

PROVINCIA DE FORMOSA
CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES

**PROYECTO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PLANTA
PILOTO DE PRODUCCIÓN DE CARBONATO DE LITIO Y ESCALADO INDUSTRIAL**

EX-2025-00021155- -CFI-GES#DC

INFORME FINAL

DICIEMBRE 2025

Autor:

Recursos y Energía de Formosa (REFSA – Hidrocarburos S.A)

Índice

I. Resumen	3
II. Introducción	5
III. Información General del Proyecto	6
IV. Objetivos	7
Objetivos específicos:	8
V. Análisis comparativo de proyectos y contexto internacional.	8
El mercado global del litio y la transición energética	8
Antecedentes y evolución del precio del litio	9
Agua de formación como recurso estratégico	10
Proyectos internacionales de referencia	11
Tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE)	11
Relevancia para el proyecto de Formosa	12
VI. Alcance del informe final	12
VII. Descripción del Proceso de obtención de carbonato de litio en planta	14
VIII. Plan de tareas	18
IX. Descripción de las actividades realizadas	19
Puesta a punto de equipos e instalaciones industriales, conexiones hidráulicas, prueba de bombas y motores. Para ver detalles completos consultar Anexo 10 Operativos de planta piloto.	19
X. RIESGOS Y SUPUESTOS	73
Riesgos identificados:	73
XI. CONCLUSIONES	79
Síntesis de resultados	79
Conclusiones de los equipos de expertos	80
Conclusión integrada	84
Análisis y deducciones finales:	92
Reflexión final	99
XII. BIBLIOGRAFÍA	100
XIII. APÉNDICE	100
Roles y responsabilidades	100
Material complementario	101
Imágenes de actividades, planta y equipos	102
ANEXOS	

I. Resumen

El presente informe constituye la continuación y actualización del **Primer Informe Parcial (septiembre 2025)** del proyecto “**Factibilidad Técnica y Económica de la Planta Piloto de Producción de Carbonato de Litio y Escalado Industrial**”, desarrollado por **REFSA Hidrocarburos** con financiamiento del **Consejo Federal de Inversiones (CFI)**. Este documento actúa como **Informe Final**, integrando los avances, resultados y conclusiones obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

La iniciativa se enmarca en la política de diversificación productiva de la Provincia de Formosa y busca validar, mediante ensayos en laboratorio y planta piloto, la viabilidad de obtener carbonato de litio a partir de salmueras de formación asociadas a la producción hidrocarburífera.

Durante los últimos dos meses de ejecución se avanzó en:

- **Acondicionamiento de salmueras:** se repitió el muestreo de hidrocarburos totales del petróleo, manteniendo valores por debajo del nivel detectable (por técnicas de laboratorio) en la mayoría de los casos. Asimismo, se avanzó con la **memoria descriptiva del sistema de nanoburbujas**, evaluado como proceso alternativo y/o complementario a la filtración y reposo para la remoción de hidrocarburos disueltos en salmuera.
- **Ensayos de procesos a escala laboratorio y piloto:** se realizaron pruebas integrales de adsorción, elución, concentración y carbonatación, logrando la obtención de carbonato de litio sólido a partir de salmuera real.

- **Optimización del tiempo de adsorción:** a partir de los resultados obtenidos en pruebas iniciales, se definió mantener un **tiempo de contacto de 6 horas** entre la salmuera y la resina (etapa de adsorción), alcanzando registros operativos estables y una mejora observable en el perfil de carga de las columnas. Esta modificación permitió identificar una zona de equilibrio más definida y reducir la dispersión de resultados, constituyendo un avance relevante para el diseño del balance de masa final.

- **Repetición de ciclos operativos:** se avanzó en la **repetición de ciclos completos de producción**, abarcando todas las etapas del proceso diseñadas para la planta piloto: adsorción, elución, concentración por ósmosis inversa (RO), concentración por evaporación forzada, carbonatación y filtrado final. La ejecución secuencial y controlada de estos ciclos permitió evaluar la estabilidad operativa del sistema y registrar parámetros representativos de cada etapa. Como resultado, se obtuvo información técnica clave para la definición de la factibilidad técnica y económica del proceso integral de producción de carbonato de litio.

- **Capacitación del personal operativo:** se realizaron instancias de formación específicas orientadas a la **etapa de carbonatación** y al manejo seguro de equipos y reactivos.

Los resultados obtenidos confirman la factibilidad **técnica del proceso para obtener carbonato de litio** considerando una serie de puntos críticos a solucionar y controlar en la planta piloto y contemplarlos para el diseño industrial en caso favorable de avance, de los cuales dependerá la calidad del producto a obtener y su posible retribución económica. Los datos generados permiten estimar consumos energéticos, tiempos de residencia y rendimientos por etapa, insumos fundamentales para proyectar el escalado industrial y la definición de costos operativos.

