



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

**OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS  
SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA**

**Jennifer Lizeth Ramos Morales**

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias  
e Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS  
SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JENNIFER LIZETH RAMOS MORALES**

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS  
E INGA. LORENA VICTORIA PINEDA CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADORA	Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

### **OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha agosto de 2009.



**Jennifer Lizeth Ramos Morales**



Guatemala, 25 de enero de 2011

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
Director de Escuela  
Escuela de Ingeniería Química  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable Ingeniero Álvarez:

Con un atento saludo me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final de Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) titulado **"OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA"** el cual ha sido elaborado por la estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Jennifer Lizeth Ramos Morales quien se identifica con carné 200511737.

Después de haber realizado la revisión del respectivo informe final y las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,

Jorge Mario Estrada Asturias  
Ingeniero Químico, colegiado 685  
PROFESOR TITULAR

Jorge Mario Estrada Asturias  
INGENIERO QUIMICO  
COLEGIADO 685





Guatemala, 12 de octubre de 2010.  
Ref.EPS.DOC.643.10.10.

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano  
Directora Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimada Ingeniera Sarmiento Zeceña.

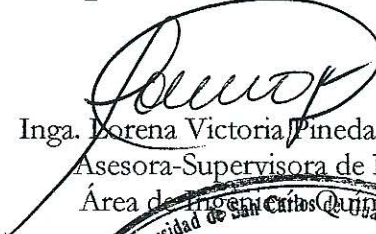
Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Jennifer Lizeth Ramos Morales** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **200511737**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

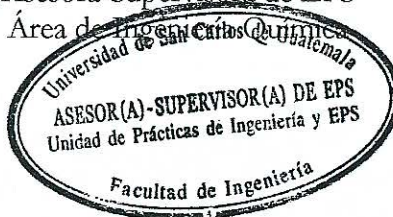
Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

  
Inga. Dorena Victoria Pineda Cabrera  
Asesora-Supervisora de EPS  
Área de Ingeniería Química

c.c.: Archivo  
LVPC/ra







Guatemala, 12 de octubre de 2010.  
Ref.EPS.D.1022.10.10.

Ing. Williams G. Alvarez Mejía  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente


Estimado Ingeniero Alvarez Mejía.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria **Jennifer Lizeth Ramos Morales**, quien fue debidamente asesorada y supervisada por la **Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera**.

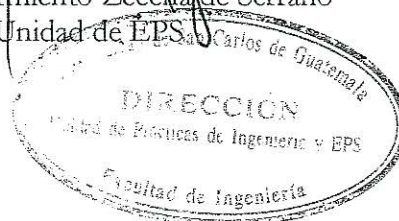
Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora -Supervisora de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

  
Inga. Norma Ileana Sarmiento Zecena de Serrano  
Directora Unidad de EPS

NISZ/ra





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 31 de marzo de 2011  
Ref. EI.Q.TG.089.2011

Ingeniero  
**Williams Guillermo Álvarez Mejía**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG-1252010-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del **Informe de Ejercicio Profesional Supervisado de graduación (EPS FINAL)**, para optar al título de **INGENIERA QUÍMICA** a la estudiante universitaria, **Jennifer Lizeth Ramos Morales**, identificada con carné No. **2005-11737**, titulado: **"OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA"**, el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico Jorge Mario Estrada Asturias.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Ramos Morales**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA

Inga. Teresa Lizeth de León Arana, M.Sc.  
COORDINADORA  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo





El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la estudiante **JENNIFER LIZETH RAMOS MORALES** titulado: **"OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2012

Cc: Archivo  
VMMV/ale



DTG. 575.2012

El Decano 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: **OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE REGENERACIONES, EN EL ÁREA DE TRATAMIENTO DE AGUA, POR MEDIO DEL ARREGLO IDEAL DE LOS SUAVIZADORES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA RESINA**, presentado por la estudiante universitaria **Jennifer Lizeth Ramos Morales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno  
Decano a.i.

Guatemala, 13 de noviembre de 2012.

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Mi amado Padre Celestial, quien en su inmensa misericordia, amor y fidelidad me guía para cumplir cada uno de mis sueños y metas.
- Mis padres** Enrique Danilo Ramos Bolán y Norma Leticia Morales de Ramos, por ser mi ejemplo a seguir, por inspirarme y por confiar en mi.
- Mis hermanos** Evelyn Doresly y Leslie Jamid Ramos Morales, por ser mis mejores amigas, mis confidentes y por hacer de mi vida tan maravillosa y feliz.
- Mis abuelos** Raúl Morales, Eloisa Barrios, Pedro Ramos (q.d.e.p.) y Hotencia Bolán (q.d.e.p.).
- Mis tíos** Estuardo Morales, Corina Morales, Rosa Morales, Belveth Castro y Marvin Ramos.
- Mis primos** Mario Ramos, Estuardo Ramos, Gimena Morales, Heidy Morales, Kevin Morales y Melisa Morales.

**Mis amigos**

Gilda Rodríguez, Carlos López, Jenoveva Maldonado, Paulo Vendrell, Ingrid Higueros, Fernando Ramírez, Víctor Aceituno, Nancy Díaz, José Gómez y Susana Arrechea.

**Los ingenieros químicos**

Karina Méndez, Victor Monzón, Williams Álvarez, Jorge Mario Estrada y Lorena Pineda.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por su infinito amor y misericordia, por guiar mi camino y por permitirme alcanza este sueño.
- Mis padres** Enrique Danilo Ramos Bolán y Norma Leticia Morales de Ramos, por su apoyo incondicional en cada decisión en mi vida, por ser los mejores padres que Dios me pudo dar, por guiarme en el buen camino y por ser mi ejemplo en todo momento.
- Mis hermanos** Evelyn Dorely y Leslie Jamid Ramos Morales, por confiar siempre en mí, por ser las mejores amigas, por compartir y formar parte de los mejores momentos en mi vida.
- Mis abuelos** Raúl Morales, Eloisa Barrios, Pedro Ramos (q.d.e.p.) y Hotencia Bolán (q.d.e.p.) por ser un gran ejemplo de vida y mis angelitos que me cuidan en todo momento.
- Mis tíos** Estuardo Morales, Corina Morales, Rosa Morales, Belveth Castro y Marvin Ramos por brindarme su confianza, amor y apoyo.

**Mis primos**

Mario Ramos, Estuardo Ramos, Gimena Morales, Heidy Morales, Kevin Morales y Melisa Morales, por hacer de cada día el mejor, por su amistad, amor, confianza y por compartir mis triunfos y tropiezos.

**Mis amigos**

Por su amistad, apoyo y confianza incondicional, por compartir mis triunfos, alegrías y tristezas, por formar parte de los mejores e inolvidables momentos de mi vida. En especial a Gilda María Rodríguez Gilda y Carlos Guillermo López Bode.

**Mi asesor empresarial**

Ingeniera Karina Méndez, por su confianza y asesoría en el desarrollo de este proyecto.

**Mi asesor**

Ingeniero Jorge Mario Estrada, por su tiempo y por brindarme sus conocimientos para la mejora y realización de este proyecto.

**Mi asesora de EPS**

Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera, por su tiempo para guiarme en todo el desarrollo de este proyecto.

**Mis revisores**

Ingenieros Químicos Víctor Monzón y Williams Álvarez, por su dedicación y aportes en la revisión de este proyecto.

**A la empresa**

Embotelladora La Mariposa, S.A. especialmente al área de tratamiento de agua, por permitirme el uso de sus instalaciones para el desarrollo de este proyecto.

**Mi establecimiento educativo**

Liceo Javier Vespertino, por todos los conocimientos transmitidos durante los años de estudio.

**La Universidad de San Carlos de Guatemala**

Mi alma máter a la cual estaré siempre agradecida, por formarme como profesional de la Ingeniería Química.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS .....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. Suavizadores.....	3
2.1.1. Operación del suavizador .....	3
2.1.2. Elección del suavizador.....	4
2.2. Intercambio iónico .....	5
2.2.1. Estructura física y química de la resina ....	8
2.2.2. Selectividad de resinas.....	10
2.2.3. Cinética .....	11
2.3. Frecuencia de regeneración en el suavizador .....	12
2.3.1. Tecnología en diseño y operación .....	12
2.4. Salmuera para regeneración .....	13
2.4.1. Factores que afectan la eficiencia de salmuera en los suavizadores.....	13



3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	15
3.1.	Variables .....	15
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	16
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	16
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	17
3.4.1.	Materia prima .....	17
3.4.2.	Cristalería.....	17
3.4.3.	Equipos .....	18
3.4.4.	Reactivos .....	18
3.5.	Flujograma del proyecto.....	18
3.5.1.	Calibración de contadores .....	20
3.5.2.	Determinación de los factores perturbadores .....	21
3.5.3.	Preparación de salmuera .....	21
3.5.4.	Cumplimiento de la demanda de agua .....	22
3.5.5.	Evaluación de la eficiencia de intercambio iónico ....	23
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	23
3.6.1.	Datos originales.....	23
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .	27
3.7.1.	Muestra de cálculo .....	27
3.7.1.1.	Granos de dureza a suavizar.....	28
3.7.1.1.1.	Factor de conversión a ppm.....	28
3.7.1.1.2.	Granos de dureza.....	28
3.7.1.2.	Preparación de salmuera .....	29
3.7.1.2.1.	Factor de saturación de salmuera .....	29
3.7.1.2.2.	Solución saturada de salmuera .....	30

3.7.1.3.	Tiempo de funcionamiento	31
3.7.1.3.1.	Tiempo teórico de funcionamiento .....	31

7.1.3.2.	Tiempo real de funcionamiento.....	32
3.7.1.4.	Eficiencia de intercambio .....	33
7.1.4.1.	Eficiencia de cada suavizador.....	33
7.1.4.2.	Aumento de eficiencia promedio .....	34
3.7.1.5.	Costo de agua suave .....	35
3.7.1.6.	Regresión lineal .....	35
3.7.1.7.	Coeficiente de dispersión o variabilidad.....	38
7.1.7.1.	Desviación estándar...	38
7.1.7.2.	Coeficiente de dispersión o variabilidad.....	39
7.1.7.3.	Tabla de representatividad del coeficiente de variabilidad.....	40
3.7.2.	Datos calculados .....	41
3.8.	Análisis estadístico.....	66
4.	RESULTADOS.....	67
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	73

5.1.	Calibración de contadores de agua .....	73
5.2.	Factores perturbadores .....	74
5.3.	Preparación de salmuera para regeneración .....	75
5.4.	Demanda de agua suave.....	77
5.5.	Optimización de regeneraciones y determinación de eficiencia .....	78
6.	LOGROS OBTENIDOS .....	79
	CONCLUSIONES .....	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	APÉNDICE .....	87



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Proceso de intercambio iónico entre resina y minerales de dureza.....	6
2.	Resina catiónica .....	9
3.	Flujograma.....	19
4.	Conexión para calibración del contador del suavizador 8 .....	20
5.	Hoja de registro de control de suavizadores, anterior .....	24
6.	Hoja de registro de control de suavizadores, modificada .....	25
7.	Agregar línea de tendencia.....	36
8.	Tipo de tendencia y regresión.....	37
9.	Regresión lineal y modelo matemático .....	38
10.	Calibración de medidores de flujo de los suavizadores.....	67
11.	Optimización de salmuera y aumento de eficiencia de suavizadores..	69

### TABLAS

I.	Variables dependientes e independientes.....	15
II.	Capacidad de intercambio iónico de la resina catiónica .....	26
III.	Características de suavizadores .....	26
IV.	Representatividad del coeficiente de variabilidad o dispersión....	40
V.	Datos de calibración de contadores de agua suave.....	41
VI.	Ecuaciones de calibración de contadores de agua suave .....	42

VII.	Pruebas de control de presiones de suavizadores con bomba de 15 hp .....	42
VIII.	Pruebas de control de presión de 2 suavizadores con bomba de 15 hp .....	43
IX.	Pruebas de control de presión de 2 suavizadores con bomba de 40 hp .....	44
X.	Preparación de salmuera para regeneración .....	45
XI.	Desviación estándar del procedimiento anterior y actual para los flujos de agua suave para el procedimiento anterior .....	45
XII.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	46
XIII.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	47
XIV.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	48
XV.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	49
XVI.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	50
XVII.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	51
XVIII.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	52
XIX.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior .....	53
XX.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	54
XXI.	Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	55

XXII.	Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	56
XXIII.	Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	57
XXIV.	Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	58
XXV.	Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	59
XXVI.	Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	60
XXVII.	Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento .....	61
XXVIII.	Porcentaje de eficiencia y tiempo teórico de los suavizadores para el procedimiento anterior .....	62
XXIX.	Porcentaje de eficiencia y tiempo teórico de los suavizadores para el nuevo procedimiento .....	62
XXX.	Control de eficiencia al modificar la salmuera .....	63
XXXI.	Eficiencia promedio y aumento de eficiencia promedio de suavizadores .....	63
XXXII.	Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo para los galones de agua suavizador.....	64
XXXIII.	Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo para tiempo de funcionamiento de suavizadores .....	65
XXXIV.	Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo para el costo de producción de agua suave .....	66
XXXV.	Puesta en funcionamiento de suavizadores según bomba .....	68
XXXVI.	Dosificación para elaboración de salmuera y regeneración de resina.....	68

XXXVII.	Eficiencia promedio y aumento de eficiencia promedio de suavizadores .....	70
XXXVIII.	Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo....	71



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>hp</b>	Caballos de fuerza, potencia
<b>NaCl</b>	Cloruro de Sodio
<b>DVB</b>	Divinilbenzeno
<b>gal</b>	Galones
<b>gpm</b>	Galones por minuto
<b>g</b>	Gramos
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>lb</b>	Libras
<b>l</b>	Litros
<b>mg</b>	Miligramos
<b>ml</b>	Mililitros
<b>ppm</b>	Partes por millón (mg/l)
<b>ft<sup>3</sup></b>	Pies cúbicos
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Pe</b>	Presión de entrada
<b>Ps</b>	Presión de salida
<b>in</b>	Pulgadas



## GLOSARIO

- Adsorción** Proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material.
- Anión** Es un ión (sea átomo o molécula) con carga eléctrica negativa, es decir; con exceso de electrones. Los aniones se describen con un estado de oxidación negativo.
- Catión** Es un ión (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva, es decir; ha perdido electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo.
- Difusión** Es el movimiento, bajo la influencia de un estímulo físico, de un componente individual a través de una mezcla. La causa más frecuente de la difusión es un gradiente de concentración del componente que difunde. Un gradiente de concentración tiende a mover el componente en una dirección, tal que iguale las concentraciones y anule el gradiente.
- Disociación** Es un proceso general en el cual complejos, moléculas o sales se separan en moléculas más pequeñas, iones o radicales, usualmente de manera reversible.

<b>Dureza</b>	Concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. Son éstas las causantes de la dureza del agua, y el grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de sales metálicas.
<b>Eficiencia</b>	Número de granos de dureza removida por libra de sal usada para regenerar.
<b>Electrolito</b>	Es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico.
<b>Intercambio iónico</b>	Es un proceso rápido y reversible, a partir del cual los iones impuros presentes en el agua son reemplazados por iones que despiden una resina de intercambio de iones. Los iones impuros son tomados por la resina que debe ser regenerada periódicamente para restaurarla a su forma iónica original.
<b>Optimización</b>	Lograr con una menor cantidad de recursos el mismo objetivo, cumpliendo con los mismos estándares de calidad.
<b>Polimerización</b>	Es un proceso químico por el que los reactivos, monómeros (compuestos de bajo peso molecular) se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso, llamada polímero, bien una cadena lineal o una macromolécula tridimensional.

<b>Regeneración</b>	Restauración de la resina al encontrarse agotada en su forma de calcio o magnesio, a partir de una solución saturada de cloruro de sodio, la cual convierte la resina a la forma de sodio.
<b>Resina catiónica</b>	Los grupos de ácidos están enlazados químicamente a la matriz de la resina, y las resinas tienen una alta concentración de cargas fijas positivas. Éstas se balancean por medio de contraiones móviles como $H^+$ , $Na^+$ o $Ca^{+2}$ , así que la neutralidad eléctrica se mantiene siempre en las partículas de la resina.
<b>Salmuera</b>	Solución preparada a partir de una sal, utilizada para la regeneración de la resina.

## **RESUMEN**

El presente proyecto se realizó con el objetivo de optimizar el número de regeneraciones en el área de tratamiento de agua, por medio del arreglo ideal de los suavizadores en función de las propiedades físicas de la resina.

Se cuantificó el flujo y las dimensiones de cada suavizador y se calibraron los contadores de agua suave. Después se determinaron los factores perturbadores y la cantidad de sal para la preparación de salmuera. Posteriormente se procedió al cumplimiento de la demanda de agua y a la evaluación de la eficiencia para obtener la eficiencia de intercambio iónico.

Como resultado de dicho proyecto se logró un aumento aproximado del 25 por ciento en la eficiencia de cada uno de los suavizadores y la optimización significativa de los recursos utilizados para dicho fin.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Optimizar el número de regeneraciones, en el área de tratamiento de agua, por medio del arreglo ideal de los suavizadores en función de las propiedades físicas de la resina.

### **Específicos**

1. Cuantificar el flujo y las dimensiones de cada suavizador por medio de la calibración de los contadores de agua y las hojas técnicas proporcionadas por los proveedores.
2. Determinar los parámetros que afectan el procedimiento actual para lograr una mejora significativa.
3. Optimizar la cantidad de salmuera y aumentar la eficiencia de intercambio iónico a partir de las dimensiones de los suavizadores, del tamaño de resina, capacidad de intercambio en granos por cada galón de agua dura, tiempo máximo de intercambio, cantidad de agua capaz de suavizar, costo y vida útil de la resina.





## INTRODUCCIÓN

La función de los suavizadores de agua es remover calcio, magnesio y otros minerales del agua, evitando así muchos de los problemas del agua dura que se reflejan en ahorro significativo de energía, agua, vida de las tuberías y maquinaria. Para ello se ponen en contacto una solución electrolítica con una partícula sólida electrolítica para cambiar la composición de la solución.

Debido a que el procedimiento actual utilizado para suavizar el agua no era el adecuado, se realizaron varias modificaciones para lograr cumplir con los objetivos planteados en dicho proyecto. Por lo que se calibraron los contadores de agua suave, con el fin de obtener datos veraces, se determinaron los factores que afectan el funcionamiento de los suavizadores, como la presión de trabajo. La ineficiente preparación de salmuera, la dureza del agua utilizada para preparación de salmuera, la cual de agua concentrada con 200 partículas por millón se cambio a agua concentrada de 5 partículas por millón.

Los resultados de dicho proyecto, evidenciaron un aumento de la eficiencia de los suavizadores del 25 por ciento aproximadamente, la optimización significativa de los recursos y las regeneraciones, el uso apropiado de los suavizadores y en general la mejora del proceso de agua suave por medio del intercambió iónico en los suavizadores.



## **1. ANTECEDENTES**

En el área de tratamiento de agua de la embotelladora, no se tiene un proceso establecido por la compañía para el proceso de suavizar agua a partir de los suavizadores.

Por tal razón surgió este proyecto, con el objetivo de mejorar el proceso de suavizar agua, la empresa no cuenta con el control necesario para el uso de los suavizadores y de la materia prima necesaria para llevar a cabo dicho proceso, lo cual ocasiona que se haga uso innecesario de materia prima (sal) y se reduzca la vida útil, tanto de los suavizadores como de la resina por el uso inadecuado.

Por lo que se mejoro el funcionamiento de cada suavizador, cumplir con la demanda de agua suave de la empresa y aumentar la eficiencia de intercambio iónico de la resina, para optimizar la cantidad y el número de regeneraciones.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Suavizadores**

Son equipos diseñados para remover calcio, magnesio y otros minerales del agua, evitando así muchos de los problemas del agua dura que se reflejan en ahorro significativo de energía, agua, vida de las tuberías y maquinaria.

