UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

“Uso de Electrodiálisis y Caracterización de Membranas de Intercambio Iónico Catiónicas para Procesamiento de Soluciones de Litio"

Maximiliano Alvarez

max.s.alvarez@gmail.com

Universidad de Santiago de Chile

Ciclo de Charlas de Graduados

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Tabla de Contenidos

Motivación

Antecedentes y Estado del Arte

Hipótesis & Objetivos

Metodología

Resultados & Conclusiones

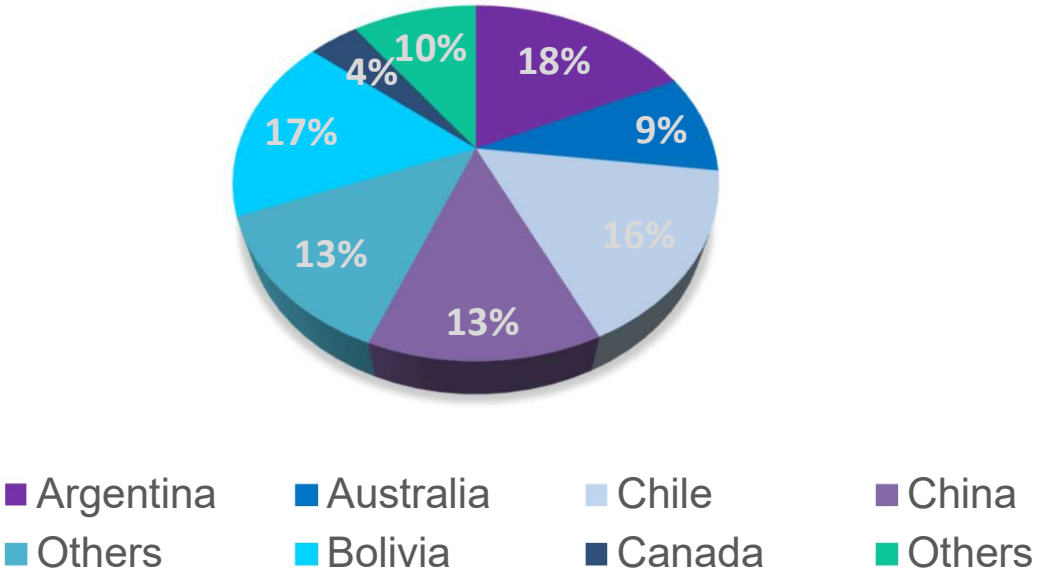
Bibliografía

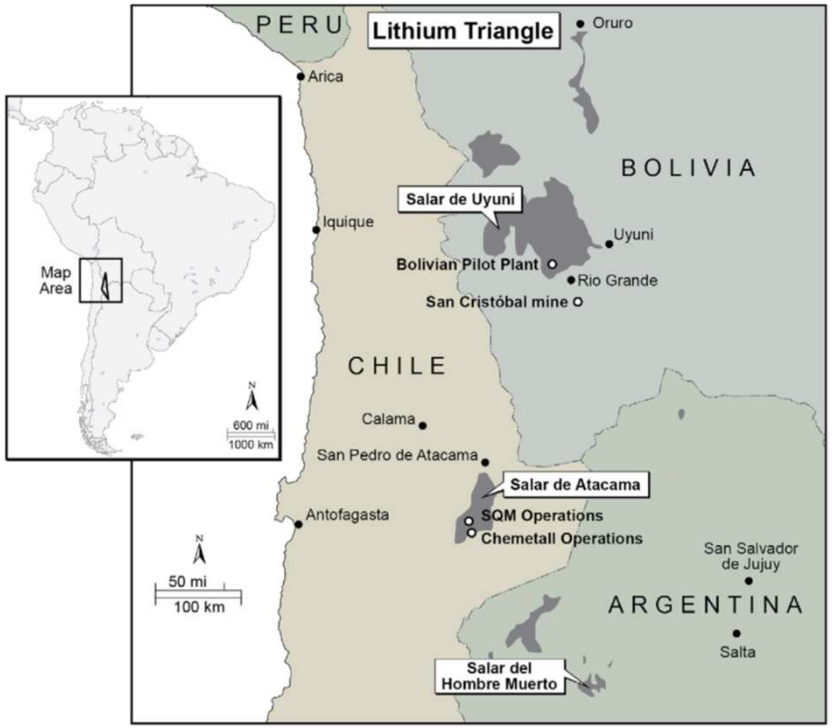
IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Introducción

Recursos de Litio en el Mundo





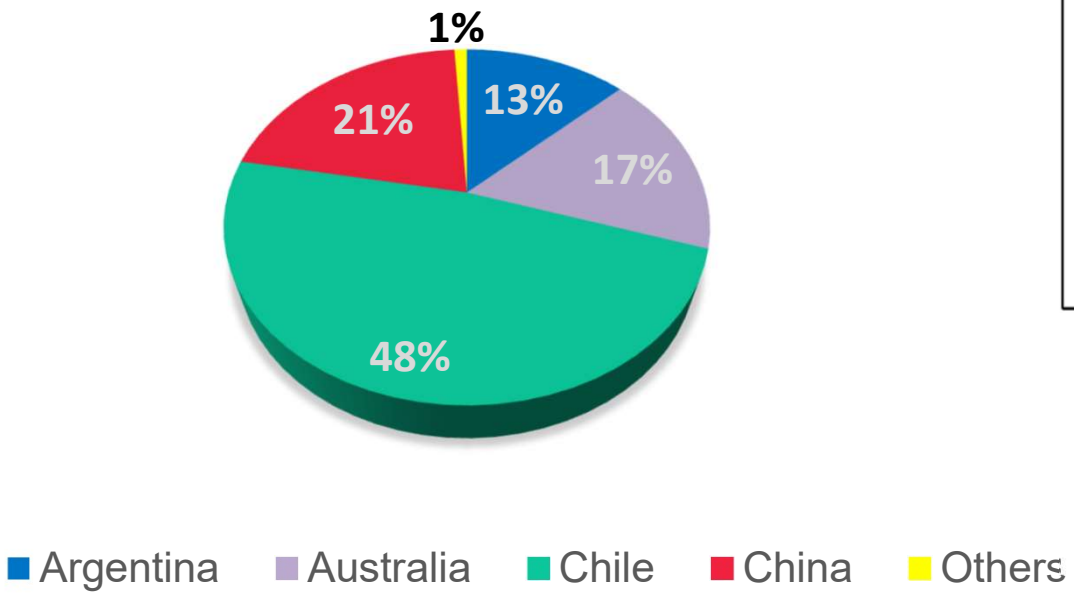
Global Lithium Availability. Gruber, Paul W, et al. , USA : Yale University, 2011.
The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry. **P. Narnis, Thomas.** Albany, NY, USA: Elsevier B.V., 2016

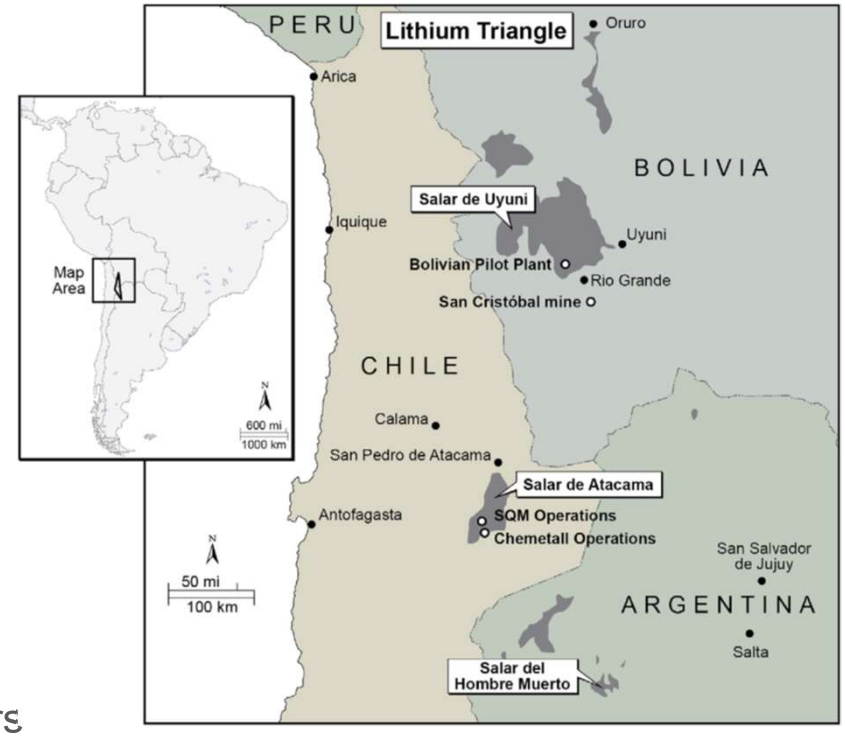
IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Introducción

Reservas de Litio en el Mundo





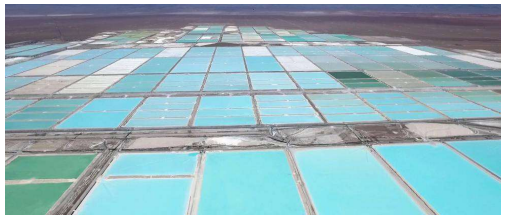
Global Lithium Availability. Gruber**, Paul W, et al.** , USA : Yale University, 2011.
Mercado internacional del Litio y su potencial en Chile. Santiago, Chile : **COCHILCO**, 2018.

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

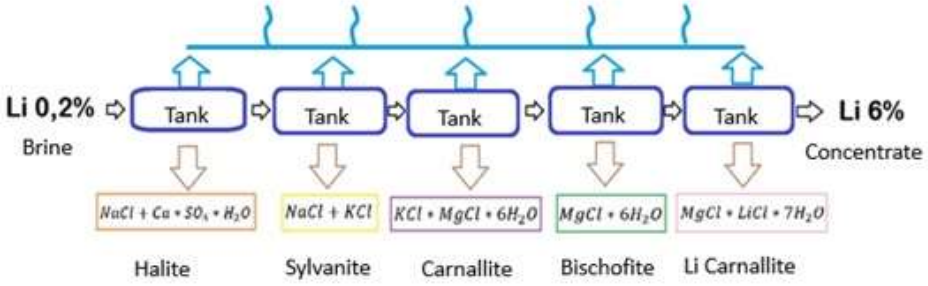
Desafíos del actual proceso de Extracción de Litio?

Proceso Actual



SQM, Atacama Salt lake

Orocobre, Olaroz Salt lake



Impacto Ambiental

Is the Nobel Prize-winning lithium-ion battery really having a positive impact on the environment?

By James Murray 14 Oct 2019

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

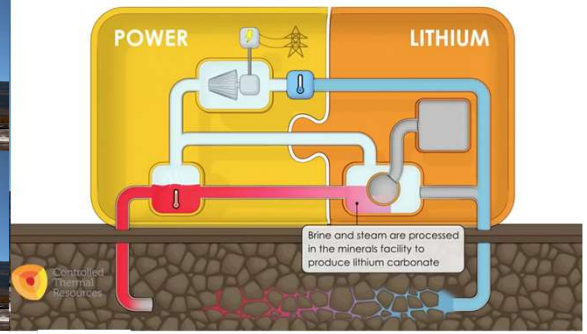
Desafíos del actual proceso de Extracción de Litio?

Tabla 1: Composición de varias salmueras alrededor del mundo (%peso).

Location	%wt Li	%wt Na	%wt K	%wt Mg	Na/Li	K/Li	Mg/Li
Bolivia: Uyuni Salt Lake	0,0321	7,06	1,17	0,65	220	36	20
Chile: Atacama Salt Lake	0,157	9,1	2,36	0,965	58	15	6
Argentina: Hombre muerto	0,121	10,30	0,97	0,14	85	8	1,16
Isrrael- Jordan: Dead Sea	0,0012	8,70	0,72	3,09	7250	600	2575
China: Zabuye	0,0489	7,29	1,66	0,0026	149	34	0,05

Recovery of lithium from Uyuni salar brine. **Tra, Tam; et al.** Seoul, South Korea: Elsevier B.V. 2012.

