

# TECNOLOGIAS PARA EXTRAÇÃO DE LÍTIO EM ROCHAS E EM SALMOURAS - UMA REVISÃO\*

Caroline Rodrigues dos Santos Brigido<sup>1</sup>

Gabriely Fornazier Brunhara<sup>2</sup>

Paulo Fernando Almeida Braga<sup>3</sup>

## Resumo

O mercado de compostos de lítio está em ascensão devido ao aumento da demanda por baterias de íon-lítio, amplamente utilizadas em veículos elétricos, bem como em eletrônicos. O lítio desempenha um papel fundamental na produção dessas baterias, conferindo-lhes melhores propriedades de desempenho e maior durabilidade de carga. Diante desse cenário, os processos de extração de lítio, tanto em rochas quanto em salmouras, têm sido objeto de desenvolvimento e aprimoramento contínuo. Este trabalho se propõe a fornecer uma revisão dessas tecnologias, oferecendo uma base sólida para futuras pesquisas e avanços tecnológicos em metalurgia extrativa. No caso das salmouras, foram discutidas as técnicas de evaporação solar, troca iônica e extração direta de lítio. Em relação à extração de lítio de minérios, foram abordados os processos de cloração, alcalino e ácido. Essas investigações têm o potencial de impulsionar o desenvolvimento de métodos mais eficientes e sustentáveis para a extração de lítio, contribuindo assim para a viabilização de fontes de energia mais limpas e renováveis.

**Palavras-chave:** Lítio; Pegmatitos; Salmouras; Bateria Íon-Lítio.

## TECHNOLOGIES FOR EXTRACTION OF LITHIUM IN ROCKS AND IN BRINE - A REVIEW

### Abstract

The lithium compounds market is on the rise due to increasing demand for lithium-ion batteries, which are widely used in electric vehicles as well as electronics. Lithium plays a fundamental role in the production of these batteries, giving them better performance properties and a longer charging life. Given this scenario, lithium extraction processes, both in rocks and in brines, have been the subject of continuous development and improvement. This work sets out to provide a review of these technologies, offering a solid foundation for future research and technological advancements in extractive metallurgy. In the case of brines, solar evaporation, ion exchange, and direct lithium extraction techniques were discussed. Regarding the extraction of lithium from ores, the chlorination, alkaline, and acid processes were addressed. These investigations have the potential to boost the development of more efficient and sustainable methods for extracting lithium, thus contributing to the feasibility of cleaner and more renewable energy sources.

**Keywords:** Lithium; Pegmatites; Brines; Lithium-Ion Battery

<sup>1</sup> Engenheira Metalúrgica e de Materiais, Dr<sup>a</sup>. bolsista, Coordenação de Processamento Mineral - COPTM, Centro de Tecnologia Mineral- CETEM, Rio de Janeiro-RJ e Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Química, Coordenação de Processamento Mineral - COPTM, Centro de Tecnologia Mineral- CETEM, Rio de Janeiro-RJ e Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Químico, Dr., tecnólogo, Coordenação de Processamento Mineral - COPTM, Centro de Tecnologia Mineral- CETEM, Rio de Janeiro-RJ e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo está passando por uma transição na matriz energética, com a substituição parcial ou integral de combustíveis fósseis por fontes de energia mais sustentáveis, com o intuito de reduzir as emissões de gases poluentes na atmosfera e minimizar o impacto ambiental. Uma das vertentes dessa transição é a crescente eletrificação de veículos, impulsionada pelo uso de baterias de íon-lítio, que oferecem uma alternativa mais limpa e eficiente. Além disso, a demanda por dispositivos eletrônicos com maior autonomia de bateria, como *smartphones* e outros *gadgets*, também tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia mais avançadas [1].

Nesse contexto, as tecnologias para a extração de lítio vem sendo aprimoradas para atender à crescente demanda. Antes do *boom* na produção de baterias de íon-lítio, a extração de lítio era predominantemente realizada a partir de salmouras. No entanto, o aumento da demanda viabilizou a extração de minérios pegmatíticos novamente, que, embora tenham um custo de processamento mais elevado, permitem a produção de compostos de lítio mais purificados em comparação com aqueles obtidos a partir de salmouras. O custo adicional associado à extração do lítio de minérios pegmatíticos está relacionado ao tratamento térmico do minério para calcinação e sulfatação, uma etapa que não é usual no processo de evaporação natural das salmouras.