Diversos países —incluidos Estados Unidos, Canadá, China y Rusia— han desarrollado proyectos piloto para la extracción de litio desde salmueras de formación y geotermiales, explorando

tecnologías de extracción directa y recuperación selectiva (Stringfellow et al., 2021; Foley et al., 2020; Xu et al., 2022). Estos antecedentes demuestran un camino aún en validación, pero con **alto potencial estratégico** frente a la creciente demanda global de litio. Siguiendo esta línea. **En Argentina**, esta iniciativa **representa la primera experiencia** orientada específicamente al aprovechamiento de salmueras de formación, dado que los desarrollos previos se han concentrado casi exclusivamente en salares (SEGEMAR; Y-TEC).

Los próximos pasos incluyen: evaluación de posibles inversiones, alternativas, posibilidad de realizar ensayos que permitan profundizar en las premisas aquí nombradas para tomar las decisiones pertinentes. Esto incluye consideración de costos para repetición de análisis de laboratorio, diseño de operaciones más eficientes (evaporación y sistemas de recuperación de calor, adaptación de escala para nanoburbujas), además de mejoras sustanciales en toda la planta o diseño industrial.

II. Introducción

El presente documento constituye el Informe Final del proyecto **“Factibilidad Técnica y Económica de la Planta Piloto de Producción de Carbonato de Litio y Escalado Industrial”**, ejecutado por REFSA Hidrocarburos **con el valioso acompañamiento y financiamiento del Consejo Federal de Inversiones (CFI)**, cuyo aporte resultó fundamental para el desarrollo de las actividades aquí documentadas.

La iniciativa se enmarca en la política industrial, científica y tecnológica de la Provincia de Formosa, orientada a la diversificación productiva, el agregado de valor en origen y el fortalecimiento de capacidades locales en torno a un recurso estratégico para la transición energética: el litio. El proyecto busca generar conocimiento técnico, validar procesos a escala piloto y contribuir a la soberanía provincial en la gestión de sus recursos naturales, promoviendo empleo calificado y la articulación con instituciones del sistema científico-tecnológico.

El objetivo central consistió en evaluar la factibilidad técnica y económica de los procesos de extracción y producción de carbonato de litio, mediante ensayos en laboratorio y planta piloto, pruebas de acondicionamiento de salmueras, análisis de alternativas tecnológicas y estimaciones de costos y viabilidad para un eventual escalado industrial.

Este Informe Final integra los avances, resultados y conclusiones obtenidos durante todo el desarrollo del proyecto, incluyendo la repetición de ciclos de producción completos, que abarcan las etapas de adsorción, elución, concentración por ósmosis inversa, evaporación forzada, carbonatación, filtrado y secado, así como la optimización de parámetros operativos, el análisis de estabilidad de proceso y la capacitación del personal técnico. Los resultados obtenidos sientan las bases para la evaluación de factibilidad integral del proceso y la definición de próximos pasos hacia su potencial aplicación a escala industrial.

III. Información General del Proyecto

Nombre del Proyecto: Factibilidad Técnica y Económica de la Planta Piloto de Producción de Carbonato de Litio y Escalado Industrial.

Unidad Ejecutora: Recursos y Energía de Formosa – REFSA – Hidrocarburos S.A

Fecha de Elaboración del Informe: Diciembre 2025

Duración Total del Proyecto: 4 meses

Periodo Cubierto por este Informe: 28/07/2025 al 28/11/2025

Contexto General

El litio es actualmente uno de los minerales más demandados a nivel mundial, por su uso en la fabricación de baterías para dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energías renovables. En general, su producción se concentra en salares del denominado “Triángulo del Litio”, que incluye a Argentina, Bolivia y Chile.

En el caso de Formosa, el interés se centra en la evaluación de las **salmueras de formación**, asociadas a la producción de hidrocarburos, como una fuente alternativa de litio. A diferencia de los salares de la Puna, este tipo de recurso ha sido escasamente explorado en el país, por lo que se trata de un campo novedoso de investigación.

El presente proyecto constituye la **primera experiencia de factibilidad en Argentina** orientada específicamente a este tipo de salmueras, contando con una planta piloto instalada y, con un marco de cooperación con YTEC y el gobierno de la provincia (memorándum de entendimiento y convenio específico) que respalda el desarrollo. Aunque existen antecedentes internacionales de proyectos similares en países como Canadá, Rusia y China, los mismos se encuentran en etapas experimentales o de validación, lo que refuerza la pertinencia de avanzar en estudios locales.

En este sentido, el proyecto busca generar información técnica rigurosa que permita determinar la viabilidad de los procesos de recuperación de litio a partir de salmueras de formación en Formosa, sentando las bases para futuras decisiones de política productiva y de investigación aplicada.

IV.Objetivos

Objetivo general:

Esta etapa del proyecto tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica de la planta piloto mediante pruebas iniciales de equipos y capacitación del personal. Los resultados determinarán la

continuidad del proyecto y permitirán ajustes presupuestarios en consenso con el equipo consultor. Si la factibilidad técnica no es viable, se analizarán usos alternativos para los equipos instalados.

