



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LAVADO DE
RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE
ALIMENTOS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SU REUTILIZACIÓN**

Jackeline Elizabeth Arrecis Torres

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, mayo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LAVADO DE
RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE
ALIMENTOS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SU REUTILIZACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JACKELINE ELIZABETH ARRECIS TORRES
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2020

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LAVADO DE RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SU REUTILIZACIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 10 de julio de 2018.

Jackeline Elizabeth Arrecis Torres

Guatemala 29 de Octubre de 2019.

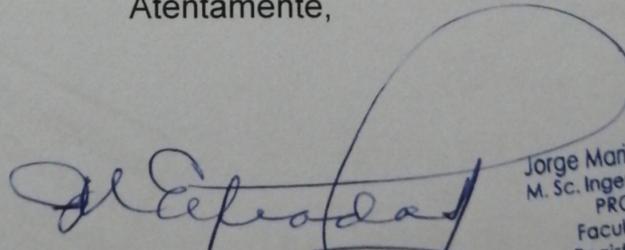
Ingeniero
Williams Álvarez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LAVADO DE RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SU REUTILIZACIÓN", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Jackeline Elizabeth Arrecis Torres, quien se identifica con el registro académico 2012-12674 y con el CUI 2260 97706 0101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

ASESOR

Ingeniero Químico

Colegiado activo no. 685

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
M. Sc. Ingeniero Químico Col. 685
PROFESOR TITULAR
Facultad de Ingeniería
Registro USAC 20080059



Guatemala, 27 de enero de 2020.
Ref. EIQ.TG-IF.004.2020.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **012-2018**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Jackeline Elizabeth Arrecis Torres**.
Identificado con número de carné: **2260977060101**.
Identificado con registro académico: **201212674**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

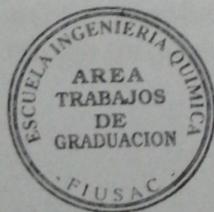
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LAVADO DE RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SU REUTILIZACIÓN

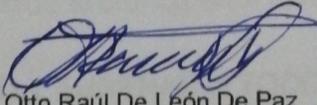
El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Jorge Mario Estrada Asturias, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Otto Raúl De León De Paz
Profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Guatemala, 18 de septiembre de 2020.

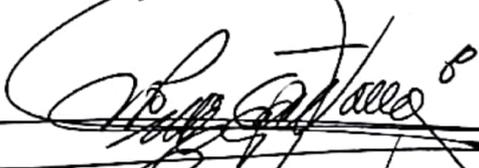
Ref. EIQ.243.2020

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LAVADO DE RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SU REUTILIZACIÓN** del(la) estudiante Jackeline Elizabeth Arrecis Torres, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

"Id y Enseñad a Todos"

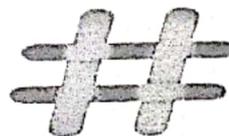

Ing. Williams G. Alvarez Mejía, M.I.Q.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/wgam



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 245.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LAVADO DE RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SU REUTILIZACIÓN**, presentado por la estudiante universitaria: **Jackeline Elizabeth Arrecis Torres**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, septiembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi guía, soporte y fortaleza en esta etapa de transformación espiritual y académica.
Mis padres	Marleni Elizabeth Torres Pérez y Ángel Estuardo Arrecis Pineda, por su apoyo, amor incondicional, ejemplo y guía durante toda mi vida.
Mis abuelos	Julieta Pineda (q. e. p. d), María Pérez y Raymundo Torres, por sus consejos, cuidados y su amor incondicional.
Mis tíos	Jeannet Torres y Hugo Molido (q. e. p. d) por su apoyo espiritual y estar presentes siempre.
Mi hermano	Jonathan Alexander Arrecis Torres, por motivarme, su amor fraternal durante toda mi vida y apoyo incondicional.
Mi novio	Yoni Daniel Cardona Arriaza, por ser una importante influencia en mi carrera, su amor incondicional, comprensión y por siempre tener una palabra de aliento.

Mis primos

Oscar y Stephany Arrecis, por inyectar alegría a mi vida juntamente con mis bellas sobrinas.

Mis amigos de la Facultad

Samadhi Padilla, Alejandra Morales, Laura Díaz, Michelle Méndez, Nadia Morán, Mildred Ola, Sandra Ayala, Yohana Rosales, José Gutiérrez, Jorge Sánchez, Romildo Dardón, Elder Villatoro, Luis Sut, Glenda Isidro, Jenifer Real, Lisbeth Flores, Arlene Leiva, Ingrid Leiva, Jazmín Salazar, María Fernanda de León y Oscar Nicolás por ser compañeros de lucha y personas incondicionales con las que siempre conté en este camino.

Familia López

Gabriela por tu amistad y cariño, mis pastores Elizabeth y José López por su apoyo, consejos y guía espiritual.

Hogar San José de la Montaña

A todas las madres del internado, especialmente a Madre Sonia Gamarro, Madre Santos, Madre Estela y Madre Imelda por sus cuidados, dedicación, guía y amor.

Mis jefes y compañeros de aseguramiento de calidad

Rosa de María Herrera, Jorge García, José Rodolfo Aguilar, Juan Lemus, Edwin Sanic, Juan Chipín, Luis Pirir y Moisés Escobar por la motivación y permisos durante todo el proceso experimental de mi trabajo de graduación.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me formó y me enorgullece día a día.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme sus aulas y pasillos donde desarrollé las habilidades necesarias para mi formación académica y profesional.
Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria	Especialmente al ingeniero Zenón Much por permitirme el uso de las instalaciones y transmitirme sus conocimientos.
Ingeniero Jorge Estrada	Por asesorarme y brindarme apoyo y conocimiento para la realización de este trabajo.
Operarios del proceso de desmineralización y mantenimiento	Cristian Car, Bryan Silva, Brayam Cáceres y Pedro Morales por su apoyo durante el proceso de captación de las muestras.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Importancia del agua.....	5
2.2. Aguas residuales.....	7
2.3. Desmineralización de agua.....	7
2.4. Intercambio iónico.....	8
2.5. Resinas de intercambio iónico.....	8
2.6. Tipos de resinas según su grupo funcional.....	10
2.6.1. Resinas catiónicas de ácido fuerte.....	10
2.6.2. Resinas catiónicas de ácido débil.....	10
2.6.3. Resinas aniónicas de base fuerte.....	11
2.6.4. Resinas aniónicas de base débil.....	11
2.7. Intercambiadores industriales.....	12
2.7.1. Producción.....	15
2.7.2. Regeneración.....	15
2.7.2.1. Contralavado.....	15

	2.7.2.2.	Regeneración	15
	2.7.2.3.	Desplazamiento	16
	2.7.2.4.	Enjuague final	16
2.8.		Intercambio iónico en columna	18
	2.8.1.	Etapas del proceso	18
		2.8.1.1. Empaquetamiento de la columna..	18
		2.8.1.2. Acondicionamiento del intercambiador	18
		2.8.1.3. Etapa de carga	19
		2.8.1.4. Etapa de regeneración.....	19
2.9.		Modo de operación	20
2.10.		Selección de regenerante	24
2.11.		Conservación del regenerante	24
2.12.		Componentes del sistema de tratamiento	26
	2.12.1.	Tratamiento preliminar.....	27
	2.12.2.	Tratamiento primario	27
	2.12.3.	Tratamiento parcial	27
	2.12.4.	Tratamiento secundario	27
	2.12.5.	Tratamiento terciario.....	27
2.13.		Tratamientos de aguas residuales.....	28
2.14.		Principales contaminantes.....	28
	2.14.1.	Sólidos en suspensión.....	28
	2.14.2.	Materia orgánica biodegradable	28
	2.14.3.	Materia orgánica refractaria.....	29
	2.14.4.	Nutrientes	29
	2.14.5.	Metales pesados	29
	2.14.6.	Compuestos tóxicos	29
2.15.		Legislación a cumplir según norma COGUANORNTG 29001	30

2.16.	Legislación a cumplir según el Acuerdo Gubernativo 236-2006	31
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	35
3.1.	Variables	35
3.1.1.	Dependientes.....	35
3.1.2.	Independientes	35
3.2.	Delimitación de campo de estudio	36
3.3.	Recursos humanos disponibles	36
3.4.	Recursos materiales disponibles	37
3.4.1.	Lista de reactivos	39
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	39
3.5.1.	Caracterización del afluente y efluente en la etapa de regeneración del proceso de desmineralización y tratamiento actual.	40
3.5.2.	Evaluación del tratamiento adecuado para el efluente de agua de lavado de resina de intercambio iónico	40
3.6.	Recolección y ordenamiento y procesamiento de la información	41
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	42
3.8.	Análisis estadístico	43
3.8.1.	Análisis estadístico para el procedimiento experimental	43
3.8.1.1.	Media	43
3.8.1.2.	Desviación estándar	44
4.	RESULTADOS.....	45

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	55
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
APÉNDICES	69
ANEXOS	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Síntesis de resinas intercambiadoras de iones (ácidas y básicas) a base de estireno y divinilbenceno	12
2.	Tipos de regeneración: sistema paralelo	13
3.	Tipos de regeneración: sistema contracorriente	14
4.	Proceso de intercambio iónico en columna: carga y regeneración por la parte superior de la columna	21
5.	Proceso de intercambio iónico en columna: regeneración por la parte inferior de la columna	21
6.	Evolución de la concentración en un lecho de intercambio iónico	23
7.	Curva de ruptura en un lecho de intercambio iónico	23
8.	Sistema de recuperación de regenerantes	25
9.	Sistemas de tratamiento de efluentes	26
10.	Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano	30
11.	Características químicas que debe tener el agua para consumo humano	31
12.	Relación de las sustancias inorgánicas cuya presencia en el agua es significativa para la salud	31
13.	Modelo de reducción progresiva de cargas de demanda bioquímica de oxígeno para descargas al alcantarillado público	32
14.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público	33
15.	Variación del pH en los puntos de muestreo	51

16.	Variación de la temperatura en los puntos de muestreo	52
17.	Variación de la demanda química de oxígeno en los puntos de muestreo	52

TABLAS

I.	Recurso material muestreo in situ.....	37
II.	Recurso material para las caracterizaciones.....	38
III.	Caracterizaciones de las muestras tomadas in situ	45
IV.	Caracterización de agua municipal utilizada en el proceso de desmineralización	46
V.	Caracterización de agua de lavado de resina catiónica	47
VI.	Caracterización de agua de lavado de resina aniónica	48
VII.	Caracterización del agua previa al tratamiento actual.....	49
VIII.	Caracterización del agua postratamiento.....	50
IX.	Comparación de los análisis fisicoquímicos de las muestras tomadas con los límites máximos permitidos del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006.....	53
X.	Comparación de los análisis fisicoquímicos de las muestras tomadas con los límites máximos permitidos de la NTG 29001 ...	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
L/s	Caudal
cm	Centímetros
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
σ	Desviación estándar
°C	Grados Celsius
Kg	Kilogramos
L	Litros
\bar{x}	Media aritmética
μS	Microsiemens
mg	Miligramos
mL	Mililitros
pH	Potencial de hidrógeno
s	Segundos
NTU	Unidades de medición de turbidez

GLOSARIO

Alcantarillado público	Conjunto de tuberías y obras accesorias utilizadas por la municipalidad para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo ordinario o de tipo especial, o combinación de ambas, que deben ser previamente tratadas antes de descargarlas a un cuerpo receptor.
Agua potable	Es el agua que puede ser consumida; no representa un riesgo para la salud.
Agua residual	Tipo de agua que ha recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.
Caracterización	Determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales, aguas para reúso o lodos.
Carga	El resultado de multiplicar el caudal por la concentración determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.
Caudal	Volumen de un fluido que pasa por una sección transversal en la unidad de tiempo.

Coagulante	Sal metálica que reaccionan con la alcalinidad del agua, para producir un flóculo de hidróxido del metal, insoluble en agua, que incorpore a las partículas coloidales.
DBO	Medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius.
DQO	Medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.
Efluente	Las aguas residuales descargadas por un ente generador.
Ente generador	Persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.
Floculante	Sustancia química que aglutina sólidos en suspensión, lo que provoca su precipitación.

Hipótesis	Proposición aceptable que ha sido formulada a través de la recolección de información y datos; aunque no esté confirmada, sirve para responder de forma alternativa a un problema con base científica.
Límite máximo	Límite máximo permisible. El valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reúso y lodos.
Monitoreo	Proceso mediante el cual se obtienen, interpretan y evalúan los resultados de una o varias muestras, con una frecuencia de tiempo determinada, para establecer el comportamiento de los valores de los parámetros de efluentes, aguas para reúso y lodos.
Muestra	Parte representativa por analizar de las aguas residuales, aguas para reúso o lodos.
Parámetro	Variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reúso o lodos, asignándole un valor numérico.
Punto de descarga	Sitio en el cual el efluente de aguas residuales confluye en un cuerpo receptor o con otro efluente de aguas residuales.

Potencial de hidrógeno	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución. Indica la concentración de iones hidronio [H ₃ O] ⁺ presentes en determinadas disoluciones.
Reúso	Aprovechamiento de un efluente, tratado o no.
Reutilización	Proceso mediante el cual se aprovecha algún bien que ya ha sido utilizado pero que aún puede ser empleado en alguna actividad secundaria.
Sólidos disueltos	Medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión microgranular (sol coloide).
Tratamiento de agua	Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

RESUMEN

En la presente investigación se evaluará el tratamiento actualmente utilizado para el tratamiento del agua de lavado de resinas de intercambio iónico en el proceso de desmineralización de agua¹, en una planta manufacturera de alimentos (dedicada a la elaboración de aditivos, emulsificantes y preservantes, la mayoría en polvo) situada en la ciudad de Guatemala.

Existe infinidad de estudios y diseños de plantas de tratamiento de aguas residuales para aprovechar el recurso hídrico debido a su escasez actual; muchos de los tratamientos pueden generar costos altos o simplemente no se logran los parámetros esperados para su reutilización. Toda empresa debe ser consiente de los desechos industriales que genera y la magnitud de repercusión en la sociedad y el medio ambiente; de allí la necesidad del presente estudio.

El proceso de desmineralización engloba el tratamiento de aguas. En una de sus etapas, las resinas deben regenerarse utilizando sales y ácidos de acuerdo a la naturaleza de las mismas, y así nuevamente tener la capacidad de adsorber los iones del agua del siguiente lote que será desmineralizado.

El proceso de regeneración de las resinas es la etapa en la que se enfocará esta investigación, debido a que posteriormente se obtienen disoluciones con concentraciones altas, tanto ácidas como básicas, y muy concentradas en metales. Como se mencionó, la planta manufacturera de alimentos consta de un

¹ En sección de apéndice se presenta el diagrama de flujo del proceso actual.

tratamiento para dicha agua y por ello se evaluará si este cumple con los requisitos necesarios para su desecho en los desagües.

De no ser así se propondrán alternativas para tratar los efluentes, recircular en el siguiente lavado o utilizar en la prueba de riego de furgones. Esta prueba se realiza a los furgones para verificar que no posean filtraciones de agua, para proteger la integridad del producto terminado ya que la humedad es un parámetro perjudicial. De no cumplir con las especificaciones requeridas para los usos mencionados, determinar la forma adecuada de eliminarlas.

Se desea proponer un tratamiento² para el agua utilizada en el lavado de las resinas. Con el tratamiento adecuado identificado se tendrá la factibilidad de recircular dicha agua en el siguiente proceso.

De no ser favorable lo anteriormente descrito, podría reutilizarse el agua de lavado de la resina post tratamiento y utilizarse en las pruebas de riego de furgones. De ser un caudal muy grande se verificará que cumpla con los estándares legales del país para ser desechada.

Dicho estudio será de beneficio para la empresa debido a que si es factible su reutilización se minimizará el consumo de agua, repercutiendo en un gasto menor, aunque esto dependerá de la inversión que se deba hacer para el tratamiento del efluente. Así mismo, la empresa podrá contar con un manejo adecuado de desechos hídricos, lo cual es muy significativo en la búsqueda de certificaciones ISO.

² En sección de apéndice se presenta el diagrama de flujo propuesto para el proceso.

OBJETIVOS

General

Evaluar el sistema actual de tratamiento de agua de lavado de resina de intercambio iónico en una industria manufacturera de alimentos y propuesta de mejora para su reutilización.

Específicos

1. Caracterizar el efluente de agua de lavado de los tanques de resina de intercambio iónico.
2. Caracterizar el agua municipal utilizada en el proceso de desmineralización.
3. Caracterizar el agua tratada y verificar que cumpla con los estándares normativos legislados por el país y determinar la viabilidad de su recirculación en el proceso.
4. Elaborar un diagrama de flujo donde se especifique el procedimiento de funcionamiento del tratamiento actual del agua de lavado de resinas de intercambio iónico.
5. Comparar y evaluar los resultados de las caracterizaciones de los objetivos anteriores y proponer el tratamiento adecuado para el efluente de agua en el lavado de las resinas de intercambio iónico.

HIPÓTESIS

Hipótesis conceptual

El agua de lavado de resina de intercambio iónico no cumple con los parámetros necesarios para su reutilización en el proceso de desmineralización de agua.

Hipótesis nula:

La concentración de los regenerantes para activación de la resina de intercambio iónico no influye significativamente en los parámetros del efluente posterior al lavado.

Hipótesis alternativa:

La concentración de los regenerantes para activación de la resina de intercambio iónico influye significativamente en los parámetros del efluente posterior al lavado.