IMetChile



Otras soluciones que contienen Litio

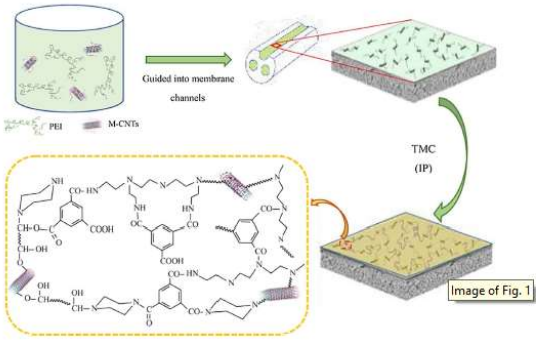
- Soluciones bromuro de Litio de Enfriadores
- Fluidos Geotermales
- Agua de mar

LiBr

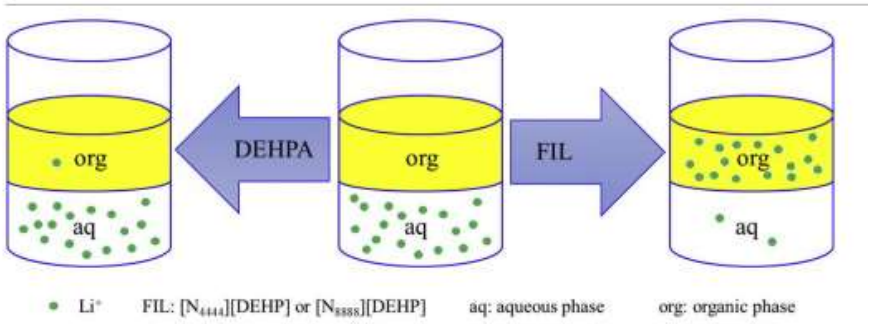
IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

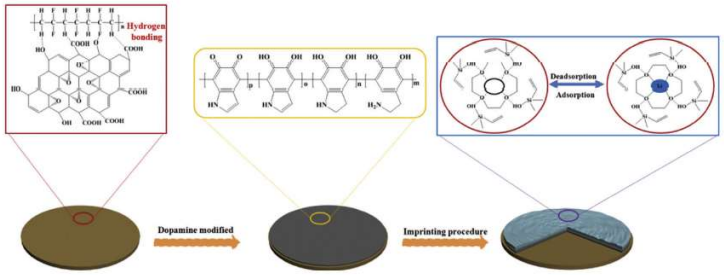
Alternativas Tecnológicas estudiadas



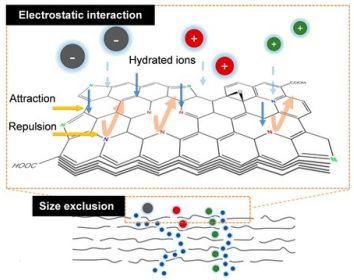
Nano-Filtracion (NF)



Extracción por Solventes(SX)



Membrana Iónica Impresa(IIM)



Membrana de Tamizaje iónico (ISM)

Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources: A review. **Li, Xianhui, et al.** Tianjin : Elsevier B. V. , 2019
Membrane technologies for Li+/Mg+2 separation from salt-lake brines and seawater: A comprehensive review. **Zhang, Ye, et al.** Changsha, Hunan, China: Elsevier B. V., 2019.

IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

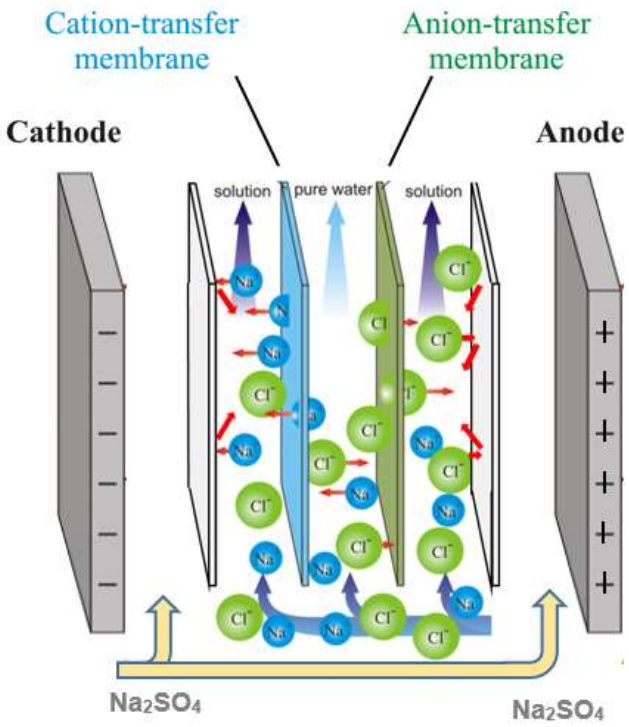
Electrodiálisis (ED)

Caracteristicas

- Se aplica una corriente eléctrica
- Membranas anionicas y cationicas de forma alternada
- Un compartimiento es desalinizado y el otro concentrado

Ventajas

- Eco-amigable y de bajo costo
- Alta selectividad de iones Li
- Menos uso de agua fresca
- No necesita reactivos químicos tóxicos
- **Factible de funcionar con fuentes de energía renovables**



Tanaka, Yoshinobu. *Ion Exchange Membranes Fundamentals and Application.* Ibaraki, Japan : Elsevier, 2007.

IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Eficiencia de ED

Eficiencia de Recuperación	$R_{(i)}\% = \frac{(C_{i,c} - C_{i,c}{}^{0}) * V_c}{Ni} * 100$
Eficiencia de Corriente	$n_{(i)}\% = \frac{(n_t - n_0) z\, F}{N * I\, t}$
Tasa de Migración iónica	$M_r(mmol/m^2 \cdot min) = \frac{\Delta C_{ct} \cdot V_{ct}}{A \cdot t}$
Coeficiente de Separación entre Litio y Sodio	$SC_{Na/Li} = \frac{C_{Na}/C_{Li}}{C_{Na}{}^{0}/C_{Li}{}^{0}}$
Tasa de Concentración	$CR_{(i^+)}\% = \frac{C_t}{C_0} \cdot 100$
Tasa de Supervivencia	$SR_{(i^+)}\% = \frac{C_{i,a}}{C^0{}_{i,a}} \cdot 100$

Recent advances on electrodialysis for the recovery of lithium from primary and secondary resources. **Chagnes, Alexandre and Gmar, Soumaya.** Nancy, France : Elsevier B. V., 2019.

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Acercamientos de la ED con Litio

- Alta selectividad para iones Li con cationes co-existentes en salmueras
- Alta separación iónica entre Li+ & Mg+2
- Nivel de separación aceptable entre Li/Na desde soluciones LiBr
- Separación entre iones monovalentes (S-ED)
- Bajo consume específico de energía
- Proceso adaptable para distintas composiciones de solución
- Proceso mas Verde

Recent advances on electrodialysis for the recovery of lithium from primary and secondary resources. **Chagnes, Alexandre and Gmar, Soumaya.** Nancy, France : Elsevier B. V., 2019.

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Caracterización de membrana

- Química
  - Composición de sustancias de intercambio iónico
  - Caracterización del enlace covalente
- Morfológica
  - SEM-EDS
- Electroquímica
  - Espectroscopía de Impedancia Electroquímica
  - Cronopotenciometria

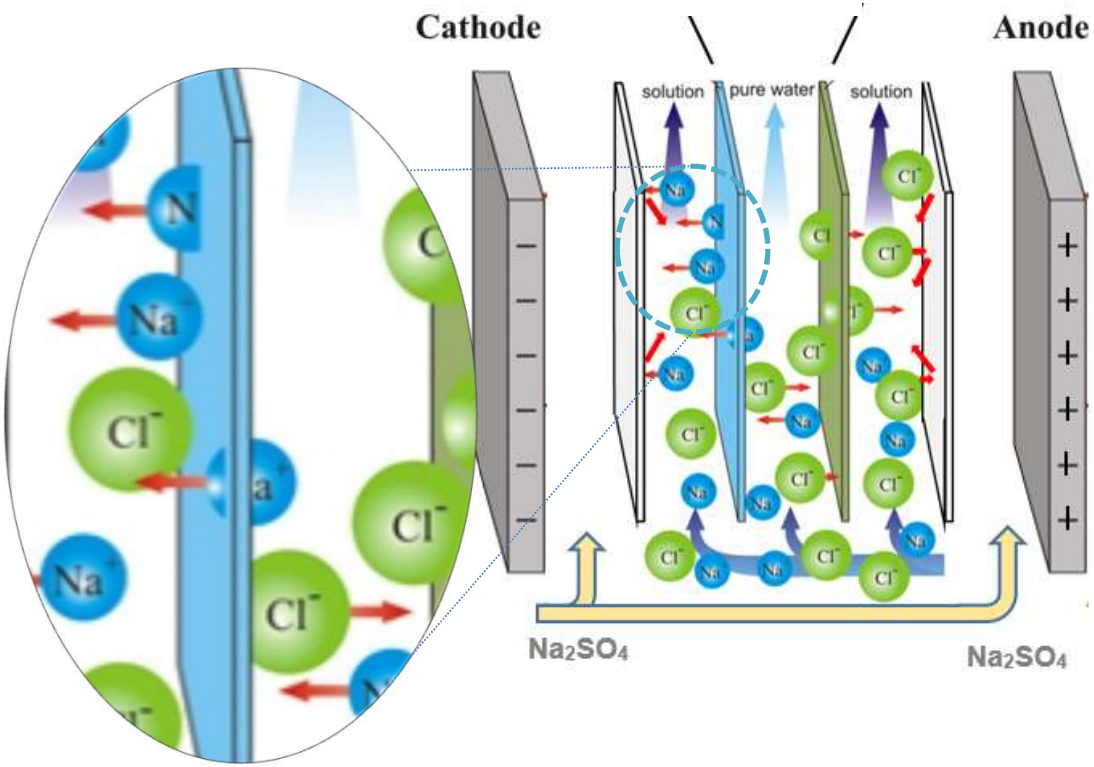
IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Caracterización electroquímica de Membrana

Información Escencial

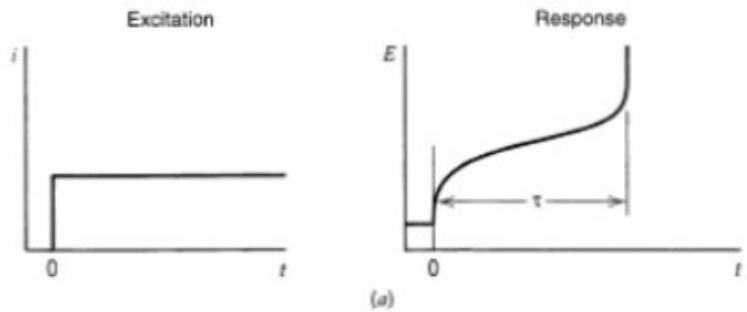
- Estabilidad química
- Conductividad
- Corriente límite
- Números de transporte de contra-iones en membrana