Objetivos específicos:

- Verificar el estado y funcionamiento de los equipos principales.
- Evaluar la adsorción selectiva y rendimiento de resinas.
- Ajustar sistemas de filtrado y disminuir la concentración de hidrocarburos presentes en la salmuera. A su vez, gestionar la ingeniería conceptual de nanoburbujas para remoción final de orgánicos disueltos.
- Evaluar la medición de litio en distintos puntos del sistema.
- Capacitar al personal en laboratorio y operación de planta.
- Estimar las reservas de litio.
- Proyectar el costo estimado de la producción de carbonato de litio y su relación con la actividad hidrocarburífera.
- Proponer opciones de uso alternativo en caso de no factibilidad.

V. Análisis comparativo de proyectos y contexto internacional.

El mercado global del litio y la transición energética

La demanda mundial de litio ha crecido de manera exponencial en la última década, impulsada por la transición hacia la electromovilidad y el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala. El carbonato de litio es un insumo crítico en la fabricación de baterías de ion litio, utilizadas en vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos.

Tradicionalmente, la producción se concentra en la minería de roca (espodumeno) y en la evaporación de salmueras en salares del “Triángulo del Litio” (Argentina, Bolivia y Chile). Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones ambientales, sociales y de plazos de ejecución, lo que motiva la búsqueda de fuentes alternativas.

Antecedentes y evolución del precio del litio

Desde 2018, el mercado del litio ha atravesado un ciclo excepcionalmente volátil impulsado por cambios estructurales en la oferta y la demanda global. Entre 2018 y 2020, la rápida expansión de proyectos en Australia y Sudamérica generó un período de sobreoferta que presionó los precios a la baja. Este escenario se revirtió abruptamente en 2021–2022, cuando la aceleración del mercado de vehículos eléctricos y las limitaciones en la capacidad de refinado provocaron un shock de demanda que llevó los precios a máximos históricos. A partir de 2023, la entrada de nueva oferta, la normalización de inventarios y una desaceleración temporal del sector automotriz generaron una corrección profunda, estabilizando el mercado en niveles más sostenibles.

De cara a 2036, el litio se proyecta como un mercado en crecimiento estructural, pero con volatilidad persistente. La expansión de la capacidad minera y de refinado, el avance del reciclaje, la diversificación tecnológica (incluyendo LFP y sodio-ion) y las políticas industriales orientadas a asegurar cadenas de suministro regionales configurarán un entorno más maduro. En este contexto, los precios tenderían a moverse dentro de un rango moderado, reflejando un equilibrio dinámico entre innovación, demanda energética global y riesgos geopolíticos. En el siguiente gráfico se pueden observar la evolución de los precios para las diferentes etapas mencionadas.

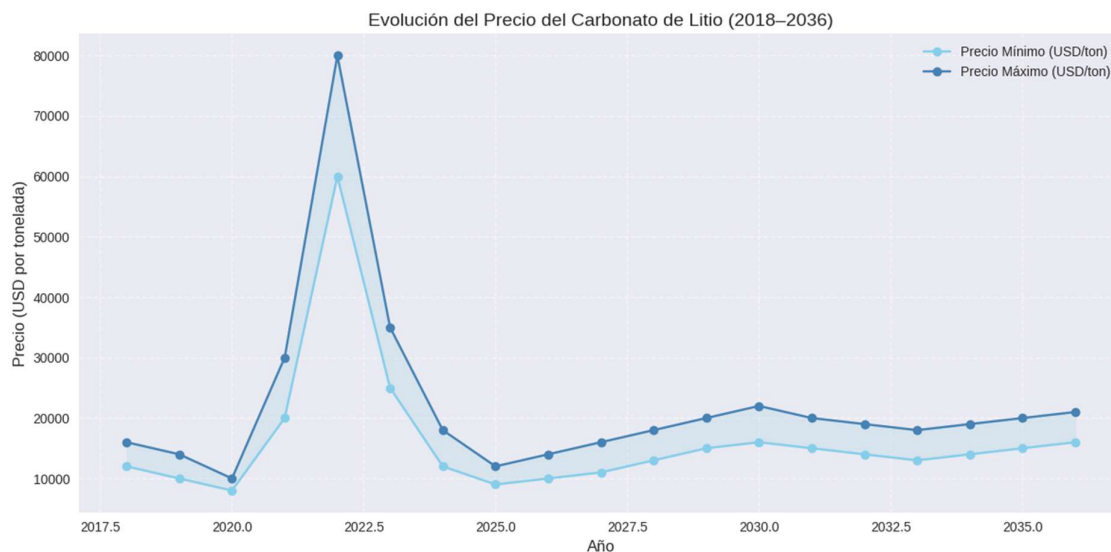


Figura 1
Evolución del precio del Litio 2018-2020.

Agua de formación como recurso estratégico

En este escenario, el agua de formación —subproducto de la industria de petróleo y gas— ha emergido como una oportunidad innovadora para diversificar las fuentes de litio. A nivel global, diariamente se generan millones de barriles de este fluido, considerado históricamente un residuo de alto costo de disposición. Estudios recientes han demostrado que muchas de estas salmueras contienen concentraciones económicamente atractivas de litio.