INTRODUCCIÓN

La importancia de tratar el agua de desechos industriales tiene dos razones: la primera es cumplir con la legislación guatemalteca como conciencia ambiental y, de esta forma, contribuir a disminuir la contaminación. La segunda razón es respetar los derechos de los guatemaltecos a tener una vida digna, como es el acceso al agua. En nuestro país, a pesar de contar con varios cuerpos de agua, lastimosamente no se ha podido mantenerlos sanos. Además, no hay verificaciones periódicas de los desechos que las industrias vierten a las alcantarillas. La ley a pesar de que existe, no se ha podido aplicar en su totalidad. Esta indiferencia social de parte de las industrias repercute en los guatemaltecos y guatemaltecas que no tienen acceso a un servicio vital como el agua. Otros factores por los que no tienen acceso son debido a que no hay suficiente agua adecuada para su distribución a la población, ya que una gran proporción se encuentra contaminada y no se tiene el presupuesto para su debido tratamiento. La distribución de agua en el país es inadecuada, ya que las redes de tuberías existentes no son suficientes, inexistentes o no han tenido el mantenimiento adecuado para transportar el agua por largas distancias. Las comunidades rurales son las más afectadas y nadie hace nada para mejorar su situación.

Si el agua llega a los hogares se corre el riesgo de que no cumpla con los estándares normalizados; así mismo, el agua de los ríos y lagos que las personas usan como su único acceso al agua, tienen parámetros de calidad que difícilmente cumplen con los límites permisibles. La mayoría de los responsables son las industrias que prefieren desechar sus aguas residuales sin invertir en un tratamiento adecuado para sus descargas al alcantarillado o cuerpos de agua. Para el gobierno, cumplir con dichos parámetros tampoco forma parte de sus

prioridades y las personas, debido a la necesidad del servicio, utilizan dicha agua sin tener conciencia de que podrían tener problemas o secuelas a largo o mediano plazo.

Debido a la escasez del agua a nivel mundial y nacional, surge la necesidad de buscar alternativas para aprovechar su utilidad; una alternativa que será evaluada es tratar el agua que es desechada al lavar las resinas de intercambio iónico en el proceso de desmineralización, en la etapa de regeneración.

Se busca cumplir con las normas estipuladas para aguas de desechos industriales y determinar si es posible reutilizar en el proceso dicha agua después del tratamiento adecuado. Se puede minimizar los costos de operación de desmineralización así mismo contribuir ambientalmente con el país y ser un agente de cambio.

Con lo anterior se podrá cumplir con los requisitos de una buena gestión ambiental y repercutir en puntuaciones favorables al momento de buscar certificaciones internacionales.

1. ANTECEDENTES

Junto al crecimiento industrial del país han aumentado residuos; muchos de ellos pueden ser tratados aunque, generalmente, económicamente no siempre son viables. A continuación se citará algunas investigaciones en la rama de tratamientos de aguas residuales de diversos tipos e industrias.

Sheila N. Fion A. (2004) realizó su tesis sobre un diseño de la planta de tratamiento de aguas para la recuperación de agua y desechos en una planta de productos alimenticios del tipo avícola. Al implementarlo logró que la materia flotante fuera ausente en el efluente. Al reutilizar el aceite de motores y no desecharlos en el drenaje disminuyó un 39 % la concentración DBO. El lodo remanente del proceso de eliminación de sólidos se reutiliza en la industria del compostaje y representa un ingreso económico para la planta. Concluyó que al incluir un desmineralizador en el tratamiento terciario el impacto ecológico disminuiría.

El estudio de factibilidad en el reúso de aguas servidas tratadas en un condominio, realizado por Francisco Jo Chan en 2006, concluyó que era factible, viable y rentable montar una planta de tratamiento de aguas residuales dentro del condominio, ya que generaría ingresos y excedentes de acuerdo al capital invertido.

En octubre del año 2007, Ednar Pável Ramírez Lorenzana realizó una evaluación de la planta de tratamiento de aguas de una industria farmacéutica nacional. Según el reglamento de descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos y propuesta para el aprovechamiento de desechos,

determinó la eficiencia de la planta de tratamiento de agua en función de la cantidad de carga orgánica que removía en los diferentes tratamientos físicos y biológicos, con un valor del 59,09%. Propuso su reúso en riegos para mejoramiento del suelo y fertilizante de cultivos. Determinó que la utilización de los desechos era viable y económica.

Evaluación del sistema de recuperación de agua de lavadoras y su impacto en la reducción de consumo de agua suave en el área de lavado de envases en una embotelladora de bebidas carbonatadas, fue el trabajo de graduación presentado en el año 2012 por Miriam Carolina Juárez Méndez. Después de realizar balances de masa y un control del proceso del sistema de recuperación de agua, concluyó que el impacto en la reducción del consumo de agua suave en lavadoras con el sistema instalado era positivo debido a que se contabilizó un ahorro de 1 197 m³ mensualmente. No fue posible la implementación del mismo por no cumplir con las especificaciones técnicas de temperatura y cloro libre establecidas por la marca registrada.

Así mismo, Pablo Aníbal Arango Cáceres presentó una propuesta de tratamiento de agua de lavado de tanques de pinturas acuosas en planta manufacturera de pinturas. Concluyó que el tratamiento apropiado era químico para cumplir con los parámetros establecidos por el Reglamento de descargas y reúso de aguas residuales. Utilizó rejillas de barras en el pretratamiento para prevenir que llegaran objetos voluminosos ajenos al proceso de lavado de los tanques de elaboración de pinturas y provocaran taponamientos en los dispositivos.

Luis Alfredo Lemus Mayora en el 2013 diseñó un sistema de reutilización del efluente de una planta de tratamiento de agua residual, en un complejo industrial dedicado a la fabricación y envasado de bebidas. Definió el área

necesaria para reutilizar el agua, la distancia que debía recorrer y el sistema de conexión de tubería adecuada; así mismo, realizó una evaluación de costos del material a utilizar como tuberías, bombas, accesorios, entre otros. Con el diseño propuesto determinó el uso que se le daría al agua tratada, entre los cuales se encuentran: sanitarios, riego, lavado exterior de camiones y vehículos. Así mismo, con el diseño se reutilizaría el 35 % de agua empleada diariamente.

El ingeniero Reinaldo Heriberto García Guillermo en el 2014, realizó una caracterización y propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la industria de galvanizado de lámina por inmersión en caliente; determinó que las aguas residuales del proceso no cumplían los parámetros legislados y propuso un tratamiento que consiste en la neutralización de ácidos, aireación, sedimentación e intercambio iónico.

Posteriormente, Ervin Noé Aguilar en el 2015, implementó un sistema de recirculación de agua para reusarla en el área de desmoldeo y tanques de lixiviación (*leaching*), como parte del proceso de fabricación de guantes de látex. El agua de lixiviación utilizada en el proceso de desmoldeo fue tratada por coagulación-floculación para luego ser decantada y filtrada, para finalmente ajustar su pH y reutilizarla en el proceso y disminuir el consumo de agua. Al comparar los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua contaminada y del agua tratada, se determinó que el agua no puede ser tratada por el proceso de coagulación-floculación, ya que aumentaban los parámetros de calidad del agua. Resultó el sulfato de aluminio ideal para clarificar el agua. Llegó a la conclusión de que el tratamiento debía ser complementado con un tratamiento secundario.

Estudio y análisis de factibilidad para reutilización del agua en enjuagador de botellas en una línea de producción en empresa envasadora de bebidas, fue

el título del trabajo de graduación de María Alejandra Sánchez García en el año 2016. Determinó que era posible reutilizar el agua, pero era necesario un post-tratamiento de la misma para reingresarla al proceso, cumplir con las normas de calidad y mantener la inocuidad en la producción; así mismo, con el análisis beneficio/costo determinó que el proyecto no era factible económicamente para la empresa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Importancia del agua

El agua es un compuesto que se forma a partir de la unión de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno mediante enlaces covalentes; su fórmula molecular es H₂O y se trata de una molécula muy estable.

En la estructura de la molécula, los dos átomos de hidrógeno y el de oxígeno están dispuestos en un ángulo de 105 °, lo cual le confiere características relevantes.³

Los recursos hidráulicos han tenido importancia crítica para la sociedad humana desde que las personas descubrieron que podían producir alimentos cultivando plantas. Las ciudades y pueblos surgieron desde el este de Egipto de Mesopotamia (Iraq en nuestros días) luego de la revolución agrícola que tuvo lugar alrededor del año 3500 a. C. requerían una provisión disponible de agua para sus necesidades domésticas y agrícolas. Con el tiempo, el agua corriente impulsó máquinas que cortaban madera, molían granos y suministraban potencia motriz para muchos procesos industriales. La abundancia del agua la hacía ideal como disolvente universal para limpiar y arrastrar todo tipo de residuos de las actividades humanas. Hasta hace poco tiempo el enfoque del suministro de agua para cualquier propósito era sencillo: o bien ubicarse cerca del agua, como lo hicieron muchas ciudades, o almacenar y transportarse en ella hasta el lugar donde se necesitaba.

Una vez utilizada, el agua se descargaba por lo general en el cuerpo de agua más próximo, en muchos casos en la misma fuente de la cual procedía. El suministro

³RÍO, Gonzalo. *Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.* <https://aguaorg.mx/que-es/#agua>. Consulta: marzo 2018.

a bajo costo de grandes cantidades de agua fue uno de los cimientos de la sociedad moderna.

El crecimiento exponencial de la población y la expansión industrial crearon la necesidad de suministrar y distribuir agua en mayores cantidades. Esta necesidad se satisfizo construyendo presas, embalses, desviaciones de ríos, tuberías y acueductos para llevar agua desde fuentes más distantes y no contaminadas. La aplicación generalizada de la tecnología moderna a la provisión de agua en abundancia para usos municipales, industriales y agrícolas sin restricción, sin incentivos que alienten su reutilización o conservación, han incrementado en alto grado la competencia para fuentes limitadas de agua fácilmente accesible. Ciertas actividades, como las grandes extracciones de agua para fines mineros o agrícolas, que antes no afectaban a otros usuarios del agua, ahora inciden de manera directa en la provisión de agua municipal de ciudades que están a cientos de kilómetros de distancia. Además de los problemas técnicos que implica la satisfacción de las necesidades de agua, existen crecientes preocupaciones ambientales que es preciso atender. Las inquietudes acerca de los efectos a largo plazo del uso del agua y la pérdida de la misma para fines estéticos y recreativos suelen hallarse en conflicto con el objetivo de mantener un suministro de agua a bajo costo.”⁴

Según la Organización Mundial de la Salud, el agua es esencial para la vida. La cantidad de agua dulce existente en la tierra es limitada, y su calidad está sometida a una presión constante.

La conservación de la calidad del agua dulce es importante para el suministro de agua de bebida, la producción de alimentos y el uso recreativo. La calidad del agua puede verse comprometida por la presencia de agentes infecciosos, productos químicos tóxicos o radiaciones.

⁴ GLYNN, Henry y HEYNKE, Gary. *Ingeniería Ambiental*. p. 338.

2.2. Aguas residuales

Son aquellas que al ser utilizadas por los seres humanos, representan un peligro y deben ser desechadas, debido a que contienen gran cantidad de sustancias o microorganismos. Hay de diversos orígenes como aguas residuales domésticas o aguas negras, aguas blancas (de procedencia atmosférica), aguas residuales industriales y aguas residuales agrícolas.⁵

Históricamente, las aguas residuales no han sido un factor intrínseco de la producción y se suponía que el medio ambiente las absorbía y les daba un tratamiento natural. El progreso cultural e industrial acabó llevando aquella práctica a situaciones límite.

La industria genera una gran cantidad de residuos muchos de los cuales son recuperables. El problema está en que las técnicas para aprovechar los residuos y hacerlos útiles son caras y en muchas ocasiones no compensa económicamente hacerlo. De todas formas, está aumentando la proporción de residuos que se valorizan para usos posteriores.⁶

2.3. Desmineralización de agua

Por proceso de desmineralización de agua se entiende la eliminación de las sales disueltas (iones catiónicos y aniónicos). Los métodos más comunes de desmineralización son intercambio iónico, destilación y osmosis inversa.

⁵ GARCÍA, Espigares y PÉREZ J. *Aguas residuales*. http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf. Consulta: marzo 2018.

⁶Universidad de Navarra. *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*. <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/13Residu/120ResInd.html>. Consulta: marzo 2018.

2.4. Intercambio iónico

La operación de intercambio iónico comprende el intercambio entre los iones presentes en una disolución (contaminantes) y los iones de un sólido (resina). Las operaciones de intercambio iónico son básicamente reacciones químicas de sustitución entre un electrolito en solución y un electrolito insoluble con el cual se pone en contacto la solución. Los mecanismos de estas reacciones son tan parecidos a las operaciones de adsorción que se considera como un tipo especial de adsorción.⁷

Algunas de las aplicaciones más importantes del intercambio iónico son el ablandamiento y desmineralización de agua, eliminación de color en la producción de azúcar, y recuperación de antibióticos y vitaminas producidas mediante fermentación.⁸

2.5. Resinas de intercambio iónico

Las resinas sintéticas de intercambio iónico son pequeñas sustancias granuladas e insolubles que consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales; el entrecruzamiento confiere a la resina estabilidad y resistencia mecánica, así como insolubilidad. El grado de entrecruzamiento es un factor importante de controlar, ya que no solo determina las propiedades mecánicas de la resina sino también su capacidad de hincharse (*swelling*) y de absorber agua.

⁷Web del profesor. *Intercambio iónico*. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/intercambio_ionico.pdf. Consulta: marzo 2018.

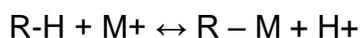
⁸UNIZAR. *Intercambio iónico*. <http://eina.unizar.es/grados/quimica/wp-content/uploads/2012/06/P.pdf>. Consulta: marzo 2018.

El hinchado del polímero se produce cuando el disolvente penetra en los poros de la estructura polimérica, ensanchándolos y abriendo la estructura.

El proceso de hinchamiento favorece la permeabilidad de iones en la matriz de la resina y mejora la accesibilidad a los grupos funcionales.

Estos grupos funcionales de las resinas intercambian en el caso más sencillo iones H^+ y OH^- , presentes en la solución según sea el tipo de intercambiadores. De ahí que, generalizando todavía más la definición, podamos considerar las resinas intercambiadoras de iones como ácidos o bases orgánicas, de fórmula general $R - H$ y $R - OH$, en donde R representa una estructura molecular orgánica, originada por condensación o polimerización, que contiene casi siempre cadenas laterales largas.⁹

Si el ion intercambiable en la resina es el H^+ , evidentemente podrá ser sustituido por otros iones de su mismo signo según la siguiente ecuación:



En el segundo caso, se tendría análogamente:



La ventaja de las resinas de intercambio iónico es que tienen habilidad para recuperar la capacidad original mediante el tratamiento con una solución que puede ser ácido, base o sal (según la resina y el uso) que desplace los iones retenidos por la resina y los remplace por iones deseados.¹⁰

⁹Análítica Inorgánica. *Resinas intercambiadoras de iones*. <http://www2.udec.cl/~analitic/Interciones.pdf>. Consulta: marzo 2018.

¹⁰Universidad de Sonora. *Intercambio iónico*. <http://esis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>. Consulta: marzo 2018.

2.6. Tipos de resinas según su grupo funcional

A continuación se detallan las más conocidas industrialmente.

2.6.1. Resinas catiónicas de ácido fuerte

Se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico. El grupo funcional es el ácido sulfónico (-SO₃H) que es altamente ionizable e intercambian iones positivos (cationes). Estas resinas operan a cualquier pH, requieren de excesivas cantidades de regenerante y son las más utilizadas.¹¹

2.6.2. Resinas catiónicas de ácido débil

El grupo funcional es un ácido carboxílico (COOH) presente en uno de los componentes del copolímero principalmente el ácido acrílico o metacrílico. Son resinas altamente eficientes, tienen menor capacidad de intercambio, no son funcionales a pH bajos, elevado hinchamiento y contracción lo que hace aumentar las pérdidas de carga o provocar roturas en la columna cuando no cuenta con suficiente espacio en su interior. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo. Estas resinas fijan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio de los bicarbonatos y liberan ácido carbónico. Los cationes unidos a los aniones sulfatos, cloruros y nitratos no son intercambiados.¹²

¹¹Universidad de Sonora. *Intercambio iónico*. <http://esis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>. Consulta: marzo 2018.

