para determinar un promedio de manera más rápida.

4.2.4.4 Cálculo del porcentaje de adsorción en agua. Se determinó el %Aa (absorción de agua) de cada una de las muestras, para ello se empleó el siguiente procedimiento:

Se midió la masa de la muestra cerámica con la balanza.

Se hirvió agua en un recipiente metálico.

Cuando el agua se encuentre en su punto de ebullición se situó la muestra cerámica dentro del agua

Se dejó durante 15 minutos una vez la muestra cerámica dejó de burbujear. Se sacó la muestra y se ubicó en un recipiente con agua a $T_{ambiente}$ durante 5 minutos.

Se sacó la muestra y se retiró el exceso de agua.

Se volvió a medir la masa de la muestra cerámica con la balanza.

Se aplicó la siguiente ecuación:

$$\%Aa_i = \left(\frac{M_{H,i} - M_{S,i}}{M_{H,i}} \right) * 100$$

Donde:

$M_{H,i}$: masa húmeda de la muestra cerámica tipo i

$M_{S,i}$: masa seca de la muestra cerámica tipo i

Se tomaron 2 membranas de cada una de las muestras cerámicas y se calculó el %Aa promedio.

4.2.4.5 Análisis de microscopia óptica. Se analizaron 2 cubos de 1cm^3 aproximadamente de década tipo de membrana porosa, la probeta se preparó en un molde de PVC, donde fueron incorporados los cubos de las membranas y se les adiciono resina de poliéster con catalizador Mek peróxido (ver figura 17). Una vez la resina tomo la consistencia adecuada se pulió hasta obtener una superficie homogénea lista para su análisis en el microscopio.

Se observaron las muestras con luz reflejada a diferentes aumentos correspondientes a 5X, 10X, 20X y 50X según lo estipulado bajo la Norma ASTM E11276, usando en el Microscopio Trilocular de Alta Resolución (Marca: ZEISS), para conocer la forma, distribución y tamaño de poro de dichas membranas.



Figura 17. Foto de probeta llevada al microscopio

4.3 Fase 3. Proceso de Filtración con los Prototipos de Membranas Cerámicas

4.3.1 Recolección de Muestras de agua residual minera. Se recolectaron las muestras de agua residual minera (ARM) en la mina COOPSELVA 2, ubicada en el corregimiento de la Don Juana, Norte de Santander. El agua se tomó del interior de la mina, se ingresó con autorización previa. En la abscisa 1300 en el nivel manto 30 y en la abscisa 1700 en el manto 50 donde se encuentran las cunetas de recolección de agua residual, se embazaron 6 recipientes de 2L. Una vez recolectadas las muestras, se transportaron en cavas de icopor con hielo para mantener la temperatura y para que no se modifiquen sus propiedades físicas y químicas, de igual manera fueron almacenadas durante todo el proceso de filtración y análisis.

Se tomaron alrededor de 2 litros antes del proceso de filtración para realizar los análisis de (DQO), conductividad, pH, DBO5 realizado en el laboratorio de aguas de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede campos elíseos, Los Patios. Como se puede evidenciar en la foto (ver figura 18).



Figura 18. Foto de muestras de agua recolectadas

4.3.2 Montaje de los filtros. Para iniciar el proceso de filtración se preparó un montaje sencillo donde se introdujo la membrana en un embudo buchner, y se recubrió en los bordes con cinta teflón de manera que el agua quedara contenida sobre el filtro y solo pasara a través de las porosidades de las membranas (ver figura 19).



Figura 19. Membrana cerámica dentro del embudo buchner

Después el embudo buchner es puesto sobre un Erlenmeyer con un tubo de desprendimiento por medio de un corcho, el cual también es forrado con cinta teflón, la bomba de vacío es

conectada por medio de una manguera al tubo de desprendimiento del Erlenmeyer con un tubo de desprendimiento quedando así el montaje final para el proceso de filtración (ver figura 20).



Figura 20. Montaje para filtración completo

4.3.3 Proceso de filtrado. Se vierte el agua residual minera en el embudo buchner y se acciona la bomba de vacío haciendo que el líquido pase por la membrana; el proceso de filtración es lento debido al tamaño de los poros. Se filtraron aproximadamente 10 litros de agua, 700 mililitros para cada membrana con 3 repeticiones por cada tipo de membrana (ver figura 21).



Figura 21. Proceso de filtración

Después de filtrada el agua se guardó en recipientes de vidrio, se rotularon y se conservaron en cavas de icopor con hielo para realizar la caracterización por DQO, DBO5, pH, turbidez, conductividad, TDS y resistividad.

4.3.4 Proceso de filtración con papel de filtro. Para tener un punto de referencia del proceso de filtración se realizó un proceso de filtración con solo papel de filtro el cual se cortó en forma circular y se introdujo en un embudo; después se le adicionó el agua residual minera y se realizó el proceso de filtración. De igual manera el agua filtrada se caracterizó por DQO, DBO5, pH, turbidez, conductividad, TDS y resistividad.

4.3.5 Caracterización de propiedades físicas y químicas. Al agua residual minera se le realizaron los mismos análisis antes y después de pasar por el proceso de filtración, así como también al agua filtrada con el papel de filtro. Esto con el fin de determinar cambios en sus propiedades físicas y químicas después de la filtración.

Análisis de pH. La determinación del pH se realizó mediante el uso del pH METRO YIERYI (Modelo: TPH01121), se midió 3 veces el pH de cada muestra (ver figura 22).



Figura 22. Análisis de pH

Análisis de conductividad. Sólidos totales suspendidos (TDS), conductividad eléctrica y salinidad. Se empleó un multiparámetro SI Analytics HandyLab 680 (ver figura 23), el cual cuenta con un sensor que se introdujo a las muestras de agua, para cada parámetro se realizaron 3 repeticiones por muestra.



Figura 23. Multiparámetro SI Analytics HandyLab 680

Análisis de turbidez, DQO y DBO5. Estos análisis se realizaron en el laboratorio de aguas de la Universidad Francisco de Paula Santander Campos elíseos, Los Patios. Las muestras se almacenaron en recipientes de vidrio y se conservó la temperatura en cavas de icopor con hielo.

5. Discusión de Resultados

5.1 Fase 1: Caracterización de la Materia Prima

Estas muestras se caracterizaron previamente en trabajos realizados por el PhD Gabriel Peña y los resultados se muestran a continuación:

5.1.1 Cenizas volantes. De acuerdo a las microfotografías tomadas a las muestras de cenizas volantes, recolectadas de la central térmica, “Termotasajero”, se puede detallar la morfología superficial de dicha muestra, se evidencia que la muestra está conformada por partículas esféricas que suponen son cenizas y algunas partículas de forma no definida, supondrían que son inquemados del carbón.

Las cenizas volantes de “Termotasajero” muestran una morfología compuesta por partículas suaves al tacto, de un color gris y de forma esférica, las cuales pueden llegar a ser vítreas, huecas, sólidas, lisas o esponjosas, por otra parte, la permeabilidad de la muestra me indica que las partículas son hidrofílicas. Estas cenizas volantes son las más importantes en cuanto cantidades producidas y aprovechamiento

También se puede observar partículas con superficies irregulares, que se encuentran adheridas a la ceniza volante, estas partículas son los inquemados.

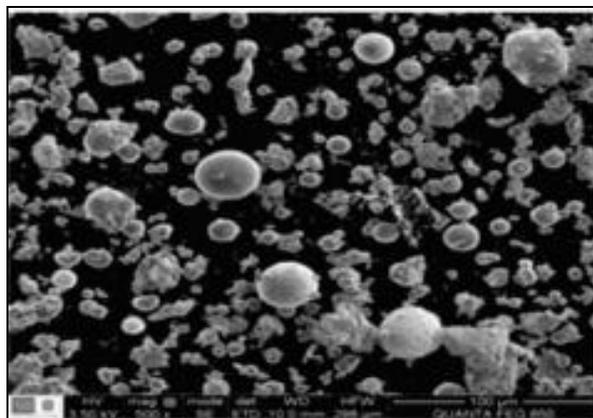


Figura 24. Microfotografía usando MEB a 500X de polvos de ceniza

Fuente: Peña & Ortega, 2014.

En la figura anterior se puede observar que el tamaño promedio de las partículas es de $41\mu\text{m}$ con desviación estándar de $\pm 0,54\mu\text{m}$. Este tamaño de partícula muestra una distribución granulométrica heterogénea que se consideró propicia para el desarrollo del proyecto puesto que una distribución más uniforme implicaría porosidades mucho menores que afectarían el proceso de filtrado.

La muestra de cenizas volantes se consiguió de la planta eléctrica de Termotasajero, municipio de San Cayetano, por lo que la granulometría y el grado de pulverización de dicha muestra es producto del proceso térmico al carbón.

De acuerdo a la figura 25 se puede evidenciar que el elemento químico que se encuentra en mayor proporción es el hierro (Fe), el silicio (Si) y el aluminio (Al) y en una menor concentración; titanio (Ti), calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) y sodio (Na). Estos elementos al combinarse con el oxígeno forman diversos óxidos presentes en dicha muestra (Peña & Ortega, 2014).

Del análisis cuantitativo por elemento químico realizado usando espectroscopia de dispersión de energías de rayos X (EDS), se observa que las cenizas de Termotasajero son silicoaluminosas con propiedades puzolánicas clase F (norma ASTM C618), por tener una concentración de Si, Al y Fe mayor al 65 % y de Ca menor al 10 % (Peña Rodríguez & Ortega Triana, 2014). El contenido de calcio es importante para saber si la membraba una vez compactadas, sin aditivos, experimentan o no endurecimiento con el tiempo (Sollutia, 2011).

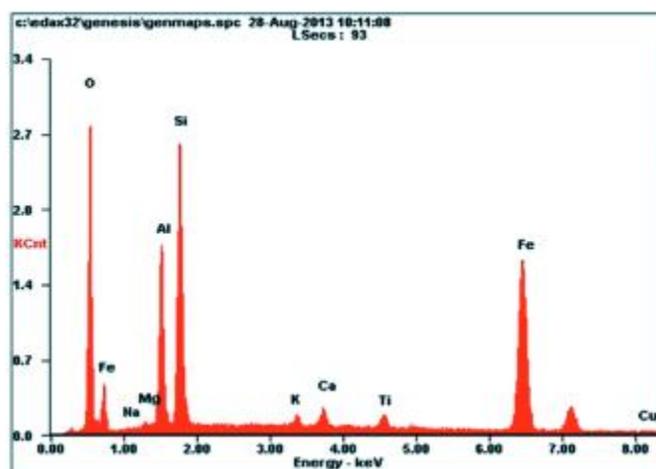


Figura 25. Espectro de dispersión de energía de rayos X

Fuente: Peña & Ortega, 2014.

En la (tabla 11), se pueden observar las principales propiedades físicas de las cenizas volantes, se puede evidenciar que el pH de estas cenizas posiblemente sea superior a 10 por lo que se considera básico.

Tabla 11. Propiedades Físicas De Las Cenizas Volantes

Propiedades físicas de las cenizas volantes	
Densidad	0,89 g/cm ³
Peso específico oscilando	2,0 y 2,9 g/cm ³
Permeabilidad	2x10 a 3x10 m/s
pH	10
Granulometría	41 µm

5.1.2 Diatomitas. Las diatomitas recolectadas, contienen un porcentaje de humedad aproximado del 46%, un porcentaje de materia orgánica de 2,88% y un pH ácido, el cual es producto de los altos contenidos de etanol y de la fermentación de levaduras y maltas en el proceso de elaboración de la cerveza.

De acuerdo a la tabla 12, la muestra de diatomita presentó una porosidad del 63,5%; al compararla con la diatomita comercial de “Diatomita Celite®” se observa que la muestra recolectada tiene menor porosidad por lo que no es reutilizada en la empresa cerveza debido a los contenidos de material orgánico, levadura y demás materiales del proceso de filtrado (Peña et al., 2019).

Tabla 12. Características de las diatomitas

Características de las diatomitas	
Característica	Resultado
Densidad aparente	0,32-0,64 g/cm ³
pH	5,2
Materia Orgánica	2,88%
Arena	26,8%
Limo	53,2%
Arcilla	20%
Porosidad	63,5%

5.1.3 Caolín. Proviene del aluminosilicato hidratado, que tiene su origen en la descomposición de rocas feldespáticas, cuyo componente principal es la caolinita, “es una arcilla muy versátil” utilizada en la elaboración cerámicas, papel, pinturas, farmacéuticos, cosméticos, dentro los más destacados (Leal, 2018).

Entre las propiedades más importantes son su blancura, su inercia ante agentes químicos, es inodoro, aislante eléctrico, moldeable y de fácil extrusión, resiste altas temperaturas, no es tóxico ni abrasivo y tiene elevada refractariedad y facilidad de dispersión. Además, tiene gran poder cubriente, baja viscosidad en altos porcentajes de sólidos y absorbente, ya que los caolines permiten la fijación por adsorción de sustancias como lecitina, quinolina, proteínas, bacterias y virus (Leal, 2018).

Tabla 13. Propiedades físicas del caolín

Propiedades físicas del Caolin	
Densidad	2,6 g/cm ³
PH	2-4
Promedio tamaño de partículas	0,8 – 1,4 μm

El caolín que se obtuvo, posee una densidad aproximadamente de 2,6 g/cm³, y también posee un pH, en el rango de 2-4 lo que se afirma su pH ácido, se puede evidenciar, de acuerdo a la tabla 13. Este material posee un promedio de tamaño de partículas que oscila entre 0,8 y 1,4 μm. Se dice que el caolín posee una granulometría baja.