IMetChile

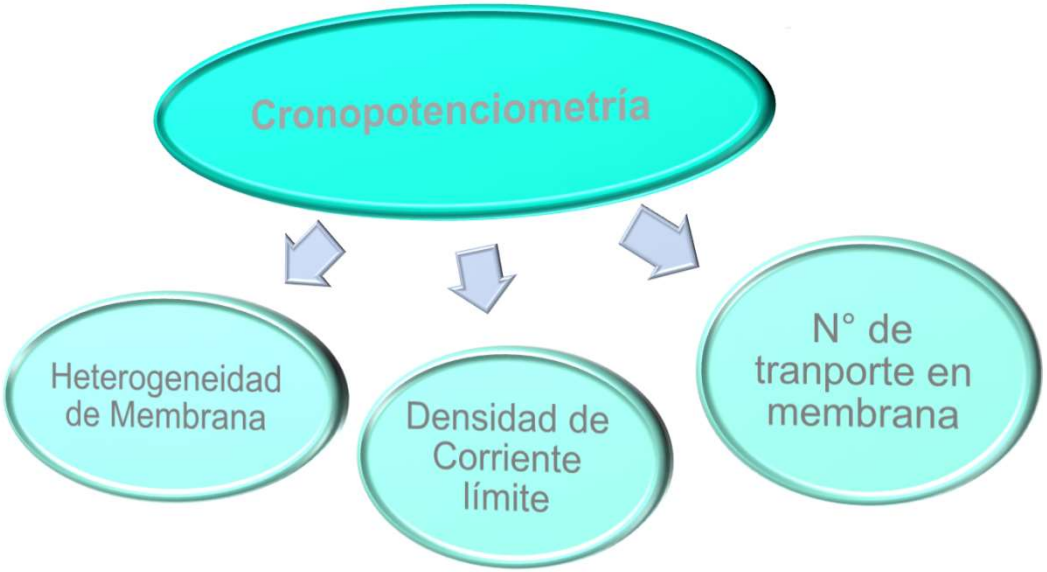
UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

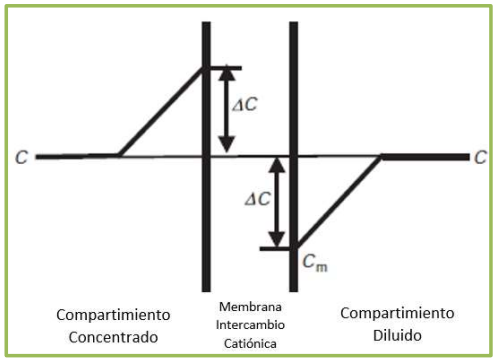
Cronopotenciometría



Ecuación de Sand

$$\tau = \frac{\varepsilon^2 \pi D}{4}\left(\frac{z F}{\overline{t_i} - t_i}\right)^2 * \left(\frac{C_0}{i}\right)^2$$





Chronopotentiometry applied to the study of ion transfer through anion exchange membranes. **Pourcelly, G. et al** Montpellier Cédex, France : Elsevier B. V., 2003.

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

HIPÓTESIS

Una correcta caracterización de membrana puede establecer propiedades básicas que describen el comportamiento de la técnica de ED.
Esta tecnología fáctible de utilizer para procesar soluciones de litio como salmueras o soluciones sintéticas que contengan litio.

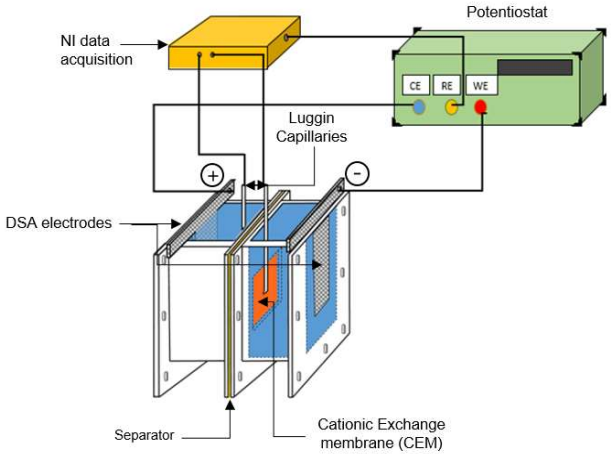
OBJETIVOS

- Realizar una caracterización de las membranas catiónicas IONSEP MC-C y IONSEP HC-C mediante el uso de una celda de ED de laboratorio de dos compartimientos.
- Determinar propiedades esenciales como números de transporte de Li+ y Na+
- Determinar la magnitud de la corriente límite bajo distintas condiciones de celda.
- Demostrar el efecto de la presencia de ion Na+ en la recuperación de litio a diferentes concentraciones mediante el cálculo de factores de eficiencia de ED.
- Determinar la recuperación de litio ante distintas condiciones iniciales de las soluciones.
- Determinar índices de factibilidad y eficiencia en la recuperación de Li+ en competencia con otros cationes monovalentes y bivalentes presentes en salmueras complejas

IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

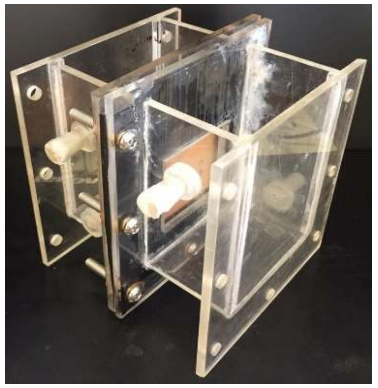
Procedimiento Experimental



Etapa I: Caracterización de Membrana por Cronopotenciometría

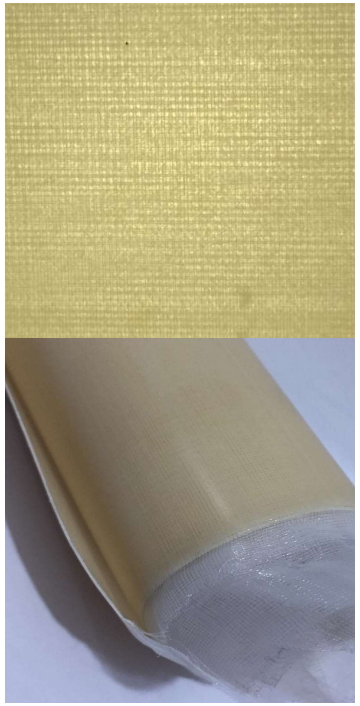
Etapa II: Evaluación del desempeño de Membrana Sistema Li-Na

Etapa III: Experimentos ED con salmuera



IMetChile

Etapa I: Caracterización de membranas

IONSEP™ HCC	IONSEP™ MCC
	

Modelo membrana	IONSEP™ HCC	IONSEP™ MCC
Espesor, mm	0,42	0,42
Contenido de Agua %	<40	<45
Capacidad de intercambio iónico (mol/kg)	>2,4	>2,2
Permselectividad, %	>92	>90
Resistencia eléctrica, $\Omega \cdot cm^2$	<10	<10
Composición	Sulfonatos	Sulfonatos
Cantidad de corriente transportada por Na^+ a una concentración 0,025 M	97%	97%

Etapa II: ED en Sistema Li-Na

- Efecto de la concentración inicial de solución en compartimiento de alimentación (anódico) en la separación iónica
- Compartimiento receptor (catódico) con concentración diluida 0.025M LiCl y 0.025M NaCl
- Duración de pruebas: 8 horas
- Cálculos de Eficiencia de ED

Anolito		Factor Li/Na Anolito	Factor Na/Li Anolito
LiCl	NaCl		
0,1	0,3	1/3	3
0,1	0,2	1/2	2
0,1	0,1	1	1
0,2	0,1	2	1/2
0,3	0,1	3	1/3

Etapa III: ED con Salmuera

- Efecto de la variación de magnitud de corriente eléctrica
  - 50, 75 & 100 ($A\ m^{-2}$)
- Efecto de la variación del nivel de flujo de solución (Turbulencia)
  - 1,7 & 0,35 ($L\ min^{-1}$)
- Duración de pruebas: 24 horas
- Cálculos de parámetros de Eficiencia de separación.

Elemento	Concentración [ppm]
Li	640
Ca	8750
Mg	4280
K	4800
Na	78500

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Resultados

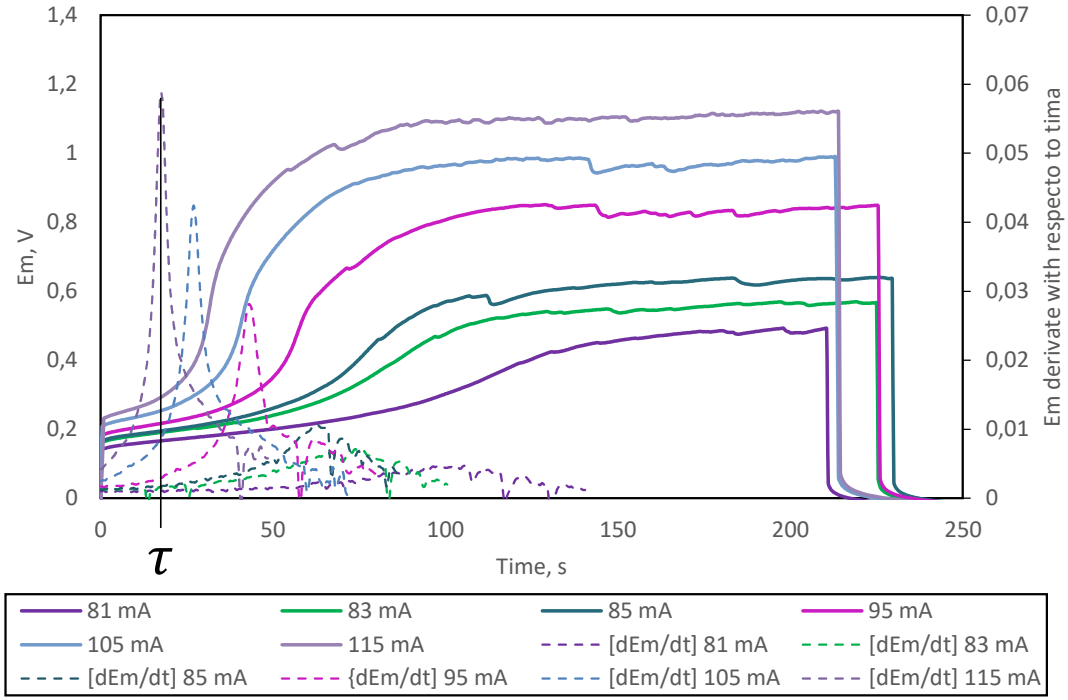
ETAPA I

Caracterización de Membrana

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Resultados y Discusiones

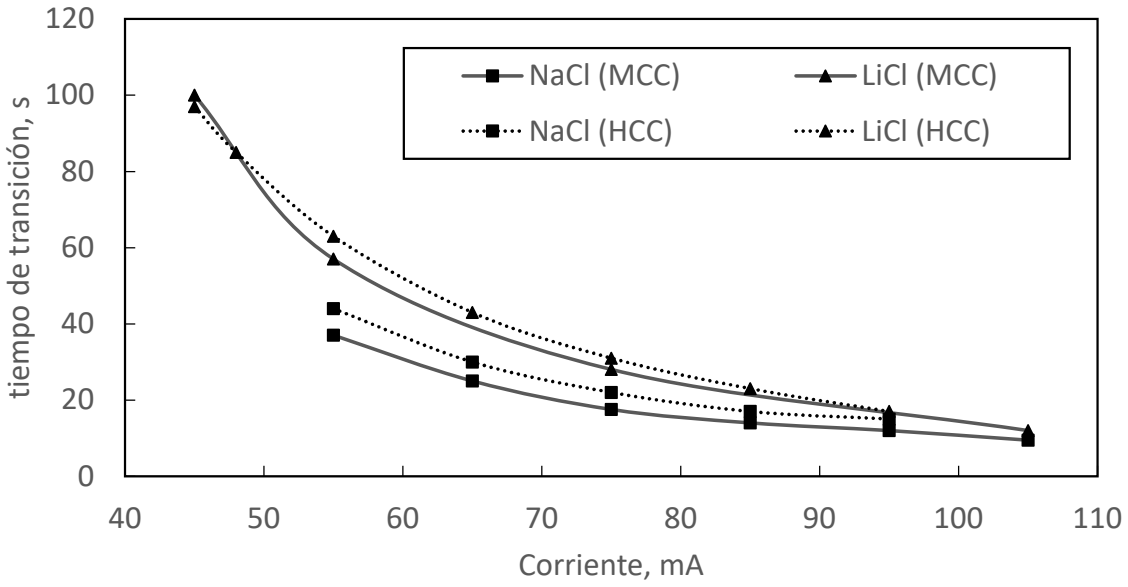


0,05M NaCl solution in MC-C membrane.