Los suavizadores funcionan por un proceso llamado intercambio iónico, el cual elimina las sales indeseables. Hay varios modelos que dependen de la aplicación, (residencial, comercial o industrial), por el agua de suministro (la dureza varía por zonas). Existen casos en los que un suavizador no es lo único para tener un agua satisfactoria, por lo general se requiere de un análisis del agua para determinar el equipo que más se adecue al problema.

#### **2.1.1. Operación del suavizador**

Los suministros de agua natural contienen sales disueltas, las cuales se disocian en el agua para formar partículas con carga, conocidas como iones. Estos están presentes por lo general en concentraciones relativamente bajas, y permiten que el agua conduzca electricidad. Algunas veces se conocen como electrolitos. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento y calefacción, generación de vapor y manufactura.

Los iones comunes que se encuentran en la mayoría de las aguas incluyen los cationes de carga positiva; calcio y magnesio—cationes que generan dureza, los cuales hacen que el agua sea dura—y sodio. Los aniones de carga negativa incluyen alcalinidad, sulfato, cloruro y silicio. La remoción de estos minerales o sales disueltas se logra por medio de la suavización del agua a través de un proceso de intercambio iónico.

Al paso del agua a través del tanque de resina los minerales disueltos son atrapados por la resina. Al paso del tiempo la resina se agota, y el suavizador se regenerará usando una solución de salmuera.

### 2.1.2. Elección del suavizador

El orden para seleccionar un suavizador de agua, comienza con determinar como primer paso la cantidad de dureza, en la empresa Embotelladora La Mariposa, S.A. a partir del método de Merck –Aquamerck 1.11106.0001 09/06-. Muchos de los análisis del agua expresan la dureza en partes por millón (ppm). Las partes por millón deben convertirse a granos por galón (gpg), para poder calcular el tamaño del suavizador. Para convertir la dureza expresada en ppm a gpg hay que dividir los ppm entre 17,1. Esta medida significa, cuántos granos de resina se necesitan para suavizar un galón de agua, la cual se obtiene a partir de la siguiente conversión:

$$\frac{1 \text{ granos}}{\text{gal}} * \frac{1 \text{ g}}{15,4324 \text{ granos}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1 \text{ gal}}{3,785 \text{ l}} = \frac{17,1 \text{ mg}}{\text{l}} = 17,1 \text{ ppm}$$

En la selección de un suavizador de agua hay que estar familiarizado en cuáles son las capacidades de un suavizador. Obviamente los esfuerzos realizados para calcular los granos totales necesarios para suavizar un volumen específico de agua, con una dureza específica, sirven para seleccionar algún suavizador con base a su capacidad. Cuando se revisa la información técnica de un suavizador, se observará que la mayoría de ellos siempre vienen especificados a su capacidad máxima de intercambio en grano, hacer esto tendrá como resultado una ineficiente operación en términos de consumo de sal. La selección debe realizarse con base a la capacidad baja o media de granos del suavizador. Por lo que se recomienda cada vez que se seleccione un suavizador, se considere que tan eficiente se quiere diseñar.

Es importante mencionar que el empleo de la máxima, media o baja capacidad, solamente afecta en el consumo de sal, pero cualquiera de las tres que se seleccione, el suavizador elimina totalmente la dureza, esto se hace por el ahorro en la operación y no por la calidad del agua, siempre será suavizada.

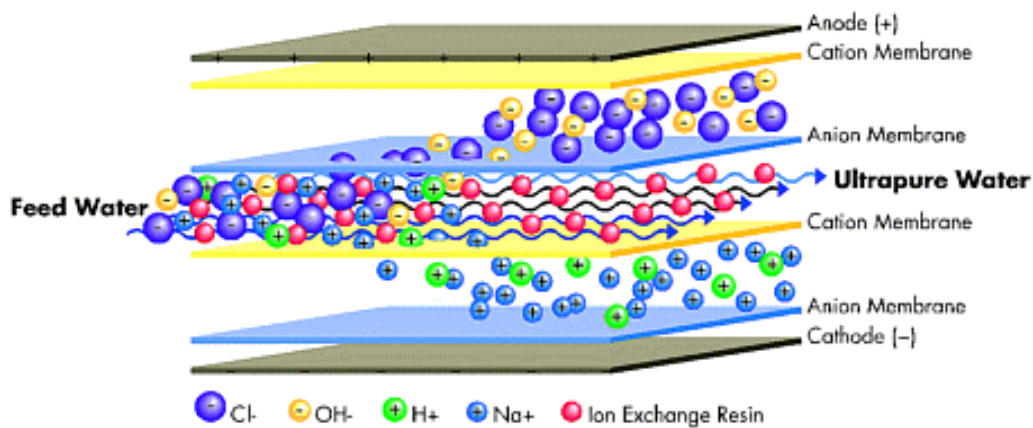
## **2.2. Intercambio iónico**

Esta operación, 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.



El intercambio de iones es un proceso en el cual las partículas sólidas que contienen cationes o aniones intercambiables se ponen en contacto con una solución electrolítica para cambiar la composición de la solución. Las mayores aplicaciones se ven en el ablandamiento del agua por intercambio de iones de calcio por iones de sodio y desmineralización de agua por eliminación de cationes y aniones.

Figura 1. **Proceso de intercambio iónico entre resina y minerales de dureza**



Fuente: AVILLA, Joseph A. Lo esencial acerca del Intercambio Iónico. Publicado el 02 de enero de 1999. p. 12-18.

La capacidad de intercambio de iones existe en algunos materiales naturales, tales como arcillas y zeolitas, pero la mayoría de los procesos utilizan resinas sintéticas de intercambio iónico. Dichas resinas se preparan a partir de polímeros orgánicos, tales como poliestireno unido de forma transversal en el cual se han añadido grupos ionizables.

Las resinas de intercambio iónico son particularmente adecuadas para la eliminación de estas impurezas por varias razones: las resinas poseen una alta capacidad para los iones que se encuentran en bajas concentraciones, las resinas son estables y se regeneran fácilmente, los efectos de la temperatura son en su mayoría insignificantes, y el proceso es excelente tanto para grandes como pequeñas instalaciones.

Los intercambiadores de cationes incluyen resinas de ácidos fuertes con grupos de ácidos sulfónicos ( $-\text{SO}_3^-$ ), resinas de ácidos débiles con grupos de ácido carboxílico ( $-\text{COO}^-$ ), y otros tipos con ácidos de fuerza intermedia. Los intercambiadores de aniones pueden tener bases fuertes de grupos de amonio cuaternario [ $-\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$ ] o bases débiles de grupos amino ( $-\text{N}^+\text{H}_3$ ).

La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB). El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio, se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo, está presente un agente flotador para mantener todo disperso. El reactor químico tiene un agitador que comienza a mezclar la solución de agua/sustancia química orgánica. El estireno/ DVB comienza a formar grandes glóbulos de material, y al aumentarse la velocidad de agitación, los glóbulos se dividen en gotitas más pequeñas hasta alcanzar un tamaño de más o menos un milímetro. En ese momento inicia la reacción de polimerización a través de la adición de peróxido de benzoilo, el cual hace que las moléculas de estireno/DVB formen las esferas pequeñas de plástico que resultan.

El divinilbenzeno es un agente entrecruzante que le proporciona a las esferas su fortaleza física, y sin el cual el estireno sería soluble en el agua. La esfera de poliestireno-DVB necesita ser químicamente activada para funcionar como material de intercambio iónico. Los grupos activados son ligados para proporcionarle funcionalidad química a la esfera, cada uno posee una carga eléctrica fija, balanceada por un número equivalente de iones de carga opuesta, con libertad de intercambiarse con otros iones de la misma carga.

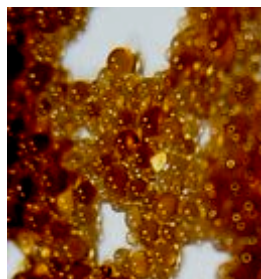
Las resinas catiónicas fuertes se forman tratando a las esferas con ácido sulfúrico concentrado (un proceso conocido como sulfonación) para formar grupos sulfónicoácidos permanentes de carga negativa, a través de las esferas. Aquí es importante el hecho de que los sitios de intercambio formados de tal manera, se encuentran ubicados a través de la esfera.

El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie; más del 99 por ciento de la capacidad de un material de intercambio iónico se encuentra en el interior de la esfera.

### **2.2.1. Estructura física y química de la resina**

Los requisitos básicos de los materiales de las esferas de intercambio iónico son la insolubilidad, el tamaño de la esfera, y su resistencia a las fracturas.

Figura 2. **Resina catiónica**



Fuente: LUWARD, Axel. Propiedades Físicas de la resina catiónica. Publicado el 15 de diciembre de 2008.

La resina deberá ser insoluble bajo condiciones normales de funcionamiento. Las esferas deberán tener dimensiones uniformes con un tamaño normal que varía entre 16 y 50 US Mesh (tamaño estadounidense de malla). El hinchamiento y contracción de la esfera de resina durante el agotamiento y la regeneración no deberán causar que revienten las esferas. Asimismo, una propiedad importante de las resinas de intercambio iónico es que el sitio activo se encuentra permanentemente ligado a la esfera.

Las resinas de intercambio iónico pueden ser fabricadas en una de dos estructuras físicas, gelatinosa o macroporosa. Las resinas gelatinosas son polímeros homogéneos entrecruzados y son las resinas más comúnmente disponibles. Éstas tienen sitios de intercambio distribuidos de manera pareja a través de la esfera. La cantidad de entrecruzamiento de DVB que se utiliza en la síntesis de una esfera determina su fortaleza relativa. La resina catiónica de ácido fuerte que se usa para la suavización, la cual es el medio más común de intercambio iónico, consiste casi siempre de un material gelatinoso de 8 por ciento DVB.

Actualmente se encuentran disponibles resinas con un contenido de DVB entre 2 y 20 por ciento y aún más. Un mayor contenido de DVB le da aún más fortaleza a la resina. Las resinas macroporosas son fabricadas a través de un proceso que deja una red de vías a través de la esfera. Esta estructura con apariencia esponjosa, permite que la porción activa de la esfera contenga un nivel elevado de entrecruzamiento de DVB sin afectar la cinética del intercambio. Desafortunadamente, también significa que la resina tiene una menor capacidad, porque las esferas contienen menos sitios de intercambio.

Los poros pueden ocupar entre 10 y 30 por ciento del polímero. Esto reduce proporcionalmente la capacidad de intercambio iónico.

### **2.2.2. Selectividad de resinas**

La selectividad o afinidad de resinas de intercambio iónico es influida por las propiedades de la esfera, los iones intercambiados, y la solución en la cual están presentes los iones. El agua es un componente esencial en las resinas de intercambio iónico. Por ejemplo, las resinas catiónicas de ácido fuerte contienen más o menos 50 por ciento de humedad. La cantidad de entrecruzamiento de la esfera tiene un impacto sobre el contenido de humedad de la esfera, y por su parte, el contenido de humedad tiene un impacto sobre la selectividad.

Una esfera con un alto contenido de humedad tiene alta porosidad y los grupos activos se encuentran más separados uno del otro. Las resinas de intercambio iónico por lo general tienen una mayor selectividad hacia los iones de mayor valencia o carga.

Entre los iones con una misma carga se encuentran mayores afinidades hacia los iones con un número atómico más alto. Estas relaciones de afinidad son revertidas en soluciones concentradas. Esto es lo que hace posible la regeneración de las resinas agotadas. Una resina catiónica agotada que se utiliza para suavizar por lo general se encuentra en forma de calcio o magnesio, de los cuales ambos son iones bivalentes. La resina es restaurada a su condición regenerada, la forma del sodio, introduciendo una solución saturada de cloruro de sodio. Esta solución de cloruro de sodio, se encuentra lo suficientemente concentrada como para revertir la selectividad. La fuerza impulsadora del ión monovalente de sodio luego convierte la resina a la forma de sodio.

### **2.2.3. Cinética**

La tasa de intercambio o cinética, de las reacciones de intercambio iónico es gobernada por varios factores. La solución que está siendo tratada tiene un efecto; las concentraciones más altas de solución pueden acelerar la velocidad de la reacción. La cantidad de entrecruzamiento de DVB en la esfera determina la porosidad de la esfera y, además, la movilidad iónica dentro de la esfera.

El tamaño de los iones que están siendo intercambiados también influye en la velocidad cinética y depende un tanto del tamaño de los poros en la estructura de la resina. El tamaño de la esfera también tiene un efecto; las esferas más pequeñas presentan una vía de difusión más corta hacia los sitios activos en la parte interior de las esferas. La resina tiene una mayor afinidad hacia los iones de mayor valencia, por lo que la predominancia de iones de alta valencia puede causar una mayor tasa de reacción.

Otros elementos que influyen son la temperatura, forma y fortaleza de los sitios de intercambio. Mayor temperatura puede acelerar las reacciones químicas. La reacción de intercambio es un proceso de difusión, por lo que la tasa de difusión tiene algún efecto.

### **2.3. Frecuencia de regeneración en el suavizador**

Muy a menudo surge la pregunta: ¿Qué tan frecuentemente el sistema deberá de regenerarse?, ¿Un suavizador se debe de regenerar diario o cada varios días?. El tener una regeneración diario es lo óptimo, si se quiere regenerar cada dos días, obligaría a tener el doble de tamaño de equipo, por lo tanto una mayor inversión inicial, la única desventaja de regenerar diario es un consumo un poco mayor en agua empleada para la regeneración. Generalmente el poco ahorro de agua de regenerar cada dos días no justifica la inversión mayor. La mayoría de los diseñadores y vendedores de equipos de suavización consideran para la selección una regeneración por día.

#### **2.3.1. Tecnología en diseño y operación**

Para aplicar la tecnología existente y lograr un óptimo diseño en la selección del suavizador, es recomendable emplear sistemas de dos tanques, con operación en base a demanda de agua, los equipos trabajan en alternado, obteniendo como primer beneficio agua suavizada las 24 horas del día.

Otro beneficio importante es que para hacer nuestra selección, se puede emplear el criterio de una regeneración al día, pero dividiendo la cantidad de resina en los dos tanques, esto hace el equipo el 50 por ciento más pequeño, por que se empleará el 50 por ciento de la resina en cada tanque.

El regenerante a usar es el NaCl (cloruro de sodio, sal), puro y libre de yodo, ya que éste queda atrapado en la resina (en vez del Ca-Mg-Na) y reduce su capacidad al igual que le agua que contiene cloro.

La tecnología más avanzada comercial, es el control por demanda, es decir con base a la capacidad real del suavizador y las necesidades que se calcularon de granos por día y considerando que el suavizador se regenera una vez por día, se tiene una operación adecuada, por lo tanto un flujo de agua que el suavizador podrá producir entre regeneraciones. En muchos casos, las necesidades de operación de la empresa son menores en los diferentes días de la semana, el operar en base a un volumen determinado, da el beneficio de que la regeneración se realizará cuando el equipo esté realmente agotado y no diario, esto en muchos casos tiene un ahorro muy importante de sal y agua.

## **2.4. Salmuera para regeneración**

Para el buen funcionamiento de los suavizadores, es necesaria la regeneración a partir de una solución saturada de cloruro de sodio, teniendo en cuenta que existen algunos factores que afectan la eficiencia de la salmuera y por lo tanto de la regeneración de los suavizadores.

### **2.4.1. Factores que afectan la eficiencia de salmuera en los suavizadores**

La eficiencia de la salmuera para suavizadores se define como el número de granos de dureza removida por libra de sal usada para regenerar. Claro está, asume un punto de fuga que generalmente es de un grano.



La eficiencia teórica máxima significa que cada ión de sodio o de potasio en la salmuera regenerante, busca su camino hacia los sitios de intercambio de la matriz de la resina y el desperdicio de regenerantes, es pura dureza sin sodio ni potasio. Para calcular la eficiencia, simplemente se multiplican los granos por galón en la alimentación por el total de galones procesados entre cada corrida y se divide entre el número de libras de sal por pie cúbico usada para regenerar.

La siguiente tabla enumera una serie de factores que afectan la eficiencia de la salmuera:

- Ajustes de sal: capacidad (gal).
- Análisis de agua: dureza total (ppm) y sólidos totales disueltos (ppm).
- Selección del inyector: concentración de la salmuera (%masa) y flujo (gpm).
- Configuración de tanque: altura de cama (ft), espacio de tanque libre (ft), cama de grava (ft<sup>3</sup>).
- Selección de resina: tamaño (granos/galón) y función (propiedades fisicoquímicas).
- Flujo de servicio: gpm de agua suave.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Entre las variables clasificadas como dependientes se encuentran: flujo de agua, cantidad de resina en cada suavizador, número de regeneraciones, cantidad de salmuera a realizar, demanda de agua de la empresa, duración de los suavizadores y capacidad de los suavizadores. Y entre las variables independientes: dimensiones de los suavizadores, propiedades físicas de la resina.

Tabla I. **Variables dependientes e independientes**

<b>Variables dependientes</b>	<b>Variables independientes</b>
Flujo de agua	Dimensión de suavizadores
Cantidad de resina	Propiedades físicas de resina
Número de regeneraciones	
Cantidad de salmuera	<b>Variables de control</b>
Demanda de agua	Dureza del agua
Capacidad de los suavizadores	Tiempo de duración

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

Este proyecto se centra en el estudio de los parámetros que afectan el funcionamiento de los suavizadores en la empresa Embotelladora La Mariposa, S.A. Se basa en determinar los factores que disminuyen la eficiencia de intercambio iónico en el arreglo actual de la empresa y en corregir dichos problemas.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Los recursos humanos disponibles para la realización de este proyecto se clasifican en 2 grupos; proporcionados por la empresa, entre los que se mencionan a la Inga. Karina Méndez, encargada del área de tratamiento de agua y a los 4 especialistas de Tratamiento de Agua. Así como también el grupo de los recursos humanos de la Escuela de Ingeniería Química: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias, asesor de proyecto de EPS, Ing. Víctor Monzón, revisor de proyecto de EPS y la Inga. Lorena Pineda, asesora del área de EPS.

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Para la elaboración de este proyecto, fue necesario el uso de materia prima, cristalería, equipos de medición y reactivos, los cuales se detallan a continuación.

#### **3.4.1. Materia prima**

Para el cálculo de la solución saturada de cloruro de sodio para la regeneración y para la determinación de la cantidad de resina catiónica en el suavizador, se utilizó la siguiente materia prima:

- Agua cruda
- Agua suave
- Resina catiónica
- Sal (NaCl)

#### **3.4.2. Cristalería**

Para la obtención del factor de saturación de salmuera, se realizó una solución de cloruro de sodio hasta su punto de saturación, para lo cual se requirió la siguiente cristalería:

- Vaso de precipitados (*Beacker*)
- Probetas graduadas
- Varillas de agitación

### **3.4.3. Equipos**

A continuación se mencionan los equipos de medición necesarios para el control de la eficiencia del proceso de agua suave y para la preparación de las soluciones requeridas para la obtención de los resultados propuestos.