Al comparar las densidades de las materias primas para la elaboración de la barbotina se puede deducir que el caolín otorgó mayor densidad en la elaboración de la barbotina puesto que su densidad promedio (2.64 g/cm³) es mucho mayor en comparación a las cenizas volantes (0,84 g/cm³) y a la diatomita (0,64 g/cm³).

Por lo que al realizar las mezclas para la elaboración de la barbotina se hizo de manera proporcional, para obtener una densidad por encima de la densidad del agua la cual es de 0.998 g/cm³

El pH de cada una de las muestras influye directamente en el proceso de elaboración de las membranas puesto que las muestras de arcilla (caolín) y diatomita evidenciaron acidez, lo que contrasta con el pH encontrado en las cenizas volantes. De acuerdo a la proporción de cada muestra en la elaboración de la barbotina, el sistema propicia un rango de pH entre 5 y 7, lo que sería beneficioso para el proceso de filtrado puesto que no altera el pH del agua residual minera.

Las propiedades más importantes que imparten el caolín a los cerámicos es la plasticidad, resistencia en verde, resistencia en seco, resistencia a la cocción, color, refractariedad, fácil vaciado o colada en los sanitarios, baja o cero absorciones de agua y control en el encogimiento o contracción (Murray, 2007)

5.2 Fase 2: Elaboración de las Membranas Cerámicas

5.2.1 Barbotina. Los resultados obtenidos en la etapa de elaboración para cada tipo de barbotina (Tipo A, B y C), descritos en la tabla 4, se muestran a continuación:

5.2.1.1 Densidad. Como se observa en el Anexo 1. se calculó la densidad en base a la proporción porcentual de las materias primas y a la cantidad de defloculante agregado a cada barbotina, se obtuvieron las siguientes densidades promedio (ver tabla 14):

Tabla 14. Densidad promedio de cada barbotina

	% de Caolín	% de Diatomitas	% de Cenizas volantes	Densidad promedio(g/cm ³)
BARBOTINA TIPO A	60	20	20	1.39
BARBOTINA TIPO B	50	20	30	1.40
BARBOTINA TIPO C	40	30	20	1.38

No existen diferencias estadísticamente significativas entre las densidades promedio de cada tipo de barbotina, esto ocurre porque las proporciones de las materias primas utilizadas se distribuyeron de manera que todas las mezclas obtuvieran la viscosidad requerida, por tanto, aunque la proporción utilizada de caolín es mayor (si se compara la mezcla tipo C con la mezcla tipo A) y su densidad no es significativa, el uso del silicato de sodio como defloculante, adicionó la textura requerida para su moldeo lo que influyó directamente en la densidad de las mezclas y ayudó a distribuir uniformemente las partículas en la barbotina.

5.2.1.2 Viscosidad. Los valores de tiempo tomados para 74 ml de cada barbotina, fueron promediados correspondiente la caída y al volumen para 5 observaciones, estos resultados se muestran en las tablas 15, 16 y 17:

Tabla 15. Relación entre volumen y tiempo de caída para barbotina tipo A

Barbotina tipo A	
Volumen (ml)	Tiempo (s)
30	5.41
50	6.89
70	8.27
100	10.75
120	18.2
74	11.74
	Ponderado

Tabla 16. Relación entre volumen y tiempo de caída para barbotina tipo B

Barbotina tipo B		
Volumen (ml)	Tiempo (s)	
30	6.08	
50	8.1	
70	10.05	
100	12.83	
120	20.45	
74	13.59	Ponderado

Tabla 17. Relación entre volumen y tiempo de caída para barbotina tipo C

Barbotina tipo C		
Volumen (ml)	Tiempo (s)	
30	6.1	
50	7.54	
70	9.33	
100	11.21	
120	20.12	
74	12.83	Ponderado

Como se observa en el anexo 2. La viscosidad fue calculada reemplazando los datos de las tablas 15,16 y17 en las fórmulas ya establecidas, los resultados obtenidos se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 18. Viscosidad de las membranas filtrantes

	% Caolín	% Diatomitas	% Cenizas volantes	Número de gotas de defloculante	tiempo de caída de 74ml	viscosidad (cp)
Barbotina tipo A	60	20	20	7	11,74	506
Barbotina tipo B	50	20	30	6	13,59	585
Barbotina tipo C	40	30	20	5	12,83	553

Como se puede evidenciar en la tabla 18, la barbotina que presentó menos viscosidad es la tipo A, esta viscosidad es producto de la adicción del defloculante, es decir, la viscosidad es inversamente proporcional a la cantidad de defloculante que se adicione. El uso de esta cantidad de defloculante se debe a que el sistema de elaboración de las membranas no se realizaba por colado si no por inmersión, es decir que se utilizó una espuma de poliuretano para sinterizar estas membranas, por tanto en el estudio de determinación de conductividad térmica efectiva en cerámicas porosas con caolines y diatomeas de Boyacá, se necesitó una viscosidad menor, lo que contrasta con este proyecto, pues era necesario una mayor viscosidad que evidenciara una consistencia más densa que permitiera una buena consistencia antes de la solidificación.

5.2.2 Membrana. Las membranas previamente cocidas se caracterizaron y se obtuvo información relevante sobre las características que presentan este material compuesto. A continuación, se muestran los resultados de los análisis realizados a cada tipo de membrana.

5.2.2.1 Densidad y volumen. Como se evidencia en los anexos 3, 4 y 5 se determinó para realizar el cálculo del volumen y la densidad de cada tipo de membrana, el diámetro y el espesor promedio. En la tabla 19 se puede evidenciar los valores obtenidos de densidad de cada tipo de membrana.

Tabla 19. Valores de densidad y volumen de las membranas

	Diámetro promedio (mm)	Espesor promedio (mm)	Masa (g)	Desviación estándar	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
Membrana tipo A	40,83	5,81	7,93	0,08	7,61	1,04
Membrana tipo B	40,89	5,89	7,69	0,08	7,74	0,99
Membrana tipo C	40,62	5,96	7,51	0,06	7,70	0,97

El tipo de elaboración de las membranas cerámicas interviene tanto en la densidad como en el tamaño del poro, ya que al utilizar el método de inmersión se genera un tamaño de poro más grande mientras que por el método de colado ocurre lo contrario, se obtiene un tamaño de poro más pequeño. Las probetas no mostraron diferencias estadísticamente significativas pues como se explicó anteriormente, se buscó que la barbotina utilizada fuera homogénea tanto para su colado como para que el tamaño de los poros generara una velocidad de filtración regular.

5.2.2.2 Contracción, diámetro membrana seca y diámetro membrana cocida. En los anexos 6, 7 y 8 se puede observar la medición del diámetro promedio de las membranas secas a temperatura ambiente y después de pasar por el proceso de cocción, los valores del % de contracción para cada tipo de membrana se pueden observar en la tabla 20.

Tabla 20. Porcentaje de contracción de las membranas filtrantes

	Promedio diámetro membrana seca (mm)	Promedio diámetro membrana cocida (mm)	% de contracción
Membrana tipo A	47,58	47,00	1,21
Membrana tipo B	49,3	48,34	1,94
Membrana tipo C	49,96	48,76	2,40

La membrana tipo A presentó el menor porcentaje de contracción (1,21%), la membrana tipo C evidenció el mayor porcentaje de contracción y la membrana tipo B presentó un comportamiento promedio entre la membrana tipo A y C. En base a lo anterior, se puede deducir que la concentración de caolín es un factor determinante para determinar el porcentaje de contracción puesto que, si la proporción de caolín es mayor en la barbotina, se propicia un menor porcentaje y en el caso contrario, al ser menor la proporción de caolín en la barbotina, el porcentaje será mayor. Estos valores son de gran importancia al escalar este proyecto a nivel

industrial pues la producción de membranas filtrantes deberá tener unas características y dimensiones exactas para los sistemas que se tengan establecidos.

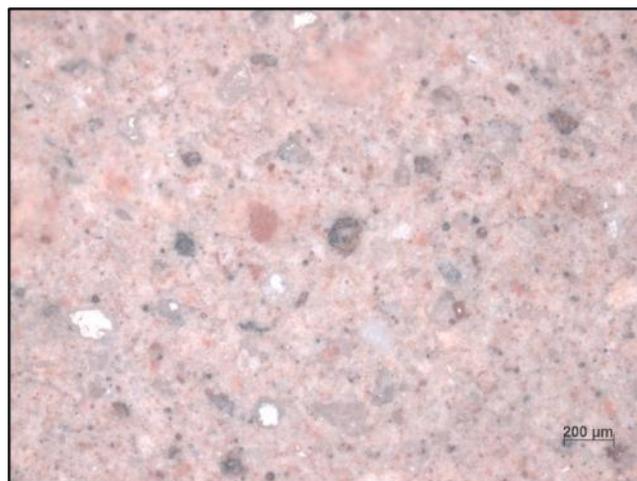
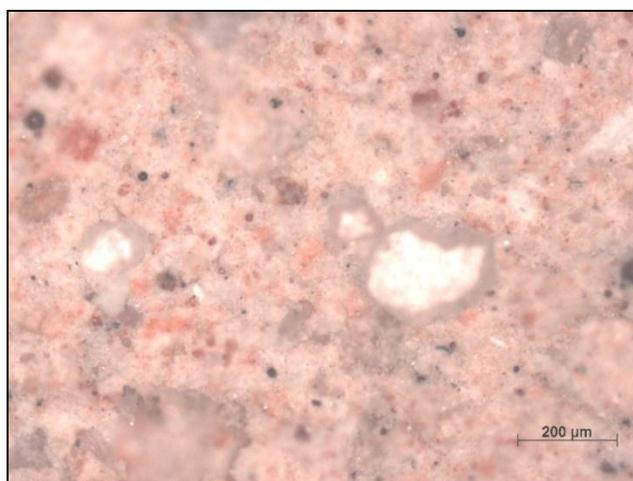
5.2.2.3 Porcentaje de absorción. Para calcular el porcentaje de absorción, se tomaron dos membranas sinterizadas de cada tipo de barbotina, los resultados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Porcentaje adsorción de agua en las membranas

Muestra	Masa seca	Desviación estándar	Masa húmeda	Desviación estandar	% de adsorción de agua	Promedio
Tipo A	9,06	0,09	12,83	0,13	29,38%	30,27%
Tipo A	8,04	0,08	11,68	0,12	31,16%	
Tipo B	9,22	0,09	13,47	0,13	31,55%	31,54%
Tipo B	10,25	0,10	14,97	0,15	31,53%	
Tipo C	7,65	0,08	13,11	0,13	41,65%	41,76%
Tipo C	7,91	0,08	13,61	0,14	41,88%	

Se puede observar que las membranas con composición de barbotina tipo C obtuvieron el mayor porcentaje de absorción de agua ($\%Aa=41,76\%$), en contraste, las membranas con composición de barbotina tipo A y B presentaron los menores valores de absorción de agua, $30,27\%$ y $31,54\%$ respectivamente. Este comportamiento se debe a que el uso de materias primas como la diatomea propicia la absorción de agua, como la barbotina tipo C tiene un porcentaje mayor de diatomeas este tipo de membrana facilita el proceso de filtrado sin que la estabilidad de la misma membrana se vea afectada.

5.2.2.4 Microscopia óptica. En las ilustraciones 26 a 31 se presenta la morfología superficial de las membranas a 5X y 10X, respectivamente, las cuales fueron tomadas por microscopia óptica, en estas se aprecian los tamaños de partículas de los diferentes minerales que conforman cada muestra.

Membrana tipo A a 5X:**Figura 26. Membrana tipo A a 5x****Figura 27. Membrana tipoA 10X**

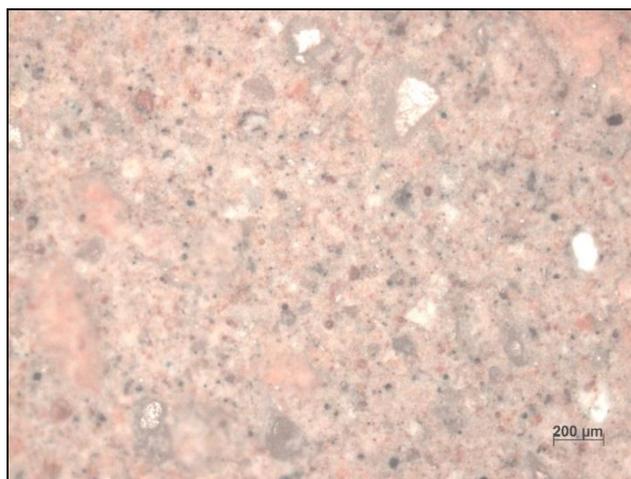
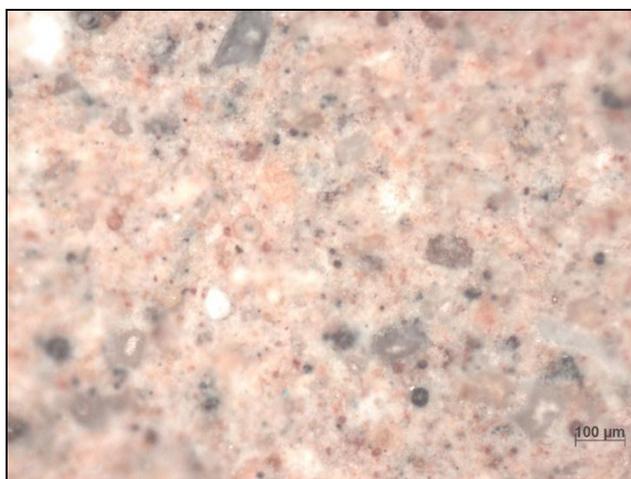
Membrana tipo B:**Figura 28. Membrana tipo B a 5x****Figura 29. Membrana tipo B a 10x**



Figura 30. Membrana tipo C a 5x

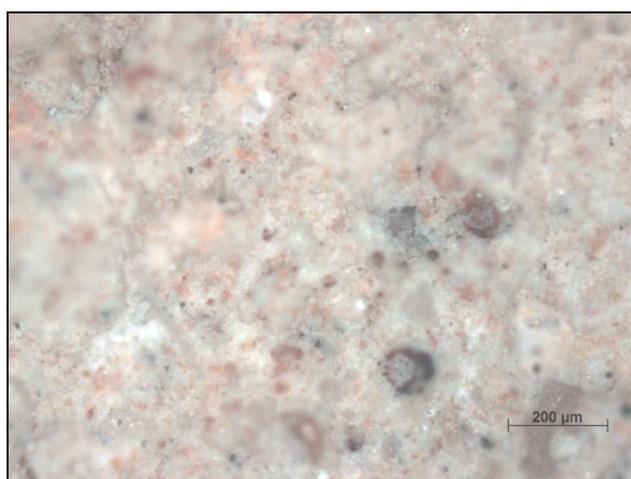


Figura 31. Membrana tipo C a 10x

En general se aprecia una morfología superficial de membranas bien sinterizadas, indicando que el proceso de cocción usado fue bueno, pues permitió la fusión de los minerales usados para cada mezcla, así mismo se observan partículas brillantes de cuarzos, así como partículas semicirculares de color oscuro que corresponden a las cenizas volantes, por otra parte no se aprecia la morfología de las diatomitas, pues las muestras fueron pulidas, y debido a su menor tamaño pueden observarse usando microscopia electrónica de barrido. Las porosidades de las muestras no se pueden observar en estas imágenes, por la razón mencionada anteriormente.