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Resultados y Discusiones



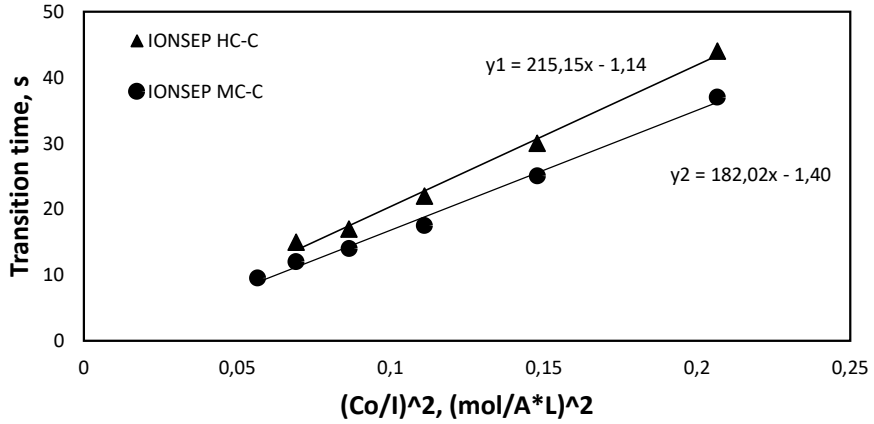
Tiempo de transición con respect a nivel de corriente electrica aplicada

IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Área conductora de la membrana ε

$$\tau := \frac{\varepsilon^2 \pi D}{4}\left(\frac{z\,F}{\bar{t}_i - t_i}\right)^2 * \left(\frac{C_0}{i}\right)^2 \rightarrow y = A \cdot x + b$$



Constant values

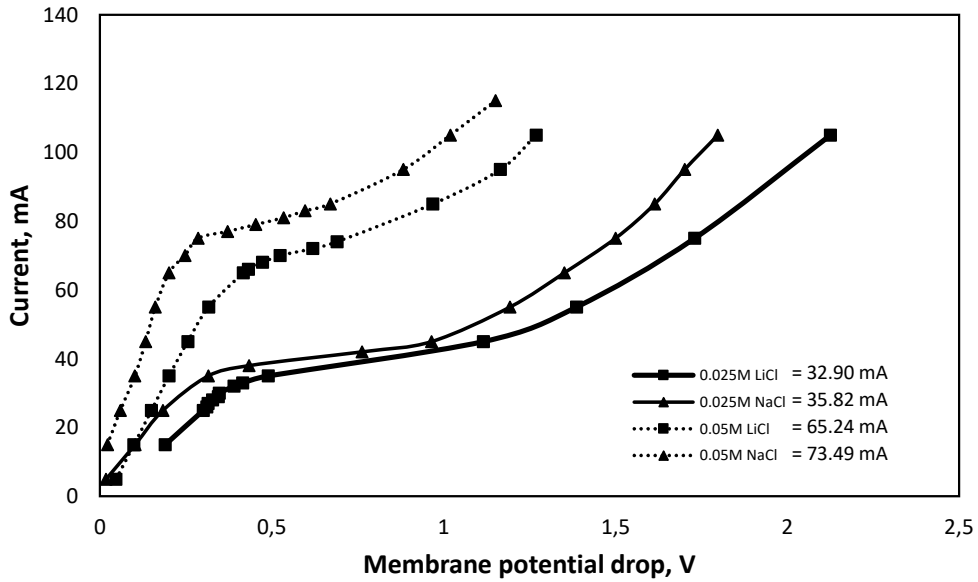
- $D_{Na} = 1{,}61 \cdot 10^{-5}\ cm^2 s^{-1}$
- $t_{Na} = 0{,}396$
- $\bar{t}_{Na} = 0{,}97$

Modelo Membrana	$\bar{t}_{Na^+}$	$\bar{t}_{Li^+}$	Porción de area conductora(%)
MCC	0,970	0,770	94,6
HCC	0,970	0,768	98,1

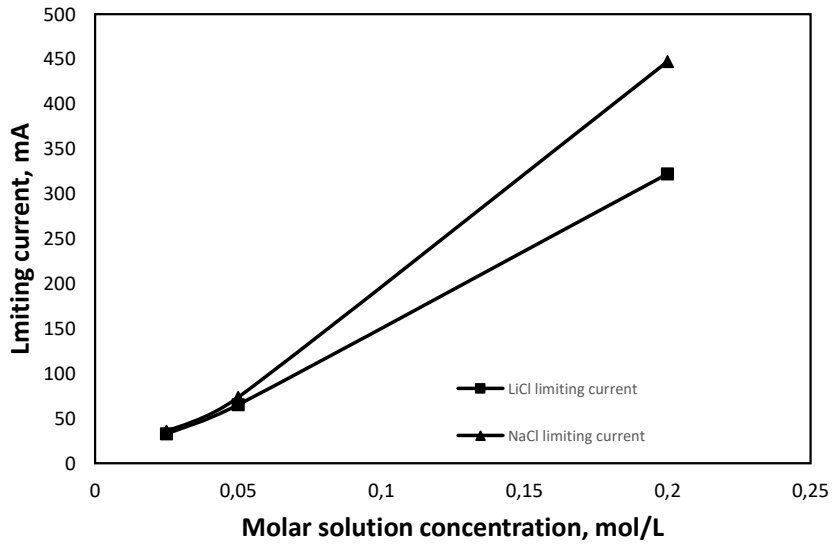
IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Densidad de corriente límite $i_{lím}$



Curva corriente-voltaje para diferentes soluciones cloruradas y membrana MCC.



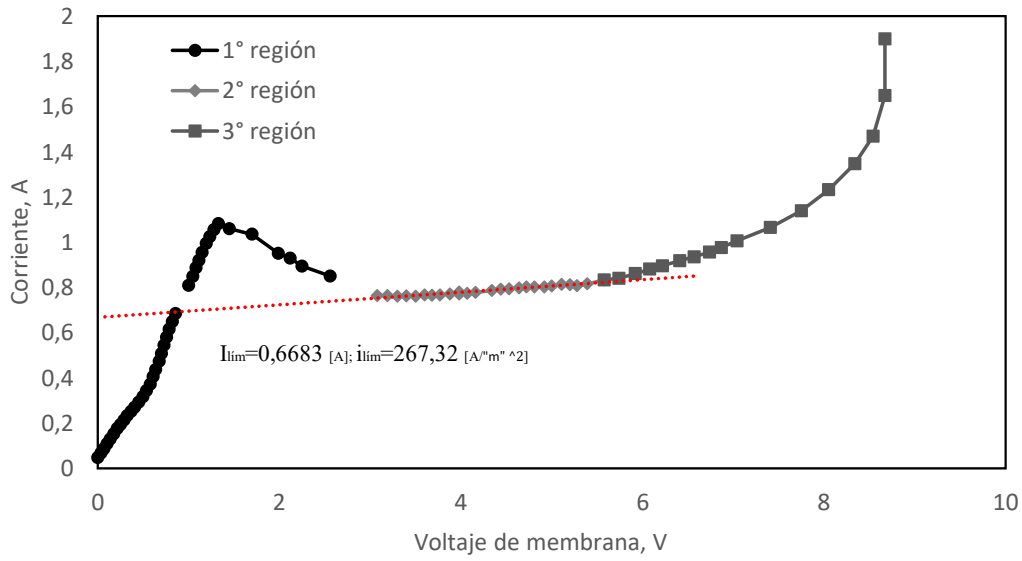
Corriente límite obtenida en función de la concentración inicial de solución

IMetChile

Chronopotentiometry applied to the study of ion transfer through anion exchange membranes. **Pourcelly, Gerald , et al.** Montpellier Cédex, France : Elsevier B. V., 2003.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Densidad de corriente límite $i_{lím}$



Curva Corriente - Voltaje obtenida utilizando salmuera real

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Resultados

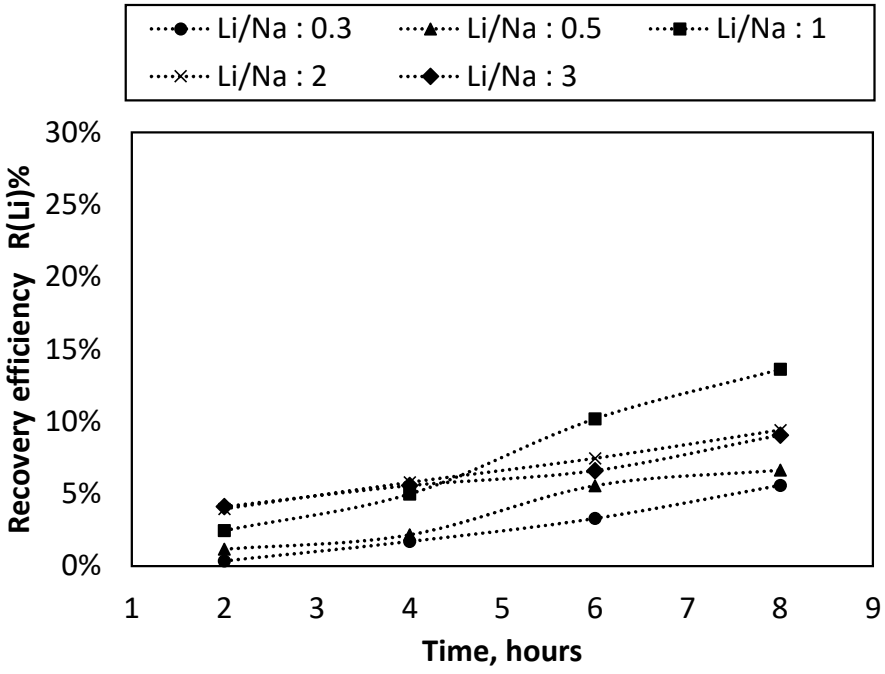
ETAPA II

Desempeño de membrana en sistema Li-Na

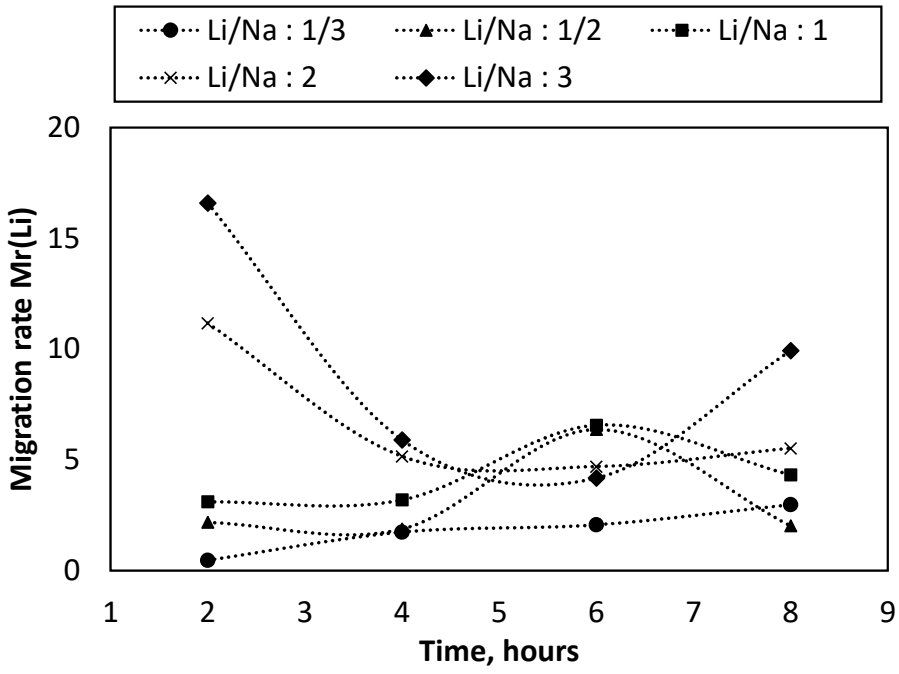
IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Desempeño de membrana sistema Li-Na