¹² *Ibíd.*

2.6.3. Resinas aniónicas de base fuerte

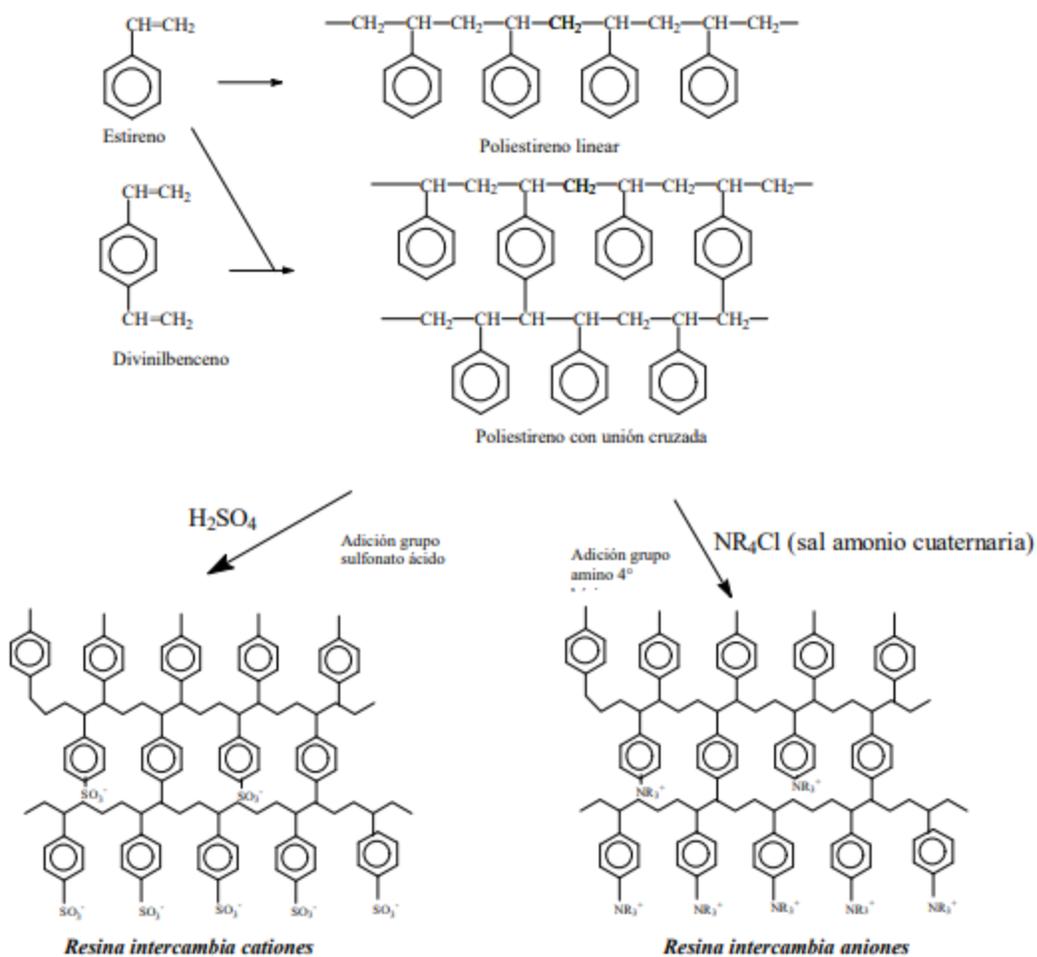
Se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbencenoclorometilados con aminas terciarias. El grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, (R_4N^+). Intercambian iones negativos y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa.

2.6.4. Resinas aniónicas de base débil

Las resinas funcionalizadas con grupos de amina primaria ($-NH_2$), secundaria ($-NHR$) y terciaria ($-NR_2$) suelen aplicarse a la adsorción de ácidos fuertes con buena capacidad pero su cinética es lenta. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos sosa para su regeneración. No se puede utilizar a pH altos, puede sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento, debe ser usada en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio. Fija los aniones de los ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos, pero no los aniones débiles del ácido carbónico (H_2CO_3), ni del ácido silícico (H_2SiO_3).¹³

¹³Universidad de Sonora. *Intercambio iónico*. <http://esis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>. Consulta: marzo 2018.

Figura 1. **Síntesis de resinas intercambiadoras de iones (ácidas y básicas) a base de estireno y divinilbenceno**



Fuente: Analítica Inorgánica. *Resinas intercambiadoras de iones*. <http://www2.udec.cl/~analitic/Interc-iones.pdf>. Consulta: marzo 2018.

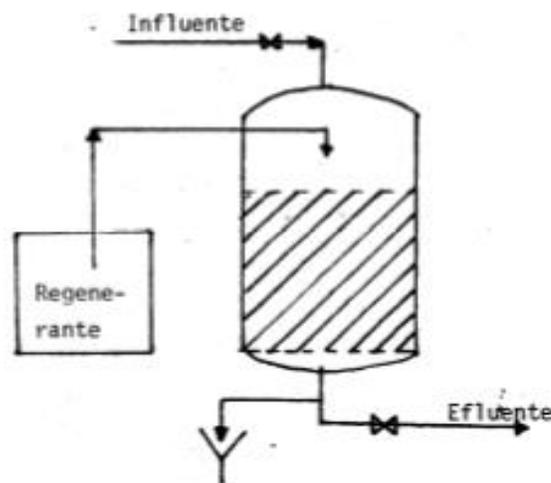
2.7. Intercambiadores industriales

Los intercambiadores clásicos (regenerados con corriente) para fines industriales están constituidos por un recipiente cilíndrico vertical cerrado provisto

en su parte superior de una entrada para el líquido a tratar, con algún sistema de distribución que permita asegurar un caudal uniforme. La mayoría de las plantas existentes responden a este tipo de proceso, pero a partir de la década del 90 las nuevas utilizan el proceso de regeneración en contracorriente. El líquido percola a través del lecho de resina. El nivel de la misma puede observarse gracias a visores de vidrio o acrílico colocados a la altura del manto de resina.

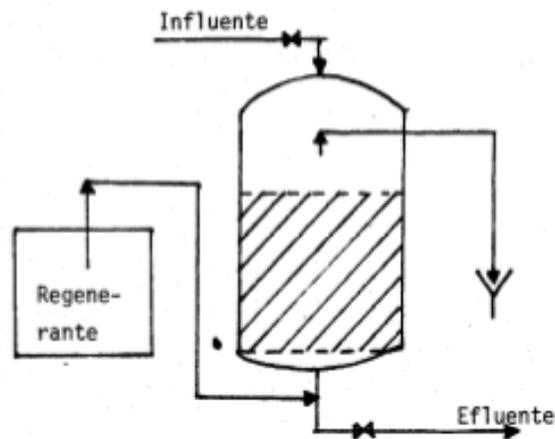
La resina es mantenida en su sitio por medio de un manto soporte de arena y grava (resina catiónica) o de antracita (resina aniónica) o, en los sistemas más modernos, mediante un falso fondo provisto de *strainers* o toberas que retienen la resina. El agua tratada es evacuada por un colector en la parte inferior del recipiente.

Figura 2. Tipos de regeneración: sistema paralelo



Fuente: Universidad de Sonora. *Tipos de regeneración y selección de regenerantes*.
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs22193/Capitulo3.pdf> .Consulta: marzo 2018.

Figura 3. Tipos de regeneración: sistema contracorriente



Fuente: Universidad de Sonora. *Tipos de regeneración y selección de regenerantes*.
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs22193/Capitulo3.pdf> .Consulta: marzo 2018.

La operación de los intercambiadores iónicos del tipo clásico tiene una secuencia que comprende las siguientes etapas:¹⁴

- Producción
- Regeneración
 - Contralavado
 - Regeneración
 - Desplazamiento
 - Enjuague final
 -

¹⁴IDRECO SUDAMERICANA S.A. *Generalidades sobre el intercambio iónico conceptos introductorios*. http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/02_Generalidades_sobre_el.pdf. Consulta: marzo 2018.

2.7.1. Producción

En esta etapa se produce la utilización real del intercambiador iónico. Se obtiene el agua tratada en la cantidad y calidad establecida por la capacidad instalada.

2.7.2. Regeneración

A continuación se detallan las cuatro etapas en que se divide.

2.7.2.1. Contralavado

Una vez terminado el ciclo productivo se procede a la regeneración de la resina. Para ello es necesario descompactar primero el lecho y eliminar al mismo tiempo las impurezas físicamente retenidas a lo largo del ciclo. Para tal fin se utiliza una corriente de agua ascendente para lograr la expansión de la resina en valores comprendidos entre el 50 % y el 75 %.

Para el control de esta operación, que demanda un tiempo aproximado de 10 a 15 minutos, es conveniente disponer de un visor ubicado a la altura del manto expandido, un limitador o indicador del caudal de lavado y, eventualmente, una trampa de resina con el objeto de evitar pérdidas por errores de operación.

2.7.2.2. Regeneración

Durante esta operación se logra, por utilización de una solución reactiva (sal, ácido, álcali), la reversibilidad del fenómeno de intercambio en un todo de acuerdo con la ley de acción de masas. Se logra compensar la mayor selectividad iónica de los iones fijados por un aumento considerable de la concentración de

la solución regenerante. Esta operación, según el tipo de resina a regenerar, puede demandar un tiempo variable entre un mínimo de 20 minutos y una hora.

2.7.2.3. Desplazamiento

Finalizada la etapa de regeneración, todo el intercambiador está lleno de solución regenerante. Existe para cada clase de intercambio una velocidad óptima de regeneración, regida por la cantidad, concentración, tiempo de contacto, tipo de reactivo y resina usada. Esta velocidad es generalmente mucho menor que las velocidades comunes de tratamiento. Se debe efectuar el desplazamiento de ese volumen de regenerante presente en la columna a la misma velocidad de regeneración. Se considera el tiempo involucrado en esta operación como tiempo de contacto real de la regeneración misma. Esta operación se conoce como enjuague lento o desplazamiento. El uso de distribuidores intermedios, ubicados en el nivel de la resina, facilita y disminuye el tiempo de esta operación.

2.7.2.4. Enjuague final

La resina en presencia de fuertes concentraciones de regenerantes absorbe físicamente los reactivos, por lo que es necesario llevar a cabo un enjuague final de la misma a un caudal mayor que el de la regeneración y que comúnmente se toma como igual al de operación. Al finalizar este período se debe obtener prácticamente la calidad del agua deseada antes de afectar el equipo al ciclo productivo.

En los intercambiadores regenerados en contracorriente, el agua a tratar y la solución regenerante circulan en sentidos inversos. Esto permite que la solución regenerante fresca actúe sobre la zona menos saturada de la resina, y

a medida que la solución avanza hacia las zonas más saturadas, su concentración disminuye. Este efecto se traduce en un ahorro sustancial de regenerante y en una calidad muy superior del agua tratada.

Es fundamental que el manto de resina esté compactado, tanto cuando opera como cuando es regenerado. Si el manto está expandido, parte del regenerante pasa entre las partículas de la resina sin contactarla. En la operación en paralelo el manto de resina se compacta por acción de la gravedad y porque ambos flujos, el de operación y el de regeneración, corren desde arriba hacia abajo.

En el caso de la regeneración en contracorriente lo importante es que los flujos son inversos, sin importar cuál de ellos va hacia arriba y cuál hacia abajo. Sin embargo, el flujo hacia arriba tiende a expandir el manto, razón por la cual es necesario sostener de alguna manera la parte superior de la resina para que esto no ocurra. Al comienzo se utilizaron sistemas de bloqueo por agua y por aire, ambos hoy superados y en desuso.

El sistema que se utiliza en la actualidad es el bloqueo mecánico de las resinas. El manto se encuentra bloqueado tanto en la parte inferior como en la superior, por una placa con toberas que mantiene el manto compactado.¹⁵

¹⁵IDRECO SUDAMERICANA S,A *Generalidades sobre el intercambio iónico conceptos introductorios*.http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/02_Generalidades_sobre_el.pdf. Consulta: marzo 2018.

2.8. Intercambio iónico en columna

Este sistema se emplea a menudo en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador se coloca en el interior de una columna vertical a través de la cual fluye la disolución a tratar.

2.8.1. Etapas del proceso

A continuación se detallan las etapas para un proceso de intercambio iónico en una columna.

2.8.1.1. Empaquetamiento de la columna

Se introduce la resina de intercambio iónico en el interior de la columna evita la formación de bolsas de aire entre sus partículas para obtener un lecho uniforme. Esta operación se realiza habitualmente al lavar el intercambiador con agua destilada que, además, resulta útil para eliminar posibles impurezas y para provocar el fenómeno de hinchamiento.

2.8.1.2. Acondicionamiento del intercambiador

Muchas resinas comerciales se venden en una forma iónica que puede no ser la adecuada para el tratamiento que se desea realizar. Por ejemplo una resina básica fuerte que tenga como contraión un grupo OH y que por necesidades del proceso sea deseable tener un ion Cl. En la etapa de acondicionamiento se procede a cambiar el contraión de la resina poniéndola en contacto con una disolución concentrada del ion que se desea tener.

Una vez que se ha conseguido este objetivo y la resina está en la forma iónica deseada debe eliminarse el exceso de esta disolución, y se lava la resina con agua destilada.

2.8.1.3. Etapa de carga

En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y la resina. La disolución se introduce en la columna y fluye gradualmente a través de la resina. Las condiciones de operación (velocidad de flujo, pH de la disolución y otros) dependerán del tipo de resina utilizada y es importante optimizarlas para obtener un buen rendimiento en cuanto a capacidad y selectividad. Cuando la resina comienza a estar saturada con los iones de la disolución que entra, se observa un aumento de la concentración de dichos iones en la disolución que sale de la columna. Esta descarga de iones se conoce como punto de ruptura (*breakthrough*) e indica que el tratamiento de la disolución por la resina ya no es efectivo. Una vez que la concentración de estos iones en la disolución de salida iguala a la de la concentración de entrada, la resina ha agotado toda su capacidad de intercambio en las condiciones de operación.

2.8.1.4. Etapa de regeneración

Consiste en devolver la resina saturada a su forma iónica inicial con una disolución concentrada en el ion originariamente asociado a la resina. Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento de la resina en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente. Para obtener el máximo rendimiento de esta etapa es importante optimizar parámetros como la concentración y volumen de disolución regenerante, así como la velocidad de flujo.

La regeneración tiene dos inconvenientes importantes:

- El gasto económico en regenerante. Puede reducirse si es reutilizada hasta que pierda su eficiencia aunque esta opción tampoco es del todo económica, ya que implica establecer unas condiciones para su almacenaje.
- La generación de residuos, ya que después de regenerar el intercambiador se obtienen disoluciones altamente ácidas o básicas generalmente muy concentradas en metales, que deben ser tratadas o eliminadas.¹⁶

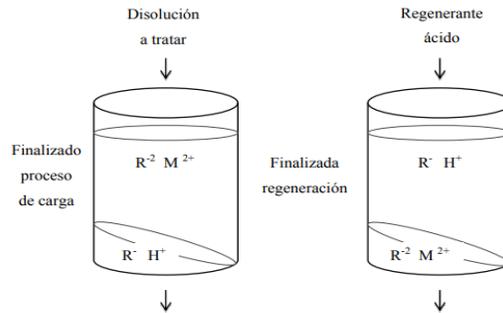
2.9. Modo de operación

En los procesos de intercambio iónico en columna se puede trabajar de dos modos:

- Las disoluciones de carga y de regeneración se introducen siempre por la parte superior de la columna.

¹⁶NEVAREZ *Tipos de regeneración y selección de regenerantes.*
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs22193/Capitulo3.pdf> .Consulta: marzo 2018.

Figura 4. **Proceso de intercambio iónico en columna: carga y regeneración por la parte superior de la columna**

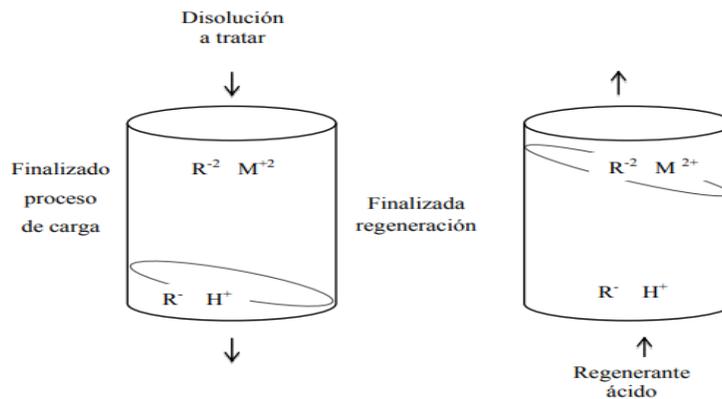


Fuente: Universidad de Sonora. *Intercambio*

iónico.<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> Consulta: marzo del 2018.

- El regenerante se introduce en dirección opuesta a la disolución de carga; es decir, por la parte inferior de la columna. Este proceso se denomina proceso en contracorriente.

Figura 5. **Proceso de intercambio iónico en columna: regeneración por la parte inferior de la columna**



Fuente: Universidad de Sonora. *Intercambio*

iónico.<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf> Consulta: marzo del 2018.

El procedimiento más habitual es el primero, ya que supone un equipamiento más barato que el segundo; sin embargo, este modo de operación utiliza el regenerante menos eficientemente que el proceso en contracorriente. En este, al pasar el regenerante de abajo hacia arriba se fluidiza el lecho de intercambiador de manera que se aumenta la superficie de contacto. La regeneración es más rápida y se necesita menos volumen de regenerante.

Al inicio de la operación de un lecho, la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar cerca de la entrada del lecho donde el fluido se pone en contacto con intercambiador. A medida que transcurre el tiempo, el sólido próximo a la entrada se encuentra prácticamente saturado y la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar lejos de la entrada. Debido a la resistencia que opone el sistema a la transferencia de iones desde el seno del líquido a los centros de intercambio, se establece un gradiente de concentración en el lecho. La región donde ocurre la mayor parte del cambio de concentración es la llamada zona de transferencia de materia; esta zona separa la zona virgen de la resina y la de saturación.¹⁷

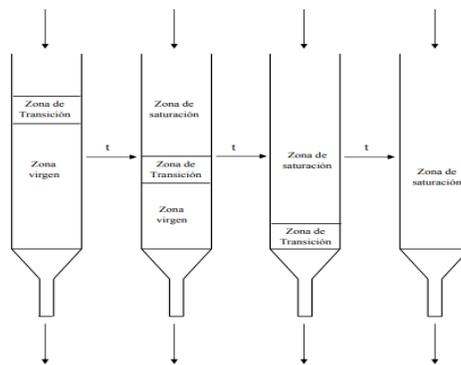
A medida que progresa el intercambio iónico la zona de transferencia de materia se traslada en el lecho hasta alcanzar su extremo inferior, instante a partir del cual la disolución de salida contendrá cantidades crecientes de los iones que se desea intercambiar.

El tiempo transcurrido desde el comienzo de la operación en el lecho hasta que los iones de la disolución aparecen en la corriente de salida o, más concretamente, cuando se alcanza la máxima concentración permisible en el efluente, se denomina tiempo de ruptura (t_R). En este momento, la corriente se

¹⁷GILARRANZ. *Intercambio iónico*.http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo_3.pdf.
Consulta: marzo 2018.