La posibilidad de transformar un pasivo ambiental en un recurso estratégico abre la puerta a sinergias entre la industria hidrocarburífera y la cadena de valor del litio. Investigaciones internacionales, como las de Werrus Energy, indican que concentraciones de litio superiores a 100 mg/L pueden dar viabilidad económica a proyectos de este tipo.

Proyectos internacionales de referencia

Si bien el desarrollo aún se encuentra en etapas tempranas, existen antecedentes en distintas regiones del mundo:

- **Estados Unidos (geotermia y produced water):** proyectos piloto en California y Texas exploran la extracción de litio a partir de salmueras geotérmicas y de agua de formación de pozos petroleros.
- **Canadá y China:** iniciativas de laboratorio y planta piloto orientadas a validar resinas y adsorbentes para aguas de formación.
- **Europa del Este y Rusia:** estudios preliminares en salmueras asociadas a yacimientos de gas, aún en fase experimental.

Estos antecedentes confirman el interés global en el aprovechamiento de este tipo de recurso, aunque todavía no existen plantas comerciales en operación consolidada.

Tecnologías de Extracción Directa de Litio (DLE)

La viabilidad de los proyectos basados en salmueras no convencionales depende de la aplicación de tecnologías de **Extracción Directa de Litio (DLE)**:

- Adsorción selectiva (resinas y óxidos de aluminio modificados).
- Intercambio iónico.
- Extracción por solventes.

Estas tecnologías ofrecen ventajas frente a la evaporación solar: reducen tiempos de proceso (meses a horas), mejoran la recuperación de litio (>90%) y minimizan el consumo de agua dulce y superficie ocupada.

No obstante, su implementación requiere adaptaciones específicas según la composición de cada salmuera. En particular, las aguas de formación presentan desafíos adicionales, como la presencia de hidrocarburos y altos niveles de Ca, Mg y K, que incrementan los costos de pretratamiento.

Relevancia para el proyecto de Formosa

El caso de Formosa se enmarca en esta tendencia internacional, siendo la **primera experiencia en Argentina focalizada en salmueras de formación**. La comparación con los proyectos mencionados permite dimensionar el carácter innovador y estratégico de este estudio, al mismo tiempo que resalta los desafíos técnicos y económicos asociados.

VI. Alcance del informe final

El presente informe abarca la totalidad de las actividades desarrolladas durante la ejecución del proyecto “Factibilidad Técnica y Económica de la Planta Piloto de Producción de Carbonato de Litio y Escalado Industrial”, culminando las etapas previstas en el plan de trabajo aprobado.

El proyecto comprendió desde la puesta a punto de instalaciones y equipamiento de laboratorio y planta piloto, hasta la obtención de carbonato de litio sólido a partir de salmuera real, incluyendo la evaluación técnica, operativa y económica de los procesos involucrados. Asimismo, se consolidó la organización del equipo técnico interdisciplinario, la articulación con actores institucionales y la capacitación del personal operativo, fortaleciendo las capacidades locales en torno al desarrollo de tecnología para la recuperación de litio.

El informe presenta los resultados finales y conclusiones derivados de los ensayos realizados, con énfasis en la validación de procesos a escala piloto, la identificación de parámetros críticos de operación y la definición de criterios para el análisis de factibilidad técnica y económica.

Específicamente, el informe cubre las siguientes áreas de trabajo:

Eje 1. Puesta a Punto de Instalaciones:

- Adecuación de equipos e instalaciones industriales, conexiones hidráulicas, prueba y calibración de bombas, motores y sistemas de control

Eje 2 - Acondicionado de la Salmuera

- Ajuste en los sistemas de filtros instalados en planta por el equipo consultor y evaluación de nuevas incorporaciones al sistema.
- Ensayos de reposo, filtrado y muestreo de salmuera.
- Análisis de resultados y evaluación de parámetros operativos.
- Ingeniería Conceptual Extendida de Nanoburbujas.

Eje 3 - Procesos de Planta - Adsorción Selectiva, Oxidación, Concentración, Carbonatación.

- Ensayo a escala laboratorio de adsorción/desorción y estabilidad de resinas.
- Preparación de Salmuera Artificial para prueba de ósmosis inversa y resto de procesos.
- Ensayos de proceso con salmuera real. Incluye el acondicionado de salmuera, la adsorción y elución en columnas, oxidación, concentración y carbonatación.
- Evaluación de medición de Li en distintas instancias de proceso.
- Análisis técnico de factibilidad. Incluye la repetición de ciclos de producción empleando salmuera real.
- Actividades de laboratorio y capacitación del personal operativo. Transversal a todas las actividades.

Eje 4 - Reservas de Litio

- Estimación de Reservas de Litio y su relación con la producción hidrocarburífera.

Eje 5. Costeo y Viabilidad Económica

- Costeo del proceso de obtención de Li_2CO_3 (planta piloto).
- Asignación de costos de la actividad hidrocarburífera (bombeo, manejo y acondicionado e inyección de agua) y la producción de la planta piloto de litio.
- Asignación de Costos sin actividad hidrocarburífera (sin producción de crudo). Asignación de carga fabril y costos directos de la estructura de producción de hidrocarburos que se afectaría a litio.
- Análisis probabilístico de viabilidad económica. Escenarios. Análisis de sensibilidad.