5.3 Fase 3. Evaluación del Filtrado con las Membranas

5.3.1 Agua residual de la mina coopselva 2. Al agua residual minera (ARM) se le realizaron análisis físicos y químicos los resultados se muestran a continuación:

Tabla 22. Muestra de agua sin filtrar

Parámetro	Unidades	Valor	Error
pH	NTU	7,98	0,11
TDS	Mg/L	1576,50	7,88
Sal		0,80	0,00
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	1580,50	7,90
Resistividad	mV	632,50	3,16
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	23,2	0,05
Turbidez	NTU	42,2	
DQO	Mg/L O ²	819	
DBO5	Mg/L O ²	515	

De la tabla 22 se puede observar que, aunque el parámetro de pH se encuentra en valores neutros, la cantidad de sólidos totales disueltos indica que es inaceptable para el consumo humano puesto que los valores se encuentran por encima de 1200 mg/l (OMS). De igual manera, el valor de conductividad es inaceptable ya que valores por encima de 1000 μS indican cambios en la cantidad de sólidos disueltos no aptos para el consumo humano.

5.3.2 Características de las membranas posfiltrado. A continuación, se muestran las membranas cerámicas y el agua antes y después del proceso de filtrado, se puede evidenciar el cambio de coloración que existe entre el agua sin filtrar y el agua filtrada, indicando que el proceso de filtrado funciona.

En las ilustraciones 32, 33 y 34 se puede observar el cambio de coloración de las membranas después del proceso de filtración, pues parte de los sólidos disueltos se establecen en la superficie

de las membranas, también se puede evidenciar el cambio de color del agua después de pasar por el proceso de filtración.

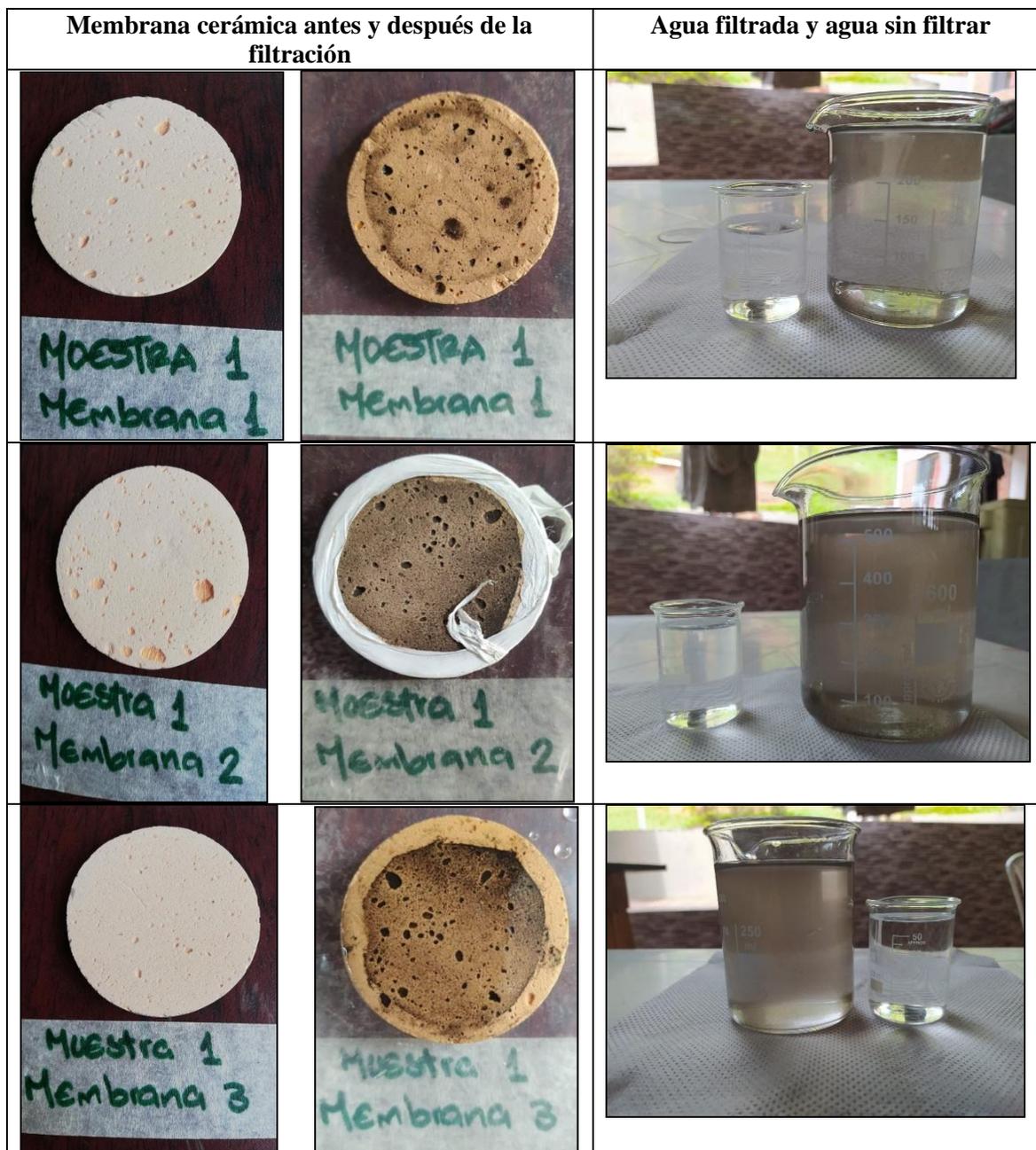


Figura 32. Fotos de filtración de agua residual membran tipo A

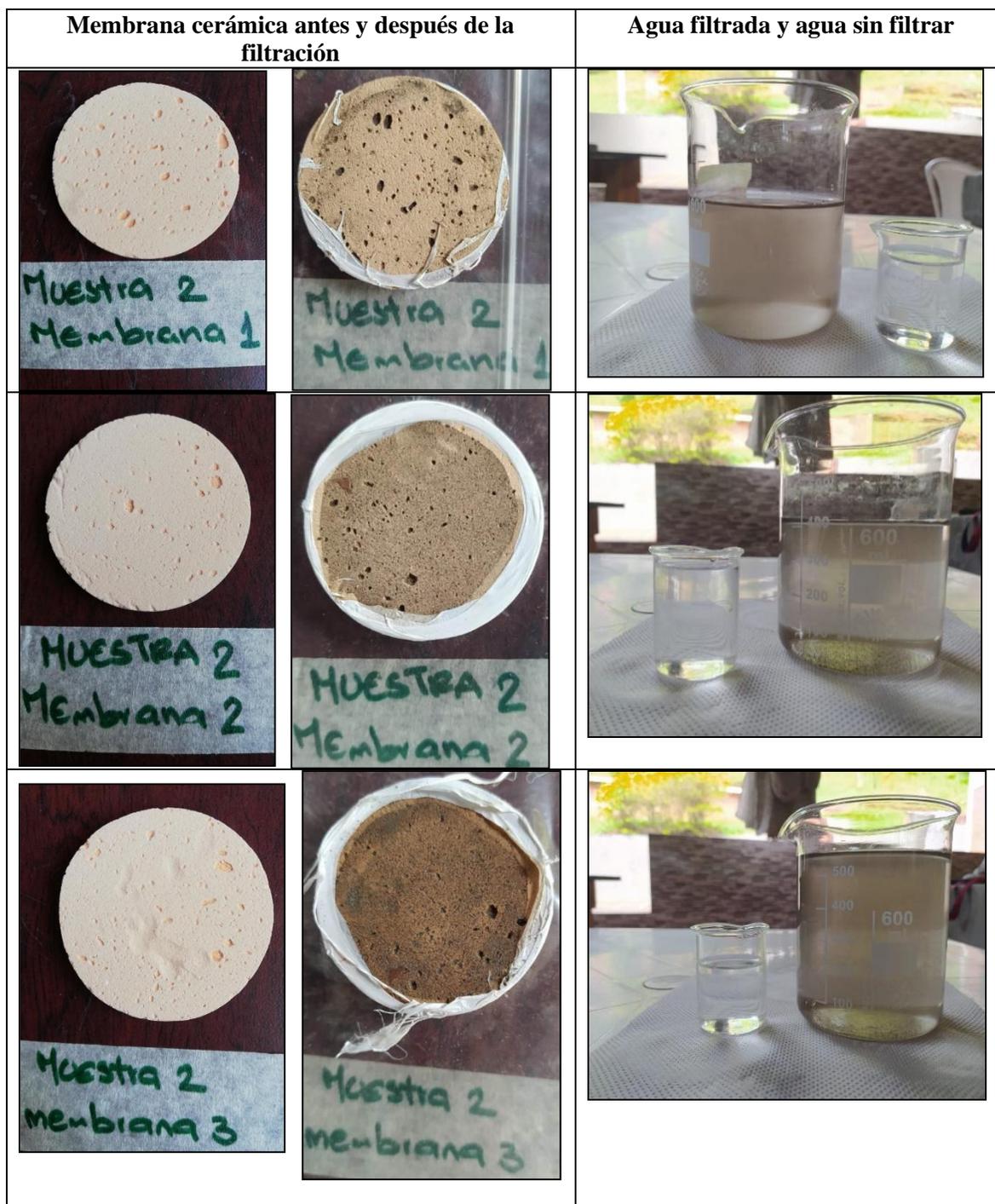


Figura 33. Fotos de filtración de agua residual membrana tipo B

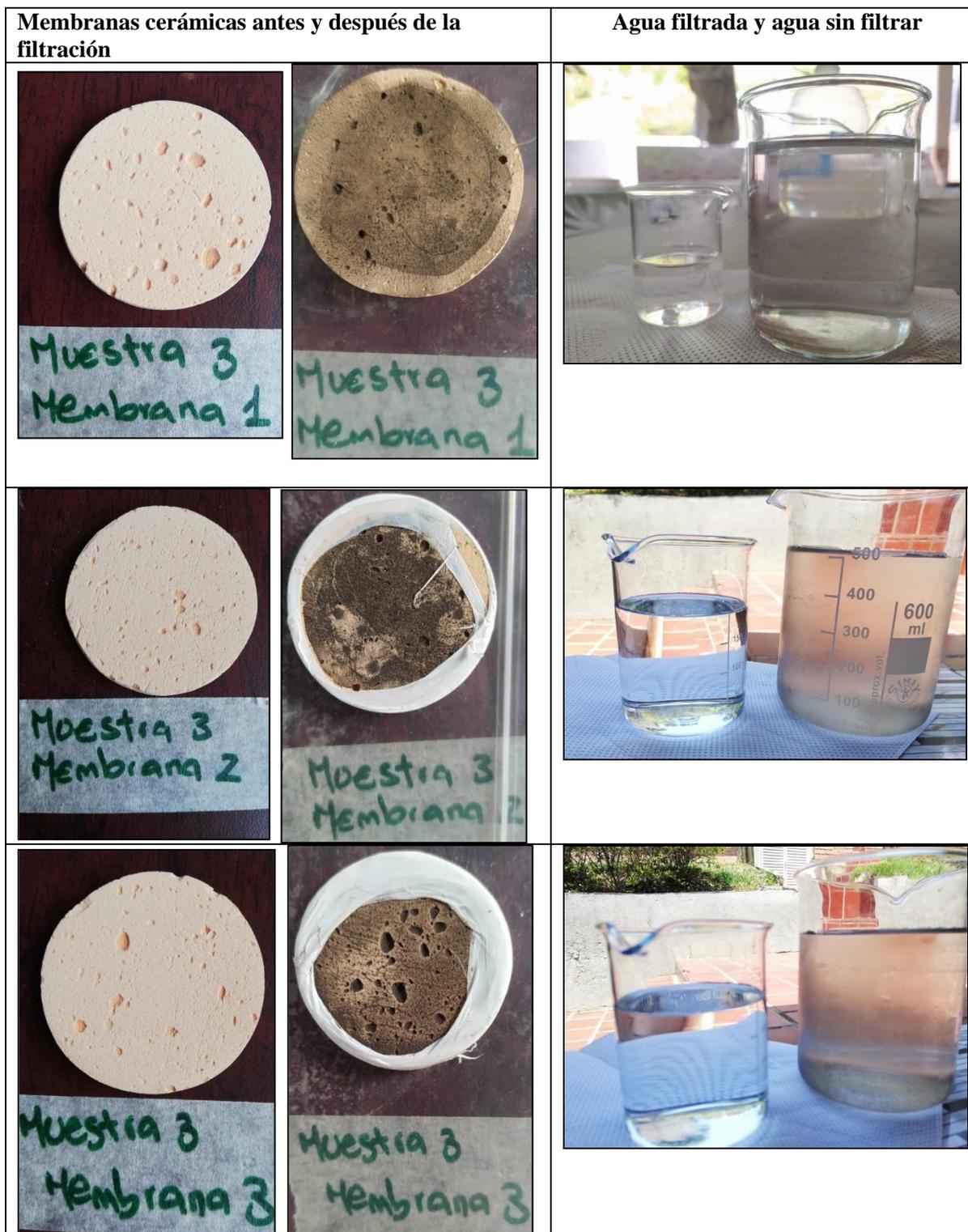


Figura 34. Fotos de filtración de agua residual membran tipo C

5.3.3 Evaluación del diseño experimental. Además del estudio de filtración del ARM con las membranas, se realizó un filtrado con un filtro papel y se midieron los parámetros del agua sin filtrar con el fin de comparar los resultados con los obtenidos por las membranas. Los resultados se compilan en las tablas 23 y 24:

