

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería

Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Fernando Parada Luna

Extracción de sulfato mediante resinas de intercambio iónico para su aplicación al tratamiento de aguas de relaves



Felipe Ariel Basualto Pedreros

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Marzo 2019

Mis Agradecimientos

En primer lugar, dedico este trabajo a mis padres, Teresa y Juan, por haber sido los pilares fundamentales en mi vida. A mi esposa Nicole, a mi suegra Estela, y a toda mi familia, ya que, gracias a ellos y la ayuda de Dios, he podido completar esta etapa de mi vida. A mis mejores amigos, Felipe y Pedro, que siempre me apoyaron en mis momentos de flaqueza, cuando mis estudios se ponían cuesta arriba.

En segundo lugar, agradezco a mi profesor guía, Don Fernando Parada, quien me brindó todo su apoyo, tanto académico como moral, para lograr este proyecto. Así mismo, a los profesores Luis Basáez e Ivan Peric, los que me guiaron en esta investigación. A la profesora, Eugenia Araneda, que siempre estuvo alentándome a seguir adelante. A Don Octavio Sanhueza, quien me brindó su ayuda y sus consejos en los análisis que realicé. Y a todos los académicos del departamento que fueron parte de mi formación, y que día a día impulsan a sus estudiantes a ser mejores profesionales.



Resumen

Este trabajo tiene por objetivo evaluar el control del sulfato en efluentes acuosos mineros, el cual es un contaminante iónico que genera problemas al medio ambiente y al ser humano. El método consiste en la utilización de resinas de intercambio iónico, las que tienen por función intercambiar iones en la solución en la que están inmersas. Se propuso dos resinas comerciales, IRA-400 e IRA-420, las cuales son de tipo alcalina fuerte y fueron acondicionadas con una solución de NaOH. Ambas resinas se sometieron a distintas pruebas en las que se cuantificaron factores como la carga máxima de sulfato que pueden retener, la velocidad de intercambio iónico, la eficiencia de descarga para diferentes concentraciones de agente re-extractante y el comportamiento de las resinas en un test cíclico de carga-descarga. De las isotermas de extracción se puede deducir que con ambas resinas es posible llegar a extraer prácticamente el 100% del sulfato, tanto para 1000 como para 2000 mg/L de sulfato en el medio acuoso. También se deduce de la isoterma obtenida con 2000 mg/L, que el aumento de pH producido por la reacción de intercambio iónico afectaría negativamente al proceso de carga. En el proceso de intercambio, la resina transfiere iones OH⁻ al acuoso, lo que hace subir el pH. La carga máxima de la resina IRA400 fue de 267 g/L cuando se contactó con una solución con 1000 mg/L de sulfato, y superior a 400 g/L para 2000 mg/L de sulfato. Para la resina IRA-420, la carga máxima fue de 228 g/L para 1000 mg/L de sulfato, y superior a 400 g/L para 2000 mg/L.

La cinética de extracción es favorable, en tiempos menores a 5 minutos porque se alcanza aproximadamente el 80% del equilibrio, lo cual da una posibilidad a tratar grandes volúmenes de agua sin tener que recurrir a enormes equipos de reacción. Para la regeneración de la resina y re-extraer el sulfato en las pruebas con 1000 ppm, se requiere de una concentración de hidróxido de sodio de 2 M con ambas resinas. Para una concentración de 2000 ppm de sulfato, la resina IRA-400 logra la máxima re-extracción con una concentración de NaOH de 4 M, mientras que con la resina IRA-420, se requeriría una concentración de NaOH igual o mayor que 5 M. En la prueba de 5 ciclos de carga y descarga, para la resina IRA-400 con agua de 2000 ppm de sulfato, se pudo comprobar que la carga efectiva de intercambio iónico fluctúa entre 35 y 65 g/L de sulfato, mientras que para la resina IRA-420 fue de 30 a 40 g/L de sulfato utilizando una concentración de 3 M de NaOH para la re-extracción.

Índice

1.	Introducción y aspectos generales.....	1
1.1.	Motivación de la investigación	1
1.2.	Objetivos	3
1.2.1.	Objetivo General	3
1.2.2.	Objetivos específicos.....	3
2.	Antecedentes de la investigación	4
2.1.	Tecnologías ocupadas para la remoción de sulfato desde el agua	4
2.1.1.	Osmosis inversa.....	5
2.1.2.	Proceso con lodos de alta densidad (HDS)	5
2.2.	Teoría de IX	6
2.2.1.	Cinética de la reacción:	7
2.2.2.	Carga máxima	9
2.2.3.	Isoterma de extracción	9
2.2.4.	Elusión.....	9
2.2.5.	Hinchabilidad de la resina	10
2.2.6.	Capacidad máxima de intercambio de la resina	10
3.	Estado del Arte	11
4.	Desarrollo experimental	16
4.1.	Resinas utilizadas	16
4.2.	Materiales	18
4.2.1.	Material de laboratorio utilizado.....	18
4.3.	Procedimiento y condiciones experimentales	19
4.3.1.	Preparación de la resina.....	19

4.3.2. Isoterma de extracción:	21
4.3.3. Cinética de extracción:	22
4.3.4. Elusión:.....	23
4.4. Análisis químico realizado	24
5. Resultados y discusiones.....	27
5.1. Isotermas de extracción.....	27
5.2. Pruebas cinéticas	29
5.3. Pruebas de elusión o re-extracción de sulfato	37
5.4. Pruebas de carga y descarga.....	39
6. Conclusiones y Recomendaciones	42
6.1. Conclusiones	42
6.2. Recomendaciones.....	43
7. Bibliografía.....	44
8. Anexos.....	46
8.1. Anexo A	46
8.2. Anexo B.....	48
8.3. Anexo C.....	51
8.4. Anexo D	52

Índice de Tablas

Tabla 1: Resinas aptas para extracción de sulfato	16
Tabla 2: Especificaciones resina IRA-400.....	17
Tabla 3: Especificaciones resina IRA-420.....	17
Tabla 4: Isoterma de extracción con resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000$ ppm.....	46
Tabla 5: Isoterma de extracción con resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000$ ppm.....	46
Tabla 6: Isoterma de extracción con resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm.....	47
Tabla 7: Isoterma de extracción con resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm.....	47
Tabla 8: Prueba cinética con resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.5 L/g	48
Tabla 9: Prueba cinética con resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.5 L/g	48
Tabla 10: Prueba cinética con resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.25 L/g	48
Tabla 11: Prueba cinética con resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.25 L/g	49
Tabla 12: Prueba cinética con resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.125 L/g	49
Tabla 13: Prueba cinética con resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.125 L/g	49
Tabla 14: Prueba cinética con resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.083 L/g	50
Tabla 15: Prueba cinética con resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.083 L/g	50
Tabla 16: Prueba de elusión. Resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.05 L/g	51
Tabla 17: Prueba de elusión. Resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.05 L/g	51
Tabla 18: Prueba de elusión. Resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.05 L/g	51

Tabla 19: Prueba de elusión. Resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.05 L/g	51
Tabla 20: Prueba de retención de sulfato. IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.05L/g.....	52
Tabla 21: Prueba de carga y descarga de resina. IRA-420. Razón agua/resina=0.05L/g.....	52
Tabla 22: Prueba de carga y descarga de resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.05 L/g.....	52



Índice de figuras

Figura 1: Variación de la concentración de sulfato en solución. Prueba de carga Resina ABS 2. (Ashref Darbi, 2003, pág. 177)	12
Figura 2: Concentración de sulfato en solución de regeneración. Resina ABS 2 (Ashref Darbi, 2003, pág. 178).....	12
Figura 3: Eficiencia de extracción de sulfato respecto a la resina Lewatit k6362. (Reza Haghsheno, 2009, pág. 965).....	14
Figura 4: Variación de la concentración de sulfato en solución. Resina IRA-68. (Musterman, 1979, pág. 344).....	15
Figura 5: Resina IRA-400 en prueba de hinchabilidad.....	19
Figura 6: Acondicionamiento de resina IRA-400.....	20
Figura 7: Medición de pH de muestras.....	22
Figura 8: Filtración en caliente de muestras	24
Figura 9: Adición de cloruro de bario para precipitación de sulfatos.....	25
Figura 10: Calcinación de muestras en crisol. $T^{\circ} = 820^{\circ}\text{C}$	26
Figura 11: Isoterma de extracción resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000\text{ppm}$	27
Figura 12: Isoterma de extracción. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000\text{ppm}$	28
Figura 13: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000\text{ ppm}$. Razón agua/resina=0.5 L/g.....	29
Figura 14: pH en prueba cinética Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000\text{ ppm}$. Razón agua/resina=0.5 L/g.....	30
Figura 15: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000\text{ ppm}$. Razón agua/resina=0.25 L/g.....	31
Figura 16: pH en prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000\text{ ppm}$. Razón agua/resina = 0.25 L/g.....	32
Figura 17: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000\text{ ppm}$. Razón agua/resina=0.125 L/g.....	33
Figura 18: : pH en prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000\text{ ppm}$. Razón agua/resina = 0.125 L/g.....	34
Figura 19: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000\text{ ppm}$. Razón agua/resina = 0.083 L/g.....	35

Figura 20: pH prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.083 L/g.....	36
Figura 21: Prueba de elusión. Efecto de la concentración de NaOH en la re-extracción del sulfato. Resina cargada con $[\text{SO}_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.05 L/g.....	37
Figura 22: Prueba de elusión. Efecto de la concentración de NaOH en la re-extracción del sulfato Resina cargada con $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.05 L/g.....	38
Figura 23: Prueba de carga/descarga. Resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.2 L/g en la carga y 0.05 L/g en la descarga con una solución 3 M de OH^-	39
Figura 24: Prueba de carga/descarga. Resina IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.2 L/g en la carga y 0.05 L/g en la descarga con una solución 3 M de OH^-	40
Figura 25: Variación de la concentración de sulfato obtenida en el acuoso de re-extracción en las pruebas de carga / descarga Resina IRA-400. Cargada con agua de $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.2 L/g en la carga y 0.05 L/g en la descarga con una solución 3 M de $[\text{OH}]^-$	41



Nomenclatura

- SX: Extracción por solventes
- IX: Intercambio iónico
- BV: Bed Volume
- PLS: Solución de lixiviación cargada
- K: Kelvin
- °C: Grados Celsius
- g: Gramo
- kg: Kilogramo
- ton: Tonelada
- mL: Mililitro
- L: Litro
- h: Hora
- min: Minuto
- s: Segundo
- g/L ó gpL: Gramos por litro
- ppm: Partes por millón (1000ppm = 1 gpL)
- m: Metro
- cm²: Centímetro cuadrado
- cm³: Centímetro cúbico
- M: Molar
- Rpm: revoluciones por minuto



1. Introducción y aspectos generales

1.1. Motivación de la investigación

El agua en la minería ha sido siempre un recurso importante y escaso. Siempre se busca la manera de poder reciclarla y retornarla al proceso minero. (Nueva minería y energía, 2016)

Los residuos industriales líquidos, también llamados riles, son comunes en la industria minera y deben ajustarse a la normativa ambiental. Dentro de estos riles, una de las especies más comunes es el sulfato y su remoción se ve dificultada por los grandes volúmenes a tratar y las pocas posibilidades de generar alguna especie de valor comercial.

La presencia de ion sulfato en el agua, ya sea por la actividad industrial o de manera natural en aguas superficiales o subterráneas, restringen el consumo habitual del recurso, debido a las consecuencias que puede generar en la salud. Las secuelas directas derivan en el consumo de sulfato en el agua potable, el cual puede producir un efecto laxante, generando deshidratación la que puede llegar a consecuencias fatales. Otros efectos adversos pueden producirse por el regadío y el posterior consumo de alimentos en seres humanos o animales. (Guidelines of drinking-water quality, 2008)

En Chile hay varias industrias, incluida la minera, que vierten sus residuos a ríos cercanos. Tales efluentes deben cumplir con una normativa que indica la concentración máxima de contaminantes en el agua. De no ser cumplida se arriesga un término de actividades en la industria y multas por contaminación. La norma chilena indica una concentración máxima de sulfato en riles de 1000 ppm (1g/L) y una concentración de 500 ppm (0.5 g/L) en el agua potable. (Biblioteca del Congreso Nacional, 2001)

En este trabajo se estudiará el empleo de resinas de intercambio iónico en un medio alto en sulfato, para simular las condiciones de un ril, tal como ocurre en la industria. La reacción se estudiará a escala de laboratorio en un sistema batch.

Las tecnologías actuales ocupadas para el manejo de ion sulfato en efluentes, consisten ya sea en filtros, membranas o precipitación, las cuales se discutirán presentando sus ventajas y desventajas.

Finalmente, se deberá obtener una concentración de sulfato menor a la máxima permitida por la norma medioambiental y, además, la implementación del uso de la resina deberá ser de bajo costo.



1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el proceso de intercambio iónico para la remoción de sulfato desde efluentes acuosos de la minería.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la cinética de la eficiencia de una resina para absorber el ion sulfato, particularmente para bajos tiempos de residencia.
- Determinar la capacidad efectiva de carga de la resina de IX (resina cargada- resina descargada).



2. Antecedentes de la investigación

Las normas de la OMS dicen que una concentración de sulfato mayor a 400 mg/L afectan la potabilización del agua, además que el sulfato al ser un ion de carga negativa, tiene la posibilidad de asociarse con cationes tales como Cu^{+2} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , entre otros, los cuales aumentan la peligrosidad del compuesto que forma en el agua potable. Además, concentraciones de sulfato superiores a 250 mg/L generan problemas de corrosión en equipos de distribución del agua potable. (M. Santander, 2011)

En la ley chilena, el decreto supremo N° 90 dice que la concentración máxima permitida de sulfato en aguas residuales es de 1000 mg/L, pero a pesar de esto, es posible observar sus efectos en concentraciones de 500 mg/L. De ser superior a la primera descrita, se arriesgan multas o el cierre de operaciones. (American Water Works Association, 1999)

En este trabajo se utilizó el método de intercambio iónico para la purificación de soluciones con ion sulfato.

2.1. Tecnologías ocupadas para la remoción de sulfato desde el agua

En el ámbito medioambiental, se han investigado diversas tecnologías para el tratamiento de aguas con ion sulfato. Entre estas tecnologías se incluye intercambio iónico, osmosis inversa y el proceso con lodos de alta densidad (HDS).

2.1.1. Osmosis inversa

Consiste en el transporte de agua a través de una membrana por medio de diferencias de presiones. Las membranas semipermeables ocupadas, impiden el paso de sales disueltas. El proceso no es selectivo, generando agua libre de iones disueltos y un flujo de agua de alta concentración en sales que debe ser tratada por algún otro método.