- Medidor de pH de laboratorio pH 213
- Suavizadores
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- Fichas técnicas de los proveedores del equipo

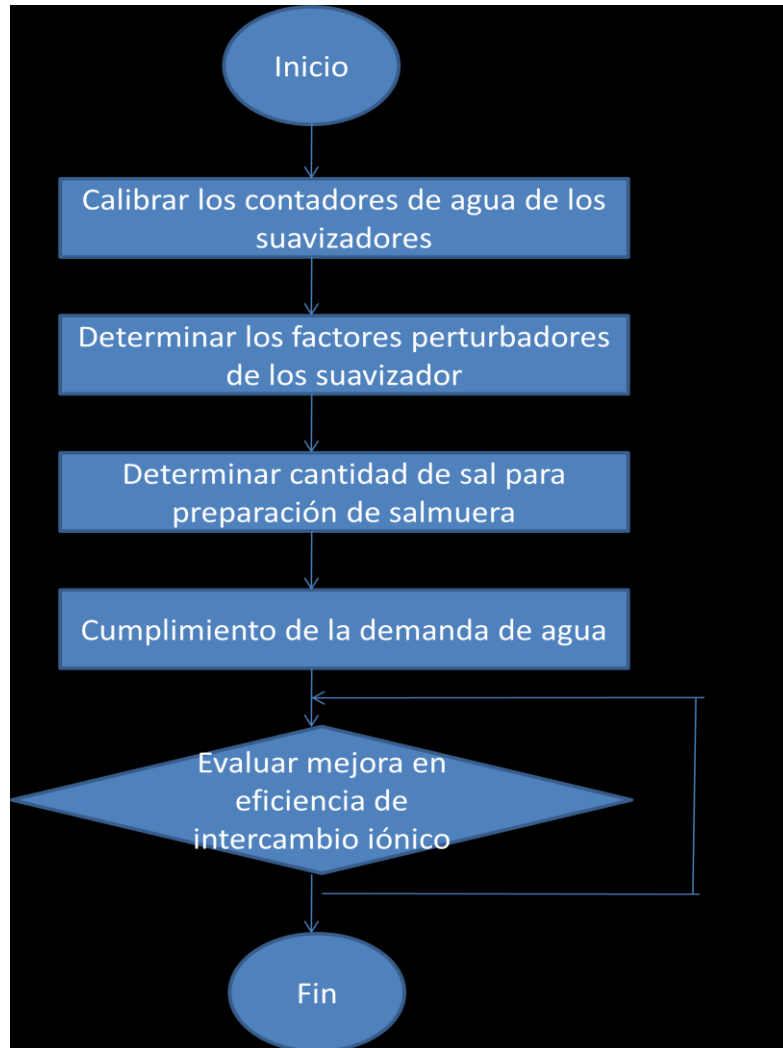
### **3.4.4. Reactivos**

Para el control estadístico de la dureza a la entrada y salida de los suavizadores, se utilizó el reactivo EDTA, HI 3840-0 reactivo dureza LR. (“Aquamerck 1.11106.0001 09/06”).

## **3.5. Flujograma del proyecto**

En la representación gráfica, se detalla la secuencia de actividades que se llevaron a cabo en el proceso de optimización del número de regeneraciones de los suavizadores.

Figura 3. **Flujograma**

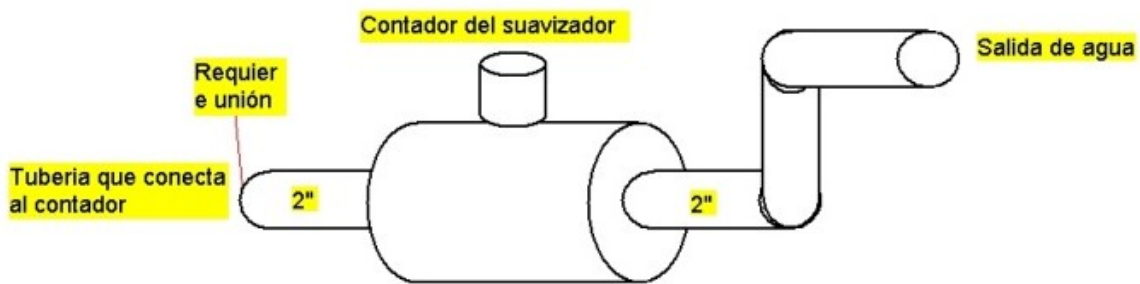


Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1. Calibración de contadores

Debido a que los contadores de agua suave proporcionaban datos inconsistentes, se procedió a la calibración de dichos contadores por medio del siguiente procedimiento: debido a que únicamente uno de los suavizadores cuenta con contador se procedió primero a calibrarlo, se extrajo el sensor, y se hicieron las conexiones necesarias con el contador para calibrar con el que cuenta el laboratorio de control de calidad, como se observa en la figura 3, y se hicieron pasar 2 000 galones de 100 en 100 y se tomó la lectura de ambos contadores para luego introducirlos en una hoja de Excel y trazar la curva y por medio de la línea de tendencia obtener la ecuación de regresión lineal, es decir, la ecuación de calibración.

Figura 4. **Conexión para calibración del contador del suavizador 8**



Fuente: elaboración propia.

Luego de haber calibrado el contador del suavizador No. 8, por medio de este se calibraron los contadores de entrada y salida de los suavizadores, se conectó únicamente el suavizador No. 8 y se tomaron las lecturas, aplicando el factor de calibración, y el contador de entrada y salida.

Realizando el procedimiento anterior de introducir los datos en una hoja de cálculo de Excel se obtuvieron las ecuaciones de calibración para estos otros contadores.

### **3.5.2. Determinación de los factores perturbadores**

Se observó que había pérdida de resina en algunos suavizadores y que las tuberías se encontraban muy presurizadas, por lo que se analizaron las bombas con las cuales se ponen en funcionamiento los suavizadores (1 bomba de 40 caballos de potencia y una de 15 caballos de potencia) y se realizaron pruebas de: cada suavizador con cada una de las 2 bombas y luego de dos suavizadores en dos con cada bomba y así sucesivamente hasta determinar en qué arreglo se evitaba la presurización de la tubería y de esta forma también evitar la pérdida de resina, debido a que esta es ocasionada cuando el sistema trabaja con demasiada presión.

### **3.5.3. Preparación de salmuera**

Debido a que la resina no se estaba regenerando por completo, por lo que se procedió a destapar cada uno de los suavizadores y medir cuántos galones de salmuera se requerían para cubrir en su totalidad la resina contenida en los suavizadores, y a partir de pruebas en el laboratorio de calidad de la empresa Embotelladora La Mariposa S.A, se determinó la solubilidad real de la sal (NaCl) utilizada para la elaboración de la salmuera y se determinó la cantidad de sal que se debe agregar para preparar una solución saturada de salmuera.



Además se observó que la salmuera se estaba preparando con agua concentrada, la cual al realizársele pruebas se comprobó que tenía una cantidad muy elevada de dureza, lo cual no permitía que la resina se regeneraba, ya que al estar en contacto con la resina, la regeneraba y la saturaba nuevamente. Por ello se procedió a cambiar el agua concentrada por la misma agua suave producida por los suavizadores, sin aumentar ningún costo, ya que la bomba utilizada para enviar la salmuera al cambiarle el giro y por la misma presión que produce la bomba de los suavizadores el agua suave se podía enviar hacia los suavizadores.

#### **3.5.4. Cumplimiento de la demanda de agua**

Uno de los principales problemas era la falta de cumplimiento de la demanda de agua, por lo que el objetivo era lograr un arreglo por medio del cual se lograra cumplir con esta demanda. Pero no fue necesario debido a que se detectó otro problema en el sistema, el agua suave luego de salir de los suavizadores, es enviada a la cisterna No. 4, en el cual se le adiciona cloro y luego es enviado al sistema de ósmosis inversa, pero debido al cloro del agua suave se producía la incrustación de las membranas, es decir; disminuía la vida útil de las membranas y aumentaba el costo de mantenimiento del sistema, por lo que luego de consultarlo con la Inga. Karina Méndez, encargada del área se llegó a la conclusión de no dejar pasar agua suave al sistema de ósmosis.

### **3.5.5. Evaluación de la eficiencia de intercambio iónico**

Al tener todos los factores mencionados con anterioridad se procedió a determinar la eficiencia de intercambio iónico para cada uno de los suavizadores, a partir de la comparación entre los galones suavizadores teóricamente y los galones suavizadores realmente para cada suavizador, antes y después de realizar las modificaciones al procedimiento de agua suave. Dando como resultado un aumento de 25 por ciento aproximadamente en promedio para los ocho suavizadores.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Para mantener un control estadístico de todos los procesos y evaluaciones llevadas a cabo durante la elaboración del proyecto, se generaron las siguientes tablas.

#### **3.6.1. Datos originales**

Se presentan los formatos de registro diario, implementados para el seguimiento y control de los resultados en el proceso de agua suave, así como los datos obtenidos para el posterior cálculo de los resultados del proyecto elaborado.





Tabla II. **Capacidad de intercambio iónico de la resina catiónica**

<b>Lb sal/ft<sup>3</sup> resina</b>	<b>Capacidad en granos/ft<sup>3</sup> de resina</b>
4,5	17 072
6	19 208
8,5	22 448
9	23 048
10	24 200
11	25 288
12	26 312
15	29 000
16	29 768

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Características de suavizadores**

<b>Suavizador</b>	<b>Resina en suavizadores (ft<sup>3</sup>)</b>	<b>ft<sup>3</sup> a cubrir con salmuera</b>	<b>Dureza compensada granos/gal</b>	<b>GPM</b>
1	40	40	6,11	190
2	26	38	6,11	180
3	36	67	6,11	185
4	48	63	6,11	220
5	48	63	6,11	220
6	50	50	6,11	220
7	50	50	6,11	220
8	50	50	6,11	220

Continuación de la tabla III.

<b>Suavizador</b>	<b>Altura (in)</b>	<b>Altura (ft)</b>	<b>Altura de grava (in)</b>	<b>Altura de grava (ft)</b>	<b>Diámetro (in)</b>	<b>Diámetro (ft)</b>	<b>Radio (ft)</b>
1	72	6,00	0	0	48	4,00	2,00
2	108	9,00	21,00	1,75	36	3,00	1,50
3	98	8,17	36,00	3,00	44	3,67	1,83
4	98	8,17	15,00	1,25	48	4,00	2,00
5	96	8,00	14,00	1,17	48	4,00	2,00
6	63	5,25	0	0	67	5,58	2,79
7	63	5,25	0	0	67	5,58	2,79
8	63	5,25	0	0	67	5,58	2,79

Fuente: elaboración propia.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Los resultados del presente proyecto, se encuentran tabulados y ordenados por medio de tablas y ecuaciones que especifican cada uno de los pasos llevados a cabo para el desarrollo del proyecto.

#### **3.7.1. Muestra de Cálculo**

A continuación se describe a detalle cada una de las ecuaciones necesarias para el cálculo del arreglo ideal necesario, para la optimización del número de regeneraciones.

### 3.7.1.1. Granos de dureza a suavizar

Para la determinación de las partes por millón (ppm) de dureza que entraran al suavizador para el intercambio iónico con la resina, se utilizó la siguiente ecuación:

#### 3.7.1.1.1. Factor de conversión a ppm

Para la determinación de las partes por millón (ppm) de dureza que entraran al suavizador para el intercambio iónico con la resina, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{1 \text{ granos}}{\text{gal}} * \frac{1 \text{ g}}{15,4324 \text{ granos}} * \frac{1\ 000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1 \text{ gal}}{3,785 \text{ l}} = \frac{17,1 \text{ mg}}{\text{l}} = 17,1 \text{ ppm}$$

Ecuación No. 1

#### 3.7.1.1.2. Granos de dureza

Se convirtieron las partes por millón de dureza a granos por galón de dureza, para determinar la cantidad de sal que se utiliza para la regeneración de la resina, según la capacidad de la resina:

$$\frac{\text{Granos}}{\text{galón}} = \text{Dureza (ppm)} * \text{Factor}_{\text{conversión}} * \text{factor}_{\text{compensación}}$$

Ecuación No. 2

Donde:

Dureza= partes por millón de dureza que contiene el agua

Factor<sub>compensación</sub> = dato proporcionado por proveedor (1.1)

Ejemplo: sabiendo que la dureza del agua siempre es de 95 partes por millón, los granos por galón que se requieren suavizar son:

$$\frac{\text{Granos}}{\text{galón}} = 95 \text{ ppm} * \frac{1 \text{ grano/galón}}{17,1 \text{ ppm}} * 1,1 = 6,11 \text{ granos/galón}$$

### 3.7.1.2. Preparación de salmuera

Se preparó una solución de salmuera hasta su punto de saturación real, a nivel de laboratorio, para luego poder determinar el factor de saturación de salmuera.

#### 3.7.1.2.1. Factor de saturación de salmuera

A partir de la solubilidad experimental calculada en el laboratorio, se determinó un factor de solubilidad para relacionar las libras de sal requeridas por cada galón de agua:

$$\begin{aligned} \text{Factor}_{\text{saturación}} &= \frac{36,03 \text{ gNaCl}}{100 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ kgNaCl}}{1\,000 \text{ gNaCl}} * \frac{2,2 \text{ LbNaCl}}{1 \text{ kgNaCl}} * \frac{1\,000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} * \frac{3,785 \text{ l}}{1 \text{ gal}} \\ &= \boxed{3 \text{ lb NaCl/gal}} \end{aligned}$$

Ecuación No. 3



### 3.7.1.2.2. Solución saturada de salmuera

Para determinar la cantidad de sal a adicionar para preparar una solución saturada, sabiendo la solubilidad de la sal a utilizar se utilizó la siguiente ecuación:

$$lb\ Sal = Gal_{salmuera} \times Factor_{Saturación}$$

Ecuación No. 4

Donde:

Gal<sub>Salmuera</sub> = galones de salmuera necesarios para cubrir la resina

Factor<sub>Saturación</sub> = equivalente a 3 libras de sal por cada galón de agua

Ejemplo: sabiendo que el suavizador 1 necesita 150 galones de salmuera para cubrir los 40 pies cúbicos de resina, se sabe que:

$$lb\ Sal = 150\ gal \times 3\ lbNaCl / 1\ gal = 450\ lbNaCl$$

Y de la misma forma se determinó la cantidad de NaCl, sal, necesaria para la preparación de salmuera para regeneración, presentado en las tablas de datos calculados.

### 3.7.1.3. Tiempo de funcionamiento

Para tener una referencia acerca de la eficiencia del proceso de los suavizadores, se debe comparar el tiempo de funcionamiento de los suavizadores real contra el teórico, por medio de las siguientes ecuaciones.

#### 3.7.1.3.1. Tiempo teórico de funcionamiento

Por medio de la siguiente ecuación que relaciona las libras de sal a utilizar para la regeneración, se determinó el tiempo que el suavizador debía funcionar, para luego, a partir de este tiempo determinar la eficiencia de los suavizadores:

$$t_{teórico}(horas) = \frac{\left( \frac{Capacidad \text{ granos}}{ft^3} \right) * ft^3_{resina}}{\left( \frac{Dureza \text{ granos}}{galón} \right) * GPM_{suavizador}} * \frac{1}{60}$$

Ecuación No. 5

Donde:

$T_{teórico}$  = tiempo de duración teórico del suavizador según cantidad de resina

Dureza = granos de dureza existentes en un galón

Capacidad = cantidad de granos capaz de suavizador cada pie cúbico de resina

$Ft^3$  de resina = capacidad o cantidad de resina que contiene cada suavizador

$GPM_{suavizador}$  = galones por minuto de cada suavizador, flujo volumétrico

60 = factor de conversión para convertir minutos a horas

Ejemplo: el tiempo teórico de funcionamiento del suavizador 1 a partir de la cantidad de resina y las libras de sal utilizadas para la preparación de la salmuera es:

$$t_{teórico} = \frac{\left(25\,288 \frac{\text{granos}}{\text{ft}^3}\right) * 40\text{ft}^3}{\left(6,11 \frac{\text{granos}}{\text{galón}}\right) * 190\text{gpm}} * \frac{1}{60} = 14,52 \text{ horas}$$

Y de la misma forma se determinó el tiempo teórico para cada uno de los suavizadores, según la cantidad de sal para regeneración, presentado en las tablas de datos calculados.

### 3.7.1.3.2. Tiempo real de funcionamiento

Para la determinación del tiempo real de funcionamiento de cada suavizador, según los datos registrados por los operarios de tratamiento de agua, se utilizó la siguiente ecuación:

$$t_{real}(\text{horas}) = \frac{\text{galones suavizados}}{GPM_{suavizador} * 60}$$

Ecuación No. 6

Donde:

$t_{real}$  = tiempo real de funcionamiento del suavizador

Ejemplo: el tiempo real de funcionamiento, en base a los galones suavizados son:

$$t_{real} = \frac{49\,656,44\ gal}{190\ gpm * 60} = 4,36\ horas$$

Y de igual forma se determinó el tiempo real de funcionamiento para cada suavizador, presentado en las tablas de datos calculados.

#### **3.7.1.4. Eficiencia de intercambio**

La eficiencia de intercambio, es decir, la eficiencia del proceso de agua suave, llevado a cabo por los suavizadores, el cual se determina a partir de los tiempos de operación.

##### **3.7.1.4.1. Eficiencia de cada suavizador**

Para el cálculo de la eficiencia de intercambio iónico de cada suavizador, según los GPM suavizados, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Eficiencia\ (\%) = \left( \frac{GPM_{real}}{GPM_{teórico}} \right) * 100$$

Ecuación No. 7

Donde:

GPM<sub>real</sub> = galones por minuto real de funcionamiento del suavizador

GPM<sub>teórico</sub> = galones por minuto teóricos de funcionamiento del suavizador

Ejemplo: la eficiencia de intercambio iónico del suavizador 1, según los GPM suavizados es:

$$Eficiencia (\%) = \left( \frac{95 \text{ GPM}}{120 \text{ GPM}} \right) * 100 = 50\%$$

Y de la misma forma se calcularon las demás eficiencias para cada suavizador, presentado en las tablas de datos calculados.

#### **3.7.1.4.2. Aumento de eficiencia promedio**

Para determinar el aumento de eficiencia promedio, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \%aumento \text{ de eficiencia}_{promedio} \\ & = \frac{\sum (\%Eficiencia_{actual \text{ c/suavizador}} - \%Eficiencia_{antes \text{ de c/suavizador}})}{Total \text{ de suavizadores}} \end{aligned}$$

Ecuación No. 8

Ejemplo: el porcentaje de aumento de eficiencia promedio para los 8 suavizadores es de:

$$\begin{aligned} \%aumento \text{ de eficiencia}_{promedio} &= ((72,25 - 31,50) + (83,50 - 58,00) + \\ & (65,75 - 36,20) + (74,25 - 45,00) + \\ & (73,00 - 56,25) + (64,25 - 38) + \\ & (66,00 - 51,00) + (80,25 - 59,75))/8 \\ &= 25,41\% \end{aligned}$$

Y de la misma forma se calculó el promedio de aumento de eficiencia, presentado en las tablas de datos calculados.

### 3.7.1.5. Costo de agua suave

Para el cálculo del costo de agua suave, debido a que los costos de la empresa son privados, se determinó con la empresa que los costos redujeron inversamente proporcional al aumento de la eficiencia, por lo que la ecuación utilizada es:

*Costo actual de agua suave*

$$= (\text{Costo de agua suave}) * (1 - \% \text{aumento de eficiencia}_{\text{promedio}})$$

Ecuación No. 9

Ejemplo: sabiendo que el porcentaje promedio de aumento de eficiencia es del 25 por ciento, el costo actual de agua suave es de:

$$\text{Costo actual de agua suave} = (Q 5,70) * (1 - 25,41\%) = Q 4,25$$

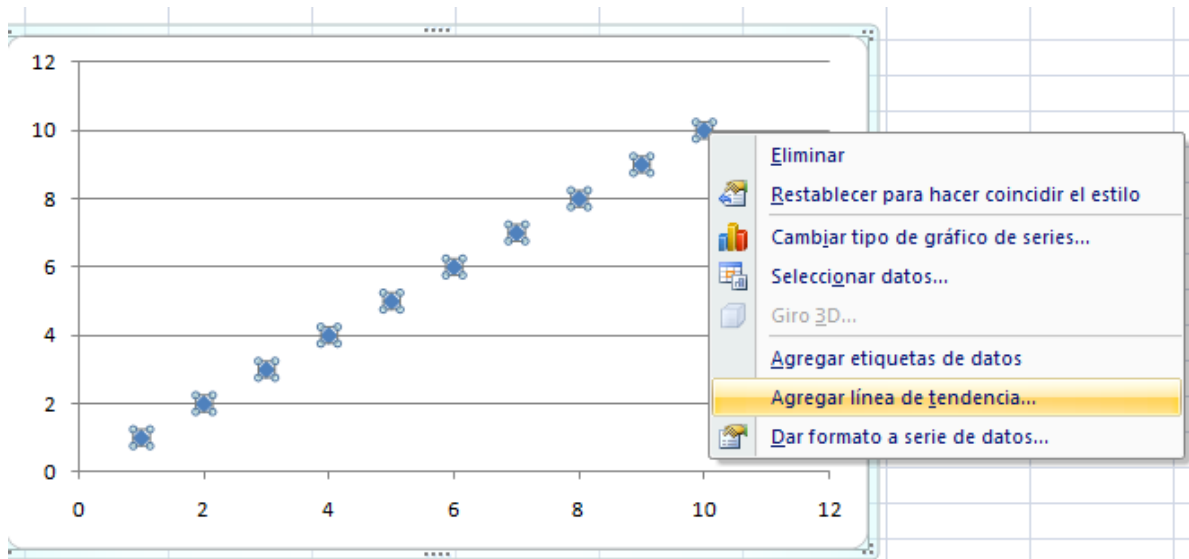
Y de la misma forma se realizaron los demás cálculos de costo, presentado en las tablas de datos calculados.

### 3.7.1.6. Regresión lineal

Para realizar la regresión lineal utilizando el método de mínimos cuadrados, se utilizó una hoja de cálculo de *Microsoft Excel* por medio de los siguientes pasos:

- Luego de plotear los datos en la hoja de Excel, se seleccionan los puntos, pulsando el botón derecho del ratón en Agregar línea de tendencia, como se muestra en la figura 6.

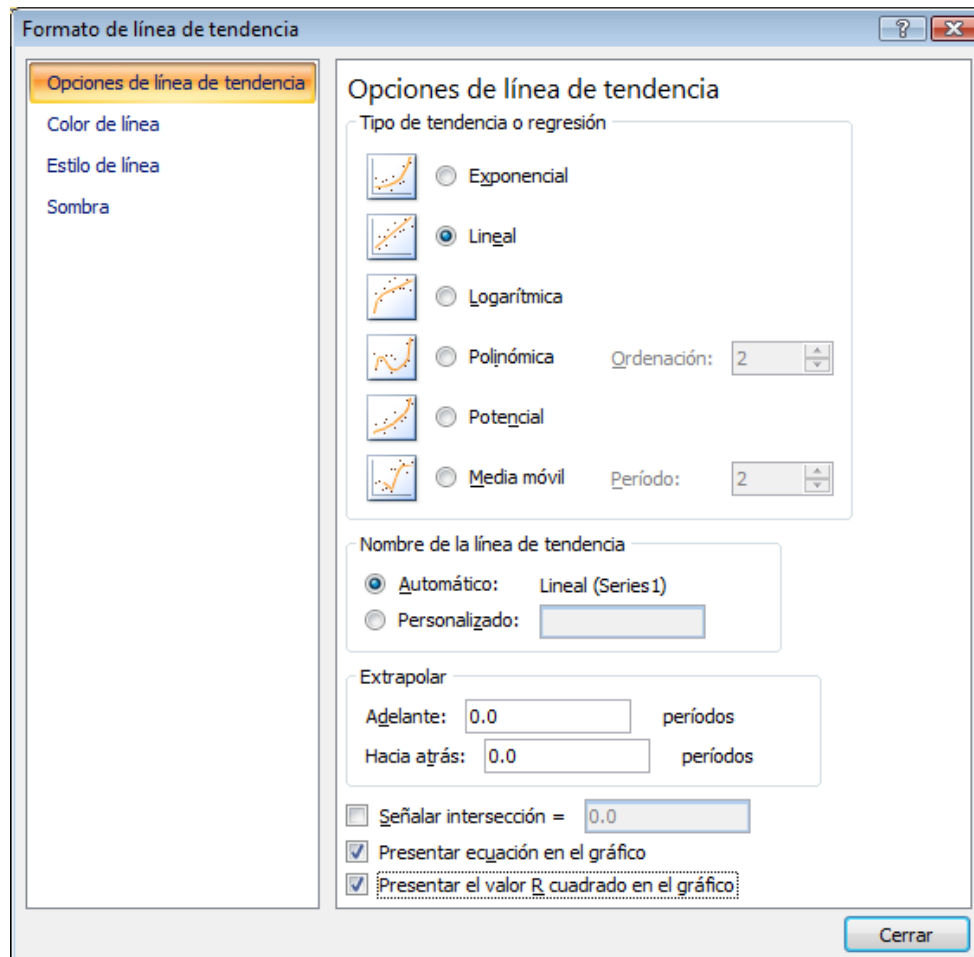
Figura 7. **Agregar línea de tendencia**



Fuente: Microsoft Excel.

- Seleccionar la pestaña de Opciones de línea de tendencia como se muestra en la figura 7 y seleccionar lineal y presentar ecuación en el gráfico y presentar el valor R cuadrado en el gráfico.

Figura 8. Tipo de tendencia y regresión

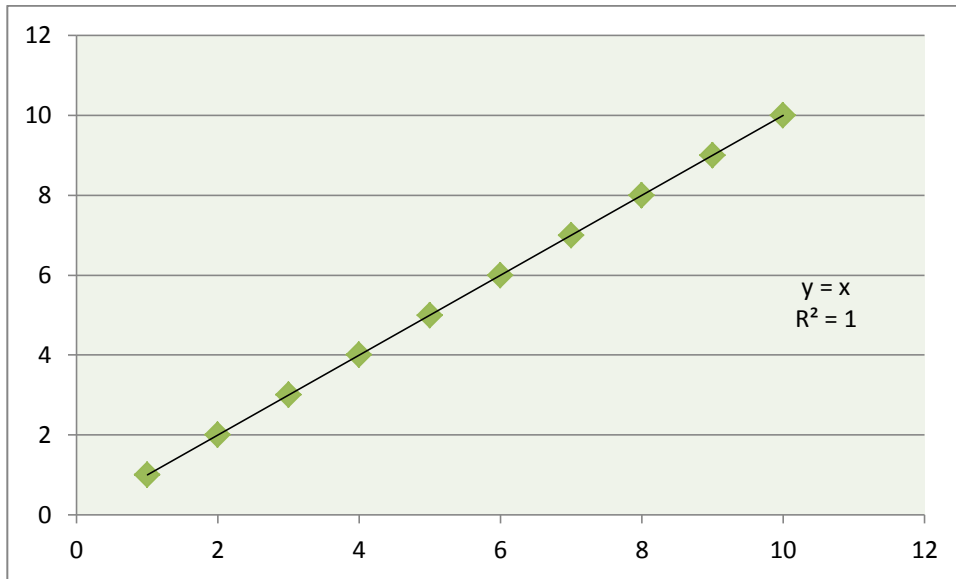


Fuente: Microsoft Excel.

- Como se observa en la figura 6 se traza la línea de tendencia lineal y la ecuación de regresión lineal.



Figura 9. **Regresión lineal y modelo matemático**



Fuente: Microsoft Excel.

Y de la misma forma se realizaron las demás gráficas y obtención de la ecuación de regresión lineal presentado en las tablas de datos calculados.

### **3.7.1.7. Coeficiente de dispersión o variabilidad**

Debido a la gran cantidad de datos que se obtuvieron en la realización del proyecto, es necesario utilizar únicamente los datos representativos, por lo que se hizo uso del coeficiente de dispersión o variabilidad.

#### **3.7.1.7.1. Desviación estándar**

Para la determinación de la desviación estándar se utilizó una hoja de cálculo de *Excel*, a partir del siguiente procedimiento:

- En la celda donde se calculara la desviación estándar escribir:
  - =DESVEST(
- Con el *mouse* seleccionar toda la columna a analizar y luego cerrar el paréntesis, de esta forma:
  - =DESVEST(F3;F8)
- Y luego dar ENTER y ya se obtiene la desviación estándar.

### 3.7.1.7.2. Coeficiente de dispersión o variabilidad

Para la determinación del coeficiente de dispersión o variabilidad para obtener el grado de representatividad de algunos flujos de suavizadores, se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{s}{x} * 100$$

Ecuación No. 10

Donde:

V=coeficiente de dispersión o variabilidad

s= desviación estándar

x=dato a analizar

Ejemplo: sabiendo que la desviación estándar del suavizador 1 es de 11,35 para los galones por minuto, de 57 muestras, se tiene un coeficiente de dispersión o variabilidad de:

$$V = \frac{11.35}{57} * 100 = 20\%$$

Y de la misma forma se determinaron los demás coeficientes de dispersión presentados en las tablas de datos calculados.

### 3.7.1.7.3. Tabla de representatividad del coeficiente de variabilidad

La tabla utilizada para determinar cuáles son los datos a tomar en cuenta para calcular los resultados, a partir del cálculo del coeficiente de variabilidad o dispersión es:

Tabla IV. **Representatividad del coeficiente de variabilidad o dispersión**

<b>Valor del coeficiente de variabilidad</b>	<b>Grado en que los valores representan a la serie</b>
De 0 a menos del 10%	Altamente representativa
De 10 a menos del 20%	Tiene representatividad
De 20 a menos del 30%	Poca representatividad
De 30 a menos del 40%	Representatividad dudosa
De 40% o más	Carece de representatividad

Fuente: RODAS DE LOPEZ, Iris. "Estadística". P. 99-150.

Ejemplo: para el coeficiente de variabilidad calculado anteriormente, y utilizando la tabla anterior se determina que los galones por minuto tienen representatividad, por lo que se toman en cuenta para los cálculos de resultados.

Y de la misma forma se realizaron los demás cálculos de representatividad del coeficiente de variabilidad, presentado en las tablas de datos calculados.

### 3.7.2. Datos calculados

A continuación se detalla, a partir de tablas, cada uno de los datos obtenidos con las ecuaciones mencionadas anteriormente, en el orden necesario para llegar al resultado objetivo del proyecto.

Tabla V. Datos de calibración de contadores de agua suave

<i>Contador del suav. 8(gal)</i>	<i>Contador calibrado (gal)</i>	<i>Contador del suav. 8 calibrado (gal)</i>	<i>Contador de entrada (gal)</i>	<i>Contador de salida (gal)</i>
0	0	9	-3	1
94	100	105	101	94
187	200	200	204	186
282	300	297	309	280
381	400	397	418	378
480	500	498	527	476
576	600	596	633	571
676	700	698	743	670
775	800	799	853	768
874	900	900	962	866
969	1 000	996	1 067	960
1067	1 100	1 096	1 175	1 056
1164	1 200	1 195	1 282	1 152
1270	1 300	1 303	1 399	1 257
1369	1 400	1 404	1 508	1 355
1466	1 500	1 503	1 616	1 451
1563	1 600	1 601	1 723	1 547
1661	1 700	1 701	1 831	1 644
1762	1 800	1 804	1 942	1 744
1856	1 900	1 900	2 046	1 837
1953	2 000	1 999	2 153	1 933

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Ecuaciones de calibración de contadores de agua suave

<b>ENTRADA</b>	$Y= 0,9228 X + 11,8209$
<b>SALIDA</b>	$Y= 1,0302 X + 7,7030$
<b>SUAV. 8</b>	$Y= 1,0186 X + 9,2458$

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Pruebas de control de presión de suavizadores con bomba de 15 hp

Suavizador	Pe (psi)	Ps (psi)	GPM calibrados	GPM teórico	OBSERVACIONES
1	20	0	285,9	190	Existe presurización ya que los GPM exceden un 34,73% el real
	18	0	268,4		
	14	0	213,7		
2	57	0	182,8	180	Existe presurización ya que los GPM exceden un 28,29% el real
	46	0	244,7		
	32	0	265,3		
3	20	0	244,7	185	Existe presurización ya que los GPM exceden un 15,35% el real
	14	0	202,4		
	12	0	193,1		
4	46	0	265,3	220	Existe presurización ya que los GPM exceden un 24,79% el real
	38	0	274,5		
	28	0	283,8		
5	50	0	236,4	220	Existe presurización ya que los GPM exceden un 19,48% el real
	40	0	276,6		
	22	0	275,6		
6	24	0	269,4	220	Existe presurización ya que los GPM exceden un 11,05% el real
	20	0	250,8		
	16	0	212,7		
7	24	0	284,8	220	Existe presurización ya que los GPM exceden un 14,49% el real
	20	0	252,9		
	16	0	217,9		
8	38	12	275,1	220	Existe presurización ya que los GPM exceden un 5,91% el real
	24	10	219,1		
	22	10	204,8		

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Pruebas de control de presión de 2 suavizadores con bomba de 15 hp

Suavizador	Suavizador 8		Suavizadores		Suavizador 8	GPM totales	Suavizadores	GPM teóricos	OBSERVACIONES
	Pe (psi)	Ps (psi)	Pe (psi)	Ps (psi)	GPM calibrados	calibrados	GPM calibrados		
1 y 8	12	2	8	0	124,35	275,56	151,21	190	No existe presurización en el sistema, por lo que se pueden trabajar 2 suavizadores con esta bomba
	12	2	8	0	124,35	275,56	151,21		
	12	2	8	0	124,35	275,56	151,21		
2 y 8	14	2	10	0	148,80	272,47	123,67	180	
	14	2	10	0	148,80	272,47	123,67		
	14	2	10	0	148,80	272,47	123,67		
3 y 8	12	2	12	0	131,48	254,96	123,47	185	
	12	2	12	0	131,48	254,96	123,47		
	12	2	12	0	131,48	254,96	123,47		
4 y 8	12	2	10	0	122,32	250,28	127,97	220	
	12	2	10	0	121,30	223,10	101,81		
	12	2	10	0	118,24	214,26	96,02		
5 y 8	12	2	10	0	131,48	275,56	144,08	220	
	12	2	10	0	131,48	275,56	144,08		
	12	2	10	0	131,48	275,56	144,08		
6 y 8	14	2	10	0	152,87	293,08	140,20	220	
	14	2	10	0	152,87	293,08	140,20		
	14	2	10	0	152,87	293,08	140,20		
7 y 8	15	2	10	0	154,91	282,77	127,86	220	
	15	2	10	0	154,91	282,77	127,86		
	15	2	10	0	154,91	282,77	127,86		

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Pruebas de control de presión de 2 suavizadores con bomba de 40 hp

Suavizador	Suavizador 8		Suavizadores		Suavizador 8	GPM totales	Suavizadores	GPM teóricos	OBSERVACIONES
	Pe (psi)	Ps (psi)	Pe (psi)	Ps (psi)	GPM calibrados	calibrados	GPM calibrados		
1 y 8	12	2	8	0	235,96	441,92	205,96	190	Existe poca presurización, pues los gpm sobrepasan aproximadamente el 8% del teórico
	12	2	8	0	235,72	441,44	205,72		
	12	2	8	0	232,55	435,10	202,55		
2 y 8	14	2	10	0	233,13	436,27	203,13	180	
	14	2	10	0	232,78	435,56	202,78		
	14	2	10	0	232,42	434,85	202,42		
3 y 8	12	2	12	0	232,07	434,14	202,07	185	
	12	2	12	0	232,71	435,42	202,71		
	12	2	12	0	235,70	441,40	205,70		
4 y 8	12	2	10	0	232,49	463,68	231,19	220	
	12	2	10	0	235,60	469,90	234,30		
	12	2	10	0	233,37	465,44	232,07		
5 y 8	12	2	10	0	234,45	467,59	233,15	220	
	12	2	10	0	234,70	468,10	233,40		
	12	2	10	0	233,47	465,64	232,17		
6 y 8	14	2	10	0	234,30	467,29	233,00	220	
	14	2	10	0	231,10	460,90	229,80		
	14	2	10	0	234,25	467,19	232,95		
7 y 8	15	2	10	0	235,70	470,10	234,40	220	
	15	2	10	0	235,30	469,30	234,00		
	15	2	10	0	234,45	467,60	233,15		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Preparación de salmuera para regeneración**

Suavizador	Resina en suavizadores (ft <sup>3</sup> )	ft <sup>3</sup> a cubrir con salmuera	Dureza compensada granos/gal	Gal de salmuera	Lb de Sal para Salmuera saturada	Sacos de sal	Lb de sal/ft <sup>3</sup> de resina	Tiempo teórico
1	40	40	6,11	150	450	4,5	11	14,52
2	26	38	6,11	100	300	3,0	8	13,05
3	36	67	6,11	150	450	4,5	7	19,02
4	48	63	6,11	175	525	5,3	8	17,59
5	48	63	6,11	175	525	5,3	8	17,46
6	50	50	6,11	200	600	6	12	16,31
7	50	50	6,11	200	600	6	12	16,31
8	50	50	6,11	200	600	6	12	16,31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Desviación estándar del procedimiento anterior y actual para los flujos de agua de cada suavizador**

Suavizador	Desviación estándar (s)	
	Procedimiento anterior	Procedimiento modificado
1	18,65	11,35
2	16,63	20,56
3	11,69	13,07
4	14,03	21,40
5	15,93	28,82
6	14,54	17,37
7	21,81	25,31
8	22,44	30,02

Fuente: elaboración propia.



