

PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DE LAS PISCINAS TERMALES DEL INSTITUTO
DE TURISMO DE PAIPA.

MARÍA ANGÉLICA CELY VARGAS
PAULA VALENTINA ACEVEDO BUITRAGO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020

PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DE LAS PISCINAS TERMALES DEL INSTITUTO
DE TURISMO DE PAIPA.

MARÍA ANGÉLICA CELY VARGAS
PAULA VALENTINA ACEVEDO BUITRAGO

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Juan Camilo Cely Garzón
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Bogotá D.C., agosto 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada-García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Iván Ramírez Marín

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Principalmente agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de vivir cada uno de los logros que estoy consiguiendo y darme salud para cumplir cada paso que doy en mi vida, igualmente agradezco a mis padres Jorge Orlando Cely Canaria y Rosalba Vargas Lara por su apoyo y amor incondicional en este proceso, ya que fueron mi motivación para seguir adelante en cada una de las metas que me propongo en la vida, gracias a cada una de sus enseñanzas brindadas me hacen ser la persona que soy ahora, este logro es principalmente para ellos. A mi hermano Juan Diego el cual con su personalidad única y alegría constante ha estado presente en esta etapa, le dedico este logro enseñándole día a día a seguir adelante a pesar de los obstáculos y jamás rendirse, A mi tía Olga por brindarme su apoyo y amor en todo este proceso ya que sin ella no hubiese sido posible este proyecto, junto con mis tías Ceci y Sandra que han sido de gran ayuda, apoyo y amor en todas mis etapas de vida , a mi tío Jaime por sus consejos y apoyo en el transcurso de esta carrera junto con cada uno de mis tíos y tías Vargas Lara y Cely Canaria gracias por su ayuda constante.

A mis personas favoritas, mi mamita Josefa, más que mi abuelita ha sido una madre para mí, gracias por todas las enseñanzas a lo largo de mi vida, por su amor y sus buenos deseos para cada uno de los logros cumplidos, con su protección constante cumplo un logro más en el cual está presente, junto los que seguiré cumpliendo, a Sebastián Granados por apoyarme en cada uno de los pasos que doy y estar a mi lado brindándome fuerza para nunca desfallecer, gracias por su amor y su buena energía en el transcurso de todos estos años siempre ha sido y será incondicional para mí, a mis tres abuelitos que a pesar de no estar presentes sé que desde el cielo me cuidan y me ayudan en cada uno de mis logros, los amo. Por último, a mi amiga Paula Valentina Acevedo por encaminarse a mi lado a cumplir uno de muchos sueños juntas, por su tolerancia y paciencia, gracias por esta linda amistad.

María Angelica Cely Vargas

Este logro va dedicado principalmente a Dios por darme la fortaleza y sabiduría a lo largo de mi carrera, a mis padres Víctor Julio Acevedo y Luz Clara Buitrago quienes con su amor infinito y apoyo incondicional me han enseñado a dar lo mejor de mí, a ellos les quiero demostrar con este logro los frutos de sus esfuerzos para emprender una nueva etapa. A mi hermana Ángela por alegrarme en los momentos que sentí desfallecer con su personalidad única que la caracteriza como una mujer fuerte y determinante, a mi sobrina Sara Luciana por ser tan alegre y hacerme reír cada momento con sus palabras y gestos; sé que para ella soy su ejemplo a seguir y quiero demostrarle que todo en la vida se puede cuando se persiste.

A mi hijo perruno Jacobo por ser mi compañía constante e incondicional también por brindarme su amor puro y real, así mismo ser mi mayor alegría al llegar a la casa. A David Rueda quien me ha apoyado a lo largo de la carrera y me ha ensaño a exigirme en cada momento gracias por brindarme esa voz de aliento para levantarme y seguir luchando cada día por mis sueños, finalmente a mi amiga María Angelica Cely por enseñarme a trabajar en equipo, por depositar su voto de confianza y construir una linda amistad, a su familia por brindarme las puertas de su casa y apoyarnos incondicionalmente en la elaboración de este proyecto.

Paula Valentina Acevedo Buitrago

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, agradecemos a la señora Olga Inés Vargas Lara por su ayuda y colaboración en la búsqueda del proyecto. Así mismo a la Gerente Martha Luz Suarez Salazar por la oportunidad y confianza que nos brindó para la elaboración del documento de grado.

Al Ingeniero Químico Juan Camilo Cely Garzón por su acompañamiento, recomendaciones y solución de inquietudes presentadas ante la dura situación acontecida. Al cuerpo de docentes de la Fundación Universidad de América por proporcionarnos los conocimientos y herramientas necesarios a lo largo de la carrera para el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	26
OBJETIVOS	28
1. MARCO TEÓRICO	29
1.1 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES	29
1.1.1 Pretratamientos y tratamientos primarios	29
1.1.2 Tratamiento secundario	31
1.1.3 Tratamientos terciarios	31
1.2 AGUAS TERMALES	31
1.2.1 Química de las aguas termales	32
1.3 INTERCAMBIO IÓNICO	32
1.3.1 Resinas de intercambio iónico	34
1.3.2 Clasificación de resinas para intercambio iónico	35
1.3.3 Estructura de las resinas	38
1.3.3.1 Matriz polimérica	38
1.3.3.2 Agente de entrecruzamiento	39
1.3.3.3 Grupo Funcional	39
1.3.4 Propiedades de las resinas.	40
1.3.4.1 Tamaño de partícula	41
1.3.4.2 Solubilidad	42
1.3.4.3 Forma	42
1.3.4.4 Densidad	42
1.3.4.5 Caída de presión	42
1.3.4.6 Resistencia a la fractura	43
1.3.4.7 Capacidad de la resina	44
1.3.5 Etapa de regeneración para la resina	44
1.4 OSMOSIS INVERSA	45
1.4.1 Transporte a través de las membranas de osmosis inversa	46

1.4.2 Clasificación de las membranas de osmosis inversa	47
1.4.2.1 Clasificación Según su estructura	47
1.4.2.2 Clasificación de acuerdo a su forma	48
1.4.2.3 Clasificación según la carga superficial de las membranas	49
1.4.2.4 Clasificación Según la naturaleza de la membrana	50
1.4.2.5 Clasificación de las membranas a partir de su composición química	51
1.4.2.6 Clasificación Según la presión de trabajo.	52
1.5 ELECTRODESIONIZACIÓN	52
1.5.1 Equipo de electrodesionización	53
1.5.2. Elementos de la celda de electrodiálisis.	54
1.6 MARCO NORMATIVO	55
2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL ITP, PAIPA-BOYACÁ	56
2.1 GENERALIDADES	56
2.2 GENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL INSTITUTO DE TURISMO DE PAIPA	58
2.3 FACTORES DE CALIDAD DEL AGUA	58
2.4 DIAGNÓSTICO DEL AGUA VERTIDA POR EL INSTITUTO DE TURISMO DE PAIPA	60
2.5 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL	60
2.5.1 Análisis de resultados frente al marco legal de vertimiento	61
3. DESCRIPCIÓN Y VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA LA DISMINUCIÓN DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS PROVENIENTES DEL ITP	63
3.1 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO A IMPLEMENTAR PARA AGUAS RESIDUALES	63
3.2 ESTUDIO DE LA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO COMO ALTERNATIVA	68
3.2.1. Referencias de resinas para su posible implementación	69
3.2.2 Pasos de selección de la resina de intercambio iónico	70
3.2.3 Matriz de selección de resinas de intercambio iónico	72

3.3 DESARROLLO A ESCALA LABORATORIO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.	76
3.3.1 Cálculos para realizar el dimensionamiento	76
3.3.2 Experimentación a escala piloto.	81
3.3.3 Resultado y análisis de la experimentación	88
4. DISEÑO Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO A ESCALA INDUSTRIAL	97
4.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE INTERCAMBIO IÓNICO	97
4.1.1 Área de la columna de intercambio iónico	99
4.1.2 Altura de la columna de intercambio iónico	100
4.1.3 Cálculos de la resina inactiva	101
4.2 ETAPAS DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IONICO EN LA COLUMNA	103
4.2.1 Velocidad del agua a tratar	103
4.2.2 Etapa de retro lavado	108
4.2.3 Sistema regenerante en contracorriente	109
4.2.3.1 Proporción de regenerante	110
4.2.3.2 Tiempo de Regeneración y Caudal	112
4.2.3.3 Etapa de enjuague	114
4.3 DESCRIPCION DEL PROCESO A ESCALA INDUSTRIAL	117
4.3.1 Especificaciones del proceso de intercambio iónico	118
4.4 MANTENIMIENTO DE EQUIPOS	123
5 EVALUACION DE COSTOS DE INVERSION Y OPERACIÓN	125
5.1 COSTOS DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	125
5.2 COSTOS DE INVERSION	125
5.3 COSTOS DE OPERACION	126
5.3.1 Costos de energía eléctrica	126
5.3.2 Costos de mantenimiento	127
5.3.3 Costo de agua tratada	127
6. CONCLUSIONES	128

7. RECOMENDACIONES	129
BIBLIOGRAFIA	130
ANEXOS	137

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Densidad húmeda de los cuatro tipos de resinas.	42
Tabla 2. Resultados fisicoquímicos del año 2019	61
Tabla 3. Volumen de cada piscina del ITP	62
Tabla 4. Matriz de Pugh	65
Tabla 5. Matriz ponderada de Pugh	66
Tabla 6. Tratamientos recomendados para aguas residuales	67
Tabla 7. Factores relevantes para la selección de la resina de intercambio iónico	72
Tabla 8. Continuación	72
Tabla 9. Convenciones para la matriz de selección	73
Tabla 10. Matriz Pugh de selección de las respectivas resinas con respecto a los criterios de importancia	74
Tabla 11. Matriz ponderada de selección de las respectivas resinas con respecto a los criterios de importancia	75
Tabla 12. Dimensiones de la columna de intercambio aniónico	80
Tabla 13. Mediciones de caudal con dos aperturas de válvula y con tiempos promedio	87
Tabla 14. Resultados de las muestras del Pozo azul	88
Tabla 15. Resultados de las muestras del agua sin tratar proveniente de la piscina olímpica	88
Tabla 16. Resultados de las muestras del agua tratada proveniente de la piscina olímpica con T de 25°C	88
Tabla 17. Datos tomados la experimentación realizada en el ITP junto con los datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.	89
Tabla 18. Resultados de la experimentación realizada en el ITP junto con los datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.	91
Tabla 19. Datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.	92
Tabla 20. Resultados de la experimentación realizada en el ITP junto con los datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.	93
Tabla 21. Dimensionamiento CII	103
Tabla 22. Dimensiones en la etapa de carga.	108
Tabla 23. Proporción de Regenerante.	114
Tabla 24. Proporción de la etapa de enjuague	116
Tabla 25. Costos de inversión.	125
Tabla 26. Costos de materia prima.	126
Tabla 27. Costos de energía.	126
Tabla 28. Costos de mantenimiento de las bombas centrifugas.	127
Tabla 29. Costo m ³ para el agua termo mineral a tratar.	127

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación de las resinas de intercambio iónico.	36
Cuadro 2. Activación de los tipos de resina.	40
Cuadro 3. Clasificación según su estructura.	47
Cuadro 4. Clasificación de las membranas según su configuración geométrica.	48
Cuadro 5. Características de las configuraciones de la membrana.	49
Cuadro 6. Descripción de las diferentes clasificaciones según la carga superficial de las membranas	49
Cuadro 7. Clasificación según la carga superficial	50
Cuadro 8. Clasificación de la composición química en cada grupo de los tipos de membrana.	52
Cuadro 9. Empresas con resinas disponibles	70
Cuadro 10. Principales materias prima en la utilización de carbón activado con sus propiedades	95

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Intercambio iónico dentro de la CII.	33
Ilustración 2. Molécula de la resina aniónica y catiónica.	34
Ilustración 3. Columna y resina de intercambio iónico.	35
Ilustración 4. Resina catiónica fuertemente ácida.	36
Ilustración 5. Resina catiónica débilmente ácida.	36
Ilustración 6. Resina aniónica fuertemente básica.	37
Ilustración 7. Resina aniónica débilmente básica.	37
Ilustración 8. Fórmula química del estireno.	38
Ilustración 9. Cadena de poliestireno simplificada	39
Ilustración 10. Cadena de poliestireno reticulado	39
Ilustración 11. Esferas de resina para el intercambio iónico.	40
Ilustración 12. Vista del tamaño de resina mediante un microscopio.	41
Ilustración 13. Gráfica caída de presión versus velocidad lineal de la resina.	43
Ilustración 14. Gráfica capacidad de intercambio respecto al volumen de la resina	44
Ilustración 15. Diagrama de proceso de ósmosis y ósmosis inversa	46
Ilustración 16. Equipo para el proceso de ósmosis inversa.	47
Ilustración 17. Diagrama esquemático de una membrana con estructura (A) simétrica y (B) asimétrica	48
Ilustración 18. Sección transversal de una membrana integral.	50
Ilustración 19. Sección transversal de una membrana compuesta de capa fina.	51
Ilustración 20. Mecanismo de un equipo de electrodesionización	53
Ilustración 21. Ubicación en Google Maps ITP Paipa- Boyacá (Piscinas Termales)	56
Ilustración 22. Pozo azul de Paipa ubicado al costado izquierdo del ITP	57
Ilustración 23. Vista superior del complejo acuático ITP Paipa-Boyacá	57
Ilustración 24. Parámetros esenciales para el agua potable, según la resolución 2115 del 2007	59
Ilustración 25. Esferas de resina aniónica para su utilización en intercambio iónico.	69
Ilustración 26. Esquema de la columna de Intercambio iónico con resina en su interior.	81
Ilustración 27. Esquema del proceso a escala piloto de la columna de intercambio iónico elaborada en Solid Edge.	82
Ilustración 28. Esferas de resina sin ser activada con NaOH.	83
Ilustración 29. Resina LEWATIT MP68 activada con NaOH para dar inicio al proceso de intercambio iónico en el ITP.	84
Ilustración 30. Prueba piloto de la CII ubicada a un costado de la piscina olímpica en el ITP	85

Ilustración 31. Válvula de bola utilizada para regular el caudal en la parte superior e inferior de la CII	86
Ilustración 36.Fuga iónica en los sistemas de regeneración.	110
Ilustración 37. Etapas que componen el proceso de regeneración.	117
Ilustración 38. Proceso de operación de las columnas de intercambio iónico.	118
Ilustración 39. Esquema de entrada y salidas del fluido y del regenerante.	120
Ilustración 40. Unidad de intercambio iónico a escala industrial para su implementación en el ITP	121
Ilustración 41. Vista superior del tratamiento a implementar.	123

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Densidad de la resina	77
Ecuación 2. Área de flujo dentro de la CII	77
Ecuación 3. Altura del lecho	78
Ecuación 4. Altura del lecho expandido	79
Ecuación 5. Altura del lecho total	79
Ecuación 6. Caudal de flujo de entrada a la CII	87
Ecuación 7. Oferta iónica	98
Ecuación 8. Capacidad operativa	99
Ecuación 9. Volumen de la resina.	99
Ecuación 10. Área de flujo de la columna	100
Ecuación 11. Altura de la resina en el lecho	100
Ecuación 12. Altura del lecho expandido	101
Ecuación 13. Altura de la resina inactiva	102
Ecuación 14. Altura total de la CII	102
Ecuación 15. Velocidad del agua a tratar	104
Ecuación 16. Volumen del lecho entre resina activa e inactiva	104
Ecuación 17. Capacidad operativa instalada	106
Ecuación 18. Volumen de agua para el proceso de regeneración.	107
Ecuación 19. Tiempo entre regeneraciones	107
Ecuación 20. Volumen del regenerante	110
Ecuación 21. Cantidad de agua para diluir el regenerante	111
Ecuación 22. Volumen del agua para diluir el regenerante.	112
Ecuación 23. Velocidad de regeneración.	113
Ecuación 24. Tiempo de regeneración.	113
Ecuación 25. Volumen de agua de enjuague.	114
Ecuación 26. Tiempo de enjuague	115

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Concentración de sulfatos vs conductividad en las aguas termo minerales	97
Gráfica 2. Comportamiento del ion sulfato vs tiempo de retención	98
Gráfica 3. Comportamiento de la conductividad vs tiempo de retención	100
Gráfica 4. Comportamiento de pH vs tiempo de retención	101

LISTAS DE ANEXOS

	pág.
Anexo A Ficha Tecnica Resina Intercambio Ionico	138
Anexo B. Condiciones de funcionamiento recomendadas para la Resina Lewatit MP68	139
Anexo C. Ficha Tecnica Hidroxido De Sodio	140
Anexo D. Manual De Análisis De Agua (Hash)	141
Anexo E. Resultados Fisicoquimicos Del Pozo Azu.	143
Anexo F. Resultados Fisicoquimicos De La Piscina Olimpica Sin Tratar	144
Anexo G. Resultados Fisicoquimicos De La Piscina Olimpica Despues De Ser Tratada	145

ABREVIATURAS

<i>ITP</i>	Instituto de Turismo de Paipa
<i>RII</i>	Resina de Intercambio Iónico
CI	Capacidad de Intercambio
<i>ATM</i>	Aguas Termo minerales
<i>FQ</i>	Físico-Químico
<i>CII</i>	Columna de Intercambio Iónico
DVB	Divilbenceno
CEDI	Electrodesionización en continuo
Q	Caudal
EL	Electrodesionización
OSI	Osmosis inversa
OI	Oferta iónica
IS	Ion Sulfato
IC	Ion Cloruro
LW	Lewites Mp68
AR	Aguas residuales
NaOH	Hidróxido de sodio
pH	Potencial de Hidrogeno
TT	Tratamiento terciario
D _R	Densidad de la resina
A _F	Área de flujo dentro de la CII
H _E	Altura del lecho expandido
H _L	Altura del lecho total
D _C	Diámetro de la columna
V _b	Válvula de bola
T	Temperatura
C _a	Carga aniónica
C _{op}	Capacidad operativa
H _R	Altura de la resina en el lecho
H _i	Altura de la resina inactiva
Vel	Velocidad del agua a tratar
BV	Volumen del lecho
D _u	Dureza
C _{opi}	Capacidad operativa instalada
R	Regenerante
W _R	Peso de la resina
V _R	Volumen de resina utilizada

GLOSARIO

AGUA RESIDUAL: son aquellas que proceden de cualquier actividad humana e industrial, cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utiliza líquidos residuales, aguas de proceso y de drenaje, que al no ser tratadas adecuadamente pueden llegar a ser peligrosas para el medio ambiente.¹

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO: estudio de las propiedades físicas y químicas de una muestra a determinar, con el fin de establecer características particulares a partir de diferentes métodos.²

ANÁLISIS PREFACTIBILIDAD: estudio preliminar para determinar la viabilidad de un proyecto. Su objetivo es conocer su financiamiento junto con la disponibilidad de insumos.³

AGUAS TERMALES: aguas con elevadas cantidades de minerales, que brotan del suelo de manera natural y a una temperatura que supera los 5°C, temperatura registrada en la superficie.⁴

BIOCIDAS: son conservantes usados para prevenir que los productos formulados se dañen al ser atacados por bacterias, hongos, algas u otros microorganismos que los descomponen y afectan características de los productos finales tales como: pinturas, emulsiones, pegantes, aditivos para concreto, lubricantes, maderas entre otros.⁵

CONDUCTIVIDAD: propiedad física de los materiales o sustancias que permite el paso de corriente eléctrica. En cuanto a líquidos la conductividad se debe a los iones disueltos en una solución.⁶

CONTRACORRIENTE: fluido que pasa a través de la columna en dirección opuesta al flujo principal del proceso.⁷

¹ SOLANO, María. Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la Nacional Escuela de ciencias ambientales, 2011.39 p. Consultado en: enero 3 del 2020.

² QUIMBAYO CASALLAS, M. DUARTE BLANCO, Y. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, e n la vereda el Vijal municipio de San-Mateo, Boyacá. tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Químico. Fundación universidad de América,2019 [En línea]: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7590/1/6142412-2019-2-IQ.pdf>. Consultado en: enero 3 del 2020.

³ PEREZ, Julián y MERINO, María. 2013. Actualizado: 2015. Disponible en sitio web: <https://definición.de/prefactibilidad/>. Consultado en: enero 3 del 2020.

⁴ Hotel Hacienda el salitre. Que son las aguas termales. Actualizado: mayo 23, 2018. Disponible en sitio web: <http://hotelhaciendaelsalitre.com/en/category/noticias/> Consultado en: enero 3 del 2020.

⁵ BIOCIDAS Y QUIMICOS S.A.S. Biocidas y conservantes. Actualizado: septiembre 28, 2017. Disponible en sitio web: <https://www.biocidasyquimicos.com/biocidas-conservantes/> Consultado en: enero 3 del 2020.

⁶ Significados.com. [Anónimo]. Actualización: marzo 19,2017. Disponible en: <https://www.significados.com/conductividad-electrica/> Consultado en: enero 3 del 2020.

DIMENSIONAMIENTO: estimación de las magnitudes o valores precisos de un sistema para llevarlo a escala real.⁸

ETAPA DE CARGA: intervención que se da lugar al intercambio de iones entre la resina y la solución a tratar.⁹

REGENERACIÓN: proceso en el cual la resina es purificada con el fin de reutilizarla. Para esto se emplea una solución concentrada en el ion de la resina.¹⁰

SODA CAUSTICA: sustancia conocida como hidróxido de sodio (NaOH), es utilizada en la industria papelera, farmacéutica, jabonera y química. Además, sirve para la elaboración de limpiadores y desinfectantes, regeneración de resinas y tratamiento de aguas.¹¹

ÓSMOSIS INVERSA: es una tecnología de purificación del agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas y partículas más grandes en el agua potable. Para lograr la ósmosis inversa se aplica una presión para vencer la presión osmótica, que es una propiedad coligativa producida por diferencias de potencial químico del solvente, un parámetro termodinámico.¹²

pH: el potencial de Hidrógeno es una medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una solución, medida a escala de 0 a 14, donde 7 expresa que la sustancia es neutra y mayores de 7 indican que la sustancia es básica. Por último, menores a 7 la sustancia es ácida.¹³

⁷ DOMINGO, Agustín. Apuntes de Mecánica de Fluidos. Departamento de Física e Instalaciones. E.T.S. Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Versión 1.0.1, mayo de 2011. 46 p. Consultado en: enero 3 del 2020.

⁸ PIZARRO, Ruth. Estimación de medida: el conocimiento didáctico del contenido de los maestros de primaria. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Septiembre 2015. 12 p. Disponible en sitio web:

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/309285/rnpc1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Consultado en: enero 3 del 2020.

⁹ ESPINOZA, David. Tratamiento terciario por resina de intercambio iónico, marzo 15 2015..disponible en sitio web: <https://es.slideshare.net/renzodaviddelacruz/resina-de-intercambio-ionico>

¹⁰ CARBOTECNIA. INTERCAMBIO IONICO. México, [sin fecha]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/intercambio-ionico/> Consultado en: enero 3 del 2020.

¹¹ ChemicalSafetyFacts.org [Anónimo]. Hidróxido de sodio. Disponible en sitio web: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/hidroxido-de-sodio/> Consultado en: enero 3 del 2020.

¹² IONIC SYSTEMS. Osmosis Inversa [sin fecha] Disponible en sitio web: <https://www.ionicsystems.com/es/osmosis-inversa/> Consultado en enero 3 del 2020.

¹³ Tus clases. [Anónimo] Actualización: noviembre 2018, Disponible en sitio web: <https://www.tusclases.co/questions/quimica/que-es-el-ph> Consultado en enero 3 del 2020.

RETICULACION: implica una reacción química entre cadenas de polímeros para que se unan. Esta unión puede ser enlaces covalentes o enlaces iónicos, polímeros naturales o sintéticos.¹⁴

¹⁴ ALONSO-, Juan y MÉNDEZ, María. Relación estructura-propiedades de polímeros. Educ.quím. Universidad Nacional Autónoma de México. Publicado en línea el 10 de septiembre de 2010, ISSN 1870-8404. Disponible en sitio web: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/64496/56625> Consultado en enero 3 del 2020.

RESUMEN

El Instituto de Turismo de Paipa es un establecimiento encargado de la recreación pública municipal, está ubicado en Paipa-Boyacá. Esta entidad cuenta con una afluencia natural de agua termo-mineral que brota del llamado Pozo Azul, el cual alimenta tres piscinas termales, que al cabo de 3 días la piscina se vacía completamente al río Chicamocha mediante un ducto de salida, estos vertimientos no cumplen con los estándares requeridos por la entidad Corpoboyacá, debido a sus altos contenidos de iones sulfatos y cloruros.

Por otro lado, se conoce que estas aguas termo minerales tienen altos contenidos de salinidad y a su vez este efluente nace en la superficie de los terrenos aledaños del río, dirigiéndose a este sin ningún tratamiento alguno provocando daños en los cultivos cercanos de esta fuente hídrica, ya que la comunidad agricultora utiliza esta agua para sus riegos y animales.

Por tal razón, este proyecto tiene como objetivo desarrollar una propuesta para la disminución de los contaminantes en las aguas residuales provenientes de las piscinas termales del instituto de turismo de Paipa, mediante un intercambio iónico con una resina que permita la reducción de parámetros como cloruros y sulfatos, evaluando sus propiedades, de tal manera que la elección sea acertada y eficaz para la reducción de estos iones.

Adicionalmente a ello, se revisaron las características de seis referencias comerciales mediante una matriz Pugh, dado que los iones disueltos pueden eliminarse utilizando resinas de intercambio iónico. Se diseñó una columna de intercambio que incluyó la resina seleccionada, en la cual se redujo $6.000 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$, sin embargo, se recomienda el uso de tratamientos previos para obtener una mejor reducción de los iones.

Por último, se realizó el análisis de costos para la implementación del proceso a escala industrial.

PALABRAS CLAVE: aguas residuales, termales, tratamientos de aguas residuales, floculación, coagulación, intercambio iónico, sulfatos, cloruros, grasas y aceite.

ABSTRACT

The Paipa Tourism Institute is an establishment in charge of municipal public tourism, it is located in Paipa-Boyacá. This entity has a natural influx of thermo-mineral water that springs from the so-called Blue Well, which feeds three thermal pools, which after 3 days the pool empties completely into the Chicamocha river through an outlet duct, the outlet effluents did not comply with the requirements required by the entity Corpoboyacá, due to its high content of sulfate and chloride ions.

On the other hand, it is known that these thermo-mineral waters have high contents of salinity and, in turn, this effluent is born on the surface of the land adjacent to the river, going to it without any treatment, causing damage to nearby crops from this water source, since the agricultural community uses this water for their irrigation and animals.

For this reason, this project aims to develop a proposal for the reduction of pollutants in wastewater from the thermal pools of the Paipa tourism institute, through an ion exchange with a resin that allows the reduction of parameters such as chlorides. and sulfates, evaluating their properties, so that the correct and effective choice of sea for the reduction of these ions, the characteristics of six commercial references were reviewed using a Pugh matrix, since dissolved ions can be removed using ion exchange resins , then an exchange column was selected that included the selected resin, in which 6,000 mg SO₄²⁻ / L was reduced, however the use of previous treatments is recommended to obtain a better reduction of ions, finally the analysis was performed of costs for the implementation of treatment on an industrial scale.

KEY WORDS: wastewater, thermal, wastewater treatment, flocculation, coagulation, ion exchange, sulfates, chlorides, fats and oil.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la actividad termal es netamente combinada con el turismo permitiendo un espacio de descanso y recreación, debido a los beneficios que estas contienen como los minerales en su composición, obtenidos de su dilución que contienen características terapéuticas provenientes de distintos procesos biológicos y geológicos.

En Colombia aún es escaso el conocimiento sobre este recurso, sin embargo algunas entidades como INGEOMINAS servicio geológico Colombiano, han adelantado investigaciones sobre el tema debido a que registra alrededor de 300 manantiales termales de composición y caracterización completamente diferentes; 20 efluentes minerales habían sido analizadas según su composición mineral, de tal manera que la industria termal se ha convertido en la práctica llamada termalismo, ciencia que a lo largo del tiempo ha sido cada vez más estudiada por mantener un turismo estable¹⁵ y desarrollo sostenible para los países.

El instituto de turismo de Paipa es uno de los centros recreativos en Boyacá más visitados tanto por extranjeros como personas de distintas partes de Colombia, ya que en este se encuentran tres piscinas con aguas termales provenientes del pozo azul, que brinda diferentes beneficios terapéuticos.

En el presente proyecto se selecciona una alternativa de tratamiento efectivo en la remoción de los iones indicados por la entidad Corpoboyacá, la cual requiere una disminución en los siguientes parámetros: iones cloruros y sulfatos. El principal objetivo es obtener un valor menor en la toma de muestra de agua para la piscina olímpica sin tratar, al no llegar a reducir los iones en la salida del agua, Corpoboyacá negará el permiso de vertimiento por falta de un tratamiento, generando sanciones al ITP e incluso el cierre total de la actividad que es su mayor atractivo.

Se realizó una búsqueda bibliográfica encontraron los siguientes métodos de remoción de iones: osmosis inversa, electrodesionización e intercambio iónico, para la cual se establecieron algunos parámetros mediante una Matriz Pugh. Partiendo de esta matriz se seleccionó el intercambio iónico ya que es un proceso económico, accesible y sencillo, así mismo se utilizó una resina aniónica de base

¹⁵ COLOMBIA, CONTRATO No.FNT-327-2014 ENTRE LA FIDUCIARIA COLOMBIANA DE COMERCIO EXTERIOR- FIDUCOLDEX S.A. VOCERA DEL PATRIMONIO AUTONOMO – FONDO NACIONAL DE TURISMO - FONTUR Y PIEDAD ACOSTA BOCANEGRA (2015). Disponible en línea: https://fontur.com.co/aym_document/aym_estudios_fontur/PROYECTO_BANDERA_PARA_EL_TURISMO_TERMAL_EN_COL.PDF

débil, ya que presenta una afinidad por los ácidos fuertes como los que se encuentran en las aguas termo-minerales de Paipa.

Seguido a esto, se realiza los cálculos de la columna de intercambio iónico con el fin de realizar la prueba piloto, en donde se evidenció una disminución de sulfatos de 6.000 mg SO_4^{2-} /L respectivamente.

Por último, se establecieron las dimensiones a escala industrial como también sus respectivos costos, reconociendo los equipos del proceso para su implementación, por esta razón, al desarrollar un tratamiento de intercambio iónico, servirá como ejemplo para que otras entidades tanto públicas como privadas, contribuyan en la disminución de los iones dando un mejor uso a este recurso natural y así mismo reducir el impacto ambiental provocado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para la disminución de los contaminantes en las aguas residuales provenientes de las piscinas termales del instituto de turismo de Paipa.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar las aguas termales a la entrada y salida de las piscinas.
2. Seleccionar alternativas de remoción de los contaminantes a nivel laboratorio.
3. Establecer las especificaciones técnicas de la alternativa seleccionada.
4. Determinar los costos asociados a la alternativa seleccionada a escala industrial.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Hoy en día para el tratamiento de aguas residuales domésticas como industriales se debe tener en cuenta nuevas tecnologías y líneas de tratamiento. En la actualidad, se encuentran diferentes métodos que contienen diversos procesos, equipos y operaciones unitarias; por lo tanto, la ingeniería química se debe considerar importante en la resolución de los problemas de aguas residuales,¹⁶ integrados en operaciones físicas como químicas logrando obtener diseños específicos para cada problema de aguas residuales.