Eje 6 - Otras Alternativas

1. Propuestas de alternativas de uso de la Planta piloto y su tecnología.

El alcance del presente informe comprende la evaluación integral de los resultados obtenidos y la determinación de la factibilidad técnica y económica del proceso, constituyendo la etapa de cierre. Se presenta la información documentada, las estimaciones, análisis y fundamentos sobre el proceso productivo, conclusiones técnicas, económicas y financieras, además de los informes técnicos de los profesionales consultores con el fin de proporcionar la información completa a evaluar para la toma de decisiones.

VII. Descripción del Proceso de obtención de carbonato de litio en planta

El proceso operativo implementado en la planta piloto se desarrolla en etapas secuenciales que permiten la recuperación de litio a partir de la salmuera de formación asociada a la actividad hidrocarburífera de Palmar Largo. A continuación, se describen los pasos principales del circuito:

- *Paso 1, reposo y acondicionamiento inicial de la salmuera:* La salmuera de formación se recepciona y almacena en el Tanque TK21 (1.000 m³), donde se somete a un período de reposo destinado a favorecer la separación por diferencia de densidad de los hidrocarburos remanentes en la salmuera y la sedimentación natural de sólidos gruesos.
- *Paso 2, triple filtración:* Posteriormente, el fluido atraviesa un sistema de triple filtración, compuesto por dos filtros de carbón activado y un filtro de vellón, destinado a la remoción de partículas finas y compuestos orgánicos. La salmuera filtrada ingresa luego al **Tanque TK001**, donde se calienta hasta aproximadamente **60 °C**, condición requerida para optimizar la etapa de adsorción.
- *Paso 3, adsorción en resinas selectivas:* La salmuera acondicionada se bombea hacia el circuito de columnas de adsorción, cargadas con resinas selectivas para litio. Previo a su ingreso, pasa por un filtro de manga con vellón, que tiene como fin retener partículas, óxido y/o contaminantes que no hayan sido retenidos en los pasos previos. La duración de los ciclos operativos ha variado a lo largo del proyecto en función del análisis de los resultados obtenidos en los mismos (seguimiento de los procesos con mediciones en laboratorio); sin embargo, los ciclos predominantes fueron de 6 horas de adsorción (dada su eficiencia operativa), tomando los datos de éstos como base de cálculo para el análisis económico del presente proyecto. En esta etapa, la resina retiene selectivamente los iones Li⁺, mientras que el resto de la salmuera —ya agotada en litio— es destinada como residuo, y se reinyecta a pozos sumideros, (disposición actual de la salmuera de formación de la actividad hidrocarburífera).
- *Paso 3, elución del litio adsorbido:* Finalizado el ciclo de adsorción, se procede a la **elución**, etapa en la cual el litio capturado por la resina es liberado mediante el pasaje de una solución denominada “agua litiada”, preparada en el tanque 002 a partir de:
 - ✓ Agua desmineralizada (Demi).

- ✓ Cloruro de litio (para alcanzar 50 ppm de Li): HCl y Li_2CO_3 de grado industrial.

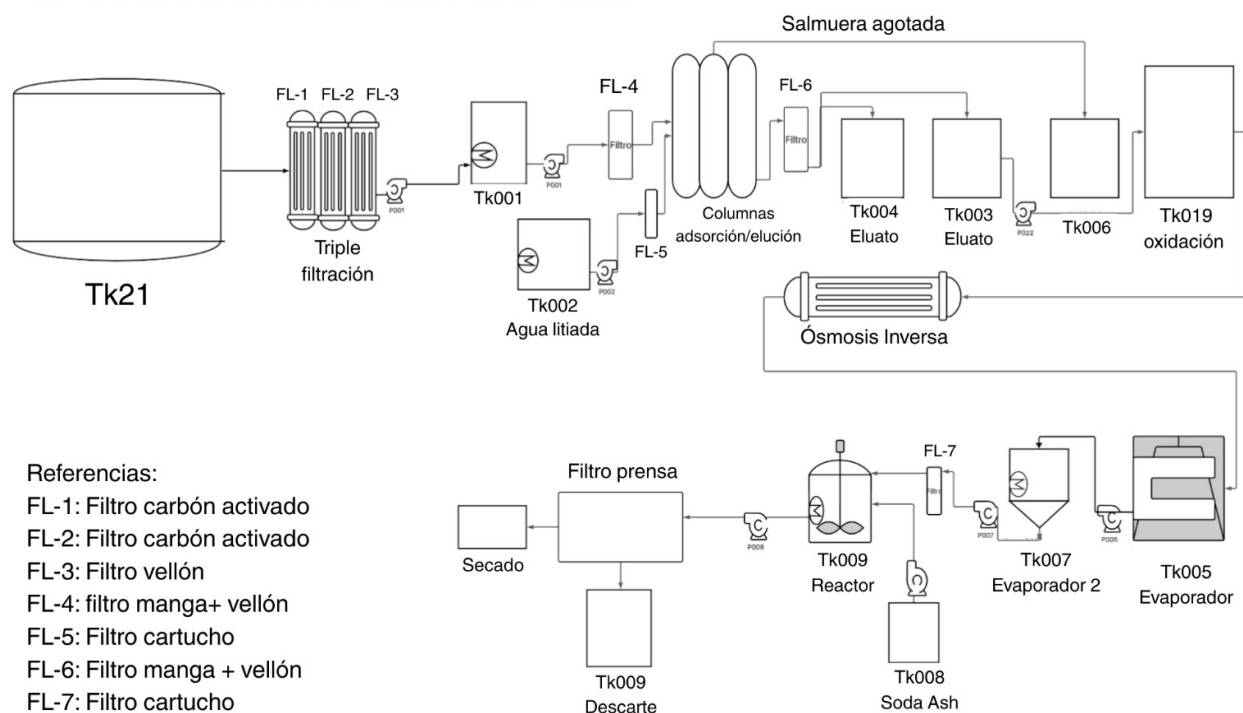
La elución se realiza también a 60 °C, logrando un eluato con una concentración típica de 200 a 300 ppm de Li, un incremento significativo respecto de la salmuera original (50–60 ppm Li).