El problema de la membrana es su durabilidad frente al ensuciamiento gradual al cual está sometida. La limpieza depende del tipo de membrana, y la duración de la membrana se ve afectada por el uso de químicos ocupados para su limpieza.

2.1.2. Proceso con lodos de alta densidad (HDS)

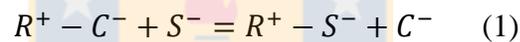
Consiste en añadir piedra caliza para formar precipitados de calcio. La reacción ocurre en un reactor en el que entran otras soluciones con sulfato, donde se mezclan y luego son decantados por medio de un floculante. El decantador separa las dos corrientes, donde una es el efluente tratado y la otra es un lodo que vuelve a una etapa de recirculación. La desventaja en la implementación de este método radica en los grandes volúmenes de solución a tratar lo que hace necesaria la utilización de grandes estanques para hacer reaccionar la solución como espesadores, entre otros. (D.J. Murdock, 1994)

2.2. Teoría de IX

El intercambio iónico es un método de purificación en el que ocurre un movimiento de iones de igual carga, los cuales se desplazan entre el fluido y el sólido.

En el intercambio iónico se ocupan resinas, las cuales son polímeros esféricos que contienen grupos funcionales capaces de intercambiar iones de su estructura por iones de carga opuesta (o mayor afinidad) que se encuentran en solución. De esta manera, existen resinas que pueden intercambiar iones de carga positiva, llamadas resinas catiónicas, y de carga negativa, llamadas resinas aniónicas. (Nevárez, 2009)

Cuando la resina está cargada positivamente es capaz de intercambiar iones de carga negativa:

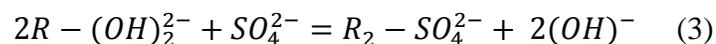


Análogamente, la resina cargada negativamente es capaz de intercambiar iones de carga positiva:



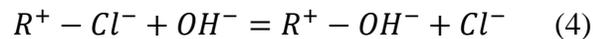
Donde R es la resina, C representa al ion de intercambio en la resina y S es el ion que se quiere extraer de la solución. (Manahan, 2007)

Las reacciones están escritas de manera que el ion a extraer es de tipo monovalente, pero al tratarse de un ion como lo es el sulfato, la reacción de carga cambia a la siguiente:



Además, el intercambiador iónico tiene preferencia sobre los iones de mayor valencia, esta es la razón por la cual es posible extraer el sulfato utilizando una resina cargada con hidróxido.

Por otro lado, una forma de verificar que el intercambio se está realizando, es comprobar que el pH en la solución aumenta a medida que la resina está en contacto con la solución. Debido a que la resina está cargada con ion cloruro (Cl^-), es preferible que después del intercambio queden iones OH^- en vez de iones Cl^- , ya que, de esta forma, la alcalinidad de la solución generada por los iones OH^- se puede controlar más fácilmente que retirando iones cloruro de la solución.



Como en el intercambio iónico las reacciones son reversibles, la reacción de re-extracción de sulfato sería:



Finalmente, la resina queda apta para una nueva etapa de carga. (Mirko Grágeda Zegarra, 2006)

2.2.1. Cinética de la reacción:

La cinética de intercambio iónico se debe abordar desde un punto de vista micro (a nivel de partícula) y desde un punto de vista macro (lecho de resina), el cual tiene relación con el equipo donde ocurre la reacción.

A nivel de partícula se tienen tres mecanismos de control:

- Control por transferencia en el film.
- Control por difusión en la partícula (Difusión de Fick).
- Control por reacción química (Modelo Núcleo recesivo).

Para el caso del intercambio iónico, el mecanismo que regula la velocidad de la reacción es el de control por difusión en la partícula (esfera de resina), en el cual, existe un contacto entre el sólido (resina) y la solución.

Para este caso, el tiempo de reacción se puede modelar mediante la siguiente ecuación:¹

$$t = -\ln(1 - x^2) \frac{R_0^2}{D\pi^2}$$

Coefficiente de distribución: D_{Me}

Se define el parámetro D_{Me} como la razón de concentración de interés entre la fase resina y la solución en equilibrio como:

$$D_{Me} = \left(\frac{\text{Concentración metal en resina}}{\text{Concentración metal en solución}} \right)_{eq}$$

Factor de separación: S_F

Este parámetro mide la selectividad de la extracción y se define como:

$$S_F = \frac{\text{Coeficiente de distribución de metal A}}{\text{Coeficiente de distribución de metal B}}$$

El estudio a nivel de lecho de resina guarda relación con el equipo en que se realizará la reacción de intercambio.

¹ (F.Parada, 2010)

La reacción de intercambio iónico se lleva a cabo en una cantidad de tiempo determinada. Para esta investigación se midió la concentración de iones absorbidos por la resina en distintos tiempos de contacto.

2.2.2. Carga máxima

Es la capacidad máxima que tiene la resina para intercambio iónico. Se mide en eq/L (equivalentes por litro). Se obtiene cargando la resina repetidas veces hasta que la resina ya no pueda realizar más intercambios con la solución.

2.2.3. Isotherma de extracción

La isoterma de extracción representa el balance de masa entre la resina y la solución acuosa. Se obtiene experimentalmente haciendo sucesivos contactos entre la resina y la solución, en la que se varía tanto la masa de resina empleada, como también el volumen de solución de contacto. Esta última contiene una concentración constante de iones en cada contacto.

Cuando se contacta una cantidad de resina que es pequeña respecto a un volumen de solución, se obtiene la máxima absorción de iones, lo que corresponde a la máxima concentración de iones en la resina. Análogamente, cuando se contacta una cantidad de resina que es grande respecto a un volumen de solución, se obtiene la mínima absorción de iones, lo que corresponde a la mínima concentración de iones en la resina.

2.2.4. Elusión

En la elusión o descarga o re-extracción de la resina, se contacta la resina cargada con una solución que contiene una alta concentración de iones más afines a la resina, que el ion que se desea descargar, por lo que ocurre un nuevo intercambio iónico. En el caso de que el ion más afín sea el H^+ , el intercambio pasa por un cambio de pH entre las fases carga/descarga.

Cuando la solución se descarga, la resina queda apta para un nuevo contacto, debido a que la resina vuelve a quedar con el sitio activo previo a la carga.

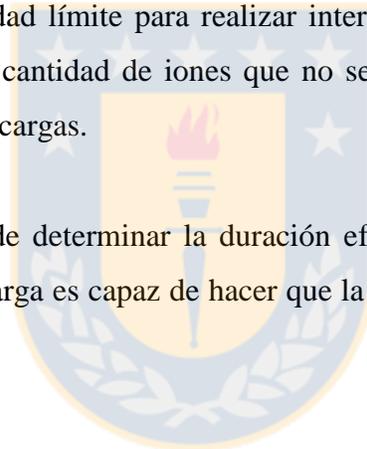
2.2.5. Hinchabilidad de la resina

La capacidad para absorber agua de la resina estando seca, se mide para poder calcular el aumento de volumen de la resina cuando tiene contacto con la solución.

2.2.6. Capacidad máxima de intercambio de la resina

La resina tiene una capacidad límite para realizar intercambios. Después de que ocurre una descarga de la resina queda una cantidad de iones que no se descargó, la cual se va acumulando después de sucesivas cargas y descargas.

Este dato, además de determinar la duración efectiva de la resina, también ayuda a determinar si la solución de descarga es capaz de hacer que la resina descargue la solución. (Pinilla, 2008)



3. Estado del Arte

A continuación, se presentan diferentes estudios considerados en el estado del arte, en los que se ocupó resinas de intercambio iónico alcalina fuertes para la remoción de ion sulfato.

(Ashref Darbi, 2003) abordaron distintos métodos para extraer sulfato, y entre los cuales el intercambio iónico estuvo dentro de las mejores alternativas. Se investigaron tres tipos de agua (agua potable con sulfato, agua subterránea de Leroy y agua de una corriente rápida en Saskatchewan - Canadá), a las cuales se les añadió sulfato de magnesio hasta llegar a una concentración de 1000 y 2000 ppm. Para el intercambio se utilizó una columna de 90 cm de largo y 1 cm de diámetro. La resina estuvo en contacto con la solución durante 4 horas, retirando muestras después de 1 hora de contacto cada media hora. La Figura 1 muestra como la resina es capaz de disminuir la concentración de sulfato en las aguas de Leroy y Swift Current. Las concentraciones iniciales de sulfato en Leroy y Swift Current fueron de 2280 y 3665 mg/L respectivamente. Las aguas de Swift Current hasta los 100 minutos aproximadamente, la resina ABS2 es capaz de retirar prácticamente el 100% del sulfato, y luego empieza a disminuir su extracción debido a su saturación, y luego aumentando la concentración de sulfato en la solución por la disminución en su capacidad de extracción. Por otro lado, en las aguas de Leroy, se puede ver que la resina ABS2 logra una extracción de sulfato menor, la cual se mantiene estable hasta los 100 minutos aproximadamente. La Figura 2 muestra el tiempo de regeneración para las muestras de Leroy y Swift Current. Se puede distinguir como la resina ABS 2 es capaz de soltar prácticamente todo el sulfato extraído en ambas aguas durante los primeros 40 minutos de elusión. En conclusión, el intercambio iónico es una alternativa conveniente debido a su capacidad de disminuir el sulfato en concentraciones de 1000 y 2000 ppm en aguas de Leroy y Swift Current. Además, es una alternativa que se puede utilizar para el tratamiento de aguas de consumo humano.

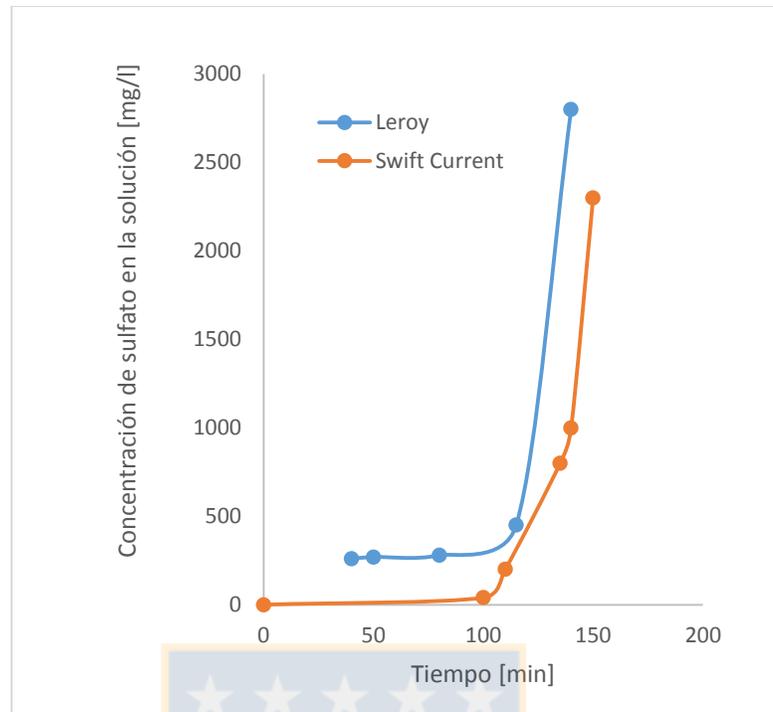


Figura 1: Variación de la concentración de sulfato en solución. Prueba de carga Resina ABS 2. (Ashref Darbi, 2003, pág. 177)

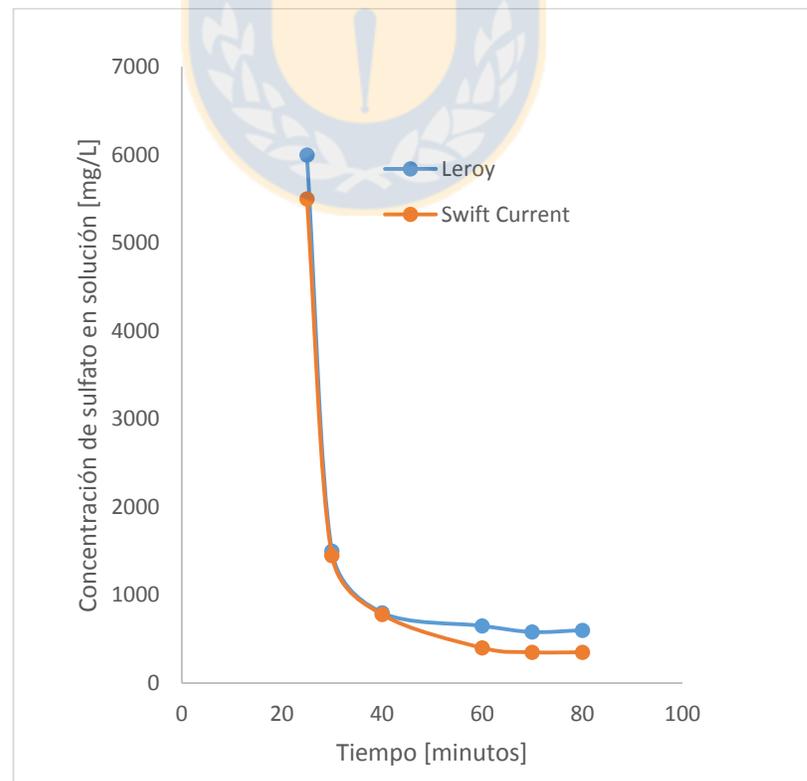
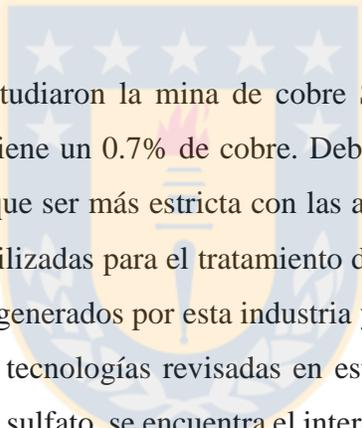


Figura 2: Concentración de sulfato en solución de regeneración. Resina ABS 2 (Ashref Darbi, 2003, pág. 178)

(W. Ashane M. Fernando, 2018), estudiaron que el drenaje ácido de minas (AMD) y, el drenaje ácido de rocas (DRA) contienen sulfatos de metales pesados, generados por la oxidación de sulfuros metálicos. El efluente rico en sulfatos avanza aguas abajo, contaminando aguas de consumo y comprometiendo el medio ambiente. En esta investigación se revisó el proceso de precipitación de yeso por intercambio iónico en contracorriente (GYP-CIX), el cual consiste en adicionar calcio a la solución para precipitar sulfato a la forma de yeso, y añadiendo resinas aniónicas y catiónicas, las cuales remueven el calcio y sulfato restantes que no precipitaron. En la experimentación se ocupó una solución que contiene una concentración de 500 ppm de calcio y 1200 ppm de sulfato. Luego del contacto con las resinas se obtuvo una concentración de 50 ppm de calcio y menos de 200 ppm de sulfato. En este proceso la formación de yeso puede mejorarse a partir de la precipitación de sulfato con calcio.