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende de los límites de vertimiento para el efluente, como también las principales etapas que se llevan a cabo tales como: pretratamiento y tratamiento primario, tratamientos secundarios, terciarios y de desinfección. Estos son tratamientos avanzados y se realizan dependiendo del uso al cual se destinará el efluente que se quiere tratar.¹⁷

1.1.1 Pretratamientos y tratamientos primarios. Antes de un tratamiento se debe considerar un pretratamiento que generalmente son de tipo físicos reduciendo los sólidos suspendidos y el acondicionamiento de las aguas para los tratamientos posteriores.¹⁸

Los siguientes tratamientos primarios son:

- **Cribado:** esta operación se utiliza para separar material grueso del agua, mediante una rejilla que también se denomina criba donde la limpieza de estas se hace completamente manual o mecánica, generalmente tienen aberturas de 5 mm o menos.¹⁹
- **Desarenador:** su fundamento es eliminar las arenas, grava, barro o en su defecto las partículas más o menos finas de origen inorgánico por medio de una sedimentación.
- **Flotación:** es un proceso para separar sólidos de baja densidad, son partículas líquidas en donde se introduce un gas que normalmente es aire en la fase líquida formando burbujas; esta fase se somete a un proceso de

¹⁶ Ramalho RS. Tratamiento de aguas residuales. Capítulo I. Niveles e tratamiento de aguas residuales y normas de calidad de las aguas. p 8. España: RevertéS.A;1993. [consulta 11 Enero 2020] [sitio web]: <https://books.google.com.co/books?id=30etGjzPXyWC&lpg=PP1&dq=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&hl=es&pg=PR4#v=onepage&q=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&f=true>

¹⁷ Ibid., p 8.

¹⁸ Galeano Rojas V. Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Vélez-Santander. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad Católica de Colombia; 2016.

¹⁹ Ramalho RS. Op. Cit., p 92.

presurización entre (2-4 atm), posterior a ello se realiza una despresurización hasta la presión atmosférica dando paso por una válvula reductora de presión.

La flotación se usa para la separación de grasas, aceites, fibras y otros sólidos de baja densidad de las aguas residuales.²⁰

- **Sedimentación:** se usa para la separación de sólidos en suspensión; es decir se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido en donde se encuentran. Puede producirse en una o varias etapas del proceso de tratamiento.

Existen varios tipos de sedimentación, sin embargo, una de las más importantes y utilizadas comúnmente es la sedimentación por zonas, la cual se presenta en clarificadores con lodos coagulados químicamente donde las partículas hacen una capa que sedimenta y es fácilmente distinguible de la fase líquida.²¹

- **Neutralización y homogeneización:** la homogeneización es una mezcla de corrientes sean ácidas o alcalinas con un método de control directo de pH en donde se adicionan bases o ácidos para neutralizar las respectivas corrientes.

Para realizar este método en una corriente, es necesario llevar un proceso de homogeneización, este tratamiento es utilizado para reducir los cambios que pueden ocurrir en ciertas corrientes, reduciendo las variaciones DBO del efluente.²²

- **Coagulación:** proceso en donde los componentes se hallan dentro de una suspensión o disolución que se desestabilizan por las fuerzas que mantienen la estabilidad, de tal manera la sustancia química se adiciona a esta suspensión.²³
- **Floculación:** consiste en la agitación de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesario para poder sedimentar con facilidad, este proceso se favorece por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos.

²⁰ RAMALHO RS. Tratamiento de aguas residuales. Capítulo I. Niveles e tratamiento de aguas residuales y normas de calidad de las aguas. p 146. España: RevertéS.A;1993. [consulta 11 Enero 2020] [sitio web]: <https://books.google.com.co/books?id=30etGjzPXyWC&lpg=PP1&dq=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&hl=es&pg=PR4#v=onepage&q=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&f=true>

²¹ Ibid., p. 92.

²² Ibid., p. 154.

²³ LIZARAZO J, y ORJUELA M. SISTEMAS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA; Universidad Nacional de Colombia; 2013.

1.1.2 Tratamiento secundario. El tratamiento biológico se lleva a cabo por medio de algunas bacterias permitiendo cerrar ciclos fundamentales que ocurren frecuentemente en la tierra, donde se debe tener en cuenta la aireación y la cantidad de biomasa que se requiere. De esta manera se obtiene tres tipos de tratamientos biológicos:

- **Laguna de aireación:** este método se utiliza para el tratamiento de aguas industriales, que tiene altas cargas orgánicas y no requiere de procesos de nitrificación.
- **Lodos activos:** este tipo de tratamiento es utilizado en aguas residuales urbanas e industriales, es una operación continua por medio del reciclado de lodos biológicos.
- **Aireación prolongada o proceso de oxidación total:** es un proceso modificado directamente de lodos activados, cuyo objetivo es disminuir la cantidad residual por medio del aumento de tiempo de resistencia, allí se utilizan reactores que tiene un volumen mayor al proceso de lodos residuales.

1.1.3 Tratamientos terciarios. Existen una variedad de métodos para el mejoramiento de la calidad de agua que satisfacen las demandas actuales para diversos fines, sin embargo, para el presente proyecto se necesita conocer de métodos terciarios, debido a que son procesos que juegan un papel importante en la reducción de iones, metales y metaloides que son indeseados en el agua.²⁴ Estos tratamientos también son llamados como tratamientos avanzados o procesos de refinamiento, obteniendo un alto grado de calidad en las aguas tratadas previamente en tratamientos secundarios. Por ejemplo: Filtración, desinfección, Osmosis inversa, Intercambio Iónico.

1.2 AGUAS TERMALES

Las aguas de origen meteórico se infiltran en el subsuelo y gracias a la gravedad descienden hacia capas más profundas, provocando un aumento de temperatura. Además, estas aguas pueden ascender posteriormente hacia la superficie, mediante las fracturas entre las mismas rocas dando origen a las aguas termo minerales con alta temperatura.

Durante las últimas décadas, los balnearios franceses al igual que los españoles han constatado una creciente demanda de aguas termales para tratamientos

²⁴ RAMALHO RS. Tratamiento de aguas residuales. España: Reverté S.A; 1993. Página 585. [Disponible en línea]: <https://books.google.com.co/books?id=30etGjzPXyWC&lpg=PP1&dq=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&hl=es&pg=PR4#v=onepage&q=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&f=true>

diversos de salud, desde allí crece el interés por la prospección y aprovechamiento de potenciales de recursos termales.²⁵

Las características fisicoquímicas dependen de los terrenos de donde provienen, es por eso que su contenido en sales, su temperatura y las características hidrológicas son muy variables.²⁶ Por otra parte, son aquellas aguas subterráneas que transitan en la profundidad sin necesidad de tener un gran tiempo de residencia en el acuífero adquiriendo diversas propiedades.

1.2.1 Química de las aguas termales. Estas aguas termo minerales tienen una composición química que se da mediante procesos de interacciones, como lo son las precipitaciones de las aguas lluvias y la nieve, en la cual adquieren los gases que se producen en la zona del suelo por descomposición de la materia orgánica en donde reacciona con las sales o minerales que están presentes en el terreno rocoso en condiciones de pH y potencial redox.²⁷

Al cabo de un tiempo, la composición química de las aguas subterráneas llega a estar en un equilibrio químico-físico con el contenido de gases y de fases sólidas disueltas, en donde estos equilibrios dependen de ciertos factores como lo son: la temperatura y la presión del sistema, cualquier cambio produce una variación en la composición química, dando lugar a una mayor disolución de los minerales.²⁸

1.3 INTERCAMBIO IÓNICO

Este proceso consiste en que los iones que están unidos a ciertos grupos funcionales en las superficies de sólido se intercambian por fuerzas electrostáticas, además, es un proceso de desmineralización. Es posible disminuir o corregir parámetros como la dureza mediante este tipo de procesos.

El intercambio de iones se realiza mediante un polímero en forma de esferas diminutas que son capaces de intercambiar iones particulares por otros iones, en una solución que se pasa a través de ellas. A estas esferas de gel sintéticas se les llama "Resinas de intercambio iónico". Las resinas sintéticas no sólo se utilizan

²⁵ GARRIDO Schneider, y RÍOS Santiago. Caracterización geoquímica de surgencias frías de alta montaña en contextos geológicos termales del Pirineo Axial.2000 Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/sim_hidro_Murcia/tomo%20XXIV/54.pdf [consultado el día 11 de enero del 2020].

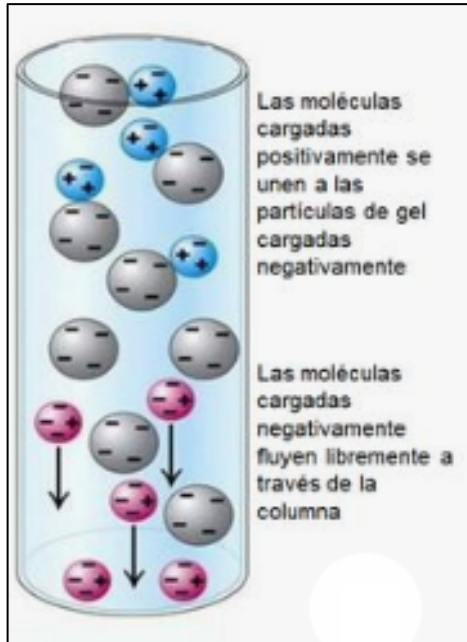
²⁶ RODRÍGUEZ, Juana. TORREANO, Rosa, CEREZUELA, Dolores. Estudio para caracterizar, evaluar y proteger las aguas minerales y termales de una comunidad: Aragon-España.2017. Disponible en: <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfart3/estudio.pdf>.

²⁷ MARAVER. Francisco. Vademécum II de aguas mineromedicinales españolas. Editorial complutense S.A Primera edición 2010. 15.p [consultado el día 11 de enero del 2020].

²⁸ ESPEJO, Tatiana. MANTILLA, José. Análisis fisicoquímicos de las aguas termo minerales de Cachicadan, Yanasara, Baños Chimú y Huaranchal en la libertad, Perú. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico.2013. [consultado el 12 de enero del 2020] 3.p

para la purificación del agua, sino también para varias otras aplicaciones que incluyen la separación de algunos elementos.²⁹

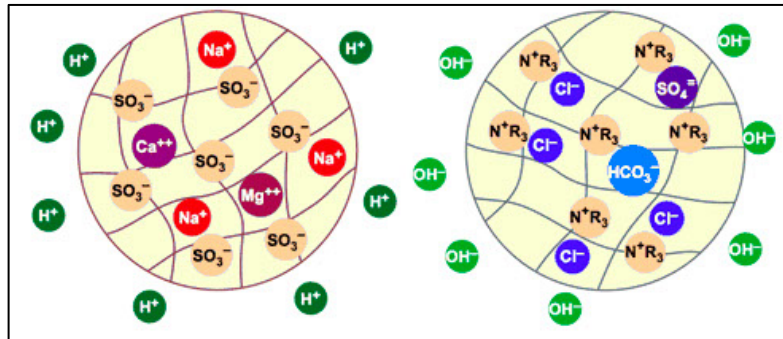
Ilustración 1. Intercambio iónico dentro de la CII.



Fuente: SÁNCHEZ, RODRÍGUEZ. Y. Oliver. L. RODRÍGUEZ RICO. R.J. Cabrera. Evaluación, modelización y optimización de una columna de intercambio iónico empleada en el tratamiento de aguas de procesos. Departamento de ingeniería química, Universidad central de las Villas. 2016

²⁹ CARBOTECNIA. INTERCAMBIO IONICO. México. Disponible en sitio web: <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/intercambio-ionico/> [Consulta: 11 enero 2020].

Ilustración 2. Molécula de la resina aniónica y catiónica.



Fuente: HIDROAGUA. Equipos para tratamiento y purificación de agua. 2020. Disponible en: <https://www.hidroagua.com.mx/intercambio-ionico.html>. [citado el 8 de enero del 2020]

1.3.1 Resinas de intercambio iónico. Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, normalmente esferas de 0,5-1 mm de diámetro, destinadas al tratamiento de aguas residuales industriales; están formadas por una matriz polimérica a la que se le han unido una gran cantidad de radicales polares, ácidos o bases. Cuando el agua pasa a través de la resina, ésta toma iones del agua (sodio, cloruro, calcio, magnesio, etc.) y cede una cantidad equivalente en cuanto a carga de protones o de hidroxilos.

Una resina, cuando se le ha agotado la capacidad de intercambiar iones, mediante una solución regenerante, pueden recuperar completamente su capacidad original. La regeneración de la columna se consigue haciendo pasar a través de la zeolita una solución con el ion original, el cual se une a los radicales de la resina y desplaza a los iones captados durante el funcionamiento normal. Para regenerarlas se suele utilizar sal común, ácido clorhídrico, sulfúrico o sosa caustica, en función del tipo de columna.³⁰

En la **Ilustración 3**, se presenta un esquema de la columna de intercambio iónico junto con la resina:

³⁰ Condorchem Evitech. [sitio web]. México: RESINA DE INTERCAMBIO IONICO. [Consulta: 11 enero 2020]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/resinas-intercambio-ionico/>

Ilustración 3. Columna y resina de intercambio iónico.



Fuente: CIFUENTES.
Desmineralización. [En línea]:
[https://www.eoi.es/es/file/18436
/download?token=HsJ9_4us](https://www.eoi.es/es/file/18436/download?token=HsJ9_4us)
[citado el 13 de enero del 2020]

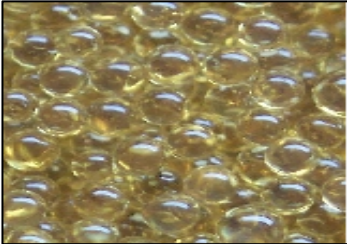

1.3.2 Clasificación de resinas para intercambio iónico. Para la clasificación de resinas se tiene en cuenta el grupo iónico la cual proporciona la transferencia entre la solución conductora y la estructura sólida, de tal manera que permite identificar la adecuada reducción de los iones sulfatos que exige la entidad reguladora de vertimientos Corpoboyacá.

A continuación, se establece de manera más amplia las características físicas y químicas relevantes de cada tipo de resina.

Cuadro 1. Clasificación de las resinas de intercambio iónico.

<p>• Resinas catiónicas fuertemente acidas</p>	<p>• Resinas catiónicas débilmente acidas</p>
<p>Intercambian iones positivos (cationes), como también funcionan a cualquier pH del efluente.</p> <p>Son ideales para aplicaciones de suavizado de agua, como primera columna de deionización en los desmineralizados o para lechos mixtos, además, necesitan una gran cantidad de regenerante.</p>	<p>Tienen menor capacidad de intercambio en comparación con las RII catiónicas fuertemente acidas mantienen una limitación con pH bajos, adicionalmente estas resinas son muy eficientes y requieren menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte.</p> <p>Estas resinas fijan los cationes de calcio, sodio, potasio y magnesio.</p>
<p><i>Reacción 1. Reacciones de resinas catiónicas fuertes</i></p>	<p><i>Reacción 2. Reacciones de resinas catiónicas débiles</i></p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $\begin{aligned} \text{CaCl}_2 + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - \text{Ca} + 2\text{HCl} \\ 2\text{NaCl} + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - 2\text{Na} + 2\text{HCl} \\ \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - 2\text{Na} + \text{H}_2\text{SO}_4 \\ \text{CaSO}_4 + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - \text{Ca} + \text{H}_2\text{SO}_4 \end{aligned}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $\begin{aligned} \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - \text{Ca} + \text{H}_2\text{CO}_3 (\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2) \\ \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - \text{Mg} + \text{H}_2\text{CO}_3 (\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2) \\ 2\text{NaHCO}_3 + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - 2\text{Na} + \text{H}_2\text{CO}_3 (\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2) \\ 2\text{KHCO}_3 + \text{R} - 2\text{H} &\rightarrow \text{R} - 2\text{K} + \text{H}_2\text{CO}_3 (\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2) \end{aligned}$ </div>
<p>Ilustración 4. Resina catiónica fuertemente acida.</p>	<p>Ilustración 5. Resina catiónica débilmente acida.</p>
	
<p>Fuente: Funcionamiento de los procesos industriales de desmineralización de agua. Copyright 2011. Disponible: http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html</p>	<p>Fuente: Carbotecnia. Equipos e insumos para tratamiento de aguas. 2018, Disponible: https://www.carbotecnia.info/producto/medio-resina-cationica-para-suavizadores/</p>

Cuadro 1. (Continuación)

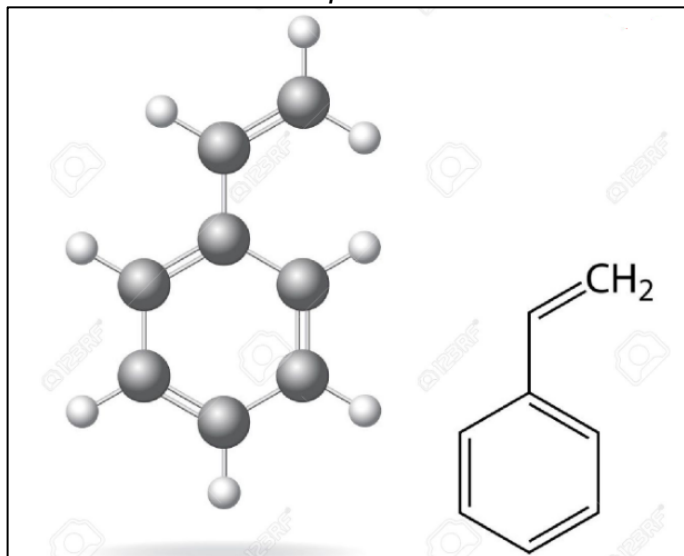
<p>• Resinas fuertemente básicas aniónicas</p> <p>Intercambian iones negativos (aniones). Se utilizan para aplicaciones de suavizado de agua, esta RII elimina los aniones del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, que normalmente es sosa (soda caustica), en la cual presentan la necesidad de consumo en gran cantidad de este regenerante. Las resinas fuertemente básicas funcionan para tratar agua que contiene minerales ácidos libres como cloruros y sulfatos, sin embargo, no son muy estables a altas temperaturas.</p> <p><i>Reacción 3. Reacción de resina aniónica fuertemente básicas</i></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> $R - 2OH + H_2CO_3 \rightarrow R - CO_3 + 2H_2O \text{ Tipo II}$ $R - 2OH + H_2CO_3 \rightarrow R - CO_3 + 2H_2O \text{ Tipo I}$ </div> <p><i>Ilustración 6. Resina aniónica fuertemente básica.</i></p>  <p>Fuente: Carbotecnia. Equipos e insumos para tratamiento de aguas.2018, Disponible: https://www.carbotecnia.info/producto/medio-resina-cationica-para-suavizadores/</p>	<p>• Resinas aniónicas débilmente básicas.</p> <p>Estas resinas son muy eficientes ya que sus sitios de intercambio son ocupados por el grupo funcional poliamida, presentan una afinidad por los ácidos fuertes y su regenerante es NaOH por lo tanto, requieren menos sosa para su regeneración. Su uso no es conveniente en aguas con pH altos ya que pueden sufrir problemas de oxidación. Dichas resinas son apropiadas para aguas con altos niveles de sulfatos o cloruros, estas se pueden diferenciar de las resinas aniónicas fuertemente básicas por dos razones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • No eliminan los silicios • Requieren menos cantidad de “sosa” (regenerante). <p><i>Reacción 4. Reacción de resina aniónica débilmente básica</i></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> $R - 2OH + 2HCl \rightarrow R - 2Cl + 2H_2O$ $R - 2OH + H_2SO_4 \rightarrow R - 2SO_4 + 2H_2O$ $R - 2OH + 2HNO_3 \rightarrow R - 2NO_3 + 2H_2O$ </div> <p><i>Ilustración 7. Resina aniónica débilmente básica.</i></p>  <p>Fuente: Funcionamiento de los procesos industriales de desmineralización de agua. Copyright 2011. Disponible: http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html</p>
--	--

Fuente: elaboración propia con base en NEVAREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizado de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. p 56.

1.3.3 Estructura de las resinas. Es de gran importancia conocer la estructura de las resinas ya que con estas características se puede determinar más fácil las propiedades físicas, mecánicas y el comportamiento de estas mismas, además, son fundamentales debido a que permite identificar la resina adecuada para la realización de este proyecto.

1.3.3.1 Matriz polimérica. La mayoría de las RII alrededor de un 90%.³¹ se fundamenta en una matriz poliestireno, conformado por múltiples unidades de monómero de estireno junto con un compuesto aromático llamado vinil benceno (DVB), permitiendo la polimerización.

Ilustración 8. Formula química del estireno.



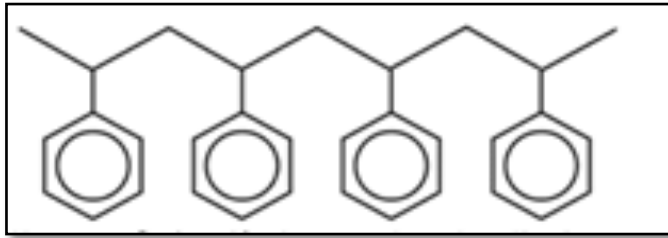
Fuente: LEBEDEV, Antón. Molécula del estireno.123RF [sin fecha]. Disponible web: https://es.123rf.com/photo_44230138_mol%C3%A9cula-de-estireno-f%C3%B3rmula-qu%C3%ADmica-estructural-y-el-modelo-uno-de-disolvente-org%C3%A1nico-principal-mon%C3%B3mero-de-po.html [citado el 13 de enero del 2020]

Las cadenas de polímeros lineales se encuentran enredadas entre sí, sin embargo, estas poseen una baja resistencia física, por lo tanto, después de la activación se logra disolver en agua.

En la **Ilustración 9** se encuentra esquemáticamente una cadena de poliestireno:

³¹ DARDEL. François Ion Exchange resin structure. Resin Matrix [En línea] <http://dardel.info/IX/resin_structure.html> [citado el 13 de enero del 2020]

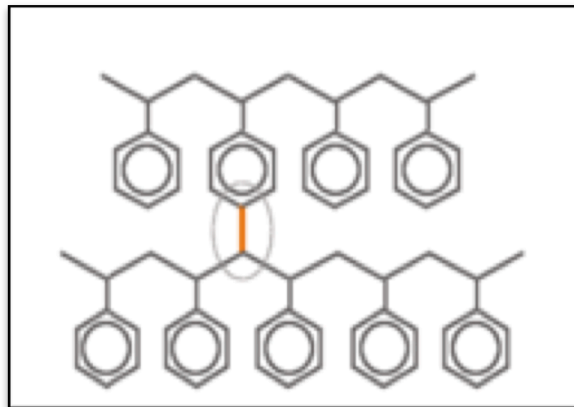
Ilustración 9. Cadena de poliestireno simplificada



Fuente: DARDEL.François Ion Exchange resin structure. Resin Matrix [En línea] http://dardel.info/IX/resin_structure.html [citado el 13 de enero del 2020]

1.3.3.2 Agente de entrecruzamiento. La característica para que el polímero tenga una mayor estabilidad se da gracias a que las cadenas de poliestireno están reticuladas a otra molécula al momento de la polimerización. De manera que la molécula más común de reticulación es el divinilbenceno (DVB), cuanto más DVB se agrega a la mezcla de reacción inicial, más rígido es el polímero.

Ilustración 10. Cadena de poliestireno reticulado



Fuente: DARDEL.François Ion Exchange resin structure. Resin Matrix [En línea] http://dardel.info/IX/resin_structure.html [citado el 13 de enero del 2020]

1.3.3.3 Grupo Funcional. Después de obtener un polímero estable es necesario activarlo para que pase a ser una resina de intercambio iónico. A continuación, se observa las activaciones químicas correspondientes para cada tipo de resina:

Cuadro 2. Activación de los tipos de resina.

TIPO DE RESINAS	ACTIVACION
Catiónicas fuertes	<ul style="list-style-type: none"> • Reacción de sulfonación
Catiónicas débiles	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrólisis con ácido sulfúrico • Hidrólisis con soda caustica
Aniónicas fuertes	<ul style="list-style-type: none"> • Cloro metilación • Aminación con amina terciaria
Aniónicas débiles	<ul style="list-style-type: none"> • Cloro metilación • Aminación con amina secundaria

Fuente: NEVAREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizado de agua de refinería estatal de esmeraldas.

1.3.4 Propiedades de las resinas.

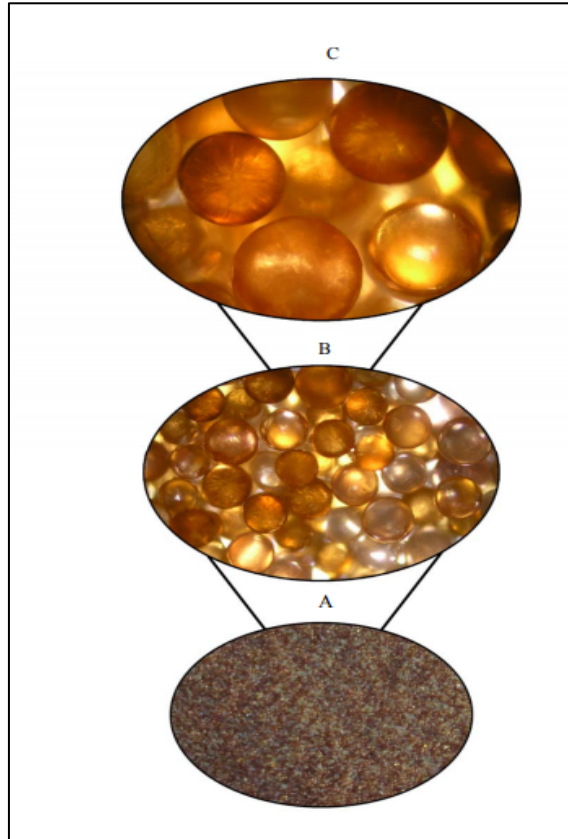
Ilustración 11. Esferas de resina para el intercambio iónico.



Fuente: CARBOTEKNIA. Intercambio iónico.2019. México. Disponible en sitio web: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/suavizadores-y-desmineralizadores/que-es-el-intercambio-ionico-y-tipos-de-resinas/> [Citado el 13 de enero del 2020]

1.3.4.1 Tamaño de partícula. Para uso industrial el tamaño de las esferas de resina resulta de la relación entre la velocidad de intercambio (la cual es mayor con partículas pequeñas) y la tasa de flujo (en donde requiere partículas grandes para tener menores pérdidas de presión). El tamaño estándar varía entre partículas con un diámetro entre 0,3 y 1,2 mm, pero se pueden conseguir tamaños menores o mayores según la necesidad del uso.³²

Ilustración 12. Vista del tamaño de resina mediante un microscopio.



Fuente: CAPITULO 3, [Anónimo] Intercambio iónico. Disponible en sitio web: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> [Consultado el 13 de enero del 2020]

La **Ilustración 12** muestra la resina en tres dimensiones observada en microscopio: En su forma normal (A) presenta un color ámbar con blanco y una

³² NEVAREZ RIVADENEIRA, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el des mineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. 66 p.

geometría esférica. (B) resina observada en microscopio con objetivo de 4x, en donde se aprecia su forma como propiedad importante de las resinas. Por último (C) se observa en microscopio con un objetivo de 10x.

1.3.4.2 Solubilidad. Los intercambios iónicos de sustancias pueden ser solubles bajo operación normal. Todas las resinas intercambiadoras usadas actualmente son poliácidas o poli bases de alto peso molecular que son insolubles, pero después de ciertas temperaturas se solubilizan.³³

1.3.4.3 Forma. Las formas de los gránulos esféricos deben tener máxima homogeneidad y dimensión uniformes, tal que las pérdidas en la cabeza del fluido en la percolación permanezcan aceptables. Normalmente, los rangos de tamaño son de 16-50 U.S. Mesh.³⁴

1.3.4.4 Densidad La densidad es una propiedad importante en las resinas y también existen varios tipos de densidad. Las densidades húmedas de las resinas están en los siguientes rangos:

Tabla 1. Densidad húmeda de los cuatro tipos de resinas.

Resinas catiónicas fuertes	1,18 g/ml – 1,38g/ml
Resinas catiónicas débiles	1,13 g/ml – 1,20 g/ml
Resinas aniónicas fuertes	1,07 g/ml – 1,12 g/ml
Resinas aniónicas débiles	1,02 g/ml – 1,10 g/ml

Fuente: ESPINOSA, Miguel. Diseño de una planta de tratamiento para el drenaje ácido de una mina en el estado de México. Trabajo para obtener el grado de Maestría en ciencias. Especialidad en ingeniería ambiental. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1997. 99.p

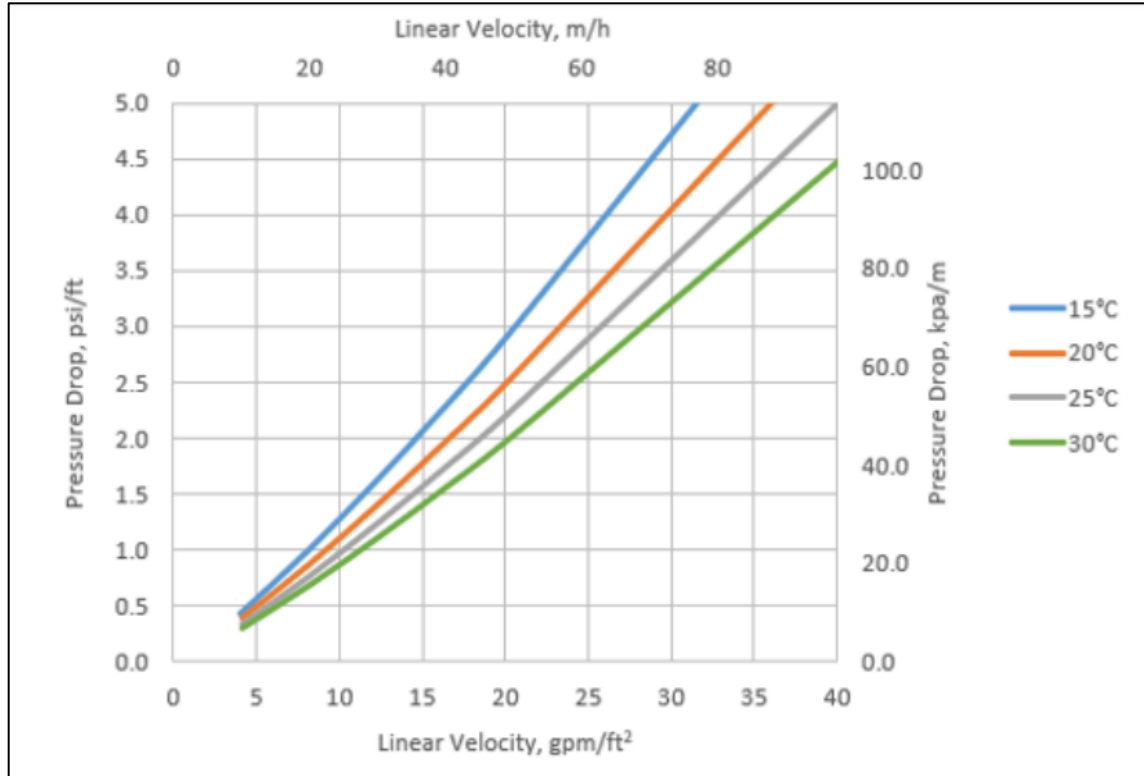
1.3.4.5 Caída de presión. La caída de presión en una columna de intercambio iónico depende de la distribución del tamaño de la partícula, altura y espacios vacíos entre la resina, así como el flujo y la viscosidad del agua a tratar. Además, esto afecta sus parámetros debido a que puede generar una obstrucción en la columna y de esta manera puede causar una compresibilidad anormal de la resina, brindando mayores pérdidas de presión, dependiendo de las

³³ MARTÍNEZ, Joelha. Tratamientos de aguas residuales e intercambio iónico. Issu, marzo 212[sitio web]: <https://issuu.com/joelvmartinez/docs/revistavirtual>.