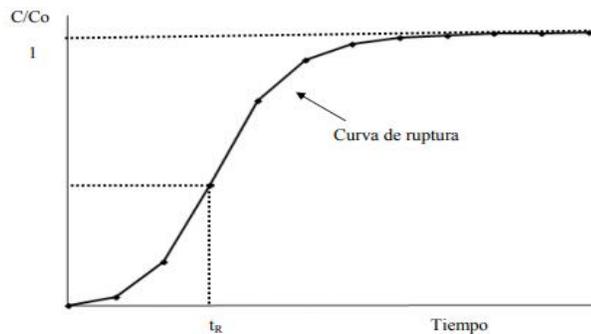
desviaría a un segundo lecho e inicia el proceso de regeneración del primero. La curva que representa la evolución de la concentración del efluente que abandona el lecho recibe el nombre de curva de ruptura.

Figura 6. **Evolución de la concentración en un lecho de intercambio iónico**



Fuente: Universidad de Sonora. *Intercambio iónico*. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>. Consulta: marzo 2018.

Figura 7. **Curva de ruptura en un lecho de intercambio iónico**



Fuente: Universidad de Sonora. *Intercambio iónico*. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>. Consulta: marzo 2018

2.10. Selección de regenerante

La selección de regenerante para un sistema de intercambio iónico depende de varios factores, los cuales desde aspectos físico-químicos de la resina hasta condiciones de operación de las mismas, son:

- Tipo de resina
- Forma de trabajo de la resina
- Condiciones de calidad del influente como:
 - Porcentaje de calcio
 - Alcalinidad
 - Contenido de sílice
 - Temperatura de trabajo
 - Presión de operación
- En casos usuales eliminación de cantidades apreciables de metales disueltos
- Manejo del regenerante
- Facilidad de almacenamiento del regenerante
- Puntos de distribución y traslado al lugar de trabajo
- Costo del mismo

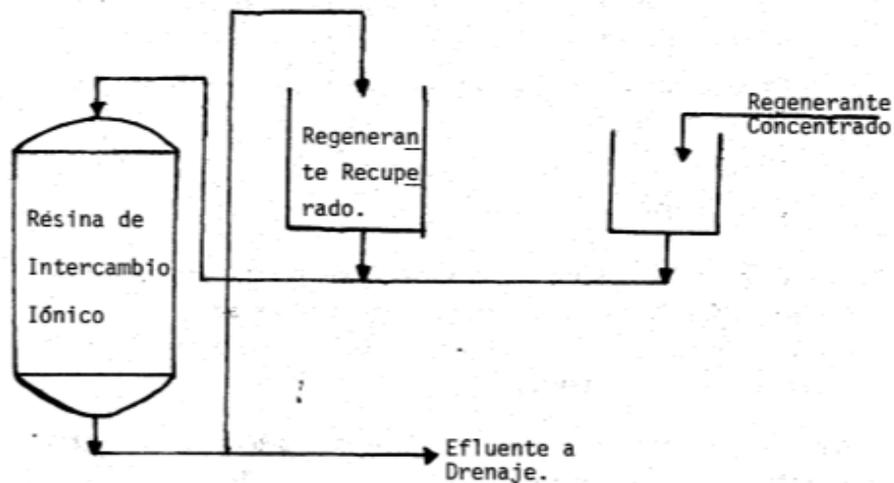
2.11. Conservación del regenerante

Durante la etapa de regeneración, según los mecanismos de reacciones químicas se usa regenerante en exceso. Al no utilizarse representa cierto valor económico y puede ocasionar un problema de contaminación. Requerirá de un sistema que resista el ataque químico de tanques, tuberías, válvulas y bombas.

Todo exceso requerirá además que se neutralice con un álcali o ácido según requiera el balance químico, lo cual repercute en un costo adicional que se reflejará en un costo de operación mayor por concepto de consumo de reactivos químicos.

Pueden recircularse los excedentes de regenerantes. Las primeras porciones del efluente en la línea de salida de regenerante contienen iones que fueron absorbidos por la resina en su etapa de servicio. El regenerante recuperado se puede utilizar en la primera fase de introducción de regenerante. La regeneración se completa con la introducción de regenerante nuevo, el cual se va a recuperar.¹⁸

Figura 8. Sistema de recuperación de regenerantes



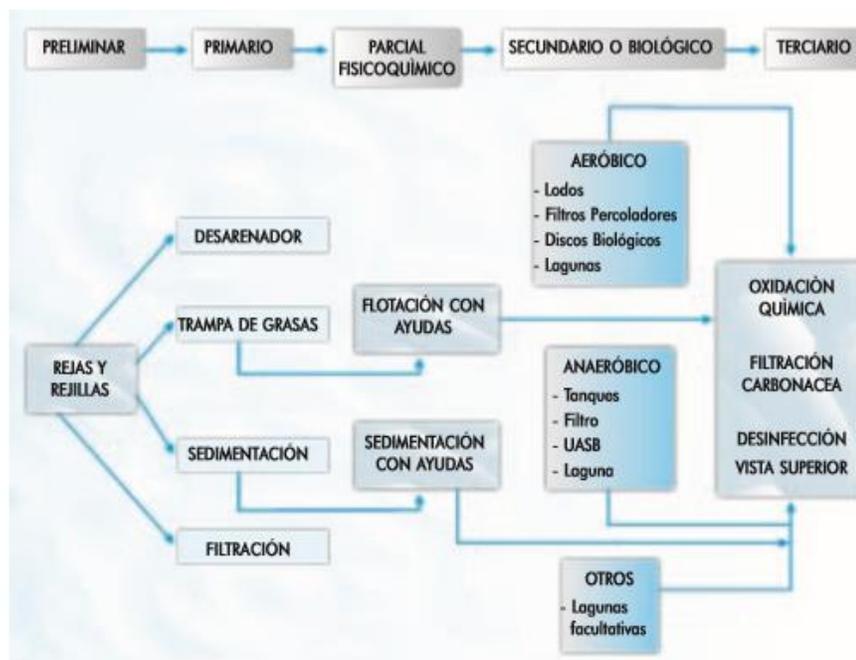
Fuente: Universidad de Sonora. *Intercambio iónico*. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>. Consulta: marzo 2018.

¹⁸Universidad de Sonora. *Intercambio iónico*. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>. Consulta: marzo 2018.

2.12. Componentes del sistema de tratamiento

El pretratamiento de un efluente se efectúa con el fin de cumplir con las condiciones mínimas exigidas para su descarga, o antes de un tratamiento secundario. En la mayoría de los casos, el pretratamiento se aplica para cumplir con normas en cuanto a pH, temperatura, contenido de sólidos en suspensión, de materia orgánica, de metales y de grasas y aceites, bien sea antes de someter al vertimiento a un tratamiento biológico, o antes de descargarlo a un cuerpo de agua.¹⁹

Figura 9. **Sistemas de tratamiento de efluentes**



Fuente: CORTOLIMA. *Guía ambiental para la formulación de planes de pretratamiento de efluentes industriales*. [https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/efluentes industriales/Efluentes%20industriales%201.pdf](https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/efluentes%20industriales/Efluentes%20industriales%201.pdf) Consulta: marzo 2018.

¹⁹CORTOLIMA. *Guía ambiental para la formulación de planes de pretratamiento de efluentes industriales*. Disponible en: [https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/efluentes industriales/Efluentes%20industriales%201.pdf](https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/efluentes%20industriales/Efluentes%20industriales%201.pdf). Consulta: marzo 2018.

2.12.1. Tratamiento preliminar

Es el tratamiento básico que se da a los vertimientos con el fin de remover sólidos gruesos y objetos que puedan impedir el funcionamiento de bombas y equipos o causar taponamiento en las redes de drenaje internas.

2.12.2. Tratamiento primario

Es el conjunto de operaciones encaminadas hacia la remoción de sólidos sedimentables o de material flotante, por medios gravitacionales o mecánicos.

2.12.3. Tratamiento parcial

En algunos casos, el tratamiento primario requiere, para aumentar su eficiencia, ayudas físicas o químicas para remover los sólidos sedimentables o el material flotante.

2.12.4. Tratamiento secundario

Se utiliza principalmente para la reducción de la carga orgánica y/o de sólidos en suspensión del vertimiento, por métodos bioquímicos.

2.12.5. Tratamiento terciario

Es aquel requerido por un vertimiento después del tratamiento secundario, cuando así lo exige la calidad de la corriente receptora del vertimiento.²⁰

²⁰CORTOLIMA. *Guía ambiental para la formulación de planes de pretratamiento de efluentes industriales*. Disponible en: <https://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/efluentes industriales/Efluentes%20industriales%201.pdf>. Consulta: marzo 2018.

2.13. Tratamientos de aguas residuales

La composición específica de los vertidos de cada industria en particular, la evacuación de las aguas tratadas, la disponibilidad de terreno en la inmediaciones de la empresa, la distancia a núcleos urbanos, la recuperación y reutilización de estas aguas, su posible utilización para riego, son factores que, en función de la legislación sobre vertidos y el estudio económico de aplicación, permitirán escoger el método más eficaz y económico.²¹

2.14. Principales contaminantes

A continuación se describen seis de los principales contaminantes del agua.

2.14.1. Sólidos en suspensión

Cuando los sólidos en suspensión de un agua residual se vierten en lechos de ríos, lagos, etc., conducen al desarrollo de depósitos de fangos y aumentan las condiciones anaerobias de las zonas de vertido.

2.14.2. Materia orgánica biodegradable

Se mide en términos de DBO y de DQO. El vertido de aguas residuales con elevada DB y DQ en el entorno acuático puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.

²¹SANS, Ramón. *Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos*. Disponible en: <https://books.google.com.gt/books?id=kumplOJs6T0C&pg=PA92&lpg=PA92&dq=recirculacion+del+agua+de+lavado+de+resinas+para+su+regeneraci%C3%B3n&source=bl&ots=0D1ET3XJzp&sig=yOsO1Gieg8cYhIEa6o7JYmapPgA&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj5opT03ZTaAhUOsIMKHfzGBH4Q6AEIcDAI#v=onepage&q=recirculacion%20del%20agua%20de%20lavado%20de%20resinas%20para%20su%20regeneraci%C3%B3n&f=false>. Consulta: marzo 2018.

2.14.3. Materia orgánica refractaria

Este tipo de materia orgánica puede interferir en los métodos convencionales de tratamiento; por otra parte, el vertido de aguas que la contengan con elevada concentración puede contaminar las aguas naturales de productos tóxicos o, según algunos estudios, incluso cancerígenos (pesticidas, fungicidas, herbicidas, fenoles, entre otros).

2.14.4. Nutrientes

Los principales nutrientes acuáticos son el nitrógeno, el fósforo y el carbono. Un agua residual que los contenga y se vierta sin tratar, puede producir el crecimiento de una vida acuática no deseada, así como la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

2.14.5. Metales pesados

Proviene generalmente de aguas residuales comerciales e industriales. Aunque algunos de estos son necesarios para el desarrollo de la vida biológica, las concentraciones elevadas pueden interferir en el proceso de depuración, su vertido al medio acuático podría poner en peligro el aprovechamiento de las aguas naturales, dada su alta toxicidad.

2.14.6. Compuestos tóxicos

Estos compuestos tienen la misma problemática que los metales pesados. Algunos de ellos, como la plata, cobre, boro, cianuros, cromatos, cromo, plomo y arsénico, son tóxicos en alguna medida para los microorganismos y, por lo tanto, pueden interferir en los procesos de depuración biológica.

Su vertido al entorno se puede considerar de la misma naturaleza que los metales pesados.²²

2.15. Legislación a cumplir según norma COGUANORNTG 29001

Esta norma se aplica a toda agua para consumo humano, preparación de alimentos y uso doméstico. Proveniente de fuentes como pozos, nacimientos, ríos, entre otras, puede estar ubicada en una red de distribución, en reservorios o depósitos.

Se excluyen el agua purificada envasada y el agua carbonatada, las cuales son cubiertas por normas específicas.

Figura 10. **Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano**

Características	LMA	LMP
Color	5,0 u	35,0 u ^(a)
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT ^(b)
Conductividad eléctrica	750 μ S/cm	1500 μ S/cm ^(d)
Potencial de hidrógeno	7,0-7,5	6,5-8,5 ^{(c) (d)}
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L

(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto
 (b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).
 (c) En unidades de pH
 (d) Límites establecidos a una temperatura de 25°C.

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas. COGUANOR 29001.p.2.

²²SANS, Ramón. *Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos*. Disponible en: <https://books.google.com.gt/books?id=kumplOJs6T0C&pg=PA92&lpg=PA92&dq=recirculacion+del+agua+de+lavado+de+resinas+para+su+regeneraci%C3%B3n&source=bl&ots=0D1ET3XJzp&sig=yOsO1Gieg8cYhIEa6o7JYmapPgA&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj5opT03ZTaAhUOsIMKHfzGBH4Q6AEIcDAI#v=onepage&q=recirculacion%20del%20agua%20de%20lavado%20de%20resinas%20para%20su%20regeneraci%C3%B3n&f=false>. Consulta: marzo 2018.

Figura 11. **Características químicas que debe tener el agua para consumo humano**

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre ^(a)	0,5	1,0
Cloruro (Cl ⁻)	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO ₃)	100,0	500,0
Sulfato (SO ₄ ⁻)	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) ^(b)	0,3	----

a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia.
b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas. *COGUANOR 29001*.p.2.

Figura 12. **Relación de las sustancias inorgánicas cuya presencia en el agua es significativa para la salud**

Substancia	LMP (mg/L)
Arsénico (As)	0,010
Bario (Ba)	0,70
Boro (B)	0,30
Cadmio (Cd)	0,003
Cianuro (CN ⁻)	0,070
Cromo total (Cr)	0,050
Fluoruro (F ⁻)	1,50
Mercurio total (Hg)	0,001
Plomo (Pb)	0,010
Selenio (Se)	0,010
Nitrato (NO ₃ ⁻)	50,0
Nitrito (NO ₂ ⁻)	3,0

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas. *COGUANOR 29001*.p.3.

2.16. **Legislación a cumplir según el Acuerdo Gubernativo 236-2006**

El objeto del reglamento es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como para la

disposición de lodos. A continuación se presentan tablas que indican los requerimientos necesarios para la descarga aguas residuales respecto a su demanda bioquímica de oxígeno (ver figura 13) y los límites máximos permisibles para descargas al alcantarillado público (ver figura 14).

Figura 13. **Modelo de reducción progresiva de cargas de demanda bioquímica de oxígeno para descargas al alcantarillado público**

Etapa	Uno				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil once				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<6000	6000≤EG<12000	12000≤EG<25000	25000≤EG<50000	50000≤EG<250000
Reducción porcentual	10	20	30	35	50
Etapa	Dos				
Duración, años	4				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil quince				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5500	5500≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<50000	50000≤EG<125000
Reducción porcentual	10	20	40	45	50
Etapa	Tres				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinte				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5000	5000≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<65000	
Reducción porcentual	50	70	85	90	
Etapa	Cuatro				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro				
Duración, años	4				
Carga, kilogramos por día	3000<EG<4000	4000≤EG<7000			
Reducción porcentual	40	60			

EG = carga del ente generador correspondiente, en kilogramos por día.

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 236.2006*. p.8.

Figura 14. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales al alcantarillado público

Parámetros	Dimensionales	Valores Iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	200	100	60	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	1500	700	400	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	180	150	80	40
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	40	20	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 236.2006*. p.15.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación se detallan las variables utilizadas según su clasificación.

3.1.1. Dependientes

Se utilizaron las siguientes nueve variables enlistadas.

- Conductividad eléctrica
- Demanda química de oxígeno
- Sulfatos
- Cloruros
- Alcalinidad
- Potencial de hidrógeno
- Dureza
- Sólidos disueltos totales
- Turbidez

3.1.2. Independientes

Se utilizaron las siguientes siete variables enlistadas.

- Caudal
- Temperatura

- Tiempo de lavado de la resina
- Parámetros fisicoquímicos del agua utilizada para el lavado de resinas de intercambio iónico.
- Tratamiento utilizado para el reúso del efluente del proceso
- Concentración de regenerantes
- Días de toma de muestras

3.2. Delimitación de campo de estudio

El estudio únicamente se realizará en la etapa de regeneración del proceso de desmineralización de agua.

- Industria: alimentos
- Campo de estudio: control de contaminantes industriales
- Área de investigación: evaluación de tratamiento de agua residual
- Proceso: retrolavado de resinas de intercambio iónico
- Ubicación: planta manufacturera de la ciudad capital de Guatemala

Así mismo los análisis experimentales se limitarán a las variables dependientes mencionadas en el inciso anterior para reducción de costos.

3.3. Recursos humanos disponibles

Para el desarrollo de la investigación las personas participes de la misma son:

- Investigadora: Jackeline Elizabeth Arrecis Torres
- Asesor : Ing. Químico Jorge Mario Estrada Asturias

3.4. Recursos materiales disponibles

El material disponible para la realización de la investigación es el siguiente:

Tabla I. **Recurso material muestreo in situ**

Descripción	Cantidad
Termómetro	1
Potenciómetro portátil	1
Cronómetro	1
Cubeta	1
Frascos estériles para toma de muestras	12
Bolsas refrigerantes o bolsas de plástico impermeables con hielo	12
Cofia desechable	4
Mascarilla	4
Guantes estériles desechables	4
Marcadores indelebles	2
Par de zapatos industriales	1
Hielera	1
Computadora	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Recurso material para las caracterizaciones**

Descripción	Cantidad
Turbidímetro	1
Potenciómetro de mesa	1
Conductímetro	1
Espectrofotómetro portátil	1
Thermoreaktor	1
Medidor de parámetros múltiples HQ 40d	1
Erlenmeyer 250 mL	5
Probeta 100 mL	1
Probeta 25 mL	1
Buretas	3
Pipetas 10 ml	2
Pipetas 5 ml	2
Pipetas 1 ml	5
Piceta	1
Gradilla	1
Viales Digestion Solution for CD LR	15
Frascos DBO	5

Fuente: elaboración propia.