Tabla 23. Reporte de análisis físicos

Muestra	PH	TDS mg/l	Sal	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Resistividad Ωm	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Agua sin filtrar	7,97	1576	0,8	1577	634	20,8
Filtro de papel	7,43	1580	0,8	1582	632	23,2
Tipo A Muestra 1	8,18	1591	0,8	1515	629	23,2
Tipo A Muestra 2	8,2	1590	0,8	1515	629	23,2
Tipo A Muestra 3	8,16	1591	0,8	1515	629	23,2
Tipo B Muestra 1	8,14	1557	0,7	1557	642	23,2
Tipo B Muestra 2	7,9	1556	0,7	1557	642	23,2
Tipo B Muestra 3	8,12	1556	0,7	1556	642	23,2
Tipo C Muestra 1	8	1591	0,8	1591	629	23,2
Tipo C Muestra 2	7,43	1590	0,8	1590	629	23,2
Tipo C Muestra 3	7,64	1591	0,8	1591	629	23,2

Tabla 24. Reporte de análisis químicos

Muestra	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L O^2)	DBO5 (mg/L O^2)
Agua sin filtrar	42,2	819	515
Filtro de papel	<1,5	76,8	50
Tipo A Muestra 1	1,5	102	66,5
Tipo A Muestra 2	1,7	38,4	25
Tipo A Muestra 3	<1,5	76,8	49
Tipo B Muestra 1	1,8	153	99,8
Tipo B Muestra 2	1,8	127	66,5
Tipo B Muestra 3	1,8	102	66,5
Tipo C Muestra 1	1,7	210	136
Tipo C Muestra 2	1,6	281	183
Tipo C Muestra 3	1,6	68	44,4

5.3.3.1 Análisis con respecto al pH. En la figura 35, se puede observar que con respecto a los controles negativo (agua sin filtrar) y positivo (filtro de papel) se puede deducir que: el filtrado con las membranas propicia cambios en los valores de pH que tenderán a ser mas básicos en comparación a los del proceso de filtrado con papel, pues se puede evidenciar que bajo el valor del pH y se encuentra en los valores de referencia establecidos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 del 2015. Es importante aclarar que la gran mayoría de los drenajes mineros son ácidos, por lo que este sistema de remediación favorece la producción de sistemas más básicos.

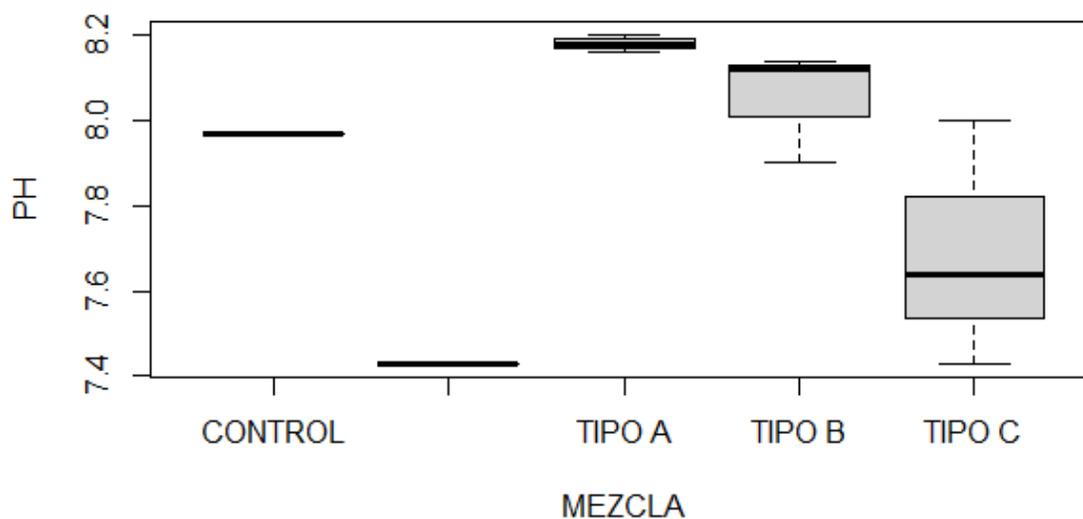


Figura 35. Medias de valores de pH de los tratamientos con respecto a los controles

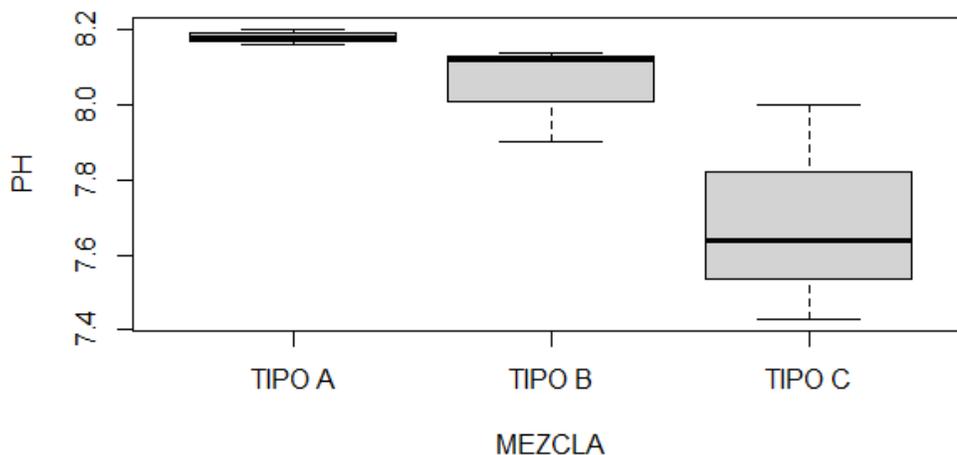


Figura 36. Medias de valores de pH de los tratamientos

Con respecto a la figura 36 se puede decir que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, pues como se evidencia en el anexo 10 mostró el comportamiento más básico el agua filtrada por las membranas tipo A, en segunda instancia las membranas tipo B y en tercera instancia se observa que las membranas tipo C no favorecen la estabilidad del pH del efluente, aunque sus valores se encuentren en el rango neutro. La prueba shapiro Wilk mostró que los residuales provienen de una población con distribución normal.

5.3.3.2 Análisis con respecto al resistividad. Se puede observar en la figura 37 que con respecto a los controles (agua sin filtrar y filtro de papel) se logra deducir que: el filtrado con las membranas tipo A y C propicia cambios en los valores de resistividad que tendieron a ser más bajos en comparación a los del proceso de filtrado con papel, caso contrario ocurre con la membrana tipo B pues se puede evidenciar un aumento en el valor de la resistividad. Lo anterior indica que el agua filtrada por la membrana tipo B propicia una menor conducción de corriente eléctrica con respecto al uso de las membranas tipo A y C.

Existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, pues como se muestra en el anexo 11 se evidenció disminución en la resistividad del agua filtrada por las membranas tipo A y tipo C y en segunda instancia se observa que el agua filtrada por el papel, no redujo ni disminuyó la resistividad y tiende a mantenerse como inicialmente se trajo la muestra del ARM. Por otra parte, las membranas tipo B no favorecen la conducción eléctrica por la reducción de iones en solución. La prueba shapiro Wilk mostró que los residuales provienen de una población con distribución anormal.

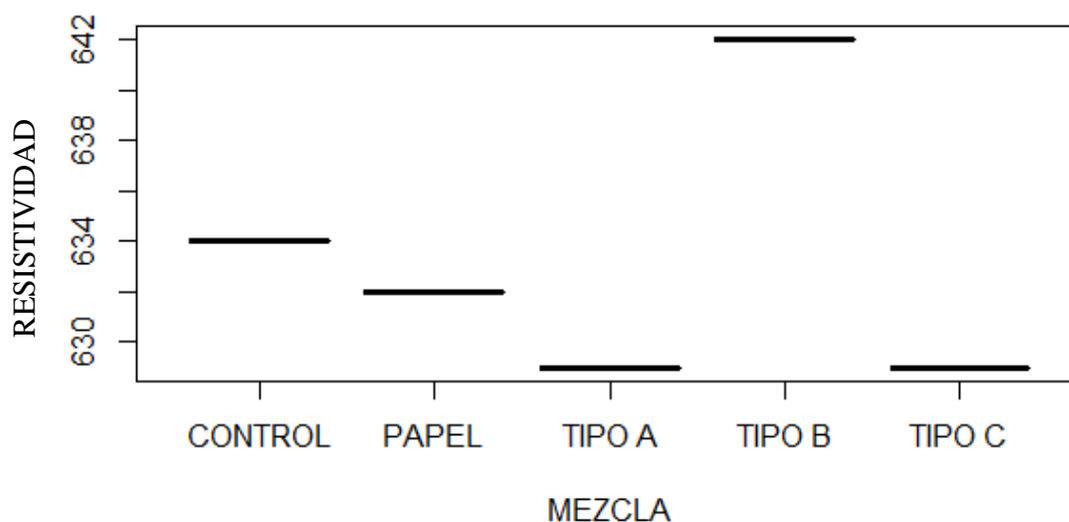


Figura 37. Medias de valores de resistividad de los tratamientos con respecto a los controles

5.3.3.3 Análisis con respecto al TDS. El Análisis con respecto al TDS se muestra a continuación:

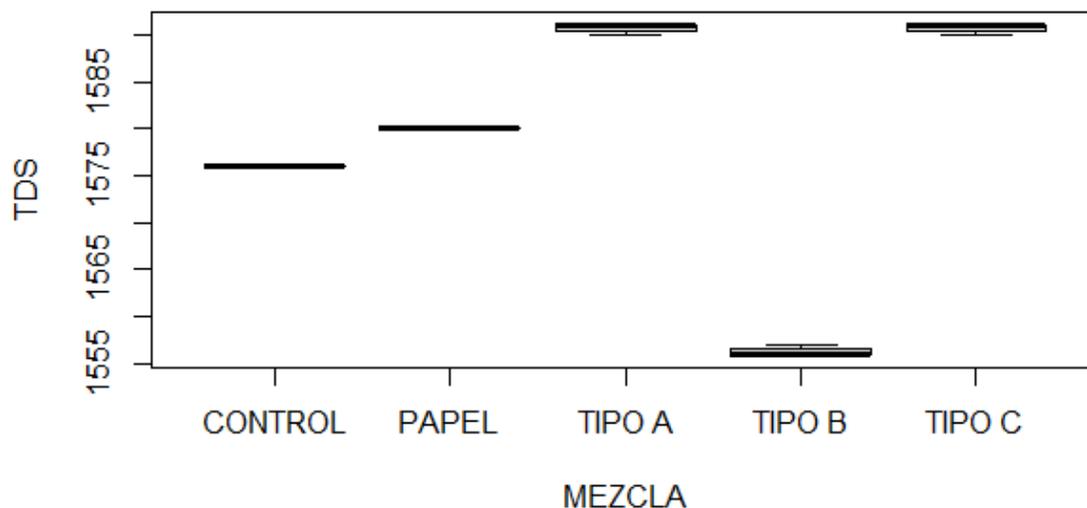


Figura 38. Medias de valores de TDS de los tratamientos con respecto a los controles

En la figura 38 se puede observar que el filtrado con las membranas propicia cambios negativos en los valores de TDS debido a que aumentan en comparación a los del proceso de filtrado con papel y el ARM, este comportamiento indica que existe concentración de los sólidos disueltos a causa de la materia prima de las membranas, pues se puede evidenciar que el único valor que disminuyó fue el obtenido por los procesos realizados con la membrana tipo B, aun así, ninguno de estos valores se encuentran en los rangos de referencia establecidos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 del 2015, siendo inaceptable para vertimientos en cuerpos de aguas superficiales y para el consumo humano.

Se puede decir, que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, pues como se evidencia en el anexo 12 se mostró el menor comportamiento en el agua filtrada por las membranas tipo B, se observa que las membranas tipo A, tipo C y el filtro de papel no favorecen la disminución de los TDS del efluente. La prueba shapiro Wilk mostró que los

residuales provienen de una población con distribución normal.

5.3.3.4 Análisis con respecto a la conductividad. En la figura 39 se puede observar que el filtrado con las membranas tipo A y B disminuyen los valores de conductividad en comparación a los del proceso de filtrado con papel y membrana tipo C, pues que en contraste aumentaron el valor de la conductividad. Pese a que el filtrado con las membranas tipo A y B disminuyó, estos valores no se encuentran en los rangos de referencia establecidos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 del 2015, indicando que el efluente no es apto para consumo humano.