³⁴ NEVÁREZ, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009. 68 p.

características del agua a tratar, el diseño de la planta puede variar de 10 a 40 volúmenes de la columna por hora.³⁵

Ilustración 13. Grafica caída de presión versus velocidad lineal de la resina.



Fuente: POLIESTIRENO GEL, [Anónimo] Resina catiónica fuertemente acida. Purolite. Disponible en: <https://www.purolite.com/es/product-pdf/C100X10.pdf> [Consultado el 13 de enero del 2020]

1.3.4.6 Resistencia a la fractura. Al expandirse y contraerse la resina durante la regeneración o incluso el agotamiento puede generar un daño en los gránulos. De manera que al diseñar aparatos que funcionen en el intercambio iónico se debe pensar en la expansión y evitar excesiva tensión o abrasión mecánica de la resina.

El agua para ser ionizada a través de una RII debe estar libre de material suspendido y coloidal, de esta manera no es posible que se dañe o se fracture fácilmente, a su vez pueden obstruir la cama o causar canales donde el agua no se distribuya correctamente entre la resina.

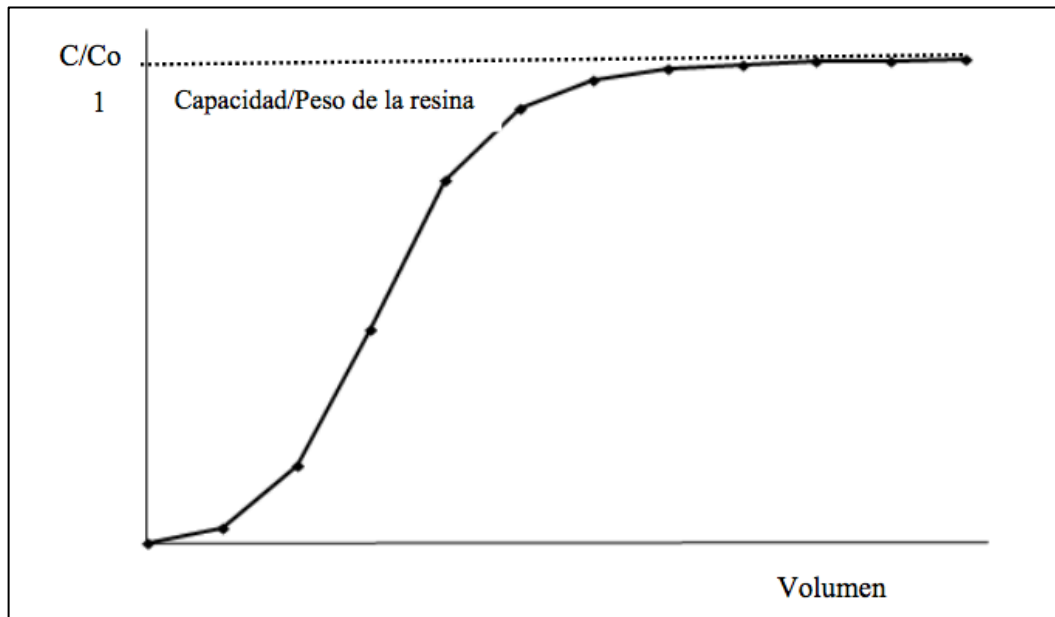
Finalmente, se podrían remover estas sustancias antes de entrar al lecho,³⁶ ya que al reducir la capacidad y disminución genera una vida útil.

³⁵ POLIESTIRENO GEL, Resina catiónica fuertemente acida. Purolite. Disponible en: <https://www.purolite.com/es/product-pdf/C100X10.pdf> [Consultado el 13 de enero del 2020]

1.3.4.7 Capacidad de la resina. Es la concentración de iones que pueden ser retenidos por una unidad de peso de resina, como también es un parámetro fundamental en la selección del intercambiador ya que se requieren capacidades para poder llevar a cabo el proceso.

La capacidad máxima de la resina se realiza intercambiado sus iones hasta ocupar los espacios libres que realizan el proceso de interacción, produciendo una reacción irreversible entre los iones salientes con los iones OH^- de tal forma, que si se va a tratar altas concentración de soluto la capacidad de la resina llegara a agotarse como se presenta en la **Ilustración 14**.

Ilustración 14. Grafica capacidad de intercambio respecto al volumen de la resina



Fuente: GILARRANZ R.M.A. Intercambio iónico. Universidad Autónoma de Madrid. 2008. [consultado el día 13 de enero del 2020] 1-10 p.

1.3.5 Etapa de regeneración para la resina. Al estar ya saturada la resina por el proceso de intercambio iónico se emplea la etapa de regeneración, la cual consiste en un retro lavado, regeneración y enjuague. Estas etapas son importantes debido a que si se aplica correctamente la resina comenzará nuevamente su ciclo de operación.³⁷

³⁶ CARBOTECHNIA, [sitio web]. México :OSMOSIS INVERSA.[consulta 14 de enero del 2020]<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa-y-membranas/que-es-la-osmosis-inversa/>

³⁷ INGENIERÍA DE TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUAS. [Anónimo] Resina de intercambio iónico. Disponible en sitio web: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/resinasintercambio7.pdf> [consultado el 14 de enero del 2020]

- **Retro lavado:** En esta etapa se hace circular el agua de alimentación al filtro, de arriba hacia abajo, después de ser usada sale por la parte inferior y es desechada.

El retro lavado tiene como finalidad la correcta distribución de la resina en la columna de intercambio iónico, para evitar la formación de canales preferenciales en el agua, por lo que disminuye la eficiencia y capacidad del filtro.

- **Regeneración:** Una vez ya realizado el retro lavado se procede a circular la solución regenerante según el tipo de resina. Por lo general, La cantidad de regenerante viene dada en las especificaciones por el proveedor.

La solución tiene contacto con la resina y ésta es regenerada, regresándola a su condición original para remover nuevamente la dureza de cierto volumen de agua que pasa por el filtro.

- **Enjuague:** Esta etapa tiene como finalidad eliminar las trazas del regenerante, para esto se hace fluir agua de alimentación de arriba hacia abajo, es decir en la forma normal de operación.

1.4 OSMOSIS INVERSA

Este proceso pertenece a uno de los tratamientos terciarios para utilizar en la eliminación hasta un 99% de sales disueltas (iones), partículas y bacterias.³⁸ La ósmosis es el movimiento de moléculas a través de una membrana parcialmente permeable porosa, que va de una región de menor a mayor concentración, en esta acción la membrana tiende a igualar las concentraciones en los dos lados. Este flujo de partículas solventes se dirige hacia la zona de menor potencial, a esto se le conoce como presión osmótica medible en términos de presión atmosférica.³⁹

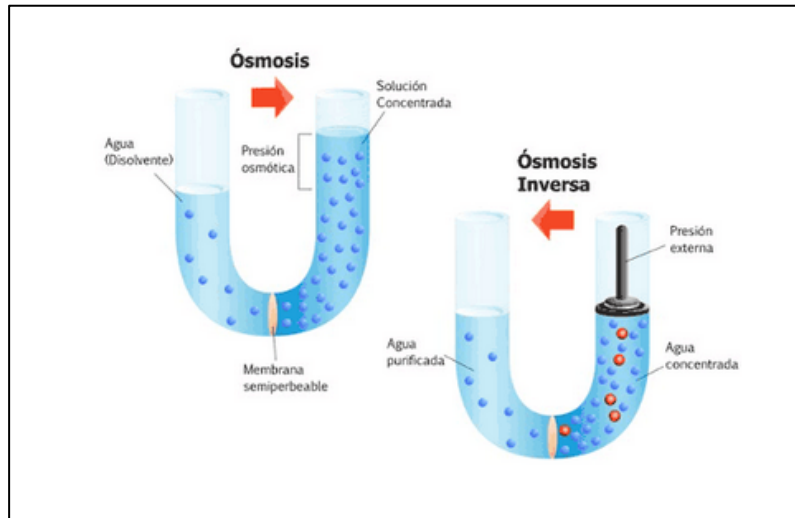
Debido al funcionamiento de este proceso, nunca se puede eliminar realmente del todo los contaminantes; este permite purificar una fracción del porcentaje, pero el contaminante nunca puede eliminarse por completo. Por otra parte, los costos de adquisición de la membrana son elevados y este sistema de tratamiento requiere una bomba de alto grado, ya que es fundamental la presión que se ejerce en la membrana para evitar la tasa de rechazo en este tipo de proceso.⁴⁰

³⁸ AFUEGOLENTO [Anónimo] Contaminantes que elimina la osmosis inversa. Disponible en sitio web: <https://www.afuegolento.com/articulo/que-contaminantes-eliminara-agua-osmosis-inversa/18914/> [consultado el día 14 de enero del 2020]

³⁹ LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo IV. Transporte a través de las membranas. p 22. [En línea:] <https://www.academia.edu/33143037/ANEJO_2_INTRODUCCIÓN_A_LA_OSMOSIS_INVERSA>

⁴⁰ PURE AQUA INC. Osmosis inversa & sistemas de tratamiento de agua. Disponible en sitio web: <https://es.pureaqua.com/que-es-la-osmosis-inversa/> [consultado el 14 de enero del 2020]

Ilustración 15. Diagrama de proceso de ósmosis y ósmosis inversa



Fuente: CARBOTECNIA, OSMOSIS INVERSA, México. Disponible en sitio web.: <<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa-y-membranas/que-es-la-osmosis-inversa/>>.[consulta 14 de enero del 2020

1.4.1 Transporte a través de las membranas de osmosis inversa. El modelo que se usa para realizar osmosis inversa es el de difusión. Según este modelo, cada componente de la solución a tratar se disuelve en la membrana según las leyes de distribución y equilibrio conocidas; difundándose debido a las diferencias de concentración y de presión existentes a ambos lados de la membrana.⁴¹

⁴¹ Ingeniería ROMIN, especialistas en agua. Ventajas de la filtración por osmosis inversa.2019. Disponible en sitio web: <https://romin.com/las-ventajas-la-filtracion-osmosis-inversa/> [consultado el 14 de enero del 2020]

Ilustración 16. Equipo para el proceso de osmosis inversa.



Fuente: INGENIERÍA ROMIN, especialistas en agua. Ventajas de la filtración por osmosis inversa.2019. Disponible en sitio web: <https://romin.com/las-ventajas-la-filtracion-osmosis-inversa/> [consultado el 14 de enero del 2020].

1.4.2 Clasificación de las membranas de osmosis inversa. Existen varias membranas utilizadas para osmosis inversa, en la cual su selección depende del tipo de agua que se va a tratar.

1.4.2.1 Clasificación Según su estructura. Estas presentan un corte transversal a la superficie en contacto de la solución a tratar, por tal motivo las membranas pueden ser:

Cuadro 3. Clasificación según su estructura.

Simétricas

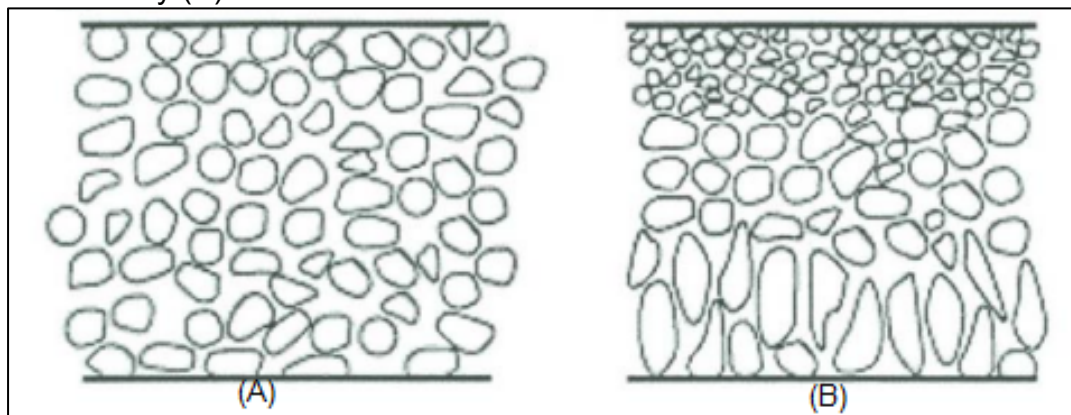
Estructura porosa uniforme en todo su espesor, presentan una elevada permeabilidad al solvente y bajo rechazo de sales, por lo que no son usadas para sistemas de osmosis inversa.

Asimétricas

Presenta una capa densa y delgada (Capa Activa) que impide el paso del soluto y también una capa de soporte para ofrecer resistencia.

Fuente: GONZÁLEZ, Diana Marcela y MARTÍNEZ, Lorena. Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio iónico con aplicaciones en celdas de combustible alcalinas. Trabajo de grado como requisito para optar el título de ingeniero Químico. Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2009.8p

Ilustración 17. Diagrama esquemático de una membrana con estructura (A) simétrica y (B) asimétrica



Fuente: GONZÁLEZ, Diana Marcela. MARTÍNEZ, Lorena. Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio iónico con aplicaciones en celdas de combustible alcalinas. Trabajo de grado como requisito para optar el título de ingeniero Químico. Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2009.9p

1.4.2.2 Clasificación de acuerdo a su forma. A nivel comercial, se encuentran membranas con diversas configuraciones geométricas, de manera que estas queden ensambladas en unos dispositivos denominados módulos de membrana, con el fin de adaptarse a las condiciones particulares según su utilidad, debido a que cada configuración de membrana tiene un comportamiento diferente con respecto a las sustancias que se encuentran en el agua a tratar.⁴²

Cuadro 4. Clasificación de las membranas según su configuración geométrica.

Planas	Tubulares	Fibra hueca
La capa activa es plana, para adoptarla en distintas formas según la función de la técnica.	Son construidas en forma de hueco, en donde la parte inferior del tubo se ubica en la capa activa.	Tiene la forma de un tubo capilar hueco en donde se dispone la parte exterior de la capa activa.

Fuente: CONDORCHEM ENVITECH. Filtración mediante membrana para el tratamiento de aguas residuales. Configuración de las membranas. Disponible en sitio web: <https://blog.condorchem.com/membranas-tratamiento-aguas-residuales/#:~:text=Las%20membranas%2C%20de%20forma%20tubular,que%20existan%20problemas%20de%20colmataci%C3%B3n.> [Consultado el 14 de enero del 2020]

⁴² AEDYR. Tipos de configuración y módulos de membranas. 2020. Disponible en sitio web: <https://aedyr.com/tipo-configuracion-modulos-membranas/> [citado el 14 de enero del 2020]

Cuadro 5. Características de las configuraciones de la membrana.

CARACTERISTICAS	ESPIRAL	FIBRA HUECA	TUBULAR	PLANAS
<i>COSTO /m²</i>	BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO
<i>DENSIDAD DE EMPAQUE (m³/m²)</i>	ALTA	MODERADA	UF-ALTA OI-MUY ALTA	MODERADA
<i>PRESION OPERACIÓN</i>	ALTA	ALTA	UF-BAJA OI-ALTA	ALTA
<i>OPCION DE POLIMEROS</i>	MUCHOS	MUCHOS	POCOS	MUCHOS
<i>RESISTENCIA AL ENSUCIAMIENTO</i>	ADECUADA	MEDIANA	UF-ADECUADA OI-ESCASA	ADECUADA
<i>FACILIDAD DE LIMPIEZA</i>	ADECUADA	MEDIANA	UF-ADECUADA OI-ESCASA	ADECUADA

Fuente: SAAVEDRA, Aldo y ROMERO, Julio. Aspectos generales sobre procesos y tecnologías de membranas. Departamento de ingeniería Química. Universidad de Santiago de Chile. Disponible en sitio web: <http://ambiente.usach.cl/jromero/imagenes/GUIAS%20MEMBRANA/Documento%201%20Antecedentes%20generales%20sobre%20membranas.pdf> [consultado el 14 de enero del 2020]

1.4.2.3 Clasificación según la carga superficial de las membranas. Los polímeros orgánicos con los que se fabrican las membranas de osmosis inversa tienen en su estructura molecular un exceso de grupos químicos que proporcionan una cierta naturaleza a la capa activa⁴³. A partir de esto las membranas pueden ser:

Cuadro 6. Descripción de las diferentes clasificaciones según la carga superficial de las membranas

Neutras	Catiónicas	Aniónicas
No presenta ninguna carga eléctrica.	Su superficie tiene carga eléctrica positiva.	Su superficie tiene carga eléctrica negativa.

Fuente: APLICACIÓN DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA AL TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR. ESTUDIO TÉCNICO Y DE VIABILIDAD ECONÓMICA. [Anónimo]. Disponible en sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13099/Mem%C3%B2ria.pdf> 51.p [consultado el 14 de enero del 2020]

⁴³ APLICACIÓN DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA AL TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR. ESTUDIO TÉCNICO Y DE VIABILIDAD ECONÓMICA. [Anónimo]. Disponible en sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13099/Mem%C3%B2ria.pdf> 51.p [consultado el 14 de enero del 2020]

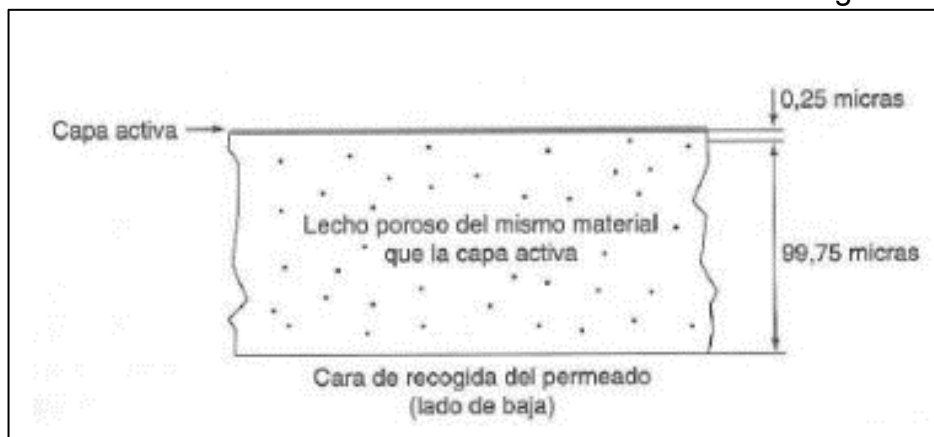
1.4.2.4 Clasificación Según la naturaleza de la membrana. Es un aspecto fundamental, ya que determinan el funcionamiento del proceso; en este caso la captura de las sales que se desean retener dependerá de su porosidad.

Cuadro 7. Clasificación según la carga superficial

Integrales	Capa fina
La capa activa y el lecho soporte tienen la misma composición química, solo difieren en el aumento progresivo de la porosidad.	La capa activa y el soporte son de diferentes materiales, proporcionando que cada capa pueda optimizarse por separado, adecuado para un resultado específico.

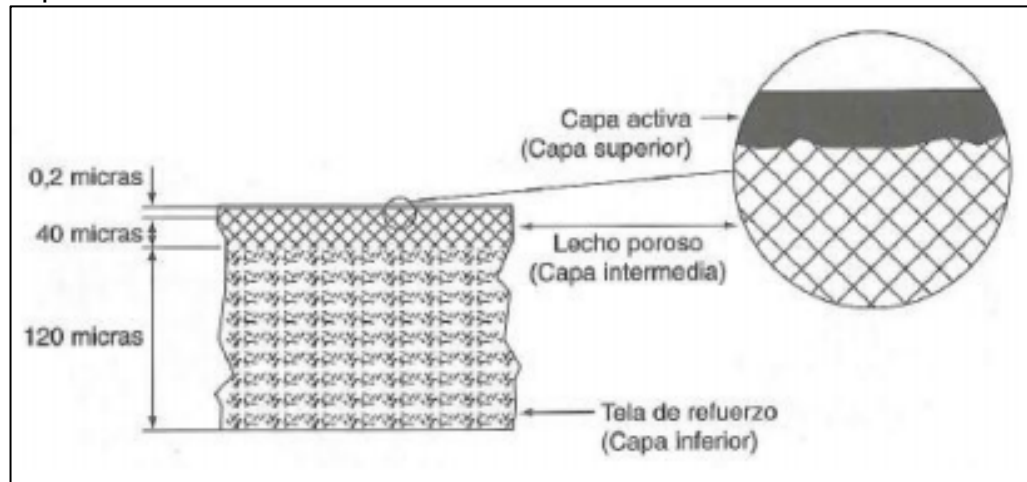
Fuente: BOHÓRQUEZ, Cesar y SARMIENTO, Diego. Análisis del uso de biorreactores de membrana para tratamiento de aguas residuales y posible implementación en Colombia. Universidad católica de Colombia. Bogotá, 2017.30p. Disponible en sitio web: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15221/1/TESIS%20MBR.pdf> [citado el 14 de enero del 2020]

Ilustración 18. Sección transversal de una membrana integral.



Fuente: APLICACIÓN DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA AL TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR. ESTUDIO TÉCNICO Y DE VIABILIDAD ECONÓMICA. [Anónimo]. Disponible en sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13099/Mem%C3%B2ria.pdf> 51.p [consultado el 14 de enero del 2020]

Ilustración 19. Sección transversal de una membrana compuesta de capa fina.



Fuente: APLICACIÓN DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA AL TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR. ESTUDIO TÉCNICO Y DE VIABILIDAD ECONÓMICA.[Anónimo] Disponible en sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13099/Mem%C3%B2ria.pdf> 51.p [consultado el 14 de enero del 20202]

1.4.2.5 Clasificación de las membranas a partir de su composición química.

Dentro del criterio de la composición química, se encuentra dos tipos de membranas las cuales son: membranas orgánicas e inorgánicas.

Las membranas orgánicas están formadas por una capa activa a partir de polímeros, estos materiales son abundantes, sin embargo, no todos son aptos para el tratamiento de osmosis inversa. Las membranas formadas a partir de materiales inorgánicos, tienen como objetivo corregir y mejorar las limitaciones de las membranas orgánicas.⁴⁴

⁴⁴ MARTÍNEZ, Palacio. Laura. Caracterización estructural y superficial de membranas micro porosas. Tesis de doctorado. Departamento de termodinámica y física aplicada. Universidad de Valladolid.2000. 3p.

Cuadro 8. Clasificación de la composición química en cada grupo de los tipos de membrana.

Orgánicas	Inorgánicas
Acetato de celulosa Triacetato de celulosa Poliamidas aromáticas Poliéter-Urea Poliacrilonitrilo Polifunado sulfonado	Cerámicas Vidrios Fosfacenos Carbonos

Fuente: MARTÍNEZ, Laura. Caracterización estructural y superficial de membranas micro porosas. Tesis de doctorado. Departamento de termodinámica y física aplicada. Universidad de Valladolid.2000. 5p.

1.4.2.6 Clasificación Según la presión de trabajo.

- Muy baja presión: funciona o trabaja entre 5 y 10 bares. Utilizadas para tratar el agua residual con bajas concentraciones de sales entre 500-1500mg/L.
- Baja presión: funciona entre 10 y 20 bares. sirve para tratar aguas con alto contenido de sales entre 4000-10000 mg/L.
- Media presión: funciona entre 20 y 40 bares. Se utilizan para tratar agua con alto contenido de sales entre 4000-10000 mg/L
- Alta presión: funciona para obtener agua potable a partir de agua de mar, trabaja entre 50 y 80 bares.

1.5 ELECTRODESIONIZACIÓN

La electrodesionización hace parte de los tratamientos terciarios empleados en aguas, es un proceso que emplea una combinación de membranas, resinas de intercambio iónico y un campo eléctrico de corriente continua para des ionizar el agua.

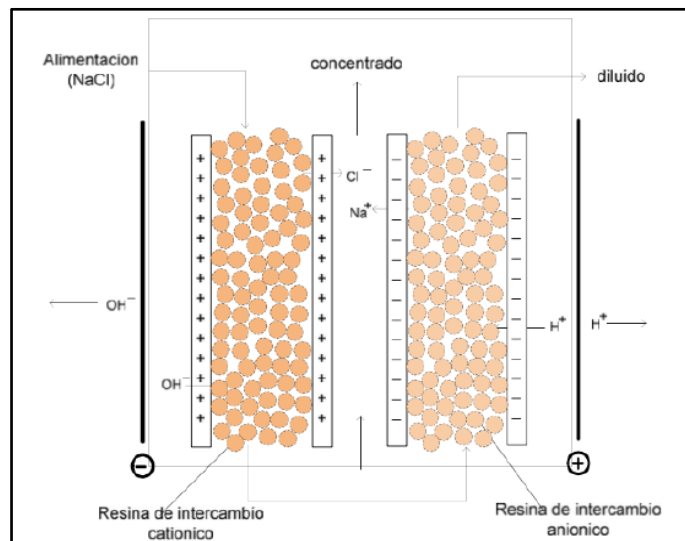
Los diseños estándar para obtener agua purificada y agua de alta pureza emplean una combinación de ósmosis inversa y electrodesionización en continuo; con este diseño el proceso CEDI puede producir agua en concentraciones de iones específicos, cercanas o inferiores a los límites de detección. En la actualidad El

proceso CEDI está ampliamente aceptado para la producción de agua de alta pureza en la industria energética, farmacéutica y microelectrónica.⁴⁵

Además, este proceso es uno de los que presenta mayor costo de adquisición ya que requiere una membrana y resina de intercambio, este proceso necesita de energía eléctrica para realizar la transferencia de los iones desde la solución menos concentrada hacia la más concentrada, en la cual al eliminar el soluto se produce una purificación del disolvente, diferente a lo que ocurre utilizando osmosis inversa, en el que el solvente se transporta a través de la membrana al mismo tiempo que al soluto se le impide el paso.⁴⁶

1.5.1 Equipo de electrodesionización. El equipo del mecanismo de electrodesionización posee unas membranas semipermeables aniónicas y catiónicas alternadas y entre ellas unos espacios denominados cámaras, la cual están rellenas de resinas de intercambio iónico, para permitir la entrada y salida del agua residual que se va a tratar.

Ilustración 20. Mecanismo de un equipo de electrodesionización



FUENTE: MEDINA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. [sitio web]: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1066>

⁴⁵ SANZ, Joan y GARCÍA, Idoia. VEOLIA WATER SYMTEM IBERICA. [Consulta 14 de enero del 2020] [sitio web]. http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/17802,Energiza_mayo_2011-2.pdf

⁴⁶ CONDORCHEM ENVITECH. Electrodiálisis (ED) y electrodiálisis reversible (EDR). 2020. Disponible en sitio web: <https://condorchem.com/es/electrodesionizacion/> [consultado el 14 de enero del 2020]

1.5.2. Elementos de la celda de electrodiálisis.

- **Electrodos:** corresponden a dos placas rectangulares de diferente material metálico, resistente a la corrosión y a la deposición de películas orgánicas no conductoras.⁴⁷ Estas placas son metálicas debido a que son materiales altamente conductivos, que por lo tanto facilitarían la distribución de corrientes y potencial aplicada al proceso de electrodesionización.
- **Espaciadores:** corresponden a una malla de material plástico que se ubican entre cada par de membranas, con el fin de evitar deposiciones de materiales en la superficie de las membranas y homogenizar la concentración.⁴⁸
- **Celda de concentración:** la celda de concentración es aquella en donde se sitúan los iones (aniones o cationes) que fueron transportados a través de las membranas por efecto de la corriente eléctrica, formando una solución electrolítica concentrada.

Es importante tener en cuenta que, si supera el límite de la concentración de iones calcio, carbonatos y sulfatos en la celda, estos pueden precipitar en las membranas, aumentar su resistencia eléctrica y disminuir su selectividad.⁴⁹

- **Celda de dilución o permeado:** es la celda en donde se obtiene el producto deseado, es decir, un agua con bajos niveles de impurezas.
- **Par de celda:** es el elemento básico para construir una pila de electrodesionización compuesto por membranas de Intercambio catiónico, espaciador del diluido, celda de dilución, membrana de intercambio aniónico, espaciador del concentrado y celda de concentración.⁵⁰

⁴⁷ ARMAU, Cesar. Diseño de una planta de producción de agua de proceso para una central térmica de ciclo combinado. Universidad Jaume I. Escuela superior de tecnología y ciencia experimentales. Julio de 2015. Capítulo 6. Análisis de soluciones P 36.

⁴⁸ Ibid., p 68.

⁴⁹ Ibid., p 71

⁵⁰ MEDINA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de ingeniería química y textil. Tesis para optar por el grado de maestro en ingeniería de procesos. Lima-Peru. 2009 p 69 [sitio web]: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1066>

1.6 MARCO NORMATIVO

Este trabajo busca la disminución de compuestos provenientes de una de las piscinas del ITP, la cual al cumplir su ciclo operativo son vertidos al río Chicamocha.

Al realizarle los estudios pertinentes, Corpoboyacá indica que algunos compuestos no están dentro de los parámetros característicos de los vertimientos. Teniendo en cuenta los artículos establecidos por el Gobierno Nacional, se toma como referencia la siguiente resolución:

Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015, del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, “Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. Se debe aclarar que este tipo de Norma no rige completamente, ya que se trata de un vertimiento, pero no de agua dulce por ende no se encuentra algún artículo que estipule la normativa para aguas termo minerales.

2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL ITP, PAIPA-BOYACÁ

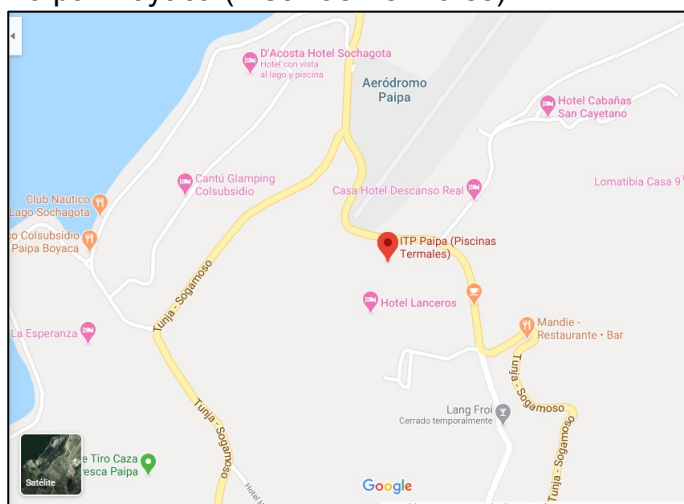
Estas aguas al cumplir su función en el instituto de turismo de Paipa se vierten completamente al río Chicamocha, no cumplen con los estándares requeridos por la entidad Corpoboyacá en el momento de verter el agua usada dentro de las piscinas, puesto que contiene altos niveles de iones sulfatos y cloruros; es de esta manera que se busca realizar una reducción en los parámetros a través del proceso de intercambio iónico, evitando el aumento en los niveles de estos componentes y daños en los cultivos aledaños.

En este capítulo se realiza una descripción de las aguas termales provenientes de aguas subterráneas que se calientan al llegar a cierta profundidad y que suben a la superficie del llamado pozo azul, el cual abastece las piscinas del complejo acuático del ITP. A continuación, se describe cualitativa y cuantitativamente una de las piscinas más recurrentes por los usuarios la cual es la piscina olímpica y sus generalidades.

2.1 GENERALIDADES

El Instituto de Turismo de Paipa está ubicado en Paipa-Boyacá, a 4 Kilómetros del casco urbano, vía monumento a los lanceros del pantano de Vargas, municipio situado en el centro-oriente de Colombia, se dedica al turismo, bienestar y salud en espacios de descanso y relajación.