Tabla XII. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 1</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
<b>1</b>	<b>57,00</b>	<b>190</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>
2	20,90	190	54%	11%
3	30,40	190	37%	16%
4	32,30	190	35%	17%
5	22,80	190	50%	12%
6	38,00	190	30%	20%
7	41,17	190	28%	22%
8	20,90	190	54%	11%
<b>9</b>	<b>66,50</b>	<b>190</b>	<b>17%</b>	<b>35%</b>
10	34,20	190	33%	18%
11	41,80	190	27%	22%
12	38,00	190	30%	20%
<b>13</b>	<b>55,10</b>	<b>190</b>	<b>19%</b>	<b>29%</b>
14	41,80	190	27%	22%
15	41,80	190	27%	22%
16	32,30	190	35%	17%
17	28,50	190	40%	15%
18	36,10	190	31%	19%
19	34,20	190	33%	18%
20	39,90	190	28%	21%
21	39,90	190	28%	21%
22	38,00	190	30%	20%
23	28,50	190	40%	15%
24	26,60	190	43%	14%
25	26,60	190	43%	14%
26	26,60	190	43%	14%
27	32,30	190	35%	17%
28	20,90	190	54%	11%
29	34,20	190	33%	18%
<b>30</b>	<b>60,80</b>	<b>190</b>	<b>19%</b>	<b>32%</b>
31	41,80	190	27%	22%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 2</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	41,40	180	50%	23%
2	48,60	180	42%	27%
3	50,40	180	41%	28%
<b>4</b>	<b>108,00</b>	<b>180</b>	<b>19%</b>	<b>60%</b>
5	39,60	180	52%	22%
6	46,80	180	44%	26%
7	46,80	180	44%	26%
8	37,80	180	54%	21%
9	50,40	180	41%	28%
<b>10</b>	<b>104,40</b>	<b>180</b>	<b>20%</b>	<b>58%</b>
11	46,80	180	44%	26%
12	46,80	180	44%	26%
13	59,40	180	35%	33%
<b>14</b>	<b>99,00</b>	<b>180</b>	<b>18%</b>	<b>55%</b>
15	45,00	180	46%	25%
16	48,60	180	42%	27%
17	37,80	180	54%	21%
18	43,20	180	48%	24%
19	48,60	180	42%	27%
20	57,60	180	36%	32%
21	37,80	180	54%	21%
22	43,20	180	48%	24%
23	46,80	180	44%	26%
<b>24</b>	<b>106,20</b>	<b>180</b>	<b>19%</b>	<b>59%</b>
25	45,00	180	46%	25%
26	45,00	180	46%	25%
27	43,20	180	48%	24%
28	46,80	180	44%	26%
29	59,40	180	35%	33%
30	39,60	180	52%	22%
31	48,60	180	42%	27%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 3</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	46,25	185	28%	25%
2	38,85	185	34%	21%
3	24,05	185	54%	13%
<b>4</b>	<b>68,45</b>	<b>185</b>	<b>19%</b>	<b>37%</b>
5	48,10	185	27%	26%
6	22,20	185	59%	12%
7	40,08	185	33%	22%
8	42,55	185	31%	23%
9	22,20	185	59%	12%
10	33,30	185	39%	18%
<b>11</b>	<b>61,05</b>	<b>185</b>	<b>21%</b>	<b>33%</b>
12	29,60	185	44%	16%
13	37,00	185	35%	20%
14	27,75	185	47%	15%
15	40,70	185	32%	22%
16	35,15	185	37%	19%
17	33,30	185	39%	18%
18	42,55	185	31%	23%
<b>19</b>	<b>68,45</b>	<b>185</b>	<b>19%</b>	<b>37%</b>
20	40,70	185	32%	22%
21	31,45	185	42%	17%
22	40,70	185	32%	22%
23	38,85	185	34%	21%
24	29,60	185	44%	16%
25	42,55	185	31%	23%
26	25,90	185	50%	14%
27	29,60	185	44%	16%
<b>28</b>	<b>72,15</b>	<b>185</b>	<b>18%</b>	<b>39%</b>
29	42,55	185	31%	23%
30	48,10	185	27%	26%
31	31,45	185	42%	17%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 4</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	50,60	220	42%	23%
2	46,20	220	46%	21%
<b>3</b>	<b>90,20</b>	<b>220</b>	<b>24%</b>	<b>41%</b>
4	50,60	220	42%	23%
5	35,20	220	61%	16%
6	35,20	220	61%	16%
7	41,80	220	51%	19%
8	46,20	220	46%	21%
9	50,60	220	42%	23%
<b>10</b>	<b>107,80</b>	<b>220</b>	<b>20%</b>	<b>49%</b>
11	35,20	220	61%	16%
12	50,60	220	42%	23%
13	57,20	220	37%	26%
14	57,20	220	37%	26%
15	52,80	220	41%	24%
16	61,60	220	35%	28%
17	55,00	220	39%	25%
18	52,80	220	41%	24%
19	52,80	220	41%	24%
20	24,20	220	88%	11%
21	24,20	220	88%	11%
22	55,00	220	39%	25%
23	35,20	220	61%	16%
24	37,40	220	57%	17%
25	28,60	220	75%	13%
<b>26</b>	<b>94,60</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>43%</b>
27	37,40	220	57%	17%
28	30,80	220	69%	14%
29	35,20	220	61%	16%
<b>30</b>	<b>103,40</b>	<b>220</b>	<b>18%</b>	<b>47%</b>
31	50,60	220	42%	23%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 5</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	50,60	220	57%	23%
<b>2</b>	<b>121,00</b>	<b>220</b>	<b>24%</b>	<b>55%</b>
3	44,00	220	65%	20%
4	48,40	220	60%	22%
5	55,00	220	52%	25%
6	44,00	220	65%	20%
7	33,00	220	87%	15%
8	30,80	220	94%	14%
9	39,60	220	73%	18%
10	39,60	220	73%	18%
11	48,40	220	60%	22%
12	44,00	220	65%	20%
13	46,20	220	62%	21%
14	48,40	220	60%	22%
<b>15</b>	<b>127,60</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>58%</b>
16	46,20	220	62%	21%
17	33,00	220	87%	15%
18	41,80	220	69%	19%
19	39,60	220	73%	18%
20	35,20	220	82%	16%
21	52,80	220	55%	24%
22	44,00	220	65%	20%
<b>23</b>	<b>129,80</b>	<b>220</b>	<b>22%</b>	<b>59%</b>
24	30,80	220	94%	14%
25	26,40	220	109%	12%
26	50,60	220	57%	23%
27	48,40	220	60%	22%
28	37,40	220	77%	17%
29	35,20	220	82%	16%
30	37,40	220	77%	17%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 6</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	35,20	220	49%	16%
2	24,20	220	72%	11%
<b>3</b>	<b>77,00</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>35%</b>
4	52,80	220	33%	24%
5	50,60	220	34%	23%
6	35,20	220	49%	16%
7	30,80	220	56%	14%
8	39,60	220	44%	18%
<b>9</b>	<b>77,00</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>35%</b>
10	50,60	220	34%	23%
11	46,20	220	38%	21%
12	35,20	220	49%	16%
13	39,60	220	44%	18%
14	30,80	220	56%	14%
15	28,60	220	61%	13%
16	39,60	220	44%	18%
<b>17</b>	<b>103,40</b>	<b>220</b>	<b>17%</b>	<b>47%</b>
18	48,40	220	36%	22%
19	46,20	220	38%	21%
20	52,80	220	33%	24%
21	46,20	220	38%	21%
22	46,20	220	38%	21%
23	28,60	220	61%	13%
24	52,80	220	33%	24%
25	48,40	220	36%	22%
26	46,20	220	38%	21%
27	52,80	220	33%	24%
<b>28</b>	<b>77,00</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>35%</b>
29	26,40	220	66%	12%
30	30,80	220	56%	14%
31	50,60	220	34%	23%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 7</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	41,80	220	61%	19%
2	50,60	220	50%	23%
3	52,80	220	48%	24%
<b>4</b>	<b>110,00</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>50%</b>
5	50,60	220	50%	23%
6	24,20	220	105%	11%
7	52,80	220	48%	24%
8	46,20	220	55%	21%
9	46,20	220	55%	21%
10	35,20	220	72%	16%
<b>11</b>	<b>105,60</b>	<b>220</b>	<b>24%</b>	<b>48%</b>
12	37,40	220	68%	17%
13	48,40	220	52%	22%
14	46,20	220	55%	21%
15	50,60	220	50%	23%
16	35,20	220	72%	16%
17	33,00	220	77%	15%
18	35,20	220	72%	16%
19	37,40	220	68%	17%
<b>20</b>	<b>112,20</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>51%</b>
21	48,40	220	52%	22%
22	46,20	220	55%	21%
23	44,00	220	58%	20%
24	28,60	220	89%	13%
25	48,40	220	52%	22%
26	28,60	220	89%	13%
<b>27</b>	<b>121,00</b>	<b>220</b>	<b>21%</b>	<b>55%</b>
28	35,20	220	72%	16%
29	37,40	220	68%	17%
30	37,40	220	68%	17%
31	41,80	220	61%	19%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el procedimiento anterior**

<b>Suavizador 8</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	74,80	220	40%	34%
2	33,00	220	91%	15%
3	46,20	220	65%	21%
4	33,00	220	91%	15%
5	46,20	220	65%	21%
<b>6</b>	<b>127,60</b>	<b>220</b>	<b>24%</b>	<b>58%</b>
7	46,20	220	65%	21%
8	72,60	220	41%	33%
9	48,40	220	62%	22%
10	52,80	220	57%	24%
11	46,20	220	65%	21%
<b>12</b>	<b>134,20</b>	<b>220</b>	<b>22%</b>	<b>61%</b>
13	35,20	220	85%	16%
14	48,40	220	62%	22%
15	50,60	220	59%	23%
16	35,20	220	85%	16%
17	70,40	220	43%	32%
18	72,60	220	41%	33%
19	50,60	220	59%	23%
20	52,80	220	57%	24%
21	46,20	220	65%	21%
22	46,20	220	65%	21%
<b>23</b>	<b>132,00</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>60%</b>
24	46,20	220	65%	21%
25	46,20	220	65%	21%
26	50,60	220	59%	23%
27	33,00	220	91%	15%
28	50,60	220	59%	23%
<b>29</b>	<b>132,00</b>	<b>220</b>	<b>23%</b>	<b>60%</b>
30	50,60	220	59%	23%
31	46,20	220	65%	21%

Fuente: elaboración propia.



Tabla XX. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

<b>Suavizador 1</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	95,00	190	20%	50%
2	81,70	190	23%	43%
3	91,20	190	20%	48%
4	83,60	190	22%	44%
5	96,90	190	19%	51%
<b>6</b>	<b>123,50</b>	<b>190</b>	<b>15%</b>	<b>65%</b>
7	83,60	190	22%	44%
8	87,40	190	21%	46%
<b>9</b>	<b>133,00</b>	<b>190</b>	<b>14%</b>	<b>70%</b>
10	102,60	190	18%	54%
11	93,10	190	20%	49%
12	83,60	190	22%	44%
13	83,60	190	22%	44%
14	87,40	190	21%	46%
<b>15</b>	<b>138,70</b>	<b>190</b>	<b>13%</b>	<b>73%</b>
16	83,60	190	22%	44%
17	87,40	190	21%	46%
18	79,80	190	23%	42%
19	77,90	190	24%	41%
<b>20</b>	<b>153,90</b>	<b>190</b>	<b>12%</b>	<b>81%</b>
21	76,00	190	25%	40%
22	79,80	190	23%	42%
23	76,00	190	25%	40%
24	81,70	190	23%	43%
25	95,00	190	20%	50%
26	93,10	190	20%	49%
27	95,00	190	20%	50%
28	85,50	190	22%	45%
29	93,10	190	20%	49%
30	93,10	1900	20%	49%
31	93,10	190	20%	49%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

<b>Suavizador 2</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	106,20	180	16%	59%
2	95,40	180	17%	53%
3	86,40	180	19%	48%
4	86,40	180	19%	48%
<b>5</b>	<b>160,20</b>	<b>180</b>	<b>8%</b>	<b>89%</b>
6	100,80	180	16%	56%
7	108,00	180	15%	60%
8	108,00	180	15%	60%
9	115,20	180	14%	64%
10	117,00	180	14%	65%
11	118,80	180	14%	66%
12	109,80	180	15%	61%
13	106,20	180	16%	59%
<b>14</b>	<b>149,40</b>	<b>180</b>	<b>9%</b>	<b>83%</b>
15	113,40	180	15%	63%
16	124,20	180	13%	69%
17	113,40	180	15%	63%
<b>18</b>	<b>138,60</b>	<b>180</b>	<b>10%</b>	<b>77%</b>
19	115,20	180	14%	64%
20	117,00	180	14%	65%
21	104,40	180	16%	58%
22	117,00	180	14%	65%
<b>23</b>	<b>153,00</b>	<b>180</b>	<b>9%</b>	<b>85%</b>
24	106,20	180	16%	59%
25	120,60	180	14%	67%
26	113,40	180	15%	63%
27	111,60	180	15%	62%
28	124,20	180	13%	69%
29	109,80	180	15%	61%
30	106,20	180	16%	59%
31	109,80	180	15%	61%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Coeficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

<b>Suavizador 3</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	90,65	185	13%	49%
<b>2</b>	<b>105,45</b>	<b>185</b>	<b>10%</b>	<b>57%</b>
3	92,50	185	13%	50%
4	92,50	185	13%	50%
5	83,25	185	14%	45%
6	88,80	185	13%	48%
7	92,50	185	13%	50%
8	94,35	185	0%	51%
<b>9</b>	<b>116,55</b>	<b>185</b>	<b>9%</b>	<b>63%</b>
10	79,55	185	15%	43%
11	90,65	185	13%	49%
12	94,35	185	12%	51%
13	94,35	185	12%	51%
14	92,50	185	13%	50%
15	94,35	185	12%	51%
16	90,65	185	13%	49%
17	86,95	185	13%	47%
18	86,95	185	13%	47%
<b>19</b>	<b>127,65</b>	<b>185</b>	<b>8%</b>	<b>69%</b>
20	88,80	185	13%	48%
21	92,50	185	13%	50%
22	96,20	185	12%	52%
23	96,20	185	12%	52%
24	92,50	185	13%	50%
<b>25</b>	<b>136,90</b>	<b>185</b>	<b>7%</b>	<b>74%</b>
26	99,90	185	12%	54%
27	92,50	185	13%	50%
28	92,50	185	13%	50%
29	96,20	185	12%	52%
30	96,20	185	12%	52%
31	94,35	185	12%	51%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

<b>Suavizador 4</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	118,80	220	12%	54%
2	129,80	220	11%	59%
<b>3</b>	<b>140,80</b>	<b>220</b>	<b>10%</b>	<b>64%</b>
4	116,60	220	12%	53%
5	127,60	220	11%	58%
6	123,20	220	11%	56%
7	129,80	220	11%	59%
8	127,60	220	11%	58%
9	125,40	220	11%	57%
10	125,40	220	11%	57%
11	118,80	220	12%	54%
12	129,80	220	11%	59%
<b>13</b>	<b>165,00</b>	<b>220</b>	<b>9%</b>	<b>75%</b>
14	127,60	220	11%	58%
15	134,20	220	10%	61%
16	121,00	220	12%	55%
17	125,40	220	11%	57%
18	129,80	220	11%	59%
19	132,00	220	11%	60%
20	132,00	220	11%	60%
21	134,20	220	10%	61%
<b>22</b>	<b>171,60</b>	<b>220</b>	<b>8%</b>	<b>78%</b>
23	125,40	220	11%	57%
24	132,00	220	11%	60%
25	132,00	220	11%	60%
26	121,00	220	12%	55%
27	125,40	220	11%	57%
28	129,80	220	11%	59%
<b>29</b>	<b>176,00</b>	<b>220</b>	<b>8%</b>	<b>80%</b>
30	127,60	220	18%	58%
31	132,00	220	11%	60%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

<b>Suavizador 5</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
<b>1</b>	<b>151,80</b>	<b>220</b>	<b>10%</b>	<b>69%</b>
2	121,00	220	13%	55%
3	123,20	220	13%	56%
4	118,80	220	13%	54%
<b>5</b>	<b>160,60</b>	<b>220</b>	<b>10%</b>	<b>73%</b>
6	99,00	220	16%	45%
7	121,00	220	13%	55%
8	114,40	220	14%	52%
9	123,20	220	13%	56%
10	116,60	220	14%	53%
11	121,00	220	13%	55%
12	118,80	220	13%	54%
13	121,00	220	13%	55%
14	125,40	220	13%	57%
15	125,40	220	13%	57%
<b>16</b>	<b>156,20</b>	<b>220</b>	<b>10%</b>	<b>71%</b>
17	114,40	220	14%	52%
18	110,00	220	14%	50%
19	132,00	220	12%	60%
20	129,80	220	12%	59%
21	123,20	220	13%	56%
22	112,20	220	14%	51%
<b>23</b>	<b>173,80</b>	<b>220</b>	<b>9%</b>	<b>79%</b>
24	114,40	220	14%	52%
25	112,20	220	14%	51%
26	112,20	220	14%	51%
27	121,00	220	13%	55%
28	114,40	220	14%	52%
29	116,60	220	14%	53%
30	121,00	220	13%	55%
31	116,60	220	14%	53%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

<b>Suavizador 6</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	99,00	220	15%	45%
2	110,00	220	13%	50%
<b>3</b>	<b>125,40</b>	<b>220</b>	<b>10%</b>	<b>57%</b>
4	121,00	220	12%	55%
5	112,20	220	13%	51%
6	99,00	220	15%	45%
7	101,20	220	14%	46%
8	101,20	220	14%	46%
<b>9</b>	<b>136,40</b>	<b>220</b>	<b>9%</b>	<b>62%</b>
10	107,80	220	13%	49%
11	107,80	220	13%	49%
12	99,00	220	15%	45%
13	107,80	220	13%	49%
14	94,60	220	15%	43%
15	110,00	220	13%	50%
16	110,00	220	13%	50%
17	96,80	220	15%	44%
18	110,00	220	13%	50%
<b>19</b>	<b>143,00</b>	<b>220</b>	<b>9%</b>	<b>65%</b>
20	116,60	220	12%	53%
21	112,20	220	13%	51%
22	112,20	220	13%	51%
23	116,60	220	12%	53%
24	123,20	220	12%	56%
25	103,40	220	14%	47%
26	105,60	220	14%	48%
<b>27</b>	<b>160,60</b>	<b>220</b>	<b>7%</b>	<b>73%</b>
28	121,00	220	12%	55%
29	127,60	220	11%	58%
30	127,60	220	11%	58%
31	123,20	220	12%	56%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

<b>Suavizador 7</b>				
<b>Datos</b>	<b>GPM</b>	<b>GPM real</b>	<b>V</b>	<b>%Eficiencia</b>
1	88,00	220	25%	40%
2	94,60	220	23%	43%
3	94,60	220	23%	43%
<b>4</b>	<b>129,80</b>	<b>220</b>	<b>17%</b>	<b>59%</b>
5	112,20	220	19%	51%
6	101,20	220	22%	46%
7	103,40	220	21%	47%
8	88,00	220	25%	40%
9	114,40	220	19%	52%
<b>10</b>	<b>132,00</b>	<b>220</b>	<b>17%</b>	<b>60%</b>
11	96,80	220	23%	44%
12	99,00	220	22%	45%
13	96,80	220	23%	44%
14	96,80	220	23%	44%
15	105,60	220	21%	48%
16	105,60	220	21%	48%
17	116,60	220	19%	53%
18	114,40	220	19%	52%
19	70,40	220	31%	32%
<b>20</b>	<b>147,40</b>	<b>220</b>	<b>15%</b>	<b>67%</b>
21	74,80	220	29%	34%
22	81,40	220	27%	37%
23	74,80	220	29%	34%
24	81,40	220	27%	37%
25	112,20	220	19%	51%
26	99,00	220	22%	45%
27	79,20	220	28%	36%
28	81,40	220	27%	37%
29	107,80	220	20%	49%
<b>30</b>	<b>171,60</b>	<b>220</b>	<b>13%</b>	<b>78%</b>
31	107,80	220	20%	49%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Coefficiente de dispersión o variabilidad para el flujo de agua suave para el nuevo procedimiento**

Datos	Suavizador 8			
	GPM	GPM real	V	%Eficiencia
1	107,80	220	21%	49%
2	112,20	220	20%	51%
3	114,40	220	20%	52%
4	110,00	220	20%	50%
5	121,00	220	19%	55%
<b>6</b>	<b>160,60</b>	<b>220</b>	<b>14%</b>	<b>73%</b>
7	103,40	220	22%	47%
8	94,60	220	24%	43%
9	110,00	220	20%	50%
10	110,00	220	20%	50%
11	114,40	220	20%	52%
12	107,80	220	21%	49%
<b>13</b>	<b>173,80</b>	<b>220</b>	<b>13%</b>	<b>79%</b>
14	114,40	220	20%	52%
15	116,60	220	19%	53%
16	116,60	220	19%	53%
17	116,60	220	19%	53%
18	121,00	220	19%	55%
19	114,40	220	20%	52%
20	114,40	220	20%	52%
21	129,80	220	17%	59%
<b>22</b>	<b>178,20</b>	<b>220</b>	<b>13%</b>	<b>81%</b>
23	132,00	220	17%	60%
24	136,40	220	16%	62%
25	118,80	220	19%	54%
<b>26</b>	<b>193,60</b>	<b>220</b>	<b>12%</b>	<b>88%</b>
27	127,60	220	18%	58%
28	127,60	220	18%	58%
29	118,80	220	19%	54%
30	125,40	220	18%	57%
31	123,20	220	18%	56%