As Salmouras são encontradas sobretudo em salares, que são lagos salgados com evaporação natural e localizados em regiões áridas. Nessas áreas, o lítio está dissolvido em alta concentração.

A extração de lítio de minério de espodumênio envolve a lavra e o processamento do minério. O processo inicia com a britagem do minério de espodumênio para reduzir o tamanho das partículas e liberação mineral/minério. Em seguida, o minério é submetido as operações unitárias de concentração por flotação, separação gravítica e magnética para separar o espodumênio dos minerais não desejados e obter o concentrado de lítio, geralmente teores de 5,0 - 7,0 % de óxido de lítio ( $\text{Li}_2\text{O}$ ). Este concentrado é tratado com ácidos para extrair o lítio, por meio da formação de uma solução rica em lítio que é purificada e transformada em carbonatos de lítio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) ou hidróxido de lítio monohidratado ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) [2].

Embora ambas as fontes tenham suas vantagens e desafios, a extração de lítio de salmouras tende a ser mais eficiente e menos intensiva em termos de energia em comparação com a extração de minério de espodumênio. No entanto, a demanda crescente por lítio está impulsionando a exploração de ambas as fontes para garantir o fornecimento sustentável desse elemento essencial para a transição a uma economia mais limpa e baseada em energia renovável. Além disso, a extração de lítio a partir de minérios pegmatíticos oferece uma vantagem adicional em termos de segurança de abastecimento, já que não está sujeita a variações sazonais ou geográficas como as salmouras. Isso torna os depósitos de minério de espodumênio e outros minerais de lítio uma fonte mais estável e confiável de matéria-prima para a indústria de baterias [3-4].

Este estudo oferece uma análise das tecnologias de extração de lítio em salmouras e do minério de espodumênio, servindo como um ponto de partida valioso para investigações futuras e o desenvolvimento de novas tecnologias nessa área em constante evolução.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

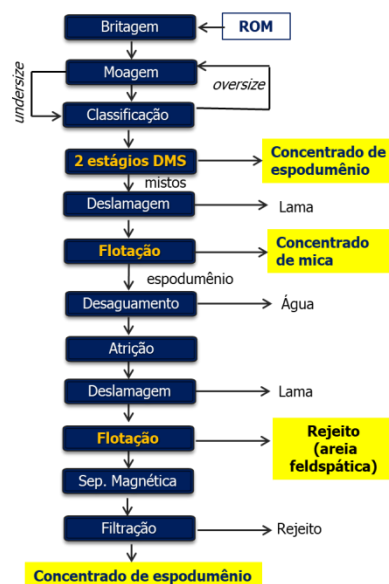
Foi realizada uma revisão das principais tecnologias de extrações de lítio em rocha dura e em salmouras. Para isto, as bases de dados utilizadas como subsídio da pesquisa foram *ScientDirect* e *Scopus*. Os artigos recuperados foram analisados e selecionados conforme a abordagem.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1 Tecnologias para concentração e extração de lítio do minério de espodumênio

#### 3.1.1 Concentração mineral

O processamento do minério de espodumênio requer várias etapas metalúrgicas que vão da concentração até a purificação, utilizando operações unitárias de separação magnética, separação densitária, flotação, precipitação, dentre outras [5]. Na Figura 1 são apresentados os principais estágios de processamento do minério de lítio. O processo inicia na britagem e moagem, seguida de peneiramento/classificação. O *undersize* segue para classificação, enquanto o *oversize* passa por dois estágios de Separação em Meio Denso (DMS), seguida de deslamagem. Nesta etapa, é possível a obtenção de um concentrado de produto afundado da DMS. Tendo em vista que ainda contém espodumênio no minério flutuado, outras operações unitárias são incorporadas para remover os minerais associados ao espodumênio, que estão em maiores quantidades. Para a remoção dos concentrados de micas, são realizadas operações de deslamagem e flotação e as areias feldspáticas são removidas pelo desaguamento, atrição, deslamagem e flotação. Por fim, ocorrem as operações de separação magnética e filtração para a obtenção do segundo concentrado de espodumênio. Este processo de concentração alcança teores de 5,5 a 7,5% em  $\text{Li}_2\text{O}$ , com tamanho de partícula entre  $-250 + 270 \mu\text{m}$  [2].