3.4.1. Lista de reactivos

Los siguientes reactivos fueron los utilizados para el análisis de muestras captadas.

- Hidróxido de amonio
- EDTA
- Ácido sulfúrico
- Negro T
- Fenolftaleína
- Naranja de metilo
- Nitrato de plata
- Cromato de potasio
- Cloruro de bario

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La técnica utilizada será tanto cualitativa como cuantitativa debido a que se evaluarán las caracterizaciones correspondientes a los afluentes y efluentes del proceso de tratamiento actual, según los análisis estadísticos de los datos obtenidos, y se propondrán mejoras para su posible reutilización.

3.5.1. Caracterización del afluente y efluente en la etapa de regeneración del proceso de desmineralización y tratamiento actual

Se realizará la toma de muestra y medición de parámetros in situ del agua utilizada para el lavado de las resinas. Los análisis serán efectuados en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini Molina.

Se realizará la toma de muestra y medición de parámetros de agua in situ posterior al lavado de las resinas. Los análisis serán efectuados en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini Molina.

Se realizará la toma de muestra y medición de parámetros de agua in situ posterior al tratamiento del agua de lavado de resina de intercambio iónico. Los análisis serán efectuados en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini Molina.

3.5.2. Evaluación del tratamiento adecuado para el efluente de agua de lavado de resina de intercambio iónico

El procedimiento a seguir es el presentado a continuación.

- Recolección de muestras y medición de parámetros del afluente y efluente del proceso de desmineralización durante un mes.
- Determinar el caudal de agua que es desechado posterior al lavado de la resina catiónica.

- Determinar el caudal de agua que es tratado posterior al tratamiento actualmente utilizado.
- Comparar los datos de los parámetros de muestras recolectadas con los parámetros del agua utilizada en el proceso y verificar que cumplan con las normativas.
- Determinar las causas que provocan el incumplimiento de los límites máximos permisibles.
- Con los datos anteriores, evaluar si el tratamiento actual que se da al agua de lavado de resina de intercambio iónico es suficiente para recircularse en el proceso. De no ser así proponer soluciones o mejoras al mismo.

3.6. Recolección y ordenamiento y procesamiento de la información

Para el manejo de datos recolectados se utilizarán las siguientes herramientas:

- Para la recolección de las muestras es indispensable acatar lo siguiente:
 - Utilización del equipo de protección para veracidad de las muestras.
 - Lavado de manos y antebrazos con agua, jabón y alcohol.
 - Identificar cada frasco correctamente con marcador indeleble.
- Punto de muestreo
- Fecha y hora de la muestra
- Método de conservación
- Información complementaria

- Conservar la muestra con gel refrigerante o bolsas impermeables con hielo.
- En cada sitio de muestreo se recolectará una muestra. Dicho procedimiento se repetirá una vez al mes para un total de doce tomas de muestras.
- Computadora para el ingreso de datos y ordenamiento de los mismos.
- Microsoft Excel para el análisis de datos por medios gráficos.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los resultados de los parámetros obtenidos en el laboratorio Dra. Alba Tabarini Molina serán recolectados en una tabla para proceder al cálculo de los valores a evaluar respecto a las normas vigentes, y de esta forma, comparar los límites máximos permitidos y evaluar si cumplen o no según la proyección de la NTG 29001 y el Acuerdo 236-2006, según la fecha máxima de cumplimiento para el dos de mayo de dos mil veinte.

3.8. Análisis estadístico

Se realizará la tabulación de los datos obtenidos *in situ* y los obtenidos experimentalmente. Se utilizarán técnicas de tendencia central para el análisis de datos.

3.8.1. Análisis estadístico para el procedimiento experimental

A continuación se presentan los métodos para el análisis de datos obtenidos experimentalmente.

3.8.1.1. Media

Para obtener un valor representativo de cada variable medida durante el muestreo, se calculó la media aritmética de cada grupo de variables.

Se utilizará la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum xi}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Ecuación No.1

Donde:

\bar{x} = media

X=valor por cada dato por variable

$\sum xi$ = sumatoria de valores

n= número de datos

3.8.1.2. Desviación estándar

A los valores promedio de los parámetros obtenidos de los análisis del agua se le determinará una desviación estándar para observar su tendencia respecto a los parámetros establecidos según la legislación guatemalteca.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Xt - \bar{Xt})^2}{n}}$$

Ecuación No.2

Donde:

σ =Desviación estándar promedio por muestra

Xt= Término del conjunto de datos

\bar{x} =Media de la muestra

n= número de datos

4. RESULTADOS

A continuación se detallan los resultados obtenidos de los cinco puntos muestreados en el proceso de desmineralización de agua.

Tabla III. **Caracterizaciones de las muestras tomadas in situ**

Caudal (L/s)	Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
			1	2	3		
NA	1	pH	7,03	7,60	7,80	7,48	0,33
		Temperatura °C	21,40	22,90	20,30	21,53	1,07
		Conductividad eléctrica (μS/cm)	800,00	600,00	277,00	559,00	215,47
		Volumen (L)	NA	NA	NA	NA	NA
		Tiempo (s)	NA	NA	NA	NA	NA
0,417	2	pH	1,76	1,38	2,06	1,73	0,28
		Temperatura °C	18,70	19,00	18,70	18,80	0,14
		Conductividad eléctrica (μS/cm)	3999,00	4000,00	3618,00	3872,33	179,84
		Volumen (L)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
		Tiempo (s)	2,00	2,40	2,79	2,40	0,32
0,365	3	pH	12,40	8,05	9,74	10,06	1,79
		Temperatura °C	20,80	21,50	22,20	21,50	0,57
		Conductividad eléctrica (μS/cm)	3999,00	4000,00	870,00	2956,33	1475,26
		Volumen (L)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
		Tiempo (s)	2,60	3,00	2,61	2,74	0,19

Continuación tabla III.

Caudal (L/s)	Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
			1	2	3		
NA	4	Ph	6,42	6,12	6,50	6,35	0,16
		Temperatura °C	20,50	21,50	21,50	21,17	0,47
		Conductividad eléctrica (µS/cm)	3999,00	3850,00	3860,00	3903,00	68,00
		Volumen (L)	NA	NA	NA	NA	NA
		Tiempo (s)	NA	NA	NA	NA	NA
0,304	5	pH	5,40	5,43	6,24	5,69	0,39
		Temperatura °C	20,70	21,60	21,70	21,33	0,45
		Conductividad eléctrica (µS/cm)	3999,00	4000,00	3999,00	3999,33	0,47
		Volumen (L)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
		Tiempo (s)	3,00	3,96	2,90	3,29	0,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Caracterización de agua municipal utilizada en el proceso de desmineralización**

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
1	pH	8,01	7,68	7,30	7,66	0,29
	Temperatura °C	25,30	25,80	25,50	25,53	0,21
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	213,00	262,00	250,00	241,67	20,85
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	113,00	139,00	132,00	128,00	10,98
	Salinidad	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Continuación tabla IV.

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
1	Turbiedad (NTU)	0,06	0,02	0,40	0,16	0,17
	Carbonatos (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bicarbonatos (mg/L)	350,00	274,00	200,00	274,67	61,24
	Alcalinidad (mg/L)	350,00	274,00	200,00	274,67	61,24
	Dureza (ml EDTA)	88,00	90,00	90,00	89,33	0,94
	Cloruros (ml nitrato de plata)	13,50	15,00	15,00	14,50	0,71
	Sulfatos (mg/L)	3,00	2,00	1,00	2,00	0,82
	DQO (mg/L)	12,00	0,00	0,00	4,00	5,66

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Caracterización de agua de lavado de resina catiónica

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
2	pH	2,30	1,97	1,90	2,06	0,17
	Temperatura °C	24,80	25,50	25,30	25,20	0,29
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	552000,00	1566000,00	951000,00	1023000,00	417082,73
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	OFL	OFL	OFL	OFL	OFL
	Salinidad	3,00	9,20	5,40	5,87	2,55
	Turbiedad (NTU)	0,47	0,08	0,68	0,41	0,25

Continuación tabla V.

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
2	Carbonatos (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bicarbonatos (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Alcalinidad (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dureza (ml EDTA)	22,00	10,00	36,00	22,67	10,62
	Cloruros (ml nitrato de plata)	880,00	3500,00	1390,00	1923,33	1134,15
	Sulfatos (mg/L)	0,00	2,00	1,00	1,00	0,82
	DQO (mg/L)	150,00	12,00	1,00	54,33	67,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Caracterización de agua de lavado de resina aniónica**

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
3	pH	11,66	7,80	9,50	9,65	1,58
	Temperatura °C	24,90	25,40	25,40	25,23	0,24
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	682000,00	334000,00	974,00	338991,33	278050,10
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	OFL	1774,00	515,00	1144,50	629,50
	Salinidad	3,70	1,70	0,30	1,90	1,40

Continuación tabla VI.

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
3	Turbiedad (NTU)	2,63	0,00	0,79	1,14	1,10
	Carbonatos (mg/L)	1588,00	472,00	280,00	780,00	576,69
	Bicarbonatos (mg/L)	394,00	1586,00	380,00	786,67	565,24
	Alcalinidad (mg/L)	1982,00	2058,00	660,00	1566,67	641,86
	Dureza (ml EDTA)	44,00	46,00	64,00	51,33	8,99
	Cloruros (ml nitrato de plata)	540,00	300,00	33,50	291,17	206,87
	Sulfatos (mg/L)	175,00	0,00	39,00	71,33	75,01
	DQO (mg/L)	11,00	0,00	2,00	4,33	4,78

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Caracterización del agua previa al tratamiento actual**

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
4	pH	7,24	6,65	6,50	6,80	0,32
	Temperatura °C	24,90	25,60	25,20	25,23	0,29
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	365000,00	325000,00	357000,00	349000,00	17281,98
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	1921,00	1726,00	1887,00	1844,67	85,05
	Salinidad	1,80	1,60	1,80	1,73	0,09

Continuación tabla VII.

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
4	Turbiedad (NTU)	56,80	32,60	55,30	48,23	11,07
	Carbonatos (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bicarbonatos (mg/L)	292,00	734,00	380,00	468,67	191,03
	Alcalinidad (mg/L)	292,00	734,00	380,00	468,67	191,03
	Dureza (ml EDTA)	90,00	164,00	96,00	116,67	33,56
	Cloruros (ml nitrato de plata)	950,00	750,00	630,00	776,67	131,99
	Sulfatos (mg/L)	8,00	8,00	100,00	38,67	43,37
	DQO (mg/L)	412,00	236,00	57,00	235,00	144,93

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Caracterización del agua postratamiento**

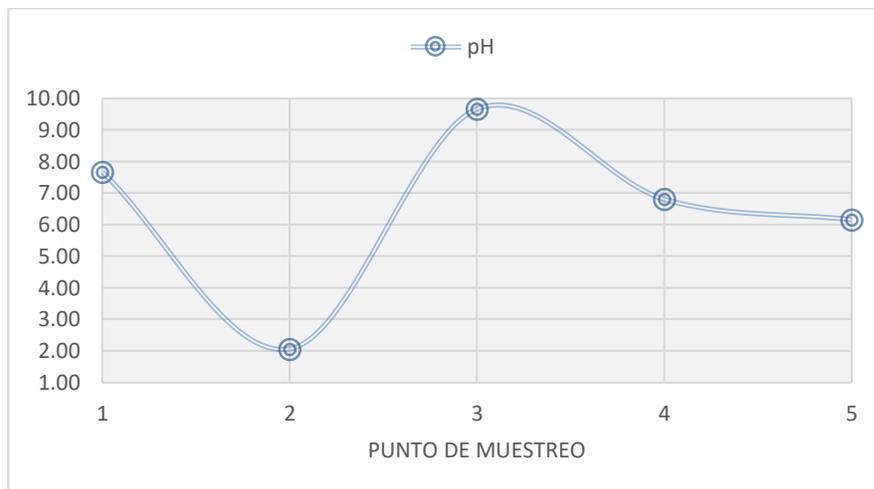
Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
5	pH	6,15	6,00	6,30	6,15	0,12
	Temperatura °C	25,20	25,80	25,40	25,47	0,25
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	4,60	359000,00	435000,00	264668,20	189699,97
	Sólidos disueltos totales (mg/L)	OFL	1895,00	OFL	1895,00	0,00
	Salinidad	2,40	1,80	2,20	2,13	0,25
	Turbiedad (NTU)	39,10	46,50	70,40	52,00	13,36

Continuación tabla VIII.

Punto de muestreo	Parámetro	Muestreo número			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
5	Carbonatos (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bicarbonatos (mg/L)	294,00	710,00	420,00	474,67	174,17
	Alcalinidad(mg/L)	294,00	710,00	420,00	474,67	174,17
	Dureza (ml EDTA)	108,00	222,00	104,00	144,67	54,71
	Cloruros (ml nitrato de plata)	1150,00	780,00	700,00	876,67	196,02
	Sulfatos (mg/L)	25,00	6,00	140,00	57,00	59,20
	DQO (mg/L)	263,00	282,00	84,00	209,67	89,20

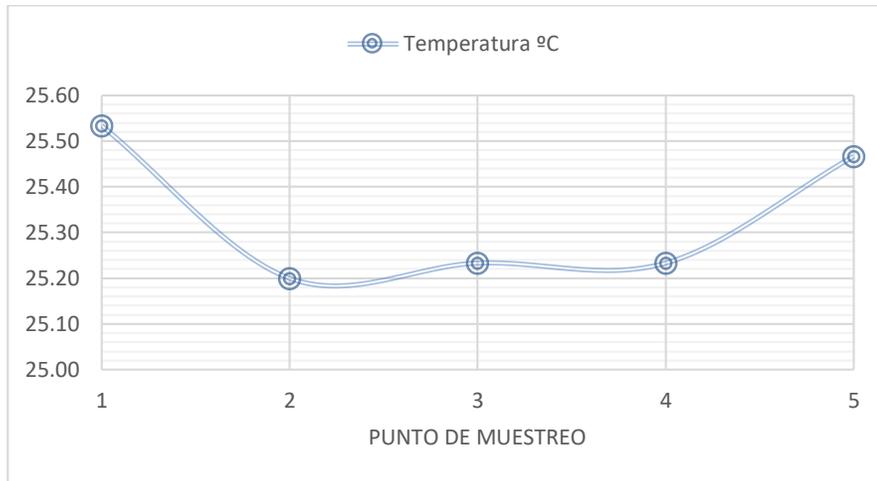
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Variación del pH en los puntos de muestreo



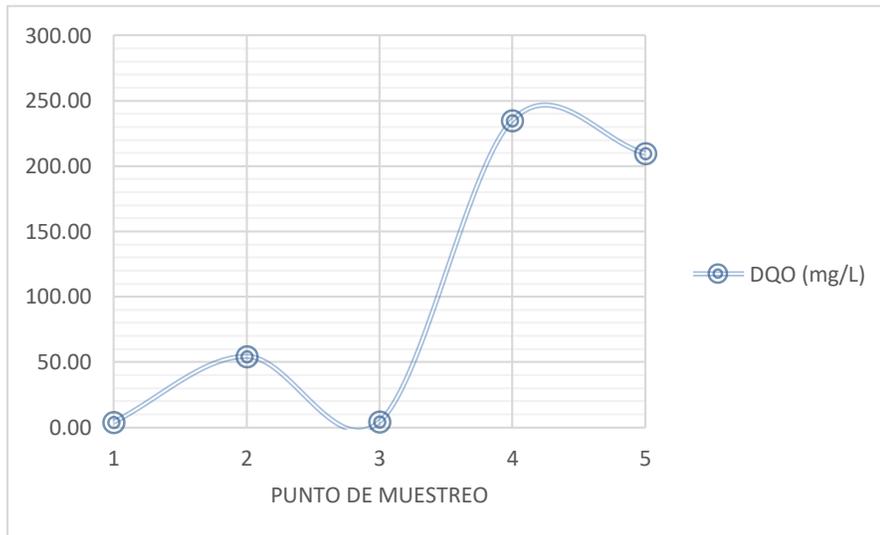
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Variación de la temperatura en los puntos de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Variación de la demanda química de oxígeno en los puntos de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Comparación de los análisis fisicoquímicos de las muestras tomadas con los límites máximos permitidos del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006**

PARÁMETRO	DIMENSIONALES	Valores promedio					Reglamento aguas residuales, acuerdo 236-2006					
		PUNTO DE MUESTREO					LMP (Fecha máxima de cumplimiento dos de mayo del dos mil veinte)	CUMPLE (C) /NO CUMPLE (NC)				
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
pH	Unidades de potencial de hidrógeno	7,66	2,06	9,65	6,80	6,15	6 a 9	C	NC	NC	C	C
Temperatura	Grados Celsius	25,53	25,20	25,23	25,23	25,47	<40	C	C	C	C	C
Sólidos disueltos totales	Miligramos por litro	128,00	OFL	1144,50	1844,67	1895,00	400	C	NC	NC	NC	NC
DQO	Miligramos por litro	4,00	54,33	4,33	235,00	209,67	250	C	C	C	C	C
	Carga Kg/día	N/A	144,00	136,54	N/A	5506,23						
DBO	Miligramos por litro	2,00	27,17	2,17	117,50	104,83	450	C	C	C	C	C
	Carga Kg/día	N/A	978	68,32	N/A	2753,07						
Fósforo Total	Miligramos por litro	0.130	<0.030	2.41	4.70	5.30	20	C	C	C	C	C
Nitrógeno Total	Miligramos por litro	1.64	<0.025	35.50	24	29	80	C	C	C	C	C

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Comparación de los análisis fisicoquímicos de las muestras tomadas con los límites máximos permitidos de la NTG 29001**

PARÁMETRO	DIMENSIONALES	Valores promedio					Agua para consumo humano, NTG 29001					
		PUNTO DE MUESTREO					LMP A 25°C	CUMPLE (C) / NO CUMPLE (NC)				
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
pH	Unidades de potencial de hidrógeno	7,66	2,06	9,65	6,80	6,15	6.5 a 8.5	C	NC	NC	C	C
Conductividad eléctrica (µS/cm)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	241,7	1023000,0	338991,3	349000,0	264668,2	1500	C	NC	NC	NC	NC
Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)	0,16	0,41	1,14	48,23	52,00	15	C	C	C	NC	NC
Dureza (mg/L)	Dureza (mg/L)	89,33	22,67	51,33	116,67	144,67	500	C	C	C	C	C
Cloruros (mg/L)	Cloruros (mg/L)	14,50	1923,33	291,17	776,67	876,67	250	C	NC	NC	NC	NC
Sulfatos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	2,00	1,00	71,33	38,67	57,00	250	C	C	C	C	C

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los datos presentados en la tabla III son los obtenidos exactamente después de la captación de la muestra en cada uno de los cinco puntos de estudio. El primer punto es la muestra tomada del agua municipal que llega a la planta y la cual se desea desmineralizar para utilizarla en una línea de producción. El segundo punto es el agua de lavado de la resina catiónica; el tercer punto es el agua de lavado de la resina aniónica; el cuarto punto es el agua previa al tratamiento, lugar en que se unen las aguas de lavado de las resinas y otro efluente del cual no se pudo obtener muestra debido al difícil acceso pero se trata de un efluente de aguas residuales de las otras líneas de producción, las cuales son ajenas al estudio en cuestión.