(Reza Haghsheno, 2009) estudiaron la mina de cobre Sarcheshmeh la cual procesa 41 mil toneladas/día de mineral que contiene un 0.7% de cobre. Debido a los altos volúmenes de mineral procesado, la industria ha tenido que ser más estricta con las aguas residuales teniendo que mejorar las instalaciones y la tecnología utilizadas para el tratamiento de estas. El sulfato y metales disueltos son los principales contaminantes generados por esta industria y el daño medioambiental que pueden generar es enorme. Dentro de las tecnologías revisadas en esta publicación para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con sulfato, se encuentra el intercambio iónico. En este estudio se hizo un contacto de una resina aniónica lewattit K6362 en una columna, a la cual se le introducían soluciones de 500 a 900 ppm de sulfato, por medio de una bomba que funcionó a velocidad constante, y cuya solución se introducía en la parte superior de la columna. La solución estuvo en contacto con la resina hasta lograr una extracción cercana al 100%. También se hicieron experimentos en los que se varió la cantidad de resina de 0.2 g a 1.2 g a un volumen constante de solución a un tiempo de contacto de 24 horas. El análisis químico se hizo por medio de cromatografía. En los resultados se tiene que hay una extracción completa de sulfato a una concentración de resina de 1000 mg /100 ml. En la Figura 3 se muestra la relación entre el porcentaje de extracción de sulfato y la cantidad de resina ocupada en una prueba en la que se utilizó una concentración de sulfato entre 500 ppm y 900 ppm. Se puede ver como aumenta el porcentaje de extracción de sulfato en la resina, hasta llegar al 100% de extracción, donde se utilizó la razón resina/agua antes descrita. En conclusión, la resina Lewattit K6362 puede extraer iones sulfato en solución en el rango de concentración de 500 a 900 mg/L.

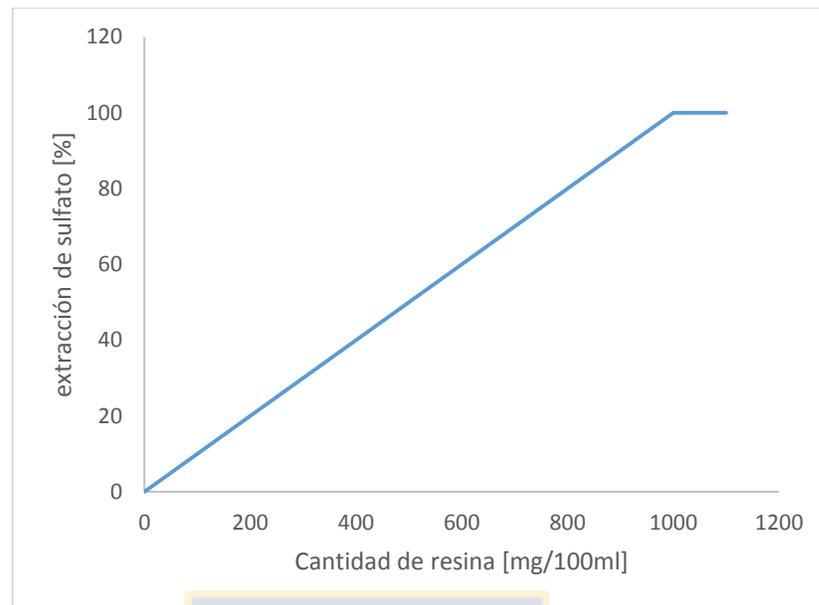
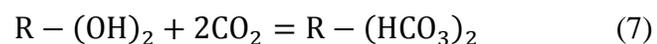
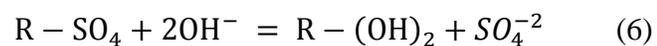
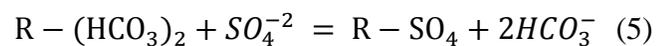


Figura 3: Eficiencia de extracción de sulfato respecto a la resina Lewatit k6362. (Reza Haghsheno, 2009, pág. 965)

(Musterman, 1979), investigaron que en el medio oeste de Estados Unidos tienen problemas por la alta concentración de sulfato causada por la disolución de yeso (CaSO_4). La concentración de sulfato se encuentra entre los 1000 y 3000 ppm. Para el tratamiento no se recomienda utilizar osmosis inversa debido al alto costo de operación y mantención. Por lo anterior, se ocupó el método de intercambio iónico en columnas utilizando la resina IRA-68 que es aniónica débil, en la forma de amina terciaria. La resina empleada fue acondicionada con bicarbonato, de esta manera, cuando ocurra el intercambio iónico, el bicarbonato será más fácil de remover. Luego de la carga de la resina se ocupó NaOH para la descarga, donde las reacciones de carga y descarga son:



La ecuación (5) indica la carga de la resina ya acondicionada en la que se intercambia el ion sulfato por el bicarbonato. En la ecuación (6) se muestra la descarga de la resina en medio alcalino gracias a la presencia de iones OH^- . Finalmente, en la ecuación (7) se muestra la regeneración de la resina por medio de la adición de dióxido de carbono, quedando la resina lista para un nuevo ciclo de extracción de sulfato.

Para el experimento se ocupó sulfato de sodio (Na_2SO_4) a una concentración de 2000 ppm. En la Figura 4 se muestra como varía la concentración de sulfato en la solución. Hasta antes de los 20 minutos hay un 100% de extracción, luego la resina llega a su saturación, por lo que empieza a extraer menos sulfato, llegando finalmente a no extraer nada de sulfato. Como resultado se obtuvo que la resina fue capaz de disminuir la concentración de sulfato de la solución en un 100% durante un tiempo de 20 minutos. También se pudo comprobar la eficiencia en el acondicionamiento de la resina con bicarbonato. En conclusión, se puede decir que la resina IRA-68 es apta para la extracción de sulfato, utilizando una columna de intercambio iónico.

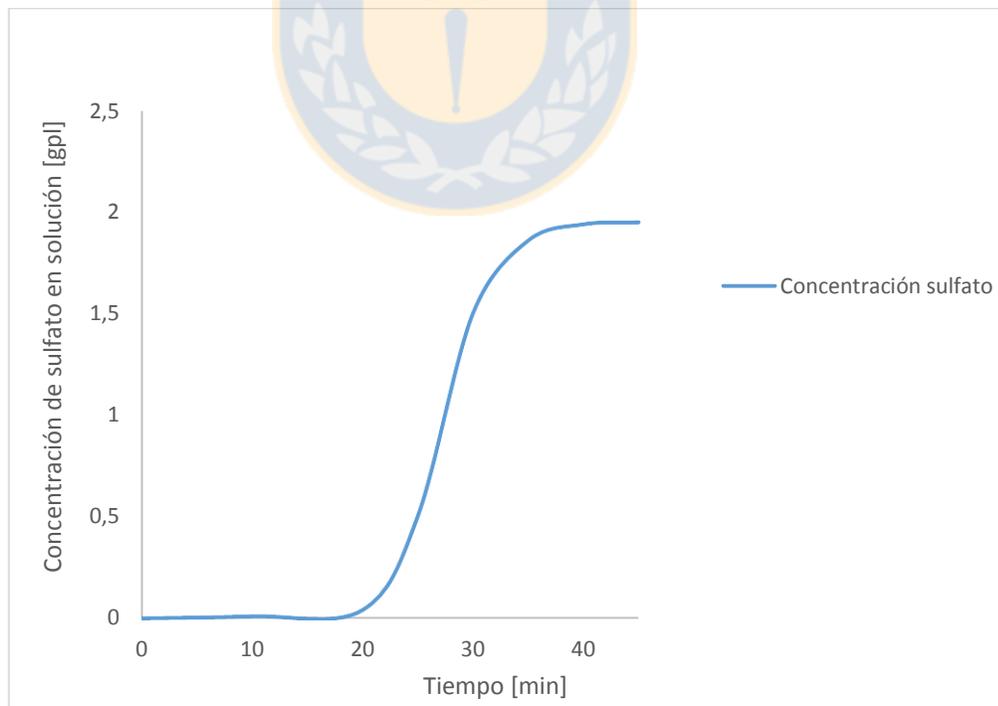


Figura 4: Variación de la concentración de sulfato en solución. Resina IRA-68. (Musterman, 1979, pág. 344)

4. Desarrollo experimental

4.1. Resinas utilizadas

De la revisión bibliográfica realizada, es posible extraer sulfato con las resinas descritas en la Tabla 1. De entre estas resinas se decidió experimentar con las alcalinas IRA-400, e IRA-420, las cuales presentaban buen rendimiento y se aplican comercialmente para la remoción de sulfato. Ambas resinas fueron conseguidas en la empresa MERCK Chile.

Las resinas de la Tabla 1 fueron probadas en distintos estudios para la extracción de sulfato desde aguas residuales.

Tabla 1: Resinas aptas para extracción de sulfato

Resina	Tipo
Amberlite IRA-68	Aniónica
Amberlite IRA-400	Aniónica
Amberlite IRA – 458	Aniónica
Amberlite IRA – 420	Aniónica
Amberlite MB20	Mezcla
Amberlite MB400	Mezcla
Dowex A-1	Aniónica

En la Tabla 2 se muestran las especificaciones técnicas de la ²resina IRA-400. En la Tabla 3 se ven las especificaciones técnicas de la ³resina IRA-420.

Tabla 2: Especificaciones resina IRA-400

Temperatura límite	60°C
Cross-Linkage	8%
Humedad	~45%
Matriz	Stireno-DVB
Tamaño de partícula	0.6 a 0.8 mm
pH de operación	0-14
Capacidad	1.4 meq/mL

Tabla 3: Especificaciones resina IRA-420

Temperatura límite	60°C
Cross-Linkage	8%
Humedad	~45%
Matriz	Polystireno-DVB
Tamaño de partícula	0.297 a 1.19 mm
pH de operación	0-14
Capacidad	0.95 meq/mL

² Y ³(Lenntech, Water treatment and air purification., s.f.)

4.2. Materiales

4.2.1. Material de laboratorio utilizado

Las pruebas se realizaron en el laboratorio del DIMET UdeC, y los materiales utilizados fueron:

- Resina IRA-400
- Resina IRA-420
- NaOH pro-análisis
- Na_2SO_4 pro-análisis
- BaCl_2 pro-análisis
- Agua destilada
- Probetas de 10 ml
- Pipetas de 50 y 100 ml
- Propipeta
- Vaso precipitado de 250, 500 y 1000 ml
- Agitador magnético
- Agitador orbital
- Agitador de eje
- Matraz Kitasato
- Papel filtro
- Balanza milimétrica



4.3. Procedimiento y condiciones experimentales

4.3.1. Preparación de la resina

a) Medición de la hinchabilidad de la resina:

En la prueba de hinchabilidad se determinó la capacidad de la resina para retener agua. Con esto se logra observar el volumen final de la resina después de realizar los intercambios.

Se pesaron 2 g de resina y se colocaron en una probeta graduada a temperatura ambiente. Se midió la altura ocupada por esta. Luego se añadió agua destilada hasta que dejó de aumentar el volumen de la misma.

Finalmente se registró la altura final del lecho de resina.

En la Figura 5 se muestra la resina IRA-400 en la prueba de hinchabilidad. Se contactaron 2 g de resina seca los cuales aumentaron su volumen debido al agua que ingresó a ella.



Figura 5: Resina IRA-400 en prueba de hinchabilidad

b) Acondicionamiento de la resina

En este estudio se aplicó la resina Amberlite IRA-400 (Cl⁻) (malla 16-50) (Sigma-Aldrich), la cual es un intercambiador iónico alcalino fuerte. En su estructura posee un grupo funcional de amonio cuaternario, cuyas características se señalan en la Tabla 2.

También se ocupó la resina IRA-420, con las cuales se hicieron las mismas pruebas que con la resina IRA-400. Las especificaciones de la resina IRA-420 se describen en la Tabla 3. En la Figura 6 se muestra la resina IRA-400 mientras es contactada con una solución de hidróxido de sodio para su acondicionamiento. Se utilizó un agitador de pedestal con una hélice de vidrio para evitar dañar la resina por la rotación.



Figura 6: Acondicionamiento de resina IRA-400

A causa de que ambas resinas contienen cloruro como ion intercambiable (R-Cl), no pueden ser usadas directamente debido a que van a intercambiar este anión con la solución de PLS, por lo que se extraería sulfato y quedaría cloruro en la solución. Por esta razón se debió hacer un acondicionamiento para que la resina intercambie iones OH^- quedando de la forma R-OH. (John Steinbach, 1951). Se acondicionaron 100 g de resina, los cuales se lavaron con agua destilada para quitar el ion cloruro inicial que posee ésta y luego se añadió NaOH en una concentración de 2.5M. La resina se agito con un agitador de pedestal, a 200 rpm y a temperatura ambiente durante 4 horas (el pH de la solución sobrepasó el pH 14 debido a la concentración de NaOH utilizada), de esta forma se acompleja el ion cloruro restante. Por último, la resina se lavó con agua destilada, quedando lista para ser utilizada.

4.3.2. Isotherma de extracción:

Para la isoterma de extracción se hicieron contactos de resina/solución en vasos precipitados de volúmenes de 250 y 1000 mL. La cantidad de resina ocupada en cada prueba fluctuó entre los valores de 0.25 g y 4 g, y la solución entre volúmenes de 50 mL y 700 mL.

En cada contacto se utilizó una concentración 1000 y 2000 ppm de sulfato en la forma de Na_2SO_4 , y una agitación de 200 rpm. Cada prueba duró 4 horas y se mantuvo a temperatura ambiente. El pH de la solución inicial con 1000 y 2000 ppm de sulfato fue de 6. Al término de cada prueba se filtró la resina y se extrajeron 50 mL de solución para medir pH y realizar análisis químico. En la Figura 7 se muestra el equipo utilizado para medir pH.

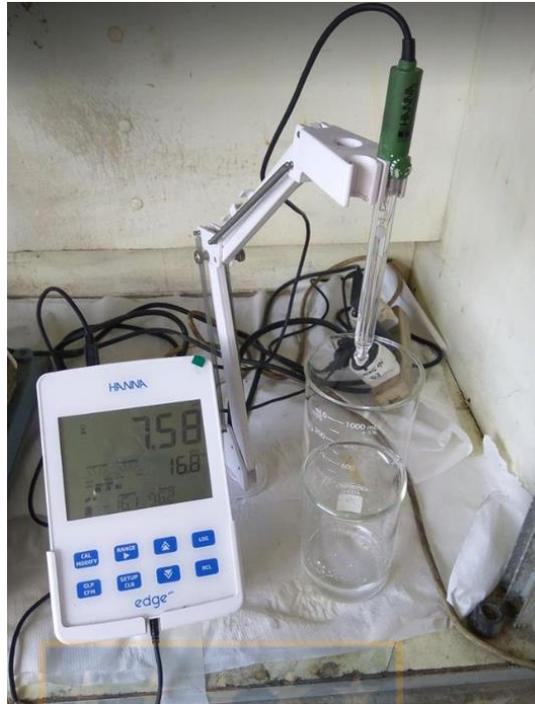


Figura 7: Medición de pH de muestras.