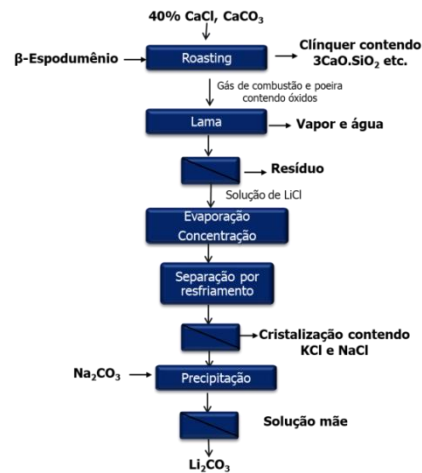
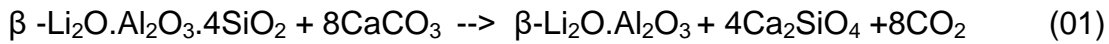
**Figura 1.** Fluxograma de concentração do espodumênio. Fonte: Adaptado de Braga e Sampaio, (2008) [6].

Roy *et al* (2023) estudaram a geoquímica e mineralogia do minério de espodumênio e mostraram que o beneficiamento ocorre em várias etapas desde a concentração até a purificação [7]. No beneficiamento mineral da empresa Nemaska Lithium® a concentração de espodumênio inicia com a britagem até o tamanho de partícula < 6,3 mm, seguida de peneiramento até 850  $\mu\text{m}$ . A seguir ocorre a separação em meio denso (DMS) em duas etapas, usando como meio uma suspensão de água e ferrosilício (meio denso). As partículas mais densas com peso específico ( $\rho_s$ ) > 2,96 são consideradas como concentrado, e as menos densas ou flutuantes ( $\rho_s$  < 2,7), como rejeitos de DMS. As partículas com  $\rho_s$  entre 2,7 a 2,96 e de tamanhos inferiores a 850  $\mu\text{m}$  foram usadas para a alimentação da concentração por flotação com ácido oleico como coletor [8]. De acordo com Tadesse *et al.*, (2019) coletores aniônicos como ácido oleico, oleato de sódio, sulfonados e ácidos graxos fosforados são amplamente utilizados para a flotação de espodumênio de minérios pegmatíticos alcançando recuperações acima de 90% e teor de concentrado de 6,52%  $\text{Li}_2\text{O}$  [9].

### 3.1.2 Processo de Cloração

Na Figura 2 é apresentado o processo de cloração do espodumênio. O concentrado de lítio (espodumênio) requer uma etapa prévia de tratamento térmico (decrepitação) realizada em fornos calcinadores rotativos, nas temperaturas de 1.000 a 1.100  $^{\circ}\text{C}$ , para conversão do  $\alpha$ -espodumênio em  $\beta$ -espodumênio, tornando o lítio disponível para extração.

Nesta técnica, são misturados sais ( $\text{CaCl}_2$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ao  $\beta$ -espodumênio (minério decrepitado), para trocar o lítio contido na estrutura do alumino silicato pelo cátion presente no sal e tornar disponível o lítio em solução e permitir a formação de cloreto de lítio ( $\text{LiCl}$ ), como pode ser observado na Reação (01). A solução é concentrada por evaporação, resfriada, cristalizada e precipitada com carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) para a obtenção de carbonato de lítio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ).



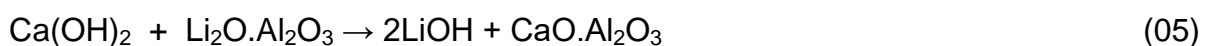
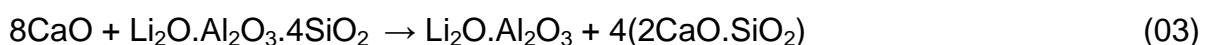
**Figura 2.** Fluxograma do processo de cloração para obtenção do  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Fonte: GAO, *et al.* 2023) [10].

As variáveis de temperatura e tempo são comumente as mais importantes na taxa de reação da cloração. Tendo como mistura de partida o  $\beta$ -espodumênio e o cloro, aquecidos a  $1100^\circ\text{C}$  por 150 minutos, para promover a extração completa do lítio como cloreto de lítio [11-12].

### 3.1.3 Processo Alcalino

O processo alcalino apresentado na Figura 3 é um resumo das principais etapas envolvidas na extração de lítio em meio com pH na faixa básica. Divergindo do processo de cloração, o processo alcalino inicia com o  $\alpha$ -espodumênio sendo misturado com uma polpa de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) com 65% de sólidos e submetidos a temperaturas de  $850^\circ\text{C}$  em forno rotativo de calcinação. Nessas condições, o carbonato de cálcio forma o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e libera gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) (Reação (02)). O óxido de cálcio em contato com o  $\alpha$ -espodumênio forma um clínquer de aluminato de lítio ( $\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e silicato de cálcio ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), conforme a Reação (03).