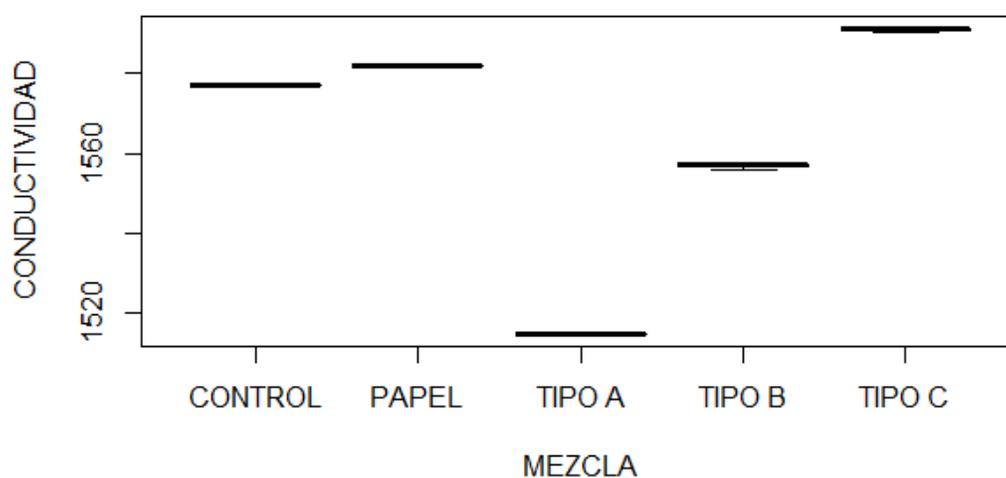


Figura 39. Medias de valores de conductividad de los tratamientos con respecto a los controles

Existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, pues como se evidencia en el anexo 13, el comportamiento más bajo se encontró en el agua filtrada por las membranas tipo A, en segunda instancia las membranas tipo B y en tercera instancia se observa que las membranas tipo C no favorecen la disminución de la conductividad, antes bien producen un mayor número de iones en solución. La prueba shapiro Wilk mostró que los residuales

proviene de una población con distribución anormal.

5.3.3.5 Análisis con respecto a la turbidez. En la figura 40 se observa que el filtrado con las membranas y el filtro de papel tienden a disminuir los valores de turbidez en comparación al agua sin filtrar, estos valores se encuentran en los rangos de referencia establecidos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 del 2015, siendo este valor adecuado tanto para vertimientos de aguas superficiales como para el consumo humano.

Con respecto a la figura 40 se puede decir que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, pues como se evidencia en el anexo 14 mostraron valores bajos de turbidez en el agua filtrada por las membranas tipo A, en segunda instancia las membranas tipo C y en tercera instancia las membranas tipo B; al analizar esta información estos valores se encuentran en el rango aceptable conforme al Decreto 1575 de 2007 y a la resolución 2115 del 2007. La prueba shapiro Wilk mostró que los residuales provienen de una población con distribución anormal.

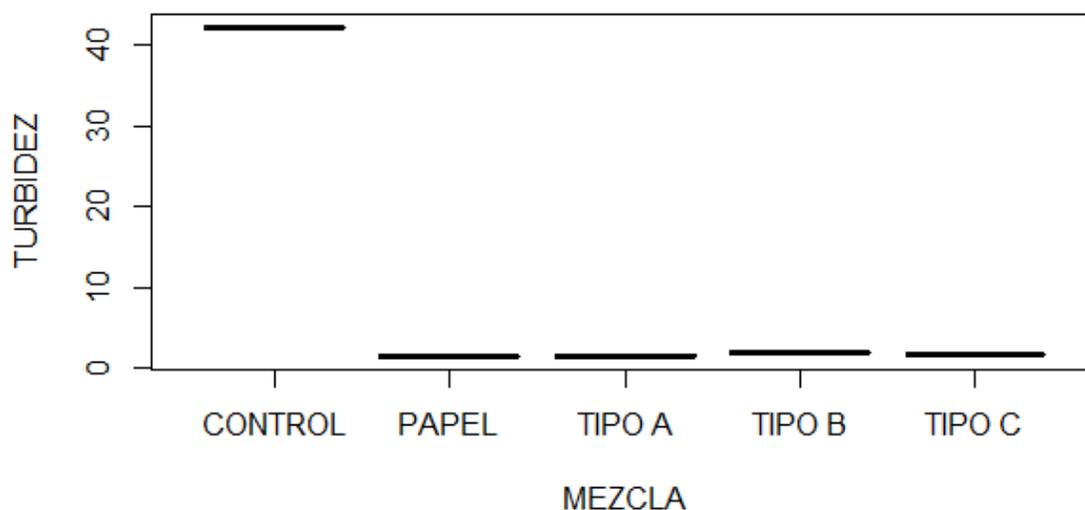


Figura 40. Medias de valores de turbidez de los tratamientos con respecto a los controles

5.3.3.6 Análisis con respecto a la DQO. En la figura 41. se puede observar que el filtrado con las membranas tipo A, B y el filtro de papel propician valores más bajos de DQO en comparación al agua sin filtrar, además se observa que se encuentran en los rangos de referencia establecidos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 del 2015, lo que indica que es apta para el consumo humano y /o vertimiento en cuerpos de agua superficiales de actividades mineras. Es importante aclarar que el filtrado con la membrana tipo C, aunque disminuyó el valor de DQO se encuentra por encima de los rangos establecidos.

Existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, pues como se evidencia en el anexo 15 se mostraron comportamientos similares en el agua filtrada por las membranas tipo A y tipo B; el uso de las membranas tipo C no favorece la disminución de la DQO del efluente, aunque sus valores se encuentran en rangos cercanos. La prueba shapiro Wilk mostró que los residuales provienen de una población con distribución normal.

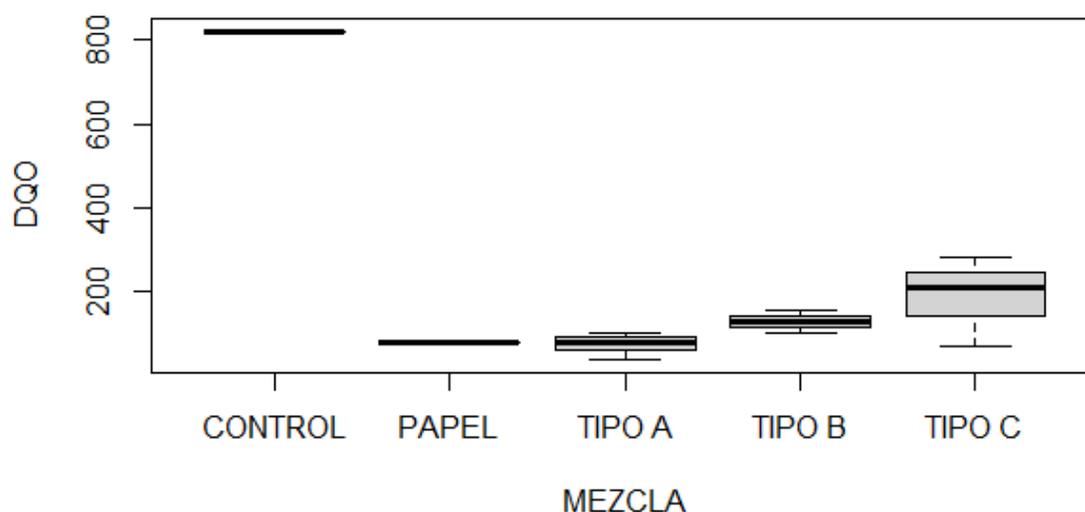


Figura 41. Medias de valores de DQO de los tratamientos con respecto a los controles

5.3.3.7 Análisis con respecto a la DBO5. En la figura 42. se puede evidencia que el filtrado con las membranas y el filtro de papel producen cambios en los valores en la DBO5 que tienden a ser más bajos al compararlos con los valores de DBO5 del agua sin filtrar. De igual manera se evidencia que la membrana tipo A presentó la mayor reducción y junto el agua filtrada con el papel; estos resultados se encuentran entre los valores de referencia establecidos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en la resolución 0631 del 2015, lo que indica que el agua es apta para el consumo humano.

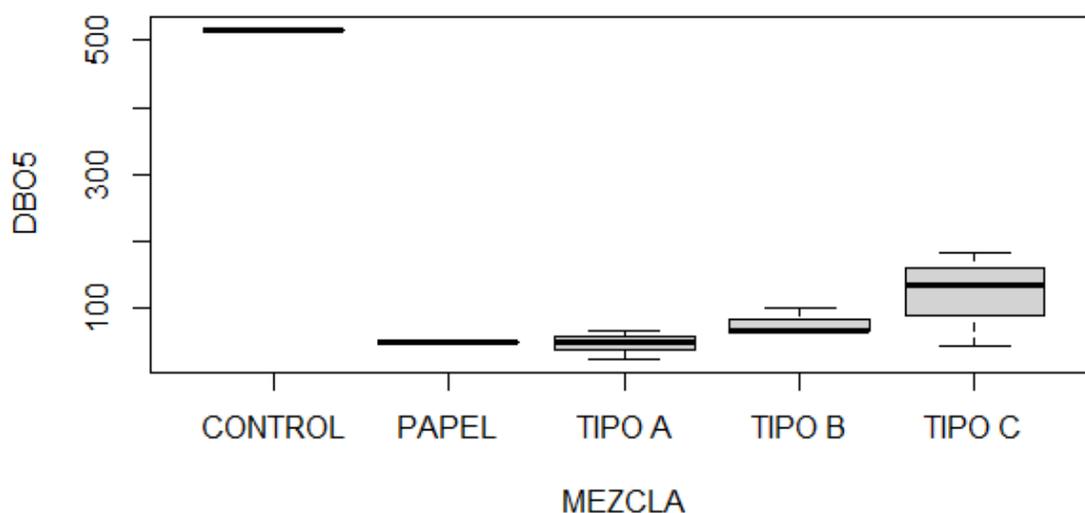


Figura 42. Medias de valores de DBO5 de los tratamientos con respecto a los controles

Existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, pues como se evidencia en el anexo 16 el agua filtrada mostró comportamientos similares al usarse las membranas tipo A, tipo B y tipo C. Aunque los valores de DBO5 del agua filtrada por la membrana tipo C y tipo B se encuentran en rangos cercanos a la norma, no alcanzan a cumplir el requerimiento que exige la resolución 0631 del 2015, caso contrario sucede con el agua filtrada por las membranas tipo A y el papel filtro pues conforme a la norma son aptas para el consumo humano y el vertimiento en cuerpos de aguas superficiales. La prueba shapiro Wilk mostró que

los residuales provienen de una población con distribución normal.

Tabla 25. Cuadro Resumen afectividad de las membranas

Variable	Mejor comportamiento	Valor del mejor comportamiento	Cumple o no cumple la norma
PH	Membrana tipo A	8,18	SI
RESISTIVIDAD	Membrana tipo B	642	N/A
TDS	Membrana tipo B	1556,33	NO
CONDUCTIVIDAD	Membrana tipo A	1515,00	NO
TURBIDEZ	Filtro de papel y membrana tipo A	1,56	SI
DQO	Membrana tipo A	72,4	SI
DBO5	Membrana tipo A	46,8	SI

En la tabla 25 se compilan los mejores comportamientos obtenidos en el diseño experimental con respecto a cada variable respuesta. Con respecto al pH se puede observar que la membrana tipo A presenta el mejor comportamiento, tendiendo a generar un ambiente más alcalino con respecto a las otras membranas. Por otra parte, la resistividad indica que la membrana tipo B es la que menos favorece la conducción eléctrica.

Aunque el parámetro de conductividad no llegó a los valores esperados, se destaca el comportamiento encontrado en la membrana tipo A por encima de la tipo B y tipo C, estos valores indican que existe un cambio sospechoso en la cantidad de sólidos disueltos en el ARM

Con respecto a la turbidez, la membrana tipo A presentó el menor grado de turbiedad, por lo tanto, el mejor comportamiento; este parámetro cumplió con los límites permisibles de la norma, que, aunque se nota cambio significativo con respecto a la muestra inicial, se esperaba un mayor grado de reducción de turbidez pues se asume que se encuentran en suspensión un menor número de sólidos totales

La demanda química de oxígeno, registrada en la muestra de agua, filtrada por la membrana tipo A obtuvo los valores más bajos, haciendo que esta cumpla con la normativa.

Las membranas tipo B y C, presentaron valores de DBO5, cercanos a la normativa descrita anteriormente, pero, sin embargo, no lo cumple, por lo que la membrana tipo A que obtuvo valores dentro del rango de la normativa, hacen que el agua residual pueda utilizarse en otros procesos, ya sea en vertimiento de superficies, riego, usos sanitarios o actividades generen un ahorro de este recurso natural no renovable. Al integrar todos resultados obtenidos en las variables respuesta, se opta por elegir como el mejor tratamiento el utilizado para filtrar el agua residual minera con la membrana tipo A, debido a que cumple con la mayoría de parámetros legales, obteniendo un proceso de filtrado eficiente.

6. Conclusiones

Se logró sinterizar cerámicas porosas a partir de residuos de diatomitas de la industria cervecera, cenizas volantes de la combustión del carbón y caolines para ser usados en procesos de tratamiento de aguas de la industria minera, lo anterior aporta significativamente a la economía circular, dando valor agregado a los residuos industriales.

La curva de cocción utilizada durante el proceso de sinterización de las membranas cerámicas fue eficiente, logrando dar buena resistencia mecánica a las muestras para ser usada en procesos de filtración de aguas en general, evidenciándose que a medida que se incrementa la concentración de diatomita en la muestra su densidad es menor, aportando mayor porcentaje de absorción de agua y por ende porosidad.