4.3.3. Cinética de extracción:

En la prueba de cinética, se contactaron 2 g de resina con una solución 1000 ppm de sulfato en la forma de Na_2SO_4 en un vaso precipitado de 2000 mL. Se agitó a 200 rpm a temperatura ambiente utilizando un agitador de pedestal con una hélice de vidrio y posteriormente se añadió la resina. El pH de la solución inicial con sulfato fue de 6.

Se extrajeron muestras de 50 mL a tiempos de 2, 5, 10, 30 y 50 minutos de reacción por medio de una pipeta.

Cada una de las muestras se llevó a análisis químico para determinación de sulfato, por método gravimétrico.

4.3.4. Elusión:

Para la prueba de elusión se preparó una muestra de resina cargada contactándola 4 veces con solución de 1000 y 2000 ppm de sulfato durante 4 horas por carga a temperatura ambiente. Se obtuvo una muestra de solución después de cada carga.

A continuación, se pesó la masa de NaOH necesaria para preparar soluciones de 100 mL de concentraciones 1M, 2M, 3M, 4M, y 5M de OH^- , en vasos precipitados de 200 mL. El pH de la solución de agente re-extractante con 1M de OH^- fue de 13, mientras que las demás sobrepasó el pH 14.

Posteriormente, se contactaron los 2 gramos de resina IRA-400 e IRA-420 con cada una de las soluciones de descarga en las cinco concentraciones durante un período de 8 horas, a 200 rpm en un shaker a temperatura ambiente. Una vez terminado el contacto, se retiraron las muestras. Se filtró la resina, y se tomó una muestra de cada vaso precipitado para análisis químico. En esta prueba no es necesario medir el pH debido a la alta concentración de OH^- , por lo que después del intercambio la variación de ésta es pequeña.

4.3.5. Prueba de carga y descarga

En la prueba de carga y descarga se busca encontrar un punto en el que se estabiliza la diferencia entre la resina cargada y la descargada. Esta diferencia representará la capacidad efectiva de la resina cuando esté en operación. En las pruebas se contactaron 2 g de resina en 200 ml de solución con 2000 ppm de sulfato y un pH de 6. Se agitó a temperatura ambiente, a 200 rpm durante 15 minutos, y luego se filtró. Se tomó una muestra de 50 mL para análisis químico para determinación de sulfato.

Posteriormente se contactó la resina con solución de NaOH a 3M, en el saker durante 15 minutos a 200 rpm a temperatura ambiente. Al término de la agitación, se filtró la resina y se tomó una muestra de 50 mL de solución para análisis químico. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento según la cantidad de ciclos que se indicó en cada prueba.

4.4. Análisis químico realizado

El sulfato se analizó mediante gravimetría de acuerdo al siguiente procedimiento, el cual se realizó en el laboratorio Dimet a temperatura ambiente.

Para el análisis químico se tomaron alícuotas de 40 mL, a las cuales se les añadió 6 mL de ácido nítrico en un vaso precipitado de 250 mL. La muestra se colocó en una placa térmica para evaporar hasta la sequedad.

Una vez seca la muestra se le agregó 20 mL de agua destilada, 2 gotas de indicador metil orange, 3 mL de ácido clorhídrico y, por último, amoníaco, hasta conseguir un color amarillo que indica que la solución es alcalina. Las muestras se filtraron en un vaso precipitado de 400 mL utilizando papel filtro del n° 2 y lavando con agua destilada caliente hasta conseguir un volumen de 300 mL. En la Figura 8 se observa el material utilizado para realizar la filtración, la cual se realizó utilizando agua destilada a una temperatura de 60°C.



Figura 8: Filtración en caliente de muestras

Seguidamente se le añadieron 2 gotas de indicador metil orange, y se añadió ácido clorhídrico hasta conseguir un color rojizo y luego, 10 mL de ácido clorhídrico en exceso.

Luego se expuso en la placa caliente hasta conseguir una temperatura de 60°C. Una vez a esta temperatura, se le agregaron 15 mL de cloruro de bario (BaCl_2) al 10% con una probeta. En la Figura 9 se observa una muestra a la que se le añadió cloruro de bario para la precipitación de sulfato. En este momento, la turbiedad de la solución indica la presencia de sulfato de bario que empezará a precipitar.



Figura 9: Adición de cloruro de bario para precipitación de sulfatos.

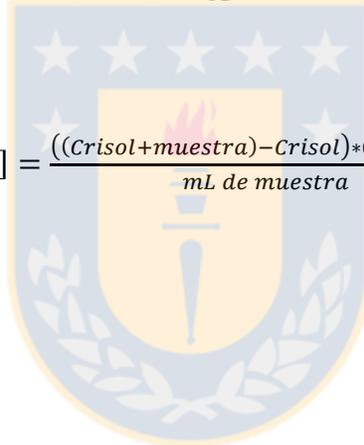
Luego se dejaron reposar de un día para otro. Una vez que precipitó el sólido, se filtró con papel n° 40 y se calcinó a una temperatura de 820°C. En la Figura 10 se observan muestras que ya terminaron la etapa de calcinación. Una vez terminada la calcinación, se hizo la diferencia de peso entre el crisol con muestra y el crisol solo.



Figura 10: Calcinación de muestras en crisol. $T^{\circ} = 820^{\circ}\text{C}$

Para calcular la concentración de $[\text{SO}_4^{-2}]$ en gpl se utilizó la siguiente fórmula:

$$[\text{SO}_4^{-2}] = \frac{((\text{Crisol} + \text{muestra}) - \text{Crisol}) * 0.411 * 1000}{\text{mL de muestra}} \quad (5)$$



5. Resultados y discusiones

5.1. Isotermas de extracción

En la Figura 11 se aprecian las isotermas de extracción de las resinas IRA-400 e IRA-420 obtenidas con una solución con 1000 ppm de sulfato inicial. Se puede observar que la isoterma de la resina IRA-400 está por sobre la isoterma de la IRA-420, lo que se traduce en una mayor capacidad de carga. Como se ve, la resina IRA-420 llega a una carga máxima de 121.8 g/L de sulfato, mientras que la resina IRA-400, llega a una carga de 170.4 g/L de sulfato. Además, los valores que están más cercanos al eje Y indican que ambas resinas pueden llegar a una extracción prácticamente completa de sulfato.

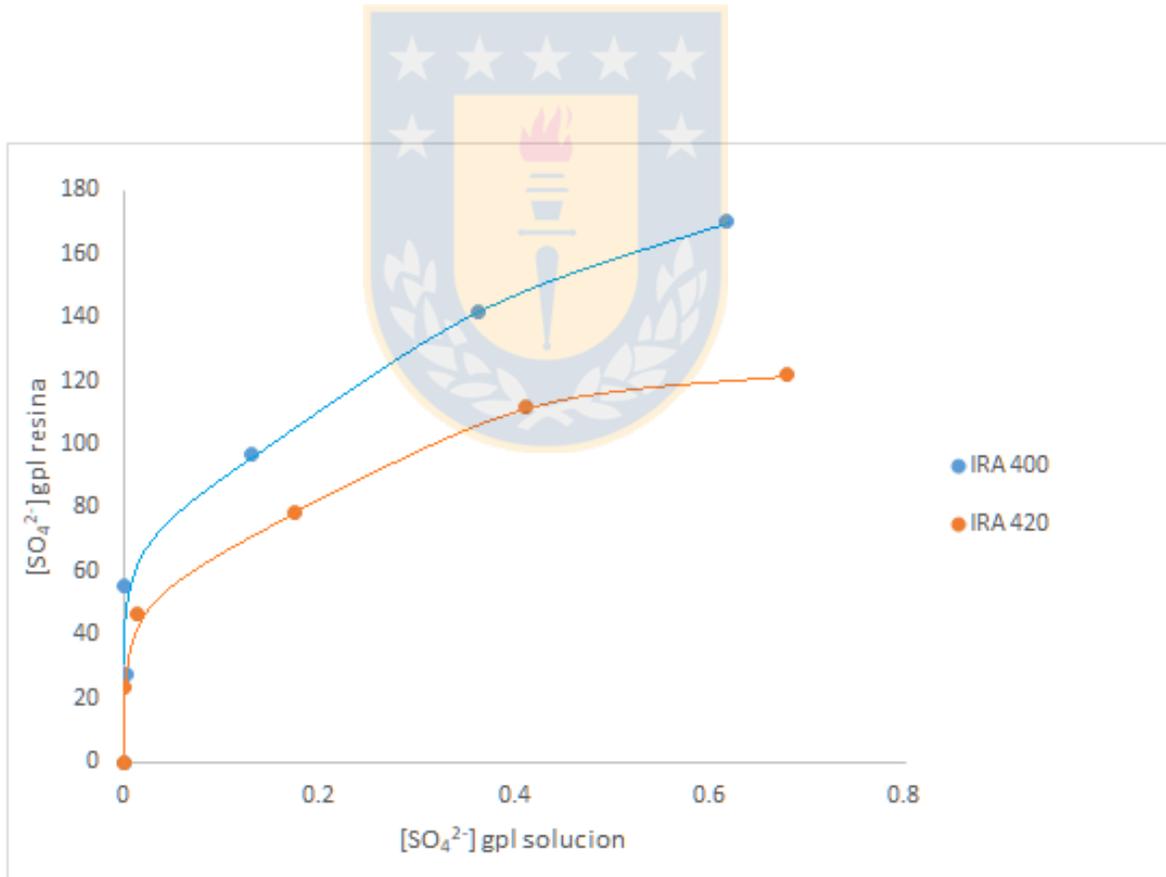


Figura 11: Isoterma de extracción resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 1000 \text{ ppm}$

En la Figura 12 se muestran las isotermas de extracción de las resinas IRA-400 e IRA-420, a una concentración de 2000 ppm de sulfato inicial. En primer lugar, se puede ver una menor capacidad de carga respecto a las isotermas de 1000 ppm. Sin embargo, para mayores concentraciones de sulfato, la capacidad de carga sube rápidamente superando a la obtenida con 1000 ppm de sulfato. Este comportamiento con 2000 ppm de sulfato podría estar influenciado por el aumento de pH debido al intercambio $\text{SO}_4^{2-}/\text{OH}^-$, por ejemplo, para la IRA-400 y una concentración de 92 g/L de sulfato en la resina, se alcanzó un pH igual a 9 en el acuoso, mientras que para 425 g/L de sulfato en la resina se obtuvo un pH de 7.96 en el acuoso. Además, se puede observar que es factible llegar a bajas concentraciones de sulfato en la solución (< 0.1 g/L). Por otro lado, se ve que la carga máxima de la resina IRA-400 es levemente mayor que la de la resina IRA-420 en estas condiciones y superaría los 400 g/L. La forma de la gráfica indicaría una dificultad de la resina para extraer el sulfato.

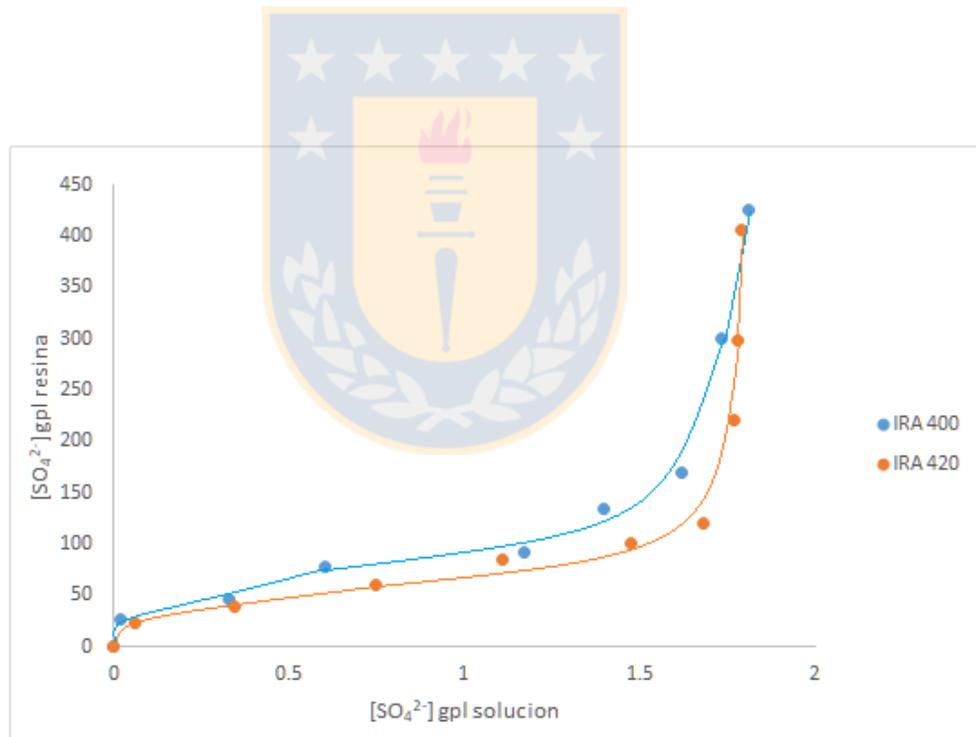


Figura 12: Isoterma de extracción. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000 \text{ ppm}$

5.2. Pruebas cinéticas

En la Figura 13 se observan las curvas cinéticas de la resina IRA-400 e IRA-420, utilizando una razón agua/resina de 0.5 L/g, y empleando una concentración de 1000 ppm de sulfato inicial. Se puede ver que ambas resinas tienen un comportamiento cinético similar en los primeros 5 minutos de reacción, en el que las resinas logran disminuir en 700 ppm la concentración de sulfato en la solución. Luego a los 10 minutos, la resina IRA-400 llega a una concentración de sulfato de 230 ppm, mientras que la resina IRA-420 llega a 256 ppm de sulfato en la solución, lo que indica una mayor extracción de sulfato por parte de la resina IRA-400, a los 10 minutos de reacción.