El quinto punto es el agua que sale del tratamiento que la empresa realiza previo a la descarga al alcantarillado público. Al observar detalladamente los resultados en dicha tabla es evidente que siguen la misma tendencia de los presentados en las tablas posteriores; sin embargo no son iguales y tienen una ligera desviación debido al tiempo de traslado del lugar de muestreo hacia el laboratorio, dónde se realizaron los análisis respectivos para la obtención de las caracterizaciones deseadas.

Los datos presentados de la tabla IV a la VIII son los obtenidos en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria, Dra. Alba Tabarini Molina, ubicado en el edificio T-5 de la Facultad de Ingeniería. Se realizaron tres muestreos en los cinco puntos de estudio, con intervalo de una semana cada uno.

Así mismo, en dichas tablas se tiene el promedio y desviación estándar de los parámetros obtenidos durante los tres muestreos. El fin de las tablas mencionadas fue la caracterización de los puntos de estudio.

En las figuras 15, 16 y 17 se representa la tendencia de los parámetros promedio de pH, temperatura y DQO de cada punto de estudio, para tener una mejor visualización de los datos de las tablas. Más adelante se explicará el porqué de los valores presentados; para un mayor entendimiento de los resultados y comparación de los mismos con las normas vigentes en Guatemala, se presenta la tabla IX y X.

La comparación de los datos obtenidos con el reglamento de aguas residuales fue según el acuerdo 236-2006, en el que se tienen proyecciones de cumplimiento. El límite máximo permisible utilizado para evaluar el cumplimiento de los parámetros fue el de fecha dos de mayo del dos mil veinte, por ser la fecha más reciente y a corto plazo que deberá cumplirse a partir del siguiente año.

El primer parámetro a evaluar es el pH; el rango permitido es de 6 a 9. Según los datos obtenidos, el primer punto de estudio, que es el agua municipal, tiene en promedio de los tres muestreos un valor de 7.66; valor que se encuentra dentro del rango permitido; este punto no es agua residual y se comparará con otra norma más adelante. El segundo punto de estudio es el agua de lavado de resina catiónica, para poder regenerar la resina, ésta debe ser retrolavada con ácido y el utilizado en la planta es el ácido muriático, por lo tanto el pH de esa agua descargada posterior al lavado es muy ácido con un valor promedio de 2.06, el cual está fuera del rango de cumplimiento permitido para la descarga al alcantarillado público, pero como esta agua se une con la del lavado de resina aniónica, la cual es retrolavada con soda caustica.

En promedio, presentó un valor de 9.65, es un pH alcalino y puede neutralizar el pH ácido del segundo punto de muestreo.

Ambas aguas de lavado de las resinas se recolectan en la primera cámara del tratamiento que la planta tiene instalado actualmente. Por ello se determinó analizar el punto número cuatro, lugar en el que se recolecta el agua utilizada para el lavado de las resinas y aguas de desecho de otras líneas de producción. El valor obtenido en éste punto fue de un pH igual a 6.80, lo que confirma que la combinación de dichas aguas se neutralizan y el valor cumple con el rango establecido.

El tratamiento actual de la planta consiste en dos cámaras las cuales su funcionamiento es el tratamiento primario para la eliminación de los sólidos suspendidos básicamente de la línea de producción que se mencionó anteriormente, la cual se une con el agua de lavado de las resinas. En el apéndice 3, en la fotografía número dos se puede observar cómo se encuentran ubicadas dichas cámaras. Su principio de funcionamiento esencialmente es la flotación, la cual es posible debido a la diferencia de densidades; por lo tanto, todo aquello que sea menos denso que la densidad del fluido, ascenderá a la superficie; la mayoría de los sólidos que llegan a dichas cámaras son restos de nylon utilizado en las áreas de producción.

Posterior a las dos cámaras mencionadas hay una tercera, la cual tiene por función la desinfección. Esto se lleva a cabo con unas pastillas de cloro con las que el agua tiene contacto y se procede al desecho en el alcantarillado público. En este lugar se tomó la muestra denominada quinto punto de estudio, en el cual se obtuvo un valor de pH igual a 6.15. Este es el punto más importante, ya que es el valor final con el que se desecha el agua y se tiene un resultado positivo de acuerdo al límite máximo permitido.

Para una mayor amplitud en las caracterizaciones de los puntos de muestreo los datos obtenidos también fueron evaluados respecto la NTG 29001. El pH obtenido en los puntos de muestreo no cumple en el segundo y tercer punto de estudio, pero como se mencionó al comparar con el Acuerdo 236-2006, el punto más importante es el número cinco y el valor se encuentra dentro del rango que solicita la norma.

El segundo parámetro a evaluar fue la temperatura. Como puede observarse en la tabla, todos los puntos de estudio cumplen con la temperatura necesaria para la descarga del agua de desecho de la planta. El límite permisible es menor a cuarenta grados Celsius.

Los sólidos disueltos totales fueron el tercer parámetro a evaluar. El límite máximo permitido es de 400 mg/L y el único punto de estudio que cumple con este valor es el número uno. La conductividad eléctrica depende de la cantidad de sales disueltas que se encuentran presentes en las muestras obtenidas y es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos. Los datos obtenidos de conductividad eléctrica están representados la tabla X. Los valores son muy altos para ambos parámetros y esto en definitiva se esperaba ya que todos los minerales presentes en el agua a desmineralizar quedaron adsorbidos por las resinas al ser regeneradas. Dichos minerales son los descargados desde el segundo punto de estudio. Las cámaras de los tratamientos que la planta tiene actualmente no tienen la capacidad de disminuir el valor. El quinto punto es el más importante, ya que es el valor final de descarga con 1 895 mg/L. Para cumplir con el valor de descarga permitido sería ideal que se utilizara un segundo tratamiento primario, como la coagulación-floculación, ya que al utilizar coagulantes se facilitaría la floculación de las partículas (sales) para favorecer la sedimentación de las mismas y así poder cumplir con la ley de descarga.

La demanda química de oxígeno fue el cuarto parámetro a evaluar, con 250 mg/L como límite máximo permisible. Todos los puntos de estudio cumplen, ya que se obtuvieron valores menores al permisible. Para un mayor entendimiento también se plasmaron los valores como carga por kilogramo al día. Igualmente, los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno en todos los puntos de estudio cumplen por presentar valores menores al permisible, el cual es de 450 mg/L. Los parámetros de fósforo y nitrógeno total también fueron satisfactorios al obtener valores menores al permitido.

Los parámetros de dureza y sulfatos cumplen con la norma NTG 29001 al ser menores a los estipulados por ley; los cloruros fueron los únicos parámetros que tuvieron resultados mayores desde el segundo punto de estudio hasta el quinto, y sobrepasaron el límite de 250 mg/L. Estos parámetros no los regula el reglamento de aguas residuales, por lo que no hay ningún inconveniente en desechar el agua en estas condiciones. Sería perjudicial si el agua se fuera a utilizar para consumo humano, pero como este no es el caso, no es una alerta al tratamiento actualmente utilizado en la planta.

Un contenido elevado de cloruros repercute en daños en las condiciones y estructuras metálicas y perjudica el crecimiento vegetal; por lo tanto queda descartada la utilización en riego de jardines o furgones, a menos que se agregue un tratamiento previo para reducir la concentración.

Los sistemas recomendados podrían ser un sistema de ósmosis inversa, un destilador o un filtro de intercambio iónico, pero su instalación sería mucho más costosa que simplemente descargarla al alcantarillado público y la municipalidad sea la encargada de reducir la concentración a un nivel aceptable.

Así mismo, el agua no puede reutilizarse en el proceso de desmineralización, ya que sería una cadena de nunca acabar: los minerales que se eliminan, siempre los adsorberán las resinas y cada vez, por el uso de los regenerantes, la cantidad a desmineralizar será mayor.

CONCLUSIONES

1. El agua residual del lavado de resinas de intercambio iónico en el proceso de desmineralización no debería ser vertida al alcantarillado público, ya que cumple con la mayoría de los límites de los parámetros establecidos del Acuerdo 236-2006, pero sobrepasa el valor máximo permisible de sólidos disueltos totales.
2. Mejorar el tratamiento actual utilizado en la planta para el tratamiento de sus aguas residuales, debido a que se debe reducir la concentración de sólidos disueltos totales.
3. El agua de lavado de resinas de intercambio iónico no puede ser utilizada en el riego de jardines de las instalaciones, ya que por presentar concentraciones altas en cloruros, se vería afectada la vegetación de los mismos.
4. Para el riego de furgones, no es viable utilizar el agua de lavado de resinas de intercambio iónico debido a la concentración de cloruros que contiene, pues puede perjudicar el estado de los mismos generando corrosiones.

RECOMENDACIONES

1. Para cumplir con el reglamento de descarga de aguas residuales, se puede considerar mejorar el sistema de tratamiento actual, utilizando el sistema de coagulación-floculación y de esta forma disminuir la concentración de los sólidos disueltos totales.
2. Aunque incorporar al tratamiento el sistema de coagulación-floculación, genere costos a la empresa, es responsabilidad de la misma cumplir con las leyes establecidas para la descarga de aguas residuales y de esta forma evitar sanciones posteriores que repercuten en multas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, Ervin. *Diseño e implementación de un sistema de recirculación de agua para reusarla en el área de desmoldeo y tanques de lixiviación (Leaching), como parte del proceso de fabricación de guantes de látex*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2015. 135 p.
2. ARANGO, Pablo. *Propuesta de tratamiento de agua de lavado de tanques de pinturas acuosas en planta manufacturera de pinturas*. Trabajo de graduación de Ing. Química Industrial. Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Landívar, 2012. 107 p.
3. FIÓN, Sheila. *Diseño de la planta de tratamiento de aguas para la recuperación de agua y desechos en una planta de productos alimenticios del tipo avícola*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ingeniería. 2004. 136 p.
4. Fondo para la Comunicación y Educación Ambiental, A.C. *Agua*. [en línea]. <<https://agua.org.mx/que-es/#agua>>. [Consulta: marzo de 2018].

5. GARCÍA, Reinaldo. *Caracterización y propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la industria de galvanizado de lámina por inmersión en caliente*. Trabajo de Maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2014. 59 p.
6. HAEUSSLER, Julio. *Diseño y construcción de un sistema de desmineralización de agua para uso en el laboratorio de operaciones unitarias con fines didácticos*. Trabajo de graduación de Ing. Química Industrial. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ingeniería. 2004. 100 p.
7. IDRECO SUDAMERICANA SA. *Generalidades sobre el intercambio iónico*. [en línea]. <www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/02_Generalidades_sobre_el.pdf>. [Consulta: marzo de 2018].
8. INTEF. *Aguas residuales*. [en línea]. <<http://mimosa.pntic.mec.es/vgarcia14/aguasresiduales.htm>>. [Consulta: marzo de 2018].
9. JUÁREZ, Miriam. *Evaluación del sistema de recuperación de agua de lavadoras y su impacto en la reducción de consumo de agua suave en el área de lavado de envases en una embotelladora de bebidas carbonatadas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2012. 242 p.
10. LEMUS, Luis. *Diseño del sistema de reutilización del efluente de una planta de tratamiento de agua residual, en un complejo industrial dedicado a la fabricación y envasado de bebidas*. Trabajo de

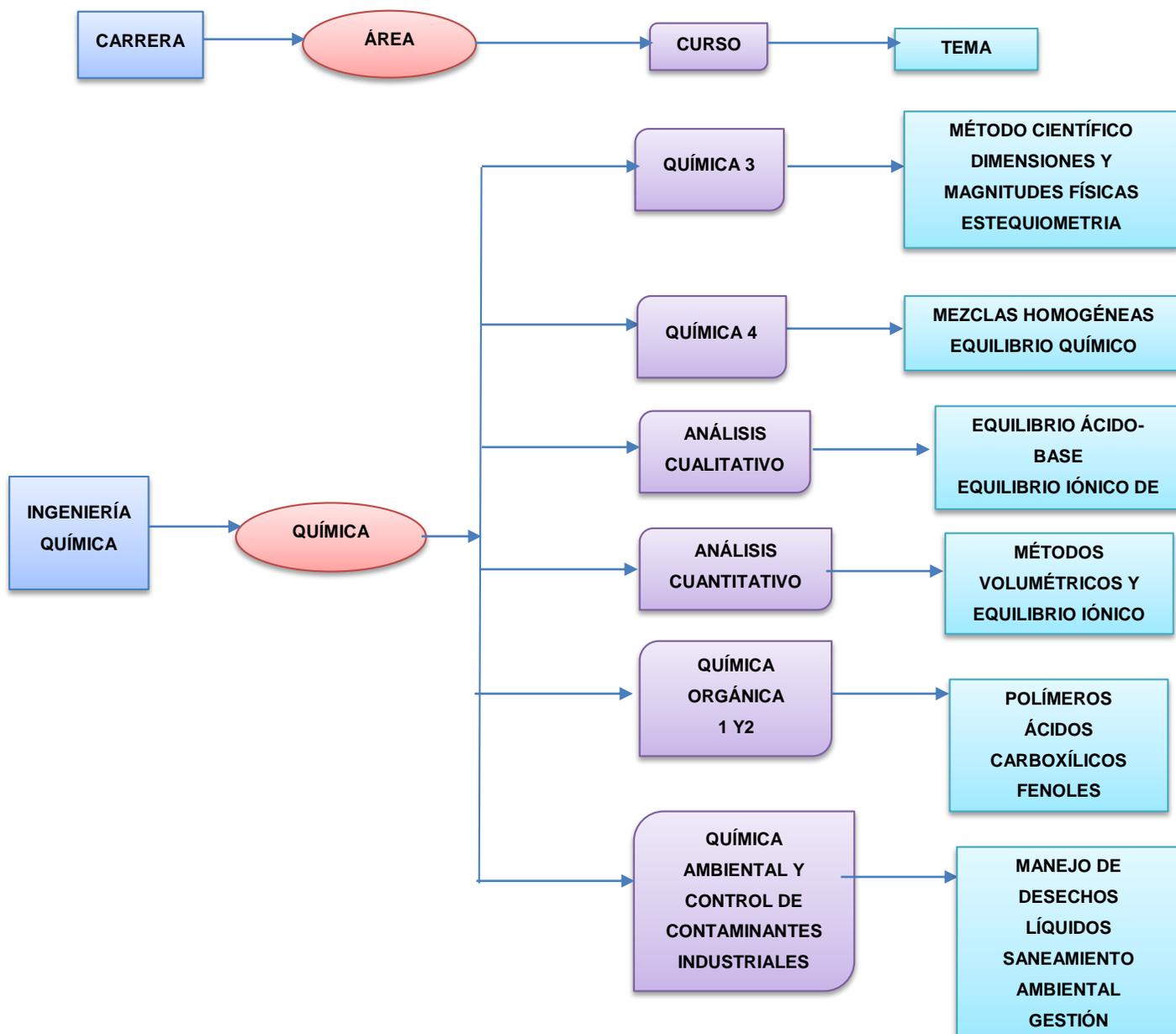
graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2013. 160 p.

11. NEVAREZ. *Intercambio iónico*. [en línea]. <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22193/Capitulo3.pdf>>. [Consulta: marzo 2018].
12. RAMÍREZ, Ednar. *Evaluación de la planta de tratamiento de aguas de una industria farmacéutica nacional, según el reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos y propuesta para el aprovechamiento de desechos*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2007. 87 p.
13. RIGOLA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales*. Colombia: MARCOMBO, S.A., 1990. 157 p. ISBN: 84-267-0740-8.
14. SÁNCHEZ, María. *Estudio y análisis de factibilidad para reutilización del agua en enjuagador de botellas en una línea de producción*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2016. 123 p.
15. SANS, Ramón y RIBAS, Joan. *Ingeniería ambiental*. Colombia: MARCOMBO, S.A., 1989. 148 p. ISBN: 84-267-0742-4.
16. UDEC. *Resinas intercambiadoras de iones*. [en línea]. <<http://www2.udec.cl/~analitic/Interc-iones.pdf>>. [Consulta: marzo de 2018].