El proceso de filtración de las aguas de minería para la muestra objeto de estudio usando las membranas sinterizadas fue eficiente, permitiendo una disminución en los parámetros como lo son los sólidos totales suspendidos (TDS), la turbidez, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO 5), valores que inclusive son comparables con la resolución 0631 de 2015, la cual establece los valores máximos permisibles para vertimientos de agua.

En general se aprecia el cumplimiento de los objetivos propuestos en el anteproyecto.

7. Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda, la adaptación de las cerámicas porosas en reactores donde puedan ser dispuestas en serie, y así mejorar la eficiencia en el tratamiento de las aguas de minería, también sinterizar cerámicas tubulares que permitan un filtrado tangencial durante el tratamiento de las aguas.

Se recomienda realizar estudios donde se evalúe el cambio del ARM que presente sulfatos ferrosos o férricos en solución, y valores de pH por debajo de 4.

Se recomienda realizar estudios que evalúen la capacidad inhibitoria de microorganismos en el ARM.

Realizar estudios con membranas filtrantes a base de caolines, diatomitas, cenizas volantes y carbón activado para remediar efluentes mineros.

Referencias Bibliográficas

- Alfa Laval. (2021). *¿Qué es la filtración por membrana?*. Recuperado de:
<https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/separacion/membranas/que-es-filtracion-por-membrana/>
- Ayala, H., Cabrera, M., Cadena, A., Castaño, C., Contreras, S., Diaz, L., et al. (2019). *Sentencia T 445 de agosto de 2016. Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano*. Recuperado de:
<http://www.humboldt.org.co/images/documentos/2-diagnostico-actividad-minera-y-explotacion-ilicita-expertos.pdf>
- Benito, J., Conesa, A. & Rodríguez, M. (2004). Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 43(5), 829–842. <https://doi.org/10.3989/cyv.2004.v43.i5.410>
- Brown, J., Proum, S. & Sobsey, M. D. (2009). Sustained use of a household-scale water filtration device in rural Cambodia. *Journal of Water and Health*, 7(3), 404–412.
<https://doi.org/10.2166/wh.2009.085>
- Carreño, E., Ferrer, M. & Peña, G. (2019). Zeolitas Sódicas y Potásicas a partir de Cenizas Volantes Provenientes de la Combustión del Carbón de la Termoeléctrica Termotasajero S.A.S. *Revista Ciencia En Desarrollo*, 10(2), 1-15.
<https://doi.org/10.19053/01217488.v10.n2.2019.8035>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2021). *Las cenizas volantes*. Recuperado de: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre->

2011/valorizacion/propiedades-del-material-procesado-/27/las-cenizas-volantes-.html. (n.d.).

Centro Educativo Cristiano Jireth. (2010). *Departamento de Norte de Santander*. Recuperado de:

<https://www.webcolegios.com/file/3985a0.pdf>

Chávez, C. & Guerra, Y. (2015). *Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón de termotasajero*. Tesis de grado. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia.

Curo, N. & Rojas, R. (2017). *Obtención de hematita a partir de la precipitación selectiva de hierro presente en el drenaje ácido de mina para su aplicación como esmalte en cerámicas*. Tesis de grado. Universidad Nacional del Centro Del Perú. Lima, Perú.

Espinosa, A. (2019). *Guia ambiental minera SUB*. Recuperado de:

<https://www.superservicios.gov.co/sala-de-prensa/comunicados/nuestro-reto-es-mejorar-la-calidad-del-agua-que-consumen-los-colombianos>

Fillaudeau, L., Blanpain, P. & Daufin, G. (2006). Water, wastewater and waste management in brewing industries. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 463–471.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.01.002>

Fluence. (2018). *Uso del Agua en la Industria Minera*. Recuperado de:

<https://www.fluencecorp.com/es/uso-agua-en-industria-minera/>

Fondo Mundial para la Naturaleza. (2021). *Agua*. Recuperado de: <https://www.wwf.org.co/>

Gao, N., Li, J., Quan, C. & Tan, H. (2020). Product property and environmental risk assessment of heavy metals during pyrolysis of oily sludge with fly ash additive. *Fuel*, 266(1), 11-19.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117090>

Gómez, M., Danglot, C. & Vega, L. (2010). Disponibilidad de agua para la salud y la vida. Lo que todos debemos saber. *Revista mexicana de Pediatría*, 77(6), 1-15.

Güiza, L. (2011). Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia * Juridical Perspective of Environmental Impact on Water Resources Caused by Mining in Colombia. *Revista Opinión Jurídica- Universidad de Medellín*, 4(2), 123–140.

<https://biblioproxy.umanizales.edu.co:2169/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=b100844f-2415-4319-b4fc-a52377ac411f%40sessionmgr4008&vid=3&hid=4204>

Leal, J. (2018). *Determinación de conductividad térmica efectiva en cerámicas porosas con caolines y diatomeas de boyacá*. Tesis de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Bogotá, Colombia.

Llorente, M. (2017). Membranas cerámicas de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales. *Escola Superior de Tecnologia i Ciencies Experimentals*, 4(2), 3-10.

López, L. M., López, M. & Medina, G. (2017). La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. *Revista Entramado*, 13(1), 78–91. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>

Marsh, B., Day, R. & Bonner, D. (1985). Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 15(6), 1027–1038. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90094-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90094-8)

- Ministerio de Minas y Energía. & Universidad de Córdoba. (2015). *Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón*. 88. Recuperado de:
http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/Guia_orientacion_para_el_minero_correcto_manejo_vertimientos.pdf
- Moreno, A., Iles, A. & Rodríguez, J. (2009). Efecto de los tratamientos químicos y térmicos sobre la microestructura y composición química de la tierra diatomácea. *Revista Académica Colombiana Ciencia*, 33(127), 243-252.
- Murray, H. (2007). *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-sepiolite, and Common Clays*. Netherlands: Elsevier
- Padaki, M., Surya, R., Abdullah, M., Misdan, N., Moslehyani, A., Kassim, M., et al. (2015). Membrane technology enhancement in oil-water separation. A review. *Revista Desalination*, 4(357), 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.023>
- Peña, G. & Ortega, L. (2014). Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 14(2), 14.
<https://doi.org/10.19053/1900771x.3481>
- Peña, G., Rodríguez, M., Becerra, E. & Caballero, X. (2019). Utilización de tierras diatomáceas recicladas de la industria cervecera como medio de transporte de macronutrientes Use of recycled diatomaceous earth from breweries as a means of transporting of macronutrients. *Revista UIS Ingenierías*, 8(4), 139–145. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n4-2019013>

Pontificia Universidad Javeriana. (2021). *Portal para la divulgación de la microbiología*

Bioremediación: Los microorganismos ayudan a limpiar el agua y el medio ambiente.

Recuperado de: <http://www.javeriana.edu.co/divulgacionmicrobiologia/bioremediacion-los-microorganismos-ayudan-a-limpiar-el-agua-y-los-espacios>

Red de Desarrollo Sostenible. (2017). *5 Ríos De Colombia Gravemente Afectados Por La*

Minería. Recuperado de: <http://www.contagioradio.com/5-rios-colombia-gravemente-afectados-la-mineria-articulo-35378/>

Revilla, C. (2018). *Carlos revilla calcina 2018.* Recuperado de:

<https://www.iagua.es/blogs/carlos-revilla-calcina/preocupados>

Ruiz, M. (2016). *Caracterización de los procesos de eliminación de metales de aguas ácidas*

utilizando magnesia cáustica. Aplicación al tratamiento in situ. 1. Tesis de grado.

Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España.

Salas, M. (2020). Coeficientes físico químicos en el proceso de adsorción de metales pesados en aguas contaminadas por relaves mineros, utilizando membrana cerámica de arcilla roja”.

Human Relations, 3(1), 1–8. Recuperado de:

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,shib&db=bth&AN=92948285&site=eds->

[live&scope=site%0Ahttp://bimpactassessment.net/sites/all/themes/bcorp_impact/pdfs/em_stakeholder_engagement.pdf%0Ahttps://www.glo-bus.com/help/helpFiles/CDJ-Pa](http://bimpactassessment.net/sites/all/themes/bcorp_impact/pdfs/em_stakeholder_engagement.pdf)

Sigler, A. & Bauder, J. (2014). Alcalinidad , pH , y Sólidos Disueltos Totales. *Northern Plains &*

Mountains. Recuperado de:

http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS_2012-11-15-SP.pdf

Spena Group. (2021). *Sistemas y Soluciones para cada Tipo de Tratamiento de Aguas*

Residuales. Recuperado de: <https://spenagroup.com/tipos-tratamiento-agua-aguas-residuales/>

Taylor, P., Rieger, A., Steinberger, P., Pelz, W., Haseneder, R. & Härtel, G. (2013). Mine water treatment by membrane filtration processes - Experimental investigations on applicability.

Desalination and Water Treatment, 4(2), 54-60.

Terán, J. (2017). *Analítica de datos para el pronóstico de la demanda y su influencia en la mejora de la productividad de las ventas en formamos Acero S.A.C. lima 2020*. Tesis de grado. Universidad Privada del Norte. Lima, Perú.

Unidad de Planeación Minero-Energética. (1998). *Guia ambiental minera subterránea*.

Recuperado de:

http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/min_cab/contenid/analisis.htm

University of Michigan Library. (2009). *ERDA Energy Research Abstracts*. Recuperado de:

[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:GNSXqYjsHrIJ:https://www.amazon.com/research-abstracts-Research-Development-](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:GNSXqYjsHrIJ:https://www.amazon.com/research-abstracts-Research-Development-Administration/dp/B002Y26Z60+&cd=3&hl=es-419&ct=clnk&gl=co)

[Administration/dp/B002Y26Z60+&cd=3&hl=es-419&ct=clnk&gl=co](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:GNSXqYjsHrIJ:https://www.amazon.com/research-abstracts-Research-Development-Administration/dp/B002Y26Z60+&cd=3&hl=es-419&ct=clnk&gl=co)

Viades, J. (2013). Fenómenos de superficie: Adsorción y Absorción. *Fenómenos de Superficie*

Adsorción, 4(514), 1–17. Recuperado de:

http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenossuperficiales.Adsorcion_23226.pdf

Anexos

Anexo 1. Composición química por Absorción Atómica

<i>Composición de las diatomitas</i>	
Composición	Resultado
Fósforo	196ppm
Potasio	371,5 ppm
Calcio	394,9ppm
Magnesio	492,7ppm
Sodio	492,7ppm

Anexo 2. Calculo de densidad para cada tipo de barbotina

Como se puede observar en la tabla 4. las barbotinas tipo A, B y C tienen una composición porcentual de materias primas ya definidas y para el cálculo de la densidad se tomó el peso de las mismas por medio de un picnómetro.

$$\text{Peso picnómetro vacío} = 26.35 \text{ g}$$

$$\text{Peso picnómetro lleno Tipo A} = 95.8 \text{ g}$$

$$\text{Peso picnómetro lleno Tipo B} = 96.42 \text{ g}$$

$$\text{Peso picnómetro lleno Tipo C} = 95.68 \text{ g}$$

Dónde:

$$\text{Tipo A: } 95.8 \text{ g} - 26.35 \text{ g} = 69.45 \text{ g}$$

$$\text{Tipo B: } 96.42 \text{ g} - 26.35 \text{ g} = 70.07 \text{ g}$$

$$\text{Tipo C: } 95.68 \text{ g} - 26.35 \text{ g} = 69.33 \text{ g}$$

Utilizando la ecuación:

$$\text{Barbotina tipo A: } \rho = \frac{m}{v} = \frac{69.45 \text{ g}}{50 \text{ cm}^3} = 1.39 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Barbotina tipo B: } \rho = \frac{m}{v} = \frac{70.07 \text{ g}}{50 \text{ cm}^3} = 1.40 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Barbotina tipo C: } \rho = \frac{m}{v} = \frac{69.33 \text{ g}}{50 \text{ cm}^3} = 1.38 \text{ g/cm}^3$$

Anexo 3. Calculo de la viscosidad para cada tipo de barbotina

La viscosidad fue calculada por caída libre, los datos de tiempo de caída y volumen fueron tomados y establecidos en las tablas 15,16 y 17. Se reemplazaron los valores en la ecuación así:

Barbotina Tipo A:

$$n = (3.16 \times 10^{-5}) \left(1390 \frac{kg}{m^3} \right) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) (0.10m)(11,74 s)$$

$$n = 0.506 \frac{kg}{m * s}$$

$$n = 506 \text{ cp}$$

Barbotina Tipo B:

$$n = (3.16 \times 10^{-5}) \left(1390 \frac{kg}{m^3} \right) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) (0.10m)(13,59 s)$$

$$n = 0.585 \frac{kg}{m * s}$$

$$n = 585 \text{ cp}$$

Barbotina Tipo C:

$$n = (3.16 \times 10^{-5}) \left(1390 \frac{kg}{m^3} \right) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) (0.10m)(12,83 s)$$

$$n = 0.553 \frac{kg}{m * s}$$

$$n = 553 \text{ cp}$$

Anexo 4. Reporte densidad muestra tipo A

Fecha: 25 de mayo 2021		Muestra: Membrana tipo A				
Diametro	Espesor	Masa	Desviación estándar	Volumen	Densidad	Fuente
40,68	6,32	7,93	0,08	7,61	1,04	Realizado por Mayra Ferreira y Felipe Benítez
40,56	5,54					
40,53	5,74					
41,21	5,64					
39,96	6,01					
40,81	5,54					
41,03	5,98					
40,78	6,24					
41,45	5,46					
40,98	5,79					
41,12	5,89					
40,64	5,43					
40,85	5,95					
41,07	5,69					
	6,12					
	5,87					
	5,59					
40,83	5,81					