Figura 13: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.5 L/g

En la Figura 14 se ve como varía el pH en la prueba de cinética con 1000 ppm de sulfato inicial y una razón de agua/resina de 0.5 L/g. En la figura se puede ver que el pH de las soluciones, después de los 10 minutos, para la resina IRA-400 varía entre 9.79 y 9.69; mientras que el pH de la solución con la resina IRA-420, varía entre 10.71 y 10.59. Se observa que el pH correspondiente a la prueba con la resina IRA-400, es inferior al pH de la correspondiente a la resina IRA-420, lo cual contradice a la prueba cinética en que la resina IRA-420 extrae menos sulfato que la resina IRA-400. Esto puede deberse a que una de las resinas puede tener mayor presencia de un mecanismo diferente al de intercambio iónico como, por ejemplo, absorción, lo cual podría explicar el aumento en la carga de la resina sin llevarse a cabo el aumento de pH de la solución.

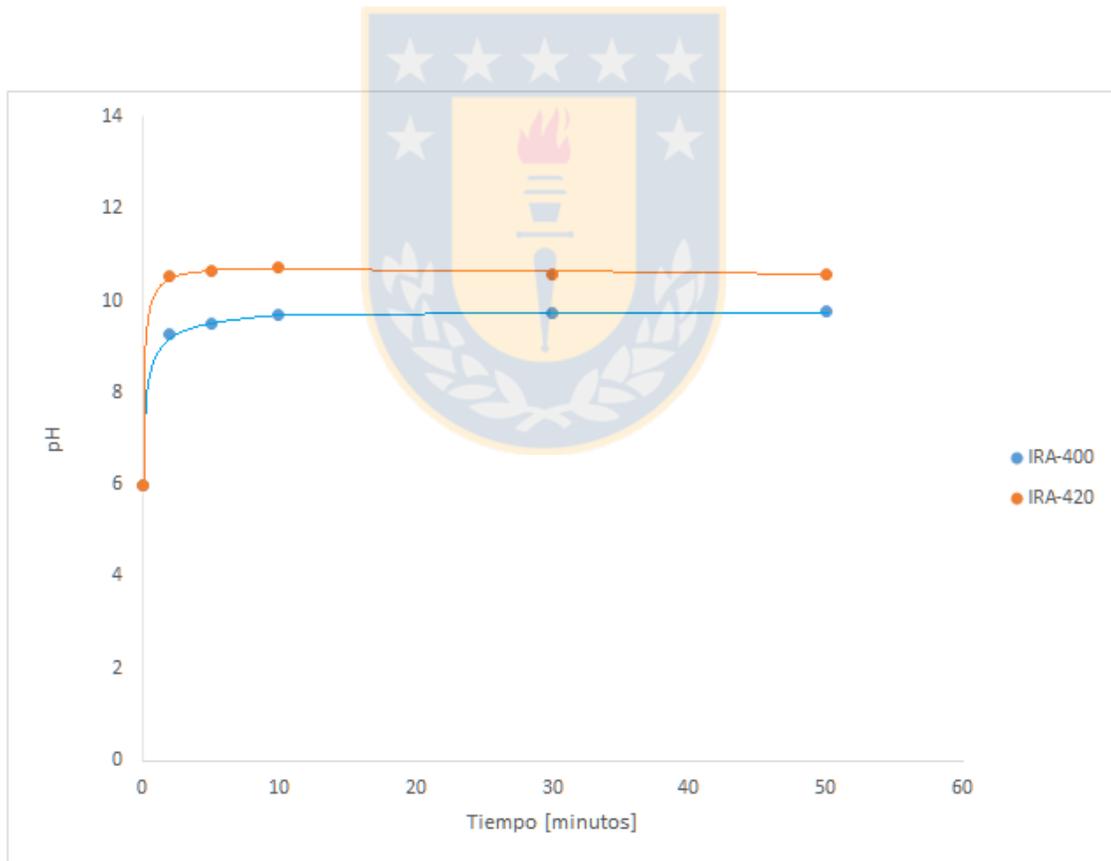


Figura 14: pH en prueba cinética Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina=0.5 L/g

En la Figura 15 se aprecian las curvas cinéticas de las resinas IRA-400 e IRA-420 con 2000 ppm de sulfato inicial y una razón agua/resina de 0.25 L/g. En la figura se puede ver que la resina IRA-400 logra bajar la concentración de sulfato en la solución, a un valor de 1.57 gpL de sulfato, mientras que la resina IRA-420, lo hace a un valor de 1.65 gpL de sulfato. Ambas resinas se comportan de una manera similar en los primeros minutos de reacción, logrando disminuir la concentración de la solución en 400 ppm aproximadamente en los primeros 10 minutos de reacción. También se puede ver que después de los 10 minutos de reacción, la concentración de sulfato en la solución no sigue disminuyendo, llegando a un valor estable cercano a 1.6 gpL de sulfato.

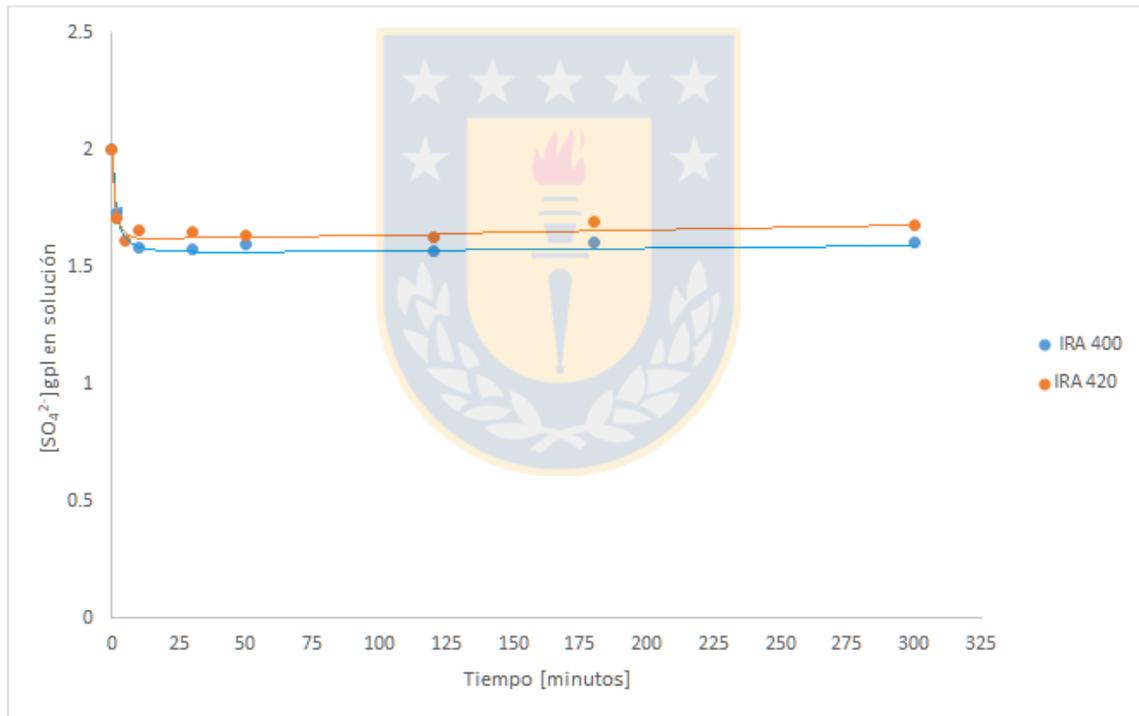


Figura 15: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.25 L/g

En la Figura 16 se observa la variación del pH en la prueba cinética con 2000 ppm de sulfato en agua y una razón agua/resina de 0.25 L/g. Se ve que en la figura se repite el mismo cambio de pH que en la prueba anterior con 1000 ppm de sulfato. La resina IRA-420, alcanzó un pH de 12.02 en los primeros 5 minutos de reacción, mientras que la resina IRA-400, alcanzó un pH de 11.68 en los primeros 5 minutos de reacción. Sin embargo, en la purificación de la solución con sulfato, se ve que la resina IRA-400 logra retirar más sulfato que la resina IRA-400. Nuevamente se puede decir, que esto puede ocurrir debido a que, en la resina hay mecanismos de interacción con la solución distintos del intercambio iónico, como lo es la absorción. Por otro lado, se puede ver que el pH, después de los 10 minutos de reacción, en la resina IRA-400, fluctuó entre los valores de 11.75 a 11.5, mientras que en la resina IRA-420, fluctuó desde 12.04 a 11.77, mientras que el análisis químico de las soluciones arrojó que la concentración de sulfato en la solución tendió a disminuir. En la resina IRA-400 de 414 ppm a los 10 min, a 398 ppm en la solución a los 180 min, mientras que para la resina IRA-420, de 388 ppm a los 5 minutos, a 310 ppm a los 180 minutos en solución.

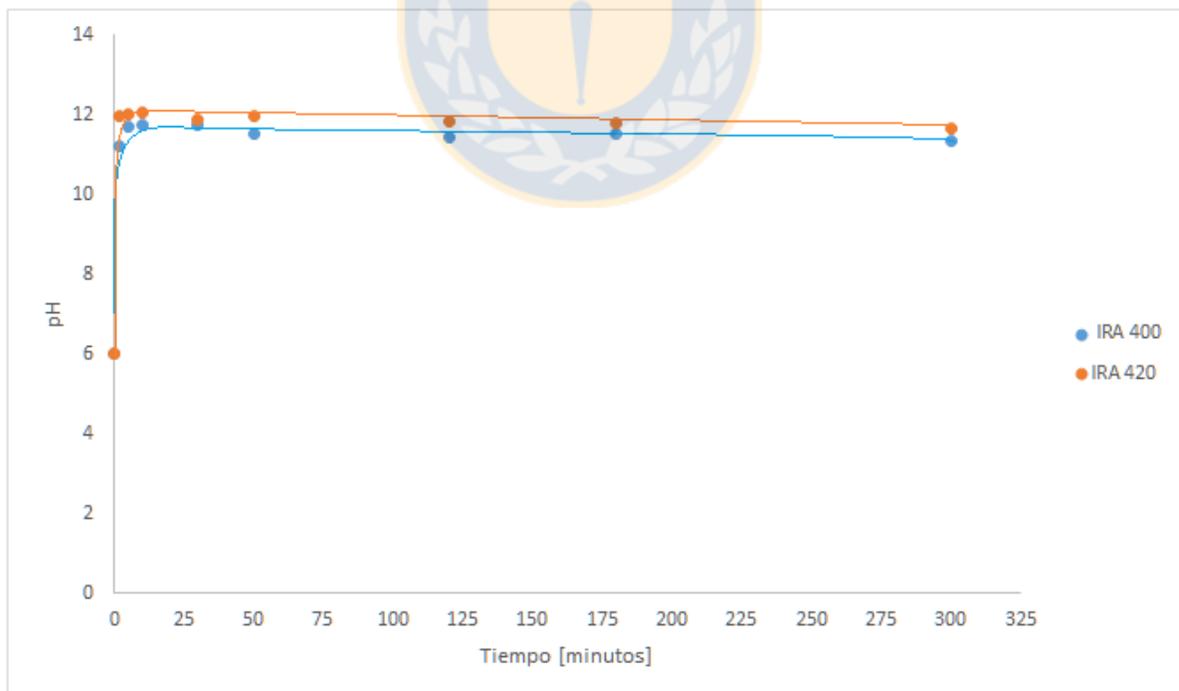


Figura 16: pH en prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.25 L/g.

En la Figura 17 se muestran las curvas de la prueba cinética de las resinas IRA-400 e IRA-420 en una solución de 2000 ppm de sulfato, y una proporción agua/resina de 0.125 L/g. En la figura se puede ver que ambas resinas son capaces de disminuir la concentración de sulfato en la solución, siendo la resina IRA-420, la que logró extraer 670 ppm de sulfato en la solución, mientras que la resina IRA-400 logró extraer 790 ppm de sulfato en la solución. También se puede ver que la reacción ocurre principalmente en los primeros minutos de reacción, y la concentración en la solución se mantuvo en el rango de 1.18 a 1.16 gpl de sulfato para la resina IRA-400, mientras que para la resina IRA-420 logró dejar la solución con una concentración final de 1.37 a 1.31 gpl de sulfato. Por lo tanto, la resina IRA-400, logró purificar más la solución que la resina IRA-420.

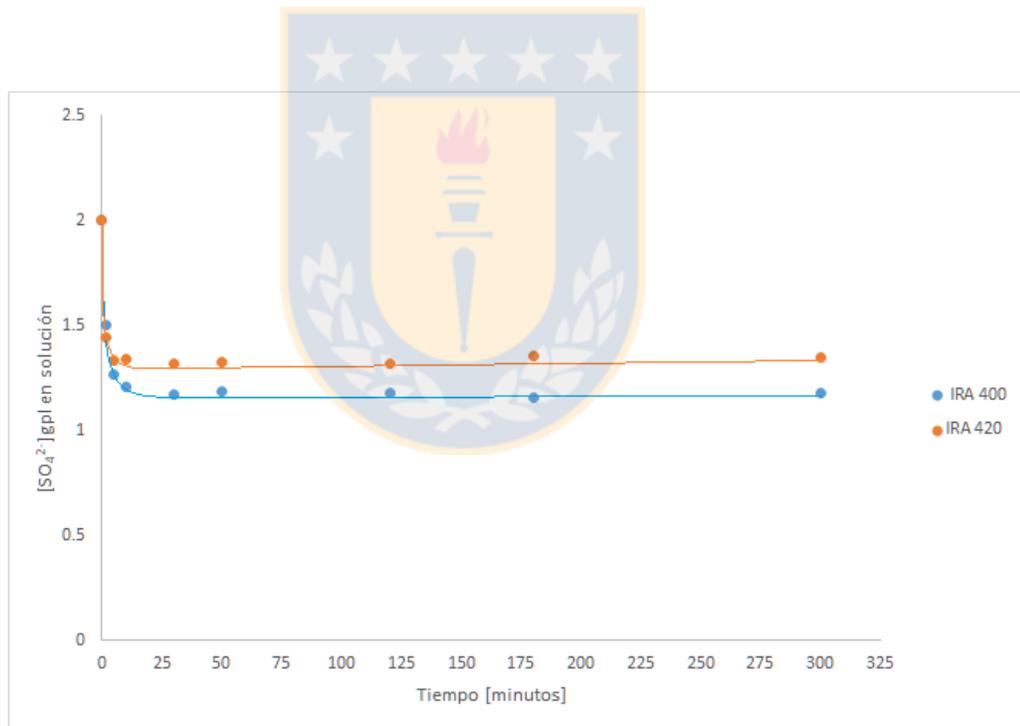


Figura 17: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.125 L/g.