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXVIII. **Porcentaje de eficiencia y tiempo teórico de los suavizadores, para el procedimiento anterior**

Suavizador	AGUA CONCENTRADA											
	Galones	t	%E	Galones	t	%E	Galones	t	%E	Galones	t	%E
1	49 656,43	4,36	30%	57 932,51	5,08	35%	48 001,22	4,21	29%	52 966,87	4,65	32%
2	67 167,35	6,22	60%	64 928,45	6,01	58%	61 570,08	5,70	55%	66 047,90	6,12	59%
3	56 554,05	5,09	37%	50 440,10	4,54	33%	56 554,06	5,09	37%	59 611,03	5,37	39%
4	80 588,25	6,11	41%	96 312,80	7,30	49%	84 519,39	6,40	43%	92 381,66	7,00	47%
5	109 403,47	8,29	55%	115 370,94	8,74	58%	117 360,09	8,89	59%	105 425,17	7,99	53%
6	75 348	5,71	35%	75 348	5,71	35%	101 181,60	7,67	47%	75 348	5,72	35%
7	107 640	8,15	50%	103 334,40	7,83	48%	109 792,80	8,32	51%	118 404	8,97	55%
8	124 862,40	9,46	58%	131 320,80	9,95	61%	129 168	9,79	60%	129 168	9,79	60%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Porcentaje de eficiencia y tiempo teórico de los suavizadores, para el nuevo procedimiento**

Suavizador	AGUA SUAVE											
	Galones	t	%E	Galones	t	%E	Galones	t	%E	Galones	t	%E
1	107 588,95	9,44	65%	115 865,02	10,16	70%	120 830,66	10,60	73%	134 072,38	11,76	81%
2	99 631,58	9,23	89%	92 914,85	8,60	83%	86 198,11	7,98	77%	95 153,76	8,81	85%
3	87 123,82	7,85	57%	96 294,74	8,68	63%	105 465,67	9,50	69%	113 108,11	10,19	74%
4	125 796,31	9,53	64%	147 417,55	11,17	75%	153 314,25	11,61	78%	157 245,38	11,91	80%
5	137 251,63	10,40	69%	145 208,25	11,00	73%	141 229,94	10,70	71%	157 143,17	11,90	79%
6	122 709,60	9,30	57%	133 473,60	10,11	62%	139 932	10,60	65%	157 154,40	11,91	73%
7	127 015,20	9,62	59%	129 168	9,79	60%	144 237,60	10,93	67%	167 918,40	12,72	78%
8	157 154,40	11,91	73%	170 071,20	12,88	79%	174 376,80	13,21	81%	189 446,40	14,35	88%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Control de eficiencia al modificar la salmuera**

Agua utilizada para realizar salmuera											
	Concentrado					Suave					
Suavizador	Eficiencia				Promedio	Eficiencia				Promedio	Diferencia
1	30%	35%	29%	32%	32%	65%	70%	73%	81%	72%	41%
2	60%	58%	55%	59%	58%	89%	83%	77%	85%	84%	26%
3	37%	33%	37%	39%	37%	57%	63%	69%	74%	66%	29%
4	41%	49%	43%	47%	45%	64%	75%	78%	80%	74%	29%
5	55%	58%	59%	53%	56%	69%	73%	71%	79%	73%	17%
6	35%	35%	47%	35%	38%	57%	62%	65%	73%	64%	26%
7	50%	48%	51%	55%	51%	59%	60%	67%	78%	66%	15%
8	58%	61%	60%	60%	60%	73%	79%	81%	88%	80%	21%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Eficiencia promedio y aumento de eficiencia promedio de suavizadores**

Suavizador	Concentrada (ppm)	Eficiencia (%)	Suave (ppm)	Eficiencia (%)	Aumento de eficiencia (%)
1	[150,200]	31,50%	[0,5]	72,25%	<b>40,75%</b>
2		58,00%		83,50%	<b>25,50%</b>
3		36,50%		65,75%	<b>29,25%</b>
4		45,00%		74,25%	<b>29,25%</b>
5		56,25%		73,00%	<b>16,75%</b>
6		38,00%		64,25%	<b>26,25%</b>
7		51,00%		66,00%	<b>15,00%</b>
8		59,75%		80,25%	<b>20,50%</b>
<b>PROMEDIO</b>		<b>47,00%</b>		<b>72,41%</b>	<b>25,41%</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo, para los galones de agua suavizados**

<b>Suavizador</b>	<b>Galones de agua suavizada, procedimiento anterior</b>	<b>Galones de agua suavizada, procedimiento nuevo</b>	<b>Aumento de galones suavizados</b>
1	46 283,69	119 589,25	73 305,56
2	64 928,45	93 474,58	28 546,13
3	47 596,90	100 498,09	52 901,18
4	78 516,98	145 943,37	67 426,39
5	75 537,20	145 208,25	69 671,05
6	53 078,40	138 317,40	85 239,00
7	71 236,80	142 084,80	70 848,00
8	83 458,80	172 762,20	89 303,40
<b>TOTAL</b>	<b>520 637,22</b>	<b>1 057 877,93</b>	<b>537 240,71</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo, para tiempo de funcionamiento de suavizadores**

<b>Suavizador</b>	<b>Tiempo de intercambio (h), procedimiento anterior</b>	<b>Tiempo de intercambio (h), procedimiento nuevo</b>	<b>Aumento de tiempo de uso (h)</b>
1	4,06	10,49	6,43
2	6,01	8,6	2,64
3	4,29	9,05	4,77
4	5,95	11,06	5,11
5	5,72	11,00	5,28
6	4,02	10,48	6,46
7	5,40	10,76	5,37
8	6,32	13,09	6,77
<b>TOTAL</b>	<b>41,77</b>	<b>84,59</b>	<b>42,82</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo, para el costo de producción de agua suave**

<b>SUAVIZADOR</b>	<b>Costo por galón de agua suave, procedimiento anterior</b>	<b>Costo por galón de agua suave, procedimiento nuevo</b>	<b>Disminución de costo de agua suave (Q/gal)</b>
1	Q5,70	Q4,25	1,45
2	Q5,70	Q4,25	1,45
3	Q5,70	Q4,25	1,45
4	Q5,70	Q4,25	1,45
5	Q5,70	Q4,25	1,45
6	Q5,70	Q4,25	1,45
7	Q5,70	Q4,25	1,45
8	Q5,70	Q4,25	1,45
<b>TOTAL</b>	<b>45,60</b>	<b>34,01</b>	<b>11,59</b>

Fuente: elaboración propia.

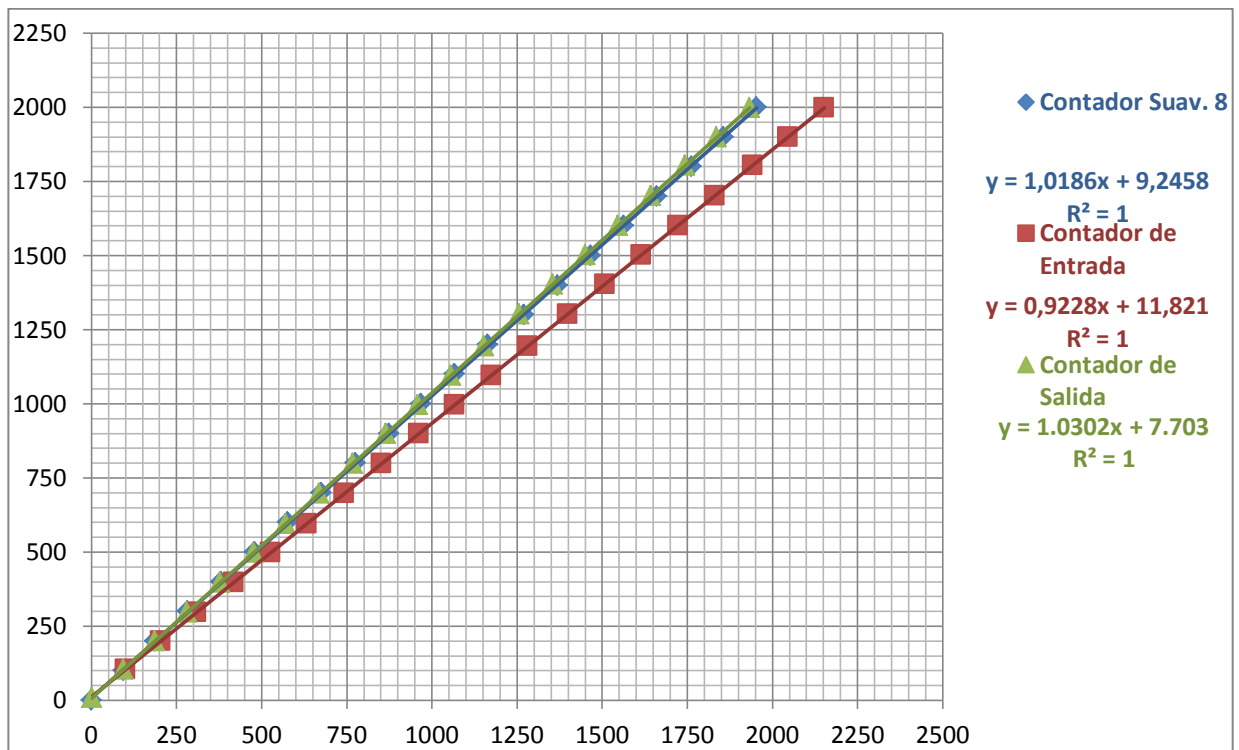
### **3.8. Análisis estadístico**

Para el rechazo o aceptación de datos dentro del cálculo de la media diaria del flujo de agua de cada suavizador, se realizó un análisis de varianza, utilizando el método de coeficiente de dispersión o variabilidad para establecer el grado de representatividad de flujo de los suavizadores, los cuales luego de determinar cuales tienen representatividad, se utilizan para el cálculo de los resultados.

## 4. RESULTADOS

A continuación se presenta el resultado de la calibración de los medidores de flujo, puesta en funcionamiento de los suavizadores, dosificación de salmuera para regeneración y la comparación de eficiencia y costos del procedimiento antes y después de la realización del proyecto.

Figura 10. **Calibración de medidores de flujo de los suavizadores**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Puesta en funcionamiento de suavizadores según bomba**

<b>Suavizadores en funcionamiento</b>	<b>Bomba a utilizar</b>	<b>Observaciones</b>
1	15 hp	Mal funcionamiento, tubería presurizada
2	15 hp	Buen funcionamiento
3	40 hp	Poco presurizada, buen funcionamiento
4	40 hp	Buen funcionamiento

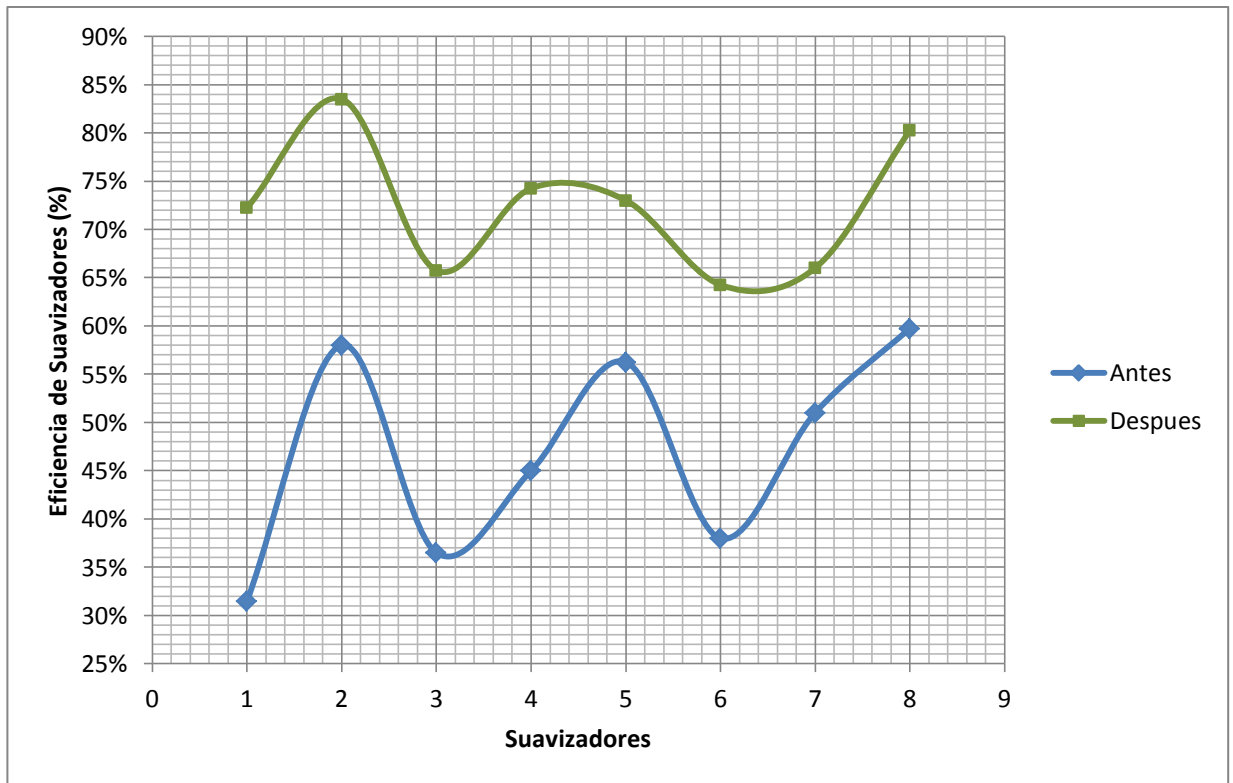
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Dosificación para elaboración de salmuera y regeneración de resina**

<b>Suavizador</b>	<b>Lb de sal/ft<sup>3</sup> de resina</b>	<b>Gal de salmuera</b>	<b>Lb de Sal para Salmuera saturada</b>	<b>Sacos de sal</b>
1	14,52	150	450	4,5
2	13,05	100	300	3,0
3	19,02	150	450	4,5
4	17,59	175	525	5,3
5	17,46	175	525	5,3
6	16,31	200	600	6
7	16,31	200	600	6
8	16,31	200	600	6

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Optimización de salmuera y aumento de eficiencia de suavizadores



Fuente: elaboración propia.



Tabla XXXVII. **Eficiencia promedio y aumento de eficiencia promedio de suavizadores**

<b>Suavizador</b>	<b>Concentrada (ppm)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Suave (ppm)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Aumento de eficiencia (%)</b>
1	[150,200]	31,50%	[0,5]	72,25%	<b>40,75%</b>
2		58,00%		83,50%	<b>25,50%</b>
3		36,50%		65,75%	<b>29,25%</b>
4		45,00%		74,25%	<b>29,25%</b>
5		56,25%		73,00%	<b>16,75%</b>
6		38,00%		64,25%	<b>26,25%</b>
7		51,00%		66,00%	<b>15,00%</b>
8		59,75%		80,25%	<b>20,50%</b>
<b>PROMEDIO</b>		<b>47,00%</b>		<b>72,41%</b>	<b>25,41%</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. Comparación de mejora entre procedimiento anterior y nuevo

SUAVIZADOR	Anterior		Nuevo		Anterior		Nuevo		Disminución de costo de agua suave (Q/gal)
	Galones de agua suavizada	Aumento de galones suavizados	Tiempo de intercambio (h)	Tiempo de intercambio (h)	Costo por galón de agua suave	Aumento de tiempo de uso (h)	Costo por galón de agua suave		
1	46 283,69	73 305,56	4,06	10,49	Q 5,70	6,43	Q 4,25	1,45	
2	64 928,45	28 546,13	6,01	8,66	Q 5,70	2,64	Q 4,25	1,45	
3	47 596,90	52 901,18	4,29	9,05	Q 5,70	4,77	Q 4,25	1,45	
4	78 516,98	67 426,39	5,95	11,06	Q 5,70	5,11	Q 4,25	1,45	
5	75 537,20	69 671,05	5,72	11,00	Q 5,70	5,28	Q 4,25	1,45	
6	53 078,40	85 239,00	4,02	10,48	Q 5,70	6,46	Q 4,25	1,45	
7	71 236,80	70 848,00	5,40	10,76	Q 5,70	5,37	Q 4,25	1,45	
8	83 458,80	89 303,40	6,32	13,09	Q 5,70	6,77	Q 4,25	1,45	
	<b>520 637,22</b>	<b>537 240,71</b>	<b>41,77</b>	<b>84,59</b>	<b>45,60</b>	<b>42,82</b>	<b>34,01</b>	<b>11,59</b>	

Fuente: elaboración propia.



## **5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

El presente proyecto perteneciente al Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) de la carrera de Ingeniería Química, se realizó con el fin de mejorar el funcionamiento de los suavizadores y cumplir con la demanda de agua del área de tratamiento de agua de la empresa Embotelladora La Mariposa, S.A. con el propósito de optimizar recursos y mejorar la eficiencia de dichos suavizadores.

### **5.1. Calibración de contadores de agua**

La calibración de los contadores de agua suave se realizó debido a que estos proporcionaban datos inconsistentes, los cuales no permitían llevar un buen control del funcionamiento de los suavizadores, ya que a partir del galonaje proporcionado por estos contadores se determina la eficiencia de los suavizadores. Por lo que se realizó la calibración, a partir de un contador proporcionado por el área de Control de Calidad de dicha empresa.

Se realizaron 3 curvas de calibración, para el contador de salida de agua suave del suavizador 8, dando como resultado una correlación positiva perfecta con un coeficiente de correlación lineal igual a 1. El contador de entrada de agua cruda a los suavizadores y el contador de salida de agua suave de los suavizadores dando como resultado una correlación excelente, con un coeficiente de correlación lineal igual a 0,9738 y 0,9982 respectivamente.

Por lo que a partir del grado de asociación que las ecuaciones de regresión lineal correspondientes a cada contador de agua, son los adecuados para calibrar los datos de galonaje de los suavizadores. Las ecuaciones de calibración se aplicaron a las hojas de registros para obtener los datos calibrados y de esta forma determinar la eficiencia real de los suavizadores, a partir de las cuales se logró determinar que los suavizadores con menor eficiencia y por lo tanto los que requieren de mayor control para mejorar su funcionamiento son los suavizador 1, 3, 4, 6 con eficiencia de 32, 37, 45 y 38 por ciento respectivamente.

## **5.2. Factores perturbadores**

Se analizó en su totalidad el proceso de los suavizadores para determinar cuáles eran los factores que afectaban su funcionamiento y encontrar una solución para eliminarlos o disminuir su impacto.

Uno de los factores primordiales que perturban el procedimiento de suavizar agua es la presión, debido a la falta de procedimiento en la puesta en funcionamiento de las bombas y suavizadores, las tuberías se presurizaban demasiado y provocaban perforaciones en la tubería y hasta pérdida de resina en las salidas de los suavizadores, lo cual se comprobó debido a que a la hora de abrir las tomas de muestra de los suavizadores había extracción de resina, por lo que se realizaron pruebas de presión, probando cada uno de los suavizadores con la bomba pequeña de 15 caballos de potencia, obteniendo como resultado una elevada presurización en todos los equipos.

Luego se conectaron 2 suavizadores con la bomba de 15 caballos de potencia y no existió presurización, por lo que para la bomba de 15 caballos de potencia se puede utilizar únicamente 2 suavizadores únicamente, debido a que con 1 se presuriza demasiado las tuberías y con más de 2 se obtiene muy bajo flujo de agua suave.