Ilustración 21. Ubicación en Google Maps ITP Paipa- Boyacá (Piscinas Termales)



Fuente: Google (s.f) Mapa de las Piscinas Termales ITP disponible en sitio web <https://goo.gl/maps/ev2SGNwzf5xjNpcE6> [citado el 10 de Julio del 2020]

Esta entidad cuenta con una afluencia natural de agua termo-mineral que brota del llamado Pozo Azul (**Ilustración 22**), el cual abastece las piscinas y al cabo de un tiempo estas son vertidas a una fuente natural con un caudal de 0.956 L/s, dato recolectado del ITP.

Ilustración 22. Pozo azul de Paipa ubicado al costado izquierdo del ITP



Fuente: elaboración propia INSTITUTO DE TURISMO DE PAIPA

Ilustración 23. Vista superior del complejo acuático ITP Paipa-Boyacá



Fuente: Instalaciones del instituto de turismo de Paipa

Las aguas termales de Paipa son uno de los grandes atractivos de la ciudad debido a que tiene un alto flujo de visitas por personas de diferentes regiones de Colombia y extranjeros, además, estas aguas contienen varios minerales que brindan beneficios curativos generando grandes aportes a la salud gracias a sus

propiedades. Por ello, se considera que las piscinas termo minerales de Paipa son muy reconocidas en comparación de otras ubicadas en Colombia.

2.2 GENERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL INSTITUTO DE TURISMO DE PAIPA

Hoy en día la generación de aguas residuales es una actividad común que puede ser dada mediante una acción humana e industrial. El uso de las piscinas termo minerales, generan unos parámetros que al momento de verterlos por el ducto presentan ciertos valores que no corresponden a lo que Corpoboyacá tiene como referencia, ocasionando unos cambios físicos y químicos en el agua, esto se debe a su alto contenido de sulfatos y cloruros, además de otros minerales.

Estas aguas minerales son producto de fallas de la tierra, en la cual van adquiriendo diferentes temperaturas debido a las profundidades que presentan, de manera que cuando sube a la cabida terrestre lo hace en forma de vapor y luego se condensa al instante que llega a la superficie con una temperatura alta que sobrepasa los 50°C.⁵¹

Su caracterización se basa en los altos valores de minerales tales como sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl^-), en donde es necesario una disminución de estos minerales antes de ser vertidas a cuerpos de aguas superficiales, con el fin de preservar el medio ambiente. No obstante, al implementar un tratamiento de aguas residuales termo minerales es de gran importancia tener un amplio conocimiento de las características fisicoquímicas del efluente.

2.3 FACTORES DE CALIDAD DEL AGUA

Las características del agua potable se encuentran reguladas por el decreto 1575 del 2007, la cual cumple con ciertas características físicas, químicas y microbiológicas para el consumo humano.

⁵¹ NEXCIENCIA. [Anónimo] [consultado el 18 de enero del 2020][sitio web]:<https://nexciencia.exactas.uba.ar/aguas-termales-risso-geologia>

Ilustración 24. Parametros esenciales para el agua potable, según la resolución 2115 del 2007

Resolución 2115 de 2007	
Características Físicas	Valor Máximo Aceptable
Color aparente	15
Olor y Sabor	Aceptable
Turbiedad	2
Características Químicas	Valor Máximo Aceptable
Cloro residual	0.3 a 2.0
pH	6.5 a 9.0
Carbono Orgánico Total	5.0
Nitritos	0.1
Nitratos	10
Alcalinidad Total	200
Cloruros	250
Aluminio	0.2
Dureza Total	300
Hierro Total	0.3
Manganeso	0.1
Sulfatos	250
Coliformes totales	0 UFC/100 cm ³
Coliformes fecales	0 UFC/100 cm ³
Mercurio	0,001
Cianuro libre y disociable	0,05
Características microbiológicas	Valor Máximo Aceptable
Coliformes Totales	0
Escherichia coli	0
Mesófilos	≤ 100

Fuente: Calidad del agua en los sistemas operados por aguas regionales EPM S.A. Disponible en sitio web: <https://www.grupo-epm.com/site/portals/23/documentos/Boletines/ABC-%20Calidad%20de%20Agua.pdf> [consultado el 18 de enero del 2020]

A continuación, se mencionan los principales factores de la calidad del agua:

- **DBO:** Demanda biológica de oxígeno, definida como la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para llevar a cabo la degradación de materia orgánica.⁵²

⁵² GALEANO, Lady y ROJAS Vivian. Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Vélez -Santander. Universidad Católica de Colombia; 2016.

- **Cantidad de iones cloruro:** Es un indicador de cantidad de los contaminantes a las actividades industriales o cargas minerales en aguas termales.
- **Cantidad de grasas y aceites:** las grasas son un componente que están presentes en mayor o menor medida en todas las aguas residuales en la cual producen incrustaciones en las tuberías, además tienen tendencia a flotar debido a que su densidad es inferior a la del agua complicando la degradabilidad de estas.

Su diseño se fundamenta en la capacidad de almacenamiento requerido por kg de grasa. Por lo general, son pozos de flotación donde la grasa y aceites son retenidas en la superficie, mientras que el agua libre de grasas sale por una descarga inferior, el costo de este tratamiento es bajo en comparación con otros tratamientos y muy efectivo si se realiza de la forma adecuada pues es similar a un tanque séptico.⁵³

- **Cantidad de sulfatos:** Estos componentes no tiene un valor máximo permisible para aguas termales, sin embargo, la entidad Corpoboyacá requiere una disminución de estos componentes.

2.4 DIAGNÓSTICO DEL AGUA VERTIDA POR EL INSTITUTO DE TURISMO DE PAIPA

De acuerdo con este proyecto se requiere disminuir el porcentaje de los sulfatos y cloruros presentes en el agua termo mineral, puesto que al verter esta agua llega al río Chicamocha provocando un aumento en los niveles del agua, generando así, un impacto ambiental en los cultivos aledaños quienes lo usan como suministro.

El objetivo principal de este proyecto, está orientado en lograr disminuir los parámetros anteriormente mencionados, teniendo en cuenta un análisis cualitativo y cuantitativo, que parten de la caracterización fisicoquímica realizada en el ITP.

Corpoboyacá entidad encargada del control y monitoreo de la parte ambiental, exige cierta disminución de parámetros para el vertimiento de estas aguas termo minerales, al no llegar a reducir los contaminantes en la salida del agua, negara el permiso de vertimiento; debido a que contaminan un cuerpo de agua superficial, generando multas al ITP e incluso el cierre total de la actividad de las piscinas termales que es su mayor atractivo.

2.5 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL

⁵³ LIZARAZO Jenny y Orjuela Martha. Sistema de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Monografía para optar el título de especialización en administración en salud pública. Facultad de medicina, Especialización en administración en salud Publica, Universidad Nacional de Colombia;2013. [sitio web]: <http://bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>

En el ITP se desarrollan dos pruebas fisicoquímicas por año en donde se determina si se incumplen algunos factores frente a los valores según su proporción con respecto al pozo azul.

Corpoboyacá ha indicado, que en los últimos años los valores obtenidos en estas pruebas no cumplen con el proceso de vertimiento; por lo tanto, estas aguas termo minerales no cuentan con una normatividad que las rija, sin embargo, requieren un control que no afecten las fuentes hídricas, para ello se apoyan en la resolución 0631, que menciona los parámetros que se encuentran presentes en aguas dulces.

2.5.1 Análisis de resultados frente al marco legal de vertimiento. Podemos observar en la tabla 2 que, en el año 2019 al no disponer de algún tipo de tratamiento, los parámetros del pozo azul como en el ducto de la salida de la piscina, no cumplen de acuerdo a la Resolución 0631. Sin embargo, al ser aguas naturales no presenta ninguna norma que restrinja la calidad del agua, pero se asemeja a dicha resolución al ser un vertimiento.

Tabla 2. Resultados fisicoquímicos del año 2019

Parámetros	Resolución 0631/2015	Pozo Azul	Ducto de salida piscinas
Temperatura (°C)	< 40	41,4	19,7 - 37,6
pH	6,0 - 9,0	6,9	6,94 - 8,94
Sulfatos (mg SO ₄ ⁻² /L)	250	626	609
Cloruros (mg Cl/L)	250	5209	5261

Fuente: elaboración propia

Corpoboyacá estableció que para la prevención de las fuentes hídricas y cultivos es necesario controlar los vertimientos de empresas ya que generan un gran impacto ambiental. Por tal razón, esta entidad controla y regula los vertimientos del ITP.

De acuerdo a la resolución 0631 mencionada anteriormente se establece que se debe reducir los iones cloruros y sulfatos a un valor de 250 mg/L, implementando un tratamiento eficaz y rentable que logre cumplir estos requisitos. A partir de esto, el ITP genera posibles soluciones que puedan tratar estas aguas termales de manera rentable, por lo que se implementa este proyecto como una posible solución a este problema.

Para la caracterización de estas aguas es muy importante saber su contenido de metales, iones y sales, de tal manera que permita identificar cuantitativamente los valores de cada elemento que la componen. Es por eso, que el ITP se encarga de tomar las caracterizaciones del agua dos veces al año, con el fin de controlar y monitorear estos parámetros para sus vertimientos.

En los últimos años los resultados de las caracterizaciones han sido diversos, debido a que estas aguas por su naturaleza varían en sus composiciones, por tal razón se evidencia una variación en los diferentes años para cada mineral como también su pH. Así mismo, se debe tener en cuenta que para cada toma de muestra se va a tener diferentes resultados, de manera que en los históricos del año 2016 al 2020 se evidencia variaciones aproximadamente 1000 mg Cl⁻/L y mas de 6000 mg SO₄²⁻/L.

En la **tabla 3**, se encuentran los volúmenes de cada piscina, cada una presenta una distancia de 10 metros y una temperatura de 37°C. Para mantener su temperatura, todas las noches bajan el nivel del agua a la mitad, la otra mitad restante la llenan directamente del pozo azul, ya que esta viene con una temperatura de 74°C, con el objetivo de homogenizar el agua a una temperatura no muy alta.

Tabla 3. Volumen de cada piscina del ITP

Piscinas	Volumen (m³)
Olímpica	355
Panorámica	376
Cisnes	261
Centro terapia	147.41
Biomédico	46.67
Spa termal	95.72

Fuente: elaboración propia

3. DESCRIPCIÓN Y VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA LA DISMINUCIÓN DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS PROVENIENTES DEL ITP

En este capítulo se llevará a cabo la selección del tratamiento para la realización de las pruebas experimentales, a partir de la bibliografía previamente revisada con el fin de seleccionar la mejor resina posible para las aguas termales, y lograr disminuir ciertos parámetros como ya se ha hablado en los anteriores capítulos.

3.1 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO A IMPLEMENTAR PARA AGUAS RESIDUALES

Los tratamientos para aguas residuales se dividen de acuerdo a su clasificación y su utilización final. Teniendo en cuenta lo mencionado en el marco teórico existen tres etapas, las cuales corresponden a un proceso primario, secundario y terciario.

Para el caso de las aguas termales de Paipa, no se ha implementado ningún tipo de tratamiento debido a que no se tenía ningún control por ninguna entidad; sin embargo, en la actualidad existe una preocupación ambiental frente a sus vertimientos puesto que el agua posee ciertos parámetros con altos valores que alteran la diversidad en la fauna y flora.

Entidades como Corpoboyacá exige una disminución de sulfatos y cloruros a la salida de las piscinas; por tal motivo, es indispensable aplicar un tratamiento terciario que reduzca cantidades apreciables de estos iones. A partir de la revisión bibliográfica no se encontró ningún tratamiento primario o secundario que lograra la disminución de estos compuestos, debido a que estos métodos funcionan para la remoción de DBO solubles y sólidos de gran tamaño.

Por tal razón, se quiere implementar algunos de los tratamientos terciarios en los cuales se encuentran los siguientes procesos:

- Intercambio iónico
- Osmosis inversa
- Electrodesionización

De estos tres métodos se debe realizar una selección adecuada a partir de una Matriz Pugh, teniendo en cuenta datos cuantitativos y cualitativos que permitan comparar los tres procesos que hacen parte del tratamiento terciario, por medio de unos criterios establecidos que favorezcan la disminución de iones sulfatos y cloruros.

A partir de los criterios aplicados, se propone un signo negativo con el fin de evidenciar la insatisfacción de las necesidades requeridas entre el método y su respectivo factor. Se plantea un signo positivo si se da el cumplimiento a los

estándares respectivos, así mismo se establece ciertos valores porcentuales según el grado de importancia de cada uno de los ítems a evaluar indicados en la **tabla 4**, de tal manera que se efectúe una puntuación comparando las tres alternativas planteadas.

- **Costo de implementación y desarrollo:** Criterio importante para la implementación del tratamiento con el fin de que el proceso que se seleccione se encuentre más asequible para la empresa ITP, es decir, la capacidad de alcance de inversión para actividades como: construcción y mano de obra, también los costos de operación como insumos.
- **Factibilidad:** criterio en el cual se evalúa la disponibilidad de los recursos y terreno que tiene la empresa con el tratamiento seleccionado.
- **Confiabilidad:** criterio que evalúa el cumplimiento del tratamiento para la mejora del efluente.
- **Reducción de iones sulfatos y cloruros:** se evalúa este criterio ya que es un objetivo principal para la elaboración de este proyecto.
- **Costo de mantenimiento:** precio en el cual se conservará el tratamiento seleccionado para su conservación, no deberá ser tan elevado para poderlo implementar.
- **Características del efluente:** factor importante que depende de acuerdo a su composición y caudal del agua para la selección del tratamiento que no afecte las condiciones operacionales del proceso, ya que este trabajara con las condiciones iniciales del agua termal.⁵⁴

⁵⁴ Iagua. Factores para evaluar para la elección y selección de operaciones y procesos en el diseño de una PTAR. Venezuela. [consulta 20 enero del 2020] [sitio web]:<https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/factores-evaluar-eleccion-y-seleccion-operaciones-y-procesos-diseno-plan>

Tabla 4. Matriz de Pugh

TRATAMIENTOS TERCARIOS				
CRITERIOS	%	OSMOSIS INVERSA	INTERCAMBIO IONICO	ELECTRODESIONIZACION
Costo de implementación y desarrollo	20%	-1	+1	-1
Factibilidad	20%	+1	+1	+1
Confiabilidad	10%	-1	+1	-1
Reducción de iones sulfatos y cloruros	25%	+1	+1	+1
Costo de mantenimiento	10%	-1	-1	+1
Características del efluente	15%	-1	+1	-1

Fuente: QUIMBAYO CASALLAS, María. DUARTE BLANCO, Yamid. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, e n la vereda el Vijal municipio de San-Mateo, Boyacá. tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Químico. Fundación universidad de América,2019. 73.p [En línea]: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7590/1/6142412-2019-2-IQ.pdf>

Nota: Cada uno de los criterios fueron analizados por las 3 alternativas, en el cual al ser signo negativo (-1) significa que no satisface el cumplimiento de este criterio y con signo positivo (+1) significa que satisface el cumplimiento de este criterio.

Aplicando el porcentaje de importancia, se obtiene la tabla ponderada para la selección del tratamiento. (**Tabla 5**)

Tabla 5. Matriz ponderada de Pugh

TRATAMIENTOS TERCARIOS				
Criterios	%	Osmosis inversa	Intercambio iónico	Electrodesionización
Costo de implementación y desarrollo	20%	-20	+20	-20
Factibilidad	20%	+20	+20	+20
Confiabilidad	10%	-10	+10	-10
Reducción de iones sulfatos y cloruros	25%	+25	+25	+25
Costo de mantenimiento	10%	-10	-10	+10
Características del efluente	15%	-15	+15	-15
Suma positivos	100 %	45	90	55
Suma negativos		-55	-10	-45
Suma general		-10	80	10

Fuente: QUIMBAYO CASALLAS, María. DUARTE BLANCO, Yamid. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San-Mateo, Boyacá. tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Químico. Fundación universidad de América, 2019. 74.p [En línea]: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7590/1/6142412-2019-2-IQ.pdf>

Mediante este método Pugh, se puede observar que el tratamiento de intercambio iónico es el que mejor se asimila a los requerimientos planteados para la empresa ITP, como se evidencia los tres métodos terciarios cumplen con la reducción de iones sulfatos y cloros, sin embargo, la mejor alternativa para la realización de este proyecto es el uso de resinas para el intercambio iónico. Además, este cumple con la mayoría de los criterios establecidos en la matriz con respecto a los otros dos tratamientos.

Según la literatura los métodos de electrodesionización y osmosis inversa se usan para altas purificaciones de agua; es decir, procesos de potabilización, la cual en este proyecto no se requiere ya que el agua se va a verter al río.

Adicionalmente, el proceso de osmosis inversa y electrodesionización son procesos costosos en cuanto a su implementación, ya que estos necesitan presiones altas mediante su proceso de operación llevando a un alto consumo de energía⁵⁵, por supuesto que su implementación es más compleja por lo tanto requiere de ayuda profesional por los equipos tecnológicos que los conforman. Razón por la cual estos incrementarían sus costos y lo hacen menos factibles para implementar los como procesos.

Las resinas del intercambio iónico son económicas, además su adaptación es fácil antes situaciones específicas, sin olvidar que su operación y manejo es sencillo ya que no se necesita de un control riguroso al momento de su operación. Por otra parte, se soporta la elección de la alternativa de intercambio iónico frente a otros tratamientos sugeridos y encontrados en la literatura **tabla 6**, para la reducción de iones sulfatos y cloruros.

Tabla 6. Tratamientos recomendados para aguas residuales

Constituyente	Concentración limitante	Tratamientos recomendados
Sólidos en suspensión	< 124 mg/L	Lagunas, sedimentación, flotación
Aceites y Grasas	>100 mg/L	Flotación
Metales pesados	1-10 mg/L	Precipitación o intercambio iónico
Alcalinidad	0,5 kg CaCO ₃	Neutralización de la alcalinidad
Acidez	Acidez mineral libre	Neutralización de la alcalinidad
Sulfuros	>100 mg/L	Precipitación o desgasificación
Cloruros	8000-2500 mg/L	Dilución
Fenoles	70-160 mg/L	Desgasificación-Mezcla completa
Amoniaco	>1600 mg/L	Dilución ajuste de pH y desgasificación

⁵⁵ SANZ, Joan.; GARCÍA, Idoia. VEOLIA WATER SYMTEM IBERICA. (s.f) [Consulta 14 de enero del 2020] [sitio web].http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/17802,Energiza__mayo_2011-2.pdf

Tabla 6. (Continuación)

Sales disueltas	>16000 mg/L	Dilución intercambio iónico
-----------------	-------------	-----------------------------

Fuente: RENDON, Claudia. Criterios de selección para el tratamiento de las aguas residuales. Relación constituyente, limitante, tratamiento. [citado el 20 de Enero del 2020] [En línea]: <https://es.slideshare.net/carodiaz7906/captulo-3-criterios-de-seleccin-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales>

Como se observa en la **tabla 6**. El intercambio iónico es el sugerido al ser estos compuestos sales disueltas, de tal manera es pertinente este tratamiento para la disminución de iones sulfatos y cloruros como objetivo del presente proyecto, de manera que no se presenten inconvenientes de operaciones por concentraciones de sales que puedan afectar de manera negativa el proceso.

3.2 ESTUDIO DE LA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO COMO ALTERNATIVA

Al realizar un análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua termal en la salida de las piscinas y compararlo con los parámetros del pozo azul, se concluyó que no se puede generar vertimientos de estas aguas ya que desembocan al río Chicamocha, con altas cantidades de iones sulfatos y cloruros de manera que la entidad Corpoboyacá actúa como agente regulador exigiendo la reducción de estos parámetros, por medio de una caracterización realizada y demostrada en el anterior capítulo.

Corpoboyacá se basa en la Resolución 0631⁵⁶ pero no en su totalidad, debido que para aguas termales no existe norma o resolución que controle y describa netamente sus parámetros, por lo siguiente manifiesta su inconformidad ante esta situación y exige una reducción significativa de estos iones con el fin de verterla. Por ende, se hace necesario implementar un tratamiento terciario que proporcione esa reducción de iones en el efluente para llevarlo a cabo con los requerimientos dichos por la entidad y que a su vez sea sencilla su puesta en marcha.

Para ello se plantea la alternativa de un tratamiento como es el intercambio iónico, utilizando un sistema de resinas que pueda cumplir con el objetivo planteado en el presente proyecto.

⁵⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. RESOLUCIÓN 0631 DE 2015, MARZO 17. 18 de Abril del 2015. Disponible en sitio web: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf [citado el día 20 de enero del 2020]

El principio fundamental del intercambio iónico es la transferencia de uno o más iones de la fase líquida al sólido mediante intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas o grupos funcionales superficiales.⁵⁷ Las resinas generalmente son de material sintético basadas en un copolímero de estireno-divinilbenceno, son sólidos insolubles al agua y tiene una forma esférica de 0,3 a 1,3 mm de tamaño.⁵⁸ Adicionalmente las resinas son muy estables químicamente como también su regeneración es de alto rendimiento.⁵⁹

Ilustración 25. Esferas de resina aniónica para su utilización en intercambio iónico.



Fuente: ALIBABA. TRATAMIENTOS DE AGUAS, QUELANTES DE RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO. [Anónimo] Disponible en sitio web: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/chelating-ion-exchange-resin-62350190950.html?spm=a2700.7735675.normalList.65.771a13d4pEQiy&s=p&s=p> [consultado el 20 de enero del 2020]

3.2.1. Referencias de resinas para su posible implementación. En el *cuadro 9*. Se presenta información de empresas que pueden suministrar resinas aniónicas

⁵⁷MARTÍNEZ, Joelha. Tratamientos de aguas residuales e intercambio iónico. Issu, marzo 212. [citado el 20 de Enero del 2020][sitio web]: <https://issuu.com/joelmartinez/docs/revistavirtual>.

⁵⁸Ibid,p.2

⁵⁹ PROPIEDADES DE LAS RESINAS INTERCAMBIADORAS DE IONES. Estabilidad. 12 de octubre del 2017. [citado el 20 de Enero del 2020][sitio web]: http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html#particle_size

de base débil útiles para el desarrollo de la experimentación, de manera que sea posible la implementación del intercambio iónico.

Cuadro 9. Empresas con resinas disponibles

Empresas distribuidoras	Referencia de la resina
Biocidas y Químicos S.A.S	• LEWATIT MONO PLUS MP68
Universal Osmosis S.A.S	• AMBERLITE IRA 402 CI
GSA (Gestión y soluciones ambientales de Colombia)	• LEWATIT MONOPLUS M500 LEWATIT MONOPLUS M600

Fuente: elaboración propia con base a la empresa BIOCIDAS Y QUÍMICOS S.A.S

3.2.2 Pasos de selección de la resina de intercambio iónico. Para los criterios de selección de la resina se tiene en cuenta algunas características como factores económicos y requerimientos para su buen funcionamiento. Teniendo en cuenta el tipo de agua que se va a tratar se escogen siete criterios de selección los cuales son:

- **Capacidad de intercambio.** Corresponde al número de sitios activos donde el intercambio iónico tiene lugar durante un ciclo⁶⁰, es uno de los criterios más importantes para la elaboración, ya que al conocer la capacidad que tiene, se pueden obtener mejores resultados de disminución de contaminantes y con esta propiedad determinar el volumen requerido de resina para tratar una determinada cantidad de agua.⁶¹
- **Agente regenerante.** Se debe tener en cuenta si es accesible para su venta, ya que influye los costos al aumentar o disminuir su elaboración en el proceso.

⁶⁰ DARDEL.François propiedades de las resinas. Capacidad de intercambio total y útil [En línea] http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html#particle_size [citado el 21 de enero del 2020].

⁶¹ LAMBRANO, Jair y MOTTA HERNÁNDEZ Angie. Diseño y montaje de un tren de intercambio iónico para el laboratorio de operaciones unitarias de la universidad de San Buenaventura, seccional Cartagena. Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de ingeniero Químico.2018. Disponible en: http://45.5.172.45/bitstream/10819/6926/1/Dise%C3%B1o%20montaje%20tren%20de%20intercambio_Jair%20Lambra%C3%B1o_2018.pdf

Al utilizar una resina aniónica el agente regenerante común es la soda caustica (NaOH), el cual se debe conocer la cantidad que se va usar para cada una de las resinas que se encuentran disponibles en el mercado.

- **Disponibilidad.** Factor que se debe tener en cuenta al momento de desarrollar la parte experimental, conocer si la resina está disponible para su compra en el mercado local o adquirirla mediante un trámite de importación.
- **Volumen de presentación.** Depende de las empresas ya que por lo general la mínima cantidad de venta es de 5L, sin embargo, para otras empresas su venta mínima es un saco de 25L.
- **Costos de adquisición.** Se relaciona con el volumen de presentación, en este caso se debe tener en cuenta si al comprar mayores cantidades su costo sería menor. Adicional a ello, permite determinar si la elaboración del proyecto es viable, y así poderlo desarrollar a futuro en dimensiones a escala industrial.
- **Porcentaje de retención de agua.** Las resinas de intercambio iónico son susceptibles de sufrir hinchamiento; por lo tanto, se debe considerar este factor indispensable para evitar posibles problemas operacionales una vez implementado el proceso. Esta propiedad está ligada a la porosidad ya que al ser muy alta proporciona un acceso más fácil a iones de gran tamaño.⁶²
- **Vida útil.** Cuando se cumple cierta cantidad de ciclos de intercambio iónico las resinas empiezan a perder sitios activos y sufrir rupturas, de esta manera disminuye la capacidad de intercambio. La mayoría de los autores asignan que la vida útil de las resinas es de 5 a 10 años, pero esto depende también de la calidad de agua que se va a tratar.

En la **Tabla 7** se presentan las características de resinas consultadas en diferentes empresas que servirán para la selección de la resina de intercambio iónico.

⁶² QUIMBAYO CASALLAS, María. DUARTE BLANCO, Yamid. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, en la vereda el vijal municipio de San-Mateo, Boyacá. Tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Químico. Fundación universidad de América, 2019 [consultado el 21 de enero del 2020]. [En línea]: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7590/1/6142412-2019-2-IQ.pdf>

Tabla 7. Factores relevantes para la selección de la resina de intercambio iónico

Resina comercial	Capacidad de intercambio (min.eq/L)	Agente regenerante (g/L)	Disponibilidad	Costo (COP/L)
Lewatit MonoPlus MP68	1,3	50 – 80	Si	\$29.900+ IVA
Amberlite ira 402 cl	1,2	150	ENCARGO	\$45.000 + IVA
Lewatit MonoPlus M500	1,3	100	Si	\$56.650 + IVA
Lewatit MonoPlus M600	1,3	100	Si	\$32.700 + IVA

Nota: La disponibilidad de la resina Amberlite ira 402 cl se realiza mediante encargo debido a que no se encuentra para su compra inmediata, por lo tanto se genera un pedido con días anticipados sin generar costos adicionales.

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Continuación

Resina comercial	Volumen de presentación (litros)	Estabilidad (pH)	Retención de agua (%)	Vida útil (Años)
Lewatit MonoPlus MP68	5	0 – 14	54 – 60	2
Amberlite ira 402 cl	25	0 – 14	60	2
Lewatit MonoPlus M500	25	0 – 14	48 – 55	2
Lewatit MonoPlus M600	5	0 – 14	45 – 60	2

Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Matriz de selección de resinas de intercambio iónico. Con la información obtenida de los criterios de selección, se realiza una Matriz Pugh para comparar cada una de estas características entre las diferentes resinas seleccionadas, esto con el fin de escoger la indicada.

En la **tabla 9** se presenta los porcentajes para cada uno de los criterios de selección de la resina de intercambio iónico, que se utilizará en la parte experimental con el fin de reducir los contaminantes presentes en el agua.

Tabla 9. Convenciones para la matriz de selección

Ítem	Valoración	Valor ponderado
Capacidad de intercambio teórico	C.I \geq 1 meq/L, Obtiene un valor de 1	35%
	C.I $<$ 1 meq/L, Obtiene un valor de -1	
Agente regenerante	Si es accesible para su venta y $R < 80$ g/L, Obtiene un valor de 1	10%
	Si no es accesible para su venta y $R \geq 80$ g/L, Obtiene un valor de -1	
Disponibilidad	El tiempo de entrega si es inmediato, obtiene un valor de 1	11%
	Si se presenta alguna limitación para la entrega, obtiene un valor de -1	
Costo de adquisición	Si su costo es $<$ de \$200.000, obtiene un valor de 1	15%
	Si su costo es \geq de \$200.000, obtiene un valor de -1	
Volumen de presentación	Si su volumen es mayor tendría un costo menor que comprarlo por cantidades menores, si es \geq a 25 L, obtiene un valor de 1	9%
	Si es $<$ a 25 L, obtiene un valor de -1	

Tabla 9. (Continuación)

Porcentaje de agua	Si el porcentaje máximo de retención es \leq a 60%, obtiene un valor de 1	10%
	Si el porcentaje máximo de retención es $>$ a 60 %, obtiene un valor -1	
Vida útil	Si es superior a 1 año, obtiene un valor de 1	10%
	Si es menor a 1 año, obtiene un valor de -1	

Fuente: QUIMBAYO CASALLAS, María. DUARTE BLANCO, Yamid. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, e n la vereda el Vijal municipio de San-Mateo, Boyacá. tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Químico. Fundación universidad de América,2019. 80.p [En línea]: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7590/1/6142412-2019-2-IQ.pdf>

Con los siguientes criterios se elabora una matriz Pugh para escoger alguna de las resinas seleccionadas previamente.

Tabla 10. Matriz Pugh de selección de las respectivas resinas con respecto a los criterios de importancia

RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO					
Criterios	%	Lewatit MonoPlus MP68	Amberlite ira 402 cl	Lewatit MonoPlus M500	Lewatit MonoPlus M600
Capacidad de intercambio teórico	35%	1	1	1	1
Agente regenerante	10%	+1	-1	-1	-1
Disponibilidad	11%	+1	-1	+1	+1
Costo de adquisición	15%	+1	-1	-1	+1

Tabla 10. (Continuación)

Volumen de presentación	9%	-1	+1	+1	-1
Porcentaje retención de agua	10%	+1	+1	+1	+1
Vida útil	10%	+1	+1	+1	+1

Fuente: elaboración propia

Utilizando el porcentaje de importancia de cada uno de los criterios, se obtiene la (**Tabla 11**), para la selección de la alternativa.

Tabla 11. Matriz ponderada de selección de las respectivas resinas con respecto a los criterios de importancia

Criterios	%	RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO			
		Lewatit MonoPlus MP68	Amberlite ira 402 cl	Lewatit MonoPlus M500	Lewatit MonoPlus M600
Capacidad de intercambio teórico	35%	+35	+35	+35	+35
Agente regenerante	10%	+10	-10	-10	-10
Disponibilidad	11%	+11	-11	+11	+11
Costo de adquisición	15%	+15	+15	-15	+15
Volumen de presentación	9%	-9	+9	+9	-9
Porcentaje retención de agua	10%	+10	+10	+10	+10
Vida útil	10%	+10	+10	+10	+10
TOTAL	100%	82	58	50	62

Fuente: elaboración propia

A partir de la matriz ponderada para la selección de resina de intercambio iónico (**Tabla 11**), se observa que Lewatit Monoplus MP68 es la mejor con respecto a los criterios establecidos, arrojando un valor de 82 unidades con respecto a las demás.