- *Paso 4, oxigenación y concentración por ósmosis inversa:* Previo a ingresar al sistema de concentración, el eluato es sometido a un proceso de **oxigenación**, destinado a mejorar condiciones fisicoquímicas del fluido antes de su tratamiento. Luego, el eluato ingresa a la **ósmosis inversa (OI)**, donde se obtiene un concentrado que alcanza valores del orden de **900 a 1.500 ppm de Li**, reduciendo al mismo tiempo el volumen total del fluido. En esta etapa también se produce la concentración de otras especies presentes (Ca, Mg, B, Na, entre otros), que acompañan al litio a lo largo del proceso, debido a que el diseño actual de la planta no contempla procesos específicos de purificación.
- *Paso 5, evaporación del concentrado:* El concentrado proveniente de la ósmosis es derivado a los **tanques evaporadores TK005, y TK007**, donde se somete a evaporación controlada. El objetivo es alcanzar una concentración final del orden de **5.500-6.500 ppm de Li**, adecuada para la reacción de carbonatación.
- *Paso 6, Reacción de carbonatación y filtración:* Una vez alcanzada la concentración requerida, se inicia la etapa de **carbonatación**, que consiste en la adición de **carbonato de sodio (Na_2CO_3)** bajo agitación y temperatura, favoreciendo la precipitación del **carbonato de litio (Li_2CO_3)**.
- *Paso 7, Filtración- prensado:* La suspensión resultante es enviada al **filtro prensa**, donde se separa el sólido precipitado del líquido remanente (TK010 – descarte).
- *Paso 8, secado del carbonato de litio:* Finalmente, el sólido filtrado se somete a secado (actualmente en condiciones no controladas dado que no existe una operación diseñada para tal fin), obteniendo el **carbonato de litio sólido**, producto final del proceso piloto.

Cabe destacar, que existen filtros estratégicos: filtros de vellón para tratamiento del ADF previo a las columnas, y a la salida de estas (para el eluato), y filtros cartuchos para el agua litiada, y para filtrar el concentrado previo a la carbonatación. Estos se instalaron con el fin de remover partículas contaminantes, y óxido que pueda alterar la composición del producto final además de generar daños en los equipos.

Los detalles operativos de cada instancia del proceso son abordados con mayor énfasis en el desarrollo del plan de tareas y se incluyen datos diarios en el anexo 10. Un diagrama simplificado de las operaciones unitarias instaladas en la planta piloto se puede observar en la figura 2.

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBONATO DE LITIO A ESCALA PILOTO



VIII. Plan de tareas

A continuación, en la tabla 1, se detallan las tareas conforme al cronograma y la planificación establecida en los TDR.