Anexo 5. Reporte densidad muestra tipo B

Fecha: 25 de mayo 2021		Muestra: Membrana tipo B				
Diametro	Espesor	Masa	Desviación estandar	Volumen	Densidad	Fuente
40,94	6,02	7,69	0,08	7,74	0,99	Realizado por mayra Ferreira y Felipe Benítez
39,95	5,9					
40,86	5,92					
41,21	5,64					
40,99	6					
40,91	5,94					
41,07	5,77					
40,88	6,03					
40,87	6,02					
41,13	5,81					
41,05	6					
40,78	5,8					
40,77	5,94					
41,03	5,58					
	6,02					
	6,08					
	5,69					
40,89	5,89					

Anexo 6. Reporte densidad muestra tipo C

Fecha: 25 de mayo 2021		Muestra: Membrana tipo C				
Diametro	Espesor	Masa	Desviación estandar	Volumen	Densidad	Fuente
40,68	5,61	7,51	0,06	7,70	0,97	Realizado por Mayra Ferreira y Felipe Benítez
40,43	5,96					
40,9	6,11					
40,73	6,42					
40,54	5,77					
40,65	6,17					
40,55	5,58					
40,46	6,33					
40,53	5,52					
40,28	5,83					
40,85	6,32					
40,76	5,66					
40,57	5,96					
40,84	5,98					
40,57	6,16					
40,54	5,98					
	5,92					
40,62	5,95					

Anexo 7. Reporte porcentaje de contracción muestra tipo A

Fecha: 25 de mayo 2021		Muestra: Membrana tipo A			
Diametro m. Seca	Promedio	diámetro m. Cocida	Promedio	% de contracción	Fuente
47,85	47,5815385	46,78	47,0048718	1,21%	Realizado por Mayra Ferreira y Felipe Benítez
47,64					
47,97					
47,89					
47,55					
47,21					
47,04					
47,63					
47,89					
48,03					
48,01					
47,48					
47,07					
47,06					
47,38					
47,06					
47,55					
48,11					
48,03					
47,92					
48,22					
48,19					
47,69					
47,25					
47,07					
46,95					
47,78					
47,98					
47,9					
47,92					
47,94					
46,6					
47,42					
47,24					
47,02					
47,75					
47,52					
47,46					

Anexo 8. Reporte porcentaje de contracción muestra tipo B

Fecha: 25 de mayo 2021		Muestra: Membrana tipo B			
diámetro m. Seca	Promedio	diámetro m. Cocida	Promedio	% de contracción	Fuente
49,31	49,3	48,62	48,34	1,94%	Realizado por Mayra Ferreira y Felipe Benítez
49,39		48,77			
49,33		48,23			
50,6		49,13			
50,06		49,03			
49,65		47,3			
47,66		46,87			
48,81		49,37			
48,1		49,02			
48,36		48,69			
47,82		47,52			
50,45		49,01			
48,85		49,09			
48,93		48,5			
50,02		47,55			
49,07		48,93			
49,85		48,68			
47,99		48,98			
50		48,45			
49,6		47,79			
48,72		48,42			
50,33		48,13			
49,78		49,1			
49,61		48,59			
49,54		48,69			
47,83		48,79			
49,85		49,59			
49,64		48,4			
47,86		49,28			
48,97		48,22			
49,79	49,42				
49,6	49,23				
50,54	49,41				
49,51	47,28				
48,97	47,8				
49,81	47,02				
48,15	48,07				
49,54	46,53				

Anexo 9. Reporte porcentaje de contracción muestra tipo C

Fecha: 25 de mayo 2021		Muestra: Membrana tipo C			
diámetro m. Seka	Promedio	diámetro m. cocida	Promedio	% de contracción	Fuente
49,52	49,96	47,81	48,76	2,40%	Realizado por Mayra Ferreira y Felipe Benítez
48,78		48,24			
48,88		48,54			
51,01		49,21			
50,73		49,37			
49,58		49,82			
50,26		49,66			
49,78		47,9			
50,14		48,25			
49,55		49,23			
50,5		49,54			
49,39		49,21			
50,02		48,49			
49,99		48,41			
49,88		48,43			
50,68		49,22			
48,86		49,46			
49,88		49,65			
50,59		49,28			
50,23		47,65			
50,4		48,12			
50,7		48,66			
50,13		49,18			
49,64		49,48			
49,69		49,53			
51,01		49,16			
49,54		48,18			
49,62		47,75			
49,7		47,81			
50,12		48,89			
49,76	48,41				
49,32	49,4				
49,89	49,45				
50,41	47,96				
50,37	48,24				
50,67	48,47				
49,6	49,48				
50,28	49,4				

Anexo 10. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto al pH

Análisis con los controles (papel y agua de la mina)

anova(m)

Analysis of Variance Table

Response: PH

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	4	0.65721	0.164302	4.869	0.04302 *
Residuals	6	0.20247	0.033744		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Study: m ~ "MEZCLA"

HSD Test for PH

Mean Square Error: 0.03374444

MEZCLA, means

	PH	std	r	Min	Max
CONTROL	7.970000	NA	1	7.97	7.97
CONTROL PAPEL	7.430000	NA	1	7.43	7.43
TIPO A	8.180000	0.0200000	3	8.16	8.20
TIPO B	8.053333	0.1331666	3	7.90	8.14
TIPO C	7.690000	0.2882707	3	7.43	8.00

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

Critical Value of Studentized Range: 5.304891

Groups according to probability of means differences and alpha level(0.05)

Treatments with the same letter are not significantly different.

	PH	groups
TIPO A	8.180000	a
TIPO B	8.053333	a
CONTROL	7.970000	a
TIPO C	7.690000	a
CONTROL PAPEL	7.430000	a

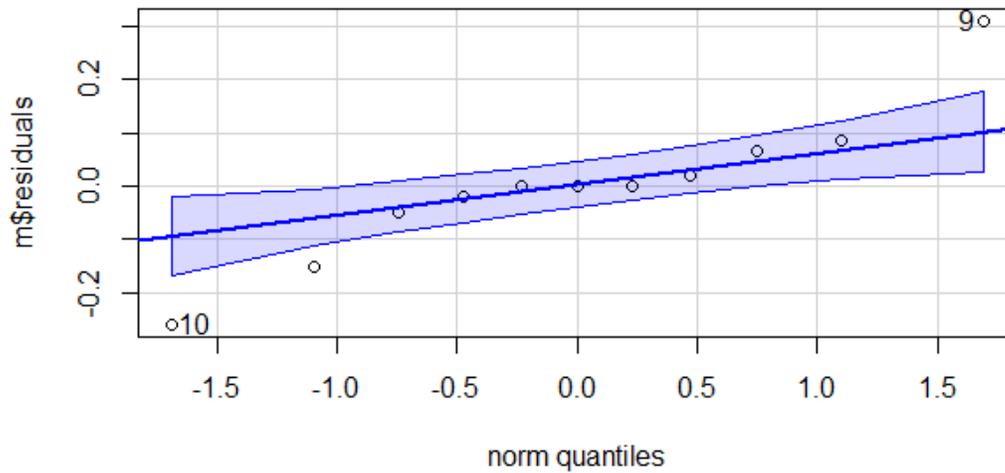
CONTROL DE RESIDUALES

shapiro.test(m\$residuals)

Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.91695, p-value = 0.2941

**EVALUACION DEL PH SOLO PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL****TABLA ANOVA**

Analysis of Variance Table

Response: PH

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	2	0.38816	0.194078	5.7514	0.04028 *
Residuals	6	0.20247	0.033744		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

PRUEBA TUKEY

HSD.test(m,"MEZCLA",console=T)

Study: m ~ "MEZCLA"

HSD Test for PH

Mean Square Error: 0.03374444

MEZCLA, means

	PH	std	r	Min	Max
TIPO A	8.180000	0.0200000	3	8.16	8.20
TIPO B	8.053333	0.1331666	3	7.90	8.14
TIPO C	7.690000	0.2882707	3	7.43	8.00

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

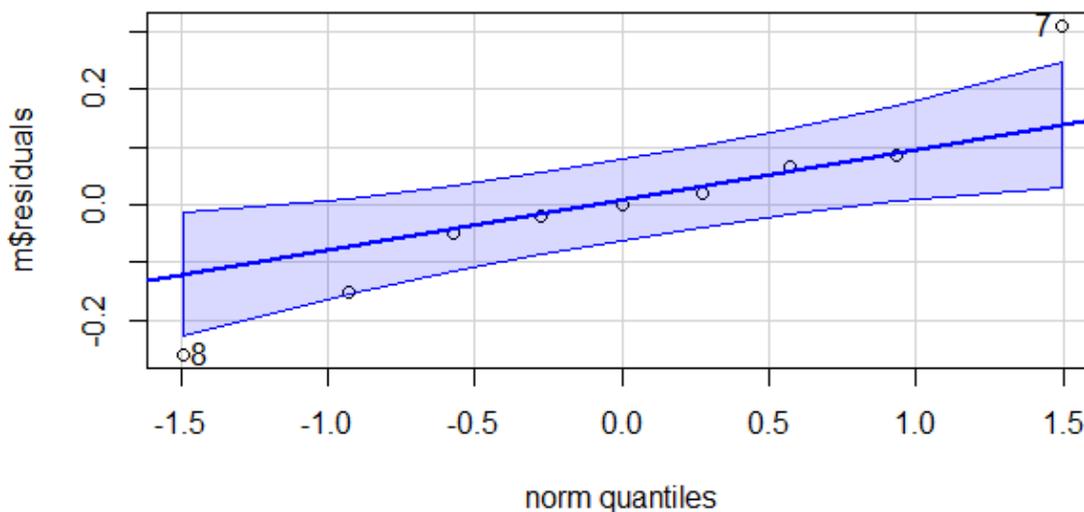
Critical Value of Studentized Range: 4.339195

Minimum Significant Difference: 0.4602033

Treatments with the same letter are not significantly different.

	PH	groups
TIPO A	8.180000	a
TIPO B	8.053333	ab
TIPO C	7.690000	b

Residuales:



```
shapiro.test(m$residuals)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.95747, p-value = 0.7715

Anexo 11. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto al resistividad

Analysis of Variance Table

Response: RESISTIVIDAD

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	4	340.18	85.045	6.8997e+32	< 2.2e-16 ***
Residuals	6	0.00	0.000		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

PRUEBA TUKEY

HSD.test(m,"MEZCLA",console=T)

Study: m ~ "MEZCLA"

HSD Test for resistividad

Mean Square Error: 1.232595e-31

MEZCLA, means

	Resistividad	std	r	Min	Max
CONTROL	634	NA	1	634	634
PAPEL	632	NA	1	632	632
TIPO A	629	0	3	629	629
TIPO B	642	0	3	642	642
TIPO C	629	0	3	629	629

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

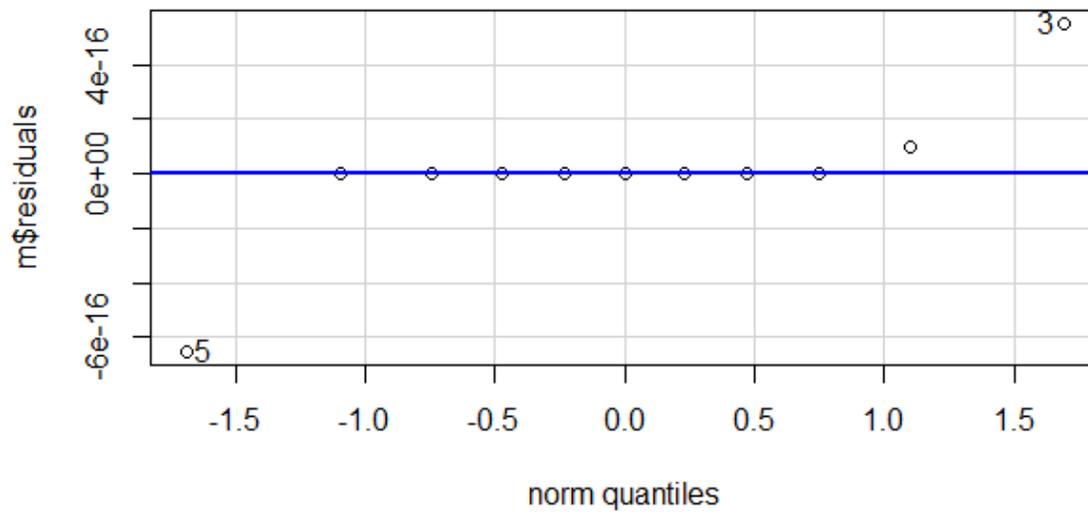
Critical Value of Studentized Range: 5.304891

Groups according to probability of means differences and alpha level(0.05)

Treatments with the same letter are not significantly different.

	Resistividad	groups
TIPO B	642	a
CONTROL	634	b
PAPEL	632	c
TIPO A	629	d
TIPO C	629	d

Residuales:



```
shapiro.test(m$residuals)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.6768, p-value = 0.000236

Anexo 12. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto al TDS

Analysis of Variance Table

Response: TDS

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	4	2368	592.00	1776	2.402e-09 ***
Residuals	6	2	0.33		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

PRUEBA TUKEY

Study: m ~ "MEZCLA"

HSD Test for TDS

Mean Square Error: 0.3333333

MEZCLA, means

	TDS	std	r	Min	Max
CONTROL	1576.000	NA	1	1576	1576
PAPEL	1580.000	NA	1	1580	1580
TIPO A	1590.667	0.5773503	3	1590	1591
TIPO B	1556.333	0.5773503	3	1556	1557
TIPO C	1590.667	0.5773503	3	1590	1591

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

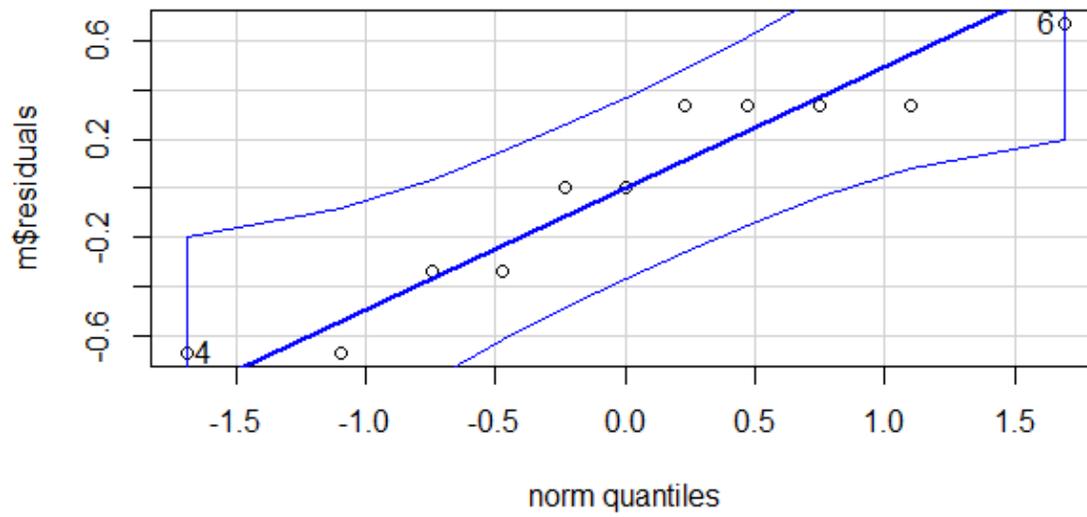
Critical Value of Studentized Range: 5.304891

Groups according to probability of means differences and alpha level(0.05)

Treatments with the same letter are not significantly different.

	TDS	groups
TIPO A	1590.667	a
TIPO C	1590.667	a
PAPEL	1580.000	b
CONTROL	1576.000	c
TIPO B	1556.333	d

Residuales:



Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.90809, p-value = 0.2315

Anexo 13. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la conductividad

Analys of Variance Table

Response: CONDUCTIVIDAD

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	4	9684.8	2421.21	10895	1.043e-11 ***
Residuals	6	1.3	0.22		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

PRUEBA TUKEY

m ~ "MEZCLA"

HSD Test for CONDUCTIVIDAD

Mean Square Error: 0.2222222

MEZCLA, means

	CONDUCTIVIDAD	std	r	Min	Max
CONTROL	1577.000	NA	1	1577	1577
PAPEL	1582.000	NA	1	1582	1582
TIPO A	1515.000	0.0000000	3	1515	1515
TIPO B	1556.667	0.5773503	3	1556	1557
TIPO C	1590.667	0.5773503	3	1590	1591

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

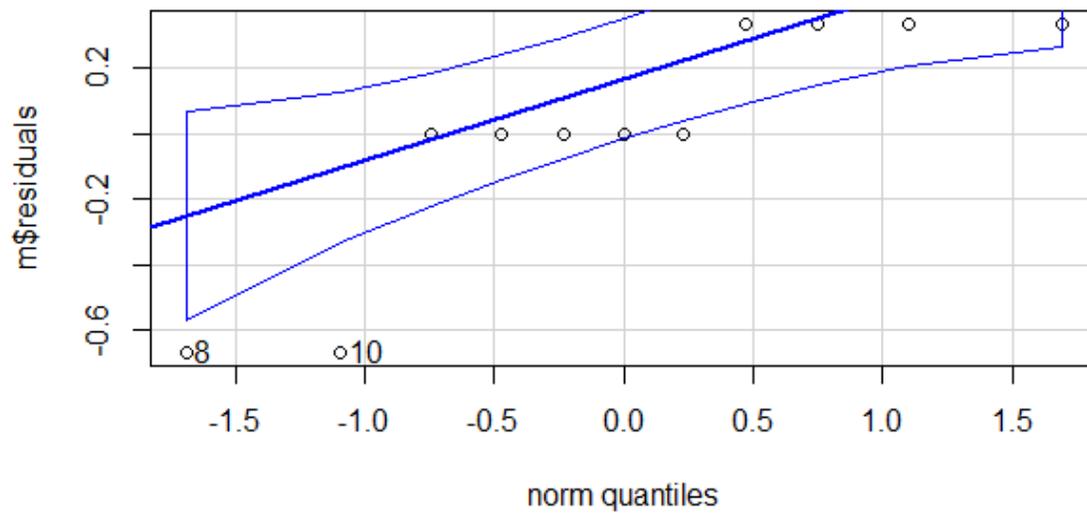
Critical Value of Studentized Range: 5.304891

Groups according to probability of means differences and alpha level(0.05)

Treatments with the same letter are not significantly different.

	CONDUCTIVIDAD	groups
TIPO C	1590.667	a
PAPEL	1582.000	b
CONTROL	1577.000	c
TIPO B	1556.667	d
TIPO A	1515.000	e

Residuales:



Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.7721, p-value = 0.00404

Anexo 14. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la turbidez

Analysis of Variance Table

Response: TURBIDEZ

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	4	1494.93	373.73	67272	4.434e-14 ***
Residuals	6	0.03	0.01		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

PRUEBA TUKEY

Study: m ~ "MEZCLA"

HSD Test for TURBIDEZ

Mean Square Error: 0.005555556

MEZCLA, means

	TURBIDEZ	std	r	Min	Max
CONTROL	42.200000	NA	1	42.2	42.2
PAPEL	1.500000	NA	1	1.5	1.5
TIPO A	1.566667	0.11547005	3	1.5	1.7
TIPO B	1.800000	0.00000000	3	1.8	1.8
TIPO C	1.633333	0.05773503	3	1.6	1.7

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

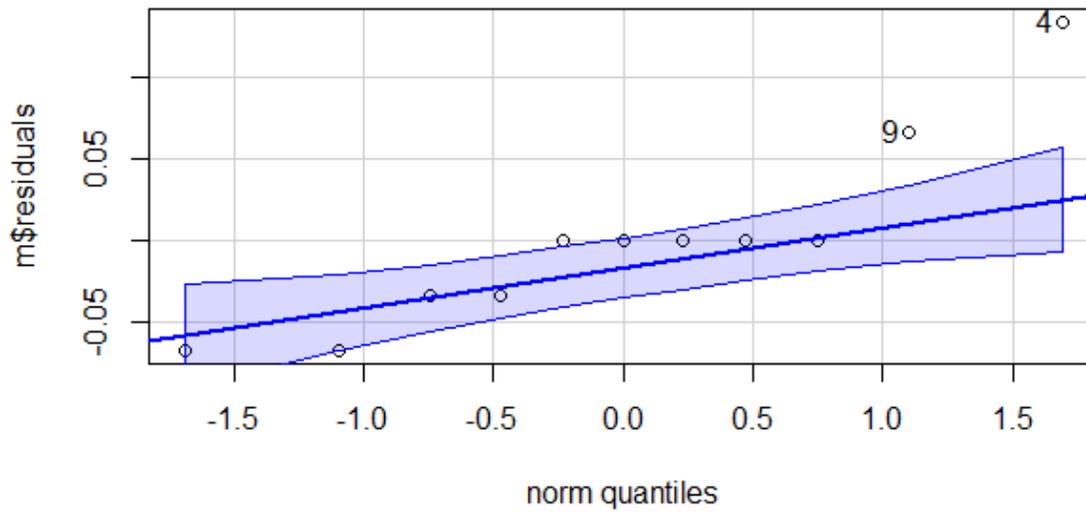
Critical Value of Studentized Range: 5.304891

Groups according to probability of means differences and alpha level(0.05)

Treatments with the same letter are not significantly different.

	TURBIDEZ	groups
CONTROL	42.200000	a
TIPO B	1.800000	b
TIPO C	1.633333	bc
TIPO A	1.566667	c
PAPEL	1.500000	c

Residuales:



Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.85192, p-value= 004521

Anexo 15. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la DQO

Analysis of Variance Table

Response: DQO

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	4	461648	115412	25.765	0.0006386 ***
Residuals	6	26877	4479		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TUKEY

Study: m ~ "MEZCLA"

HSD Test for DQO

Mean Square Error: 4479.476

MEZCLA, means

	DQO	std	r	Min	Max
CONTROL	819.0000	NA	1	819.0	819.0
PAPEL	76.8000	NA	1	76.8	76.8
TIPO A	72.4000	32.02749	3	38.4	102.0
TIPO B	127.3333	25.50163	3	102.0	153.0
TIPO C	186.3333	108.45429	3	68.0	281.0

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

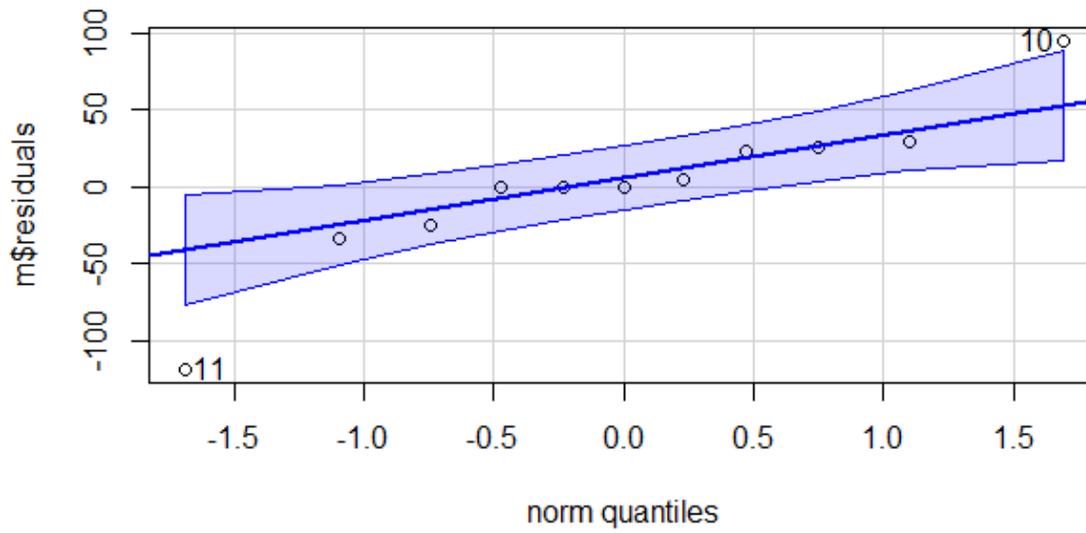
Critical Value of Studentized Range: 5.304891

Groups according to probability of means differences and alpha level(0.05)

Treatments with the same letter are not significantly different.

	DQO	groups
CONTROL	819.0000	a
TIPO C	186.3333	b
TIPO B	127.3333	b
PAPEL	76.8000	b
TIPO A	72.4000	b

Residuales:



Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.9013, p-value = 0.1917

Anexo 16. Resultados de análisis en programa Rstudio con respecto a la DBO5

Analysis of Variance Table

Response: DBO5

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MEZCLA	4	182352	45588	23.695	0.0008065 ***
Residuals	6	11544	1924		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

TUKEY

Study: m ~ "MEZCLA"

HSD Test for DBO5

Mean Square Error: 1923.989

MEZCLA, means

	DBO5	std	r	Min	Max
CONTROL	515.00000	NA	1	515.0	515.0
PAPEL	50.00000	NA	1	50.0	50.0
TIPO A	46.83333	20.83467	3	25.0	66.5
TIPO B	77.60000	19.22576	3	66.5	99.8
TIPO C	121.13333	70.48584	3	44.4	183.0

Alpha: 0.05 ; DF Error: 6

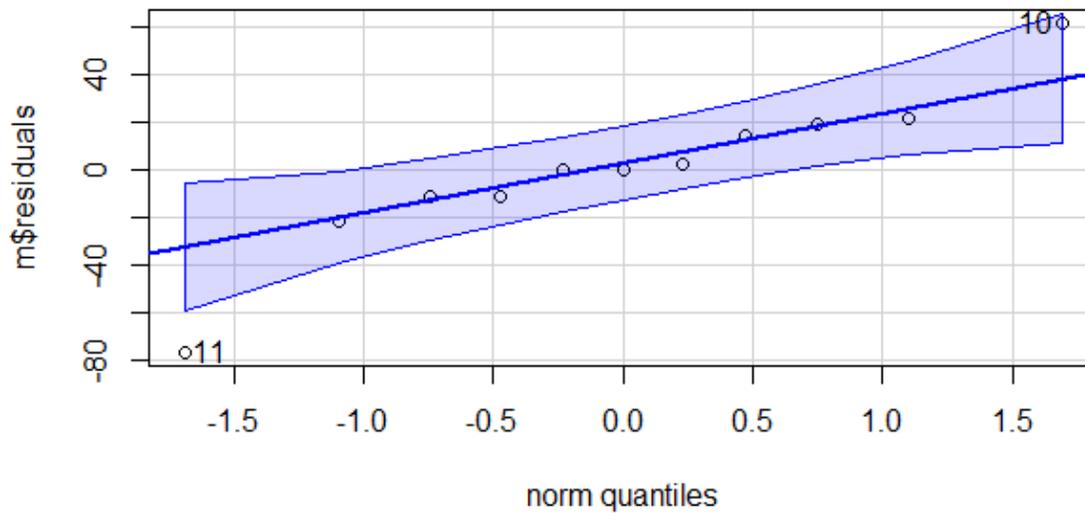
Critical Value of Studentized Range: 5.304891

Groups according to probability of means differences and alpha level(0.05)

Treatments with the same letter are not significantly different.

	DBO5	groups
CONTROL	515.00000	a
TIPO C	121.13333	b
TIPO B	77.60000	b
PAPEL	50.00000	b
TIPO A	46.83333	b

Residuales:



Shapiro-Wilk normality test

data: m\$residuals

W = 0.91976, p-value = 0.316