Al observar la resina con mayor puntaje es considerada una de las más apropiadas para la utilización de este proyecto, presentando las siguientes ventajas:

- La desmineralización de agua industrial.
- Alta velocidad de intercambio en la regeneración y adicionalmente en la carga del agua a tratar.
- Tiene buen funcionamiento con respecto a su capacidad de intercambio.
- Utiliza bajo consumo de agua en el proceso de retro lavado y enjuague.
- Proporciona una distribución homogénea con respecto al regenerante, su retro lavado, enjuague y agua a tratar, formando por ello, zona de trabajo homogénea.

3.3 DESARROLLO A ESCALA LABORATORIO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.

Partiendo de la Matriz Pugh se selecciona la resina a utilizar en la experimentación, esto con el objetivo de dimensionar el intercambiador a escala laboratorio, ya que los diseños con base a datos teóricos no son suficientes para su desarrollo. Permitiendo evaluar la eficiencia del proceso teniendo en cuenta la calidad del agua a la salida de la columna; de esta manera se pueda identificar si el proceso es adecuado para la reducción de los contaminantes.

Teniendo en consideración lo estipulado por Corpoboyacá se analiza el comportamiento de los cloruros y sulfatos, tanto en el pozo azul como en la piscina olímpica mediante el cambio de pH y tiempos de retención. De tal manera, se identifica la capacidad de intercambio de la RII manteniendo un caudal fijo y así identificar si al hacer alguna de estas variaciones se obtiene una disminución en estos componentes.

3.3.1 Cálculos para realizar el dimensionamiento. Se obtuvo la resina Mono Plus MP68 por medio de la empresa Biocidas y Químicos S.A.S en una cantidad de 4 litros, Por consiguiente, se realizaron los cálculos con base a la información dada por el distribuidor y se procede a determinar el peso de la resina (W_R) ya que es necesario para el cálculo de la altura de la CII.

De manera, que se obtuvo la cantidad de resina para ejecutar la experimentación:

Ecuación 1. Densidad de la resina

$$\rho_R = W_R * V_R$$

Fuente: IBAÑEZ MORENO, William Xavier. Recuperación de hierro y ácido clorhídrico de medios decapantes agotados. Tesis pregrado, para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad central de Ecuador Quito 2015. [consultado el 8 de marzo del 2020]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4513/1/T-UCE-0017-112.pdf>

$$W_R = V_R * \rho_R$$

$$W_R = 4L * 0.62 \frac{kg}{L}$$

$$W_R = 2.48 kg$$

Donde

W_R : Peso de la resina

V_R : Volumen de resina utilizada

ρ_R : Densidad aparente de la resina

Determinando la cantidad de resina que se utiliza, se procede a determinar la altura de la resina dentro del CII a partir de un tubo PVC de 10 cm de diámetro y una altura promedio de 1m:

Ecuación 2. Área de flujo dentro de la CII

$$A_f = \pi * \frac{D_c^2}{4}$$

FUENTE: ARAGON CARRILLO, Alberto, Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007, p., 179

$$A_f = \pi * \frac{10 \text{ cm}^2}{4}$$

$$A_f = 78.539 \text{ cm}^2 = 0.0078 \text{ m}^2$$

Donde:

A_f : Área de flujo dentro de la CII

D_c : Diámetro de la columna

Con el cálculo realizado del área de flujo dentro de la CII se procede a encontrar la altura del lecho.

Ecuación 3. Altura del lecho

$$H = \frac{V_R}{A_f}$$

FUENTE: ARAGON CARRILLO, Alberto, Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. P.179

$$H = \frac{0.004 \text{ m}^3}{0.0078 \text{ m}^2}$$

$$H = 0.509 \text{ m}$$

Donde:

H: Altura de lecho (resina empacada)

V_R : Volumen de resina utilizada

A_f : Área de flujo dentro de la CII

Debido a que la resina aumenta su volumen por hinchamiento dentro de la CII, se calcula una nueva altura de lecho expandido de un 24% (porcentaje recomendado por la ficha técnica).

Ecuación 4. Altura del lecho expandido

$$H_e = H + (H * 24\%)$$

FUENTE: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España.2007 pg. 193.

$$H_e = 0.509 \text{ m} + (0.509 * 24\%)$$

$$H_e = 0.631 \text{ m}$$

Donde:

H_e : Altura expandida de lecho

H : Altura de lecho (resina empacada)

Ecuación 5. Altura del lecho total

$$H_L = H_t - H_e$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España.2007 pg. 193.

$$H_L = 1 \text{ m} - 0.631 \text{ m}$$

$$H_L = 0.369 \text{ m}$$

Donde:

H_L : Altura espacio libre

H_t : altura de la columna

H_e : Altura expandida de lecho

En **(Tabla 12)**, se presenta el resumen de los cálculos realizados para el dimensionamiento de la columna de intercambio aniónico:

Tabla 12. Dimensiones de la columna de intercambio aniónico

Altura de la columna	H_t (m)	1
Diámetro de la columna	D_c (m)	0.100
Volumen de lecho (resina)	V_R (m ³)	0.004
Área de flujo dentro de la CII	A_f (m ²)	0.0078
Altura del lecho	H (m)	0.509
Altura del lecho expandido	H_e (m)	0.631
Altura espacio libre	H_L (m)	0.369

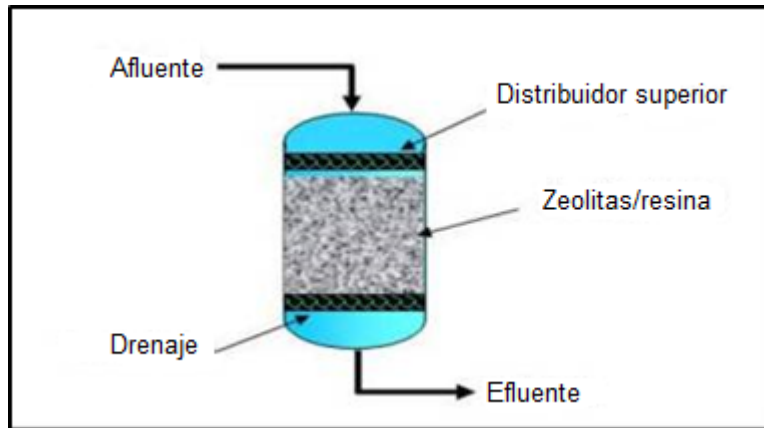
Fuente: elaboración propia

Se trabajará a escala piloto, en la **ilustración 27** se evidencia gráficamente las medidas de la CII, de manera que el agua a tratar y la solución regenerante ingresaran por la parte superior de la CII; es decir, en co-corriente. Así mismo, se debe garantizar una distribución homogénea del líquido para que sea más eficaz el intercambio de iones, esto aplica para el agua a tratar como para la solución regenerante, de manera que se implementó un aspersor para que pueda cumplirse este parámetro en la resina.

Teniendo en cuenta los cálculos presentes en la **tabla 12**, dicha columna no se llenará en su totalidad debido a que la resina Lewatit Mono plus MP68 maneja un hinchamiento de un 24%, razón por la cual se dejó un espacio libre para este fenómeno en la resina.

Por otro lado, no se respetó la condición del diseño de las resinas que debe tener una altura mínima de 0.8 m, debido a que se adquirió un tubo comercial PVC con diámetro de 0.1 m y una altura de 1 m, a partir de estas dimensiones se calculó la altura de la resina obteniendo un valor de 0.509 m, sin embargo, para mejorar el prototipo y llegar a la condición planteada del proveedor se debe angostar el diámetro del tubo y alargar su altura con el objetivo de llegar a una mejor reducción de iones sulfatos y cloruros.

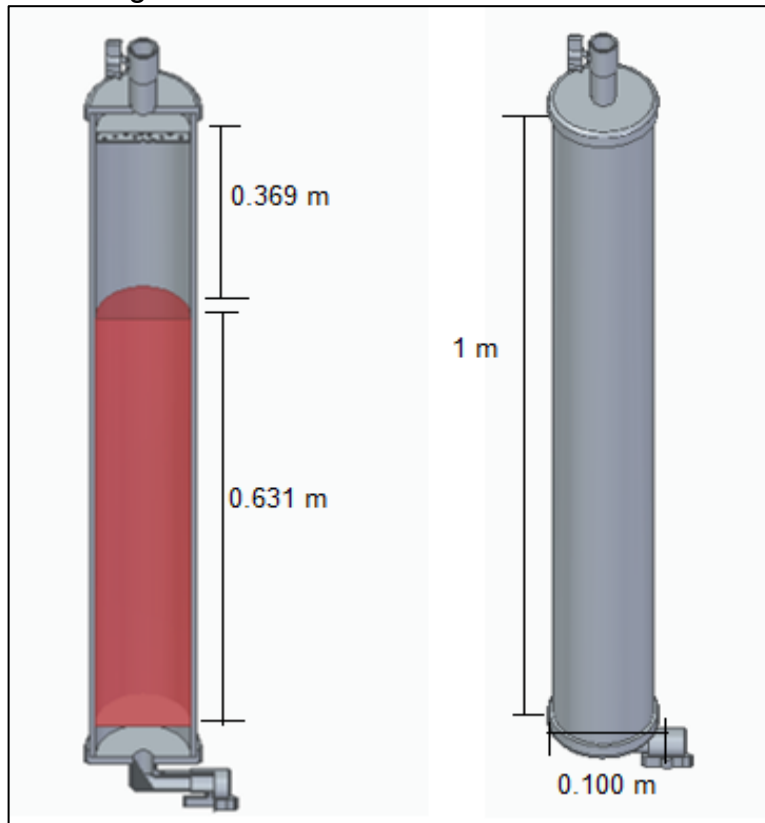
Ilustración 26. Esquema de la columna de Intercambio iónico con resina en su interior.



Fuente: FLUENCE NEWS TEAM. [Anónimo]. Que es el intercambio iónico. enero 27 del 2016. [Consultado el 25 de enero del 2020], disponible en: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-intercambio-ionico/>

3.3.2 Experimentación a escala piloto. Previamente de realizar los cálculos pertinentes para lograr el dimensionamiento de la CII a escala piloto, se efectuó las pruebas experimentales con la resina, para poder evaluar la reducción de iones cloruros y sulfatos en las aguas termo minerales del ITP.

Ilustración 27. Esquema del proceso a escala piloto de la columna de intercambio iónico elaborada en Solid Edge.



Fuente: elaboración propia

Por consiguiente, la experimentación consistió en cuatro etapas; la primera, se basa en la activación de la resina mediante hidróxido de sodio (NaOH), luego se procedió a la realización de los cálculos pertinentes para el dimensionamiento de la columna de intercambio de iones, a partir de datos obtenidos de la literatura como también del mismo proveedor.

Por otra parte, la experimentación se evaluó a un caudal fijo, temperatura ambiente y dos tiempos de retención de 0 y 15 minutos respectivamente, con el fin de verificar si estos parámetros afectan el proceso de intercambio de iones.

La segunda etapa, consiste en un retro lavado para remover cualquier tipo de impurezas que puedan ocasionar daños en la resina. En la tercera etapa se realiza la regeneración, con el fin de liberar sitios activos contenidos por sulfatos y cloruros, dando inicio a un nuevo ciclo.

La cuarta etapa corresponde al enjuague, en donde se remueve el exceso de regenerante, proceso que se realiza con agua desionizada para mejores resultados. Por último, en la parte inferior de la columna mediante una válvula de bola se tomó la recolección de muestras, las cuales se envían a un laboratorio en la ciudad de Duitama-Boyacá para un completo análisis de los parámetros de importancia en el proyecto como lo son los iones cloruros y sulfatos.

A continuación, se explicará de manera más detallada cada etapa realizada en la experimentación, y previamente descrita:

- **Activación de la resina mono plus MP68.** Es macro porosa, débilmente básica, con una distribución granulométrica uniforme, a base de un copolímero de estireno divinilbenceno. Las bolas mono-dispersas son química y mecánicamente estables.⁶³

Esta resina fue suministrada mediante la empresa Biocidas y Químicos S.A.S, tiene un tamaño de 0.55 mm y su color es blanco, en el **ANEXO A** se puede encontrar la ficha técnica de esta resina y las recomendaciones para un buen funcionamiento, su volumen de presentación fue de 4L sin ser activada, de manera que el distribuidor recomendó activarla con NaOH disuelta en agua, fue necesario utilizar una tela filtrante durante 15 minutos, de manera que con los cálculos obtenidos previamente para los 4L de resina se determinó 200g de NaOH para dos litros de agua potable.

Ilustración 28. Esferas de resina sin ser activada con NaOH.



Fuente: WATER FILTER MEDIA, resina aniónica de base débil. [consultado el 22 de marzo del 2020]. Disponible en: <http://www.alkalinewaterfiltersupplier.com/ion-exchange-resin/related->

⁶³ LENNTECH. Información de producto. LEWATIT MonoPlus MP68. Edición octubre del 2012. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-MonoPlus-MP-68-SP-L.pdf>

[products/ion-exchange-resin-suppliers.html](https://www.lewatit.com/products/ion-exchange-resin-suppliers.html)

Ilustración 29. Resina LEWATIT MP68 activada con NaOH para dar inicio al proceso de intercambio iónico en el ITP.



Fuente: elaboración propia

- **Construcción de la unidad piloto.** Para la realización de esta prueba fue necesario un tubo PVC de tubería sanitaria de 1 m de largo con un diámetro de 10 cm (3.937 in), de manera que se selló la parte superior e inferior del tubo, además se introdujo un aspersor y tela filtrante, con el fin de humedecer por completo la resina y prevenir que no se introduzca algún material particulado que pueda afectar la resina mediante el proceso. Adicionalmente a ello, se perforo dos orificios en los dos extremos del tubo y así acoplar los tubos blancos donde se genera la entrada y salida del agua, estos tienen un diámetro de 3 cm (1.18 in), se les adaptó en cada extremo una válvula de bola con el fin de regular el caudal de entrada y salida del agua termo mineral a la columna de intercambio iónico.

En el interior del prototipo se encuentra las esferas de poliestireno reticulado donde su tamaño es de 0.55 mm de diámetro, que respectivamente es la resina activada con una altura de lecho de 0.509 m ubicada en la parte inferior del tubo, en la cual se deja un espacio libre entre la parte superior del lecho y resina activada de 0.369 m donde se tiene en cuenta el hinchamiento para cada ciclo correspondiente.

En las siguientes ilustraciones se observa el montaje realizado directamente en el instituto de turismo de Paipa:

Ilustración 30. Prueba piloto de la CII ubicada a un costado de la piscina olímpica en el ITP



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 31. Válvula de bola utilizada para regular el caudal en la parte superior e inferior de la CII



Fuente: elaboración propia.

- **Toma de muestra del agua.** Para evaluar el funcionamiento del intercambio iónico, en este caso la reducción de los parámetros de interés en el presente proyecto como son los iones cloruros y sulfatos, fue necesario la toma de muestras con el objetivo de analizar y verificar si realmente se logró una disminución. Se realizó las pruebas pertinentes con el agua termo mineral del ITP, sus características fisicoquímicas fueron evaluadas en el primer capítulo del proyecto.

Se tomaron 4 muestras, dos de ellas fueron del agua sin tratar tanto del pozo azul como de la piscina posterior a ello, se tomaron 2 muestras después de realizar el tratamiento a temperatura ambiente con base a dos tiempos de retención diferentes: un tiempo 0 y de 15 minutos con un caudal fijo, con el fin de observar el comportamiento de la resina según la variación de los tiempos de retención a lo largo de toda la columna.

Para medir el caudal se seleccionó un recipiente de 1.5 L en la cual, se acoplo al tubo PVC de color blanco, con la manipulación de la válvula de bola localizada en la parte inferior de la CII se logró obtener el caudal, por medio de gravedad se calculó el tiempo que duraba en llenarse la botella con un volumen ya fijo de la siguiente manera:

Tabla 13. Mediciones de caudal con dos aperturas de válvula y con tiempos promedio

Apertura de la válvula de bola	Volumen (ml)	Tiempo 1 (seg)	Tiempo 2 (seg)	Tiempo 3 (seg)	Tiempo 4 (seg)	Promedio tiempo (seg)	Caudal (ml/seg)
100%	1500	8.16	8.13	8.15	8.11	8.14	184.27
50%	1500	11.42	11.17	11.15	11.32	11.27	133.09

Fuente: elaboración propia

Ecuación 6. Caudal de flujo de entrada a la CII

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

Fuente: DOMINGO, Martin. Apuntes de mecánica de fluidos. P. 39. [Consultado el 24 de marzo del 2020]. Disponible en: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>

Donde:

Q : Caudal

V : Volumen de agua a tratar

t : Tiempo que tarda en llenar la botella

Con la ecuación anterior se procedió a calcular el caudal, de tal manera que se obtuvo dos aperturas de válvulas, una con el 100% y otra con el 50%, de tal manera que el caudal seleccionado para hacer el proceso de intercambio iónico fue el de 133.09 mL/seg con la válvula abierta al 50%.

Las muestras fueron realizadas en el ITP y se recolectaron en botellas de 600 mL previamente purgadas con agua tratada; se obtuvieron cuatro muestras, dos de ellas con agua saliente de la CII, una con agua proveniente del pozo azul a una temperatura de 74°C y la última muestra corresponde al agua de la piscina olímpica sin tratar, posterior a ello, fueron analizadas en el laboratorio "Analizar Ltda" ubicado en la ciudad de Duitama a 20 minutos de Paipa, la recepción de las muestras y su conservación fueron seleccionadas a partir del manual de análisis de agua (HASH), el cual proporcionó recomendaciones para diferentes componentes evidenciados en el **ANEXO C**.

Al realizar la experimentación no fue suficiente la recolección de datos para observar el comportamiento de los mismos debido a problemas logísticos, de manera que se tomó un proyecto de grado previamente revisado, el cual presenta datos similares al presente proyecto. Se pretende realizar el mismo proceso experimental con el objetivo de corroborar datos experimentales y teóricos entre

sí, por lo tanto, se puede observar a continuación la toma de datos con diferentes tiempos de retención para poder observar la línea de tendencia de la concentración, a través de las mediciones de conductividad obtenidas en el proyecto de investigación que se tomó como referencia.

3.3.3 Resultado y análisis de la experimentación. Se determino los parámetros como lo son los iones cloruros y sulfatos después de haber realizado el procedimiento con la prueba piloto para el intercambio de iones, con el fin de evaluar si realmente se logró la disminución de estos parámetros según el método planteado.

Se establecieron variables de interés como lo es el tiempo de retención y pH, sin embargo, se tendrá en cuenta otros parámetros importantes como lo es el tiempo de activación de la resina y su regeneración, ya que para una escala a nivel industrial estos parámetros son de suma importancia.

A continuación, se observa las siguientes tablas de resultados:

Tabla 14. Resultados de las muestras del Pozo azul

Temperatura	pH	Cloruros (mg CL/L)	Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)
74°C	7.20	6045	26817

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Resultados de las muestras del agua sin tratar proveniente de la piscina olímpica

Temperatura	pH	Cloruros (mg CL/L)	Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)
25°C	7.49	5603	25251

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Resultados de las muestras del agua tratada proveniente de la piscina olímpica con T de 25°C

Temperatura	Tiempo de retención (minutos)	pH	Cloruros (mg CL/L)	Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)
25°C	0	9.78	1953	19616
	15	10.12	4791	19806

Fuente: elaboración propia

Con estos datos obtenidos por el laboratorio Analizar Ltda. junto con los datos teóricos tomados del trabajo de grado: "Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2LTDA, para su reutilización en la

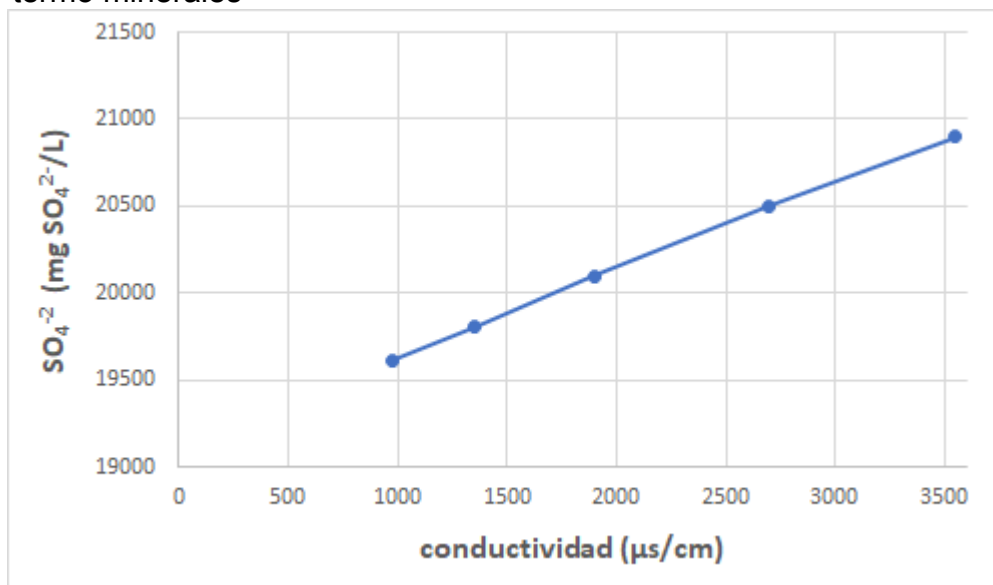
agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San- Mateo Boyacá⁶⁴ se realiza las gráficas pertinentes, para poder evidenciar el comportamiento del agua termo mineral del ITP, de acuerdo a los parámetros establecidos como el tiempo de retención y los diferentes pH.

Tabla 17. Datos tomados la experimentación realizada en el ITP junto con los datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.

SO_4^{-2} (mg SO_4^{2-} /L)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
19616	980
19806	1350
20095	1900
20500	2700
20900	3550

Fuente: elaboración propia

Gráfica 1. Concentración de sulfatos vs conductividad en las aguas termo minerales



Fuente: elaboración propia.

⁶⁴ QUIMBAYO CASALLAS, M. DUARTE BLANCO, Y. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, e n la vereda el Vijal municipio de San-Mateo, Boyacá. tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Químico. Fundación universidad de América,2019 [En línea]: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7590/1/6142412-2019-2-IQ.pdf>

A partir de las revisiones bibliográficas de otros proyectos se evidencio una relación directamente proporcional entre sulfatos con la conductividad, debido a que esta propiedad física está relacionada con la presencia de sales que se disocian en iones, en la cual estos son los responsables del paso de la corriente eléctrica.⁶⁵

El uso de la conductividad es importante para el tratamiento de aguas ya que por medio de esta no solo permite medir concentraciones de sulfatos, sino que también se puede crear una relación entre otros iones presentes en el agua, teniendo en cuenta que para el presente proyecto se tratan aguas termo minerales en la cual se encuentran una variedad de iones, así mismo es importante la medición de este parámetro ya que ofrece la posibilidad de estimar la cantidad de sales disueltas en cualquier tipo de agua para poder monitorear la calidad de purificación del tratamiento a realizar.

Al concluir que se relaciona los sulfatos con la conductividad nos permite conocer que a pesar del cambio de concentración de sulfatos o de cualquier sal es probable determinar la cantidad de iones presentes por medio de la conductividad.

Además, no se evidenció un efecto significativo de la temperatura durante el proceso de intercambio iónico, debido a que por recomendaciones del proveedor la temperatura máxima de trabajo es de 70°C, por ende la temperatura que se encuentra en las piscinas termo minerales es de 37°C, de manera que al realizar el intercambio iónico las aguas son transportadas mediante una tubería PVC, en donde esta temperatura disminuye hasta llegar a condición ambiente (25°C), la cual fue utilizada al momento de la toma de muestras.

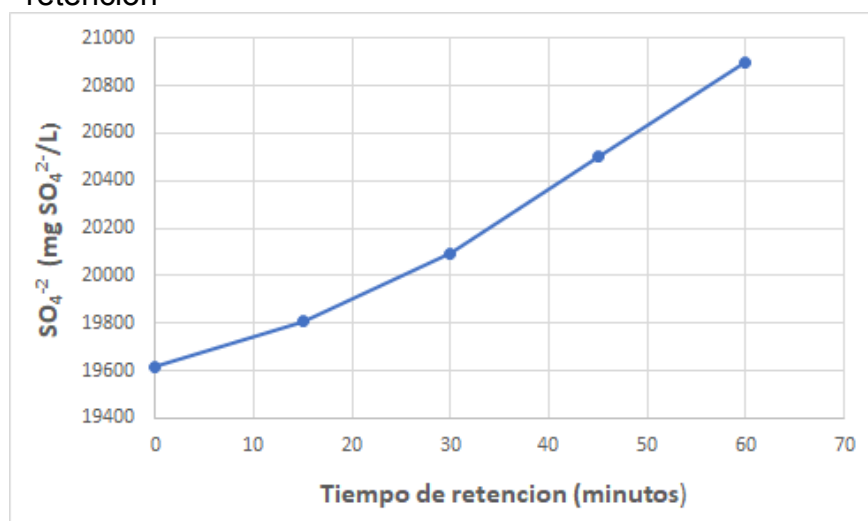
⁶⁵ GELVEZ, G. LAVERDER, H. Remoción de metales pesados de drenajes ácidos de minas de carbón usando baterías sulfato reductoras. Grupo de investigación de minerales, biohidrometalurgica y ambiente. Universidad industrial de Santander, Sede Guatiguara. Bucaramanga, Colombia Disponible en sitio web: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5/704>

Tabla 18. Resultados de la experimentación realizada en el ITP junto con los datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.

SO_4^{-2} (mg SO_4^{-2} /L)	Tiempo de retención (minutos)
19616	0
19806	15
20095	30
20500	45
20900	60

Fuente: elaboración propia

Gráfica 2. Comportamiento del ion sulfato vs tiempo de retención



Fuente: elaboración propia

Adicional a ello, se toma en cuenta la recolección de datos con respecto al tiempo de retención para evidenciar los cambios que se producen durante una hora con intervalos de 15 minutos presente en la gráfica (**Ilustración 34**).

En el tiempo cero se hace mejor el intercambio iónico debido a que no se retiene el agua, en comparación a los siguientes tiempos de retención que aumentan, ya que la conductividad y tiempo de retención son directamente proporcionales. Los altos contenidos de minerales en este tipo de aguas limitan la capacidad de intercambio iónico debido a que los sitios activos se ocupan reteniendo los iones sulfatos y cloruros, produciendo una saturación más rápida al aumentar el tiempo

de retención, por tal razón es necesario la regeneración para realizar un nuevo ciclo.

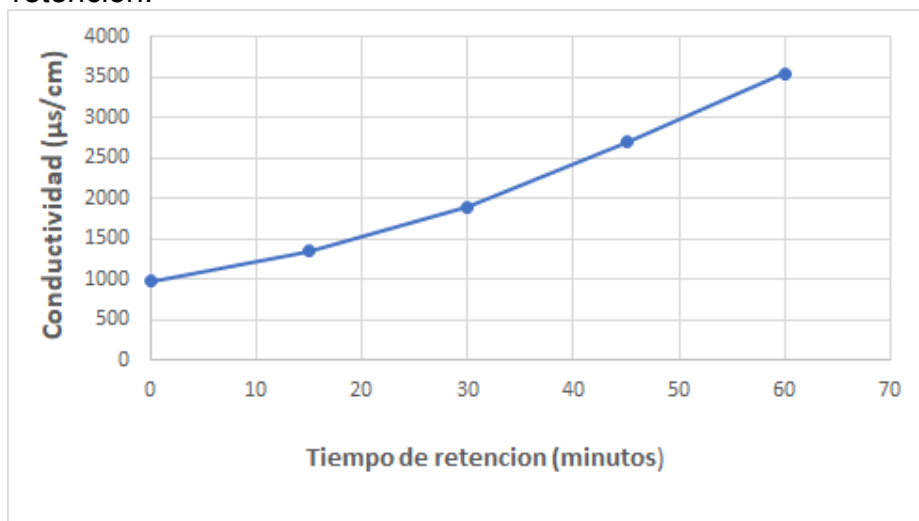
Como ya se mencionó anteriormente en la (Ilustración 33) se puede encontrar una similitud con respecto a la gráfica (Ilustración 34), ya que existe una relación entre sulfatos y conductividad, por ende, al aumentar conductividad también aumenta el tiempo de retención como se evidencia en la siguiente gráfica.

Tabla 19. Datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.

Conductividad ($\mu\text{s/cm}$)	Tiempo de retención (minutos)
980	0
1350	15
1900	30
2700	45
3550	60

Fuente: elaboración propia

Gráfica 3. Comportamiento de la conductividad vs tiempo de retención.



Fuente: elaboración propia

Otro de los factores que contribuyen a que la resina no retenga completamente los iones sulfatos en su totalidad es debido a su afinidad que podría presentar con otro tipo de iones, generando una contaminación cruzada en el agua presente.

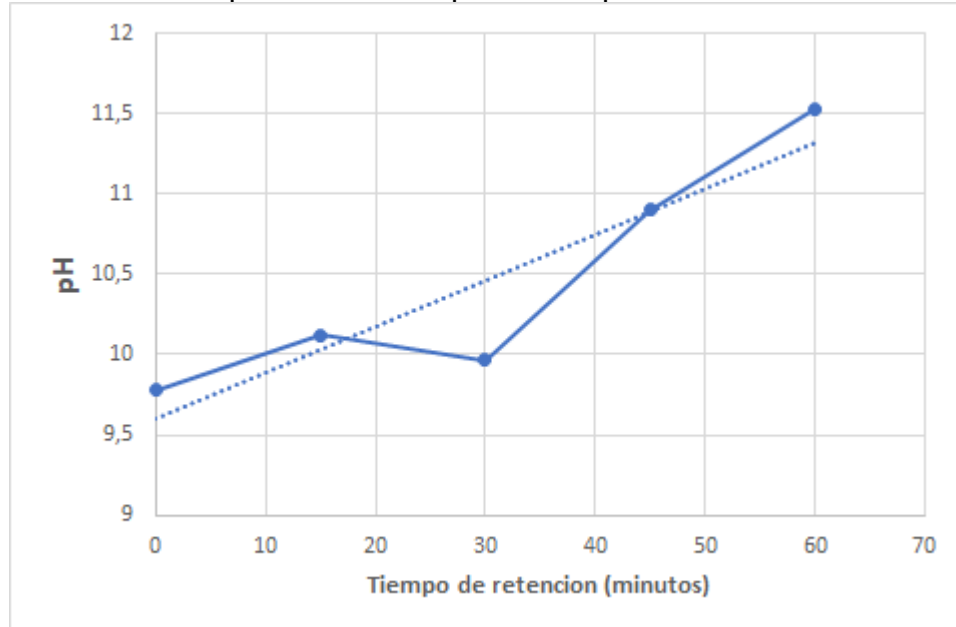
Se debe tener en cuenta que estas aguas por ser subterráneas de origen natural no siempre presentan los mismos valores en su caracterización, esto se evidencio en la toma experimental ya que en el histórico 2019 se muestra los valores de sulfato de 626 ml $\text{SO}_4^{-2}/\text{L}$ pero para el presente año aumenta a 26817 ml $\text{SO}_4^{-2}/\text{L}$.

Tabla 20. Resultados de la experimentación realizada en el ITP junto con los datos teóricos tomados de fuentes bibliográficas.

pH	Tiempo de retención (minutos)
9,78	0
10,12	15
10,15	30
11,12	45
11,94	60

Fuente: elaboración propia

Gráfica 4. Comportamiento de pH vs tiempo de retención.



Fuente: elaboración propia

En la **(Ilustración 35)** se puede observar el incremento de pH a medida que el tiempo de retención en la columna aumenta, esto se debe a que las resinas aniónicas (R-OH^-) separa los aniones del agua a tratar intercambiando los iones

sulfatos y cloruros por iones hidroxilo, aumentando el pH a la salida de la columna⁶⁶. Generando una variación de pH en el rango de 9.78-11.94 como se muestra en la ilustración anterior.