Eficiencia de Recuperación de iones Litio

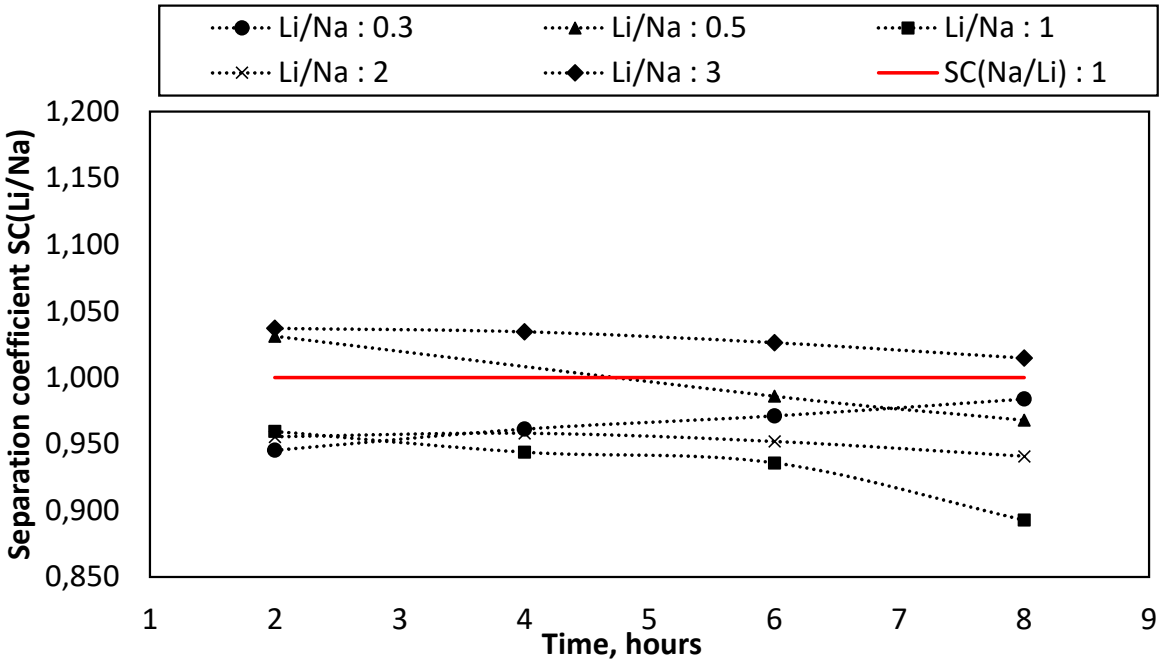


Tasa de migración iónica de Litio

IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Factores de Extracción de Litio

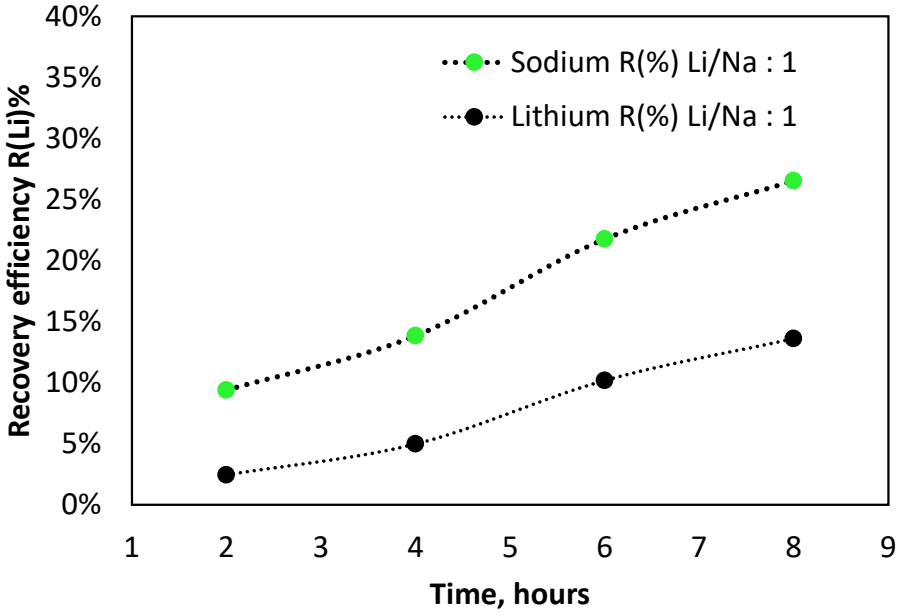


Coeficiente de separación de iones Litio

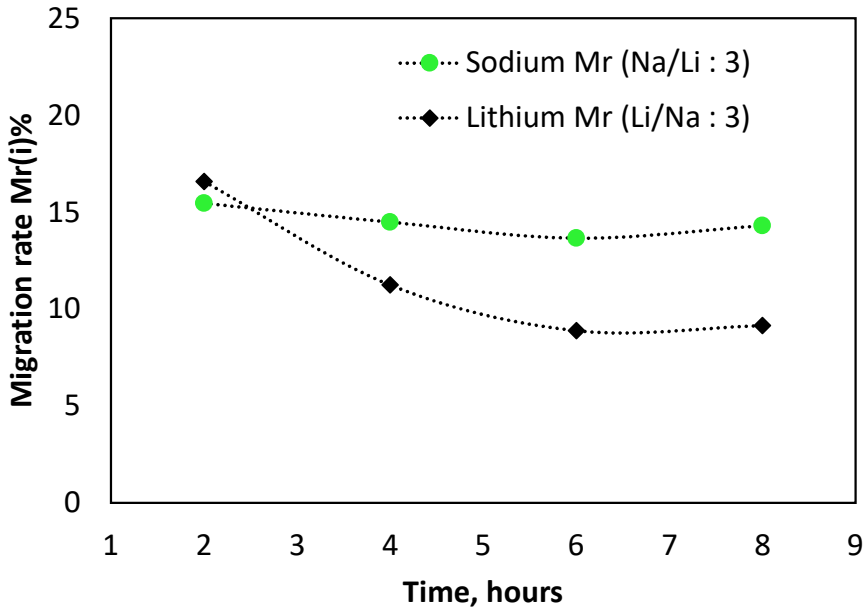
IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Factores de Extracción de Sodio



Eficiencia de Recuperación de iones Sodio

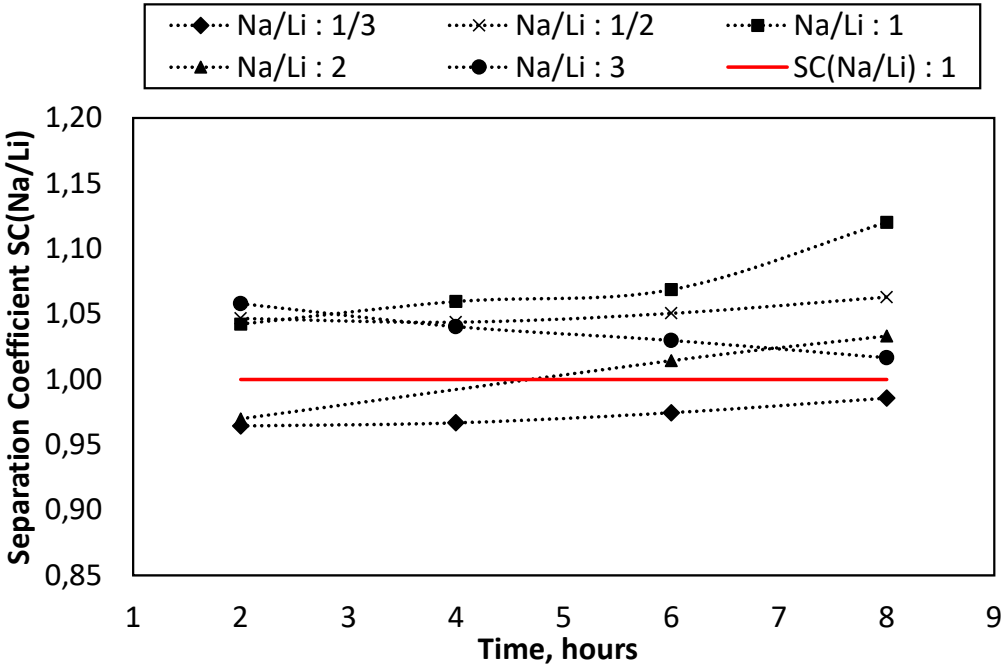


Tasa de migración iónica de Sodio

IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Factores de Extracción de Sodio



Coeficiente de separación de iones Sodio

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Resultados

ETAPA III

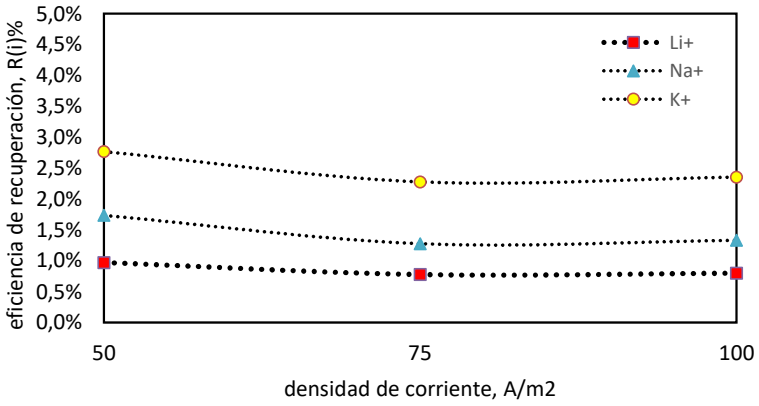
Experimentos ED con salmuera

IMetChile

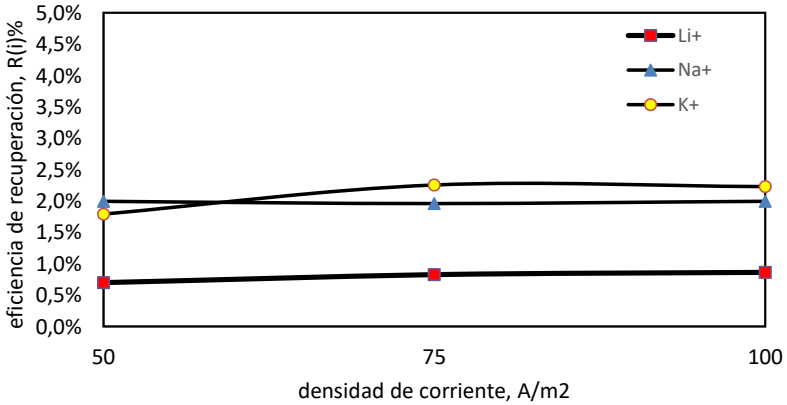
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