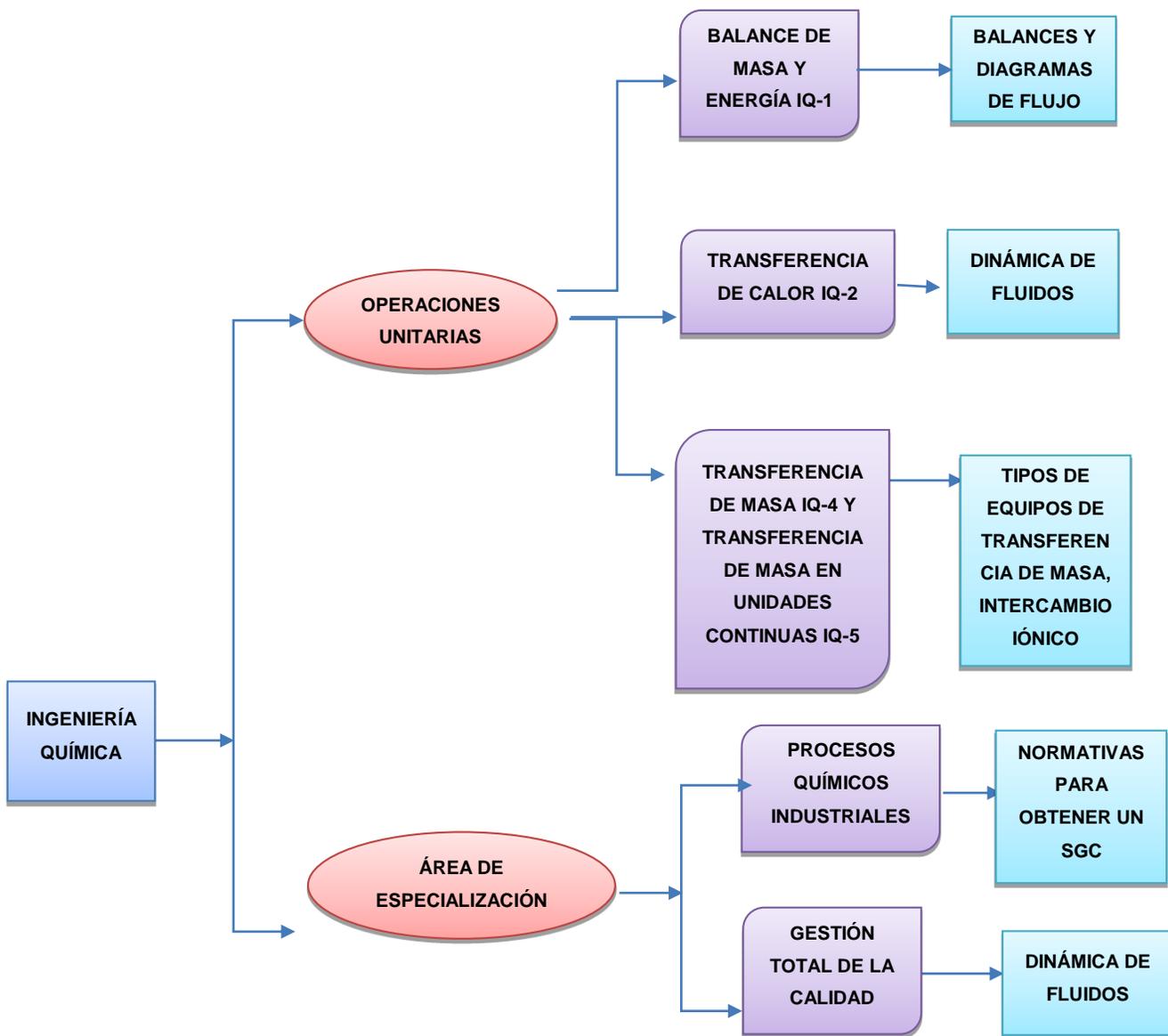
17. Universidad de Navarra. *Residuos industriales*. [en línea]. <<http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecología/Hipertexto/13Residu/120ResInd.htm>>. [Consulta: marzo 2018].
18. Universidad de Sonora. *Tipos de regeneración y selección de regenerantes*. [en línea]. <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/609/Capitulo3.pdf>>. [Consulta: marzo de 2018].
19. ZARAGOZA. *Intercambio iónico*. [en línea]. <<http://eina.unizar.es/grado/squimica/wcontent/uploads/2012/06/P6.pdf>>. [Consulta: marzo del 2018].

APÉNDICES

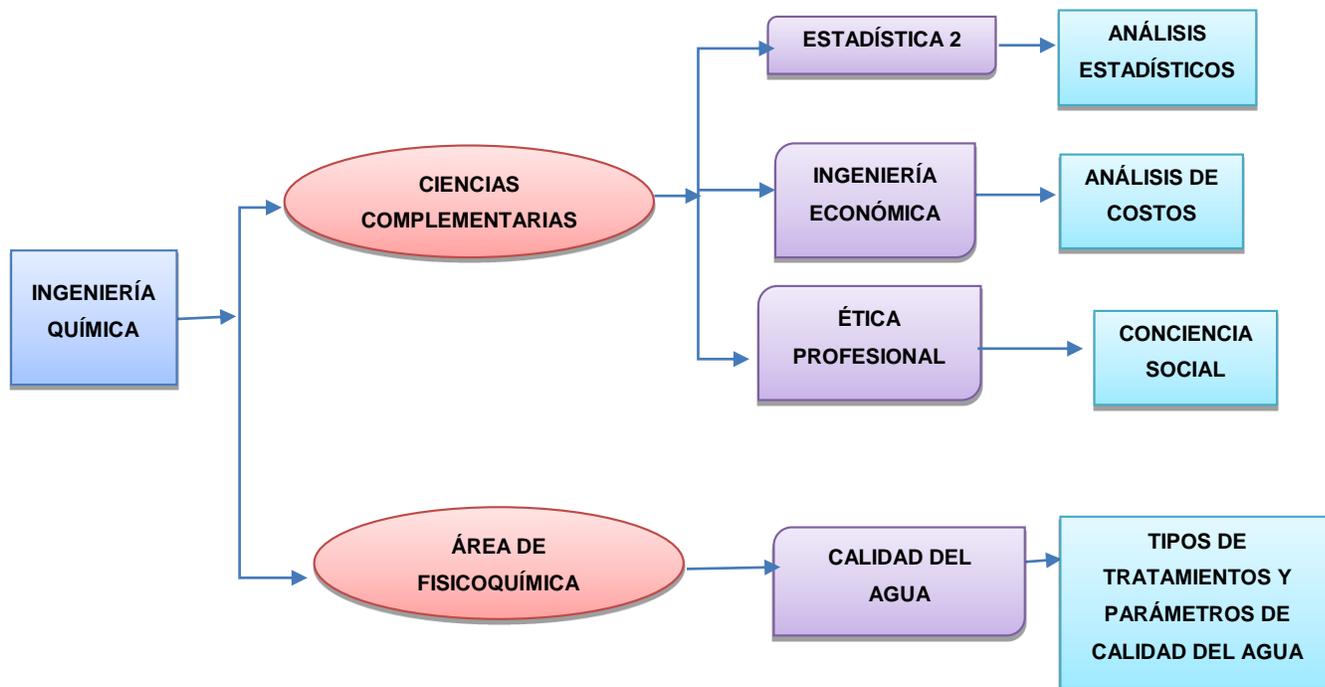
Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos



Continuación apéndice 1.



Continuación apéndice 1.



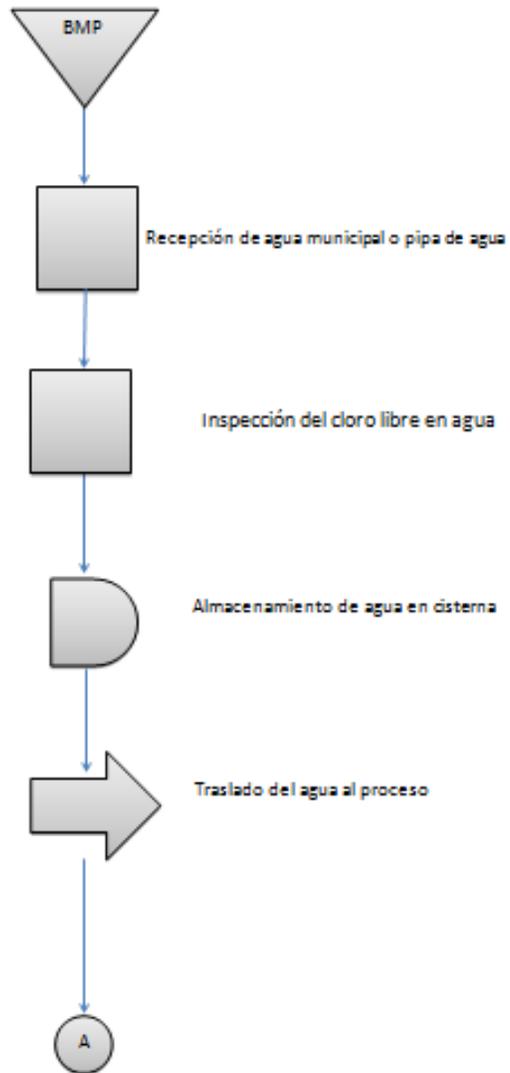
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**

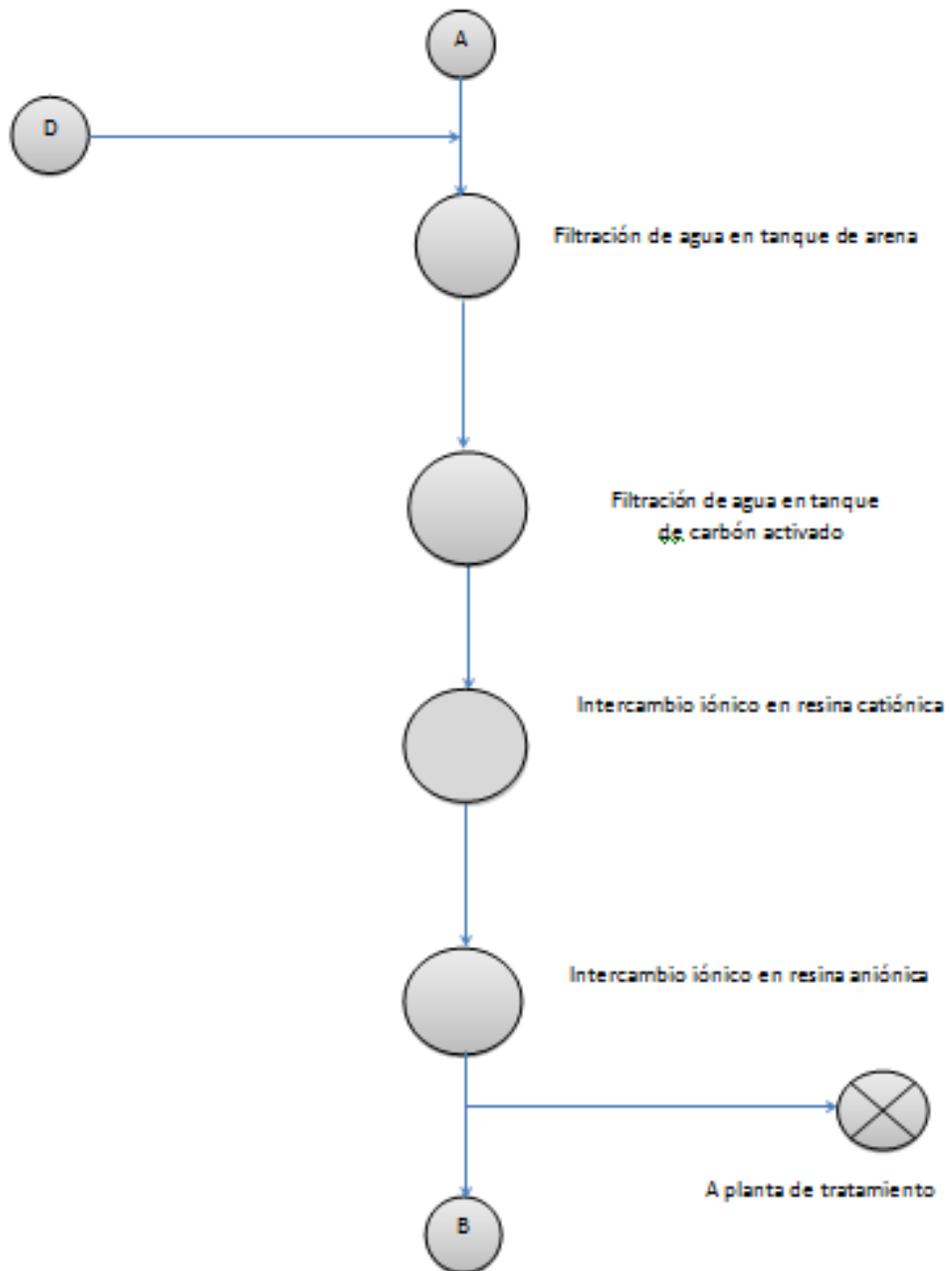


Fuente: elaboración propia.

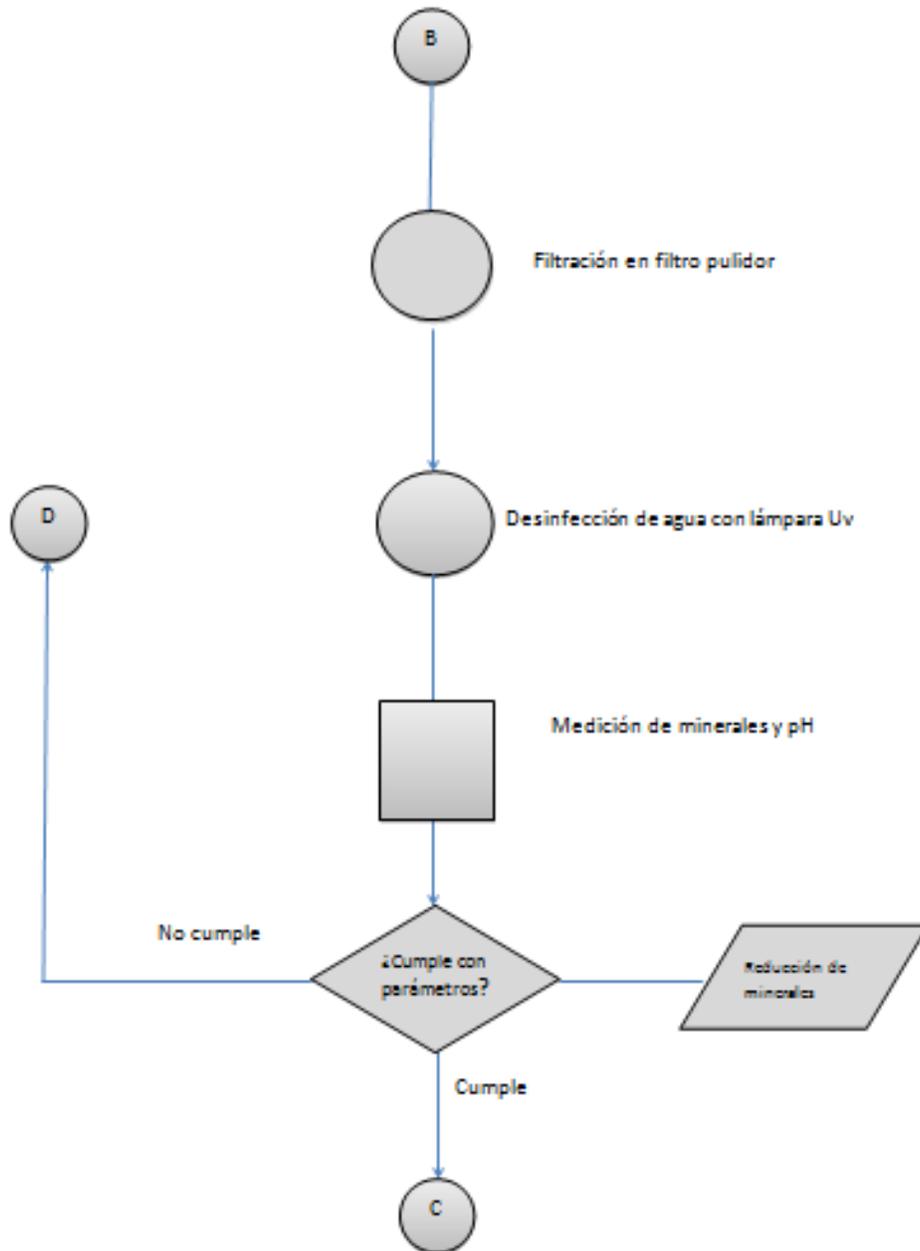
Apéndice 3. **Diagrama de proceso para la producción de agua desmineralizada**



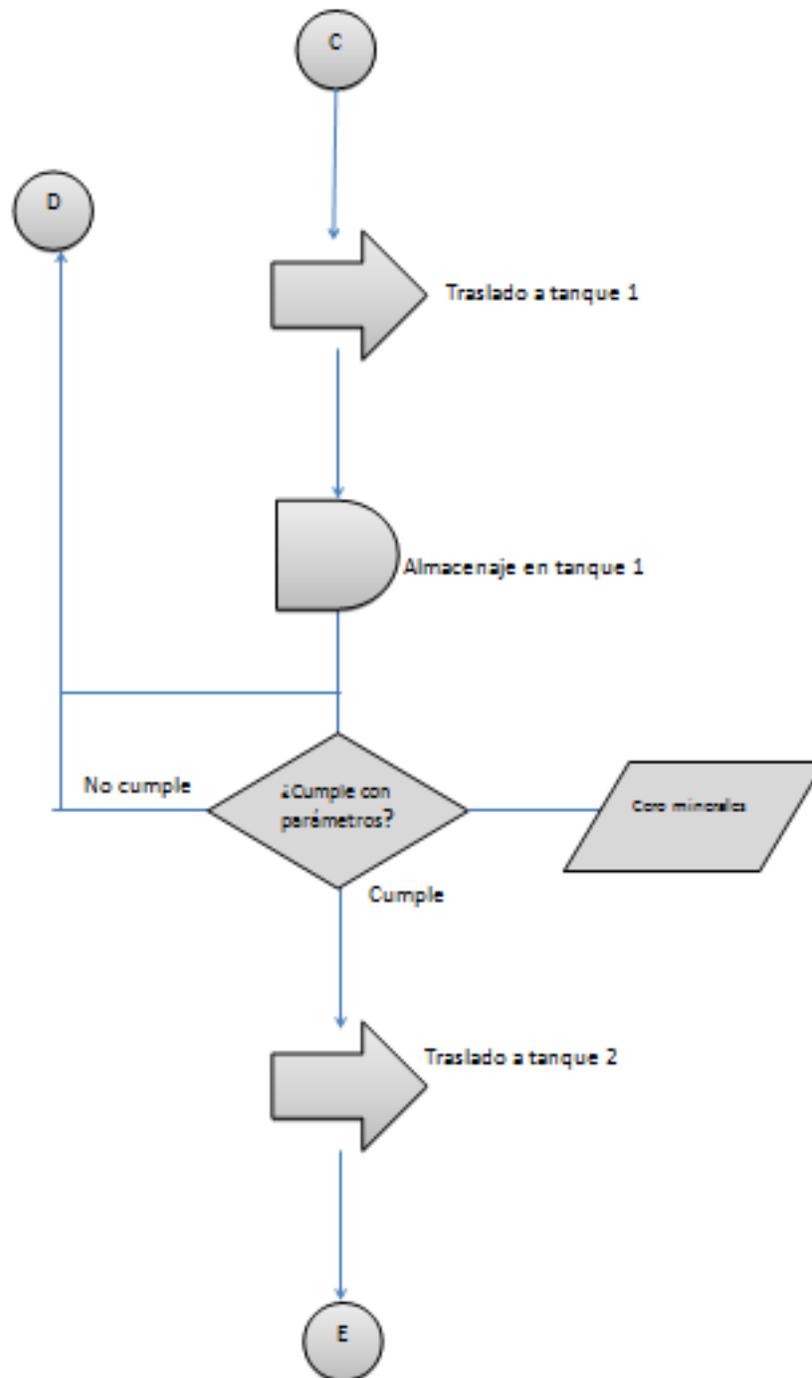
Continuación apéndice 3.