Con base al análisis anterior se puede identificar que por medio del intercambio iónico se realiza una disminución de los iones de sulfatos y cloruros presentes en la piscina del ITP, para obtener mejores resultados y una mayor disminución intentando llegar a los parámetros establecidos por Corpoboyacá, se toma como recomendaciones algunos tratamientos previos del intercambio iónico los cuales son:

- **FILTRACION.** Este tratamiento consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en soluciones acuosas.⁶⁷ Por lo tanto, en este tipo de aguas es muy fácil la formación de organismos unicelulares como lo son las algas, ya que al entrar el agua a las piscinas se intenta controlar el paso de estas, sin embargo, pasan partículas de manera que es necesario este proceso para mejorar la calidad del agua. Esto con el fin de evitar obstrucciones en cuanto a equipos (tuberías y válvulas), como también puede dañar el proceso de intercambio iónico.
- **CARBON ACTIVADO.** Es un tipo de carbón poroso preparado por medio de un proceso de carbonización, el cual es sometido a un tratamiento de activación con el fin de incrementar su área superficial atrapando compuestos como lo es el cloro.

Este método contiene una alta efectividad que es el purificante más utilizado por el ser humano, el carbón activado designa un amplio espectro de materiales que se diferencian fundamentalmente en su estructura interna y en su granulometría.⁶⁸ La capacidad de adsorción del carbón activado depende no solo de su área superficial sino también del tamaño del poro ya que debe tener un diámetro entre una y cinco veces la molécula que se quiere absorber.

Para elaborar carbón activado se parte de materiales como corteza de almendros, nogales o palmetas, antracita, hulla bituminosa, lignito y turba; también se pueden elaborar a partir de carbones vegetales como residuos de madera, cáscara de

⁶⁶ ARAGON CARRILLO, Alberto, Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007.

⁶⁷ MALDONADO Víctor. Filtración. Capítulo 9 (s.f) disponible en sitio web: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/nueve.pdf> [consultado el día 26 de junio del 2020] 83p.

⁶⁸ MANUAL DEL CARBON ACTIVADO. Master en ingeniería del agua (s.f) Universidad politécnica. Sevilla. Disponible en sitio web: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>

coco, bagazo y huesos de fruta. Su aplicación funciona para diferentes procesos como lo son: potabilización del agua, desodorización, purificación de aire, refinación de azúcar y entre otros.⁶⁹

La utilización de este tratamiento es viable ya que no solo brinda la disminución de algunos compuestos si no que se puede fabricar de varios materiales carbonosos que presentan bajo costo en el mercado y disponibilidad. En el **cuadro 10** se muestra las principales materias primas y tecnologías de su activación más utilizadas en la industria, junto con la dureza y el tamaño de poro de los siguientes productos.

Cuadro 10. Principales materias prima en la utilización de carbón activado con sus propiedades

MATERIA PRIMA	ACTIVACIÓN	DUREZA O RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	TAMAÑO DE POROS
MADERA DE PINO	DESHIDRATACIÓN QUÍMICA ¹	30-50	MACROPOROSO
MADERA DE PINO	TÉRMICA ²	40-60	MESOPOROSO
CARBÓN MINERAL BITUMINOSO	TÉRMICA ²	70-80	MESOPOROSO
CONCHA DE COCO	TÉRMICA ²	90-99	MICROPOROSO

Fuente: MANUAL DEL CARBON ACTIVADO. Master en ingeniería del agua (s.f) Universidad politécnica. Sevilla. Disponible en sitio web:<http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>

- **ADSORCION DE ARCILLA** Los adsorbentes químicos son ampliamente utilizados, dado que juegan un papel importante en la remoción de metales pesados, materia orgánica natural y compuestos orgánicos sintéticos. Esto ha sido de constante interés en el desarrollo de adsorbentes basados en arcillas modificadas para la remoción de dichos contaminantes.

Las arcillas son minerales que poseen unas características especiales para esta aplicación, ya que ellas contienen una elevada área superficial, pequeño tamaño de partícula, y es de bajo costo. Sin embargo, existen algunas limitaciones ya que este material tiene baja selectividad sobre el tipo de material y a su vez tiene baja capacidad de captación, no obstante, se ha realizado mejoras que han empleado diferentes tipos de modificaciones⁷⁰.

⁶⁹ CARBOTECHNIA. Que es el carbón activado. México 2019. Disponible en sitio web: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-el-carbon-activado/>

⁷⁰ RODRIGUEZ, Vanessa. TORRES, Armando. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante arcillas naturales y modificadas. Monografía para optar el título especialista de ingeniería ambiental. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Facultad de ingeniería Físico-Química y Escuela de Ingeniería Química. 2009. 13,15,53p.

Estas modificaciones se basan en cuanto a la capacidad de adsorción de agentes contaminantes en soluciones acuosas y en propiedades superficiales dada a su buena estabilidad química y mecánica, son efectivas en este tipo de aguas ya que estos efluentes poseen diversos minerales, en las cuales estas pueden aplicarse como intercambio iónico, tomando los cationes y aniones para la eliminación de contaminantes.

4. DISEÑO Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO A ESCALA INDUSTRIAL

Con base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior se procede a realizar los cálculos a escala industrial para su posible implementación, ya que la columna de intercambio iónico a escala piloto demostró una reducción en los parámetros establecidos con la utilización de la resina aniónica de base débil Lewatit Monoplus MP68. De esta manera se procede a realizar el diseño y las especificaciones técnicas del proceso para llevarlo a cabo en el ITP.

4.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE INTERCAMBIO IÓNICO

Se diseñan dos columnas de intercambio iónico las cuales tendrán las mismas características tanto en forma como en cantidad de resina y regenerante, logrando un proceso continuo, de tal manera que una de las columnas trata el agua y la otra realiza el proceso de regeneración, en donde se acopla la tubería a la salida del ducto de las piscinas conectadas a las columnas de intercambio iónico junto con las válvulas de bola donde se gradúa la apertura con respecto al flujo.

La operación de intercambio iónico se realiza habitualmente en semicontinuo, en un lecho fijo de resina a través del cual fluye la disolución. El régimen de funcionamiento no es estacionario por variar continuamente la concentración de los iones en cada punto del sistema.⁷¹

A continuación, se presenta el cálculo del dimensionamiento de la columna para obtener el volumen de la resina y la carga aniónica (Ca) de acuerdo al parámetro de la conductividad y caracterización del año 2019 del ITP, con una dureza total de: 411 mg/CaCO₃.

$$ppm \text{ de } CaCO_3 = \frac{mg \text{ } CaCO_3}{L}$$

$$Ca = 411 \frac{mg \text{ } CaCO_3}{L} * \frac{1 \text{ meq } CaCO_3}{50 \text{ ppm de } CaCO_3}$$

$$Ca = 8.22 \frac{meq \text{ } CaCO_3}{L}$$

Donde:

Ca: Carga aniónica

⁷¹ CAPÍTULO 3. [Anónimo]. Intercambio iónico. Modo de operación. p 14-16[En línea]<<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> > [citado el 12 de mayo del 2019]

Se requiere calcular la capacidad instalada y así mismo el volumen de la resina con el fin de saber qué cantidad se necesita a escala industrial, para esto es importante conocer el caudal de salida de las piscinas del ITP el cual corresponde a 13.76 m³ por día (573.3 L/h) a partir de este dato se realiza el cálculo de la oferta iónica.

Ecuación 7. Oferta iónica

$$OI = Ca * Q * tc$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007 pg. 189.

Donde:

OI= Oferta iónica

Ca: carga aniónica

Q: Caudal del flujo

tc: Tiempo de duración por ciclo

Los ciclos de operación de las columnas dependen de los siguientes factores:

- Caudal para tratar
- Carga iónica aportada
- Especificaciones técnicas particulares de la resina

Por tal razón, los factores anteriores y bibliografías previamente revisadas, se toma como tiempo de duración de cada ciclo de operación, 12 horas (tc). Ya que un ciclo mayor a 24 horas de duración requerirá mayor cantidad de resina y un diámetro mayor, por lo tanto, la velocidad lineal del fluido disminuye y de esta manera se impide el movimiento continuo del fluido (agua a tratar) dentro de la CII.

$$OI = 0.00822 \frac{eq \text{ CaCO}_3}{L} * 573.3 \frac{L}{h} * 12 \frac{h}{ciclo}$$

$$OI = 56.55 \frac{eq \text{ CaCO}_3}{ciclo}$$

La capacidad operativa (C_{op}) de la resina aniónica de base débil a utilizar es dada por el distribuidor con un valor mínimo de 1.3 eq/L

Ecuación 8. Capacidad operativa

$$C_{OP} = 1.3 \frac{eq}{L}$$

Fuente: Elaboración propia con base a la ficha técnica de la resina LEWATIT MONOPLUS MP68

De acuerdo con los cálculos anteriores como la oferta iónica y la capacidad operativa, se procede a calcular el volumen de la resina aniónica que se va a utilizar a escala industrial de la siguiente manera:

Ecuación 9. Volumen de la resina.

$$V_R = \frac{OI}{C_{OP}}$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007 pg. 190.

Donde:

OI: Oferta iónica

C_{OP}: Capacidad operativa

V_R: Volumen de la resina

$$V_R = \frac{56.55 \frac{eq}{ciclo}}{1.3 \frac{eq}{L}}$$

$$V_R = 43.5 L = 0.044 m^3$$

De acuerdo con los cálculos obtenidos se requiere un volumen de 43.5 L, de manera que la empresa Biocidas y químicos S.A.S distribuye sacos de resina con una presentación de 5 litros como mínimo, por lo tanto, se necesita aproximadamente 9 sacos en volumen de resina.

4.1.1 Área de la columna de intercambio iónico. Al realizar el cálculo del volumen de resina se continua con el cálculo para la CII, en donde se requiere de un análisis en cuanto al área de esta. Sin embargo, se necesita de un diámetro

especifico de la columna tomado de la bibliografía, dada por una experiencia en donde el diámetro es de 0.23 m (230 mm), y con este diámetro se calcula el área de paso de la columna de la siguiente manera:

Ecuación 10. Área de flujo de la columna

$$A = \pi * \frac{D_c^2}{4}$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España.2007 pg. 191.

$$A_f = \pi * \frac{0.23 m^2}{4}$$

$$A_f = 0.042m^2$$

Donde:

D_c : Diámetro de la columna de intercambio

A_f : Área de flujo dentro de la CII

4.1.2 Altura de la columna de intercambio iónico. Mediante la ficha técnica de la resina Lewatit Mono Plus MP68, el proveedor recomienda una altura mínima para su uso, la cual es 800 mm (0.8 m), de tal manera que la altura debe estar dentro de las recomendaciones del fabricante, por ende, al momento de calcular dicha altura es importante que pase de los 0.8 m.

Ecuación 11. Altura de la resina en el lecho

$$H_R = \frac{V_R}{A_f}$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España.2007 pg. 191.

$$H_R = \frac{0.044m^3}{0.042m^2}$$

$$H_R = 1.048 m$$

Donde:

H_R : Altura de la resina en la CII

A_f : Área de flujo en el interior de la CII

V_R : Volumen de la resina

De acuerdo con el proveedor se especifica la expansión del lecho con un 24%:

Ecuación 12. Altura del lecho expandido

$$E_{lcho} = H_R * 24\%$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España.2007 pg. 192.

$$E_{lcho} = 1.048 m * 24\%$$

$$E_{lcho} = 0.2515 m$$

Con el cálculo anterior se determina la altura expandida de la CII.

$$H_e = H_R + (H_R * 24\%)$$

$$H_e = 1.048 m + (1.048 m * 24\%)$$

$$H_e = 1.2995 m$$

4.1.3 Cálculos de la resina inactiva. Se decide colocar resina inactiva dentro de la CII ya que al realizar un proceso con un flujo alto de agua a tratar puede presentarse cierta cantidad de suciedad en cuanto a trazas de algas o cualquier tipo de sólido, ya que la piscina esta a la intemperie es más fácil que presente contaminación , por tal motivo es pertinente tener la resina inerte con el objetivo de evitar la entrada de dichos contaminantes que puedan producir un daño en ella y a su vez el proceso se vea perturbado.

Por recomendaciones del proveedor el volumen de la resina inactiva a utilizar es de 3L, lo que equivale a 0.003 m³.

Ecuación 13. Altura de la resina inactiva

$$H_i = \frac{V_i}{A_f}$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España.2007 pg. 192.

$$H_i = \frac{0.003m^3}{0.042m^2}$$

$$H_i = 0.071m$$

Donde:

H_i: Altura de la resina inactiva

V_i: Volumen de la resina inactiva

A_f: Área de flujo de la columna

Para el cálculo de la altura de la zona libre de la CII se toma el valor de la bibliografía, en el cual se recomienda una altura de 42 mm (0.042 m), H_{FB}=0.042m.

Con el fin de saber la altura total de la CII que va a realizar el intercambio iónico se realiza la sumatoria de las alturas anteriores.

Ecuación 14. Altura total de la CII

$$H_T = H_R + H_i + H_E$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España.2007 pg. 192.

Donde:

H_T : Altura Total de la CII

H_i : Altura de la resina en la CII

H_R : Altura de la resina inactiva

H_E : Altura expandida de la resina

$$H_T = 1.048 \text{ m} + 0.071 \text{ m} + 1.2995 \text{ m}$$

$$H_T = 2.4185 \text{ m}$$

En la **(Tabla 21)** se observa el dimensionamiento de la CII con las especificaciones planteadas para la utilización en el ITP.

Tabla 21. Dimensionamiento CII

Parámetros	Símbolo	Magnitud
Volumen de la resina (L)	V_R	43.5
Diámetro de la columna (m)	D_c	0.23
Área de flujo de la columna (m ²)	A_f	0.042
Altura de la resina en el lecho (m)	H_R	1.048
Altura del lecho expandido (m)	H_e	1.299
Altura de la resina inactiva (m)	H_i	0.071
Altura total de la CII (m)	H_T	2.418

Fuente: elaboración propia

4.2 ETAPAS DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO EN LA COLUMNA

A escala industrial el proceso de intercambio iónico, se genera mediante un proceso cíclico ya que una vez que las resinas han agotado su capacidad de intercambio iónico, es necesario regenerarlas para que vuelva a recuperar sus propiedades, por lo tanto, se tiende a extender los ciclos para espaciar las regeneraciones, minimizando así los residuos generados.⁷²

A continuación, se presenta los cálculos pertinentes para cada una de las etapas del proceso de intercambio iónico junto con la descripción respectiva.

4.2.1 Velocidad del agua a tratar. La velocidad de flujo se requiere para obtener un buen rendimiento en cuanto a la capacidad y selectividad, ya que este factor contribuye a una distribución e interacción iónica, de esta manera permite un buen

⁷² RODRIGUEZ Alejandro, Aplicaciones industriales 2011. [consultado el 18 de Mayo del 2020] disponible en: <https://es.scribd.com/document/58744086/APLICACIONES-INDUSTRIAL>

control en cuanto al manejo del caudal de la piscina Olímpica del ITP 13.76 m³/día.

Ecuación 15. Velocidad del agua a tratar

$$vel = \frac{Q_t}{A_f}$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 198 p.

$$vel = \frac{0.5733 \frac{m^3}{h}}{0.042 m^2}$$

$$vel = 13.65 \frac{m}{h}$$

Donde:

vel: velocidad de agua a tratar.

Q_t: Caudal del agua en el tratamiento.

A_f: Área de flujo dentro de la CII.

Se calcula el volumen del lecho (B_{ED} Volumen) ya que es necesario conocer el volumen que ocupa la resina inerte y la resina aniónica dentro del intercambiador.

Ecuación 16. Volumen del lecho entre resina activa e inactiva

$$BV = (H_e + H_i) * A_f$$

Fuente: ARAGON CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007 pg. 192.

Donde:

BV=volumen de la resina aniónica e inactiva.

H_e: Altura del lecho expandido

H_i: Altura de la resina inactiva

A_f: Área de flujo dentro de la CII.

$$BV = (1.318 \text{ m} + 0.071 \text{ m}) * 0.042 \text{ m}^2$$

$$BV = 0.0583 \text{ m}^3$$

Para realizar el intercambio se requiere el ingreso del agua termal que se va a tratar a una velocidad de 13.65 m/h, con el fin de que corra a través de la columna de manera uniforme por medio de la gravedad para que pueda tener contacto directo con la resina Lewatit Monoplus 68, que se encuentra ubicada en el fondo de la CII.

Al cabo de un tiempo la resina empieza a saturarse, esto se debe a que se agota los sitios activos y se evidencia en un aumento la concentración de los iones sulfatos a la salida del agua tratada; es allí donde se debe regenerar la resina, ya que esta pierde su capacidad de intercambio hasta contaminar el agua que se viene tratando.

Se requiere calcular la capacidad operativa total de la resina junto con la dureza del agua a la entrada de la columna, ya que inicialmente son datos desconocidos, a partir de la heurística de grados hidrotimétricos °F,⁷³ se considera la capacidad total de intercambio que presenta la resina indicada por el proveedor **ANEXO A**.

$$Du = 411 \text{ ppm de CaCo}_3 \text{ o } \frac{\text{mg CaCo}_3}{\text{L}}$$

$$Du = 411 \text{ ppm de CaCo}_3 * \frac{1 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}}{17.1 \text{ ppm de CaCo}_3} = 24.035 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}$$

$$Du = 24.035 \frac{\text{granos}}{\text{gal}} * 1.5 = 36.0525 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}$$

Donde:

Du: Dureza

⁷³ GONZÁLEZ, Alberto. Dureza del agua; Tipo de análisis. Septiembre 8,2014. [Consultado el 20 de mayo del 2020] Disponible: <http://aqmlaboratorios.com/dureza-del-agua-tipos-analisis/>

Se tiene una capacidad operativa de 1.3 eq/L dada por el proveedor, sin embargo, se realiza la siguiente conversión para facilitar los cálculos siguientes.

$$C_{op} = 1.3 \frac{eq}{L}$$

$$C_{op} = 1.3 \frac{eq}{L} * \frac{1000 meq}{1 eq} * \frac{50 ppm \text{ de } CaCo_3}{1 \frac{meq CaCo_3}{L}} * \frac{1 \frac{granos}{gal}}{17.1 ppm \text{ de } CaCo_3} * \frac{1 gal}{3.78541 L}$$

$$C_{op} = 1004.163 \frac{granos}{L}$$

Donde:

C_{OP}: Capacidad operativa

De esta manera se calcula la capacidad operativa instalada, la cual viene determinada por el volumen de la resina y la capacidad operativa.

Ecuación 17.
Capacidad operativa instalada

$$C_{opi} = C_{op} * V_R$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 191 p.

$$C_{opi} = 1004.163 \frac{granos}{L} * 43.5 L$$

$$C_{opi} = 43681.0905 \text{ gramos}$$

Donde:

C_{opi}: Capacidad operativa instalada

V_R: Volumen de la resina

Una vez que ya se tiene la dureza y la capacidad operativa instalada se puede calcular el volumen del agua que se necesita entre regeneración para evitar los residuos de NaOH, el cual es el regenerante adecuado para este tipo de resinas.

Ecuación 18. Volumen de agua para el proceso de regeneración.

$$V_{agua} = \frac{C_{opi}}{Du}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 198 p.

$$V_{agua} = \frac{43681.0905 \text{ gramos}}{36.0525 \frac{\text{gramos}}{\text{gal}}}$$

$$V_{agua} = 1211.597 \text{ gal}$$

Donde:

V_{agua} : Volumen del agua por ciclo.

Ya obteniendo el volumen del agua que se requiere para la regeneración, se procede a calcular el tiempo en el cual la resina no está realizando intercambio, es decir; está liberando los sitios activos para poder volver a realizar su proceso.

Ecuación 19. Tiempo entre regeneraciones

$$t_{reg} = \frac{V_{agua}}{Q}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico.

Donde:

t_{reg} : Tiempo entre regeneraciones

V_{agua} : Volumen de agua

Q: Caudal

$$t_{reg} = \frac{1211.597 \text{ gal}}{3608.59 \frac{\text{gal}}{\text{día}}}$$

$$t_{reg} = 0.3358 \text{ día} = 8.06 \text{ horas}$$

A partir del cálculo anterior se determina que el proceso de intercambio iónico requiere de un ciclo de operación de 8.06 horas, es decir; que se introduce el agua termal sin tratar a la columna de intercambio iónico, en el cual se procesa y una vez cumplido este tiempo se detiene para continuar con la regeneración.

Tabla 22. Dimensiones en la etapa de carga.

Parámetro	Unidades	Símbolo	Magnitud
Velocidad del agua a la entrada de la columna	m/h	vel	13.65
Caudal de agua	m ³ /h	Q	0.5733
Volumen de la resina aniónica e inactiva	m ³	BV	0.0583
Capacidad operativa	Granos/L	C _{op}	1004.163
Capacidad operativa de la resina instalada	Galones	C _{opi}	43681.0905
Volumen de la resina	L	V _R	43.5
Volumen del agua que se usara en la regeneración	Galones	V _{agua}	1211.597
Tiempo entre regeneraciones	Horas	t _{reg}	8.06

Fuente: elaboración propia

4.2.2 Etapa de retro lavado. Para obtener un buen proceso de intercambio iónico es necesario iniciar con una etapa de retro lavado, la cual ayuda a eliminar

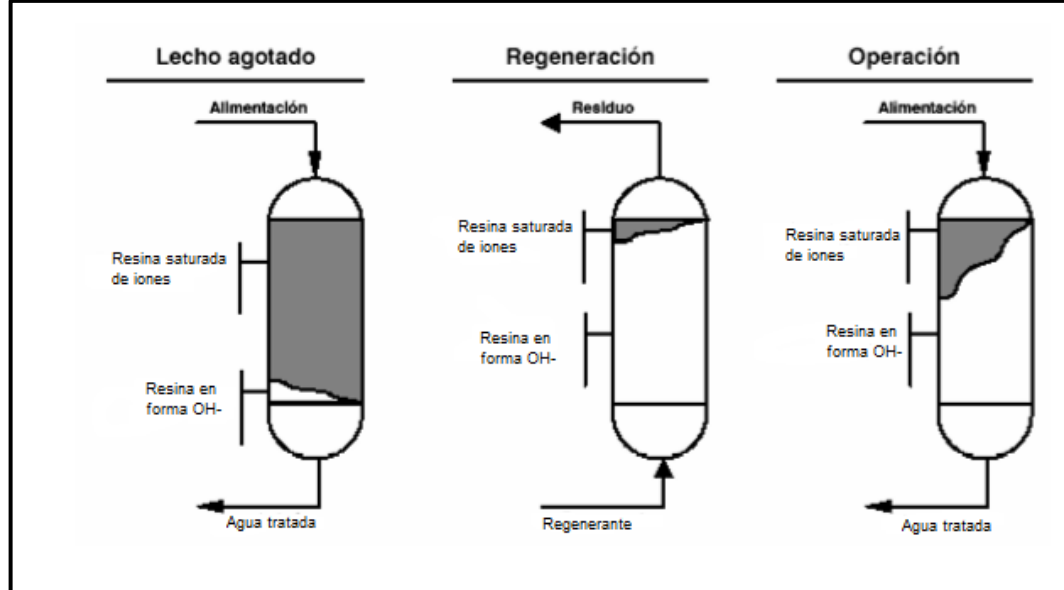
partículas que se acumulan en la resina provenientes del agua a tratar, además ayuda a no formar canales de preferencia.⁷⁴

4.2.3 Sistema regenerante en contracorriente. Este proceso se lleva a cabo en forma ascendente, es decir, en contracorriente. Esto ayuda a presentar una mejor calidad en el agua y a proporcionar la recuperación de sitios activos de la resina disminuyendo drásticamente la fuga iónica, algunas ventajas de realizar la regeneración en contracorriente es la utilización de NaOH en menor cantidad y también la reducción del tiempo de regeneración que lleva a cabo el proceso en co-corriente.

En la **ilustración 36** se evidencia la reducción de la fuga iónica mediante la regeneración a contracorriente, igualmente en la primera columna se observa la saturación de la resina, en la segunda columna se evidencia la regeneración a contracorriente, finalmente en la última se ilustra la alimentación del agua a tratar después de que la resina recupera los sitios activos al realizar la regeneración.

⁷⁴ Sánchez, Concepción. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Intercambio Iónico, tratamientos terciarios septiembre 2015. Disponible en línea: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+i%C3%B3nico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659> [consultado el 21 de mayo del 2020]

Ilustración 32. Fuga iónica en los sistemas de regeneración.



Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 71 p.

4.2.3.1 Proporción de regenerante. La cantidad utilizada es de 50 gramos de hidróxido de sodio NaOH por cada litro de resina, dato especificado por el proveedor, por consiguiente, para 43.5 litros de resina se requiere una cantidad de 2175 gramos de regenerante al 99% de pureza.

$$masa NaOH = 2175 g = 2.175 kg NaOH$$

De acuerdo a los gramos del regenerante se procede a calcular el volumen:

Ecuación 20. Volumen del regenerante

$$V_{NaOH} = \frac{m_{NaOH}}{\rho_{NaOH}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 196p.

Donde:

V_{NaOH} : Volumen del regenerante (NaOH)

m_{NaOH} : masa de NaOH

ρ_{NaOH} : Densidad de NaOH

$$V_{NaOH} = \frac{2175 \text{ g}}{1.511 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}$$

$$V_{NaOH} = 1439.44 \text{ ml} = 0.00143944 \text{ m}^3$$

Para poder regenerar la resina es imprescindible diluir el NaOH en agua con el fin de obtener la solución, de tal manera que por medio de la ficha técnica Lewatit MP68 se obtiene el porcentaje en peso del NaOH de un valor de 2% - 4%.

Por consiguiente, este valor es útil para conocer la cantidad de agua que se necesita para diluir el hidróxido de sodio.

$$\%W NaOH = 3\% \text{ de NaOH}$$

Ecuación 21. Cantidad de agua para diluir el regenerante

$$m_{H_2O} = \frac{m_{NaOH}}{\frac{\%w_{NaOH}}{100\%}} - m_{NaOH}$$

Fuente: QUIMBAYO, María y DUARTE, Yamid. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 LTDA, para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San-Mateo Boyacá. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico. Universidad de América. Bogotá 2019.118p

$$m_{H_2O} = \frac{2175}{\frac{3\%}{100\%}} - 2175$$

$$m_{H_2O} = 70325 \text{ g} = 70.325 \text{ Kg}$$

Donde:

m_{NaOH} : Masa de NaOH

m_{H_2O} : Masa de H₂O

$\%W_{NaOH}$: Porcentaje en peso de NaOH

A partir de la masa requerida del agua y su densidad, la cual es de 1,000 kg/m³ se puede obtener el volumen necesario para la disolución.

Ecuación 22. Volumen del agua para diluir el regenerante.

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$$

Fuente: QUIMBAYO. María y Duarte, Yamid. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 LTDA, para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San-Mateo Boyacá. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico. Universidad de América. Bogotá 2019.118p

$$V_{H_2O} = \frac{70.325 \text{ kg}}{1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V_{H_2O} = 0.070325 \text{ m}^3 \text{ de agua}$$

De acuerdo a los cálculos anteriores, se necesita 0.070325 m³ para diluir 2175 g de NaOH, con el fin de lograr una dilución de manera que sea adecuada para el proceso de regeneración.

4.2.3.2 Tiempo de Regeneración y Caudal. Al determinar los cálculos anteriores se puede identificar el caudal óptimo para llevar a cabo el proceso a escala industrial, igualmente se determina el tiempo de regeneración en que debe presentar contacto la resina aniónica con la sustancia regenerante, sin embargo, la velocidad del regenerante es proporcionada por el proveedor ANEXO A en donde es de 5 m/h.

Ecuación 23. Velocidad de regeneración.

$$V_{reg} = \frac{Q_{reg}}{Af_{resina}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 197p.

$$Q_{reg} = 0.042m^2 * 5 \frac{m}{h}$$

$$Q_{reg} = 0.21 \frac{m^3}{h}$$

Donde:

V_{reg} : Velocidad de regeneración

Q_{reg} : Caudal de regeneración

Af: Área de flujo dentro de la CII

A partir del caudal se procede a calcular el tiempo de regeneración necesario para restaurar la resina.

Ecuación 24. Tiempo de regeneración.

$$t_{reg} = \frac{V_{reg}}{Q_{reg}}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 194p.

Para calcular el volumen del regenerante es importante tener presente el volumen del agua y el de hidróxido de sodio, ya que se mezclan para producir la disolución, la cual es utilizada para liberar sitios activos contenidos por sulfatos y cloruros.

$$t_{reg} = \frac{0.071764 \text{ m}^3}{0.21 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$t_{reg} = 0.3417\text{h} = 20.502 \text{ min}$$

Donde:

t_{reg}: Tiempo que necesita la resina en regenerarse.

V_{reg}: Velocidad de regeneración

Q_{reg}: Caudal de regeneración

Tabla 23. Proporción de Regenerante.

Parámetro	Símbolo	Magnitud
Volumen del regenerante NaOH (m ³)	V _{NaOH}	0.00143944
Cantidad de masa de NaOH (g)	m _{NaOH}	2175
Cantidad de agua para diluir el regenerante (g)	m _{H2O}	70325
Volumen del agua para diluir el regenerante (m ³)	V _{H2O}	0.070325
Caudal de regenerante ($\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$)	Q _{reg}	0.21
Tiempo de regeneración (h)	t _{reg}	0.3417

Fuente: elaboración propia.

4.2.3.3 Etapa de enjuague. Una vez realizada la etapa de regeneración se procede a retirar el exceso de la disolución de hidróxido de sodio con agua presente en la resina y entre las hendiduras de la columna, en donde se lleva acabo a una baja y alta velocidad, con el fin de lograr la disminución de la solución regenerante a partir de un volumen de agua recomendado por Biocidas y Químicos S.A.S el cual indica que este volumen de agua es cuatro veces la cantidad del lecho de la resina en la CII.

Ecuación 25. Volumen de agua de enjuague.

$$\text{Volumen de agua de enjuague} = 4 * V_R$$

Fuente: Información con base a la empresa BIOCIDAS Y QUÍMICOS S.A.S.

$$\text{Volumen de agua de enjuague} = 4 * 43.5L$$

$$\text{Volumen de agua de enjuague} = 174 L = 0.174 m^3$$

Para este proceso de enjuague según la literatura es importante realizar dos etapas secuenciales las cuales son:

- **Enjuague lento:** es imprescindible ya que se remueve la mayor parte del regenerante, por tal motivo el caudal es bajo junto con la velocidad.⁷⁵
- **Enjuague rápido:** este procedimiento despeja las ultimas trazas del regenerante, se realiza a una alta velocidad de manera que la calidad del agua al salir alcance las especificaciones del agua tratada.⁷⁶

Para calcular el tiempo de enjuague se debe utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 26. Tiempo de enjuague

$$t_{\text{enjuague}} = \frac{V_{\text{enjuague}}}{Q}$$

Fuente: ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 194p.

$$t_{\text{enjuague}} = \frac{0.174 m^3}{0.21 \frac{m^3}{h}}$$

$$t_{\text{enjuague}} = 0.8286 h = 49.716 min$$

Para conocer el volumen de enjuague lento según literatura se utiliza el 75% del volumen total y para el enjuague rápido se utiliza el 25% del volumen total.⁷⁷

⁷⁵ DARDEL, François. Ciclo completo de una columna de intercambio iónico. Tratamiento de agua 2019. Disponible en: http://dardel.info/IX/processes/cycle_ES.html [consultado el 22 de mayo del 2020]

⁷⁶ Ibip.1p.