O clínquer é moído e submetido a uma lixiviação aquosa. Quando o  $\text{CaO}$ , ainda presente na amostra, sofre hidrólise, é formado o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (Reação (04)). Este por sua vez, reage com o aluminato de lítio ( $\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), produzindo  $\text{LiOH}$  e aluminato de cálcio ( $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), conforme Reação (05). As impurezas presentes no licor são insolúveis e precipitam, enquanto o  $\text{LiOH}$  encontra-se solubilizado, neste caso, a etapa de purificação consiste em espessamento e filtração das impurezas. Por conseguinte, o licor rico em  $\text{LiOH}$  é cristalizado e o hidróxido contido na solução saturada é separado por centrifugação. O processo é finalizado com a secagem, a fim de retirar a umidade residual [2].





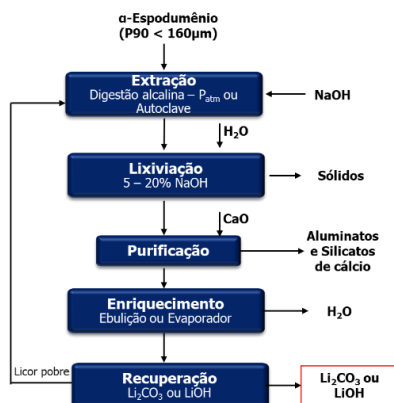


Figura 3. Fluxograma do processo álcali. Fonte: Adaptado de Braga e Sampaio, (2008) [6].

Os autores Shengbo *et. al*, (2022) realizaram uma extração de lítio de  $\alpha$ -espodumênio com hidróxido de potássio (KOH) na busca em fornecer um novo processo metalúrgico para concentrado de espodumênio por uma rota mais verde [13]. A estrutura do  $\alpha$ -espodumênio foi destruída diretamente por uma solução de KOH, e novos produtos em fase sólida de  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  e  $\text{KAlSiO}_4$  foram gerados simultaneamente. A relação mássica de KOH/minério foi de 2:1, velocidade de agitação de 500 rpm, temperatura de lixiviação de  $250^\circ\text{C}$  e tempo de lixiviação de 16 h. A eficiência total de extração de lítio atingiu 89,9%, dos quais 84,1% foram convertidos em  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  e 5,8% permaneceram na fase líquida.

### 3.1.4 Processo ácido

O concentrado de lítio requer uma etapa de tratamento térmico (decrepitação) realizada em fornos calcinadores rotativos, entre as temperaturas de  $1.000$  a  $1.100^\circ\text{C}$ , para conversão do  $\alpha$ -espodumênio em  $\beta$ -espodumênio. A cerca deste tema, Salakjani *et. al*, (2020) relataram sobre a mineralogia do espodumênio e apresentou três polimorfos  $\alpha$ -,  $\beta$ - e  $\gamma$ -espodumênio [14]. O  $\alpha$ -espodumênio é a forma natural que é resistente à lixiviação, posto isso, deve ser convertido para uma forma mais reativa, em que o lítio esteja disponível para a extração. A mudança de forma é ocasionada por meio de calcinação, quando o minério é exposto a temperaturas próximas de  $1000^\circ\text{C}$ , que produz o  $\beta$ -espodumênio, também conhecida como reação de decrepitação.

Na Figura 4(a) é delineado o processo de extração de lítio por digestão ácida, utilizando uma mistura de  $\beta$ -espodumênio e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) em excesso (30%), a uma temperatura de  $250^\circ\text{C}$ . Esse meio reacional promove a formação de sulfato de lítio ( $\text{Li}_2\text{SO}_4$ ), conforme a Reação (06), que é extraído do clínquer após a lixiviação com água. O lítio é extraído como  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  e é separado do resíduo ( $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ ) por filtração. A purificação da solução de  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  é iniciado com a adição de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e  $\text{CaCO}_3$  que irão remover por precipitação o ferro, o alumínio, o magnésio e o cálcio na forma de seus hidróxidos. A seguir a solução é concentrada por evaporação até  $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ . Para a obtenção do carbonato de lítio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), é adicionado o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), para ocorrer à dupla troca de lítio e sódio, conforme a Reação (07), onde é formado o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e o carbonato de lítio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ).

Para a produção de  $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$  são realizadas as etapas apresentadas na Figura 4(b), onde o  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  úmido é submetido ao processo de caustificação com óxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), conforme Reação (08). O carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )

formado é precipitado, e o licor diluído LiOH é concentrado por evaporação seguido de cristalização e centrifugação, para produção de hidróxido de lítio monohidratado (LiOH.H<sub>2</sub>O) [2].

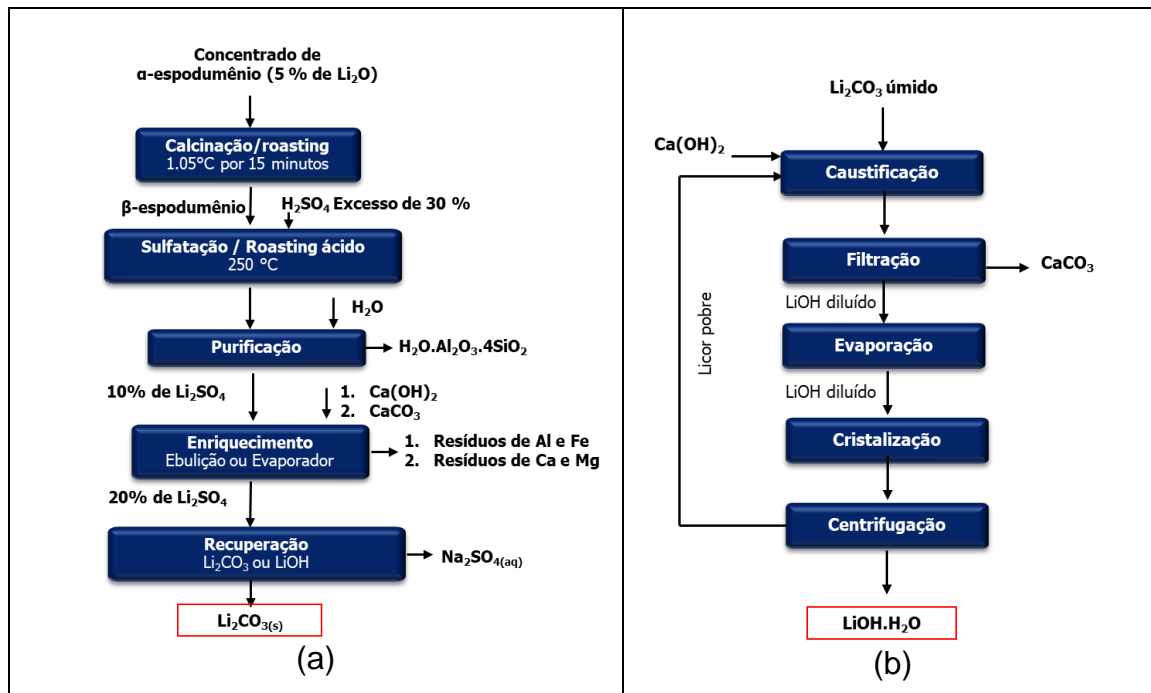
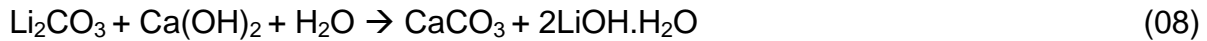
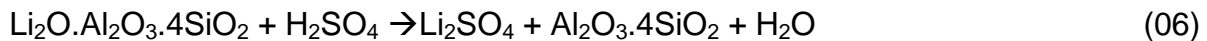


Figura 4. Fluxograma do processo ácido de obtenção do  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (a) e  $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$  (b). Fonte: Adaptado de Braga e Sampaio, (2008) [6].

Outros ácidos, além do sulfúrico, são empregados para a extração de lítio, dentre eles o clorídrico e o fluorídrico. Guo *et al.* (2017) analisaram os efeitos da proporção de massa, temperatura e tempo de reação, eles encontraram valores promissores de extração, cerca de 96%, com espodumênio/HF/ $\text{H}_2\text{SO}_4$  na proporção de 1:3:2, com 3h de reação, na temperatura de  $100^\circ\text{C}$ . Além disso, perceberam que o  $\alpha$ -espodumênio e albita são dissolvidos antes do quartzo, e resíduos insolúveis são formados, tais como os fluoroaluminatos e fluorossilicatos [15].

Nos estudos de Zhu *et al.*, (2022) abordaram as extrações de lítio proveniente de lixiviações com o ácido clorídrico (HCl) e o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Os autores concluíram que o ácido sulfúrico é o agente de lixiviação de maior eficiência e menor consumo de ácido, nas condições de  $0,75 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ , 40% de ácido em excesso, 10 min,  $30^\circ\text{C}$  e 100 rpm, onde alcançaram 87,48% de extração de lítio [16].

## 3.2 Tecnologias para extração de lítio em salmouras

### 3.2.1 Piscinas de salmouras, método de evaporação

A

Figura 5 apresenta o processo de extração do lítio em Salares, que é iniciado com a captura da salmoura por bombeamento para tanques ou lagoas. Essa salmoura é concentrada por evaporação solar ou através de processos de evaporação industrial, quanto maior a evaporação da água, mais os sais dissolvidos se concentram. O lítio é então recuperado da salmoura concentrada por meio de processos químicos, como precipitação seletiva e extração por solvente. Meng *et al* (2019) em seu trabalho afirmaram que salmouras contendo lítio contêm muitas impurezas como magnésio, cálcio, sódio e potássio, e para remover as impurezas, tecnologias como membranas iônicas, extração de solvente, precipitação e troca iônica foram empregues para recuperar lítio de salmouras, contudo devido as restrições econômicas e ambientais, a salmoura contendo LiCl necessita ser concentrada por evaporação natural antes de extrair o lítio [3].

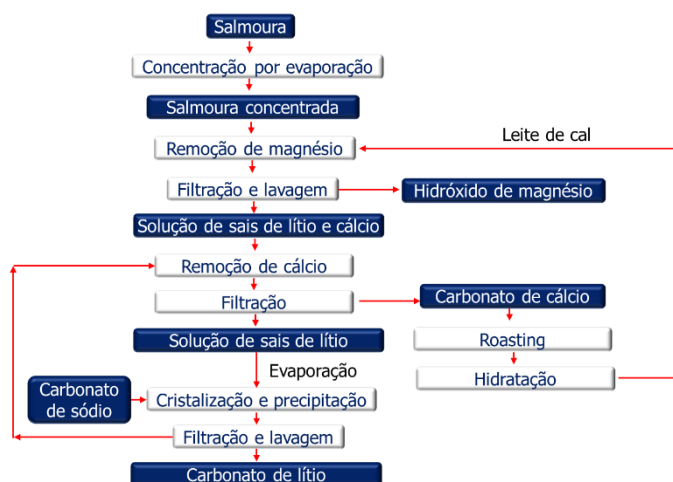


Figura 5. Fluxograma do processo de extração de lítio em salmouras por método de evaporação.

### 3.2.2 Técnica de troca-iônica

Este método utiliza resinas de troca iônica para capturar e concentrar o lítio presente na água salgada. A solução salina é percolada através das resinas, que retêm o lítio e permitem que outros íons passem. Posteriormente o lítio é retido e desorvido da resina e recuperado no processamento.

No trabalho apresentado por Rögener e Tetampel (2022) atestam a adequação da eletrodialise como uma boa alternativa aos métodos tradicionais, podendo alcançar concentrações elevadas de 1746% [4]. Os processos tradicionais de evaporação de concentração de lítio em salmoura têm um custo energético muito baixo, uma vez que utilizam principalmente energia solar natural para a evaporação, contudo só podem ser utilizados em locais restritos que geralmente têm um forte impacto ambiental. Conseqüentemente, a aplicação de eletrodialise desempenhará um papel fundamental na concentração de lítio para as quais os métodos tradicionais de evaporação não são viáveis, como a purificação de soluções ricas em lítio tendo como fonte os minérios e a recuperação de lítio a partir de baterias sem vida útil [17].

### 3.2.3 Técnica de Extração Direta de Lítio/ Direct Lithium Extraction (DLE)

É uma técnica emergente de extração de lítio que ganhou destaque devido à sua eficiência e potencial para reduzir custos e impactos ambientais. Diferentemente



dos métodos tradicionais que dependem da evaporação solar ou da troca iônica, o DLE envolve a extração direta do lítio de soluções salinas de forma mais eficiente e rápida. Existem várias abordagens, incluindo a adsorção seletiva, extração por solvente e tecnologias de membrana, além disso, oferece a vantagem de reduzir o tempo e os custos associados à extração de lítio [18].