Luego se realizaron pruebas con la bomba grande de 40 caballos de potencia, debido a que con la pequeña y un suavizador se produce demasiada presión, la bomba grande fue probada con 2 suavizadores, lo cual también produjo presurización, al probarla con 3 suavizadores, se obtuvo un flujo normal por lo que la bomba de 40 caballos de potencia puede utilizar únicamente con 3 o más suavizadores.

Luego de detectar dichos factores y aplicar las soluciones ya mencionadas se evitó la pérdida de resina, reduciendo el uso innecesario de la misma, y así mismo se redujo el costo de energía eléctrica, por el mal uso de las bombas, así como también se logro un mejor cuidado para los suavizadores y las bombas.

### **5.3. Preparación de salmuera para regeneración**

Debido a que la eficiencia de los suavizadores era demasiado baja, se determinó la solubilidad real de la sal, NaCl, requerida para realizar una salmuera saturada, la cual dio como resultado 36,03 gramos de sal por cada 100 mililitros de agua, es decir, 3 libras de NaCl por cada galón de agua y se multiplicó por la cantidad de galones de salmuera que necesitaba cada suavizador para cubrir la resina, para determinar esta cantidad se abrió uno por uno y se midieron los galones necesarios que cada suavizador.

Se observó que a la bomba utilizada para enviar la salmuera hacia los suavizadores se podía invertir el giro y ahora enviar la misma agua suave producida en los suavizadores hacia el tanque de preparación de salmuera, para ahora preparar la salmuera con agua suave y evitar que la dureza impida la total regeneración de la resina.

Así mismo se realizaron pruebas al agua concentrada, con la cual se estaba preparando la salmuera, a partir de la cual se determinó que esta tenía demasiada dureza, entre 150 a 200 partes por millón, por lo que al entrar en contacto con la resina, en solución con la sal, esta regeneraba la resina pero a su vez la gran cantidad de dureza del agua creaba obstáculos que impedían que la resina se regenerara en su totalidad y disminuía la eficiencia de intercambio iónico entre la resina y la dureza del agua, disminuyendo el tiempo de funcionamiento óptimo del suavizador.

Con lo anterior se produjo un aumento significativo de eficiencia, para el suavizador 1 de 31,50 al 72,25 por ciento aumentando su eficiencia en un 40,75 por ciento, para el suavizador 2 de 58,00 a 83,50 por ciento aumentando su eficiencia en un 25,50 por ciento, para el suavizador 3 de 36,50 a 65,75 por ciento aumentando su eficiencia en un 29,25 por ciento, para el suavizador 4 de 45,00 a 74,25 por ciento aumentando su eficiencia en un 29,25 por ciento, para el suavizador 5 de 56,25 a 73,00 por ciento aumentando su eficiencia en un 16,75 por ciento, para el suavizador 6 de 38,00 a 64,25 por ciento aumentando su eficiencia en un 26,25 por ciento, para el suavizador 7 de 51,00 a 66,00 por ciento aumentando su eficiencia en un 15 por ciento y para el suavizador 8 de 59,75 a 80,25 por ciento aumentando su eficiencia en un 20,50 por ciento.

Es decir se aumentó la eficiencia aproximadamente en un 25,41 por ciento para todos los suavizadores, siendo los que más aumentaron su eficiencia los suavizadores 1,3,4 y 6, los mismos suavizadores que presentaban una menor eficiencia, alcanzando ahora todos una eficiencia de aproximadamente 77 por ciento.

#### **5.4. Demanda de agua suave**

Uno de los principales problemas a partir de los cuales se realizó el presente proyecto, es para cumplir la demanda de agua de la empresa, debido a que únicamente se estaba cumpliendo con el 70 por ciento de la demanda de producción.

Se realizaron varios análisis para determinar un arreglo a partir del cual se pudiera cumplir esta demanda sin aumentar los costos de inversión en compra de más equipo, pero debido a que se observó que el cloro adicionado al agua suave, la cual al salir de los suavizadores es enviada al cisterna 4 en el cual se le adiciona cloro hasta 2 partes por millón, luego es enviado al sistema de ósmosis inversa, pero el cloro contenido en el agua suave producía incrustación en las membranas de ósmosis inversa.

La empresa Embotelladora la Mariposa S.A. y la proveedora de las membranas llegaron a la determinación de no usar agua suave en el sistema de ósmosis por cuestión de costos. Con lo que se logró la reducción significativa de la demanda de agua suave, quedando esta únicamente para servicios auxiliares, los cuales si son posible cubrir con el arreglo y la cantidad de suavizadores actuales.



## **5.5. Optimización de regeneraciones y determinación de eficiencia**

Al calcular el aumento promedio de eficiencia de cada uno de los suavizadores se determinó que tanto la eficiencia aumento un 25,41 por ciento y el costo disminuyo en el mismo porcentaje en promedio para todos los suavizadores, cumpliendo satisfactoriamente con el objetivo principal de la realización de este proyecto.

## 6. LOGROS OBTENIDOS

- A partir de la calibración del contador de agua suave se obtuvieron datos consistentes y veraces, que aseguraron que los resultados de eficiencia calculados a partir de ellos son correctos.
- Se le dio un mejor uso a los suavizadores a partir de la determinación del flujo real de cada uno de los suavizadores, debido a que entran en funcionamiento de acuerdo al flujo verdadero de cada suavizador y no se sobrepasan sus límites, lo cual produjo un mejor funcionamiento y mejor cuidado.
- La delimitación de la presión mínima y máxima de trabajo en cada uno de los suavizadores permitió un mejor cuidado, debido a que se trabajan de acuerdo a los límites permitidos para cada uno de ellos, siempre cumpliendo con los estándares de la empresa.
- Se determinó la cantidad exacta y el tiempo de intercambio de la resina, en función de la cantidad de dureza del agua, logrando el aprovechamiento al máximo y optimizando su uso.
- Se disminuyó la demanda de agua suave, ya que el agua suave luego de salir de los suavizadores es enviada al cisterna 4, donde se le adiciona cloro, y luego entraba al sistema de ósmosis inversa, el cloro que contiene el agua suave afecta las membranas de ósmosis disminuyendo su vida útil debido a la incrustación, por lo que se dejó de pasar agua suave a este sistema, disminuyendo la demanda de agua suave.

- Debido a que se redujo la demanda de agua suave de la empresa únicamente se realizó un arreglo para evitar su mal uso en relación a la presión producida por las bombas. Es decir, el arreglo incluye que suavizadores utilizar con determinada bomba para evitar presurización en la tubería y pérdida de resina por elevadas presiones.
- Se realizó una hoja de cálculo donde se indica la cantidad de sal optimizada con el nuevo procedimiento, en comparación con la cantidad utilizada por la empresa actualmente.
- Se mejoró el procedimiento de regeneración de los suavizadores cambiando el agua concentrada que se utilizaba para hacer la salmuera por agua suave, aumentando la eficiencia de los suavizadores.
- Se capacitó al personal de tratamiento de agua en temas relacionados con la optimización en el número de regeneraciones y el arreglo de los suavizadores, así como de los resultados obtenidos en el proyecto realizado.

## CONCLUSIONES

1. La calibración de los contadores de agua suave produjo datos consistentes y veraces, que aseguraron que los resultados de eficiencia calculados a partir de ellos son correctos.
2. Se logró dar un mejor uso a los suavizadores a partir de la determinación de los límites de presión que producen las bombas a utilizar con cada suavizador, evitando presurización, pérdida de resina y reducción de la vida útil del equipo.
3. Se comprobó que la realización de una salmuera saturada permite una mayor regeneración de la resina, debido al aumento de la eficiencia de los suavizadores.
4. La realización de salmuera utilizando agua suave produce una mayor eficiencia que al utilizar agua concentrada, por lo que se comprueba que la dureza actúa como obstáculo para el intercambio iónico entre la dureza capturada por la resina saturada y el sodio de la salmuera saturada.
5. Se disminuyó la demanda de agua suave a partir de la eliminación del uso de dicha agua al sistema de ósmosis inversa.
6. Se logró el aumento de la eficiencia de intercambio iónico de cada suavizador en aproximadamente un 25,41 por ciento en promedio para todos los suavizadores.

7. Se disminuyó el costo de elaboración de agua suave en un 25,41 por ciento, pasando de Q5,70 por galón a Q4,25 por galón de agua suave.
8. Se capacitó a los 4 operarios de tratamiento de agua en temas relacionados con la optimización en el número de regeneraciones y el arreglo de los suavizadores, así como de los resultados obtenidos en el proyecto realizado.

## RECOMENDACIONES

1. Poner en funcionamiento las bombas según el número de suavizadores a utilizar para evitar presurización de las tuberías y pérdida de resina.
2. Utilizar agua suave para la preparación de la salmuera, no agua concentrada, debido a que la dureza que contiene esta agua provoca que la resina no se regenere completamente.
3. Para regenerar los suavizadores enviar la cantidad indicada de salmuera y prepararla saturada para regenerar por completo la salmuera y que no quede resina sin cubrir.
4. Tener en cuenta las ecuaciones de calibración para la determinación del galonaje real de los suavizadores, para obtener la certeza de los datos que se están calculando.
5. Utilizar y llenar las hojas de registro diario de los suavizadores para tener un mejor control acerca de su funcionamiento y mantenimiento.
6. Cumplir con los parámetros de preparación de la salmuera para evitar gastos innecesarios por mal uso de recursos.
7. Para mejorar el control y seguir optimizando el proceso, se necesita de la instalación de un regulador de frecuencia para controlar las revoluciones por minuto (rpm) de las bombas y no presurizar la tubería sin necesidad.



## BIBLIOGRAFÍA

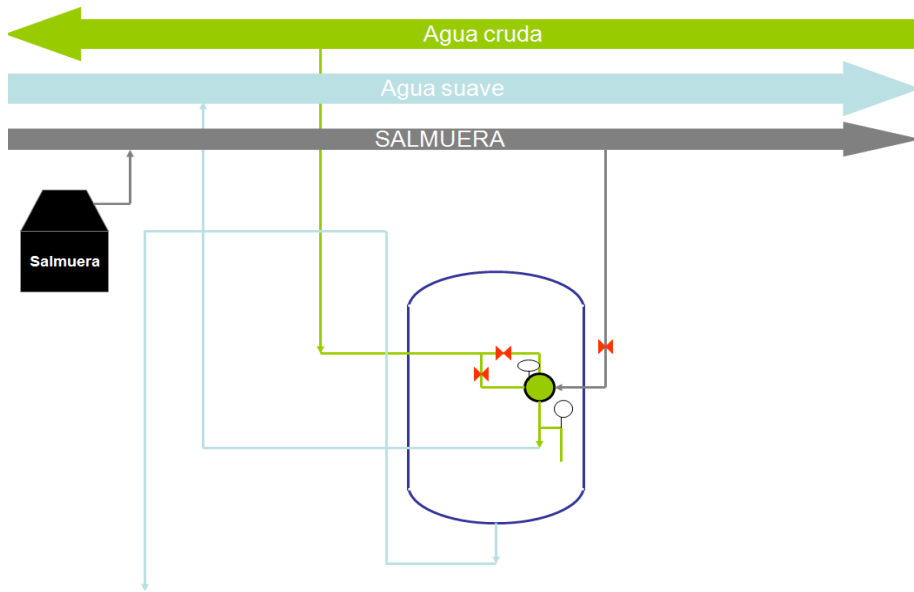
1. AVILLA, Joseph A. *Lo esencial acerca del intercambio iónico* [en línea]. [ref. 02 de enero de 1999]. Disponible en Web: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/PDF/5-6-02avilla.pdf>.
2. BETZ. *Handbook of Industrial Water Conditioning*. 6a ed. Philadelphia. Betz Laboratories, 1962. 379 p.
3. COOPHER, Michaud F. *Condiciones del agua y purificación*. 3ª ed. Vol. 41, No. 8, 1999, USA. p. 36-38.
4. LUWARD, Axel. *Propiedades físicas de la resina catiónica* [en línea]. [ref. 15 de diciembre de 2008]. Disponible en Web: [http://www.trathal.com/Resina\\_cat.jpg&imgrefurl/](http://www.trathal.com/Resina_cat.jpg&imgrefurl/).
5. MCCABE, Warren; SMITH, Julian. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2007, México, 1715 p.
6. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a. ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996. 970 p.
7. RODAS DE LÓPEZ, Iris. *Estadística*. 4a. ed. Guatemala: Zantmaró, 2002. 410 p.



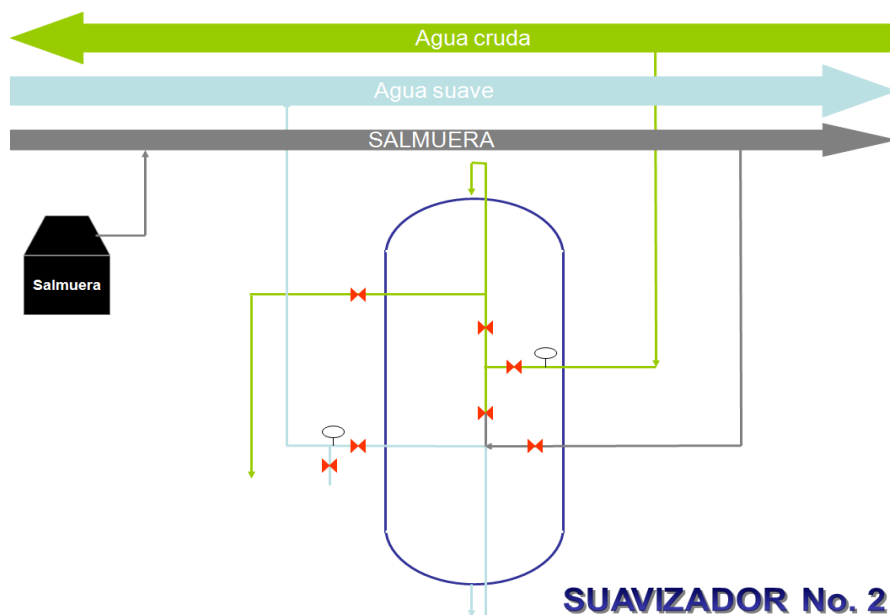
8. RODRÍGUEZ, Víctor Guillermo. *Manual de calderas y tratamiento de agua* [en línea]. [ref. 8 de octubre de 2009]. Disponible en Web: <http://www.scribd.com/ManualdeCalderasyTratamientodeAgua>.
  
9. *Suavizadores de agua comerciales* [en línea]. Lab. Caribe Medioambiental. [ref. 05 de noviembre de 2009]. Disponible en Web: <http://www.quiminet.com/Laboratorioambiental/suavizador/>.

# APÉNDICE

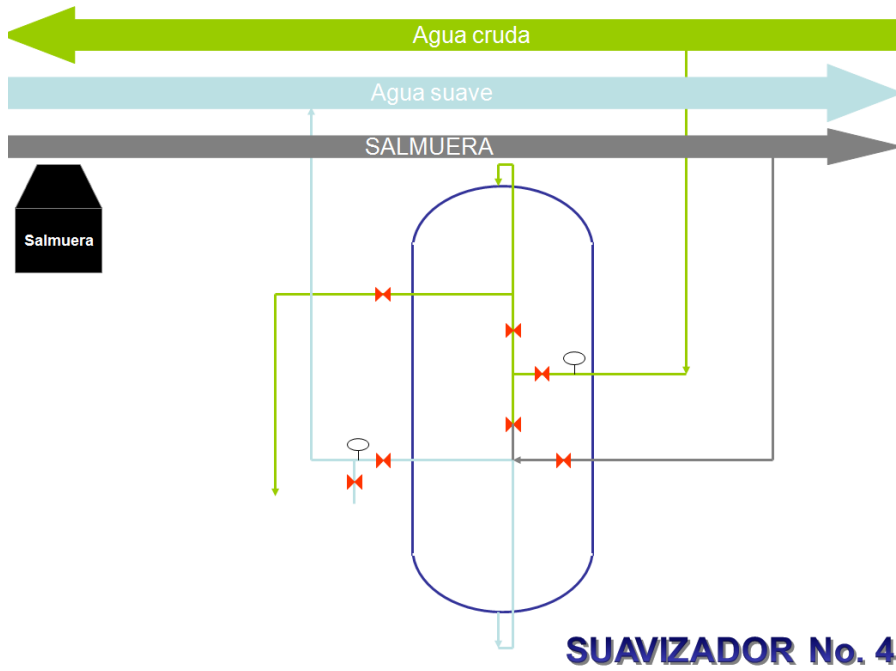
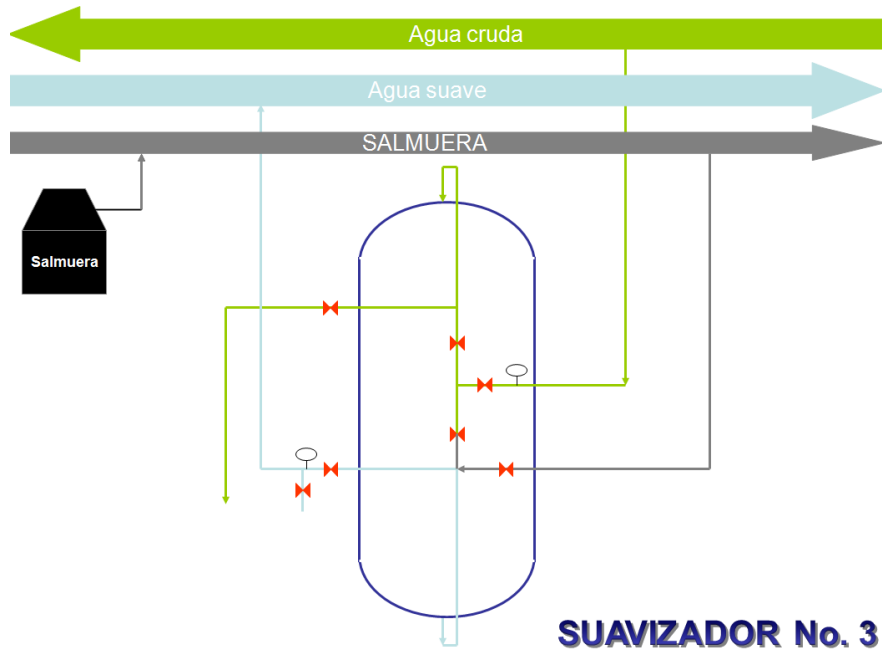
Apéndice 1. Diagrama de suavizadores