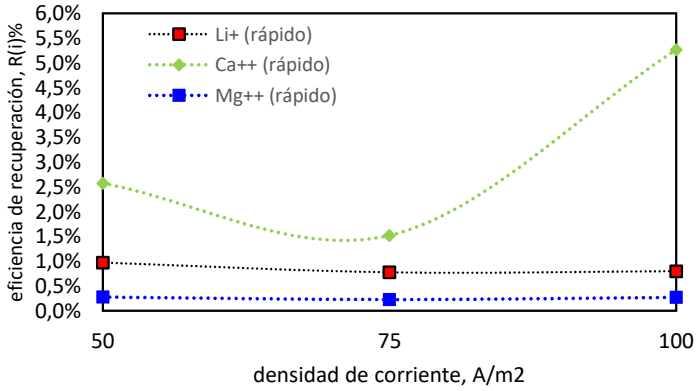
Eficiencia de Recuperación, $R_{(i+)}\%$

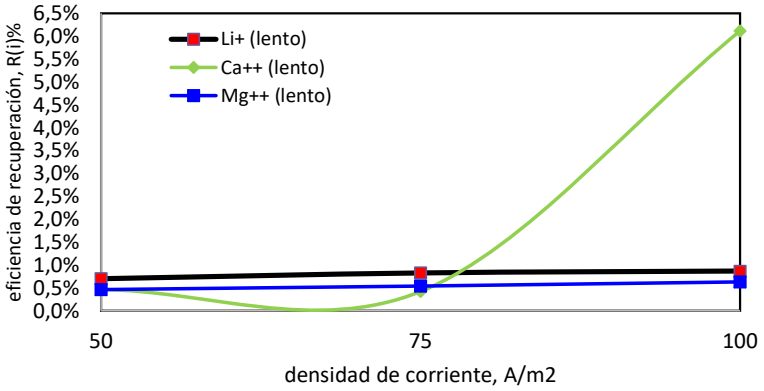
Eficiencia de Recuperación de iones, flujo - 1,70 L min^{-1}



Eficiencia de Recuperación de iones, flujo – 0,35 L min^{-1}





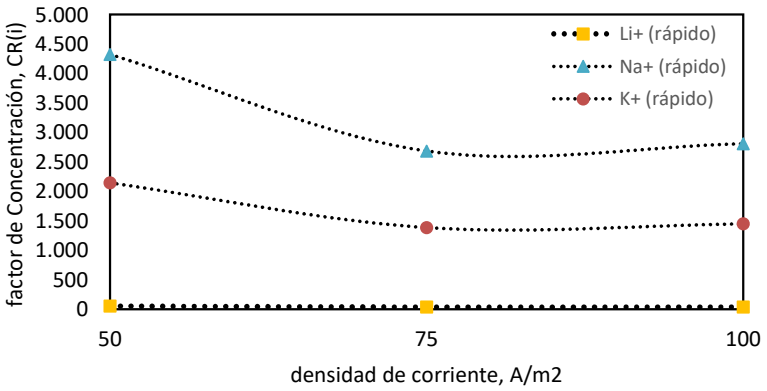


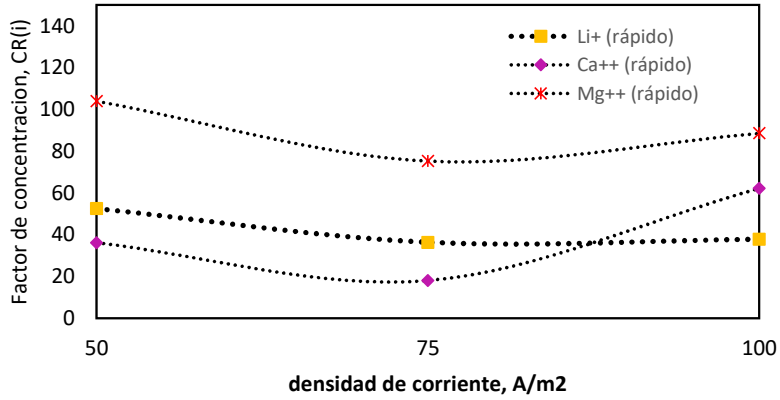
IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

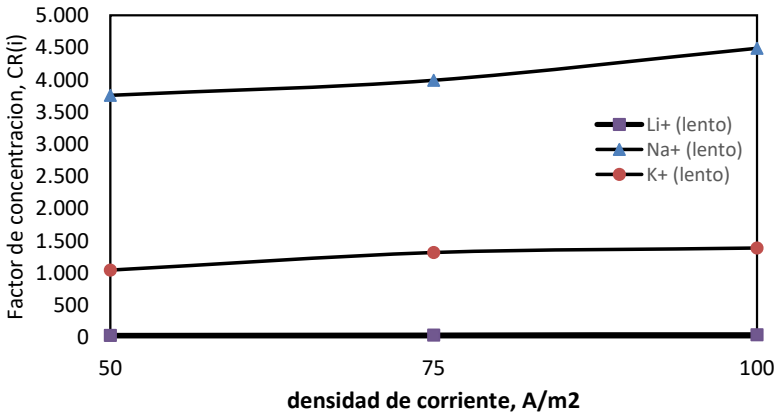
Tasa de Concentración, $CR_{(i+)}$

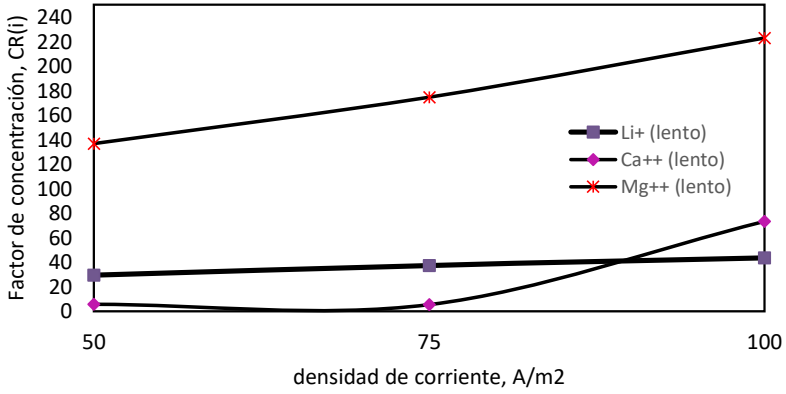
Factor de Concentración (CR) de iones, flujo - 1,70 L min^{-1}





Factor de Concentración (CR) de iones, flujo - 0,35 L min^{-1}



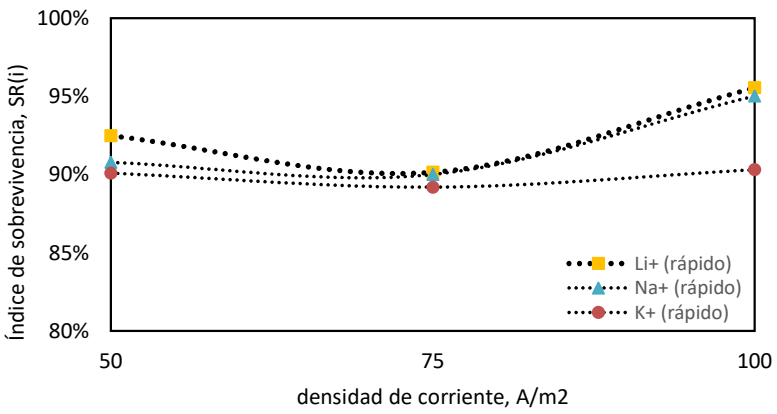


IMetChile

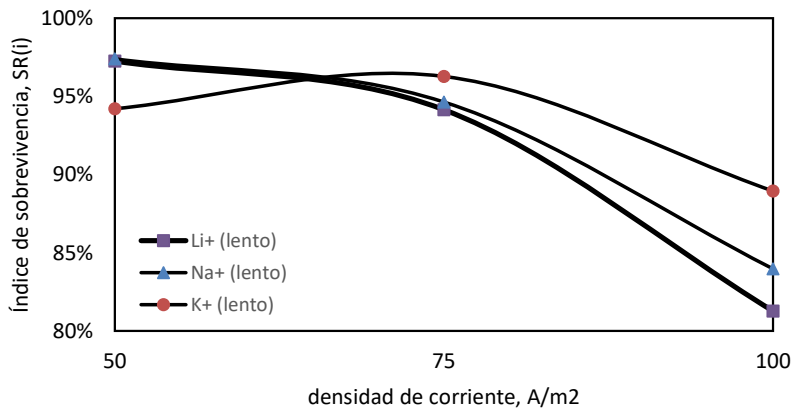
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

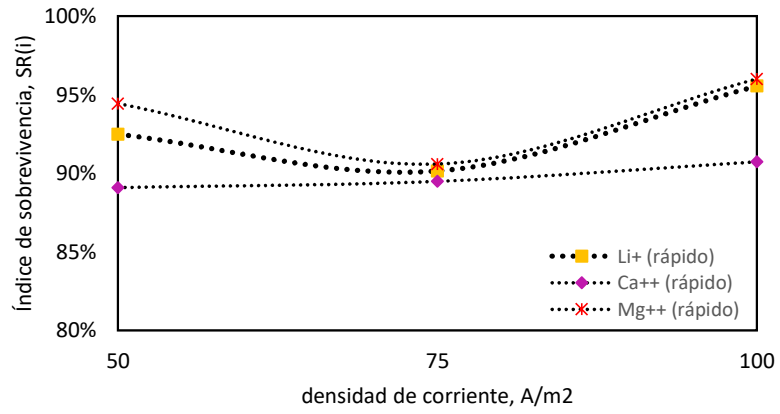
Tasa de Sobrevivencia, $SR_{(i^+)}$

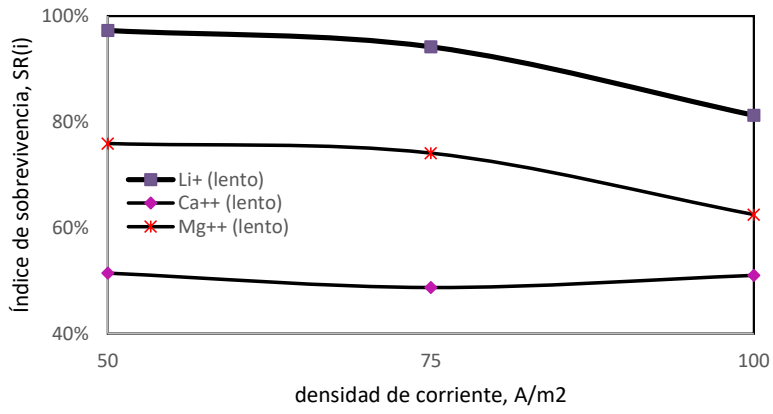
Factor de Supervivencia (SR) de iones, flujo - 1,70 L min^{-1}



Factor de Supervivencia (SR) de iones, flujo - 0,35 L min^{-1}



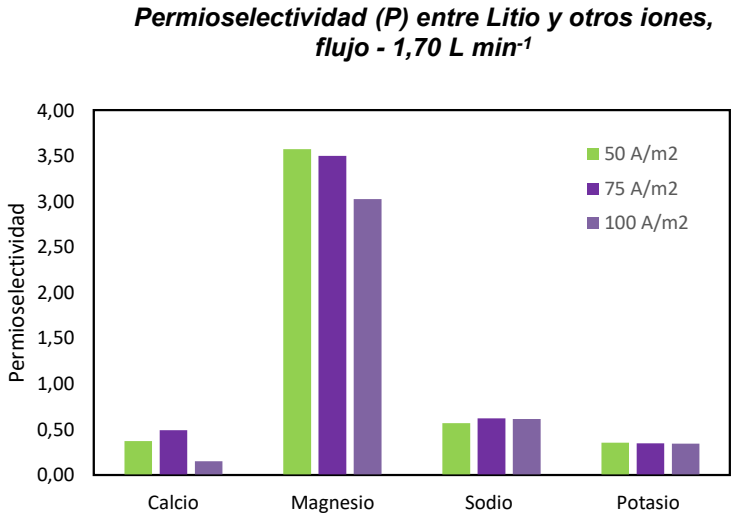


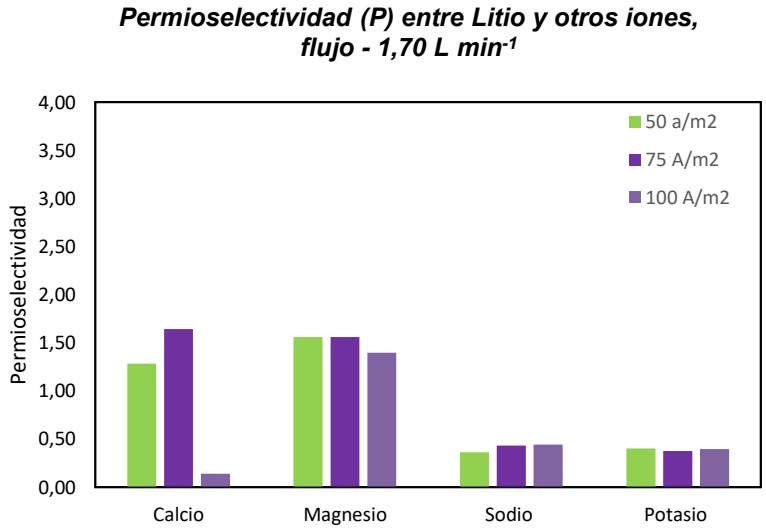


IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Permioselectividad del Li^+ respecto de iones i^+, P_{Li^+/i^+}





IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Conclusiones

- La Cronopotenciometría resulto una técnica efectiva para la caracterización de las membranas en estudio
- Número de transporte de Litio en membrana resulto menor que el numero de transporte del sodio
- El numero de transporte decrece con el aumento de la concentración en el compartimiento anódico
- Como era de esperarse, el nivel de corriente límite crece con la concentración de la solución y también al incluir flujo de solución en la celda
- En un sistema Li-Na, el Na demuestra un efecto nocivo para la recuperación de Li; a medida que disminuye el factor Li/Na el efecto es aun más nocivo.
- Es mas factible la recuperación de iones sodio desde la solución de alimento utilizando el modelo de membrana MCC.

IMetChile

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Conclusiones

- La eficiencia de recuperación de iones monovalentes con una condición de flujo rápido refleja valores en el orden K^+>Na^+>Li^+ en las tres densidades de corriente estudiadas.
- El factor de concentración es exuberantemente mayor para los iones Na^+ y K^+ que el Li^+ y esto cuantifica la diferencia en la cantidad de iones traspasados a la solución catódica entre las especies iónicas.
- Un comportamiento similar del facto $CR_{(i^+)}$ fue encontrado para todos los iones en solución, decrecimiento del con un flujo rápido y crecimiento de los valores con uno lento.
- Con respecto al factor $SR_{(i^+)}$ del ion Li^+, este permanece en la solución anódica en mayor magnitud cuando es empleado un flujo lento (0,35 L min^{-1}).
- Valores muy bajos de $SR_{(Ca^+)}$ fueron obtenidos en todo el rango de corriente estudiado; el Ca+2 migra fácilmente a través del material.
- Valores bastante aceptables de permioselectividad fueron determinados entre el litio y el magnesio cuando fue empleado un flujo rápido, indicando que hubo una buena separación entre estos iones.

IMetChile

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Agradecimientos

Los autores deseamos expresar nuestra gratitud por el apoyo a la elaboración de esta investigación por parte de **College of Science, Health, Engineering & Education of Murdoch University** y el colaborador **Michael Nicol**. Maximiliano Alvarez agradece al **Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile** por todo el soporte económico y de gestión para el proyecto por parte de las autoridades de este.

Referencias

A., Gerardo Cifuentes M. Cristian Vargas R. Jaime Simpson. 2006. *Fundamentos de corrosión y protección de materiales.* Santiago : Universidad de Santiago, 2006.

Adrián, Yirda. 2019. pH. *Blog: Concepto Definición Sitio Web.* [En línea] Venemedia Comunicaciones , 18 de Septiembre de 2019. [Citado el: 25 de Octubre de 2019.] https://conceptodefinicion.de/ph/.

Ali, Umar. 2019. Power-Technology.com. [En línea] Verdict Media Limited, 25 de Noviembre de 2019. [Citado el: 12 de Mayo de 2020.] https://www.power-technology.com/news/geo40-lithium-geothermal-fluid/.

Anders, Valentín. 2008. Etimologías de Chile. *deChile.net (Sitio Web).* [En línea] 2008. http://etimologias.dechile.net/?litio.

Baoji City Changsheng Titanium Company (China). 2019. Ruthenium oxide coated titanium anode. *Baoji City Changsheng Titanium Co Web site.* [En línea] Baoji City Changsheng Titanium Co, 2019. [Citado el: 27 de Julio de 2019.] http://www.bjcstitanium.com/titanium-anode/ru-coating/ruthenium-oxide-coated-titanium-anode.html.

Bloomberg Green. 2019. bloomberg.com. [En línea] Bloomberg, 11 de Junio de 2019. [Citado el: 8 de Mayo de 2020.] https://www.bloomberg.com/news/features/2019-06-11/saving-the-planet-with-electric-cars-means-strangling-this-desert?sref=HOPZPtg9.

Briones, R, y otros. 2017. Litio mineral estratégico para la energía en Chile. *El Mostrador: Noticias: Blogs y Opinión Sitio Web.* [En línea] 16 de Diciembre de 2017. [Citado el: 3 de Octubre de 2019.] http://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2017/12/16/el-litio-mineral-estrategico-para-la-energia-en-chile-y-el-mundo/.

Caracterización de ánodos de PtPdO(x) y RuO(2) usados en una celda electroquímica para la eliminación del cloruro de metiltionina en una solución sintética. **Isarain, Eloy, y otros. 2012.** 2, México, DF. : Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 2012, Vol. 16. 1665-529-X.

Carrere, Michelle. 2018. Explotación de litio en Chile: renueva contrato a empresa infractora ambiental. *Mongabay Latam Sitio Web.* [En línea] Mongabay.org, 31 de Octubre de 2018. [Citado el: 7 de Julio de 2019.] https://es.mongabay.com/2018/10/explotacion-de-litio-en-chile-estado-renueva-contrato-a-empresa-infractora-ambiental/.

Castaños, Enrique. 2015. Procesos electrolíticos y leyes de Faraday. *Blog Lidia con la Quimica sitio Web.* [En línea] 13 de Agosto de 2015. [Citado el: 25 de Agosto de 2019.] https://lidiaconlaquimica.wordpress.com/tag/electrolisis/.

Castello, Andrés y Kloster, Marcelo. 2014. *Industrialización del litio y agregado de valor local.* Buenos Aires : Centro Interdisciplinario de Estudios de Ciencia, Tecnología e Innovación (CIECTI), 2014. Informe Técnico Académico. ISBN 978-987-46517-0-9.

—. 2015. *Industrialización del Litio y Agregado de Valor Local.* Buenos Aires : Centro Interdisciplinario de Estudios en Ciencia, Tecnología e Innovación, 2015. Informe Tecno-Productivo.

Cedrón, J, Landa, L y J, Robles. 2011. Química General. *Unidad 4: Electroquímica.* [En línea] 2011. [Citado el: 2 de Agosto de 2019.] http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/unidades-q2/unidad-4-electroquimica.html.

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Referencias

Centro Nacional de Metrología (México). 2018. *Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en las Mediciones Químicas que emplean las técnicas de Espectrofotometría de Absorción Atómica y de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.* La Cañada, Querétaro : CENAM, 2018. Manual técnico.

Chagnes, Alexandre y Gmar, Soumaya. 2019. *Recent advances on electrodialysis for the recovery of lithium from primary and secondary resources.* Nancy, France : Elsevier B.V., 2019. 0304-386X.

Cifuentes M., Gerardo, Vargas R., Cristian y Simpson A, Jaime. 2006. *Fundamentos de corrosión y protección de materiales.* Santiago : Universidad de Santiago, 2006.

COCHILCO. 2018. *Mercado internacional del litio y su potencial en chile.* Chile : COCHILCO Dirección de estudios y Políticas Públicas, 2018.

Comisión Chilena del Cobre. 2017. *Mercado Internacional del Litio y si potencial en Chile.* Santiago : COCHILCO, 2017. Informe Técnico DE /32 /2017.

Comisión Chilena del Cobre. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. 2012. *Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio.* Santiago : COCHILCO, 2012. Informe técnico DE/12/09.

Cristalino. Lepidolita. *Galería de Minerales FMF.* [En línea] Seixo Amarelo, Guarda, Distrito de Guarda, Portugal. [Citado el: 21 de Julio de 2019.] https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=71594&searchterms=&searchauthor=Cristalino.

Dr.meter. Medidor Dr Ps305dm 30 V5 Una Fuente De Alimentación De Cc. [En línea] Dr.meter. [Citado el: 3 de Septiembre de 2019.] https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-480117567-medidor-dr-ps305dm-30-v5-una-fuente-de-alimentacion-de-cc-_JM.

EcuRed.cu. 2010. Microscopio electrónico de barrido. *EcuRed: Enciclopedia Cubana sitio Web.* [En línea] 25 de Diciembre de 2010. [Citado el: 21 de Julio de 2019.] https://www.ecured.cu/Microscopio_electrónico_de_barrido.

—. 2010. Níquel. *EcuRed: Enciclopedia Cubana Sitio Web.* [En línea] 2010. [Citado el: 24 de Junio de 2019.] https://www.ecured.cu/N%C3%ADquel.

El dilema del litio. **Rodríguez, Ana y Boric, Simón. 2014.** 1, Santiago : Universidad de Chile,Vicerrectoría de Extensión y Comunicaciones, Septiembre de 2014, El Paracaídas, págs. 24-27.

El impacto ambiental de la minería en Chile. **ICARITO. 2010.** Santiago : s.n., 2010, Icarito.

Escobar Orellana, María Rosa. 2017. *Electrodeposición.* Central La Paz : Escuela de Ingenieros Militar, 2017. Informe Técnico Académico.

Evaluation of transition metals transport propierties through a cation-exchange membrane by chronopotentiometry. **Pérez-Herranz, Valentin, y otros. 2006.** Valencia, Spain : Elsevier B. V., 2006, Vol. 284.

Ganfeng. 2018. *Application Proof.* 2018.

Garcés Millas, Ingrid. 2019. *La industria del Litio en Chile.* Antofagasta : Universidad de Antofagasta, Departamento Ingeníeria Química, 2019. Informe Técnico Académico.

García, Irene. 2016. Producción de cloro in situ mediante electrolisis de salmuera. *Iagua: Blogs Sitio Web.* [En línea] IAgua, 2 de Septiembre de 2016. [Citado el: 15 de Octubre de 2019.] https://www.iagua.es/blogs/elena-torre/produccion-cloro-in-situ-mediante-electrolisis-salmuera.

Garrido Moreno, Belén Estefanía. 2018. *Estudio de electrodeposición de cobre a partir de soluciones amoniacales por medio de electrodiálisis reactiva utilizando membranas de intercambio iónico aniónicas y/o catiónicas.* Santiago : Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2018. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva.

González, Diana y Martínez, Lorena. 2009. *Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio aniónico con aplicación en celdas de combustible alcalinas.* Medellín : Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, 2009. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico.

Gravel Ortega, Leopoldo Francisco. 2015. *'Litio y las dificultades para la obtención de una calificación ambiental favorable en el salar de atacama. Análisis de las causas'.* Santiago : Universidad de Chile, 2015. Tesis para optar al grado de magíster en gestión y dirección de empresas.

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Referencias

Haynes, William M., Lide, David R. and Bruno, Thomas J. 2016-2017. *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data.* Florida : Boca Raton, 2016-2017. 97th edition.

Henrique Rotta, Eduardo. 2018. *Eletrodiálise aplicada na recuperação de fósforo a partir de solução com baixo teor de fosfato.* Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul ,Engenharia de Minas, 2018.

Hewitt, Paul G. 1999. *Física Conceptual.* México : Pearson Educación, 1999. IBSN 9789684442986.

Hoekema, Sharai. 2019. whatsorb.com. [En línea] 15 de Agosto de 2019. [Citado el: 8 de Mayo de 2020.] https://www.whatsorb.com/energy/environmental-costs-of-lithium-battery-addiction-worldwide.

Hoshino, Tsuyoshi. 2013. *Preliminary studies of lithium recovery technology from seawater by electrodialysis using ionic luquid membrane.* Japan : Elsevier, 2013. 0011-9164.

Husson, E, y otros. 2013. *Selective anthocyanins enrichment of cranberry juice by electrodialysis with ultrafiltration membranes stacked.* Cánada : Innov. Food Sci. Emerg., 2013.

Instituto de Biotecnología. 2006. *Cristalografia.* Ciudad de México : Universidad Autónoma de México, 2006. Informe Técnico Académico.

IONSEP (TM) . 2000. *Membranes information.* 2000.

Isarain, Eloy, y otros. 2012. *Caracterización de ánodos de PtPdO(x) y Ru O(2) usados en una celda electroquímica para la eliminación del cloruro de metilionina en una solución sintética.* Mexico, DF. : Revista Académica de la Facultad de Ingenieria, Universidad Autónoma de Yucatán), 2012. 1665-529-X.

Jia, Yongzhong, y otros. 2016. *Solvent extraction of lithium from aqueous solution using non-fluorinated functionalized ionic liquids as extraction agents.* Xining, China : Elsevier B.V., 2016.

Jing, Yan, y otros. 2014. *Extraciont of lithium from salt lake brine using room temperature ionic liquid in tributyl phosphate.* Xining, China : Elsevier B.V., 2014.

La era del litio. **Valencia Giraldo, Asdrúbal. 2016.** 9, Antioquia : Revista Colombiana de los materiales, 2016, Revista Colombiana de los materiales, Vol. 1.

Lagos, Gustavo. 2012. *El desarrollo del litio en Chile: 1984-2012.* Santiago : Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012. Informe técnico academico.

Ledesma García, Q. Janet. 2004. *Preparación y Caracterización de Membranas de Intercambio Iónico a Partir del Anclaje de Dendrímeros PAMAM en una Base Polimérica de Acetato de Celulosa.* Santiago de Querétaro : Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, 2004. Tesis para optar al grado de Maestría en Electroquímica.

Li, X.H., y otros. 2015. *Preparation and characterization of posotovely charged polyamide composite nanofiltration hollow fiber membrane for lithium and magnesium separation.* China : Desalination, 2015.

Li, Xianhui, y otros. 2019. *Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources: A review.* Tianjin, Wuhan, Hong Kong, China : Elsevier B. V., 2019. 0376-7388.

Liex . 2016. ¿Cómo se obtiene y procesa el litio de un salar? *Liex SA Sitio Web.* [En línea] Liex, 2016. [Citado el: 24 de Junio de 2019.] https://liex.com.ar/como-se-obtiene-y-procesa-el-litio-de-un-salar/.

Lithium Mine. 2018. www.lithiummine.com. *lithiummine.* [En línea] lithiummine.com, 2018. [Citado el: 08 de Mayo de 2019.] http://www.lithiummine.com/lithium-mining-and-environmental-impact.

Liu, B.J., y otros. 2011. *As (III) removal from aqueous solution using alfa-Fe2=3 impregnated chitosan beads with As(III) as imprented ions.* PR China : Desalination, 2011.

Lombrana, Laura Millan. 2019. *Saving the Planet with electric cars means strngling this desert.* s.l. : Bloomberg Green, 2019.

López García, Ulises Miguel. 2005. *Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en el agua.* Santiago de Querétaro : Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, 2005. Tesis para optar al grado de Maestría en Electroquímica.

Manrique, Alejandro. 2015. *Explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina.* Mar del Plata : Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ingeniería, 2015. Tesis para optar al título de Especialización en Gestión de la Tecnología y la Innovación.

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Referencias

Minería Chilena. 2018. SQM proyecta alza de 20% en precios del litio en el primer semestre de 2018. *Minería Chilena Sitio Web.* [En línea] 9 de Abril de 2018. [Citado el: 10 de Octubre de 2019.] http://www.mch.cl/2018/04/09/sqm-proyecta-alza-20-precios-del-litio-primer-semestre-2018/.

Ministerio de Energía y Minería. 2017. *Mercado de Litio.* s.l. : Ministerio de Energía y Minería, 2017. Informe Técnico .

Ministerio de Minería. 2018. Historia de la minería en Chile. [En línea] Ministerio de Minería (Gobierno de Chile, 12 de Marzo de 2018. [Citado el: 25 de Junio de 2019.] http://www.minmineria.gob.cl/%C2%BFque-es-la-mineria/historia-de-la-mineria-en-chile/.

Moheb, Ahmad, y otros. 2015. *Recovery of lithium ions from sodium-contaminated lithium bromide solution by using electrodialysis process.* Isafahan, Iran : Elsevier B.V., 2015.

Murray, James. 2019. nsenenergybusiness.com. [En línea] NS Energy, 2019 de Octubre de 2019. [Citado el: 8 de Mayo de 2020.] https://www.nsenergybusiness.com/features/lithium-ion-battery-environmental-impact/.

Navarrete, Elias. 2013. *Electroquímica.* Lima : Universidad Nacional Mayor de San Marcos , 2013. Informe Técnico Académico, Practica dirigida de Química.

NKS . 1989. Acero inoxidable Tipo 316L. *NKS de México Sitio Web.* [En línea] NKS, 1989. [Citado el: 30 de Julio de 2019.] https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/.

Paola. Espodumeno . *Galería de Minerales FMF.* [En línea] Yacim María del Huerto San Luis. [Citado el: 21 de Julio de 2019.] https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=20823&searchterms=Espodumeno&searchauthor=-.

Pequeño, Sergio. Petalita. *Galería de Minerales FMF.* [En línea] Minas Gerais, Brasil. [Citado el: 21 de Julio de 2019.] https://www.mineralogia.es/index.php?level=picture&id=49092&searchterms=Petalita.&searchauthor=-.

Pérez-Herranz, Valentin, y otros. 2009. *Chronopotentiometric study on the effect of boric acid in the nickel transport propierties trough a cation-exchange membrane.* Valencia, Spain : Elsevier B.V., 2009.

Pérez-Herranz, Valentin, y otros. 2006. *Evaluation of transition metals transport propierties through a cation-exchange membrane by chronopotentiometry.* Porto Alegre, Brazil : Elsevier B.V., 2006.

Pismenskaia, Natalia, y otros. 2003. *Chronopotentiometry applied to the study of ion transfer through anion exchange membranes.* Krasnodar, Rusia : Elsevier B.V., 2003.

Pourcelly, Gérald y Sistat, Phillippe. 1996. *Chronopotentiometric response of an ion-exchange membrane in underlimiting current-range. Transport phenomena within the diffusion layers.* Montpellier Cedex, France : Elsevier B.V., 1996.

Quiroz A., Gisela. 2018. *Importancia estratégica del Litio.* Santiago : Universidad de Chile , 2018. Informe Técnico Académico.

REcent advances on electrodialysis for the recovery of lithium from primary and secondary resources. **Chagnes, Alexandre y Gmar, Soumaya. 2019.** 105124, Nancy, France : Elsevier B.V., 2019, Vol. 189. 0304-386X.

Responsabilidad social corporativa vs. responsabilidad contable. **Martínez-Ferrero, J., Prado-Lorenzo, J.M. y Fernández-Fernández, J.M. 2013.** 1, Barcelona : Elsevier España, 2013, Revista de Contabilidad – Spanish Accounting Review, Vol. 16, págs. 32-45.

Ribera Arismendi, Marco Octavio. 2015. *Crónica ambiental 2013 - 2015.* Bolivia : s.n., 2015.

Rivera Rodriguez, Nicolas Rolando. 2008. *Proponer estrategias de crecimiento para la industria chilena del litio, sobre la base de un estudio del comportamiento competitivo de las empresas.* Santiago de Chile : Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile, 2008. 35601154206746.

Salomone, Horacio Daniel y Cáceres, Maximiliano Antonio. 2007. *Valija de Electricidad.* Bueno Aires : Universidad Nacional de General Sarmiento, 2007. Informe Técnico Académico.

Sociedad Química y Minera de Chile. Litio y derivados. *SQM Sitio Web.* [En línea] SQM. [Citado el: 2 de Julio de 2019.] https://www.sqm.com/producto/carbonato-de-litio/.

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Referencias

Somrani, A, Hamzaoui, A.H. y Pontie, M. 2013. *Study on lithium separation from salt lake brines by nanofiltration (NF) and low pressure reverse osmosis (LPRO).* Tunisia : Desalination, 2013.

SQM. 2018. Procesos de producción: Litio y Derivados. *SQM Sitio Web.* [En línea] SQM, 3 de Octubre de 2018. [Citado el: 5 de Septiembre de 2019.] https://www.sqm.com/acerca-de-sqm/recursos-naturales/proceso-de-produccion/.

Tanaka, Yoshinobu. 2007. *Ion Exchange Membranes Fundamentals and Applications.* Ibaraki, Japan : Elsevier B. V., 2007. 0927-5193.

Tapia Díaz, Jorge. 2013. *Procedimiento de extracción de litio para la obtención de carbonato de litio, desde una salmuera o mineral y/o arcilla previamente tratado para estar libre de boro. Patente No. WO 2013/049952 Al* Chile, 11 de Abril de 2013. Procedimiento Técnico.

Tran, Tam, y otros. 2012. *Recovery of lithium from Uyuni salar brine.* Seoul, South Korea : Elsevier B. V., 2012.

Universidad de Santiago de Chile. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. 2019. *Análisis SEM.* Santiago : Universidad de Santiago de Chile, 2019. Informe Técnico de Laboratorio .

Universidad de Santiago de Chile. Departamento de Ingeniería Química. 2019. *Análisis de Difracción de Rayos X.* Santiago : Universidad de Santiago de Chile, 2019. Informe Técnico de Laboratorio.

Uso de electrodiálisis para la extracción de litio. **Cifuentes, Gerardo, Cifuentes, Magdalena y Álvarez, Maximiliano. 2018.** 1, Santiago : Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Geográfica, 20 de Agosto de 2018, GeoIngeniería, Vol. 1, págs. 28-31.

Vargas Vargas, Vairo. 2013. *Desarrollo y Optimización de una Celda Basada en Electrodiálisis para la Producción de Hidroxido de Litio Grado Batería.* Antofagasta : Universidad de Antofagasta, Facultad de Ingeníeria, Departamento de Ingeníeria Química y Procesos Minerales, 2013. Tesis para optar al título de Magíster en ciencias de la ingeníeria mención en Ingeníeria de Procesos de Minerales.

Wilkomirsky, Igor. 2008. *Etracción y refinación de metales no ferrosos: Litio.* Concepción : Departamento de ingeniería metalúrgica, Universidad de Concepción, 2008.

Xu, X.Y., y otros. 2017. *Synthesis and application of novel magnetic ion-imprented polymers for selective solid phase extraction of cadmium (II).* China : Plymers, 2017.

Zhang, Ye, y otros. 2019. *Membrane technologies for Li+/Mg2+ separation from salt-lake brines and seawater: A comprehensive review.* Hunan, China : Elsevier B. V., 2019.

Zhi-Yong, Ji, y otros. 2017. *Development of recovering lithium from brines by selective-electrodialysis: Effect of coexisting cations on the migration of lithium.* Tianjin, China : Elsevier B.V., 2017.

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

Gracias

IMetChile

Maximiliano Alvarez

max.s.alvarez@gmail.com

www.linkedin.com/in/maximilianoalvareza