En la Figura 18 se ve la variación de pH de la prueba de cinética de las resinas IRA-400 e IRA-420 en solución con 2000 ppm de sulfato y una razón agua/resina de 0.125 L/g. En la figura se puede ver el aumento de pH de la solución desde 6 hasta cerca de 12. La resina IRA-400 en los primeros 10 minutos de reacción, alcanzó un pH de 11.86, mientras que la resina IRA-420, alcanzó un pH de 12.71. Con esto se puede ver que el comportamiento que tienen ambas resinas, en que la resina que alcanza el mayor pH, no alcanza la mayor purificación de la solución, por lo que también se ve reflejado el posible mecanismo de absorción, el cual puede dar explicación a este fenómeno. Por otro lado, se puede ver que el pH de la solución que contiene la resina IRA-400, se mantiene en un rango de 11.81 a 11.54, mientras que la resina IRA-420, tiene un rango de pH de 12.36 a 12.2, lo cual es nuevamente inverso en el caso de la concentración de sulfato en la solución, en que la resina IRA-400, tiene un aumento de extracción de sulfato dejando a la solución con una concentración en el rango de 832 ppm a los 30 minutos, a 819 ppm a los 300 minutos en solución, mientras que la resina IRA-420, tiene un rango de concentración de sulfato en la solución de 668 ppm a los 5 minutos en solución, a 655 ppm de sulfato en la solución a los 300 minutos. El aumento de pH podría tener un efecto negativo en la extracción de sulfato de acuerdo a la reacción (3) planteada, es decir, a mayor pH podría tender a revertirse la reacción de intercambio, mientras que cuando el pH tiende a disminuir, la reacción tiende a retirar sulfato de la solución.

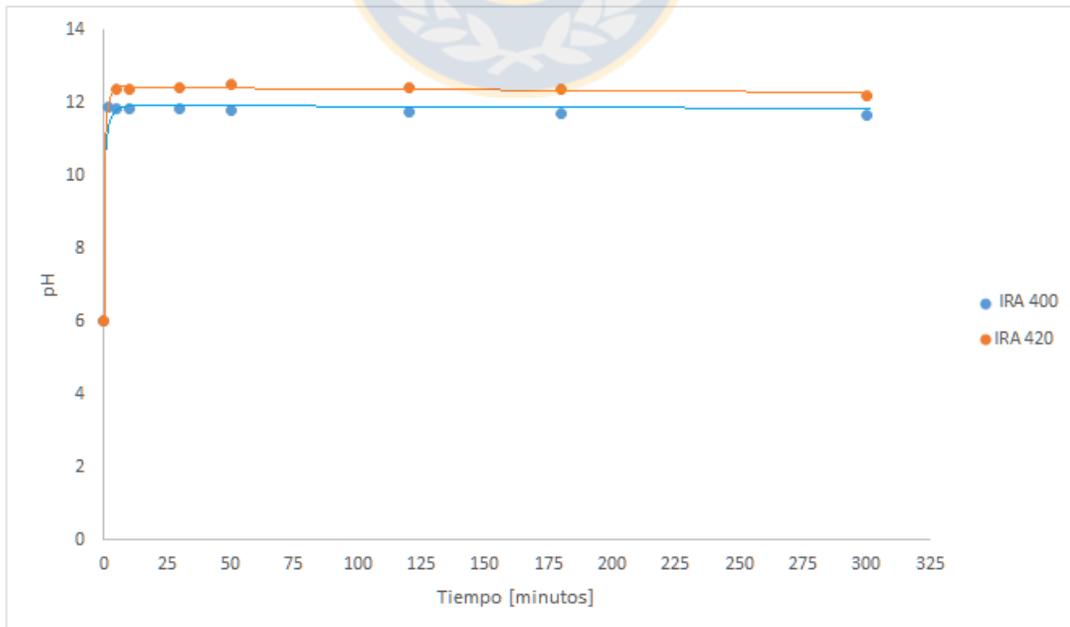


Figura 18: : pH en prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.125 L/g.

En la Figura 19 se observan las curvas de cinética de las resinas IRA-400 e IRA-420 en una solución de 2000 ppm de sulfato, y una razón agua/resina de 0.083 L/g. En la figura se puede ver que ambas resinas son capaces de disminuir la concentración de sulfato en la solución a valores que están cercanos a 900 ppm sulfato, siendo en este caso, la mayor extracción de sulfato, lo cual es acorde con la razón agua/resina utilizada. La purificación de la solución, al igual que los casos anteriores, se llevó a cabo en los primeros minutos de reacción. También se puede apreciar en la figura que ambas resinas obtienen valores muy cercanos de extracción, durante los primeros minutos de reacción. A su vez, se ve que la resina IRA-400, logra retirar 1.17 gpL de sulfato, superando a la resina IRA-420 con 1.15 gpL de sulfato. Por otro lado, el rango de extracción de sulfato de ambas resinas se mantuvo en un rango de 0.84 a 0.82 gpL de sulfato en solución, mientras que la resina IRA-420, se mantuvo en un rango de 0.93 a 0.88 gpL de sulfato. Por lo tanto, la resina IRA-400, logró una mayor purificación de la solución, que la resina IRA-420.

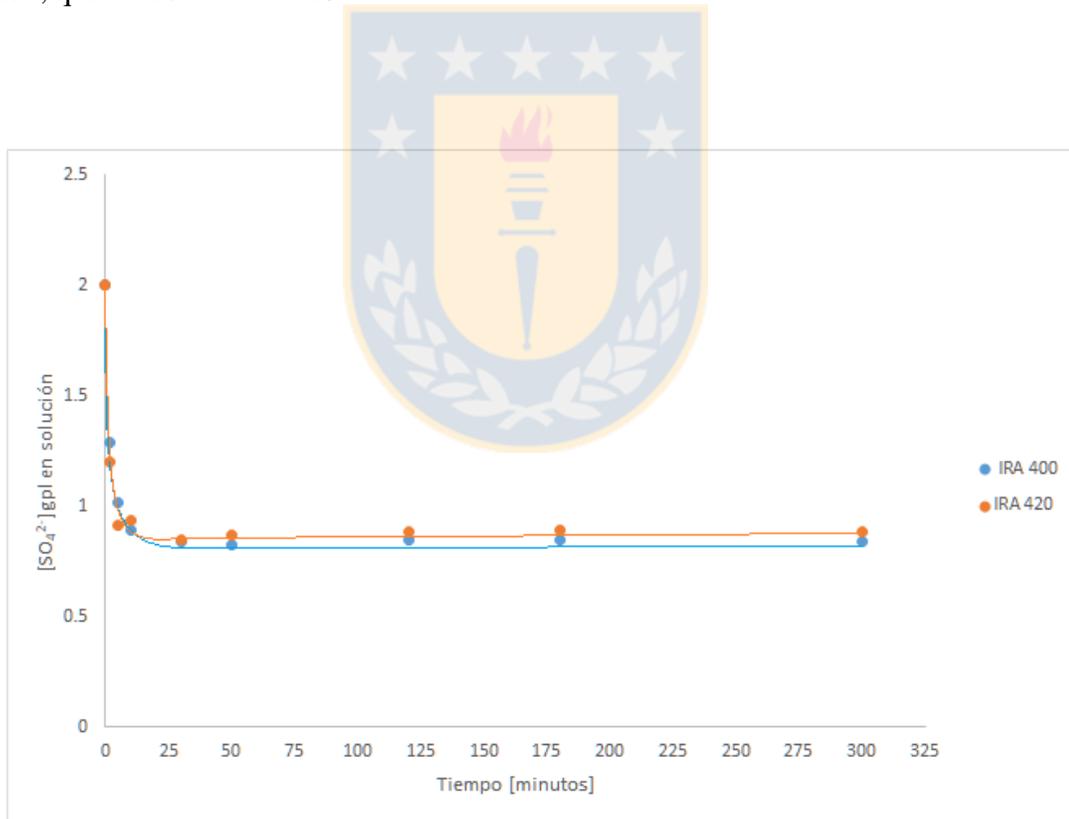


Figura 19: Prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.083 L/g

En la Figura 20 se muestra la variación de pH de la prueba cinética de las resinas IRA-400 e IRA-420, en una solución con 2000 ppm de sulfato, y una razón agua/resina de 0.083 L/g. En la figura se puede ver el aumento de pH de solución inicialmente en 6 y llegando a valores cercanos de 11. En este caso, ocurrió nuevamente el mismo fenómeno, en el que la curva que alcanza el mayor pH no es la que obtiene la mayor extracción de sulfato, por lo que este hecho se puede explicar nuevamente con el mecanismo de absorción de sulfato en la resina. Se puede ver también que el rango de pH de la resina IRA-400, después de los 5 minutos de reacción, está en 12.02 a 11.77, mientras que el de la resina IRA-420, estuvo en el rango de 10.39 a 10.47, en que nuevamente esto se traduce en un aumento en la purificación de la solución, en que la resina IRA-400, logra que la solución quede con una concentración de sulfato entre los valores de 1172 a 1156 ppm de sulfato, mientras que la resina IRA-420, logra un rango de concentración de sulfato en la solución entre los valores de 1150 a 1106 ppm.

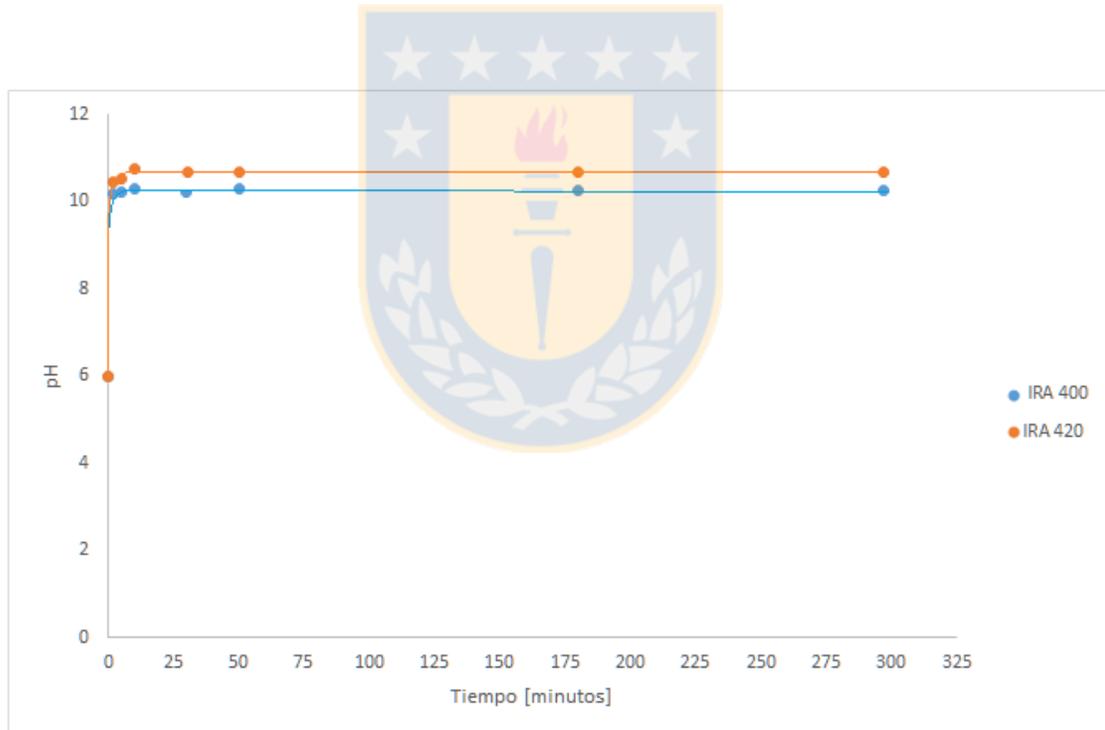


Figura 20: pH prueba cinética. Resinas IRA-400 e IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.083 L/g

5.3. Pruebas de elusión o re-extracción de sulfato

En la Figura 21 se ve el efecto de la concentración de NaOH en la re-extracción del sulfato, utilizando las resinas IRA-400 e IRA-420, las cuales fueron cargadas cuatro veces en una solución de 1000 ppm de sulfato y utilizando una razón agua/resina de 0.05 L/g. En la re-extracción se utilizó una razón agente re-extractante/resina de 0.05 L/g. El comportamiento de ambas curvas es similar, notando que la mayor extracción la realizó la resina IRA-400 alcanzando una concentración de solución en la descarga de 2.35 gpL de sulfato, utilizando una solución 2 M de NaOH. La resina IRA-420, logró descargar una concentración máxima de sulfato de 2.25 gpl también con una solución de 2 M de NaOH. La resina IRA-400 tiene una mayor capacidad de elusión que la resina IRA-420, esto se ve reflejado en la cantidad de sulfato que logro ser re-extraído desde la resina.

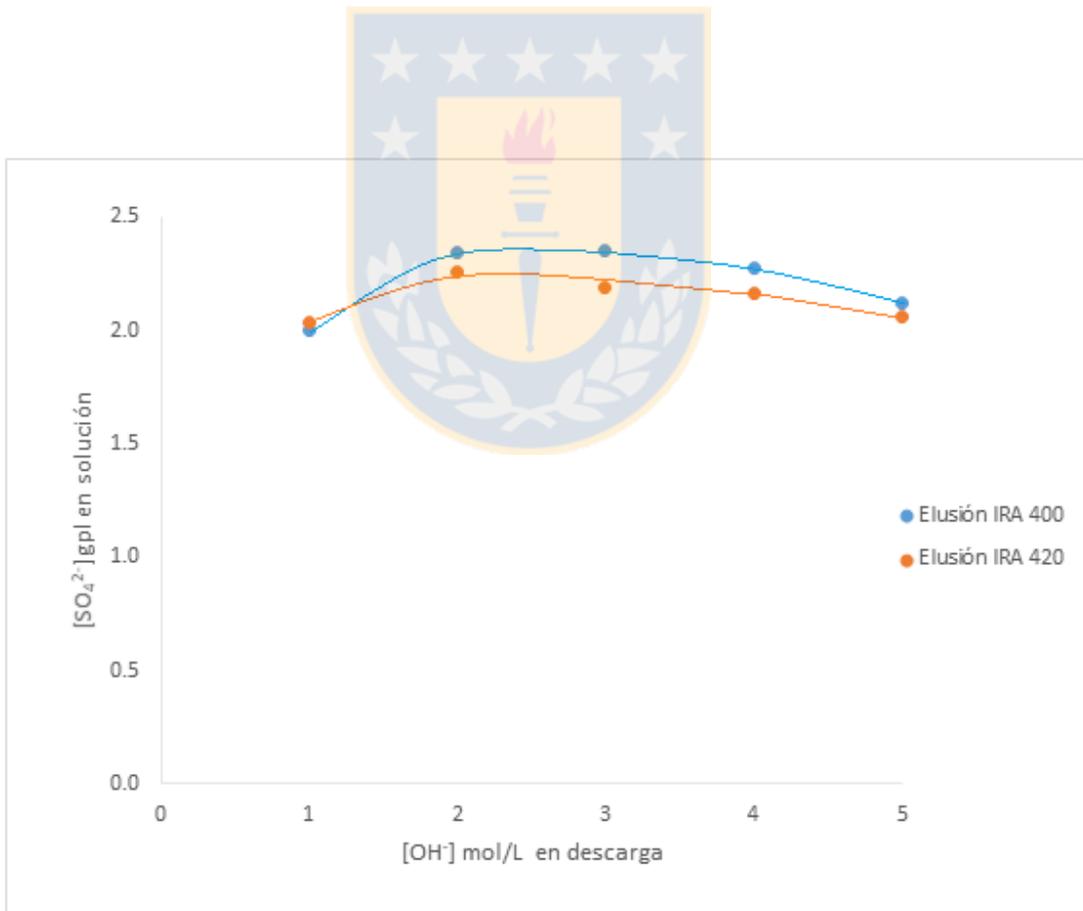


Figura 21: Prueba de elusión. Efecto de la concentración de NaOH en la re-extracción del sulfato. Resina cargada con [SO₄²⁻]=1000ppm. Razón agua/resina=0.05 L/g

En la Figura 22 se observa el efecto de la concentración de NaOH en la re-extracción del sulfato, utilizando las resinas IRA-400 e IRA-420, las cuales fueron cargadas cuatro veces en una solución de 2000 ppm de sulfato, y utilizando una razón agua/resina de 0.05 L/g. En la re-extracción se utilizó una razón agente re-extractante/resina de 0.05 L/g. En la figura se ve un comportamiento distinto que para la elusión con 1000 ppm de sulfato. La resina IRA-400 logra la mayor extracción en una concentración de sulfato de 4 mol/L de hidróxido de sodio, mientras que la resina IRA-420, no se puede decir lo mismo, debido a que la curva tiende a aumentar y se escapa del rango estudiado, lo que significa que puede haber una concentración de hidróxido mayor o igual a 5 mol/L en que la elusión puede ser superior a la elusión de la resina IRA-400.