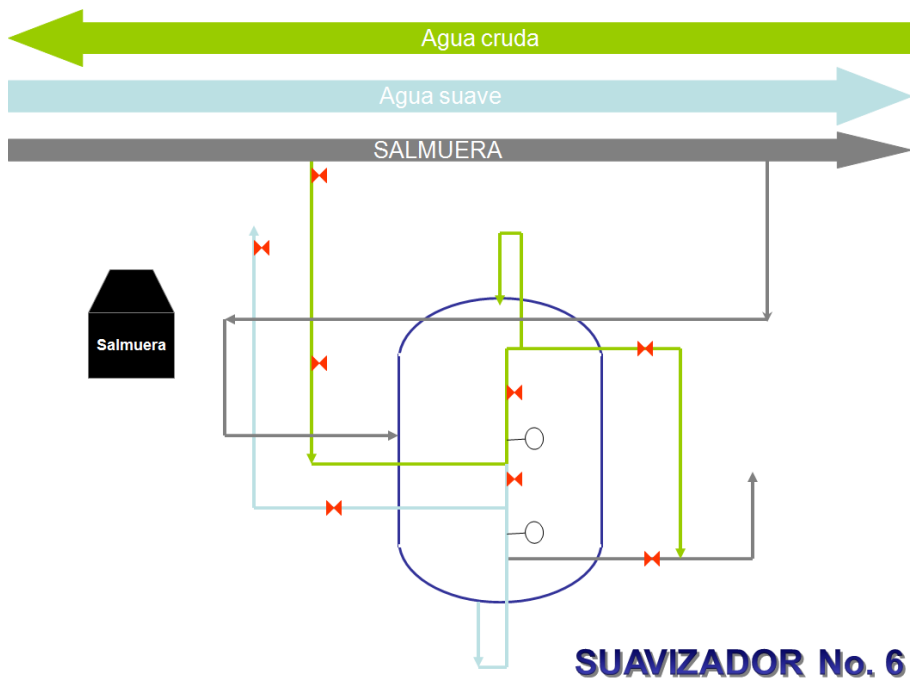
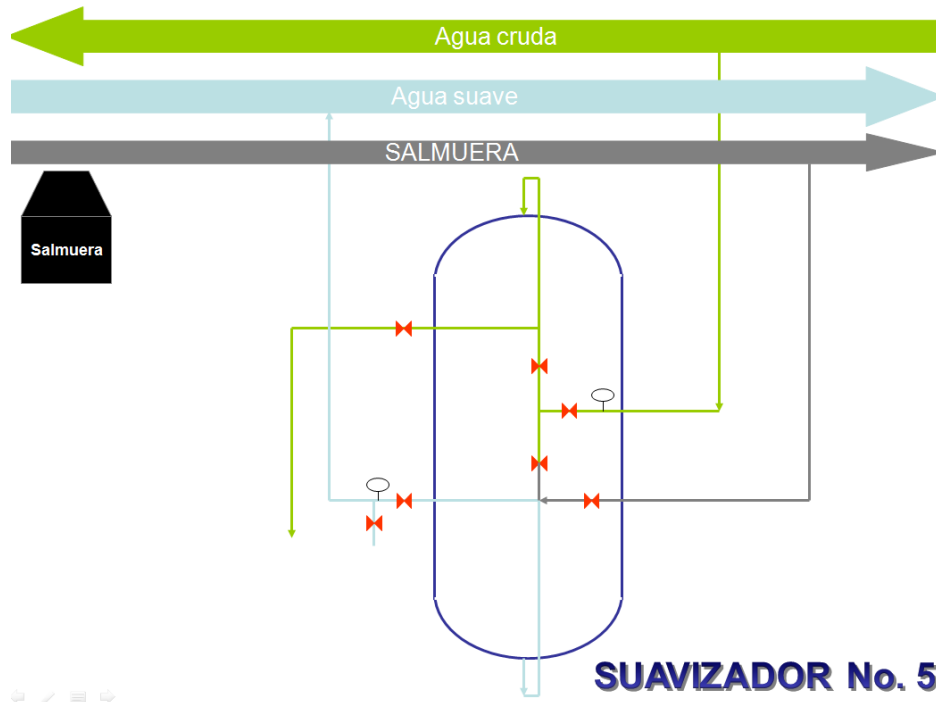


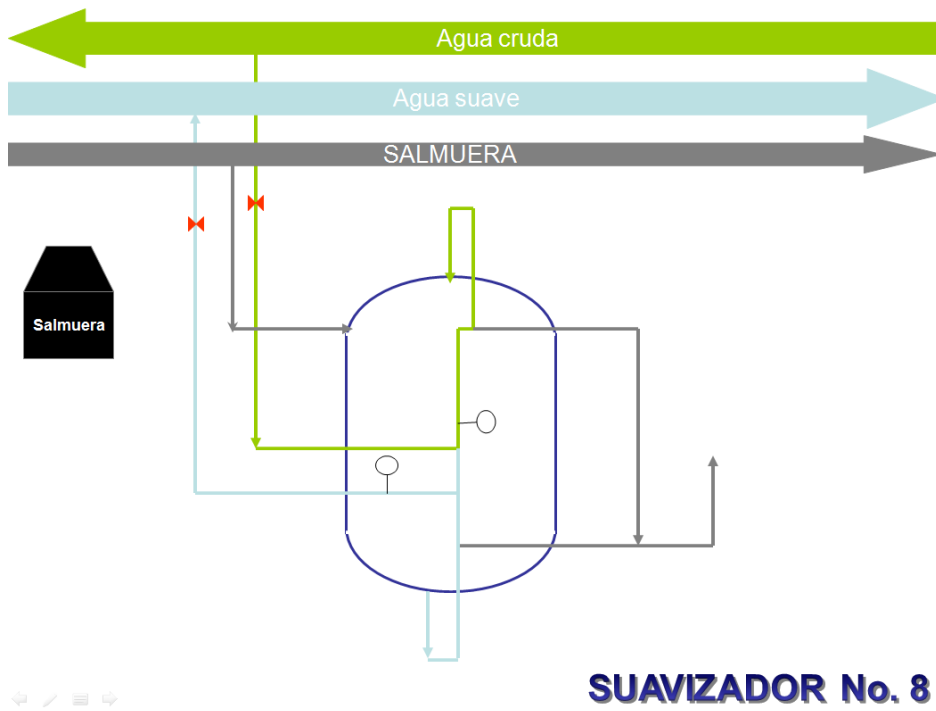
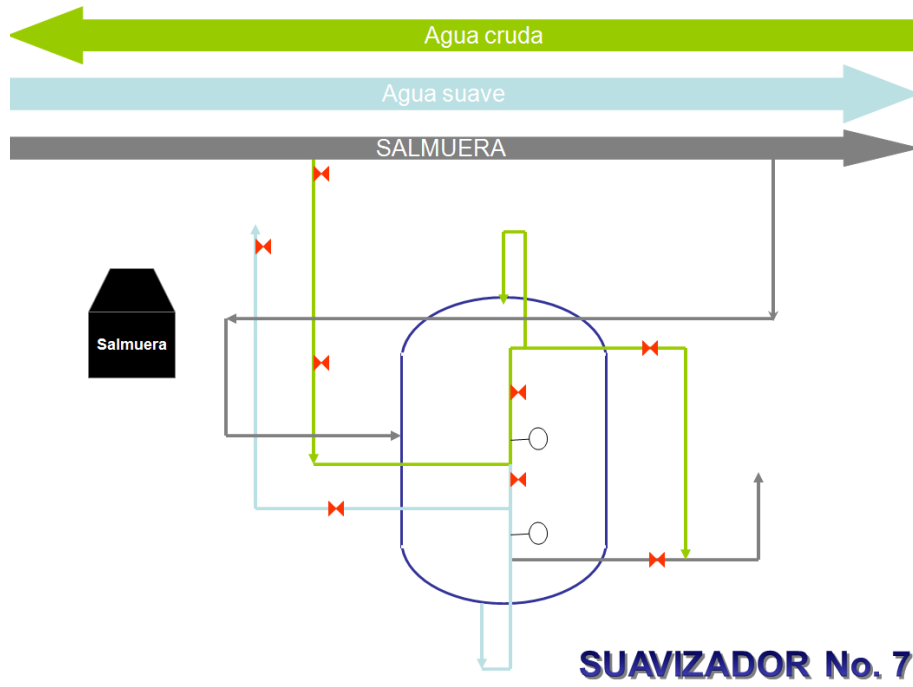
**SUAVIZADOR No. 1**



**SUAVIZADOR No. 2**



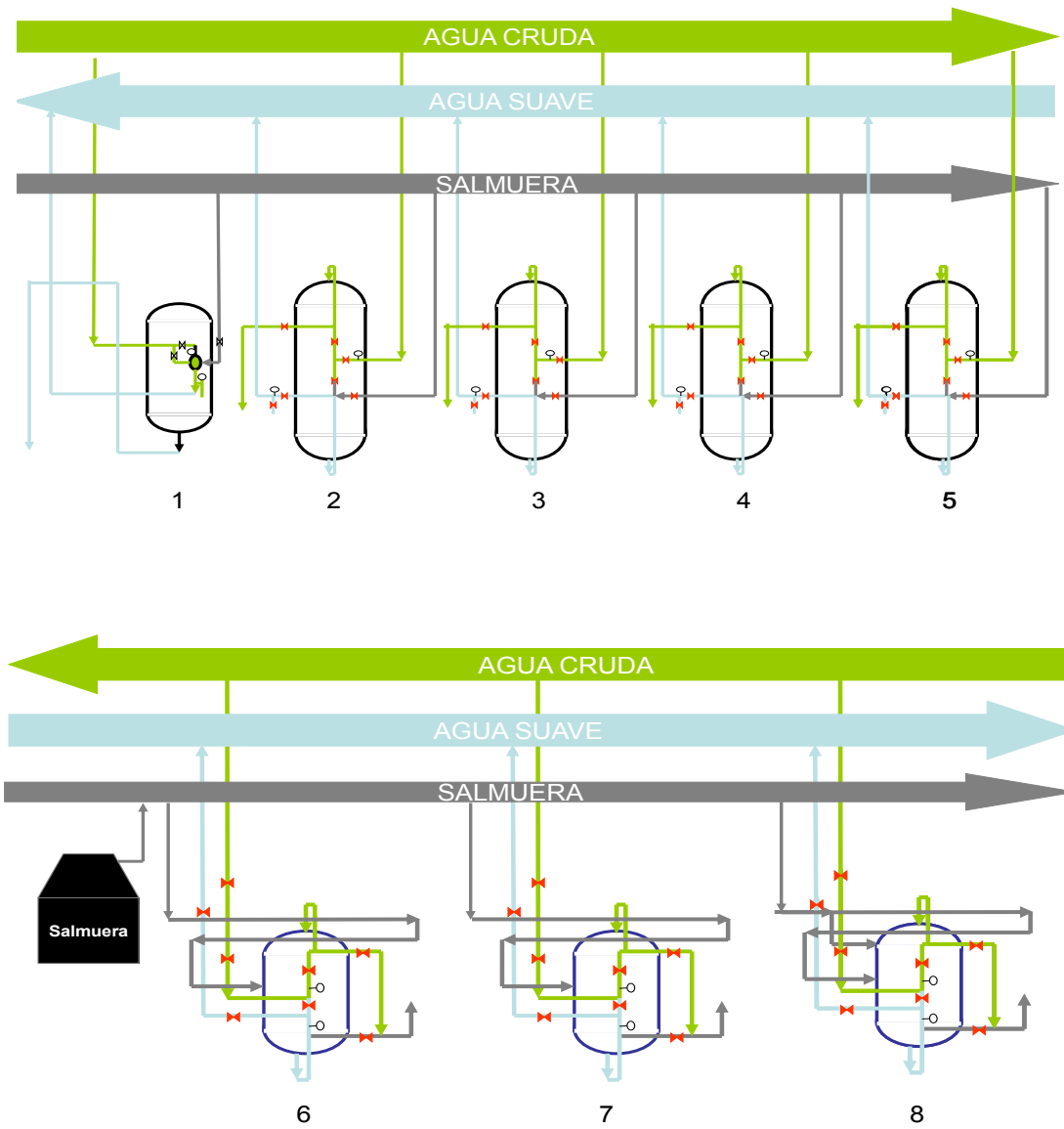




Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de arreglo de suavizadores

**DIAGRAMA DE SUAVIZADORES**



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Carta de trazabilidad del medidor de flujo patrón

#### Especificaciones técnicas

Rango de medición	100 ... 8.000 m³/h
Precisión	±2 %
Capacidad de lectura	según modelo
Versiones	Versión con brida / con manguito
Carcasa	polipropileno
Color	gris
Temperatura ambiental	0 ... +80 °C
Norma	DIN EN ISO 5167 / ISA 1932

#### Versiones

	Diámetro nominal	Rango	Capacidad de lectura	Versión con brida	Versión con manguito
Versión corta	Ø 160	100-1500 m³/h	50 m³/h	PCE-VR-160KF	PCE-VR-160KM
	Ø 200	200-2500 m³/h	50 m³/h	PCE-VR-200KF	PCE-VR-200KM
	Ø 250	300-3500 m³/h	50 m³/h	PCE-VR-250KF	PCE-VR-250KM
Versión larga	Diámetro nominal	Rango	Capacidad de lectura	Versión con brida	Versión con manguito
	Ø 110	100-700 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-110LF	PCE-VR-110LM
	Ø 125	100-1000 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-125LF	PCE-VR-125LM
	Ø 140	200-1250 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-140LF	PCE-VR-140LM
	Ø 160	200-1500 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-160LF	PCE-VR-160LM
	Ø 180	300-2000 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-180LF	PCE-VR-180LM
	Ø 200	300-2500 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-200LF	PCE-VR-200LM
	Ø 225	500-3000 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-225LF	PCE-VR-225LM
	Ø 250	500-4000 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-250LF	PCE-VR-250LM
Ver / imprimir la tabla con las diferentes versiones	Ø 280	1000-5000 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-280LF	PCE-VR-280LM
	Ø 315	1000-6000 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-315LF	PCE-VR-315LM
	Ø 355	1000-8000 m³/h	100 m³/h	PCE-VR-355LF	PCE-VR-355LM

Fuente: datos originales.

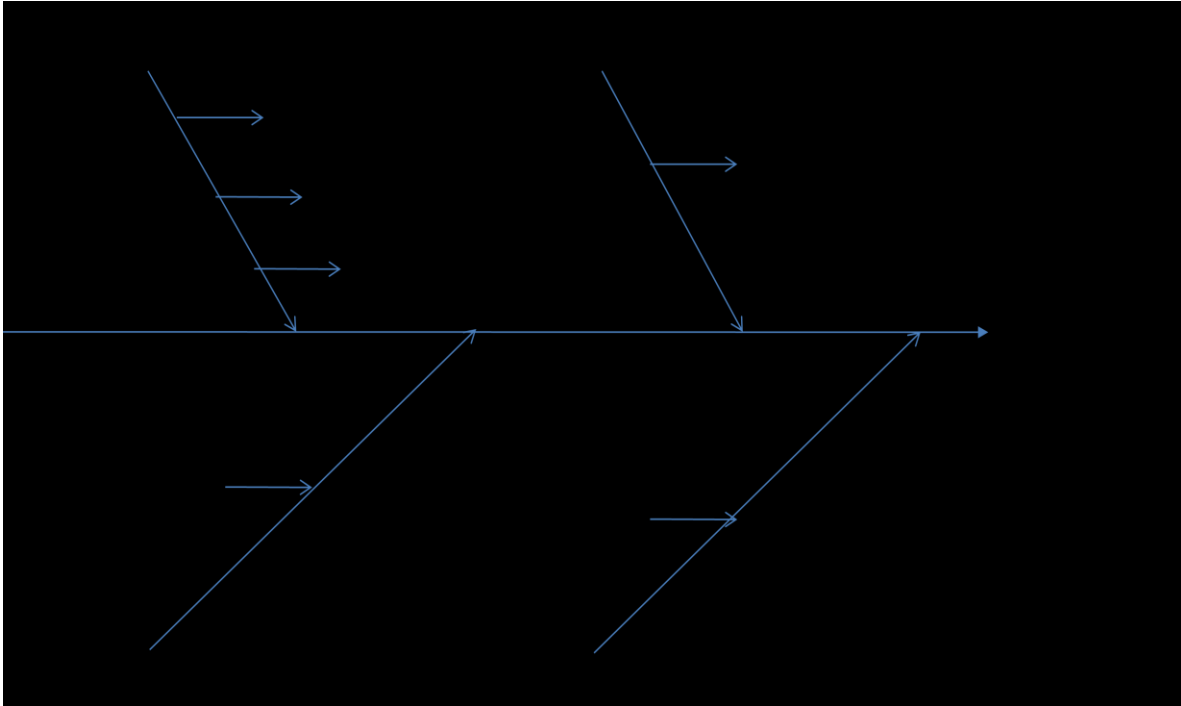
Apéndice 4. **Precisión de contadores de agua**

<b>Contador</b>	<b>Precisión</b>
Patrón	<b>2%</b>
Suavizador 8	<b>3%</b>
Entrada a suavizadores	<b>3%</b>
Salida de suavizadores	<b>10%</b>

Fuente: datos originales.

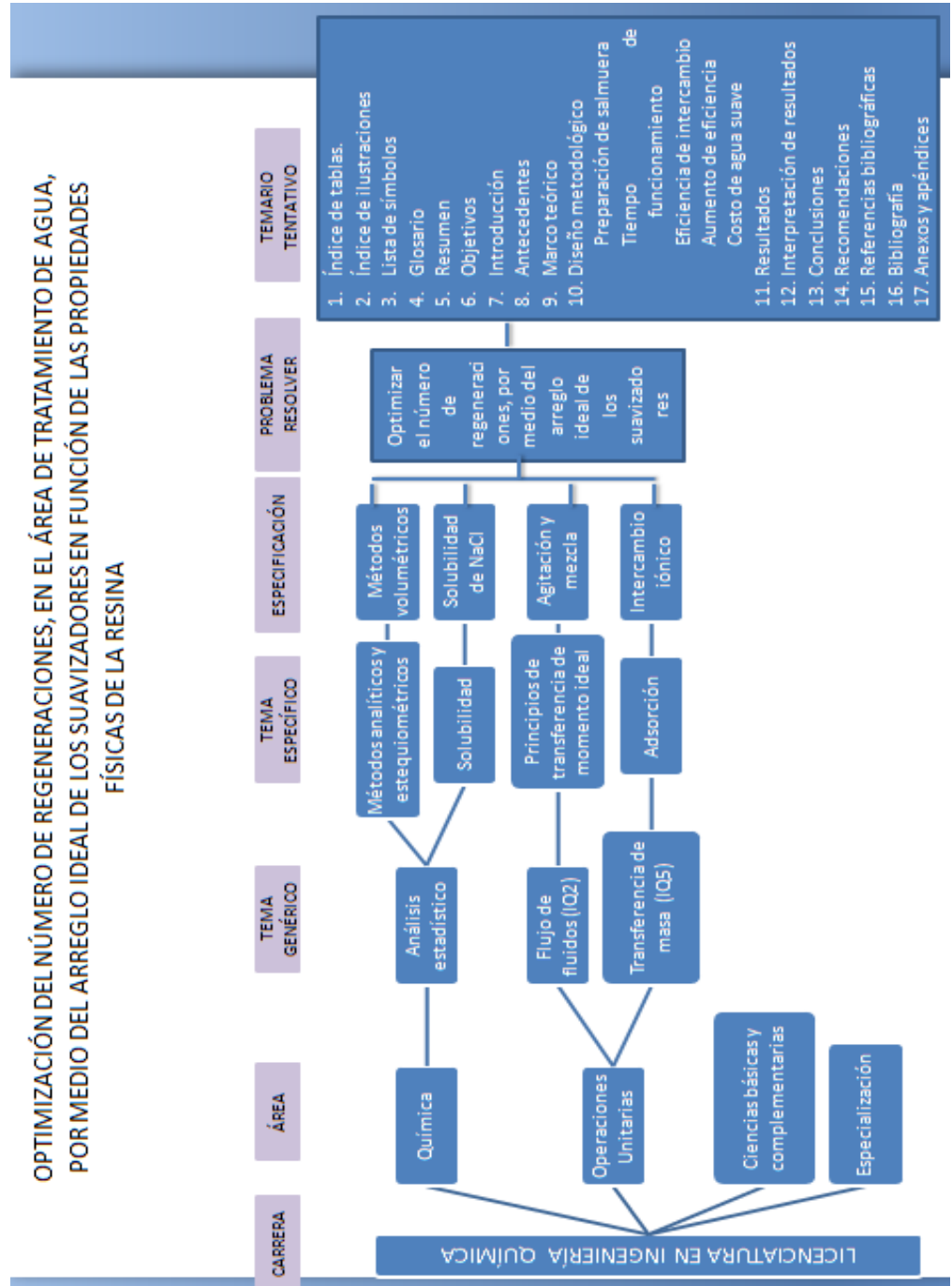


Apéndice 5. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Diagrama metodológico



Fuente: elaboración propia.