Tabla 24. Proporción de la etapa de enjuague

Parámetro	Símbolo	Magnitud
<i>Volumen de agua de enjuague (m³)</i>	V_{EN}	0.174
<i>Volumen de agua de enjuague lento (m³)</i>	V_{EL}	0.1305
<i>Volumen de agua de enjuague rápido (m³)</i>	V_{RA}	0.0435
<i>Tiempo de enjuague (min)</i>	t_{en}	49.716

Fuente: elaboración propia.

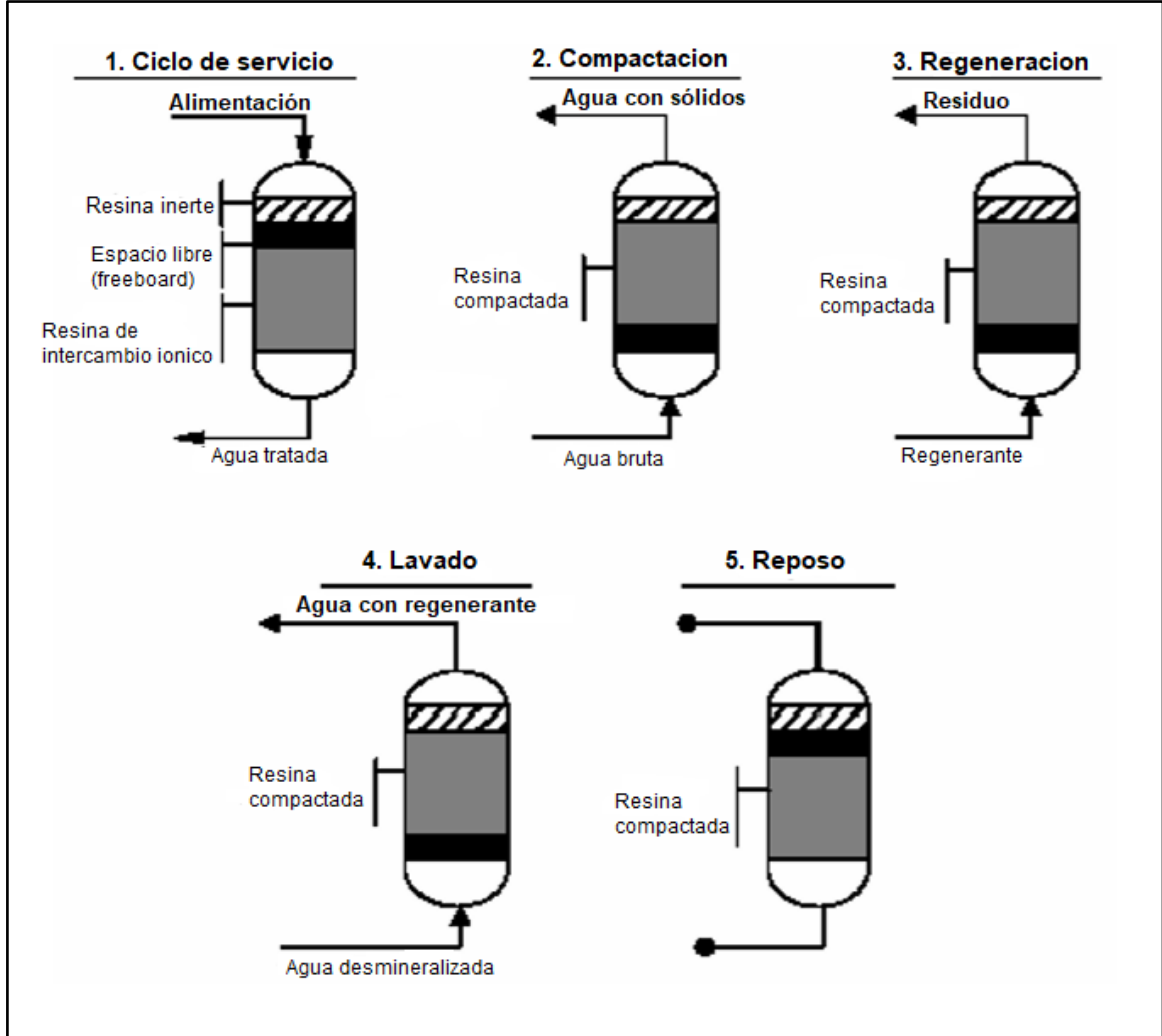
Después de este proceso la salinidad del agua es netamente baja, por lo que se recomienda un lavado final con el agua saliente del proceso que contiene bajos iones de sulfatos y cloruros, con el fin de reducir el consumo de agua de servicio y la carga iónica sometida a las resinas durante esta fase.⁷⁸

En la **ilustración 37** se muestran las etapas del proceso donde se evidencia la alimentación del agua a tratar y posteriormente se realiza la compactación del lecho en donde ingresa un flujo ascendente, de tal manera que la resina activada e inerte queden distribuidas uniformemente en la CII. Seguido a esto, se realizó un retro lavado, regeneración y finalmente un enjuague para eliminar los excesos de la solución de NaOH.

⁷⁷ QUIMBAYO. María Paula. DUARTE BLANCO Yamid Gustavo. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 LTDA, para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San-Mateo Boyacá. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico. Universidad de América. Bogotá 2019.121p

⁷⁸ DARDEL, François. Ciclo completo de una columna de intercambio iónico. Tratamiento de agua 2019. Disponible en: http://dardel.info/IX/processes/cycle_ES.html [consultado el 25 de mayo del 2020]

Ilustración 33. Etapas que componen el proceso de regeneración.



Fuente: ARAGÓN CARRILLO. Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 75 p.

4.3 DESCRIPCION DEL PROCESO A ESCALA INDUSTRIAL

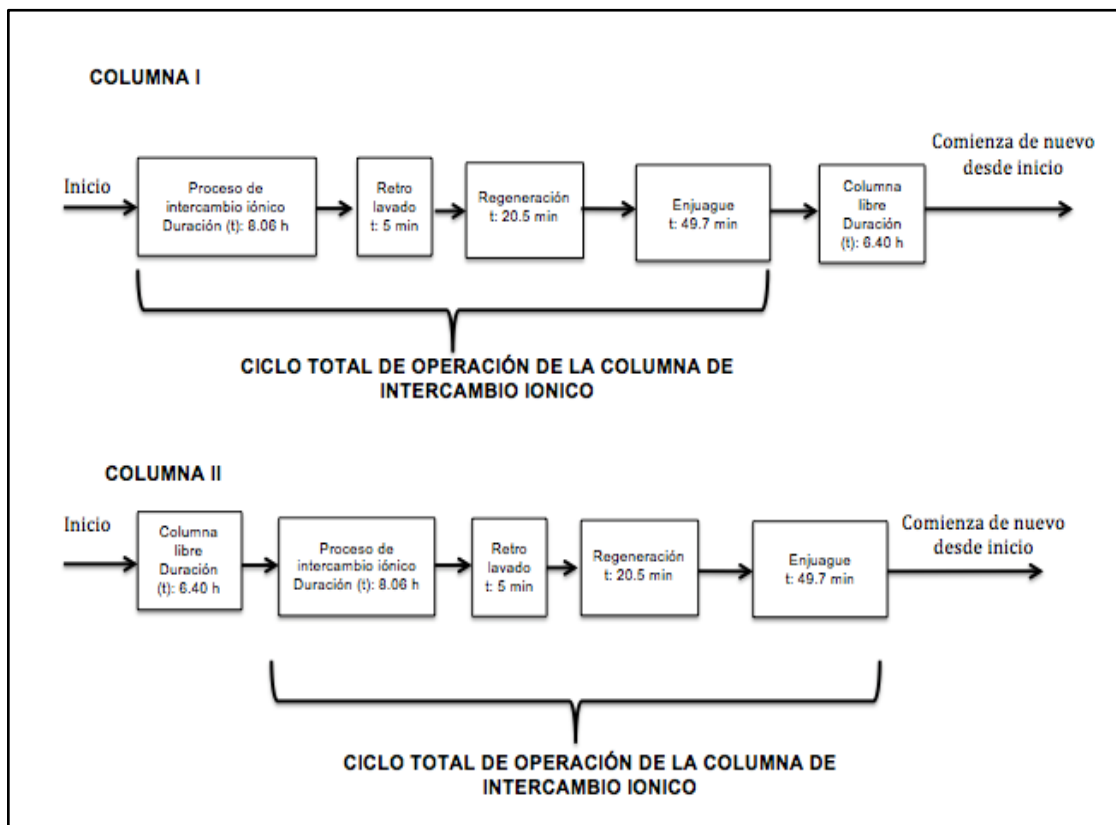
Para la eficiencia del proceso de intercambio iónico se utilizan dos columnas con el fin de generar un proceso continuo de manera que cuando la (columna 1) llegue al punto de saturación este pase por el proceso de lavado, regeneración y enjuague previamente descritos anteriormente, la (columna 2) empieza su ciclo de operación⁷⁹.

⁷⁹ QUIMBAYO, María Paula y DUARTE BLANCO, Yamid Gustavo. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 LTDA, para su reutilización en la agricultura, en la vereda el Vijal municipio de San-Mateo Boyacá. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico. Universidad de América. Bogotá 2019.123p

Partiendo de los cálculos obtenidos se identificó que el tiempo de operación de la resina es de 8 horas y 6 minutos, al finalizar este tiempo se realiza un lavado durante un tiempo de 5 minutos, seguido a esto se procede a regenerar con un tiempo de 20 minutos y como etapa final se hace el enjuague con un transcurso de 50 minutos, como se muestra en la **ilustración 38**.

La jornada laboral del ITP es desde la 5 am hasta las 9 pm, por tal razón las columnas de intercambio iónico trabajan un tiempo total de 9 horas y 20 minutos, finalmente estas paran su proceso durante 6 horas y 40 minutos.

Ilustración 34. Proceso de operación de las columnas de intercambio iónico.



Fuente: elaboración propia.

4.3.1 Especificaciones del proceso de intercambio iónico. Al tratar aguas con altas cantidades de salinidad, es necesario que el diseño de las tuberías sea en PVC (Policloruro de vinilo), ya que no presentan fenómenos de corrosión externa e interna, su implementación es sencilla debido a que su peso es muy ligero facilitando los cortes de este y la unión a otros materiales, como también su costo es relativamente bajo.

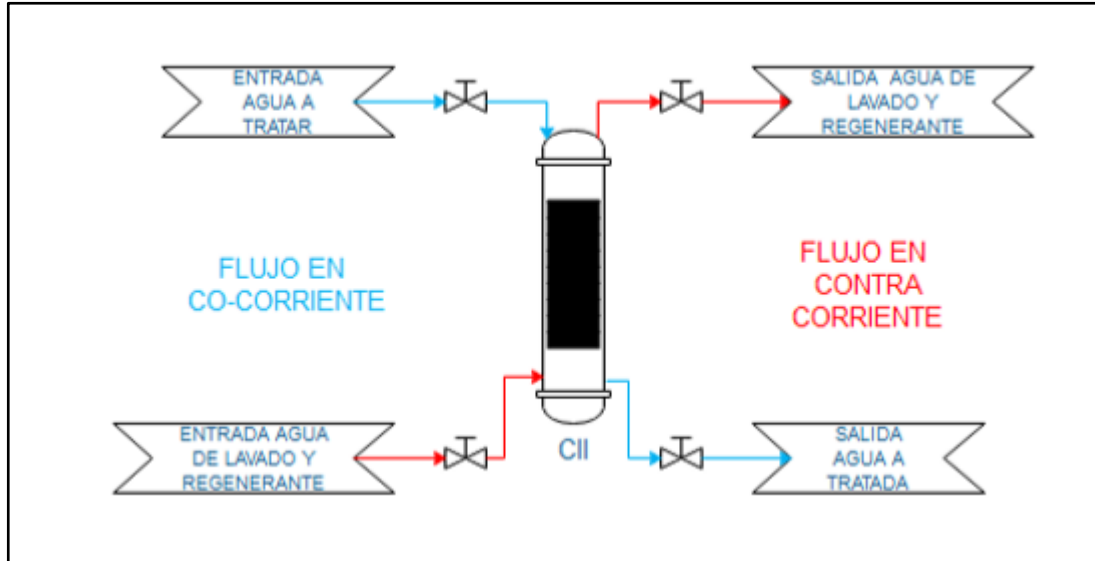
Para la implementación de las columnas de intercambio iónico se llevarán a cabo a partir de acero inoxidable 316, ya que este material tiene altas resistencias a la corrosión⁸⁰. Estas columnas de intercambio iónico contienen en la entrada y en la salida válvulas de bola PVC $\frac{3}{4}$ manuales, las cuales permiten la apertura y el cierre para el paso del fluido; en su parte interna posee filtros de tal manera que impiden la entrada de sólidos suspendidos como también la fuga de la resina al momento de realizar el lavado, seguido a esto se ubica un aspersor en la cual permite la distribución del fluido hacia la resina, de manera que se humedezca toda las zeolitas sin dejar caminos preferenciales al pasar el agua a tratar.

Al momento de hacer la regeneración es indispensable el uso de dos bombas centrifugas, las cuales cuentan con adaptadores machos de dos válvulas, se ubican en la parte superior e inferior de la CII, y esta impulsa la disolución que permite renovar la resina para dar comienzo a un nuevo ciclo, es allí donde el agua a tratar tiene contacto directo con la resina LEWATIT MP 68, de manera que esta intercambia iones hidroxilo por los ácidos fuertes que para este caso son los sulfatos y cloruros.

Se cuenta con un tanque de mezclado en donde se prepara la disolución de hidróxido de sodio con agua desionizada, que por medio de un adaptador de 2 válvulas se une a las válvulas de bola PVC $\frac{3}{4}$ y a su vez a una bomba centrifuga, en donde el fluido es impulsado de manera ascendente hacia la columna, para realizar las etapas como el retro lavado, la regeneración y el enjuague con un tiempo total de 1 hora y 15 minutos en cada una de las columnas respectivamente, en la **ilustración 39** se evidencia la entrada y la salida de agua a tratar y de igual manera el regenerante.

⁸⁰ ARAGÓN CARRILLO, Alberto. Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007. 101 p.

Ilustración 35. Esquema de entrada y salidas del fluido y del regenerante.

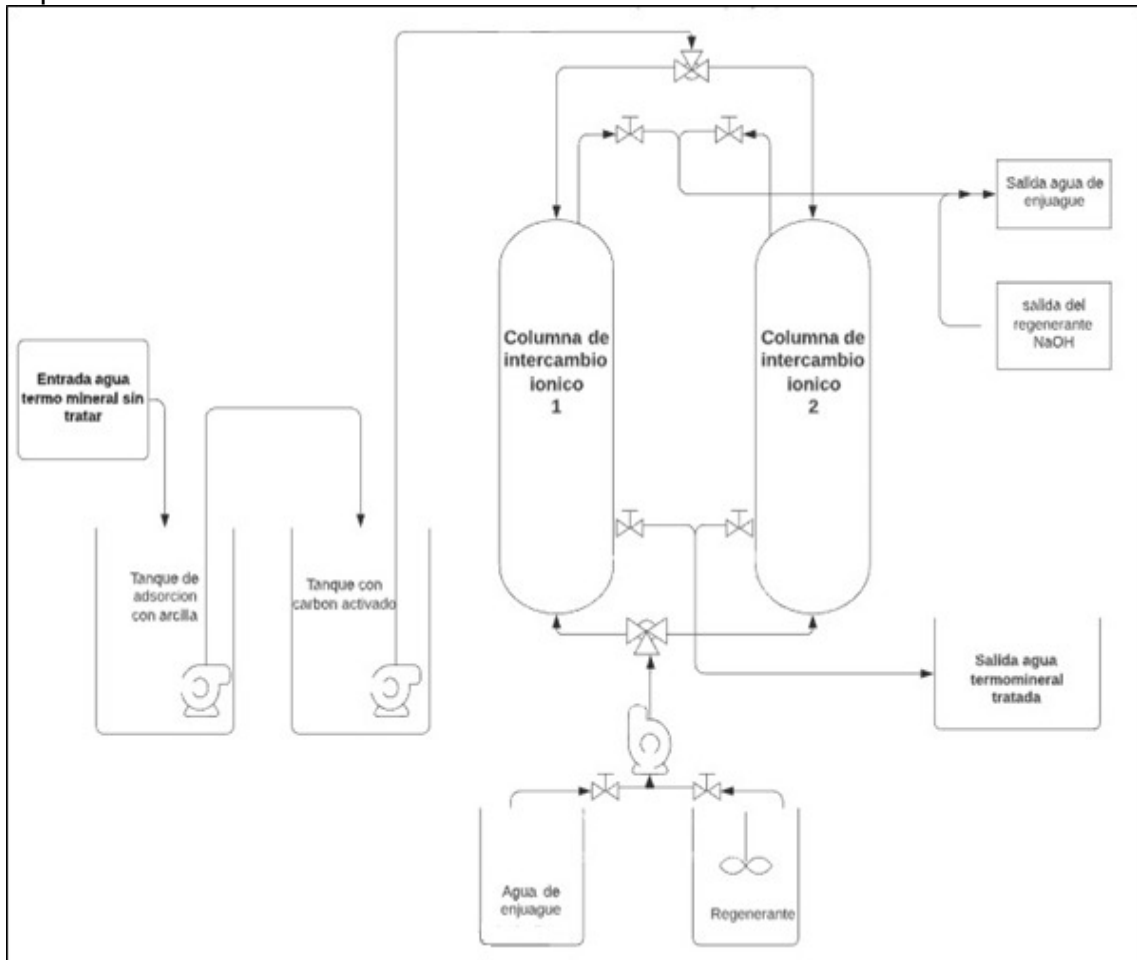


Fuente: CAPITULO 3 [Anónimo]. Intercambio Iónico. Modo de operación. P 14-16. (s.f)
Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> [consultado el día 26 de mayo del 2020]

El proceso se lleva a cabo a temperatura de 25°C ya que al terminar su ciclo de uso el agua sale por el ducto de la piscina hasta llegar al canal Vargas, en el cual durante todo el trayecto el agua pierde su temperatura, igualmente para realizar el proceso de carbón activado es necesario tener una temperatura baja para obtener mejores resultados.

En la **ilustración 40** se evidencia el diseño del proceso en la cual se encuentra la conexión entre columnas junto con las salidas y entradas del flujo, realizado en un software en línea para diseñar diagramas de tuberías e instrumentación denominado lucid chart.

Ilustración 36. Unidad de intercambio iónico a escala industrial para su implementación en el ITP



Fuente: elaboración propia

En la **Ilustración 40** se observa las unidades del proceso a escala industrial en la cual se encuentra:

- Tanque de adsorción de arcilla: es importante ya que este retiene ciertos iones con el fin de reducir los sulfatos para generar más sitios activos en la resina.
- Tanque de carbón activado: este equipo es imprescindible ya que remueve los cloruros del agua a tratar, para obtener un mayor funcionamiento por medio de este tratamiento es necesario manejar una temperatura ambiente que proporcione una mejor adherencia de los iones cloruros al tipo de carbón activado que se vaya a utilizar. Este es un proceso económico ya que se puede obtener a partir de diferentes materiales.
- Columnas de intercambio iónico: se implementan dos columnas para que su trabajo sea intercalado de tal manera que una hace el proceso de intercambio

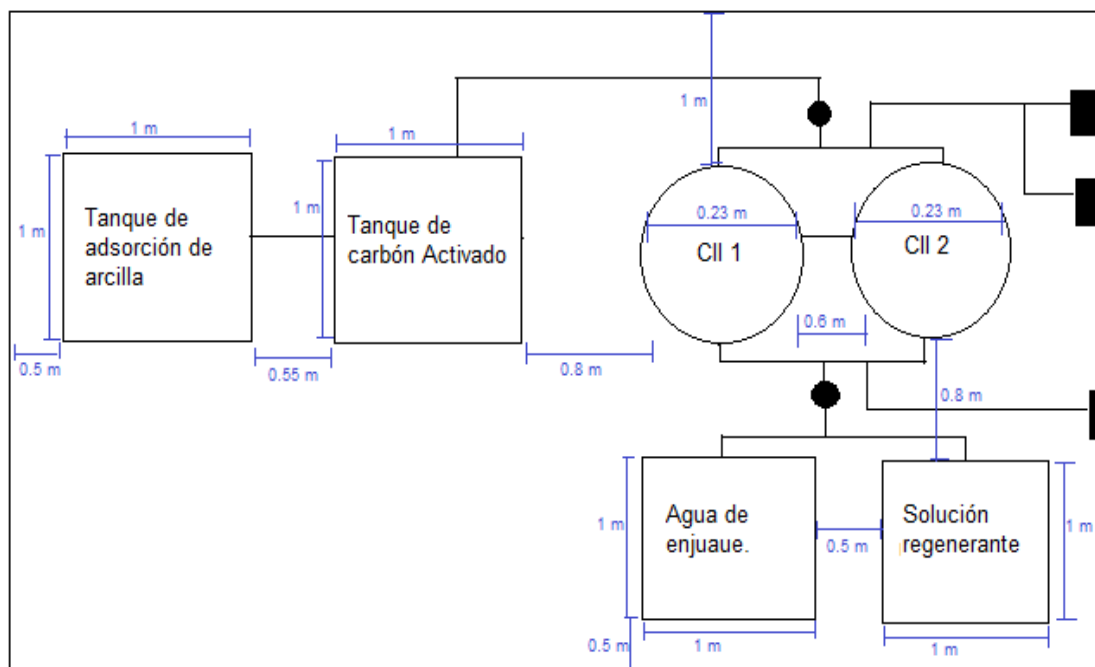
iónico mientras la otra está regenerando, a cada una de ellas se le adiciona resina aniónica de base débil ya que presenta una afinidad por los sulfatos y cloruros que se quieren retirar del agua termo mineral.

- Tanques de regeneración: el propósito de este equipo es liberar los espacios activos que fueron ocupados por los iones sulfatos y cloruros mediante hidróxido de sodio, permitiendo un nuevo ciclo para la resina. Se debe tener en cuenta que para la realización de una buena regeneración la proporción de NaOH debe ser exacta con respecto al agua.
- Tanques de enjuague: una vez realizada la regeneración es de gran importancia el enjuague debido a que es necesario retirar las trazas del hidróxido de sodio para que el proceso de intercambio ionio no se vea afectado. Este al igual que la regeneración se debe realizar en contracorriente, así, el agua tratada tiene una pureza mayor con respecto al flujo en co-corriente, así mismo se utiliza menos regenerante ya que los iones contaminantes no tienen que ser empujados a través de todo el lecho.

De acuerdo a la **Ilustración 41** se calcula el área total que ocupara el tratamiento de intercambio iónico junto con las alternativas previamente seleccionadas para obtener un mejor proceso en el ITP, el cual cuenta con un área total de 24.18 m².

Por otra parte, es necesario que las columnas estén en una zona cubierta para evitar el deterioro de las mismas provocados por las lluvias y exceso de sol, además, se recomienda que la separación de las columnas no pase de 0.6 m y los tanques de regeneración, enjuague, adsorción de arcilla y carbón activado estén ubicados cerca al sistema de intercambio iónico con el fin de supervisar su operación y evitar costos adicionales de transporte.

Ilustración 37. Vista superior del tratamiento a implementar.



Fuente: elaboración propia.

4.4 MANTENIMIENTO DE EQUIPOS

El mantenimiento de los equipos es de suma importancia para el desarrollo y preservación del mismo, como también la eficacia del proceso durante los ciclos de operación, ya que al tratarse de aguas con altos contenidos de minerales pueden generar problemas en ellos, por ende, es ideal realizar un mantenimiento preventivo y correctivo⁸¹ mensual en las bombas centrífugas, válvulas, adaptadores y las mismas columnas de intercambio iónico. Esto con el fin de proporcionar un mejor rendimiento durante el tratamiento; para ello se realizará un plan de mantenimiento preventivo que evite posibles daños y correctivo si se llegara a presentar complicaciones que requieran reparaciones inmediatas.

Se debe hacer una revisión pertinente en las tuberías que conectan con las columnas para no generar fugas u obstrucciones. Así mismo, la calidad de la resina es imprescindible debido a que estas zeolitas son fundamentales para el proceso, se debe tener un control en la salida del fluido ya que se puede presentar escapes de resina al momento de salir el efluente, por tal motivo se recomienda tener un buen cuidado de los filtros para asegurar la vida útil de la misma.

⁸¹ TECNOLOGÍA PARA LA INDUSTRIA. Check list para el mantenimiento preventivo de bombas centrífugas. Disponible en sitio web: <https://tecnologiaparalaindustria.com/check-list-para-el-mantenimiento-preventivo-de-bombas-centrifugas-2/> [Consultado el 29 de julio del 2020]

Por datos del proveedor la vida útil de la resina es de 5 a 10 años aproximadamente, sin embargo, en este proyecto se tratan aguas termales con altas cargas de iones, en donde se debe tener en cuenta que la vida útil podrá ser menor al tiempo estimado dado por la ficha técnica **ANEXO A**, por tal razón es necesario evaluar la capacidad de intercambio anualmente para evitar problemas durante el proceso y conocer el momento exacto en donde se debe renovar la resina.

La calidad del agua a la entrada del retro lavado, regeneración y enjuague es importante ya que al presentar contaminantes contribuye al mal funcionamiento de la resina produciendo una ineficiencia en el proceso de intercambio iónico, la solución regenerante debe ser preparada con concentraciones exactas para que no haya una pérdida de capacidad de intercambio y de esta manera se contamine del agua tratada.

5. EVALUACION DE COSTOS DE INVERSION Y OPERACIÓN

En este capítulo se realizará el análisis de los costos del intercambio iónico, teniendo en cuenta los parámetros como los costos de inversión e implementación, así mismo los costos de operación en cuanto a los servicios derivados, con el fin de saber si es viable el presente proyecto.

5.1 COSTOS DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Al realizar la experimentación a escala piloto, se determinó la viabilidad de la propuesta de implementación de intercambio iónico para el tratamiento del agua en las piscinas del ITP. Teniendo en cuenta el proceso experimental se determinó las especificaciones técnicas para llevarlo a escala mayor.

5.2 COSTOS DE INVERSION

La estimación de los costos de inversión se lleva a cabo mediante el valor comercial del material y equipos utilizados para la implementación de dichos instrumentos. los costos indicados a continuación fueron obtenidos de la página de ventas de Homecenter Colombia, los cuales fueron los elementos necesarios para llevar la construcción a escala mayor.⁸²

Se tiene en cuenta que cada uno de los precios presentes en la **tabla 25** es en relación a las dos columnas de intercambio iónico que se implementarían; a partir de los cálculos obtenidos en el capítulo anterior se genera las alturas de cada una de las columnas: 2.4185 m. Por esta razón se requiere 6 m para las dos columnas en total, de igual manera cada uno de los demás materiales y equipos se tienen en cuenta para el diseño de las dos columnas.

Tabla 25. Costos de inversión.

MATERIALES Y EQUIPOS	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
Tubo PVC / metro	6	\$14.400	\$86.400
Tapón de prueba tubo PVC	4	\$1.600	\$6.400
Adaptador macho 2 válvulas	4	\$84.900	\$339.600
Tubos PVC $\frac{3}{4}$	8	\$3.400	\$27.200
Válvula de bola PVC $\frac{3}{4}$	8	\$8.900	\$71.200

⁸² HOMCENTER, ventas online Colombia. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/373409/Tubo-Sanitario-4%22-x-1M/373409>[consultado el día 5 de junio del 2020]

Tabla 25. (Continuación)

Bomba centrifuga	2	\$ 150.300	\$300.600
Aspersor	2	\$58.200	\$116.400
Filtro	6	\$45.000	\$270.000
TOTAL			\$1.217.800

Fuente: elaboración propia

5.3 COSTOS DE OPERACION

Para el tratamiento de intercambio iónico no es necesario la utilización de productos químicos, por tal razón solo se tomará en cuenta la materia prima para las dos columnas estimadas, que tendrán una duración de 5 a 10 años como vida útil. Sin embargo, se adquieren estos insumos cada año así evitando pérdidas en la calidad de esta materia prima.

Tabla 26. Costos de materia prima.

Materia prima	Unidad	Cantidad/ año	Precio unitario	Precio total/ Año
Resina Lewitit MP68 (L)	1L	87	29.900+IVA (19%)	3.095.547
Hidróxido de sodio NaOH (kg)	1Kg	783	\$2.350	\$1.840.050
TOTAL				\$4.935.597

Fuente: elaboración propia.

5.3.1 Costos de energía eléctrica. En el costo energético se tiene en cuenta la energía requerida de cada equipo, para este caso se necesita una bomba sumergible centrifuga, donde se determina el valor unitario de la unidad de energía eléctrica en KW junto con la potencia requerida de cada uno de los equipos a utilizar. Las tarifas de energía eléctrica en Paipa son controladas por la empresa EBSA y establece un valor para el sector industrial no residencial de 525 COP/KWh.⁸³

Tabla 27. Costos de energía.

Equipo	Consumo (KW/h)	Consumo Anual (kw/h)	Costo de energía (COP/KWh)	Costo total de energía COP/AÑO
Bomba sumergible centrifuga	0,552	4769,28	\$575	\$2.742.336

⁸³ EBSA. Tarifa de energía del municipio de Paipa-Boyacá. Disponible en: <https://www.ebsa.com.co/nuestra-empresa.html> [consultado el día 5 de junio del 2020]

Tabla 27. (Continuación)

Total para 2 bombas	0,552	9538,56	\$575	\$5.484.672
---------------------	-------	---------	-------	-------------

Fuente: elaboración propia.

5.3.2 Costos de mantenimiento. En el presente proyecto se requiere de dos bombas centrifugas, la primera encargada de impulsar el agua a tratar y la segunda bomba impulsara el regenerante y agua desionizada para el lavado. Por tal razón su mantenimiento es de suma importancia para su buen funcionamiento, ya que el uso de estas es constante durante el proceso, el costo para cada bomba es de \$150.000 mensuales, anualmente es de \$1.800.000 respectivamente.⁸⁴

Tabla 28. Costos de mantenimiento de las bombas centrifugas.

Equipo	Cantidad	Costo mantenimiento por año (COP/año)
Bombas sumergibles centrifugas	2	\$3.600.000

Fuente: elaboración propia.

5.3.3 Costo de agua tratada. Para calcular el costo de agua tratada es necesario tener en cuenta la totalidad de los costos anteriores como también el caudal a escala industrial del proceso de intercambio iónico.

Tabla 29. Costo m3 para el agua termo mineral a tratar.

TOTAL, COSTOS (COP)	CAUDAL Q (m3/año)	COSTO DEL TRATAMIENTO POR METRO CÚBICO (COP/m ³)
\$15.238.069	4953,312	\$3076.33

Fuente: elaboración propia.

Considerando cada uno de los parámetros calculados en las tablas anteriores se obtiene un costo total de inversión de **\$1.217.800** y un costo total de operación de **\$14.020.269**; se evidencia un valor menor de inversión, debido al material utilizado en la CII.

Al implementar los procesos complementarios como lo es el carbón activado y la adsorción de arcilla incrementaría los costos, sin embargo, estos no se tomaron en cuenta ya que al momento de la experimentación solo se realizó con la CII, el cual se presentó una reducción de iones sulfatos y cloruros.