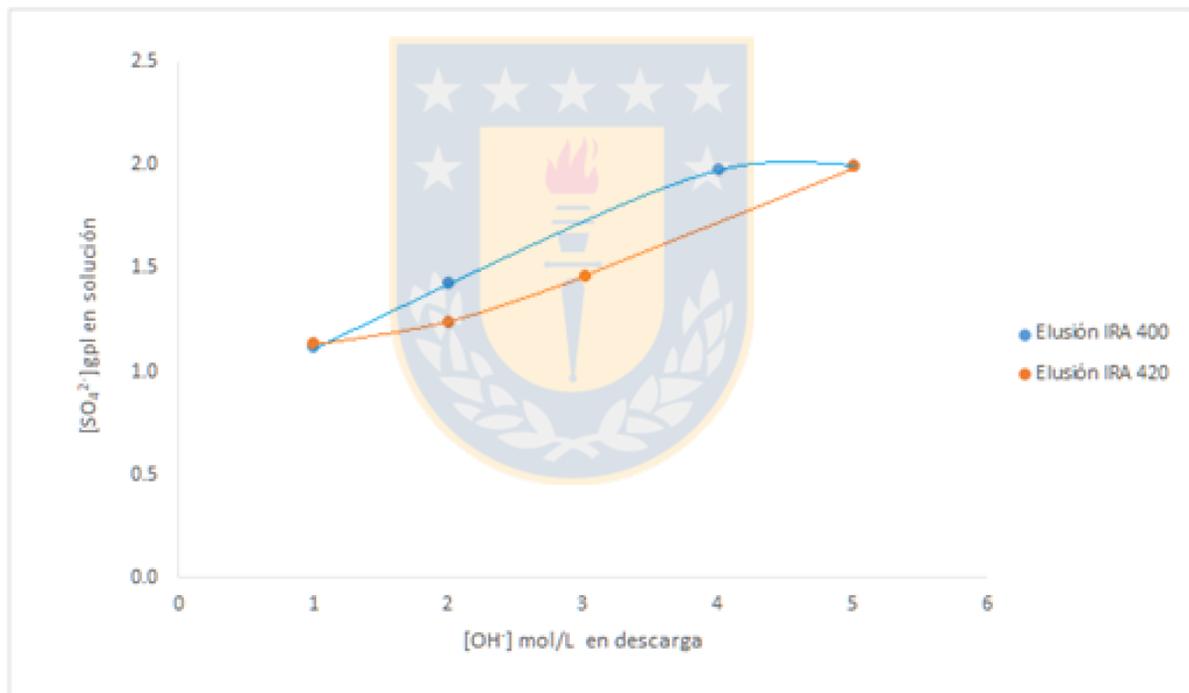


Figura 22: Prueba de elusión. Efecto de la concentración de NaOH en la re-extracción del sulfato Resina cargada con $[SO_4^{2-}] = 2000\text{ppm}$. Razón agua/resina = 0.05 L/g

5.4. Pruebas de carga y descarga

En la Figura 23 se aprecia la eficiencia de la prueba de carga y descarga de la resina IRA-400 en una razón agua/resina de 0.2 L/g, La carga se realizó en una solución de 2000 ppm de sulfato y la descarga en una solución con 3 mol/L de agente re-extractante (OH^-). Con estas pruebas se esperaba que se estabilizara la capacidad de intercambio de la resina con el aumento de los ciclos de carga/descarga, sin embargo, en la figura no se aprecia esto. Se ve que la cantidad descargada es variable, lo que significa que no es posible determinar acertadamente la capacidad efectiva de carga de la resina en los ciclos estudiados, la cual se mantuvo entre 35 y 65 g/L. Debido a esto es recomendable aumentar el número de ciclo en forma significativa.

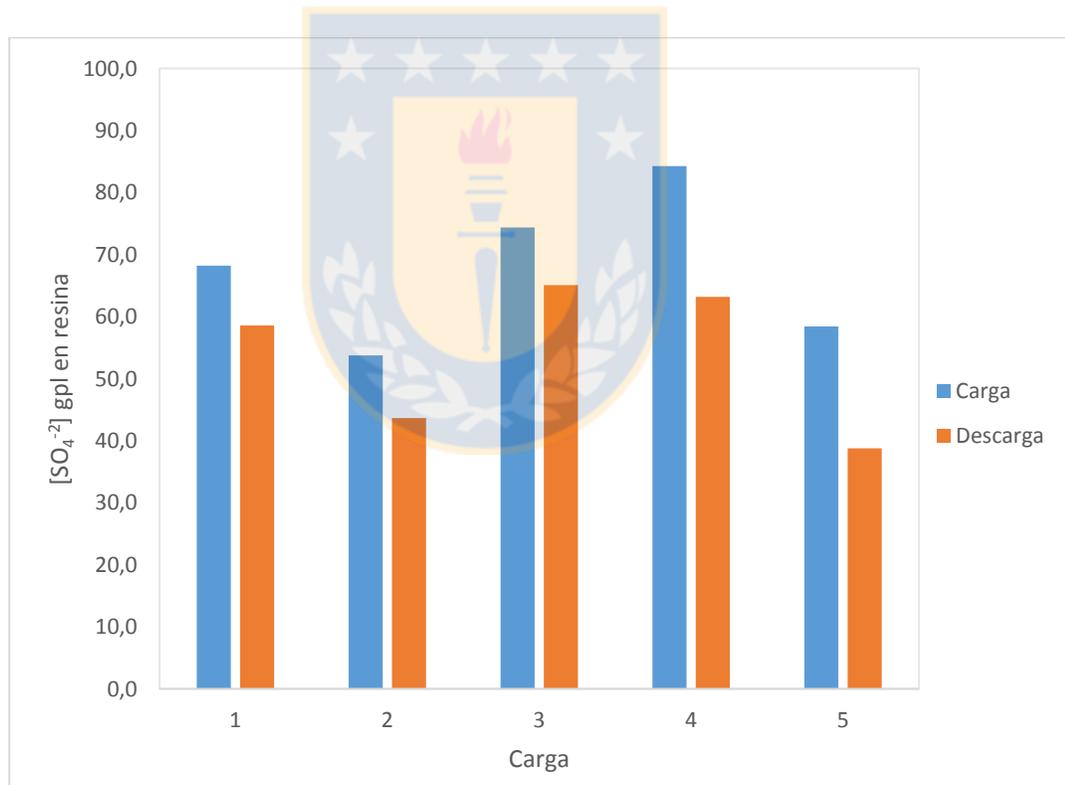


Figura 23: Prueba de carga/descarga. Resina IRA-400. $[\text{SO}_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.2 L/g en la carga y 0.05 L/g en la descarga con una solución 3 M de OH^- .

En la Figura 24 se puede apreciar la eficiencia de la prueba de carga y descarga de la resina IRA-420 en una razón agua/resina de 0.2 L/g. La carga se realizó en una solución de 2000 ppm de sulfato y la descarga en una solución con 3 mol/L de agente re-extractante (OH⁻). Se ve que la resina no es capaz de descargar todo el sulfato que extrae y ocurre lo mismo que en el caso anterior respecto a que no se llegó a una estabilización de la capacidad de intercambio en los 5 ciclos considerados. Lo que se puede visualizar, es que la resina IRA-420 tiene una capacidad de re-extracción que fluctúa entre 30 y 40 g/L, lo cual es inferior a los 35 a 65 g/L que tiene la IRA-400

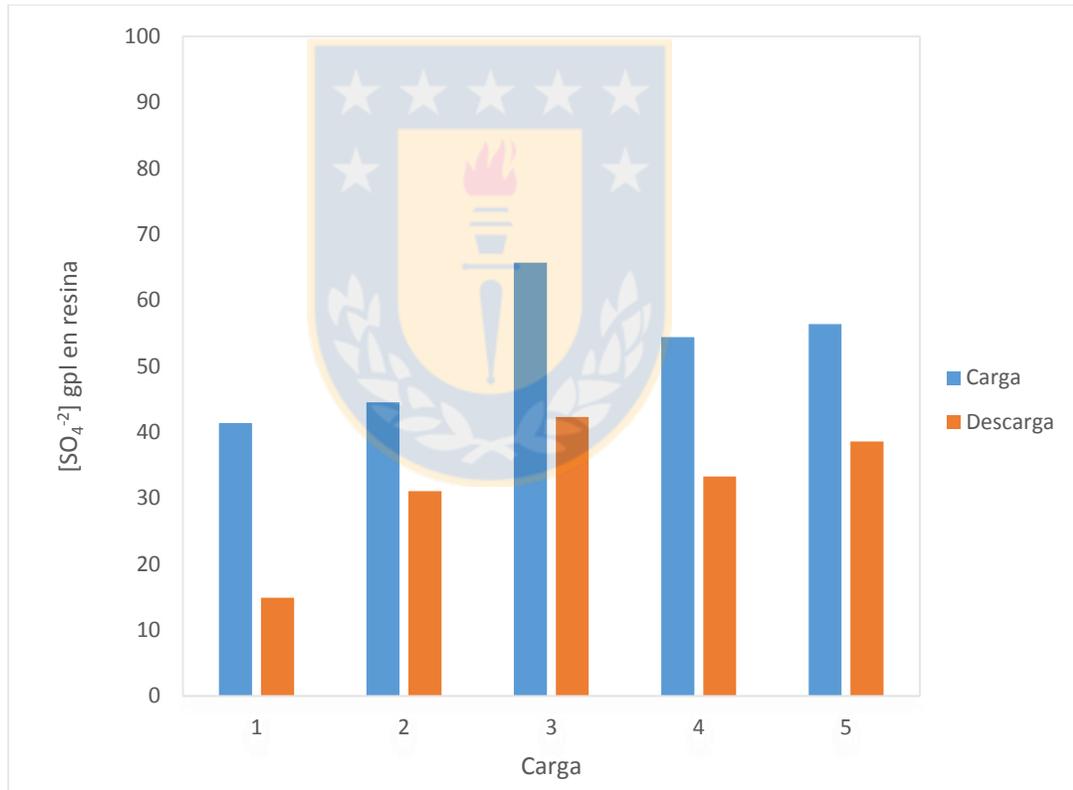


Figura 24: Prueba de carga/descarga. Resina IRA-420. [SO₄²⁻]=2000 ppm. Razón agua/resina =0.2 L/g en la carga y 0.05 L/g en la descarga con una solución 3 M de OH⁻.

En la Figura 25 se aprecia una repetición de la prueba de carga-descarga utilizando agua con 2000 ppm de sulfato y una solución 3 M de NaOH como re-extractante. En la Figura 28, se ve la concentración de sulfato restante en el acuoso de cada ciclo de carga de resina, es decir, la diferencia representa la cantidad extraída por la resina. Se puede ver que la cantidad extraída se tiende a estabilizar entre 500 y 600 ppm, con una media de 0.55 g/L de sulfato equivalente a una carga de 72 g/L de sulfato en la resina.

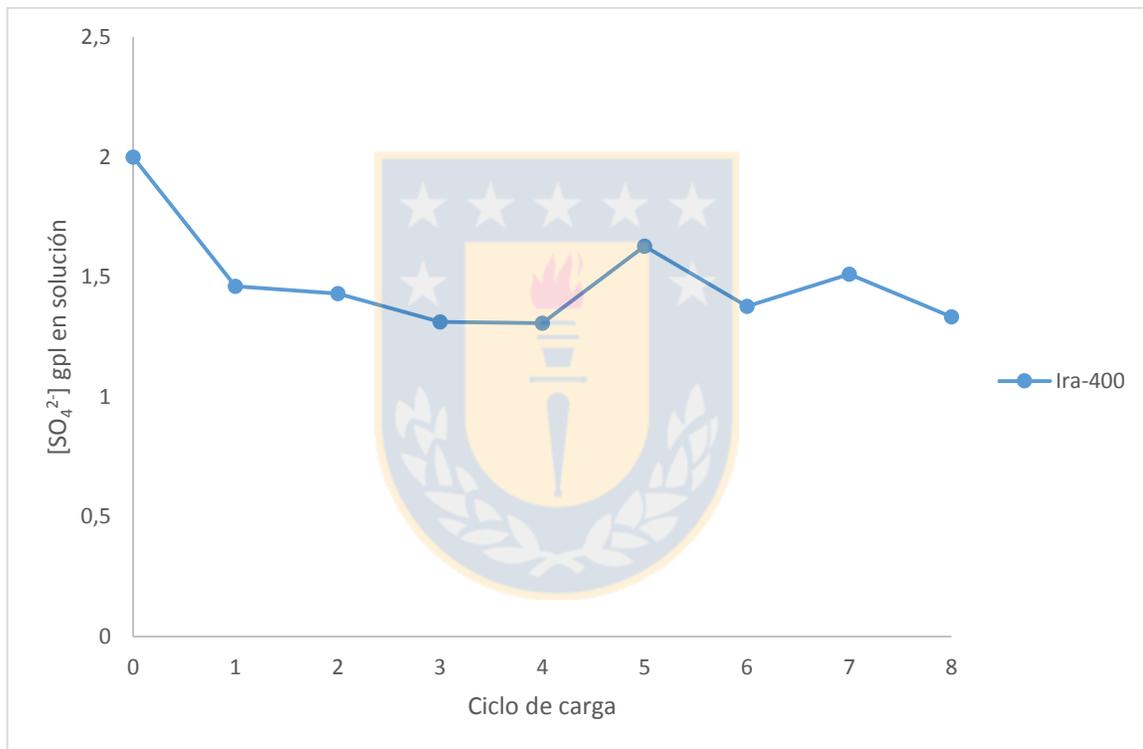


Figura 25: Variación de la concentración de sulfato obtenida en el acuoso de re-extracción en las pruebas de carga / descarga Resina IRA-400. Cargada con agua de [SO₄²⁻]=2000 ppm. Razón agua/resina =0.2 L/g en la carga y 0.05 L/g en la descarga con una solución 3 M de [OH].