### 3.3 Comparação entre as extrações de lítio por tipo de fonte

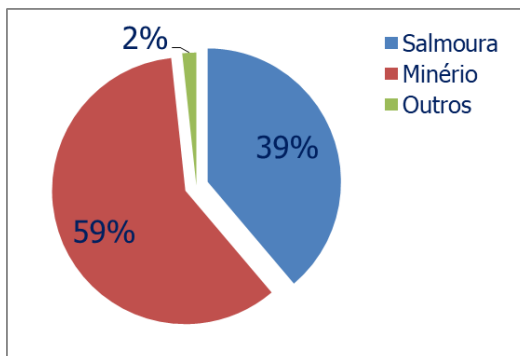
Na Tabela 1 são apresentadas as principais diferenças entre as extrações de lítio por tipo de fonte, considerando o custo com pesquisa, localização das fontes, os processos de extração, vantagens, desvantagens e a qualidade do produto. Diante do exposto é possível inferir, que poucas regiões no mundo possuem salares, o que torna a mineração deste mineral localizada majoritariamente na América do Sul, em uma região nomeada de Plateau de Puna que compreende parte dos países Chile, Argentina e Bolívia.

**Tabela 1.** Comparação entre as extrações de lítio por tipo de fonte

	<b>Salmouras</b>	<b>Minérios</b>
<b>Pesquisa mineral</b>	Baixo custo, porém as reservas são difíceis de calcular.	Alto custo, devido a sondagens, porém de fácil mensuração.
<b>Localização</b>	América do Sul (Plateau de Puna).	Austrália, Canadá, Portugal, Brasil, Zimbábue.
<b>Processo</b>	Bombeamento de salmouras para piscinas de evaporação e concentração (12 a 18 meses).	Usinas modernas e atualizadas.
	Produção de cloreto de potássio (KCl) como coproduto.	É necessária a conversão mineral a 1050°C.
	Precipitação do lítio em outra região.	
<b>Vantagens</b>	Baixo OPEX.	Baixo CAPEX.
<b>Desvantagens</b>	Não escalonável.	Alto OPEX devido à intensidade de energia e o custo de lavra.
	Tempo de implantação.	
	Baixa recuperação.	
	Depende de condições climáticas.	
<b>Qualidade do produto final</b>	Inferior, devido à presença de diversos íons ( $K^+$ , $Na^+$ , $Mg^{2+}$ , $Cl^-$ , $SO_4^{2-}$ ).	Superior (preferido por fabricantes de baterias).

No ano de 2023, a extração de lítio provindo de salmouras correspondeu a 39%, no caso das extrações em minérios foram cerca de 60% em relação à produção mundial. Esse número indica que o lítio extraído de rochas tem aumentado

à produção e tornado as extrações por salmouras menos procuradas, mas ainda permanecem em altos índices.



**Figura 6.** Porcentagem extração de lítio conforme sua fontes. Fonte: BENCHMARK MINERAL INTELLIGENCE, (2023) [19].

Alguns motivos podem ter corroborado para esse cenário, um deles é a menor quantidade de impurezas presentes nos lítios de pegmatíticos, o que o torna bastante competitivo, tendo em vista que para a produção de baterias íon-lítio puras exigem altos índices de pureza do metal.

### 3 CONCLUSÃO

É importante considerar os impactos ambientais e os desafios técnicos associados à mineração e processamento de minérios de lítio, destacando a importância de práticas sustentáveis e tecnologias de extração eficientes. Dentre os processos de extração utilizados em rochas, o processo ácido é considerado o mais promissor. A cerca das salmouras, técnicas mais avançadas de purificação do LiCl tem sido empregadas para atender o padrão de pureza dos compostos de carbonato e hidróxido de lítio para a produção de baterias. As extrações de lítio de minérios tem crescido, embora com custos de processamento superiores ao lítio produzido por salmouras.

### Agradecimentos

Agradecimentos ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação pelo incentivo à pesquisa no Brasil, que por meio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) permitiu o desenvolvimento desta pesquisa fomentada com bolsas do Programa de Capacitação Institucional, PCI-CETEM/MCTI.

### REFERÊNCIAS

- 1 EYZAGUIRRE, A. G., ROJAS, F. D., & LUCERO, V. G. (08 de Junho de 2023). El mercado de litio Desarrollo reciente y proyecciones al 2035. Disponível em Cochilco Ministerio de Minería: [www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20del%20Litio%20-%20Proyecciones%20al%202035%20-06.06.2023l.pdf](http://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20del%20Litio%20-%20Proyecciones%20al%202035%20-06.06.2023l.pdf). Acesso em 07 de Agosto de 2023
- 2 BRUNHARA, G. F., & BRAGA, P. (2021). Tecnologias de extração de lítio de pegmatitos. Rio de Janeiro/RJ: Centro de Tecnologia Mineral.

- 3 MENG, FEI; MCNEICE, JAMES; ZADEH, SHIRIN S.; GHAHREMAN, AHMAD (2019). Review of Lithium Production and Recovery from Minerals, Brines, and Lithium-Ion Batteries. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1–19. doi:10.1080/08827508.2019.1668387
- 4 RÖGENER F, TETAMPEL L. Electrodialysis for the Concentration of Lithium-Containing Brines—An Investigation on the Applicability. *Membranes*. 2022; 12(11):1142. <https://doi.org/10.3390/membranes12111142>
- 5 ASIF A. H., CHAO LI, HAZEL LIM, AND HONGQI SUN. 2024. Australia’s Spodumene: Advances in Lithium Extraction Technologies, Decarbonization, and Circular Economy. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2024 63 (5), 2073-2086. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c04048
- 6 BRAGA, P. F. A.; SAMPAIO, J. A.. Lítio. IN: *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 585-603.
- 7 ROY T., PLANTE B., BENZAAZOUA M., DEMERS I. (2023). Geochemistry and mineralogy of a spodumene-pegmatite lithium ore at various mineral beneficiation stages, *Minerals Engineering*, Volume 202, 2023, 108312, ISSN 0892-6875, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108312>.
- 8 MAGURAN, D., DUPÉRE, M., GAGNON, R., ANSON, J., BOYD, A., GRAVEL, A.-F., TREMBLAY, D., 2019. NI 43–101 technical report: Report on the estimate to complete for the whabouchi lithium mine and shawinigan electrochemical plant. Nemaska Project, DRA/Met-Chem, Montréal.
- 9 TADESSE, B., MAKUEI, F., ALBIJANIC, B., DYER, L., 2019. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review. *Minerals Engineering* 131, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>
- 10 GAO T.; NA FAN; WU CHEN; TAO DAI. Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost. *China Geology*, v.6, p.137-153, 2023.
- 11 BARBOSA LI, VALENTE G, OROSCO RP, GONZÁLEZ JA. 2014. Lithium extraction from  $\beta$ -spodumene through chlorination with chlorine gas. *Minerals Engineering*, 56, 29–34. doi: 10.1016/j.mineng.2013.10.026.
- 12 BARBOSA LI, GONZÁLEZ JA, CARMENRUIZ MD. 2015. Extraction of lithium from  $\beta$ -spodumene using chlorination roasting with calcium chloride. *Thermochimica Acta*, 605, 63–67. doi: 10.1016/j.tca.2015.02.009.
- 13 SHENGBO QIU, YUE ZHU, YOUFA JIANG, CHENGLIN LIU, AND JIANGUO YU. Kinetics and Mechanism of Lithium Extraction from  $\alpha$ -Spodumene in Potassium Hydroxide Solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2022 61 (41), 15103-15113.
- 14 SALAKJANI, N. K., SINGH, P., & NIKOLOSKI, A. N. (2020). Production of Lithium - A Literature Review Part 1: Pretreatment of Spodumene. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(5), 335–348.
- 15 GUO H, KUANG G, WANG HD, YU HZ, ZHAO XK. 2017. Investigation of enhanced leaching of lithium from  $\alpha$ -spodumene using hydrofluoric and sulfuric acid. *Minerals*, 7(11), 205. doi: 10.3390/min7110205.
- 16 [16] ZHU Y., D. ZHANG, S. QIU, C. LIU, J. YU,. 2023. Lithium recovery from pretreated  $\alpha$ -spodumene residue through acid leaching at ambient temperature. *Canadian journal of chemical engineering*. v.101, n. 8, p.4360-4373. <https://doi-org.ez106.periodicos.capes.gov.br/10.1002/cjce.24806>
- 17 GMAR, S.; CHAGNES, A. Recent Advances on Electrodialysis for the Recovery of Lithium From Primary and Secondary Resources. *Hydrometallurgy* 2019, 189, 105124.
- 18 KARRECHA, M.R. AZADIA, M. ELCHALAKANIA, M.A. SHAHINB, A.C. SEIBIC, 2020. A review on methods for liberating lithium from pegmatites. *Minerals Engineering* v. 145, p. 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106085>
- 19 BENCHMARK MINERAL INTELLIGENCE. (2023). Hard rock lithium vs. brine – how do their carbon curves compare?. Disponível em:

<https://source.benchmarkminerals.com/article/hard-rock-vs-brine-how-do-their-carbon-curves-compare>. Acessado: 09 de Maio de 2024.