⁸⁴ IMPERBOMBAS SERVICIOS Y SOLUCIONES. Mantenimiento de bombas centrifugas. Disponible en sitio web: <https://www.imperbombas.com/>. [Consultado el 30 de julio del 2020]

6. CONCLUSIONES

- Con respecto a la literatura se puede concluir que la resina más viable es la resina aniónica de base débil, siendo esta de gran utilidad para la reducción de sales en el agua termal del ITP, provocando una remoción de dichos parámetros planteados como objetivos en el presente proyecto.
- Se diagnostico el estado en el que se encuentra el agua por medio de los análisis físico-químicos realizados por el ITP, en los cuales se evidencia un incumplimiento en sulfatos y cloruros mencionados por la entidad Corpoboyacá al no cumplir con la resolución 0631.
- Se establece tres tecnologías como posibles alternativas de tratamiento para la implementación en el ITP a través de las matrices Pugh, identificando el tratamiento indicado para obtener una reducción de los iones SO_4^{2-} y Cl^- . Por otra parte, se logra obtener el intercambio iónico como el mejor método, así mismo se seleccionó la resina aniónica de base débil por su afinidad a los ácidos fuertes y su bajo costo de implementación en comparación a otros tratamientos terciarios.
- Al diseñar la columna de intercambio iónico se pudo obtener una reducción de $6.000 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ debido a la eficiencia que presenta el intercambio iónico, sin embargo, se concluyó que para una mejor reducción es necesario la implementación de tratamientos previos mencionados en los capítulos anteriores.
- De acuerdo a la reducción según la experimentación a escala piloto, se continuó con el escalonamiento del proceso de intercambio iónico, especificando las diferentes etapas de carga: retro lavado, regeneración y enjuague, calculados a partir del caudal utilizado en el ITP, presentando un tiempo total de operación de la columna el cual es de 9 horas y 15 minutos.
- Se evalúan los costos de la implementación del proyecto a partir de un análisis, en donde se evidencia los costos de inversión involucrando la instalación de los equipos por un valor de \$1.217.800, así mismo se calculó la materia prima y energía eléctrica, por un valor de \$10.490.269. Se concluye que el valor de la inversión es menor al de operación al construir la columna con material PVC.
- Al tener en cuenta los procesos complementarios como lo es el carbón activado y la adsorción de arcilla posiblemente aumentaría el valor de inversión, sin embargo, no se tomaron en cuenta ya que al momento de la experimentación solo se realizó el intercambio iónico, este presentó una reducción de los iones sulfatos y cloruros, finalmente para conseguir mejores resultados se recomienda el uso de los tratamientos previos.

7. RECOMENDACIONES

- La implementación de regenerante a contracorriente es viable ya que se reduce costos en la implementación del hidróxido de sodio (NaOH) y de esta manera también disminuye el consumo de agua para este proceso, de igual manera en el enjuague.
- El uso de tratamientos previos como la implementación de carbón activado y la adsorción de arcilla puede generar una mayor disminución en sulfatos y cloruros, de tal manera que al momento de realizar el proceso de intercambio iónico disminuye los contenidos de estos iones en mayor cantidad.
- Implementar propuestas para la reutilización de aguas saliente al proceso de regeneración y enjuague de las columnas de intercambio iónico.
- Es indispensable controlar de forma constante las condiciones de operación recolectando el mayor número de muestras para el posible análisis con el objetivo de reducir y mejorar las tendencias.
- Indagar la posibilidad de implantar otro tipo de tratamiento terciario, el cual pueda presentar una disminución significativa en comparación al del intercambio iónico.
- Automatizar el proceso de intercambio iónico para facilitar el control y calidad del agua.
- Realizar múltiples pruebas a nivel laboratorio con el fin de corroborar el comportamiento del intercambio iónico para considerar la eficacia de manera más exacta.

BIBLIOGRAFIA

AEDYR. Tipos de configuración y módulos de membranas. 2020. Disponible en sitio web: <https://aedyr.com/tipo-configuracion-modulos-membranas/>

AFUEGOLENTO. [Anónimo] Contaminantes que elimina la osmosis inversa. Disponible en sitio web: <https://www.afuegolento.com/articulo/que-contaminantes-eliminara-agua-osmosis-inversa/18914/>

ALIBABA. [Anónimo]. Tratamientos de aguas, quelantes de resina de intercambio iónico. Disponible en sitio web: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/chelating-ion-exchange-resin-62350190950.html?spm=a2700.7735675.normalList.65.771a13d4pEQuiy&s=p&s=p>

APLICACIÓN DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA AL TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR. Estudio técnico y de viabilidad económica. Disponible en sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13099/Mem%C3%B2ria.pdf> 51.p

ARAGON CARRILLO, Alberto, Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Universidad Cádiz, España. 2007.

ARMAU, Cesar. Diseño de una planta de producción de agua de proceso para una central térmica de ciclo combinado. Universidad Jaume I. Escuela superior de tecnología y ciencia experimentales. Julio de 2015. Capítulo 6. Análisis de soluciones.

BOHÓRQUEZ, Cesar. Sarmiento, Higuera. Diego. Análisis del uso de biorreactores de membrana para tratamiento de aguas residuales y posible implementación en Colombia. Universidad católica de Colombia. Bogotá, 2017.30p. Disponible en sitio web: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15221/1/TESIS%20MBR.pdf>

CALIDAD DEL AGUA EN LOS SISTEMAS OPERADOS POR AGUAS REGIONALES EPM S.A. Disponible en sitio web: <https://www.grupo-epm.com/site/portals/23/documentos/Boletines/ABC-%20Calidad%20de%20Agua.pdf> [consultado el 18 de enero del 2020]

CAPÍTULO 3, Intercambio iónico. Disponible en sitio web: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>

CARBOTECNIA.: Intercambio iónico. México Disponible en sitio web: <https://www.carbotecnica.info/encyclopedia/intercambio-ionico/>

Carbón activado. México Disponible en sitio web.
<https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-carbon-activado/>

Osmosis inversa. México: Disponible en sitio web:
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa-y-membranas/que-es-la-osmosis-inversa/>

CHAVEZ, Marco. Selección y diseño de un equipo de intercambio iónico a escala de banca. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico Industrial. Instituto politécnico nacional.2000. Disponible en sitio web
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17014/1/25-1-11766.pdf>

COLOMBIA, Contrato No.FNT-327-2014 entre la fiduciaria colombiana de comercio exterior-fiducoldex S.A. Vocera del patrimonio autónomo-Fondo nacional del turismo-Fontur y 'piedad acosta bocanegra (2015). Disponible en línea:

https://fontur.com.co/aym_document/aym_estudios_fontur/PROYECTO_BANDERA_PARA_EL_TURISMO_TERMAL_EN_COL.PDF

CONDORCHEM EVITECH. México: RESINA DE INTERCAMBIO IONICO. Disponible en sitio web: <https://condorchem.com/es/resinas-intercambio-ionico/>

CORINA, Risso. Formación de aguas termales. Departamento de ciencias Geológicas exactas. Universidad de Buenos Aires 2014. Disponible en: <https://nexciencia.exactas.uba.ar/aguas-termales-risso-geologia>

DARDEL. François propiedades de las resinas. Capacidad de intercambio total y útil [En línea] http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html#particle_size

ESPEJO, Tatiana. Mantilla, José. Análisis fisicoquímicos de las aguas termo minerales de Cachicadan, Yanasara, Baños Chimú y Huaranchal en la libertad, Perú. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico.2013. 3p.

ESPINOSA, Rodríguez. Diseño de una planta de tratamiento para el drenaje ácido de una mina en el estado de México. Trabajo para obtener el grado de Maestría en ciencias. Especialidad en ingeniería ambiental. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1997. 99.p

FLUENCE NEWS TEAM. QUE ES EL INTERCAMBIO IÓNICO. Enero 27 del 2016. disponible en: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-intercambio-ionico/>

FUNCIONAMIENTO DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA.COPYRIGHT 2011.Disponible: http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html

GALEANO ROJAS V. Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Vélez-Santander. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad Católica de Colombia; 2016.

GARRIDO SCHNEIDER, Ríos Santiago. Caracterización geoquímica de surgencias frías de alta montaña en contextos geológicos termales del Pirineo Axial.2000 Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/sim_hidro_Murcia/tomo%20XXIV/54.pdf

GILARRANZ R.M.A. Intercambio iónico. Universidad Autónoma de Madrid. 2008.1-10 p.

GONZÁLEZ, RODRÍGUEZ. Diana Marcela. Martínez, Jaramillo Lorena. Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio iónico con aplicaciones en celdas de combustible alcalinas. Trabajo de grado como requisito para optar el título de ingeniero Químico. Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2009.9p

GONZÁLEZ Alberto. AQM laboratorios. Dureza del agua; Tipo de análisis. Septiembre 8,2014. Disponible: <http://aqmlaboratorios.com/dureza-del-agua-tipos-analisis/>

HIDROAGUA. Equipos para tratamiento y purificación de agua. 2020. Disponible en: <https://www.hidroagua.com.mx/intercambio-ionico.html>.

IAGUA. Factores para evaluar para la elección y selección de operaciones y procesos en el diseño de una PTAR. Venezuela. [consulta 20 enero del 2020] [sitio web]:<https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/factores-evaluar-eleccion-y-seleccion-operaciones-y-procesos-diseno-plan>

INGENIERÍA DE TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUAS. Resina de intercambio iónico. Disponible en sitio web: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/resinasintercambio7.pdf>

INGENIERÍA ROMIN, especialistas en agua. Ventajas de la filtración por osmosis inversa.2019. Disponible en sitio web: <https://romin.com/las-ventajas-la-filtracion-osmosis-inversa/>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

LAMBRAÑO, Jair y MOTTA Angie, Narvárez de la Rosa Elena. Diseño y montaje de un tren de intercambio iónico para el laboratorio de operaciones unitarias de la

universidad de San Buenaventura, seccional Cartagena. Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de ingeniero Químico.2018. Disponible en: http://45.5.172.45/bitstream/10819/6926/1/Dise%C3%B1o%20montaje%20tren%20de%20intercambio_Jair%20Lambra%C3%B1o_2018.pdf

LENNTECH. Información de producto. LEWATIT Mono Plus MP68. Edición octubre del 2012. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-MonoPlus-MP-68-SP-L.pdf>

LIZARAZO J, Orjuela M. Sistema de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Monografía para optar el título de especialización en administración en salud pública. Facultad de medicina, Especialización en administración en salud Publica, Universidad Nacional de Colombia;2013. [sitio web]: <http://bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>

LÓPEZ, Jorge. Planta desaladora de agua de mar por osmosis inversa. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Capítulo IV. Transporte a través de las membranas. [En línea:] <https://www.academia.edu/33143037/ANEJO_2_INTRODUCCIÓN_A_LA_OSMOSIS_INVERSA>

MANUAL DEL CARBON ACTIVADO. Master en ingeniería del agua (s.f) Universidad politécnica. Sevilla. Disponible en sitio web: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>

MARAVER. Francisco. Vademécum II de aguas mineromedicinales españolas. Editorial complutense S.A Primera edición 2010. 15.p [consultado el día 11 de enero del 2020]

MARTÍNEZ, Joelha. Tratamientos de aguas residuales e intercambio iónico. Issu, marzo 212[sitio web]: <https://issuu.com/joeymartinez/docs/revistavirtual>.

MARTÍNEZ, Palacio. Laura. Caracterización estructural y superficial de membranas micro porosas. Tesis de doctorado. Departamento de termodinámica y física aplicada. Universidad de Valladolid.2000. 3p.

MARTÍNEZ, Stagnaro. Evaluación sobre el uso de Arcillas para la adsorción de colorantes utilizados en la industria textil. Tesis doctoral para acceder al grado académico de Doctor en ingeniería. Universidad Nacional de la plata 2017.

MEDINA COLLANA, Juan. Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. Universidad Nacional de Ingeniería.

Facultad de ingeniería química y textil. Tesis para optar por el grado de maestro en ingeniería de procesos. Lima-Peru.2009. [sitio web]: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1066>

NEVAREZ, Martha. Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal de esmeraldas. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Riobamba, Ecuador. 2009.

NEXCIENCIA. [Anónimo] disponible en sitio web:<https://nexciencia.exactas.uba.ar/aguas-termales-risso-geologia>

PURE AQUA INC. OSMOSIS INVERSA & SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA. Disponible en sitio web: <https://es.pureaqua.com/que-es-la-osmosis-inversa/>

POLIESTIRENO GEL, RESINA CATIÓNICA FUERTEMENTE ACIDA. Purolite. Disponible en: <https://www.purolite.com/es/product-pdf/C100X10.pdf>

PROPIEDADES DE LAS RESINAS INTERCAMBIADORAS DE IONES. Estabilidad. 12 de octubre del 2017. [sitio web]: http://dardel.info/IX/resin_properties_ES.html#particle_size

QUIMBAYO CASALLAS, María y DUARTE BLANCO, Yamid. Desarrollo de una alternativa de tratamiento del agua residual de mina 2 Ltda., para su reutilización en la agricultura, e n la vereda el Vijal municipio de San-Mateo, Boyacá. tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Químico. Fundación universidad de América,2019 [En línea]: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7590/1/6142412-2019-2-IQ.pdf>

RAMALHO RS. Tratamiento de aguas residuales. Capitulo I. Niveles e tratamiento de aguas residuales y normas de calidad de las aguas. España: RevertéS.A;1993. [sitio web]: <https://books.google.com.co/books?id=30etGjzPXywc&lpg=PP1&dq=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&hl=es&pg=PR4#v=onepage&q=tratamiento%20de%20aguas%20residuales&f=true>

RAMOS, Erick. Separación del ácido anacardino por resina de intercambio iónico. Universidad Ramon Llull. 2016. Disponible en sitio web:https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/666977/Tesi_Erick_Harold_Ramos.pdf?sequence=2&isAllowed=y

RENDON, Claudia. Criterios de selección para el tratamiento de las aguas residuales. Relación constituyente, limitante, tratamiento. [citado el 20 de Enero del 2020] [En línea]: <https://es.slideshare.net/carodiaz7906/captulo-3-criterios-de-seleccin-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales>

RODRÍGUEZ Alejandro, Aplicaciones industriales 2011 disponible en:<https://es.scribd.com/document/58744086/APLICACIONES-INDUSTRIAL>
RODRÍGUEZ, Juana y TORREANO, Rosa. Estudio para caracterizar, evaluar y proteger las aguas minerales y termales de una comunidad: Aragon-España.2017. Disponible en: <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfart3/estudio.pdf>

RODRÍGUEZ, Francisco. Eliminación de metales alcalinos de Polioles mediante intercambio iónico. Tesis doctoral. Universidad de Castilla-La mancha 1995. Edición de COMPOBELL, S.L. Murcia. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=-nZfgSZSShQC&pg=PA73&lpg=PA73&dq=MALLA+en+acero+para+columna+de+intercambio+ionico&source=bl&ots=QcceVFRbju&sig=ACfU3U2inrCv7SntQQ65FpEleEyxbxZjg&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwisqtv3vrnqAhXrhOAKHUATA0Q6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=MALLA%20en%20acero%20para%20columna%20de%20intercambio%20ionico&f=false>

RODRÍGUEZ Marcela y RUIZ Paola. Desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales para la planta de producción de asequequicos S.A.S. Proyecto integral de grado para optar el título de Ingeniero Químico, Universidad de América. Bogotá-Colombia 2018.

SAAVEDRA, Aldo y ROMERO, Julio. Aspectos generales sobre procesos y tecnologías de membranas. Departamento de ingeniería Química. Universidad de Santiago de Chile. Disponible en sitio web: <http://ambiente.usach.cl/jromero/imagenes/GUIAS%20MEMBRANA/Documento%201%20Antecedentes%20generales%20sobre%20membranas.pdf> [consultado el 14 de enero del 2020]

SÁNCHEZ, Concepción. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Intercambio Iónico, tratamientos terciarios septiembre 2015. Disponible en línea: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Intercambio+i%C3%B3nico.pdf/a832c542-7c3a-4d31-789b-5f318eced659>

SANTAMARIA, Diana. Algas termófilas: revisión y caso de estudio parque nacional natural los nevados. Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el título de Microbiología industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Bogota.2011. Disponible en sitio web: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8744/tesis682.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [consultado el 20 de mayo]

SANZ, Joan.; GARCIA, Idoia. VEOLIA WATER SYMTEM IBERICA. [sitio web].http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/17802,Energiza__mayo_2011-2.pdf

WATER FILTER MEDIA, RESINA ANIÓNICA DE BASE DÉBIL. [consultado el 22 de marzo del 2020]. Disponible en: <http://www.alkalinewaterfiltersupplier.com/ion-exchange-resin/related-products/ion-exchange-resin-suppliers.html>

ANEXOS

ANEXO A FICHA TÉCNICA RESINA INTERCAMBIO IÓNICO

**INFORMACIÓN DE PRODUCTO
LEWATIT® MonoPlus MP 68**

X Lewatit®

Descripción general

Forma de suministro	Base libre/Cl
Grupo funcional	Amina terciaria / cuaternaria
Matriz	Poliestireno reticulado
Estructura	Macroporosa
Aspecto	Beige, opaco

Propiedades especificadas

	Unidades métricas	
Coefficiente de uniformidad	máx.	1,1
Tamaño medio del grano	mm	0,55 (+/- 0,05)
Capacidad total	min. eq/l	1,3

Propiedades físico-químicas

	Unidades métricas	
Densidad aparente (+/- 5 %)	g/l	620
Densidad	aprox. g/ml	1,04
Contenido en agua	% en peso	54 - 60
Variación de volumen hinchamiento total (forma suministro --> Cl)	típico, % vol.	24
Variación de volumen hinchamiento en la carga	típico, % vol.	8
Estabilidad rango de pH		0 - 14
Almacenaje del producto	máx. años	2
Almacenaje rango de temperatura	°C	-20 - +40

Este documento contiene información importante y debe ser leído por completo.

Edición: 2014-01-16
Edición previa: 2014-01-13

2/4

LANXESS
Energizing Chemistry

ANEXO B. CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO RECOMENDADAS PARA LA RESINA LEWATIT MP68

INFORMACIÓN DE PRODUCTO
LEWATIT® MonoPlus MP 68

 **Lewatit®**

Condiciones de funcionamiento recomendadas*

		Unidades métricas	
FUNCIONAMIENTO			
Temperatura de trabajo		máx. °C	70
Rango de pH de trabajo			0 - 7
Altura de lecho		min. mm	800
Pérdida de presión específica	(15 °C)	aprox. kPa*h/m²	1,0
Pérdida de presión		máx. kPa	300
Velocidad lineal	carga	máx. m/h	60
REGENERACIÓN, CONTRA-CORRIENTE			
Regenerante	tipo		NaOH
Regenerante	cantidad	aprox. g/l	50
Regenerante	concentración	aprox. % en peso	2 - 4
Velocidad lineal		aprox. m/h	5
Velocidad lineal	lavado	aprox. m/h	5
Consumo de agua de lavado	lento / rápido	aprox. BV	3
REGENERACIÓN, CO-CORRIENTE			
Regenerante	tipo		NaOH
Regenerante	cantidad	aprox. g/l	50 - 80
Regenerante	concentración	aprox. % en peso	3 - 5
Velocidad lineal		aprox. m/h	5
Velocidad lineal	contra lavado (20 °C)	aprox. m/h	4
Velocidad lineal	lavado	aprox. m/h	5
Consumo de agua de lavado	lento / rápido	aprox. BV	8
Expansión del lecho	(20 °C, por m/h)	aprox. % vol.	21
Zona libre	contra lavado (externo / interno)	% vol.	100

* Las condiciones de operación recomendadas hacen referencia a la utilización del producto bajo condiciones de trabajo normales. Están basadas en ensayos en plantas piloto y datos obtenidos de aplicaciones industriales. No obstante, para calcular los volúmenes de resina necesarios para una instalación de intercambio iónico son precisos datos adicionales.

Este documento contiene información importante y debe ser leído por completo.

Edición: 2014-01-16
Edición previa: 2014-01-13

3/4

LANXESS
Energizing Chemistry

ANEXO C. FICHA TÉCNICA HIDRÓXIDO DE SODIO

Rótulo NFPA



Rótulos UN



Fecha Revisión: 21/03/2005

SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del Producto:	HIDROXIDO DE SODIO
Sinónimos:	Soda cáustica (anhidra), Soda cáustica en escamas, Cáustico blanco, Lejía, Hidrato de sodio.
Fórmula:	NaOH
Número interno:	
Número UN:	1823 Sólido
Clase UN:	8
Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad:	Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2686355. Fax: (571) 2684367. Bogotá, D.C. - Colombia.

Teléfonos de Emergencia:

SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

Componente	COMPONENTES			
	CAS	TWA	STEL	%
Hidróxido de sodio	1310-73-2	N.R. (ACGIH 2004)	C 2 mg/m ³ (ACGIH 2004)	99-100

Uso: Neutralización de ácidos, refinación del petróleo, producción de papel, celulosa, textiles, plásticos, explosivos, removedor de pinturas, limpiador de metales, electroplateado, limpiadores comerciales y domésticos, pelado de frutas y verduras en la industria de alimentos.

SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

Peligro. Corrosivo. Higroscópico. Reacciona con agua ácidos y otros materiales. Causa quemaduras a piel y ojos. Puede ocasionar irritación severa de tracto respiratorio y digestivo con posibles quemaduras. En casos crónicos puede producir cáncer en el esófago y dermatitis por contacto prolongado con la piel.

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación:	Irritante severo. Los efectos por la inhalación del polvo o neblina varían desde una irritación moderada hasta serios daños del tracto respiratorio superior, dependiendo de la severidad de la exposición. Los síntomas pueden ser estornudos, dolor de garganta o goteo de la nariz. Puede ocurrir neumonía severa.
Ingestión:	Corrosivo! La ingestión puede causar quemaduras severas de la boca, garganta y estómago. Pueden ocurrir severas lesiones tisulares y muerte. Los síntomas pueden ser sangrado, vómitos, diarrea, caída de la presión sanguínea. Los daños pueden aparecer algunos días después de la exposición.
Piel:	Corrosivo! El contacto con la piel puede causar irritación o severas quemaduras y cicatrización en las exposiciones mayores.

ANEXO D. MANUAL DE ANÁLISIS DE AGUA (HASH)

1.5.1 Acopio de muestras de agua

Obtenga la mejor muestra por medio de un acopio minucioso. En general, acopie las muestras cerca del centro del recipiente o conducto por debajo de la superficie. Utilice únicamente contenedores limpios (botellas, vasos). Enjuague el contenedor varias veces primero con el agua de la cual se tomará la muestra.

Tome las muestras lo más cerca que pueda de la fuente de suministro. Esto disminuye la influencia que el sistema de distribución tiene sobre la muestra. Permita que el agua fluya lo suficiente para lavar el sistema. Llene los contenedores de muestras lentamente con un flujo moderado para evitar turbulencia y burbujas de aire. Recoja muestras de agua de pozos después de que el agua de la bomba haya fluido lo suficiente como para proporcionar agua representativa de las aguas subterráneas que alimentan al pozo.

Es difícil obtener una muestra totalmente representativa cuando se acopian muestras de aguas superficiales. Obtenga mejores resultados realizando pruebas a distintas muestras. Utilice muestras tomadas en momentos diferentes de lugares y profundidades diferentes. Los resultados se pueden utilizar para establecer un modelo para un cuerpo de agua en particular.

Generalmente, debe permitir que transcurra el menor tiempo posible entre el acopio de la muestra y el análisis de la misma.

CAPÍTULO 1

Tabla 5 Contenedores requeridos, técnicas de conservación y tiempos de espera¹

Nº de parámetro/Nombre	Contenedor ²	Conservación ^{3,4}	Tiempo máximo de espera ⁵
Tabla 1A - Pruebas de bacterias			
1-4. Coliforme, fecal y total	P, V	Frío, 4°C, 0,008% Na ₂ S ₂ O ₃ ⁶	6 horas
5. Estreptococo fecal	P, V	Frío, 4°C, 0,008% Na ₂ S ₂ O ₃	6 horas
Tabla 1B - Pruebas inorgánicas			
1. Acidez	P, V	Frío, 4°C	14 días
2. Alcalinidad	P, V	Frío, 4°C	14 días
4. Amoníaco	P, V	Frío, 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
9. Demanda bioquímica de oxígeno (BOD)	P, V	Frío, 4°C	48 horas
10. Boro	P, PFTE o cuarzo	HNO ₃ a pH<2	6 meses
11. Bromuro	P, V	No se requiere	28 días
14. Demanda bioquímica de oxígeno carbonado	P, V	Frío, 4°C	48 horas
15. Demanda química de oxígeno	P, V	Frío, 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
16. Cloruro	P, V	No se requiere	28 días
17. Cloro, total residual	P, V	No se requiere	Analice inmediatamente
21. Color	P, V	Frío, 4°C	48 horas
23-24. Cianuro, total y sujeto a cloración	P, V	Frío, 4°C, NaOH a pH>12, 0,6 g Acido ascórbico	14 días ⁷
25. Fluoruro	P	No se requiere	28 días
27. Dureza	P, V	HNO ₃ a pH<2, H ₂ SO ₄ a pH<2	6 meses
28. Ion de hidrógeno (pH)	P, V	No se requiere	Analice inmediatamente
31, 43. Nitrógeno orgánico y Kjeldahl	P, V	Frío 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Metales⁸			
18. Cromo VI	P, V	Frío, 4°C	24 horas
35. Mercurio [3, 5-8, 12, 13, 19, 20, 22, 26, 29, 30, 32-34, 36, 37, 45, 47, 51, 52, 58-60, 62, 63, 70-72, 74, 75] ⁹	P, V	HNO ₃ a pH<2	6 meses
Metales, excepto el boro, cromo VI y mercurio			
38. Nitrato	P, V	Frío, 4°C	48 horas
39. Nitrato-nitrito	P, V	Frío 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
40. Nitrito	P, V	Frío, 4°C	48 horas
41. Aceite y grasa	V	Frío, 4°C, HCl o H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
42. Carbono orgánico	P, V	Frío, 4°C, HCl o H ₂ SO ₄ o H ₃ PO ₄ a pH<2	28 días
44. Ortofosfato	P, V	Filtrelo inmediatamente; Frío, 4°C	48 horas
46. Sonda de oxígeno disuelto	V Botella y parte superior	No se requiere	Analice inmediatamente
47. Winkler	V Botella y parte superior	Fijelo en el sitio y almacene en lugar oscuro	8 horas
48. Fenol	V únicamente	Frío 4°C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
49. Fósforo elemental	V	Frío, 4°C	48 horas

**ANEXO E.
RESULTADOS FISICOQUÍMICOS DEL POZO AZUL.**



ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA
MONITOREO Y CONSULTORIA
 NIT. 826.000.346-1



Duitama, 2020/03/23

**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS
AG28525 - 20**

IDENTIFICACIÓN

Solicitante: **MARIA ANGELICA CELY**
 Dirección: Cr 23 8 35 Duitama
 Ensayo Realizado: Físicoquímico
 Tipo de Agua: Termomineral
 Sitio de Muestreo: Instituto de Turismo de Paipa Paipa
 Punto de Toma: Pozo Azul - T: 74°C
 Tipo de Muestreo: Simple
 Fecha y Hora de Muestreo: 2020/03/19 14:00
 Recolectada por: El Solicitante - Angelica Cely
 Fecha y Hora de Recepción: 2020/03/19 16:40
 Objeto: Caracterización
 Condición de Recepción: Al Clima - En Recipientes del Cliente
 Período de Análisis: De 2020/03/19 a 2020/03/23

DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACEPTABLE	METODO
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
pH	Unidades de pH	7,20	N.E.	SM 4500-H* B
Sulfatos (A)	mq SO ₄ ²⁻ /L	26817	N.E.	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Cloruros (A)	mq Cl ⁻ /L	6045	N.E.	SM 4500-Cl ⁻ -B
FIN DE LOS ENSAYOS				

**ANEXO F.
RESULTADOS FISICOQUÍMICOS DE LA PISCINA OLÍMPICA SIN TRATAR**



ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA
MONITOREO Y CONSULTORIA
 NIT. 826.000.346-1



Duitama, 2020/03/23

**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS
AG28526 - 20**

IDENTIFICACIÓN

Solicitante: **MARIA ANGELICA CELY**
 Dirección: Cr 23 8 35 Duitama
 Ensayo Realizado: Físicoquímico
 Tipo de Agua: Termomineral
 Sitio de Muestreo: Instituto de Turismo de Paipa Paipa
 Punto de Toma: Piscina Olímpica Agua Sin Tratar - T: 25°C
 Tipo de Muestreo: Simple
 Fecha y Hora de Muestreo: 2020/03/19 14:00
 Recolectada por: El Solicitante - Angelica Cely
 Fecha y Hora de Recepción: 2020/03/19 16:40
 Objeto: Caracterización
 Condición de Recepción: Al Clima - En Recipiente del Cliente
 Período de Análisis: De 2020/03/19 a 2020/03/23

DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACEPTABLE	METODO
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
pH	Unidades de pH	7,49	N.E.	SM 4500-H* B
Sulfatos (A)	mg SO ₄ ²⁻ /L	25251	N.E.	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Cloruros (A)	mg Cl ⁻ /L	5603	N.E.	SM 4500-Cl ⁻ -B
FIN DE LOS ENSAYOS				

**ANEXO G.
RESULTADOS FISICOQUÍMICOS DE LA PISCINA OLÍMPICA DESPUÉS DE
SER TRATADA**



ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA
MONITOREO Y CONSULTORIA
 NIT. 826.000.346-1



Duitama, 2020/03/22

**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS
AG28517 - 20**

IDENTIFICACIÓN

Solicitante: **MARIA ANGELICA CELY**
 Dirección: Cr 23 8 35 Duitama
 Ensayo Realizado: Físicoquímico
 Tipo de Agua: Termomineral
 Sitio de Muestreo: Instituto de Turismo de Paipa Paipa
 Punto de Toma: Piscina Olimpica - T: Ambiente; t: 0 Minutos
 Tipo de Muestreo: Simple
 Fecha y Hora de Muestreo: 2020/03/18 15:00
 Recolectada por: El Solicitante - Angelica Cely
 Fecha y Hora de Recepción: 2020/03/19 07:30
 Objeto: Caracterización
 Condición de Recepción: Al Clima - En Recipientes del Cliente
 Período de Análisis: De 2020/03/19 a 2020/03/22

DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACEPTABLE	METODO
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
pH	Unidades de pH	9.78	N.E.	SM 4500-H* B
Sulfatos (A)	mg SO ₄ ²⁻ /L	19616	N.E.	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Cloruros (A)	mg Cl ⁻ /L	1953	N.E.	SM 4500-Cl ⁻ B
FIN DE LOS ENSAYOS				



Duitama, 2020/03/22

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS
AG28516 - 20

IDENTIFICACIÓN

Solicitante: **MARIA ANGELICA CELY**
Dirección: Cr 23 8 35 Duitama
Ensayo Realizado: Físicoquímico
Tipo de Agua: Termomineral
Sitio de Muestreo: Instituto de Turismo de Paipa Paipa
Punto de Toma: Piscina Olimpica - T: Ambiente; t: 15 Minutos
Tipo de Muestreo: Simple
Fecha y Hora de Muestreo: 2020/03/18 15:00
Recolectada por: El Solicitante - Angelica Cely
Fecha y Hora de Recepción: 2020/03/19 07:30
Objeto: Caracterización
Condición de Recepción: Al Clima - En Recipientes del Cliente
Período de Análisis: De 2020/03/19 a 2020/03/22

DESCRIPCION	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MAX. ACEPTABLE	METODO
ANÁLISIS EN LABORATORIO				
pH	Unidades de pH	10,12	N.E.	SM 4500-H* B
Sulfatos (A)	mg SO ₄ ²⁻ /L	19806	N.E.	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Cloruros (A)	mg Cl ⁻ /L	4791	N.E.	SM 4500-Cl ⁻ -B
FIN DE LOS ENSAYOS				