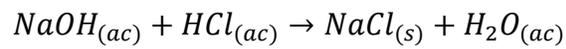
6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Las isotermas de extracción con ambas resinas, IRA-400 e IRA-420, muestran que es factible llegar a extraer prácticamente el 100% del sulfato desde una solución con 1000 y 2000 ppm de sulfato.
- De la isoterma de extracción con 2000 ppm de sulfato se deduce que el pH afectaría la capacidad de extracción en ambas resinas. Por ejemplo, al analizar los puntos sobre la línea de equilibrio para la IRA-400, se observa que cuando se alcanzó una concentración de 92 g/L de sulfato en la resina, el pH en el acuoso llegó a 9, mientras que cuando se llegó a 425 g/L de sulfato en la resina, el pH fue de 7.96.
- La cinética de extracción es favorable pues en tiempos menores a 5 minutos se alcanza aproximadamente el 80% del equilibrio, lo cual permitiría tratar grandes volúmenes de agua sin tener que recurrir a equipos con enormes volúmenes de reacción.
- En las pruebas de elusión de resina cargada con 1000 ppm de sulfato, se obtuvo una máxima extracción utilizando una solución de 2 M de NaOH, mientras que, para la resina cargada con 2000 ppm de sulfato, se obtuvo un máximo de re-extracción utilizando una concentración de 4 M de NaOH con la resina IRA-400 y para la resina IRA-420 la máxima re-extracción se lograría con una concentración igual o mayor a 5 M de NaOH.
- En las pruebas con 5 ciclos de carga y descarga de la resina IRA-400 con agua de 2000 ppm de sulfato, se pudo comprobar una carga efectiva de intercambio que fluctúa entre 35 y 65 g/L de sulfato, mientras que para la resina IRA-420 fue de 30 a 40 g/L, utilizando en ambos casos una solución de 3 M de NaOH para la re-extracción.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda evaluar el efecto del pH de la solución en la etapa de carga de la resina.
- En las pruebas de carga/descarga se recomienda realizar una cantidad superior a 8 ciclos para poder observar una tendencia más clara de los datos de extracción de sulfato.
- Para el análisis químico de la solución de descarga con NaOH, se recomienda contactar la solución con HCl, evitando que precipite $\text{NaCl}_{(s)}$.



7. Bibliografía

- American Water Works Association. (1999). En R. D. Letterman, *Water Quality and treatment* (págs. 6-18). McGraw-Hill, INC.
- Ashref Darbi, e. a. (2003). Sulfate removal from water. *Water Qual. Res. J. Canada*, 169-182.
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2001). *Decreto 90*.
- D.J. Murdock, J. F. (1994). Treatment of acid mine drainage by the high density sludge process. *American Society of mining and reclamation*, 241-244.
- Damaris Guimarães, V. A. (2011). Studies of sulfate ions removal by the polyacrylic anion exchange resin Amberlite IRA458: batch and fixed-bed column studies. *Mine water - Managing the Challenges*, 337-340.
- F.Parada, D. e. (2010). Evaluación de resinas de intercambio iónico para el control del hierro en soluciones de electro-obtención de cobre. *Revista de Metalurgia*, 331-339.
- Feng D, A. C. (2000). Treatment of acid mine water by used of heavy metal precipitation and ion exchange. *Miner.Eng.*, 623-642.
- Guidelines of drinking-water quality. (2008). *World Health Organization*, 438.
- HSEC. (2013). El desafío de reducir y gestionar los riles. . *HSEC*.
- John Steinbach, H. F. (1951). Preparation of Standard Sodium Hydroxide Solutions by Use of a Strong Anion Exchange Resin. *Analytical Chemistry*, 1927-1928.
- Lenntech, Water treatment and air purification. (s.f.). *Amberjet TM*. Obtenido de Lenntech: www.lenntech.com
- M. Santander, M. P. (2011). Tratamiento de riles del sector minero-metalúrgico y reutilización de las aguas. *Revista facultad de ingeniería*, 10-26.
- M.Holub, P. P. (2017). Application of ion-exchange resins for removing sulphate ions from acidic solutions. *Cheminé Technologija*, 18-22.
- Manahan, S. E. (2007). En *Introducción a la química ambiental* (págs. 231-234). Ciudad de México: Reverté. S.A.
- Mirko Grágeda Zegarra, M. G. (2006). *Desarrollos actuales en tratamientos de riles por métodos electroquímicos*.
- Modesto López, J. C. (1991). Anion Exchange in Amberlite IRA-400 and Amberlite IRA-410 Ion Exchange Resins. *Journal of Chemical & engineering data*, 274-277.

- Musterman, M. S. (1979). Removal of Sulfate by Ion Exchange. *American Water Works Association*, 343-348.
- Nevárez, R. M. (2009). *Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua en refinería estatal esmeraldas*. Riobamba - Ecuador.
- Nueva minería y energía. (2016). Los constantes retos de la gestión del agua en minería. *Nueva minería*.
- Pinilla, E. F. (2008). *Intercambio iónico. Propuesta de laboratorio de procesos unitarios*. Colombia.
- Reza Haghsheno, A. M. (2009). Study of kinetic and fixed bed operation of removal of sulfate anions from an industrial wastewater by anion exchange resin. *Journal of Hazardous Materials*, 961-966.
- W. Ashane M. Fernando, I. I. (2018). Challenges and opportunities in the removal of sulphate ions in contaminated mine water. *Minerals Engineering*, 74-90.



8. Anexos

8.1. Anexo A

En las siguientes tablas se muestra la isoterma de extracción de las resinas IRA-400 y 420 utilizando concentraciones de 1000 y 2000 ppm de sulfato.

En la isoterma de extracción, se hacen contactos resina/solución en los que se varia tanto la cantidad de resina, como la cantidad de solución con el fin de conseguir la menor y mayor concentración de sulfato en la resina respectivamente.

Tabla 4: Isotherma de extracción con resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 1000$ ppm

Isoterma	L resina	gr	L Volumen	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
IRA-400	0.000225	0.25	0.7	0.999	7.63
	0.000225	0.25	0.5	0.879	7.96
	0.00045	0.5	0.7	0.931	8.84
	0.00045	0.5	0.5	0.809	8.45
	0.00045	0.5	0.2	0.616	8.85
	0.0009	1	0.2	0.363	9
	0.0009	1	0.1	0.131	8.76
	0.0018	2	0.1	0.001	8.6
	0.0036	4	0.1	0.002	8.4

Tabla 5: Isotherma de extracción con resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 1000$ ppm

Isoterma	L resina	gr	L Volumen	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
IRA-420	0.0002625	0.25	0.7	0.9999	8.25
	0.0002625	0.25	0.5	0.881	9.24
	0.000525	0.5	0.7	0.914	9.48
	0.000525	0.5	0.5	0.835	9.34
	0.000525	0.5	0.2	0.680	9.7
	0.00105	1	0.2	0.412	9.69
	0.00105	1	0.1	0.176	9.41
	0.0021	2	0.1	0.014	9.45
	0.0042	4	0.1	0.001	9.2

Tabla 6: Isoterma de extracción con resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm

Isoterma	L resina	gr	Volumen L	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
IRA-400	0.000225	0.25	0.7	1.865	7.7
	0.000225	0.25	0.5	1.808	8.3
	0.00045	0.5	0.7	1.827	7.88
	0.00045	0.5	0.5	1.730	10.03
	0.00045	0.5	0.2	1.617	10.8
	0.0009	1	0.2	1.398	10.99
	0.0009	1	0.1	1.171	11.36
	0.0018	2	0.1	0.604	11.84
	0.0036	4	0.1	0.329	13
	0.0036	4	0.05	0.019	8.95

Tabla 7: Isoterma de extracción con resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm

Isoterma	L resina	gr	L Volumen	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
IRA-420	0.0002625	0.25	0.7	1.876	7.9
	0.0002625	0.25	0.5	1.787	8.86
	0.000525	0.5	0.7	1.776	8.33
	0.000525	0.5	0.5	1.768	11.66
	0.000525	0.5	0.2	1.682	11.63
	0.00105	1	0.2	1.474	12.55
	0.00105	1	0.1	1.108	12.86
	0.0021	2	0.1	0.748	12.32
	0.0042	4	0.1	0.344	10.34
	0.0042	4	0.05	0.063	9.28

8.2. Anexo B

Pruebas de cinética de reacción de las resinas Ira-400 e IRA-420.

Tabla 8: Prueba cinética con resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.5 L/g

IRA-400	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 minutos	0.534	9.27
	5 minutos	0.458	9.51
	10 minutos	0.230	9.69
	30 minutos	0.187	9.73
	50 minutos	0.189	9.79

Tabla 9: Prueba cinética con resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 1000$ ppm. Razón agua/resina = 0.5 L/g

IRA-420	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 minutos	0.565	10.53
	5 minutos	0.255	10.65
	10 minutos	0.257	10.71
	30 minutos	0.251	10.57
	50 minutos	0.376	10.59

Tabla 10: Prueba cinética con resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.25 L/g

IRA-400	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 min	1.727	11.21
	5 min	1.746	11.68
	10 min	1.585	11.75
	30 min	1.571	11.74
4 g resina	50 min	1.594	11.53
	2h	1.570	11.44
	3h	1.602	11.5
	5h	1.603	11.34

Tabla 11: Prueba cinética con resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.25 L/g

IRA-420	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 min	1.706	11.97
	5 min	1.611	12.02
	10 min	1.658	12.04
	30 min	1.650	11.86
4 g resina	50 min	1.631	11.97
	2h	1.628	11.85
	3h	1.689	11.77
	5h	1.677	11.64

Tabla 12: Prueba cinética con resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.125 L/g

IRA-400	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 min	1.499	11.86
	5 min	1.267	11.83
	10 min	1.210	11.82
	30 min	1.167	11.81
8 g resina	50 min	1.184	11.8
	2h	1.178	11.72
	3h	1.155	11.64
	5h	1.181	11.54

Tabla 13: Prueba cinética con resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.125 L/g

IRA-420	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 min	1.439	12.71
	5 min	1.332	12.36
	10 min	1.3399	12.38
	30 min	1.318	12.42
8 g resina	50 min	1.322	12.49
	2h	1.315	12.42
	3h	1.369	12.35
	5h	1.345	12.2

Tabla 14: Prueba cinética con resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.083 L/g

IRA-400	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 min	1.287	10.19
	5 min	1.019	10.21
	10 min	0.891	10.31
	30 min	0.836	10.21
12 g resina	50 min	0.827	10.28
	2h	0.851	10.26
	3h	0.844	10.27
	5h	0.841	10.25

Tabla 15: Prueba cinética con resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina = 0.083 L/g

IRA-420	Muestra	$[SO_4^{2-}]$ gpl Solución	pH
	2 min	1.198	10.43
	5 min	0.913	10.51
	10 min	0.938	10.73
	30 min	0.849	10.39
12 g resina	50 min	0.867	10.68
	2h	0.882	10.08
	3h	0.894	10.47
	5h	0.881	10.37

8.3. Anexo C

En este anexo se muestra las pruebas de elusión o re-extracción de sulfato.

Tabla 16: Prueba de elusión. Resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 1000\text{ppm}$. Razón agua/resina=0.05 L/g

IRA-400	[NaOH]	$[SO_4^{2-}]$ gpl	Solución descarga	pH
	1M		1.003	14
	2M		1.023	14
	3M		1.042	14
	4M		1.046	14
	5M		1.049	14

Tabla 17: Prueba de elusión. Resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 1000\text{ppm}$. Razón agua/resina=0.05 L/g

IRA-420	[NaOH]	$[SO_4^{2-}]$ gpl	Solución descarga	pH
	1M		1.032	14
	2M		1.036	14
	3M		1.054	14
	4M		1.058	14
	5M		1.073	14

Tabla 18: Prueba de elusión. Resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 2000\text{ppm}$. Razón agua/resina=0.05 L/g

IRA-400	[NaOH]	$[SO_4^{2-}]$ gpl	Solución descarga	pH
	1M		1.121	15.36
	2M		1.427	15.2
	3M		1.420	15.2
	4M		1.985	15.2
	5M		1.995	15.2

Tabla 19: Prueba de elusión. Resina IRA-420. $[SO_4^{2-}] = 2000\text{ppm}$. Razón agua/resina=0.05 L/g

IRA-420	[NaOH]	$[SO_4^{2-}]$ gpl	Solución descarga	pH
	1M		1.140	15.2
	2M		1.241	15.2
	3M		1.463	15.2
	4M		1.360	15.2
	5M		2.000	15.2

8.4. Anexo D

En las siguientes tablas, se muestran las distintas pruebas de ciclos carga/descarga de sulfato, para ambas resinas. La Tabla 22 muestra una prueba de carga/descarga solo para la resina IRA-400, en la que se realizaron 8 ciclos.

Tabla 20: Prueba de retención de sulfato. IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.05L/g

Ira-400	Ciclo	$[SO_4^{2-}]$ gpL carga resina	$[SO_4^{2-}]$ gpL descarga solución
	1	68.2	58.6
	2	53.7	43.7
	3	74.4	65.1
	4	84.3	63.2
	5	58.4	38.8

Tabla 21: Prueba de carga y descarga de resina. IRA-420. Razón agua/resina=0.05L/g

Ira-420	Ciclo	$[SO_4^{2-}]$ gpL carga resina	$[SO_4^{2-}]$ gpL descarga solución
	1	41.3	14.9
	2	44.5	31.1
	3	45.2	42.3
	4	54.4	33.2
	5	56.4	38.6

Tabla 22: Prueba de carga y descarga de resina IRA-400. $[SO_4^{2-}] = 2000$ ppm. Razón agua/resina=0.05 L/g

Ira-400	Ciclo	$[SO_4^{2-}]$ gpL descarga solución
	0	2.00
	1	1.46
	2	1.43
	3	1.31
	4	1.31
	5	1.63
	6	1.38
	7	1.51
	8	1.33