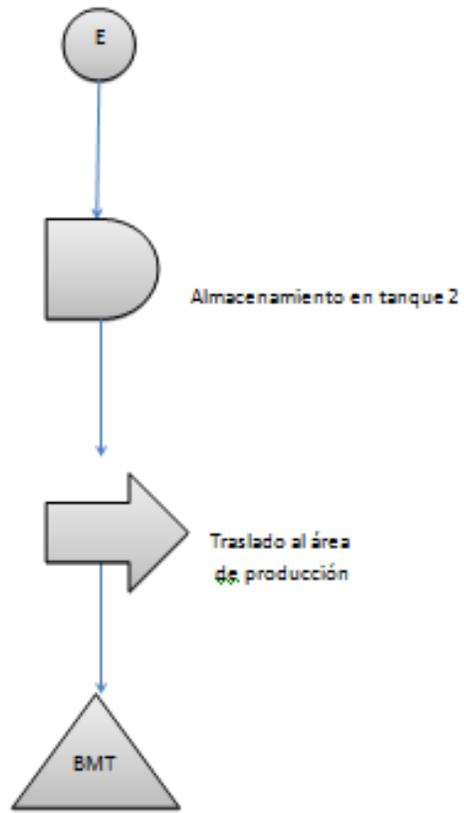
Continuación apéndice 3.



Continuación apéndice 3.



Continuación apéndice 3.

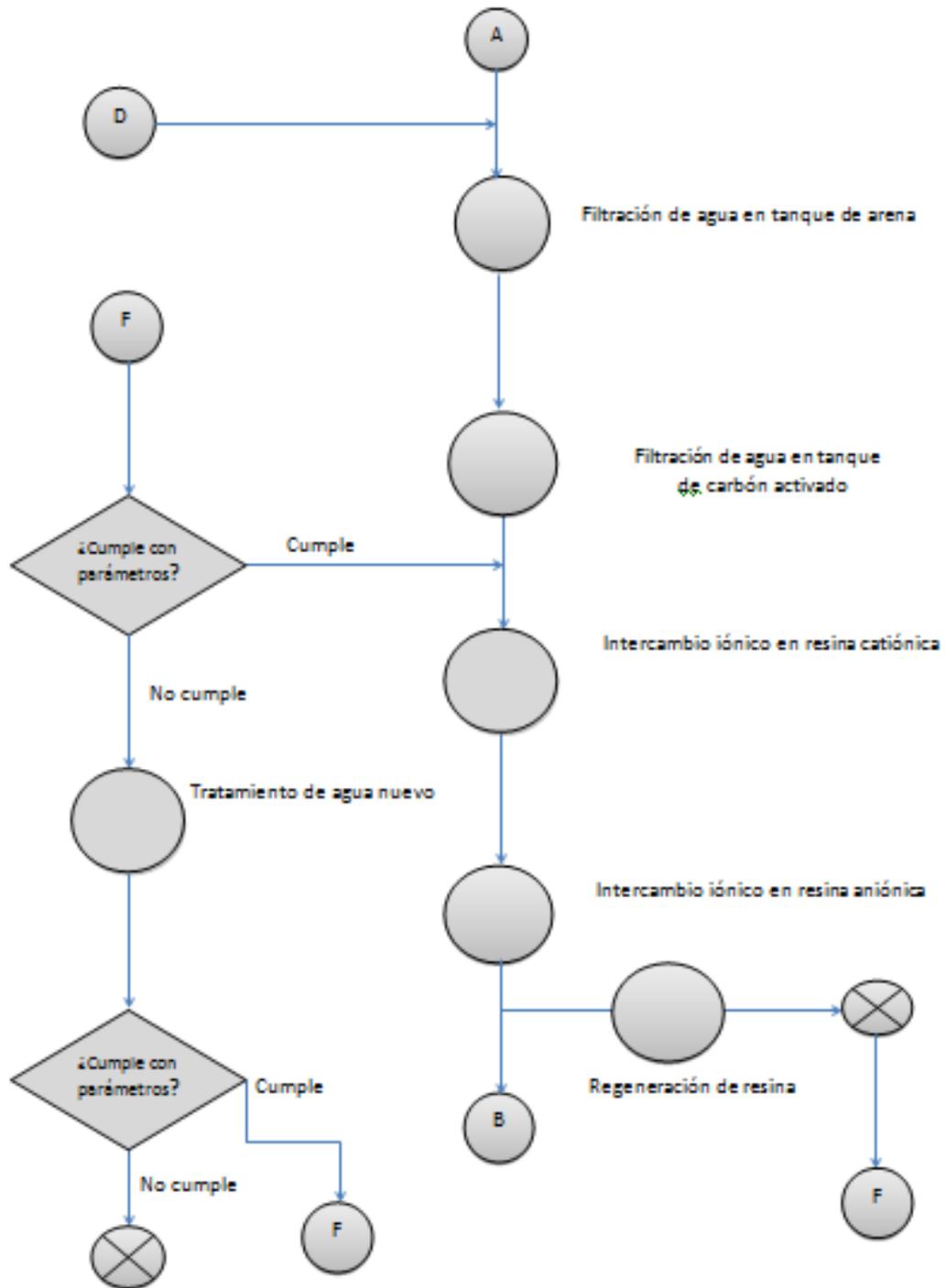


Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la empresa manufacturera de alimentos en estudio, ciudad de Guatemala.

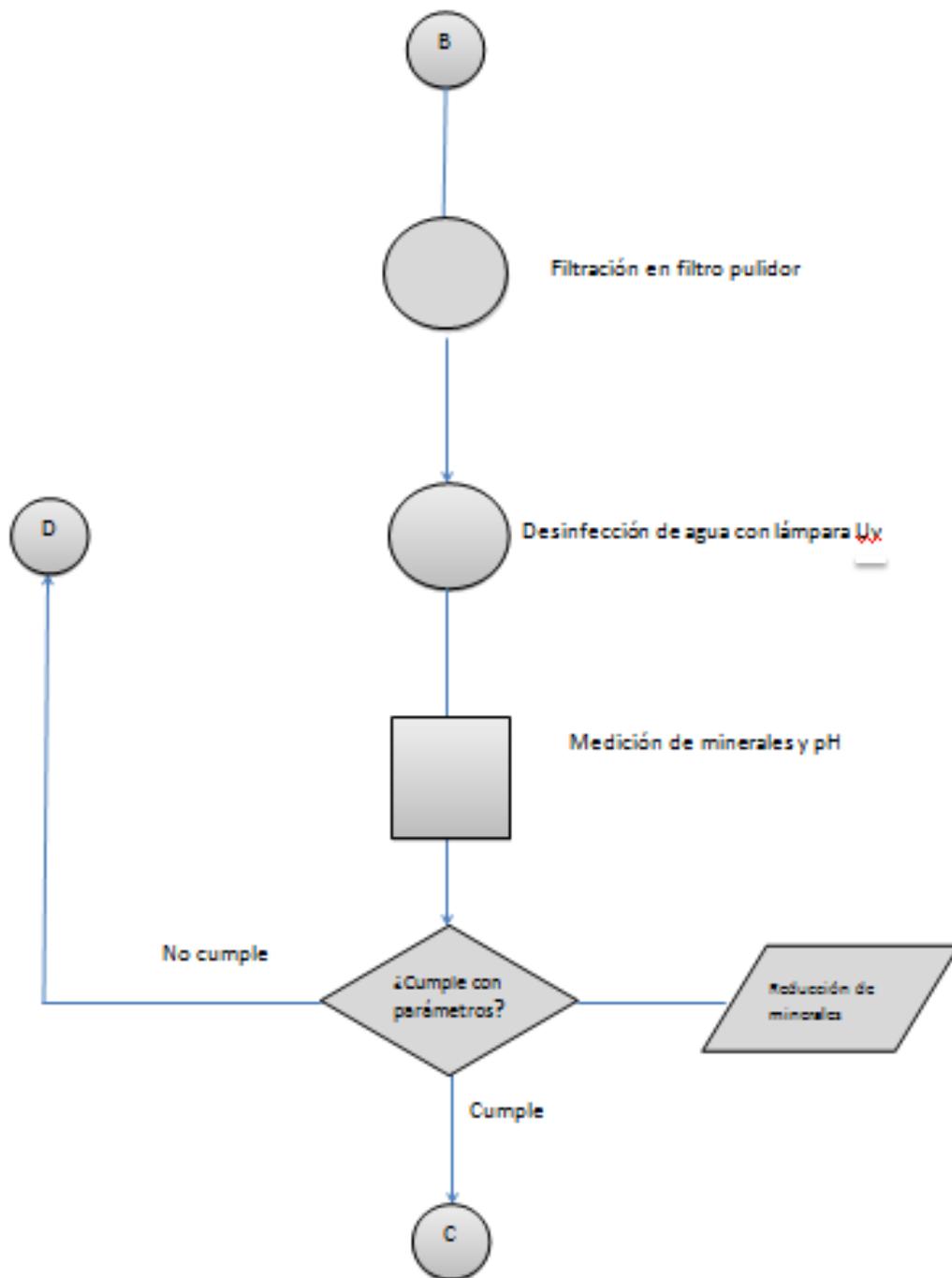
Apéndice 4. **Diagrama de proceso propuesto para la producción de agua desmineralizada**



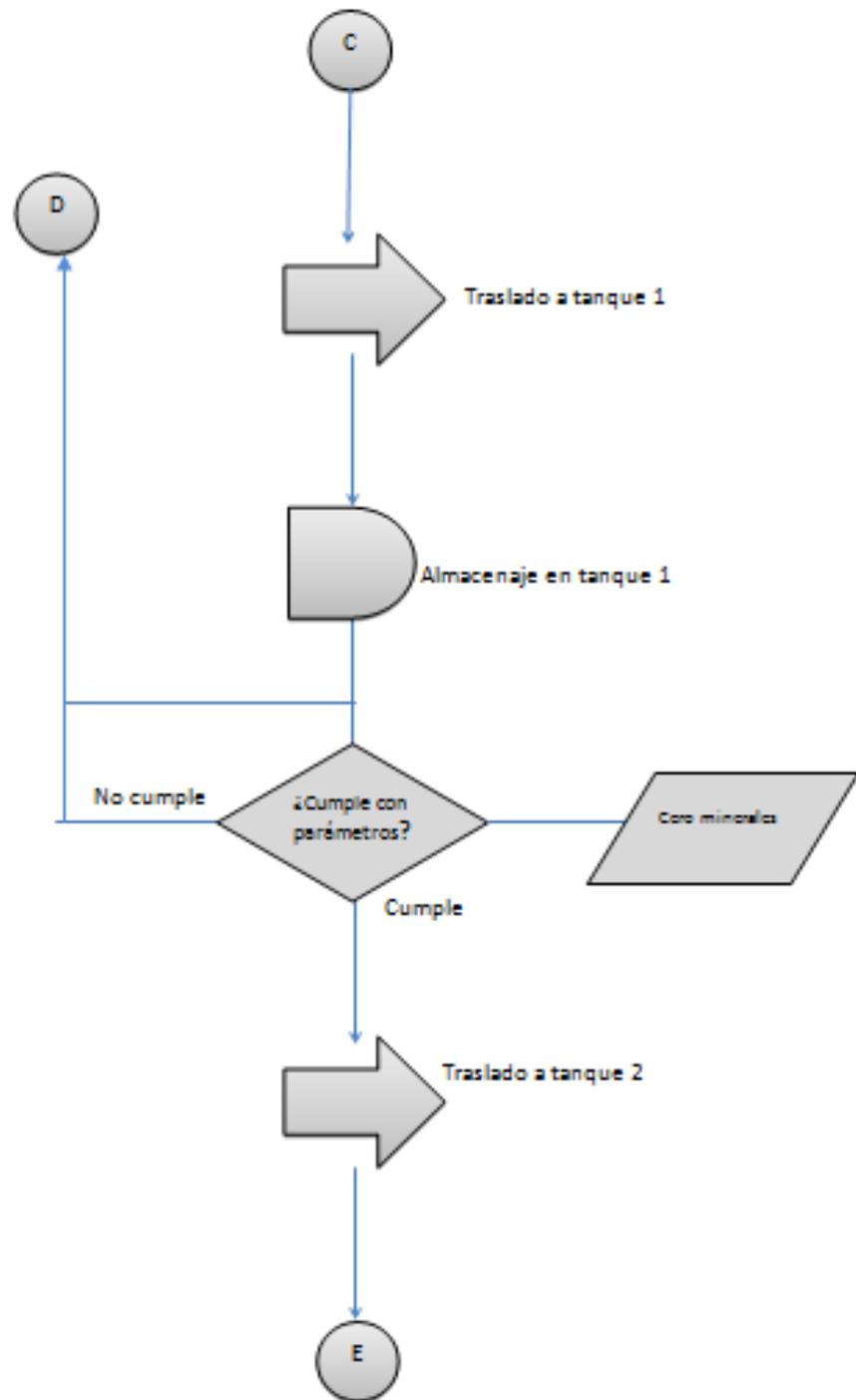
Continuación apéndice 4.



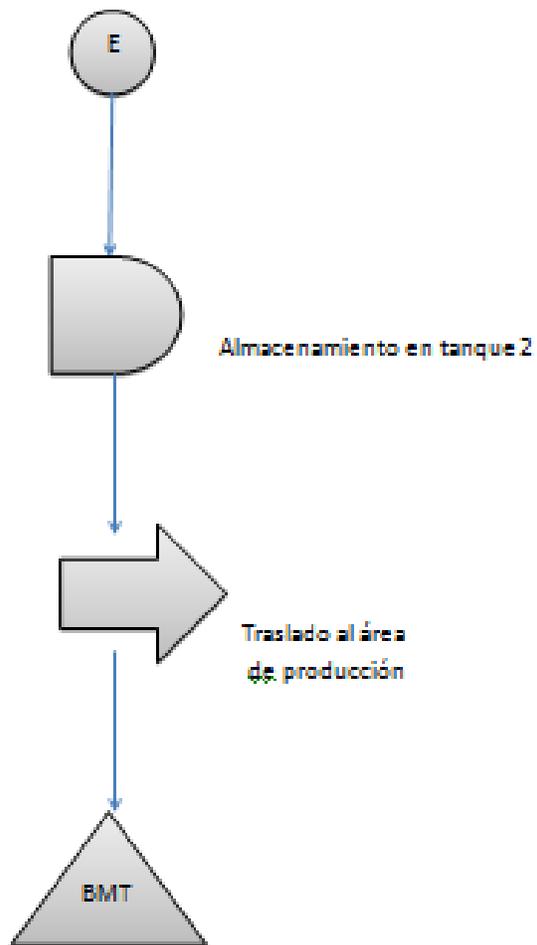
Continuación apéndice 4.



Continuación apéndice 4.



Continuación apéndice 4.



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la empresa manufacturera de alimentos en estudio, ciudad de Guatemala.

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías

Fotografía No.1 **Proceso de desmineralización de agua.**



Fuente: empresa manufacturera de alimentos.

Fotografía No. 2 **Tratamiento del agua de lavado de las resinas**



Fuente: empresa manufacturera de alimentos.

Fotografía No. 3 **Muestras para caracterizar**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 4 **Cristalería utilizada**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 5 **Reactivos utilizados**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 6 **Thermoreaktor y viales para determinación de DQO**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 7 **Turbidímetro**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 8 **Potenciómetro**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 9 **Conductímetro**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 10 **Medidor de parámetros múltiples HQ 40d**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.

Fotografía No. 11 **Espectofotómetro**



Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología.