



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“DETERMINACION DE PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA LA REMOCIÓN DE IONES CALCIO MEDIANTE UN MODULO DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO EN UNA SOLUCIÓN MODELO”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autor:

Carlos Rodrigo Muñoz Angeles

Asesor:

Ing. Mg. Ricardo Rodríguez Vílchez.

Lima - Perú

2021

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Ing. Mg. Ricardo Rodríguez Vílchez, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis de los estudiantes:

- Muñoz Angeles Carlos Rodrigo

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: Determinación de Parámetros Óptimos Para la Remoción de Iones Calcio Mediante un Módulo de Resinas de Intercambio Iónico en una Solución Modelo para aspirar al título profesional de: Ingeniero Ambiental por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** al o a los interesados para su presentación.

Ricardo Rodríguez Vílchez

Asesor

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a mis padres, quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional para poder alcanzar ser una persona profesional y ser ejemplo para mis hermanos, además de ser motivo por quienes seguir creciendo día a día como persona y en el ámbito profesional.

AGRADECIMIENTO

A mi padre celestial, por permitirme llegar hasta esta etapa de la vida.

A mis familiares, amigos y personas que conocí a lo largo de esta travesía en el desarrollo de la tesis experimental, quienes siempre me alentaron y presionaron para poder culminar el presente trabajo y lograrlo profesionalmente.

Al Ing. Mg. Ricardo Rodríguez Vílchez por brindarme pautas y guiarme el proceso de titulación.

Y un agradecimiento especial al Dr. Juan Taumaturgo Medina Collana quien me brindó los conocimientos y recursos necesarios para poder hacer realidad este trabajo, además de las palabras alentadoras para no darme por vencido en cada procedimiento que desarrollaba, a quien estoy agradecido.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Realidad Problemática	11
1.2 Bases Teóricas	19
1.3 Formulación del problema	24
1.4 Justificación	25
1.5 Objetivos	25
1.6 Hipótesis	26
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	27
2.1 Tipo de investigación	27
2.2 Población y muestra	28
2.3 Técnicas, instrumentos de recolección y análisis de datos	29
2.4 Procedimiento de montaje y fase experimental	30
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	35
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	76
4.1 Discusión	76
4.2 Conclusiones.....	78
Referencias.....	79
ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Diseño Factorial 2^3	28
Tabla 2 Determinación Dureza Cálctica	42
Tabla 3 Resultado Corrida Experimental N°1	44
Tabla 4 Resultado Corrida Experimental N°2.....	48
Tabla 5 Resultado Corrida Experimental N°3.....	52
Tabla 6 Resultado Corrida Experimental N°4.....	56
Tabla 7 Resultado Corrida Experimental N°5.....	60
Tabla 8 Resultado Corrida Experimental N°6.....	64
Tabla 9 Resultado Corrida Experimental N°7.....	68
Tabla 10 Resultado Corrida Experimental N°8.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del Módulo de Intercambio Iónico	34
Figura 2 Residuos vs Ajustes.....	35
Figura 3 Histograma	36
Figura 4 Grafica de Probabilidad Normal.....	37

Figura 5 Residuo vs Orden	38
Figura 6 Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados	39
Figura 7 Grafica de Efectos Principales Para Remoción Calcio	40
Figura 8 Gráfica de Interacción Para Remoción Calcio	41
Figura 9 Experiencia 1 - Dureza vs Tiempo	45
Figura 10 Experiencia 1 - Conductividad vs Tiempo	46
Figura 11 Experiencia 1 - pH vs Tiempo.....	47
Figura 12 Experiencia 2 - Dureza vs Tiempo	49
Figura 13 Experiencia 2 - Conductividad vs Tiempo	50
Figura 14 Experiencia 2 - pH vs Tiempo.....	51
Figura 15 Experiencia 3 - Dureza vs Tiempo	53
Figura 16 Experiencia 3 - Conductividad vs Tiempo	54
Figura 17 Experiencia 3 - pH vs Tiempo.....	55
Figura 18 Experiencia 4 - Dureza vs Tiempo	57
Figura 19 Experiencia 4 - Conductividad vs Tiempo	58
Figura 20 Experiencia 4 - pH vs Tiempo.....	59
Figura 21 Experiencia 5 - Dureza vs Tiempo	61
Figura 22 Experiencia 5 - Conductividad vs Tiempo	62
Figura 23 Experiencia 5 - pH vs Tiempo.....	63

Figura 24 Experiencia 6 - Dureza vs Tiempo	65
Figura 25 Experiencia 6 - Conductividad vs Tiempo	66
Figura 26 Experiencia 6 - pH vs Tiempo.....	67
Figura 27 Experiencia 7 - Dureza vs Tiempo	69
Figura 28 Experiencia 7 - Conductividad vs Tiempo	70
Figura 29 Experiencia 7- pH vs Tiempo.....	71
Figura 30 Experiencia 8 - Dureza vs Tiempo	73
Figura 31 Experiencia 8 - Conductividad vs Tiempo	74
Figura 32 Experiencia 8 - pH vs Conductividad.....	75
Figura 33 Módulo de Intercambio Iónico	88
Figura 34 Tanques de Resinas de Intercambio Iónico	89
Figura 35 Equipos y materiales	90
Figura 36 Instrumentos Para Titulación EDTA.....	91
Figura 37 Materiales e Instrumentos Titulación EDTA	92

ÍNDICE DE ECUACIONES

- **Porcentaje de remoción..... 23**
- **Ecuación ppm $CaCO_3$ 23**
- **Reacción en resina 24**

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar los parámetros de operación óptimos de un módulo de resinas de intercambio iónico para la remoción de iones calcio de una solución modelo para así mejorar las condiciones de operación de equipos convencionales a escala industrial.

Se construyó un módulo de resinas de intercambio iónico a escala piloto, el cual cuenta con una estructura metálica donde se montó los equipos y materiales, se utilizó un tanque de almacenamiento principal con capacidad de 10 L y dos tubos de almacenamiento de resinas de 6 L, bomba de agua, resina de intercambio iónico Lewatit S1567 y accesorios. Se cuantificó los sólidos totales disueltos, pH, conductividad y la concentración de iones calcio del agua tratada.

Los parámetros de operación evaluados fueron: peso de resina, flujo volumétrico y concentración de la solución modelo. Mediante el uso del software Minitab se determinaron los valores óptimos de cada parámetro, los cuales se establecieron en las siguientes medidas: Peso de resina (1770 gr), Flujo volumétrico (1.3 ml/s) y concentración (0.5 g/L), bajo estas características de los parámetros del equipo de intercambio iónico brindo mejores resultados en el proceso de obtención de agua libre de dureza cálcica.

Palabras clave: Resinas, intercambio iónico, agua blanda.

SUMMARY

This research aimed to determine the optimal operating parameters of an ion exchange resin module for the removal of calcium ions from a model solution in order to improve the operating conditions of conventional equipment on an industrial scale.

A pilot scale ion exchange resin module was built, which has a metallic structure where the equipment and materials were assembled, a main storage tank with a 10 L capacity and two 6L resin storage tubes, pump of water, Leawtit S1567 ion exchange resin and accessories. The total dissolved solids, pH, conductivity and the concentration of calcium ions of the treated water were quantified.

The operating parameters evaluated were: resin weight, volumetric flow and concentration of the model solution. Using Minitab software, the optimal values of each parameter were determined, which were set in the following measures: Resin Weight (1770 gr), Volumetric Flow (1.3 ml/s) and Concentration (0.5 g/L), under these characteristics of the parameters of the ion exchange equipment provide better results in the process of obtaining water free of calcium hardness.

Keywords: Resins, ion exchange, soft water.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad Problemática

El agua es fundamental para la vida y la proporción de agua dulce presente en el planeta es reducida, la preservación de la calidad de agua dulce es valiosa para el abastecimiento de agua de consumo, elaboración de alimentos, uso doméstico y fines recreativos. La condición y calidad del agua puede ser influenciada por presencia de contaminantes como productos químicos, agentes infecciosos o radiaciones. El progreso constante de provisión de agua, limpieza y una adecuada dirección de los recursos hídricos podría fomentar el crecimiento económico de las naciones y colaborar con el decrecimiento de la pobreza. (OMS, 2019)

El fuerte aumento poblacional, variación demográfica, cambio climático y el incremento de la carencia de agua, conjeturan retos para la mayoría de métodos de aprovisionamiento de agua. Al 2025, gran parte de los habitantes del mundo vivirá en sectores con carencia y dificultad de acceso de agua. Por lo que técnicas para la reutilización de aguas con el fin de reponer nutrientes, agua o energía se están volviendo una estrategia significativa. (OMS, 2019)

El origen de las fuentes de agua potable y de regadío seguirán desarrollándose con el pasar de los años con una comparecencia cada vez superior en orígenes subterráneos y fuentes alternas como aguas servidas conllevando a que la gestión total de todos los recursos hídricos tendrá que mejorar para asegurar el suministro y condición. (OMS, 2019)

Siempre encontraremos al recurso natural más importante y la base de toda forma de vida, con presencia de sales que se encuentran en equilibrio químico, las cuales dependen de factores como el pH, temperatura, concentración de sales y especies químicas. Estas al ser modificadas, tendera a llegar a una nueva condición de equilibrio, con una concentración de sales distintas. (Cortijo Herrera, 2013)

En su mayoría, las empresas utilizan agua para sus procesos industriales o en servicios de planta, algunos de los cuales requieren de ciertas características y concentraciones específicas en el agua como pH, dureza, temperatura, entre otros, previo ingreso a calderas o algún otro proceso. Debido a la interacción que existe entre el agua y el medio de transporte, pueden llegar a producirse incrustaciones o corrosión en las tuberías, tanques y equipos.

El presente trabajo de investigación tiene como referencia artículos científicos, tesis y distintos trabajos investigativos que sirvieron de alusión para la redacción del informe como para la elaboración del módulo piloto de intercambio iónico, tomando las recomendaciones y experiencias descritas es los trabajos estudiados.

La tesis titulada “Variación de Concentración de Cationes del Agua Dura al Paso por la Resina Catiónica” publicada por (Quispe Puma, 2016) en la Universidad Nacional del Altiplano; busco reducir la dureza del agua, que es bombeada a la ciudadela de la UNA, cuya dureza es de 556.40 ppm de $CaCO_3$, para ello se empleó el equipo de intercambio iónico del laboratorio de procesos, teniendo como resultado la variación porcentual al caudal más bajo en el intercambiador

catiónico fue de 83%. A su vez el rendimiento del intercambiador, fue de 61.36% para dureza total, 77.09% para ion calcio Ca^{2+} y 85.21% para magnesio Mg^{2+} . Además, se estimó que el tiempo para la regeneración de las resinas se da en periodos de 2 – 2.5 horas para uso continuo, esto debido a que las resinas llegan a saturarse rápidamente, ya que la capacidad y cantidad de resina fue diseñada para tratar aguas de dureza baja con 10 ppm.

El estudio titulado “Eficiencia de la Resina Lewatit Monoplus M600 (Guerrero Vejarano & Anaya Fernández, 2019) tuvo como propósito determinar la eficacia de la resina de intercambio iónico Lewatit Monopls M600, mediante la construcción de columnas de intercambio iónico de diámetro 1”, 0.05 L en volumen de resina, con altura de 40 cm, donde se determinó la eficiencia de las columnas de intercambio iónico, manejando dos variables, tiempo de operación y concentración de nitratos, teniendo como resultados una eficacia de la resina más alta de 99.55% en la concentración más baja de 6.45 meq de NO_3 en un tiempo de 30min y remoción más baja de 18.61% en la concentración más alta de 16.13 meq de NO_3 operado a 120 min. Los datos recopilados, sirven para estimar el tiempo de operación óptimo de la columna de intercambio iónico.

El estudio titulado “Uso de resina ácida fuerte Purolite C100E para la eliminación de la dureza permanente del agua – Factores que afectan la capacidad de intercambio iónico” (Bandrabur, et al., 2012) exploró el rendimiento y capacidad de la resina PuroliteC100E recomendada para ablandamiento de aguas en industrias alimentarias, el trabajo se realizó

mediante un intercambiador en modo batch, donde se determinó que las condiciones óptimas de funcionamiento se dan entre un pH de 7.1, temperatura ambiente de 25°C, con un tiempo de contacto de 360 min, bajo esas condiciones la capacidad de retención de iones calcio Ca^{2+} , tuvo una eficiencia de remoción de 85.7%. Adicionalmente, afirma que la capacidad de intercambio catiónico es independiente del pH de la solución inicial y que la resina usada en el estudio, presenta un considerable rendimiento en el proceso de ablandamiento de agua para toda la serie de pH en aguas naturales a temperatura ambiente.

El estudio titulado “Intercambio Iónico de resina compuesta de poliestireno sulfonado para la eliminación de dureza de calcio” (Fathy, et al., 2015) busco la eliminación de dureza cálcica en una solución sintética preparada como solución de stock en un rango inicial de pH entre 2.0 y 5.0, mediante el proceso de intercambio iónico formando resinas compuestas o preparadas a base de resinas catiónicas de poliestireno, las cuales fueron capaces de eliminar los iones calcio en un 98% a pH neutro. Por lo que aconseja utilizar este tipo de resinas para la desalinización de agua salobre de iones calcio.

El estudio titulado “Uso de resina de intercambio catiónico débil Lewatit S8528 como alternativa a las resinas de intercambio iónico fuertes para la eliminación de sal de calcio” (Coca, et al., 2009) indago el uso de resinas alternativas a las resinas de carácter fuerte, en 2 soluciones de betarraga azucarera mediante intercambio iónico, donde se trabajó a 4 temperaturas, 20°C, 40°C, 60°C y 80°C, teniendo como resultado que para experimentos a más de 60°C la eficiencia de descalcificación fue alrededor del 100% independientemente del caudal y

concentración de calcio del jugo crudo, por lo que se llevó experiencias a más de 80°C. Amabas soluciones presentaron un pH similar, entre 0.1 y 9.1. Se puede indicar que la descalcificación puede verse favorecidas mediante la combinación de una alta temperatura y caudal o alta temperatura y concentración de calcio, permitiendo la reducción del tamaño del suavizante.

“Aplicación de modelos matemáticos para la eliminación del intercambio iónico de calcio iones de soluciones de cromato de potasio de resina Amberlite IRC 748 en una columna de lecho fijo continuo” estudio realizado por (Yu, et al., 2015) investigo el rendimiento de la resina Amberlite IRC 748 en la eliminación de iones calcio de solución de cromato de potasio altamente concentrada en una columna de lecho fijo, donde sostiene que la capacidad de intercambio incrementó con la concentración original de iones calcio y la altura del lecho, sin embargo disminuyó a medida que aumentaba el caudal. Las predicciones del modelo Thomas y Yoon-Nelson fueron las adecuadas de acuerdo a los resultados de los datos experimentales bajo los parámetros estudiados, lo que los hace apropiados para este tipo de método y modelo de intercambio iónico. Las curvas de rupturas fueron determinadas en las siguientes alturas de lechos, 15cm, 20cm y 25cm, encontrando la efectividad de la resina en la eliminación de iones calcio, donde el efecto de purificación se extendió cuando la distancia de la columna aumentó, el tiempo de contacto fue más bajo, indicando el agotamiento más rápido del lecho fijo. Además, cuando la altura del lecho se redujo destacaron los fenómenos de dispersión axial de transferencia de masa, disminuyendo la difusión de iones calcio pues no existía tiempo suficiente para que la difusión se extendiera en todo el lecho.

En la tesis titulada “Diseño de unidades de desmineralización del agua como medio de enfriamiento” (Araujo Ulloa, 2015) investigo el método más adecuado para reducción de $CaCO_3$ y SiO_2 para agua de enfriamiento en motores de combustión interna mediante intercambio iónico y osmosis inversa, donde sostiene que las resinas catiónicas y aniónicas fuertes tienen una alta capacidad de intercambio y retención de iones, pues logran disminuir gran parte de la dureza hasta en un 99%, lo que se reflejó en la combinación de métodos, reduciendo la concentración de 216.4 ppm $CaCO_3$ a 0.6 ppm $CaCO_3$.

El estudio titulado “Factores que influyen en el comportamiento cinético y de equilibrio del intercambio iónico de sodio con resina catiónica de ácido fuerte” (Millar, et al., 2016) informa sobre el tratamiento de intercambio ionio de soluciones de cloruro de sodio en relación del uso tecnologías como la resina para la desalinización de agua salobre, se estudió la resina catiónica de ácido fuerte Dow Marathon C para la determinación de la capacidad de adsorción de sodio y evaluar los fundamentos del proceso de intercambio iónico involucrado. Se demostró que las condiciones de pruebas por lotes eran importantes con la normalidad constante de solución, masa de la resina variable, las cuales son posiblemente los enfoques más adecuados para estudios de intercambio iónico. Además, la ecuación isotérmica de Langmuir fue inexacta incluso en un enfoque lineal con mínimos cuadrados para simular datos experimentales.

La tesis titulada “Capacidad de resina Amberlite IR-120 para mejorar la calidad de agua subterránea en la urbanización San Sebastián – Comas 2017” publicado por (Ramos Salcedo, 2017); tuvo como objetivo mejorar la calidad del agua subterránea para consumo humano en la urbanización San Sebastián – Comas usando la resina catiónica Amberlite IR-120 por medio de un equipo de ablandamiento a escala piloto. Se afirma que se logró bajar la dureza de 724 mg/L a 20.1 mg/L y ajustar el pH de 6.08 a 7.16, cumpliendo con los valores de dentro de los LMP de la normativa nacional para agua de consumo humano, logrando una remoción porcentual significativa de 97.2%. Además, afirma que el uso de la resina Amberlite IR-120 tiene la suficiencia para aumentar la calidad de agua subterránea en parámetros de dureza, pH y oxígeno disuelto.

En el estudio “Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizado de agua de refinería estatal esmeraldas” publicado por (Nevárez Rivadeneira, 2009) tuvo como objetivo comprobar las condiciones óptimas de regeneración de resinas de intercambio iónico mediante pruebas a escala laboratorio y análisis de dureza, alcalinidad, sílice, hierro y conductividad. Se uso 0.3N, 0.41N, 0.5N, 1N de concentración de ácido sulfúrico para capacidad de regeneración de resinas catiónicas y 50 ml de agua para determinar dureza cálcica mediante valoración EDTA. El autor señala que a 0.41N concentración de ácido sulfúrico se tiene una mayor disminución de propiedades del agua tratada por resinas catiónicas. También señala que, una vez regenerada las resinas, la capacidad de atrapar iones es superior al 80%. Se puede apreciar que el pH como la conductividad tienden a aumentar y luego

disminuir tras el paso por la resina catiónica debido a la descomposición del ácido anhídrido carbónico y agua que se origina dentro de este proceso.

El estudio “Eliminación de Ca (II) y Mg (II) de la solución de cromato de potasio en la resina sintética Amberlite IRC 748 por intercambio iónico” publicada por (Yu, et al., 2008) Tuvo como objetivo principal estudiar los parámetros que influyen en el intercambio iónico, como tiempo de agitación, pH de la solución, temperatura y dosis de resina además de cinética, equilibrio y parámetros termodinámicos. Las mediciones experimentales se realizaron en un intercambiador catiónico por lotes. Se sostiene que el intercambio iónico de calcio, aumento bruscamente en un rango de pH 8.5 - 9.5, se estimó una dosis mínima de 0.06 g para Ca (II) para el modelo planteado.

1.2 Bases Teóricas

- **Intercambio Iónico**

Son reacciones químicas en los que los iones no deseados en una solución acuosa son intercambiados equivalentemente por iones de carga similar de un sólido en un lecho fijo de resinas denominado intercambiador iónico. (Alvarez Valdez & Rado Parada, 2013)

- **Intercambio Catiónico**

Es el desplazamiento de un ion positivo de una solución por otro ion positivo proveniente de la resina de intercambio catiónico mediante el proceso de adsorción. (Quispe Puma, 2016)

- **Intercambio Catiónico en columna**

Estructura más habitual en el proceso de intercambio catiónico, es el modelo en el cual se dispone el intercambiador(resina) dentro de una columna vertical, por donde fluirá la solución a tratar. (Quispe Puma, 2016)

- **Resinas**

Las resinas son esferas sintéticas de materiales duraderos a las cuales se le integran grupos funcionales ionizables de carácter ácido o base. Dichos grupos diseñan y optimizan dependiendo de las aplicaciones que se pretendan obtener a través del intercambio iónico, son compuestas de material polimérico, que pueden ser de polímero acrílico o poli estireno. (Coruña, 2015)

- **Dureza del agua**

Es el agua que contiene un alto contenido de minerales, en particular sales de magnesio (Mg) y calcio (Ca) los cuales son los principales iones causantes de la dureza del agua. (Alvarez Valdez & Rado Parada, 2013)

- **Diseño de Experimentos**

Aplicación del método científico para originar conocimientos de un sistema o proceso, a través de pruebas proyectadas previamente. Esta técnica se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas de estadística y de ingeniería, que posibilitan entender mejores situaciones complejas de relación causa-efecto. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Experimento**

Es una alteración en las condiciones de ejecución de un método o proceso, que se realiza con el propósito de evaluar un efecto de alteración en una o varias características del producto o resultado. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Unidad Experimental**

Pieza(s) o muestra(s) que se emplean para formar un valor que sea característico del producto de la prueba, dependiendo del tratamiento que se analiza. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Variable(s) de respuesta**

Son propiedades de la calidad de un producto y/o variables que evalúan el desempeño de un proceso. Por medio de estas variables se entiende el efecto o resultados de cada prueba experimental. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Factores Controlables**

Son variables y/o características de los materiales y los procedimientos experimentales determinados o fijados en un nivel dado. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Factores No Controlables**

Son variables que no se pueden controlar durante el experimento o la operación habitual del proceso. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Factores Estudiados**

Son variables que se indagan en el experimento para estudiar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Diseño Factorial**

Es un diseño experimental que sirve para examinar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Niveles**

Son los diferentes valores que se establece a cada factor estudiado en un diseño experimental. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Error experimental**

Elemento del error aleatorio que refleja los errores del experimentador en la programación y realización de la prueba. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Error aleatorio**

Es la variación observada que no se puede aclarar por los factores estudiados; resulta del minúsculo efecto de los factores no investigados y del error experimental. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Matriz de diseño**

Es el orden formado por los tratamientos que serán experimentados, incluyendo las repeticiones (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Repetición**

Es efectuar más de una vez un tratamiento o combinación de factores. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Diseño Factorial 2³**

Es un tipo de diseño experimental que sirve para estudiar el efecto de tres factores que tienen sobre una o más variables de respuesta. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008)

- **Porcentaje de remoción**

$$\% R = \left(\frac{C_0 - C_f}{C_f} \right) \times 100\%$$

C_0 : Concentración inicial

C_f : Concentración final

- **Ecuación ppm $CaCO_3$**

$$\text{ppm } CaCO_3 = \frac{(ml \text{ EDTA}) \times (M \text{ EDTA}) \times (mmol \text{ CaCO}_3) \times 10^6}{\text{Alicuota}}$$

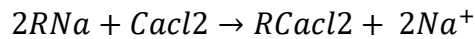
ml EDTA: volumen gastado de EDTA

M EDTA: molaridad carbonato de calcio

mmol: mili mol de carbonato de calcio

Alícuota: volumen muestreado

- **Reacción en resina**



R: Resina

Na: Sodio

CaCl: Cloruro de calcio

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Formulación del problema general

- ¿Cuáles serán los parámetros de operación óptimos de un módulo de resinas de intercambio iónico para alcanzar un mayor porcentaje de remoción de iones calcio en una solución modelo?

1.3.2 Formulación de los problemas específicos

- ¿Cuáles serán los niveles de experimentación más adecuados de los parámetros de operación seleccionados de un módulo de resinas de intercambio iónico para la remoción de iones calcio?
- ¿Cuál será el porcentaje de remoción de iones calcio usando un módulo de resinas de intercambio iónico?

1.4 Justificación

Mediante el presente trabajo se buscó identificar los parámetros óptimos de operación en un módulo piloto de intercambio iónico, con el fin de perfeccionar y determinar mejores condiciones de operación en este tipo de quipos, garantizando un mayor porcentaje de reducción de iones calcio, mejora del rendimiento y reducción de costos de operación, a su vez reducir posibles costos de mantenimiento por incrustaciones de calcio en las paredes de tuberías o quipos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Determinar los parámetros de operación óptimos de un módulo de resinas de intercambio iónico para la remoción de iones calcio de una solución modelo.

1.5.2 Objetivos específicos

- Establecer el rango de los niveles de experimentación más adecuados de los parámetros de operación como flujo volumétrico, concentración y peso del módulo de resinas de intercambio iónico para la remoción de iones calcio
- Determinar el porcentaje de remoción de iones calcio en un módulo de resinas de intercambio iónico.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

- La determinación de parámetros óptimos de operación de un módulo de resinas de intercambio iónico influye significativamente en la remoción de iones calcio

1.6.2 Hipótesis específicas

- La elección de los niveles de niveles de experimentación más adecuados de las variables de operación como el peso de resina, flujo volumétrico, concentración, del módulo de resinas de intercambio iónico influye significativamente en la remoción de iones calcio.
- La determinación del porcentaje de remoción de iones calcio permitirá conocer el grado de dureza cálcica de la solución modelo a las condiciones óptimas de operación del módulo de resinas de intercambio iónico.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

2.1.1 Según el propósito: Aplicada

Según (Vargas Cordero, 2009) esta investigación tiene como objetivo “resolver o mejorar una situación específica o particular, para comprobar un método o modelo mediante la aplicación innovadora y creativa de una propuesta de intervención”.

2.1.2 Según el diseño de investigación: Factorial

Según (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar , 2008) el diseño factorial tiene como fin estudiar diversos factores sobre una o diversas respuestas cuando se tiene la misma inclinación sobre todos los factores.

Tabla 1

Diseño Factorial 2³

N.º	X1	X2	X3
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fuente: Elaboración propia

2.2 Población y muestra

2.2.1 Población

- 80 litros de agua desionizada producida por la empresa “Ingeniería de membranas” ubicada en el Distrito de Carabaylo.

2.2.2 Muestra

- 10L de agua desionizada para la preparación de solución modelo para cada experimento.

2.2.3 Toma de muestra

- La toma de muestra que se realizo fue de carácter simple, pues se capto el agua en el sitio de descarga, plasmando cuantitativa y cualitativamente la composición del agua teniendo el volumen necesario para su disposición. (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003)

2.2.4 Materiales

- Los materiales utilizados para la construcción del equipo de intercambio iónico se muestran en el Anexo N°1.

2.2.5 Instrumentos de laboratorio

- Los instrumentos para análisis de parámetros in situ se muestran en los anexos N°2 y N°3.

2.3 Técnicas, instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1 Técnica

- La técnica utilizada fue la técnica cuantitativa de medición de datos, bajo la medición de dureza total en agua con EDTA por volumetría (Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales, 2007)

2.3.2 Instrumento de recolección de datos

- El instrumento utilizado para la recolección de datos fue la ficha de registro de datos del equipo de intercambio iónico.

2.3.3 Método de análisis de datos

Para el análisis y procesamiento de la información obtenida se utilizó el software Minitab 18, mediante el diseño de experimentos factorial 2^3 , el mencionado programa estadístico procesó los datos bajo diferentes combinaciones de parámetros (peso de resina, flujo y concentración) para determinar los efectos que tienen sobre la variable de respuesta (remoción de iones calcio) dando como producto los gráficos mostrados en el capítulo de resultados.

2.4 Procedimiento de montaje y fase experimental

El proceso experimental de la presente investigación consta de 3 partes: construcción del módulo de intercambio Iónico, preparación de equipos, instrumentos y materiales; Operación y recolección de datos; Procesamiento de información.

2.4.1 Construcción del módulo de intercambio iónico, preparación de equipos, instrumentos y materiales:

Durante esta etapa se adquirió los insumos a utilizar como cloruro de calcio, cloruro de magnesio y la resina de intercambio iónico. De la misma forma se enlistó y adquirió los materiales necesarios para construcción del equipo de intercambio iónico descritos en el anexo N.º1. También

se seleccionaron los equipos a utilizar durante el proceso como medidor de pH, medidor de conductividad, medidor de sst, baldes, agua a desionizada, vasos precipitados, bureta, piceta, pipeta, matraz, entre otros instrumentos de laboratorio descritos en el anexo N. °2 y N. °3.

La construcción del equipo de intercambio iónico, se inició montando las bases acrílicas en los espacios seleccionados para la instalación de los contenedores de agua y resina. Se midió las distancias que existe entre las columnas de la estructura metálica y se instaló los tubos de PVC para agua caliente, así como las válvulas de cierre distribuidas en partes específicas para garantizar el adecuado funcionamiento del equipo. El contenedor de resina y tanque de almacenamiento de agua, fueron perforados cuidadosamente a fin de no dañar las paredes acrílicas y ocasionar posibles fugas de agua. Una vez perforados se instaló los tubos de PVC correspondientes para su llenado.

La instalación de uniones universales fue necesaria para el retiro de partes del equipo en ocasiones de limpieza y mantenimiento por alguna ruptura de tubería o paredes de acrílico dañadas. El montaje de la bomba de agua se realizó en la base más baja del equipo, colocando de la misma forma uniones universales. Una de las partes más importantes del equipo, fue la instalación de la tobera en el tanque de almacenamiento de la resina, esta tobera cumple la función de evitar el paso de las esferas de resina de intercambio iónico debido al tamaño reducido que estas poseen, evitando pérdidas de volumen en el lecho, obstrucción de tuberías y daño en la bomba de agua.

Finalmente, una vez colocados todos los tubos y accesorios en la estructura metálica, se procedió a sujetarlos con cintillos y a comprobar que no exista fuga alguna en las tuberías, las pequeñas fugas existentes se sellaron con pegamento AyB. Se realizó una prueba con agua corriente en el equipo para garantizar el correcto funcionamiento de este y verificar que no existan pérdida de agua en todas las entradas y conexiones del equipo.

2.4.2 Operación y recolección de datos:

Para la etapa de operación del equipo de intercambio iónico, se realizaron corridas experimentales previas a las corridas originales con el fin de establecer algunos parámetros de operación óptimos que se adecuen a las características del equipo construido. Para ello, se preparó una solución sintética, en la cual se disolvió cloruro de calcio (Ca^{+2}) en 2 concentraciones en agua desionizada. Una vez determinado los parámetros de operación se procedió a la creación de la matriz experimental del modelo escogido para la investigación (2^3). Se preparó el equipo para realizar la prueba experimental, para ello se lavó el equipo con agua destilada,

evitando cualquier residuo de agua con calcio, pues de esta manera las tuberías quedaron limpias garantizando un mejor resultado. Este paso fue repetitivo después de cada corrida experimental con el fin de reducir los errores experimentales. El nivel de concentración, peso y flujo fueron establecidos en medidas fijas colocados en la matriz experimental. Las corridas experimentales con experiencias semejantes se dividieron en bloques con el objetivo de minimizar el tiempo de cada experiencia y evitar acciones repetitivas y arduas de limpieza.

(se pesó las resinas y se separaron) Las resinas fueron pesadas y separadas en 2 bloques, el primero de 1770 g y el segundo de 850 g, los bloques fueron regenerados al finalizar cada experimento. Se ajustó el flujo del equipo a 2 niveles (1.3 ml/s – 5 ml/s) correspondientes a cada experiencia según el cuadro factorial diseñado. De la misma forma, la concentración del agua sintética fue realizada en 2 niveles (0.5 g/L– 1.5 g/L).

Para la primera prueba experimental, se regeneró la resina con 200 g de cloruro de sodio, para ello se mezcló la sal y la resina en un balde con 5 lt de agua desionizada y se procedió a agitar el balde fuertemente durante 5-10 minutos, una vez finalizada la agitación se filtró el agua y se realizó 4 enjuagues posteriores, cada uno con 5l de agua desionizada, hasta alcanzar la conductividad requerida. Una vez regenerada la resina, se procedió a llenar el contenedor y preparar la solución sintética, la solución se preparó en concentraciones de 0.5 mg/l y 1.5 mg/l, se agitó fuertemente, se midió y anotó la conductividad obtenida. Una vez colocado la resina y el agua sintética en el contenedor, se lavó y preparó los vasos precipitados para la recolección de muestras del equipo y se procedió al encendido del equipo. Se tomó una muestra de agua en el tiempo 0 y cada 15 minutos una vez puesto en funcionamiento. Cada muestra fue de 2 vasos precipitados teniendo 6 envases por punto muestreado, generando 3 repeticiones por punto teniendo un total de 12 muestras por experimento. Durante la etapa de operación mantuvo monitoreo constante de la bomba de agua y la circulación normal del agua por las tuberías.

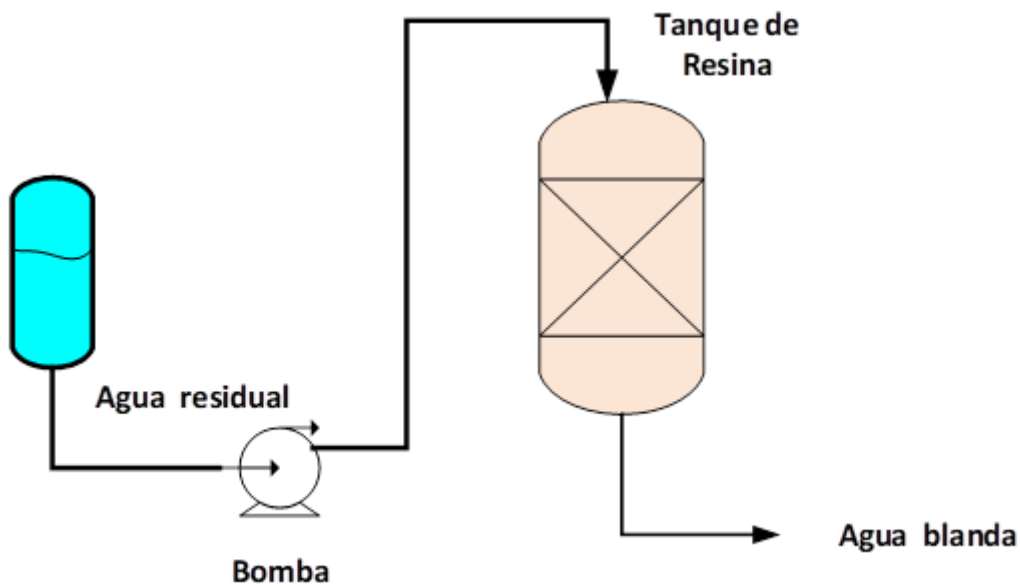
Este procedimiento se efectuó de manera repetitiva en los posteriores experimentos con la única variación de concentración, flujo y resina empleada en las corridas experimentales.

2.4.3 Procesamiento de Información:

Los datos obtenidos fueron anotados en la hoja de recolección de datos para posteriormente ser tabulados en Excel, las tablas obtenidas se pasaron al programa minitab 18, donde se ajustó el modelo factorial requerido en esta investigación, se estableció los parámetros y datos usados en los experimentos y se asignó las medidas necesarias para las gráficas requeridas, teniendo como resultados los siguientes cuadros y gráficos presentados a continuación.

Figura 1

Esquema del Módulo de Intercambio Iónico



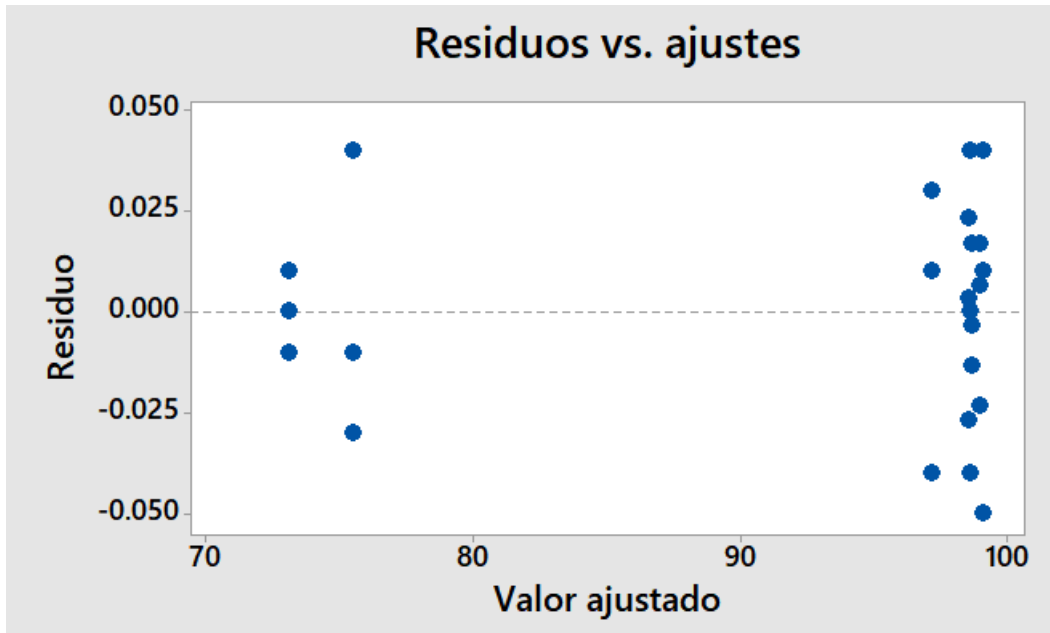
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Graficas de residuos para Remocion de Calcio

Figura 2

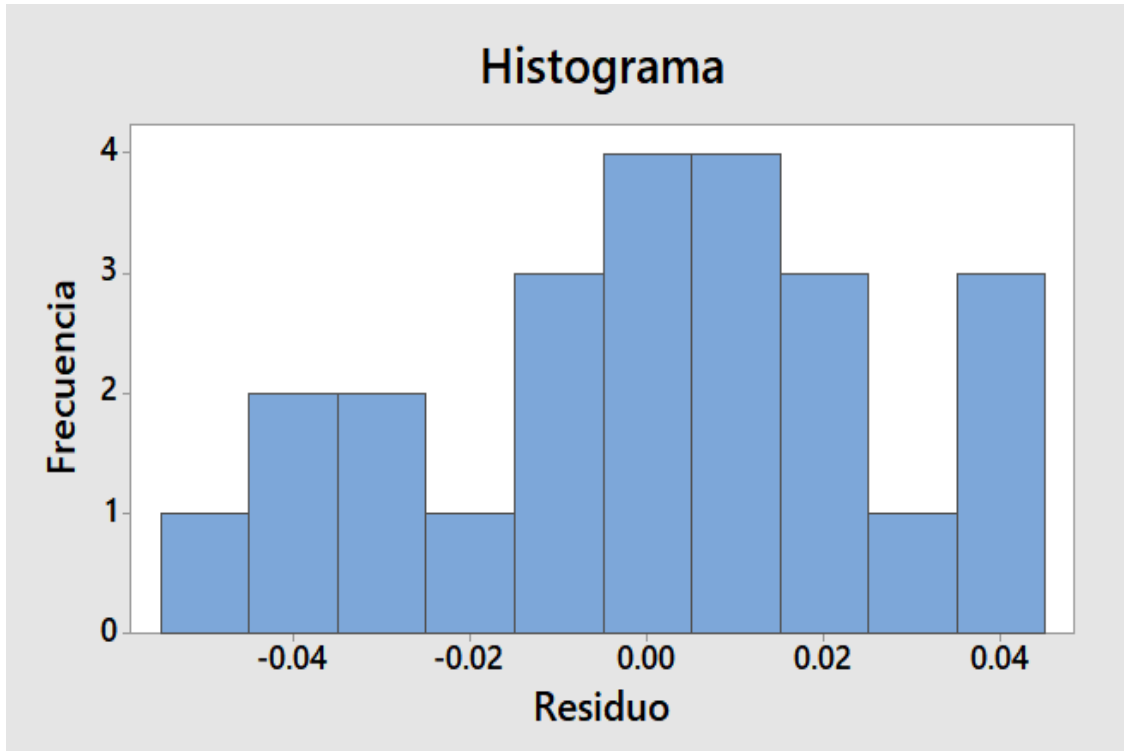
Residuos vs Ajustes



Nota. La grafica de residuos vs ajustes, sirve para verificar la distribución aleatoria de los residuos y tiene una varianza constante, donde es recomendable que estén alejados del cero para ambos lados del gráfico, y que haya presencia de patrones no detectables entre los puntos, garantizando los supuestos del modelo.

Figura 3

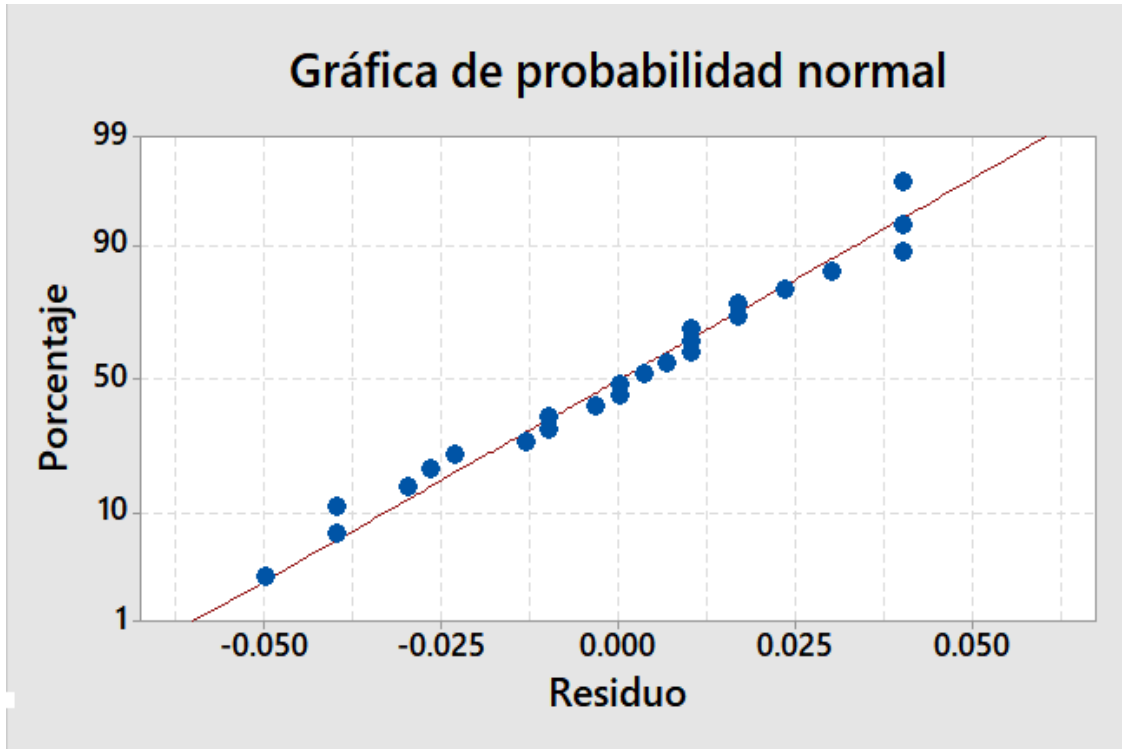
Histograma



Nota. La grafica de histograma muestra que la distribución de residuos no contiene suficientes puntos de datos para poder para mostrar de manera fiable valores atípicos o asimetría en los puntos por lo que se recomienda usar la gráfica de probabilidad normal de residuos

Figura 4

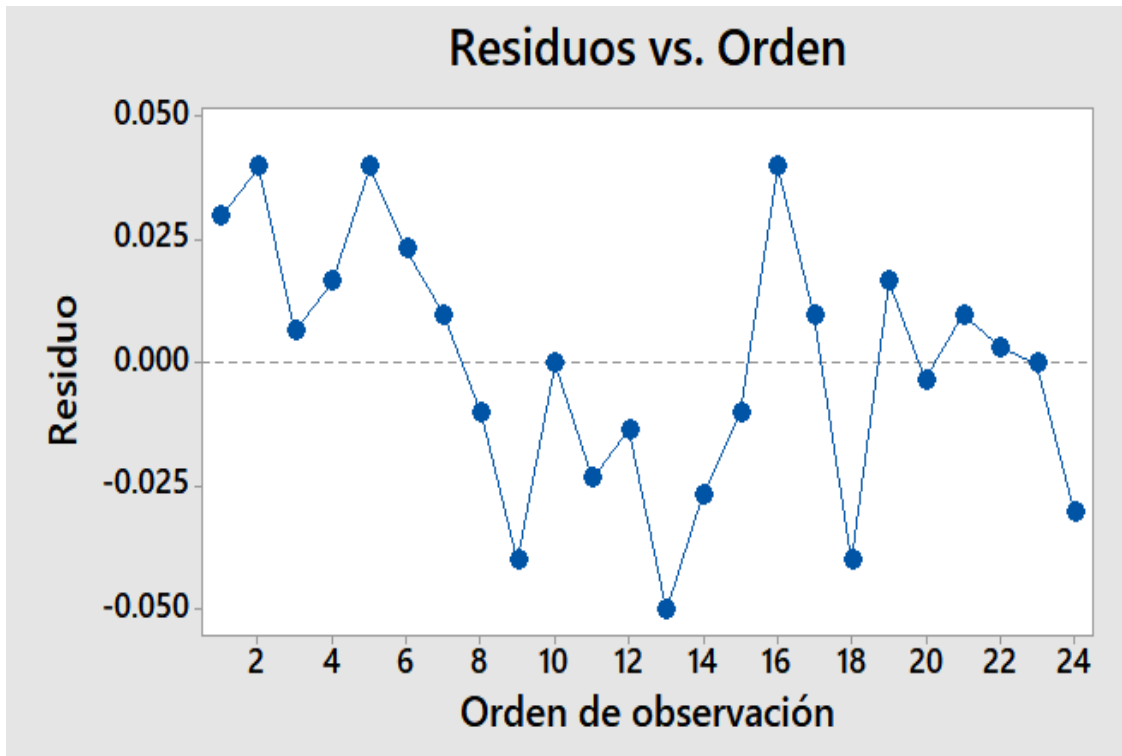
Grafica de Probabilidad Normal



Nota. En la siguiente grafica de probabilidad normal se desprende una curva la cual se le conoce con el nombre de S invertida, donde se muestra una distribución de colas cortas si los residuos no consiguen una distribución normal, los intervalos de confianza pueden ser inexactos,

Figura 5

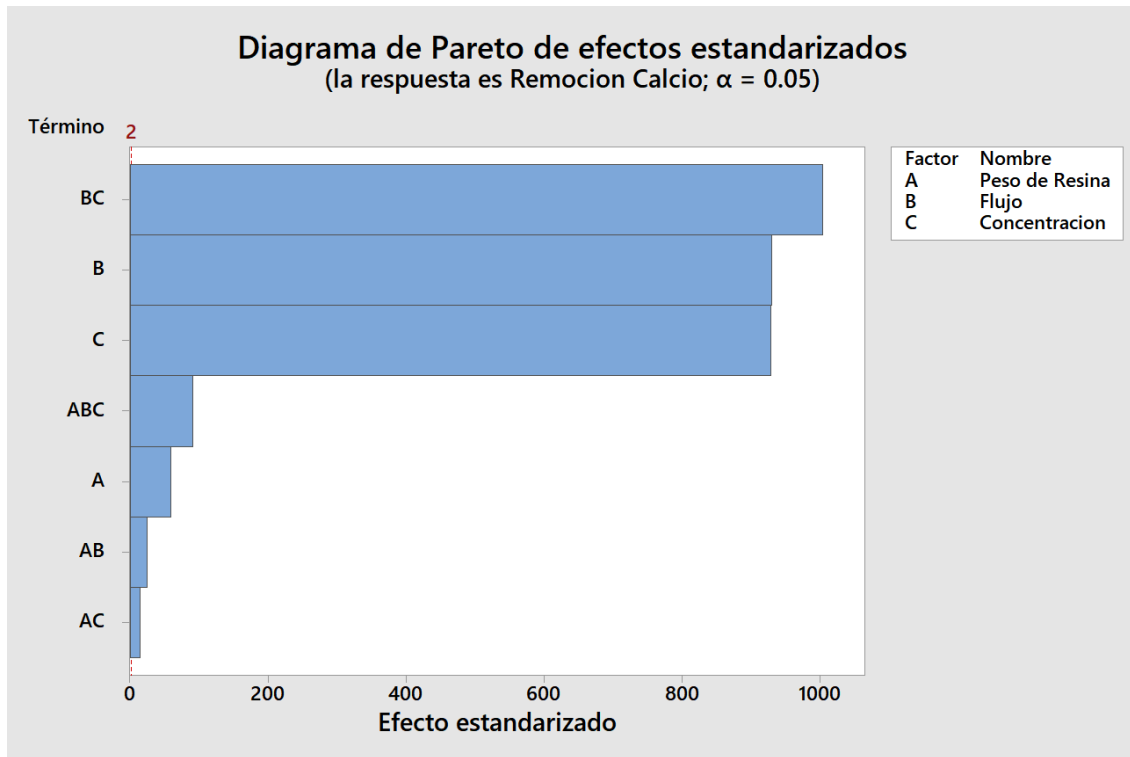
Residuo vs Orden



Nota. En la siguiente grafica se muestra los residuos vs orden en el cual se aprecia que los residuos independientes no muestran tendencias ni patrones cuando se muestran en orden cronológico que es lo ideal en este tipo de gráfica, pues se busca que los residuos que se aprecian en la gráfica se ubiquen de forma aleatoria alrededor de la línea central.

Figura 6

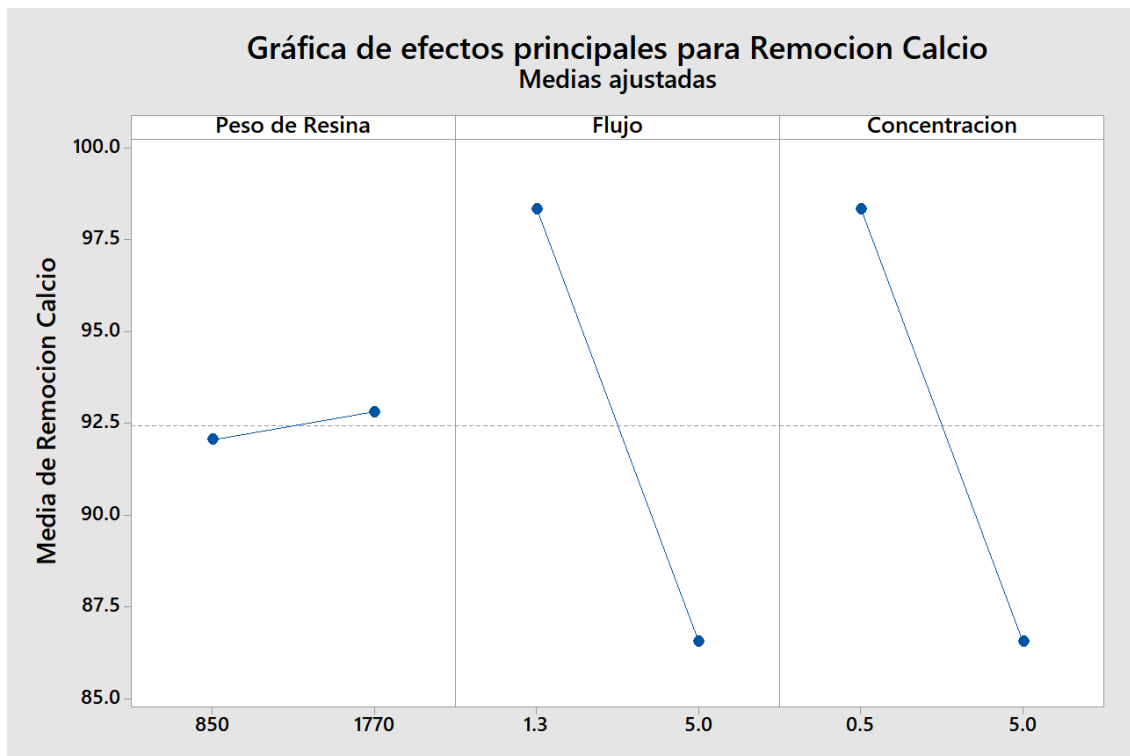
Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados



Nota. En el siguiente diagrama de resultados se muestra el efecto estandarizado de los factores: Peso (A), Flujo (B), Concentración (C), donde los tres efectos significativos incluyen a 2 factores principales – Esto pone en evidencia que los factores que más tuvieron influencia en la remoción de ion calcio fueron: Flujo y concentración, seguido de flujo y finalmente la concentración de entrada.

Figura 7

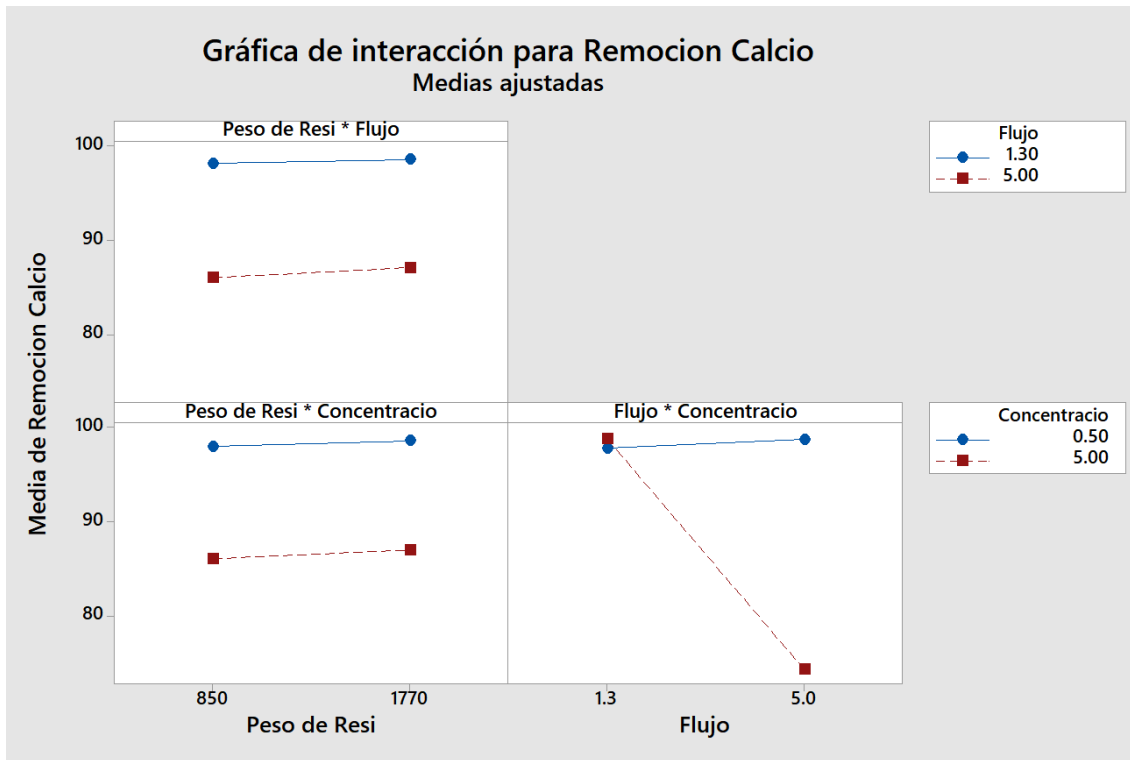
Grafica de Efectos Principales Para Remoción Calcio



Nota. En la siguiente gráfica, se muestran los principales efectos de remoción para medias ajustadas en las tres variables estudiadas que se dan en: 1770gr de resina, 1.3 ml/s de flujo y 0.5ml/s de concentración inicial de solución para un mayor porcentaje de remoción de iones calcio en el equipo de intercambio iónico.

Figura 8

Gráfica de Interacción Para Remoción Calcio



Nota. En la siguiente grafica se pueden apreciar las 3 graficas de interacción de parámetros, donde la mayor interacción encontrada se da de manera notoria entre la variable flujo y la variable concentración, pues estas 2 interactúan desde el nivel más bajo de cada una de ella.

Tabla 2

Determinación Dureza Cálctica

VARIABLES	CANTIDAD
Concentración	0.5 g/L
Flujo	5 ml/s
Peso resina	850 g

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(\text{ml EDTA}) \times (\text{M EDTA}) \times (\text{mmol CaCO}_3) \times 10^6}{\text{volumen muestreado}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(10.75 \text{ ml}) \times (0.01 \text{ M}) \times (0.1) \times 10^6}{10 \text{ ml}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = 1075 \text{ ppm CaCO}_3$$

Determinación dureza cálcica T (15)

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(\text{ml EDTA}) \times (\text{M EDTA}) \times (\text{mmol CaCO}_3) \times 10^6}{\text{volumen muestreado}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(0.35 \text{ ml}) \times (0.01 \text{ M}) \times (0.1) \times 10^6}{20 \text{ ml}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = 17.5 \text{ ppm CaCO}_3$$

Determinación dureza cálcica T (30)

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(\text{ml EDTA}) \times (\text{M EDTA}) \times (\text{mmol CaCO}_3) \times 10^6}{\text{volumen muestreado}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(0.25 \text{ ml}) \times (0.01 \text{ M}) \times (0.1) \times 10^6}{20 \text{ ml}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = 12.5 \text{ ppm CaCO}_3$$

Determinación dureza cálcica T (45)

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(\text{ml EDTA}) \times (\text{M EDTA}) \times (\text{mmol CaCO}_3) \times 10^6}{\text{volumen muestreado}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = \frac{(0.25 \text{ ml}) \times (0.01 \text{ M}) \times (0.1) \times 10^6}{20 \text{ ml}}$$

$$\text{ppm CaCO}_3 = 12.5 \text{ ppm CaCO}_3$$

Tabla 3

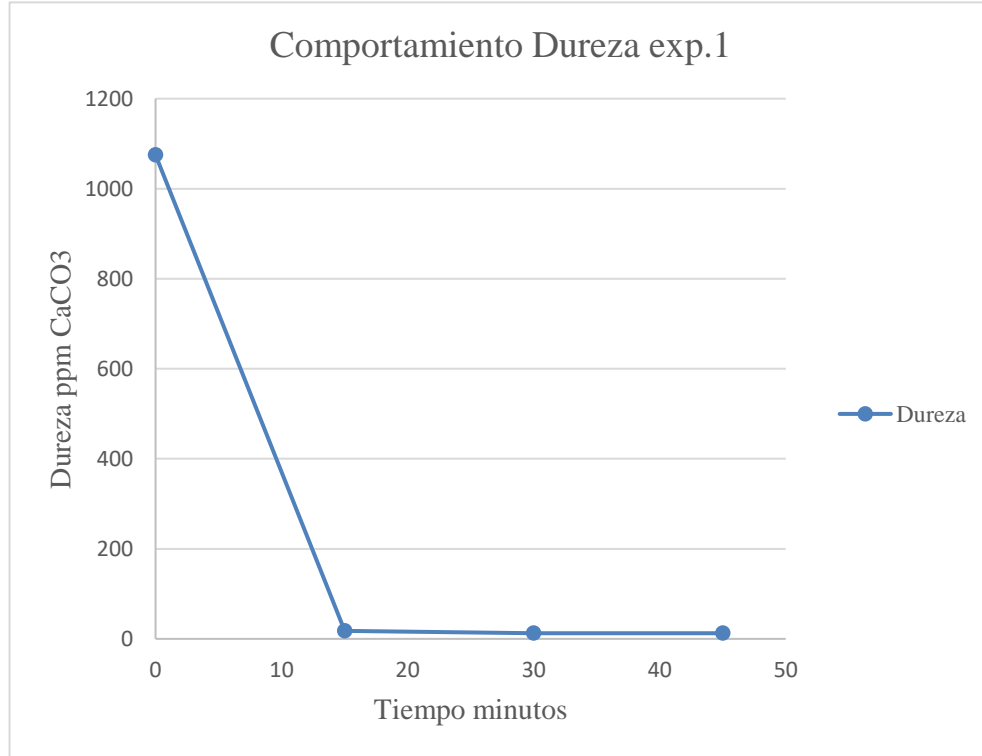
Resultado Corrida Experimental N°1

Remoción de iones calcio			
T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	1075 ppm $CaCO_3$	1.075 g/L	0
15	17.5 ppm $CaCO_3$	0.0175 g/L	96.5%
30	12.5 ppm $CaCO_3$	0.0125 g/L	97.5%
45	12.5 ppm $CaCO_3$	0.0125 g/L	97.5%

Fuente: Elaboración propia

Figura 9

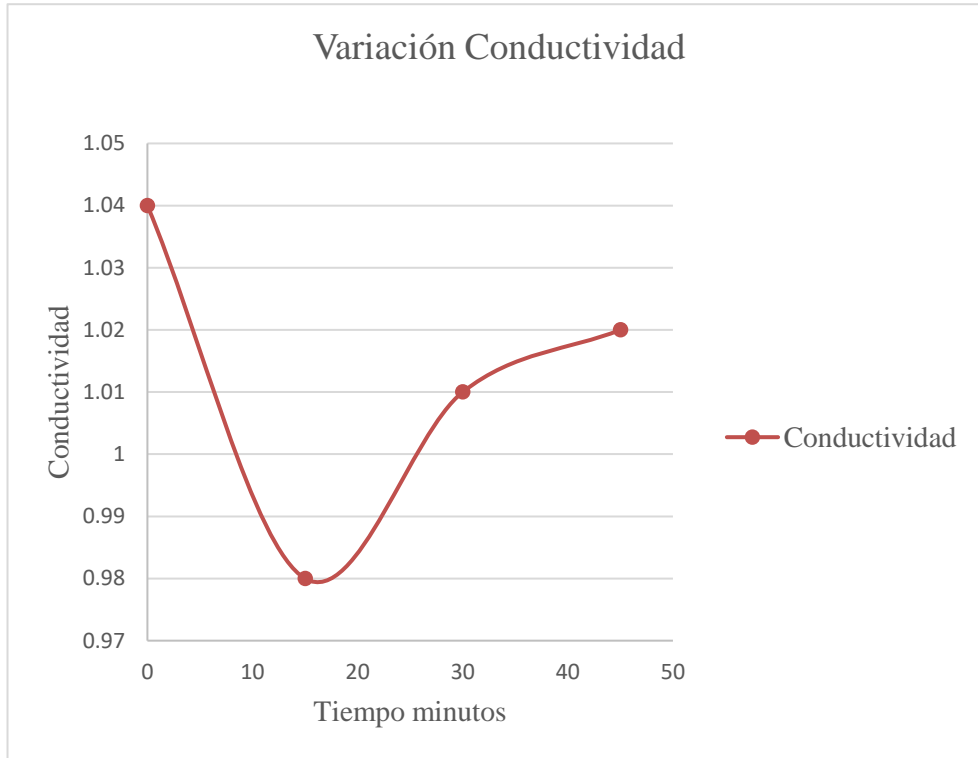
Experiencia 1 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 10

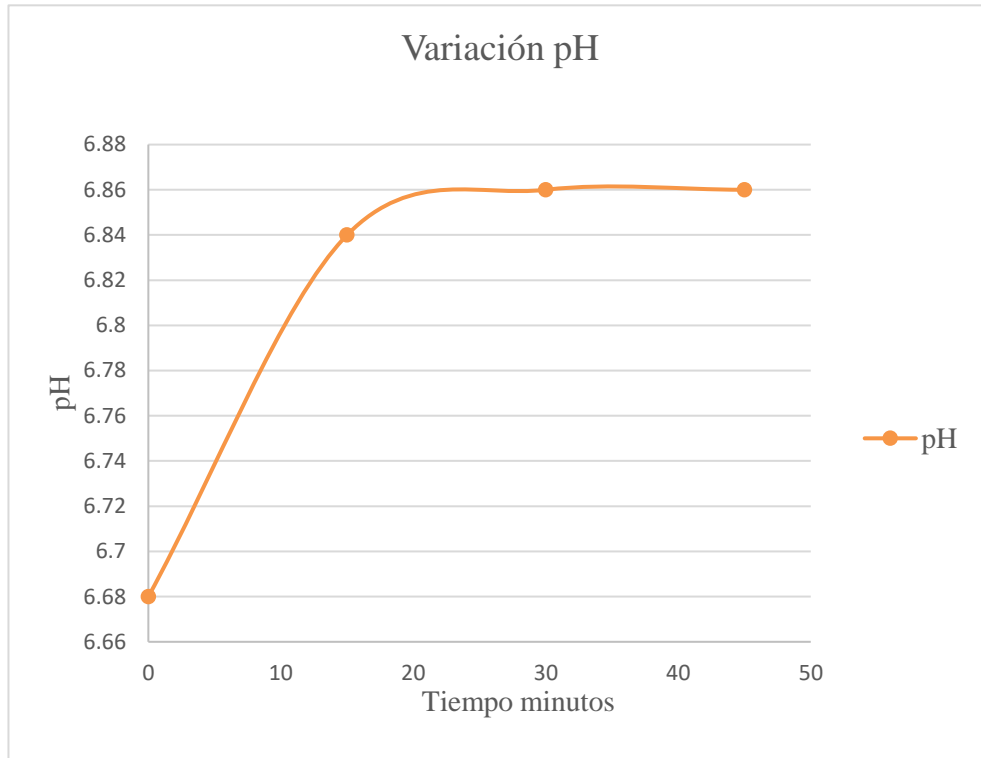
Experiencia 1 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 11

Experiencia 1 - pH vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Resultado Corrida Experimental N°2

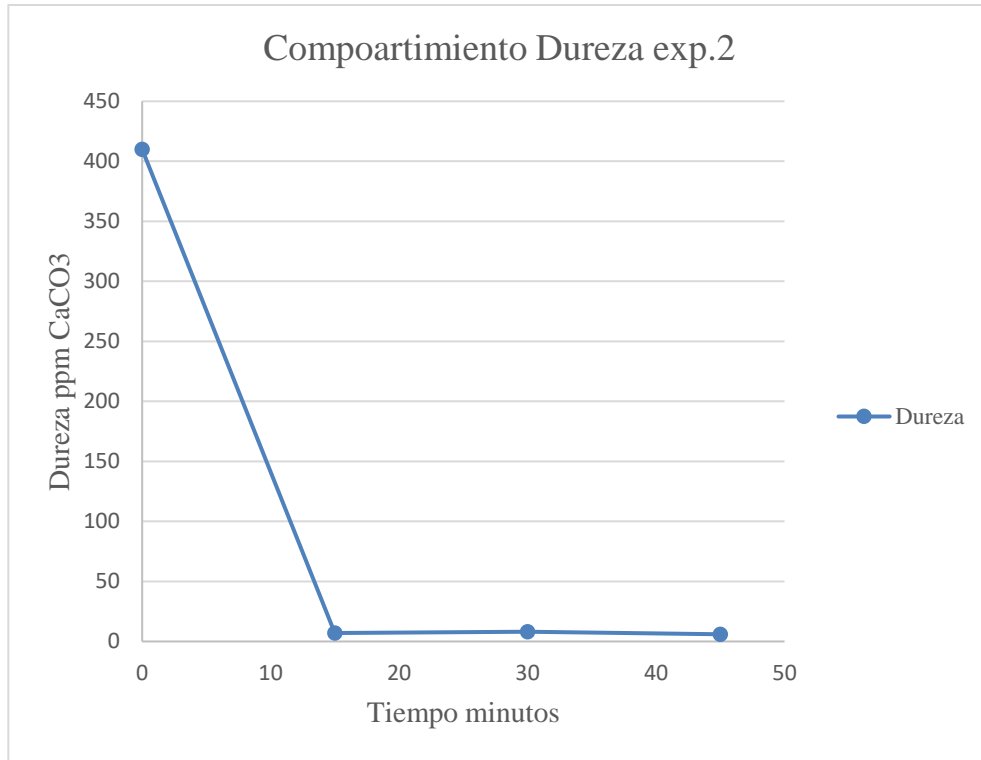
Remoción de iones calcio

T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	410 ppm $CaCo_3$	0.41 g/L	0
15	7 ppm $CaCo_3$	0.007 g/L	98.6%
30	8 ppm $CaCo_3$	0.008 g/L	98.4%
45	6 ppm $CaCo_3$	0.006 g/L	98.8%

Fuente: Elaboración propia

Figura 12

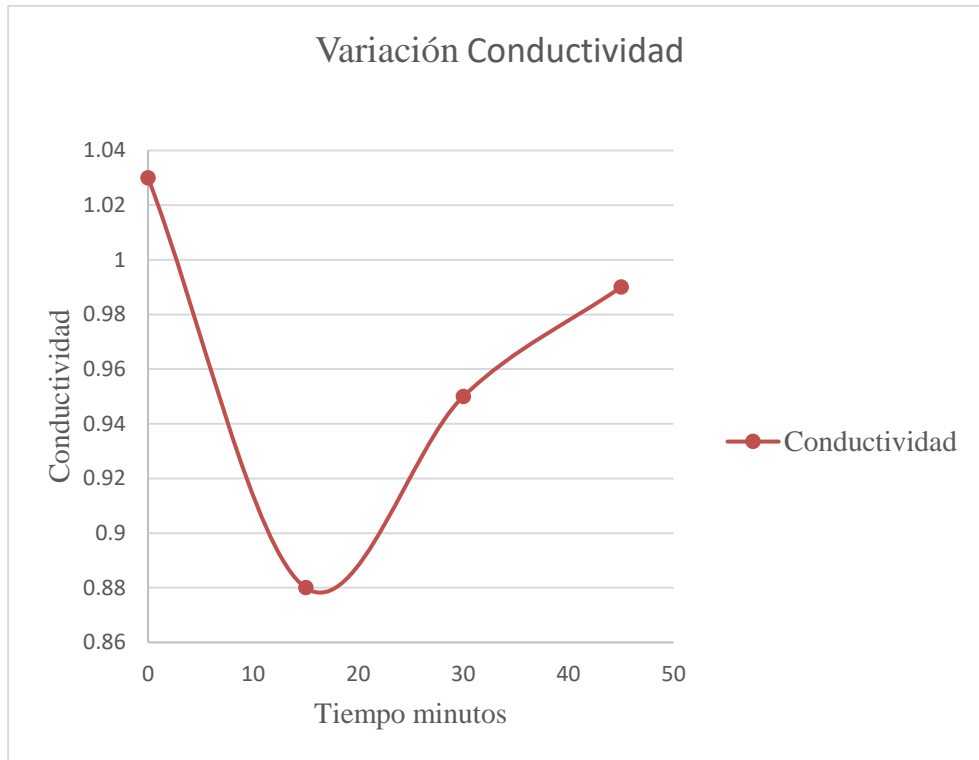
Experiencia 2 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 13

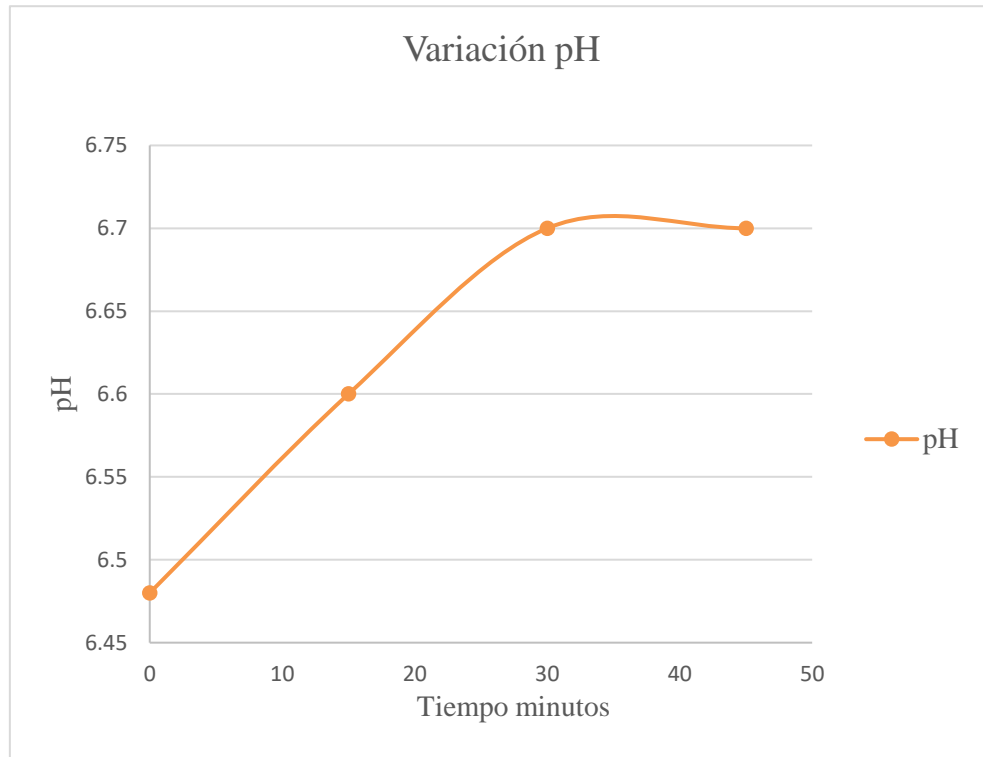
Experiencia 2 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 14

Experiencia 2 - pH vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

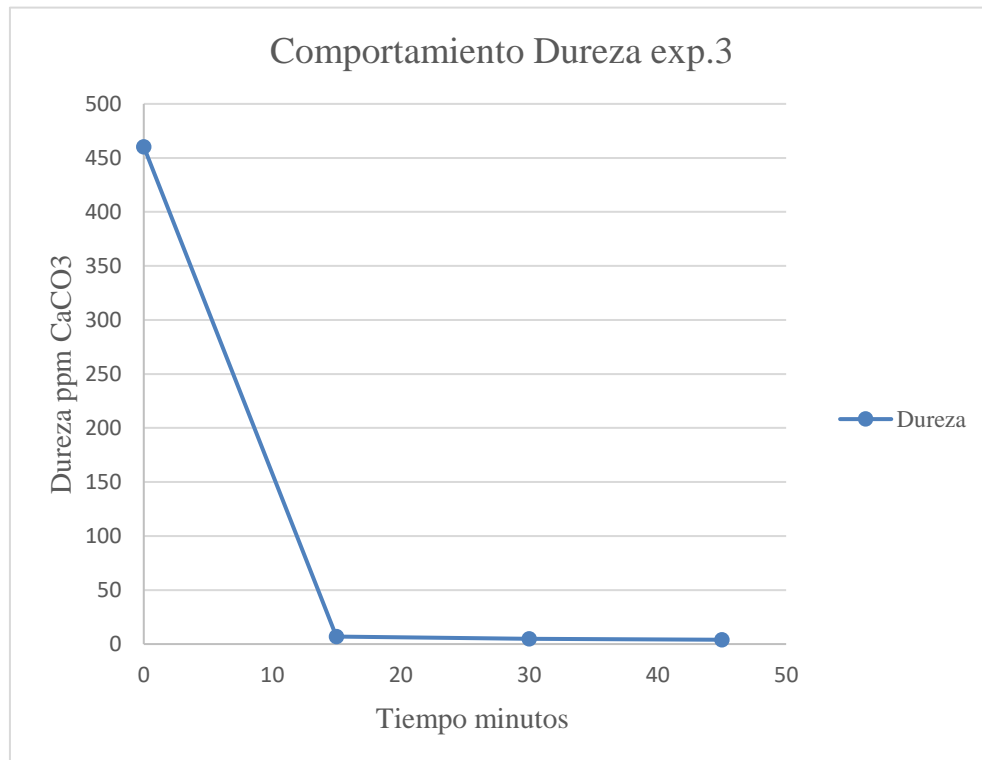
Resultado Corrida Experimental N°3

Remoción de iones calcio			
T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	460.4 ppm $CaCo_3$	0.4604 g/L	0
15	7 ppm $CaCo_3$	0.007 g/L	98.6%
30	5 ppm $CaCo_3$	0.005 g/L	99%
45	4 ppm $CaCo_3$	0.004 g/L	99.2%

Fuente: Elaboración propia

Figura 15

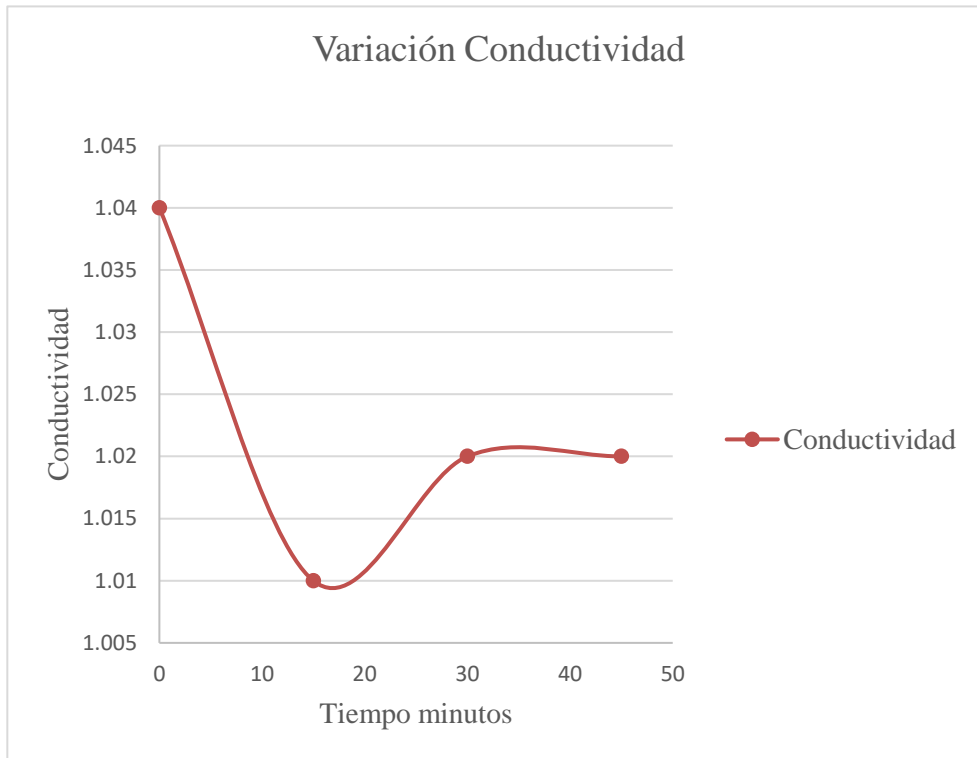
Experiencia 3 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 16

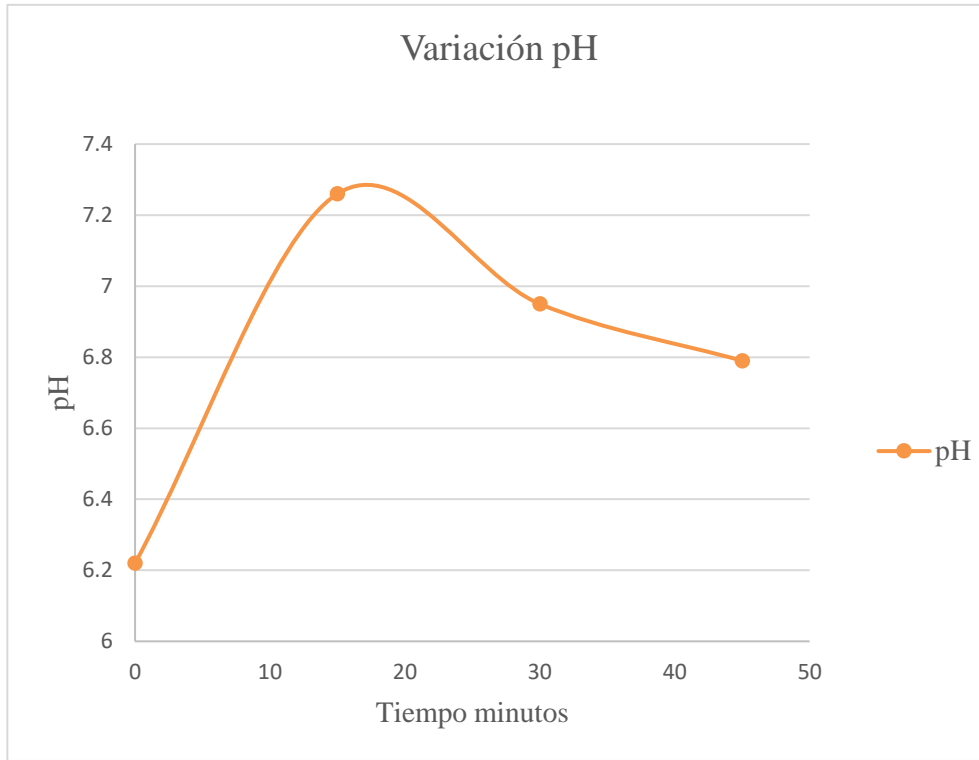
Experiencia 3 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 17

Experiencia 3 - pH vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

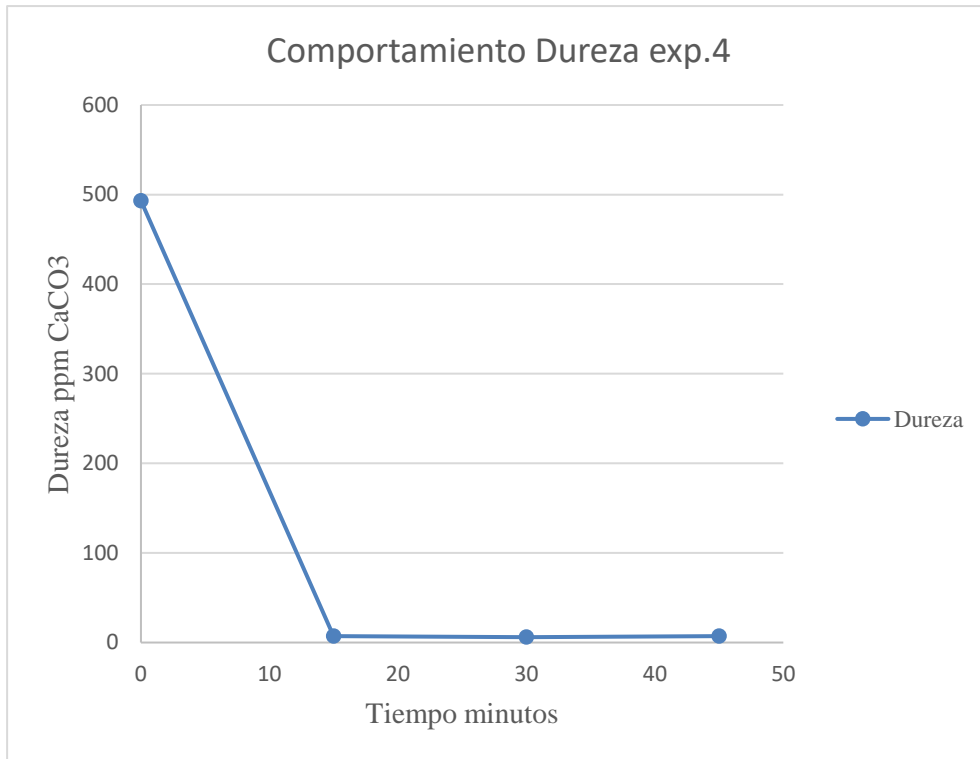
Resultado Corrida Experimental N°4

Remoción de iones calcio			
T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	493.2 ppm $CaCO_3$	0.4932 g/L	0
15	7 ppm $CaCO_3$	0.007 g/L	98.6%
30	6 ppm $CaCO_3$	0.006 g/L	98.93%
45	7 ppm $CaCO_3$	0.007 g/L	98.63%

Fuente: Elaboración propia

Figura 18

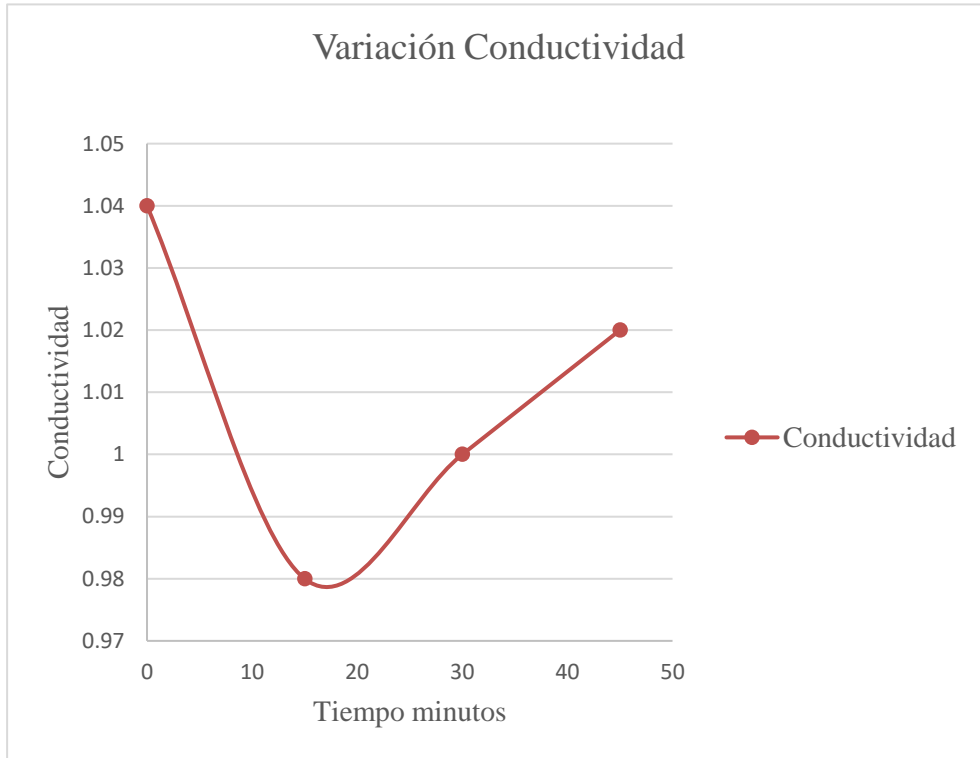
Experiencia 4 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 19

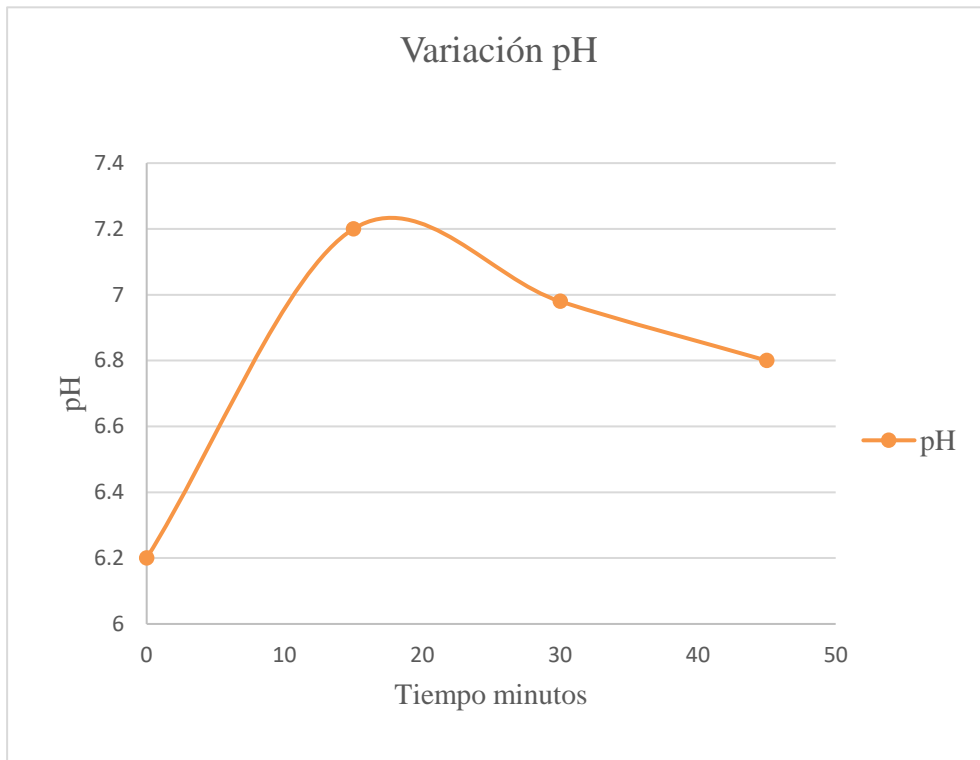
Experiencia 4 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 20

Experiencia 4 - pH vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7

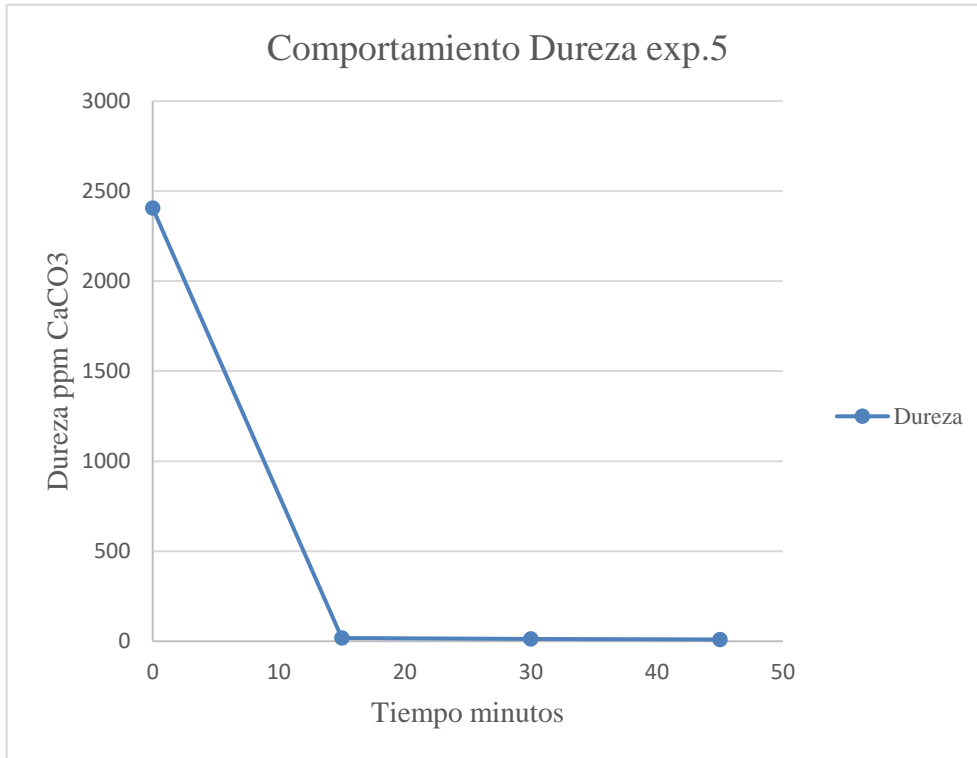
Resultado Corrida Experimental N°5

Remoción de iones calcio			
T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	2405 ppm $CaCO_3$	2.405 g/L	0
15	17.5 ppm $CaCO_3$	0.0175 g/L	98.83%
30	12.5 ppm $CaCO_3$	0.0125 g/L	99.16%
45	10 ppm $CaCO_3$	0.01 g/L	99.3%

Fuente: Elaboración propia

Figura 21

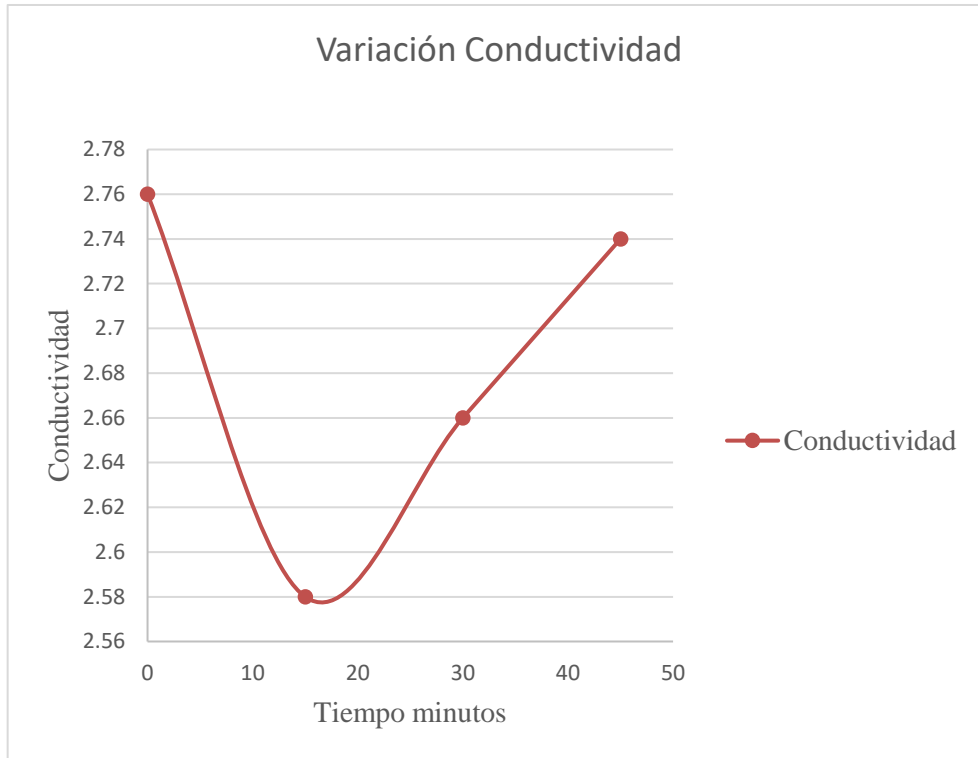
Experiencia 5 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 22

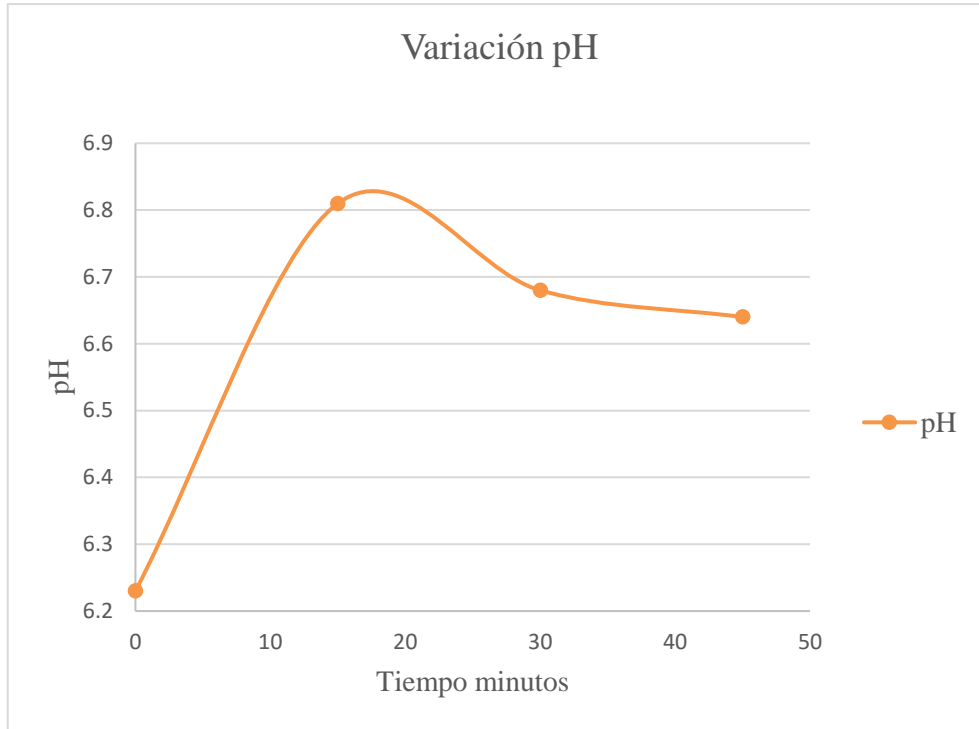
Experiencia 5 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Experiencia 5 - pH vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Resultado Corrida Experimental N°6

Remoción de iones calcio			
T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	1179 ppm $CaCO_3$	1.179 g/L	0
15	22.5 ppm $CaCO_3$	0.0225 g/L	98.5%
30	22.5 ppm $CaCO_3$	0.0225 g/L	98.5%
45	20 ppm $CaCO_3$	0.02 g/L	98.6%

Fuente: Elaboración propia

Figura 24

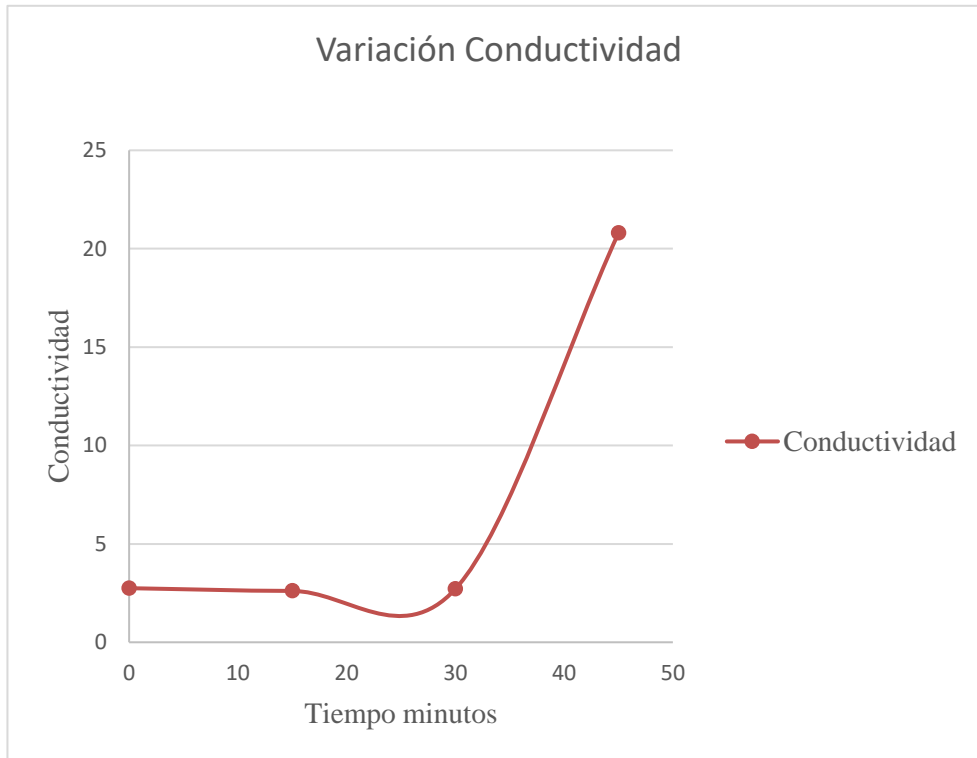
Experiencia 6 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 25

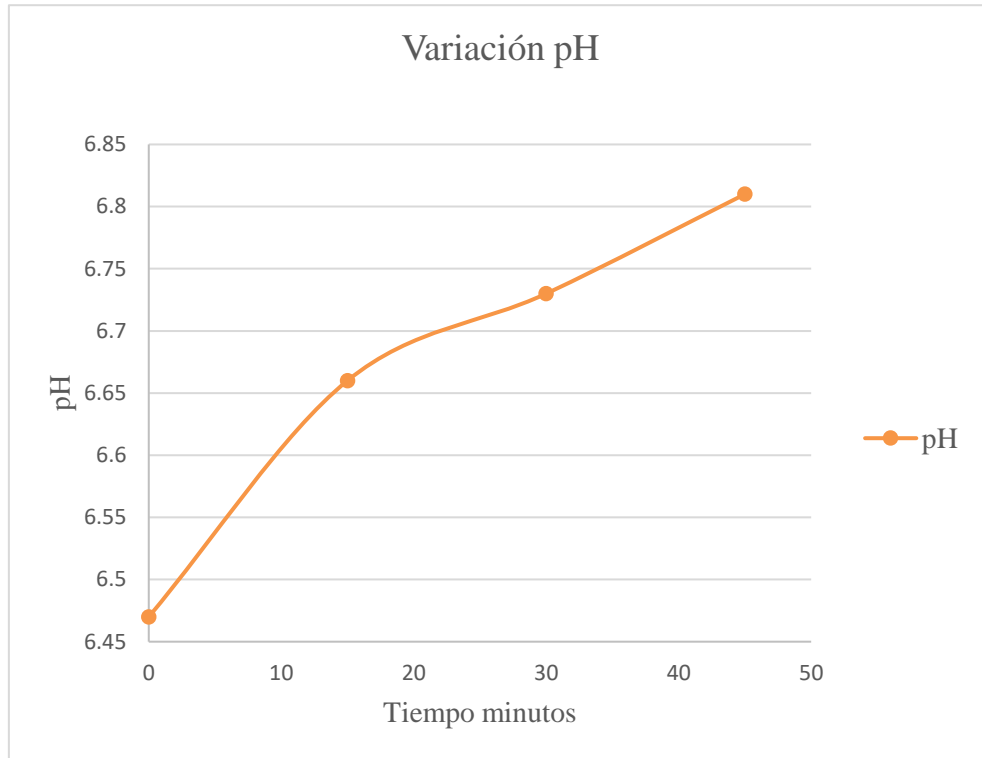
Experiencia 6 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

Experiencia 6 - pH vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

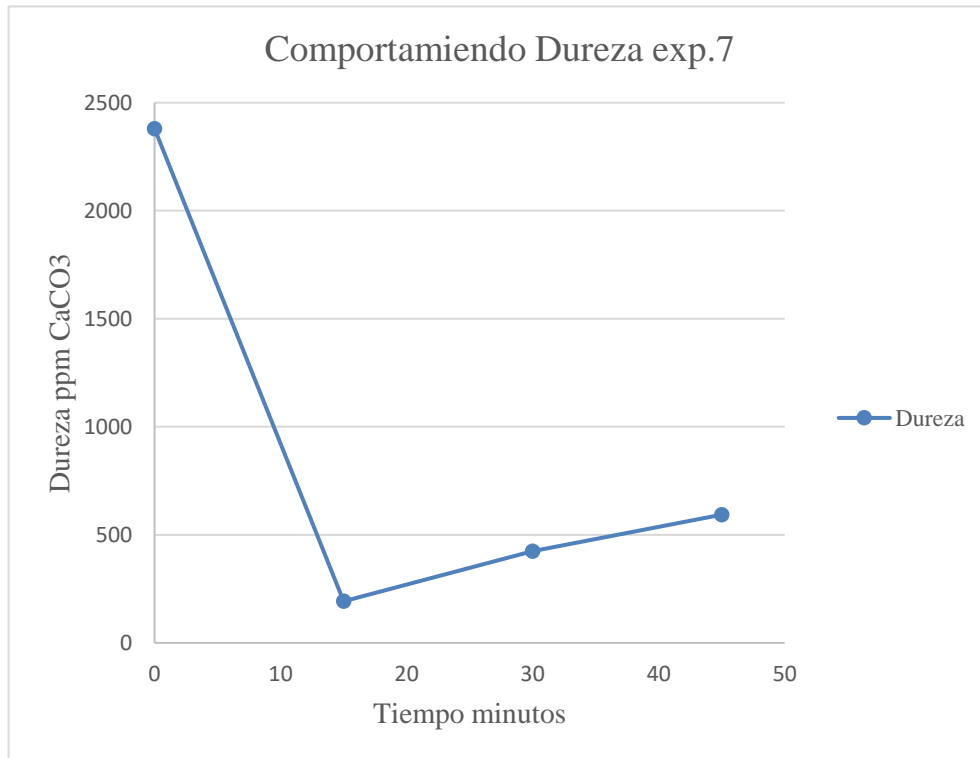
Resultado Corrida Experimental N°7

Remoción de iones calcio			
T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	2380 ppm $CaCo_3$	2.38 g/L	0
15	192.5 ppm $CaCo_3$	0.1925 g/L	87.16%
30	425 ppm $CaCo_3$	0.425 g/L	71.66%
45	592.5 ppm $CaCo_3$	0.5925 g/L	60.5%

Fuente: Elaboración propia

Figura 27

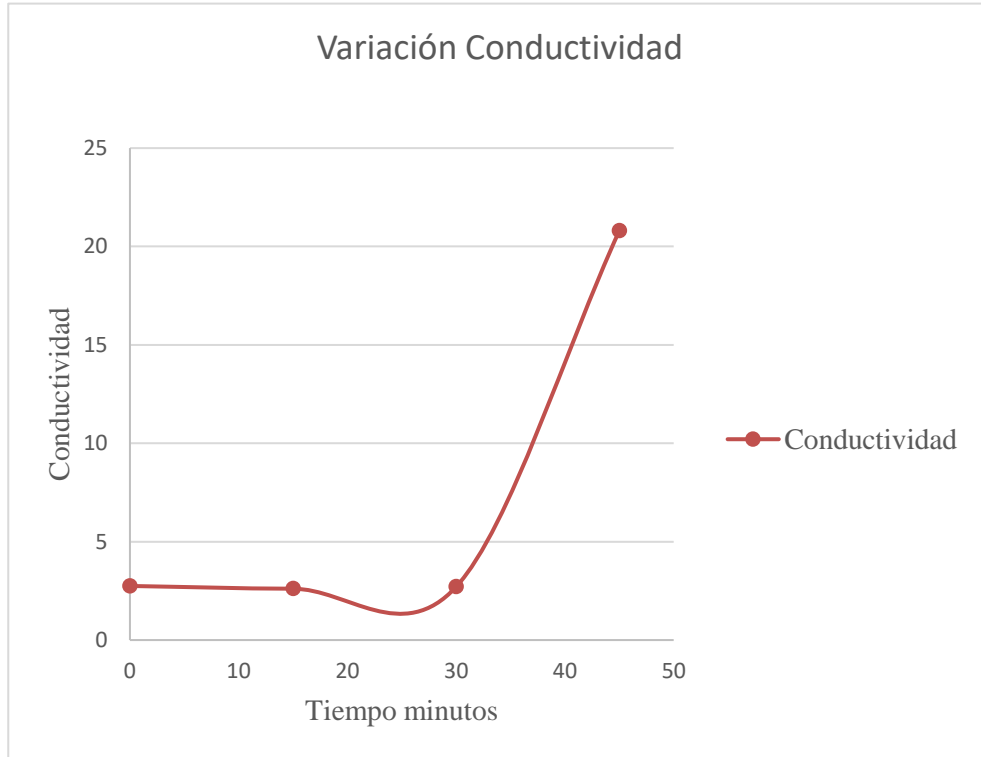
Experiencia 7 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 28

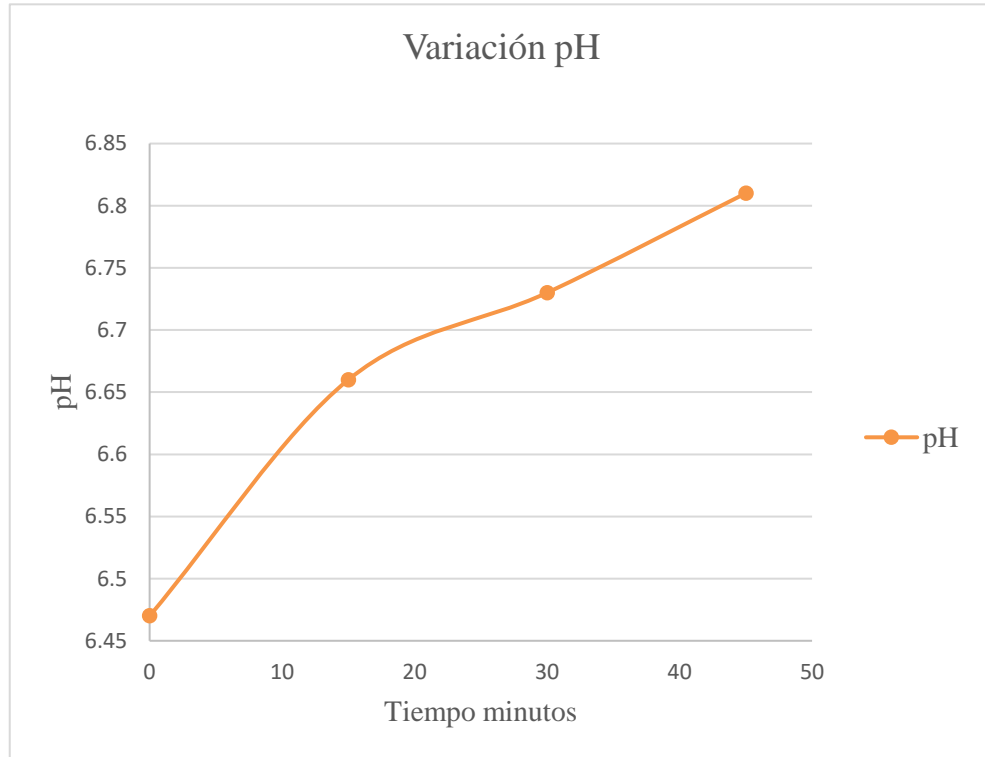
Experiencia 7 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Experiencia 7- pH vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Resultado Corrida Experimental N°8

Remoción de iones calcio			
T(min)	Dureza	Conversión	% de remoción
0	1270 ppm $CaCO_3$	1.27 g/L	0
15	25 ppm $CaCO_3$	0.025 g/L	98.3%
30	22.5 ppm $CaCO_3$	0.0225 g/L	98.5%
45	20 ppm $CaCO_3$	0.02 g/L	98.6%

Fuente: Elaboración propia

Figura 30

Experiencia 8 - Dureza vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 31

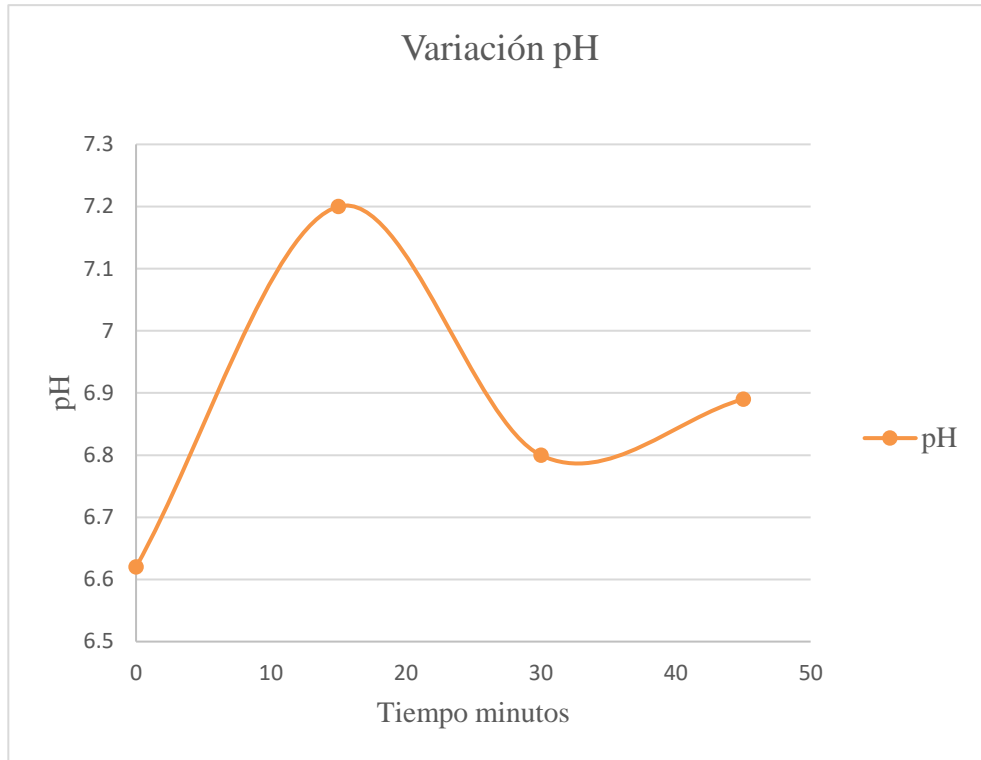
Experiencia 8 - Conductividad vs Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 32

Experiencia 8 - pH vs Conductividad



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Según (Quispe Puma, 2016) sostiene que el tiempo para la regeneración de las resinas es de periodos de 2 – 2.5 horas en operación continua, pues las resinas llegan a saturarse aceleradamente debido al diseño del equipo en el tratamiento de aguas de dureza baja. Además, que el porcentaje de remoción para el catión Calcio fue de 77.09%. El tiempo de saturación basado en el diseño del equipo fue un factor clave al momento del diseño y construcción del equipo de intercambio iónico, evitando la saturación rápida de resinas en periodos cortos de tiempo y la repetición constante de pruebas o corridas experimentales.

El autor (Bandrabur, y otros, 2012) brinda una mejor visión respecto a la variación del proceso de ablandamiento por factores experimentales específicos en el proceso de intercambio iónico, como pH de la solución inicial, dosis de resina, concentración inicial de calcio, temperatura, tiempo de contacto y la naturaleza de los contraiones. También, afirma que la resina usada presenta un notorio rendimiento en el proceso de ablandamiento de agua para toda la serie de pH. Lo que se pudo evidenciar en los resultados de las corridas experimentales pues la variación de pH no fue muy notoria en gran medida, llegándose a estabilizar en lapsos cortos de tiempo.

Para (Fathy, y otros, 2015) las resinas preparadas son capaces de depurar iones calcio en 98% bajo pH neutro. Por otro lado, en el estudio mencionado se trabajó con soluciones de agua sintética, asemejándola hacia agua dura para realizar las fases experimentales, no presentando

inconvenientes bajo este tipo de agua, por lo que se consideró el empleo de este tipo de solución al presente trabajo de investigación.

El estudio de (Coca, Mato, Gonzale Benito, Ureña, & García Cubero , 2009) refiere a que se deben de realizar más corridas experimentales para optimizar las condiciones de regeneración y poder mejorar la vida útil de la resina. Por otro lado, los resultados obtenidos sirven de contraste al poner en evidencia la adaptabilidad en usos de las resinas según el enfoque que se quiera brindar a cada estudio, pues estos varían según el tipo de componente, regenerante y campo de aplicación. Además, se puede decir que las pruebas preliminares que se realizó, brindan una mayor solides en los ajustes de parámetros, toma de muestra y adecuada manipulación y regeneración de resinas, reduciendo errores experimentales.

Las resinas catiónicas fuertes tienen una alta capacidad de intercambio iónico (Araujo Ulloa, 2015) sostiene que las resinas catiónicas fuertes son capaces de retener gran cantidad de iones, pues logran disminuir gran parte de la dureza hasta en 99%. Por consiguiente, se consideró el uso exclusivo de resinas catiónicas de tipo fuerte en el modelo tipo torre, para la remoción del ion calcio, garantizando el adecuado funcionamiento del equipo de intercambio iónico.

Respecto a los parámetros de operación (Millar, Miller, Couperthwaite, & Papworth, 2016) refiere a que la temperatura y normalidad de la solución es importante para estimar el comportamiento de intercambio iónico, pues afirma que este tipo de estudios debe realizarse en condiciones de constante de normalidad de solución y temperatura constante, así como también en

cantidades distintas de resina. Por lo que se podría indicar que este ambiente en el trabajo de intercambio iónico puede ser los más relevantes en cuanto a parámetros.

4.2 Conclusiones

- Se puede asegurar que la elección de los parámetros de operación óptimos del módulo de resina de intercambio fueron los adecuados, siendo estos: Flujo, concentración inicial y peso de resina bajo los cuales se trabajó de manera eficaz la remoción de iones calcio en el equipo construido.
- Los resultados óptimos de remoción se vieron reflejados bajo los siguientes niveles de experimentación de los parámetros establecidos previamente: flujo 1.3 ml/s, concentración 0.5 ml/s y peso de resina 1770 g obtenidos mediante las distintas pruebas experimentales del trabajo.
- El rendimiento del equipo fue el adecuado con los parámetros y niveles establecidos, pues se apreció la remoción de iones calcio a más del 97% como resultado de remoción más alto y a más del 85% en su resultado más bajo.
- El software minitab 18 brinda un adecuado procesamiento de datos y un accesible majeo de información para la interpretación de estos. También posee una gran versatilidad respecto a los parámetros y rangos establecidos a los que se desea trabajar, obteniendo resultados más idóneos en cada experiencia de intercambio iónico establecida.

Referencias

- Alvarez Valdez, F. R., & Rado Parada, A. J. (2013). *Sistemas de tratamiento de agua por intercambio iónico y osmosis inversa*. Arequipa: Universidad Católica de Santa María.
- Araujo Ulloa, K. D. (2015). *Diseño de unidades de desmineralización del agua como medio de enfriamiento*. Quito.
- Bandrabur, B., y, Tataru-Farmus, R. E., Lazar, L., Bulgariu, L., & Gutt, G. (2012). Use of strong acid resin Purolite C100E for removing permanent hardness of water factors affecting cation exchange capacity. *Estudios Científicos e investigación Química e Ingeniería Química, Biotecnología, Industria alimentaria.*, 295-304.
- Coca, M., Mato, S., Gonzalez Benito, G., Ureña, M., & García Cubero, M. (2009). Use of weak cation exchange resin Lewatit S 8528 as alternative to strong ion exchange resins for calcium salt removal. *Journal of Food Engineering*, 569-573.
- Cortijo Herrera, D. (2013). Desalcalinización del agua mediante intercambio iónico. *Ingeniería Industrial*, 221-238.
- Coruña, U. d. (2015). *Intercambio Iónico (FT-TER-006)*. La Coruña.
- Fathy, M., Moghny, A., Ahmed Mousa, M., Hameed A-A, A., El-Bellihi, & Awadallah, A. E. (2015). Sulfonated Ion Exchange Polystyrene Composite Resin for Calcium Hardness Removal. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 20-29.

Guerrero Vejarano , T. E., & Anaya Fernández, Ó. G. (2019). Eficiencia de la Resina Lewatit Monoplus M600 en la Remoción de Nitratos en Aguas para Consumo Humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 153-162.

Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar , R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Mexico: McGraw - Hill Interamericana.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (04 de Octubre de 2007). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Republica de Colombia*. Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Republica de Colombia: <http://www.ideam.gov.co>

Millar, G., Miller, G., Couperthwaite, S., & Papworth, S. (2016). Factors influencing kinetic and equilibrium behaviour of sodium ion exchange with strong acid cation resin. *ELSEVIER*, 79-91.

Nevárez Rivadeneira, M. E. (2009). *Optimización del Proceso de Regeneración de Resinas de Intercambio Iónico para ser Utilizadas en el Desmineralización de Agua de Reninería Estatal Esmeraldas*. Riobamba - Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

OMS. (14 de Junio de 2019). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

Quispe Puma, R. (2016). *Variación de Concentración de Cationes del Agua Dura al Paso por la Resina Catiónica*. Puno.

Ramos Olmos, R., Sepúlveda Marqués, R., & Villalobos Moreto, F. (2003). *El agua en el medio ambiente Muestreo y Analisis*. México: Plaza y Valdés.

Ramos Salcedo, F. R. (2017). *Capacidad de la resina Amberlite IR-120 para mejorar la calidad de agua subterránea en la urbanización San Sebastián - Comas, 2017* . Lima.







Vargas Cordero, Z. (2009). La investigación aplicada: Una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Revista Educación*.







Yu, Z., Qi, T., Qu, J., & Gou, Y. (2015). Application of mathematical models for ion-exchange removal of calcium ions from potassium chromate solutions by Amberlite IRC 748 resin in a continuous fixed bed colum. *ELSEIVER*, 165-171.

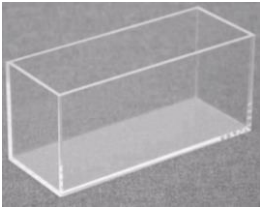


Yu, Z., Qi, T., Qu, J., Wang, L., & Chu, J. (2008). Removal of Ca(II) and Mg(II) from potassium chromate solution on Amberlite IRC. *ELSEIVER*, 1-7.

ANEXOS

ANEXO N. °1 Materiales para construcción del módulo de intercambio iónico






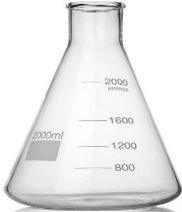
Item	Nombre	Número de unidades	Imagen
1	Tubo de 1/2 pvc agua caliente	1 tubo de 10mt	
2	Codos 1/2 pvc agua caliente	15 unidades	
3	Llave de cierre 1/2 para agua caliente	3 unidades	
4	Uniones 1/2 para agua caliente	3 unidades	
5	T 1/2 para agua caliente	3 unidades	
6	Union universal 1/2 para agua caliente	2 unidades	




Item	Nombre	Número de	Imagen
7	Rosca macho 1/2 para agua caliente	2 unidades	
8	Pegamento pvc agua caliente	1 unidad	
9	Pegamento AyB	1 unidad	
10	Tobera	1 unidad	
11	Cintillos	4 unidades	
12	Tubos de acrilico	2 unidades	

Item	Nombre	Número de	Imagen
13	Tanque de acrilico 10L	1 unidad	
14	Bomba de agua	1 unidad	
15	Resian de intercambio cationico	3L	

Fuente: Elaboración propia


ANEXO N. °2 Instrumentos de laboratorio

Item	Nombre	Número de unidades	Imagen
1	Bureta	1 unidad	
2	Piceta	1 unidad	
3	Vaso precipitado	10 unidades	
4	Pipeta	2 unidades	
5	Propipeta	2 unidades	
6	Matraz erlenmeyer	2 unidaes	

Item	Nombre	Número de	Imagen
7	Embudo de vidrio	1 unidad	
8	Pinzas para bureta	1 unidad	
9	Soporte Universal	1 unidad	

Fuente: Elaboración propia

ANEXO N. 03 Insumos y equipos de laboratorio

Item	Nombre	Número de unidades	Imagen
1	Medidor SST/pH	1 unidad	
2	Conductimetro	1 unidad	
3	Cloruro de Sodio	1 frasco	
4	Cloruro de Calcio	1 frasco	
5	EDTA	1 frasco	
6	Ericromo de metilo	1 frasco	
7	Solucion Buffer	1 frasco	

Fuente: Elaboración propia

ANEXO N. °4 Imágenes del equipo de Intercambio iónico e instrumentos

Figura 33

Módulo de Intercambio Iónico



Fuente: Elaboración propia

Figura 34

Tanques de Resinas de Intercambio Iónico



Fuente: Elaboración propia

Figura 35

Equipos y materiales



Fuente: Elaboración propia

Figura 36

Instrumentos Para Titulación EDTA



Fuente: Elaboración propia

Figura 37

Materiales e Instrumentos Titulación EDTA



Fuente: Elaboración propia