Tabla 1.
Cronograma Extraído del TDR

Ejes	Tarea/Mes	1	2	3	4
1. Eje 1 - Puesta a punto de instalaciones	1.1. Puesta a punto de equipos e instalaciones industriales, conexiones hidráulicas, prueba de bombas y motores.				
2. Eje 2 - Acondicionado de la Salmuera	2.1 Ajuste en los sistemas de filtros instalados en planta por el equipo consultor y evaluación de nuevas incorporaciones al sistema.				
	2.2 Ensayos de reposo, filtrado y muestreo de salmuera.				
	2.3 Análisis de resultados y evaluación de parámetros operativos.				
	2.4 Ingeniería Conceptual Extendida de Nanoburbujas.				
3. Eje 3 - Procesos de Planta	3.1 Ensayo a escala laboratorio de adsorción/desorción y estabilidad de resinas.				
	3.2 Preparación de Salmuera Artificial para prueba de ósmosis inversa y resto de procesos.				
	3.3 Ensayos de proceso con salmuera real. Incluye el acondicionado de salmuera, la adsorción y elución en columnas, oxidación, concentración y carbonatación.				
	3.4 Evaluación de medición de Li en distintas instancias de proceso.				
	3.5 Análisis técnico de factibilidad. Incluye la repetición de ciclos de producción empleando salmuera real.				
	3.6 Actividades de laboratorio y capacitación del personal operativo. Transversal a todas las actividades.				
Eje 4 - Reservas de Litio	4.1 Estimación de Reservas de Litio y su relación con la producción hidrocarburífera.				
Eje 5 - Costeo y viabilidad económica	5.1 Costeo del proceso de obtención de Li_2CO_3 (planta piloto).				
	5.2 Asignación de costos de la actividad hidrocarburífera (bombeo, manejo y acondicionado e inyección de agua) y la producción de la planta piloto de litio.				
	5.3 Asignación de Costos sin actividad hidrocarburífera (sin producción de crudo). Asignación de carga fabril y costos directos de la estructura de producción de hidrocarburos que se afectaría a litio.				
	5.4 Análisis probabilístico de viabilidad económica. Escenarios. Análisis de sensibilidad.				
Eje 6 - Otras alternativas	6.1 Propuestas de alternativas de uso de la planta piloto y su tecnología, si se declara no factible				

IP IF

Durante el mes de diciembre, se recibieron los resultados de análisis de laboratorio, del trabajo realizado durante el cuarto mes del plan de trabajo (noviembre), lo cual permitió concluir el presente informe.

IX. Descripción de las actividades realizadas

1. Eje 1 - Puesta a Punto de Instalaciones

Puesta a punto de equipos e instalaciones industriales, conexiones hidráulicas, prueba de bombas y motores. Para ver detalles completos consultar Anexo 10 Operativos de planta piloto.

1.1. Restauración de filtros, cartuchos y cañería de alimentación:

Se restauraron las carcasas de filtros oxidadas, separándolas de la base y trasladándose al taller de soldadura. Se aplicó fosfatizante, se removió el óxido con amoladora, se limpió y secó el interior; se aplicó antióxido rojo y pintura epoxi blanca. Los bulones de los filtros, con alta presencia de óxido, fueron cepillados y lijados con amoladoras de banco. En los cartuchos de los filtros se realizó una modificación para optimizar el filtrado: se extendió la chapa ciega interior dejando 4 cm de espacio libre en el tope de la base, se agregó una malla porosa en el extremo superficial de dos cartuchos y un sello de goma entre el cartucho y la carcasa para impedir el paso de agua por los costados.

Se detectó y reparó una pinchadura en la cañería que transporta agua de formación hacia los filtros, antes de su ingreso al sistema de filtrado, y se construyó un nuevo sistema de desagüe con su respectiva cámara de efluentes para evitar filtraciones futuras.

1.2. Pintura y limpieza de instalaciones.

Se aplicó pintura y antióxido a los caños oxidados de la planta y se restauró el tanque de agua litiada. Se cepilló y lijó el interior de tanques oxidados (calentadores con serpentina) y se realizó limpieza individual de cada tanque.

Se limpió química de cañerías utilizando fosfatizante al 30% con agua dulce de los tanques exteriores (agua de El Potrillo), recirculando el agua a través de cañerías y tanques. Se observó arrastre de arcilla y escaso óxido.

Se establecieron procedimientos de limpieza continua diaria para las cañerías exteriores, con el objetivo de evitar la acumulación de óxido y partículas.

1.3. Instalaciones eléctricas y de seguridad:

Se revisaron las instalaciones eléctricas de la planta piloto y se identificó la necesidad de agregar una llave diferencial y un botón de encendido en el exterior del tablero de la zona de caldera.

Se mejoró el sistema de purgas de vapor, utilizando niples, acoples y cambio de válvulas, mejorando la seguridad para el equipo operario y previniendo el deterioro de los equipos.

1.4. Prueba de caldera y sistema de vapor

Se puso en marcha la caldera utilizando agua desmineralizada de la ósmosis. Durante el funcionamiento se identificaron fugas de vapor y problemas de presión, los cuales fueron reparados. Se reemplazaron repuestos de fusibles, regulador de llama y presostatos para garantizar el correcto funcionamiento.

Se realizó la limpieza del filtro de combustible que alimenta al quemador del equipo.

Se implementó un protocolo diario de recirculación y purgado de las líneas de vapor con el fin de evitar el arrastre de óxido hacia los tanques que poseen calentamiento con vapor directo.

Se colocaron dos tanques con bomba dosificadora y productos químicos para el agua de alimentación de la caldera, siguiendo las recomendaciones del proveedor (BHY S.A.). Los productos se agregan periódicamente y se estableció un procedimiento de monitoreo y control de parámetros del agua. Esto permite evitar la formación de incrustaciones, mejorando y asegurando el funcionamiento del equipo a corto y largo plazo.

Se implementaron procedimientos periódicos de purga de caldera y análisis semanales del agua del sistema (agua de alimentación cruda y pretratada, condensado, purgas de fondo y superficie y agua dulce que alimenta a la planta), midiendo parámetros como pH, conductividad y dureza.

Se incorporaron como parámetros de control ensayos de alcalinidad, fosfatos y sulfatos, hierro y sílice.

1.5. Instalación de filtros

Se instalaron filtros estratégicos: Dos filtros bolsas (con lecho filtrante de vellón) previo ingreso del agua de formación a las columnas para el *proceso de adsorción selectiva* y posterior a éstas para el *proceso de elución*; y un filtro cartucho a la salida del tanque de agua litiada. Éstos se renuevan entre ciclos según se requiera.

Filtro multimedia: Se instaló un filtro multimedia a la ósmosis de doble paso de agua dulce, mejorando la calidad del agua de ingreso y prolongando la vida útil de las membranas. Para garantizar lo anterior, se implementaron retro-lavados y enjuagues semanales de este filtro, para mejorar su utilidad y preservar su función.

Filtro cartucho: Se instaló un filtro cartucho a la salida del tanque concentrador (tanque 7), previo paso a la carbonatación, para retener restos de partículas sólidas y sal principalmente.

1.6. Instalación de sistema de aire comprimido:

Durante las últimas semanas de trabajo se instaló un sistema de aire comprimido con el fin de no requerir el uso del compresor de manera constante. Se utilizó para pasar aire por las columnas previo al proceso de elución (para expulsar los restos de adf y barrido salino). El mismo deberá ser mejorado dado que por su poca capacidad pierde presión rápidamente.

Resultados Clave

- ✓ Se restauraron exitosamente las carcasas y cartuchos de los filtros, eliminando óxido, aplicando pintura y mejoras estructurales que optimizan el flujo y la retención de partículas.
- ✓ Se reparó la pinchadura en la cañería de alimentación de agua de formación y se construyó un sistema de desagote para prevenir futuras filtraciones.
- ✓ Se completó la pintura y limpieza de cañerías, tanques y calentadores, implementando procedimientos de limpieza continua para mantener la integridad de las instalaciones.
- ✓ Se revisaron y mejoraron las instalaciones eléctricas, agregando elementos de seguridad (llave diferencial y botón de encendido externo), garantizando un funcionamiento seguro del tablero de caldera.
- ✓ Se implementó un sistema de dosificación de productos químicos para caldera, con procedimiento de control y seguimiento periódico, asegurando la operación eficiente y segura del sistema de vapor.
- ✓ La caldera y el sistema de vapor fueron puestos en marcha y ajustados: se repararon fugas, reemplazaron repuestos y se establecieron procedimientos de purga y monitoreo de parámetros de agua (pH, conductividad, dureza, alcalinidad, fosfatos, sulfatos sílice y hierro), sentando las bases para el control de calidad del sistema.

- ✓ Se instalaron filtros estratégicos en la planta piloto y un filtro multimedia en la ósmosis, mejorando la calidad del agua de proceso y prolongando la vida útil de membranas y equipos.
- ✓ Se instaló un sistema de aire comprimido para facilitar los trabajos de las operaciones.

2. Eje 2. Acondicionado de Salmuera

2.1. Ajuste en los sistemas de filtros instalados en planta:

Se efectuaron mejoras estructurales en el sistema de filtrado (como se mencionó en el EJE 1); a su vez, se cargaron los filtros con distintos lechos filtrantes según su función: dos con carbón activado y uno con vellón. El carbón activado fue lavado previamente con agua dulce con el fin de eliminar el polvo fino de carbón, estabilizar el lecho filtrante y evitar que partículas o impurezas pasen al sistema, y se estableció la necesidad de implementar protocolos de retrolavado posteriores al menos una vez al mes (como factor negativo tomar en cuenta que se pierde material filtrante durante la realización de este proceso). En el caso del filtro de vellón, se dispuso su reemplazo periódico en función del grado de contaminación (identificado por el cambio de coloración). Estas acciones permiten mantener la eficiencia en la remoción de hidrocarburos y material particulado de la salmuera.

2.2. Ensayos de reposo, filtrado y muestreo de salmuera:

Durante el 2024 se realizaron pruebas utilizando el tanque 21 (1000 m³), cargado hasta 780 m³, aproximadamente, los días viernes y dejado en reposo durante el fin de semana. El reposo permite la decantación natural de hidrocarburos por diferencia de densidad, reduciendo su concentración antes del filtrado.

Durante los ensayos se tomaron muestras en distintos puntos críticos del proceso:

1. Salida del tanque 21, posterior al reposo.
2. Salida del sistema de filtrado (último filtro con vellón).

3. Tanque 01, posterior al calentamiento a 60 °C.

Las muestras fueron enviadas al laboratorio externo Alex Stewart para análisis fisicoquímicos e hidrocarburos totales de petróleo, ver Anexo 8.

Se llevaron a cabo ensayos visuales y organolépticos de manera periódica (observación de color, turbidez, olor, presencia de precipitados o sólidos en suspensión, etc.), complementados con registros fotográficos, que permiten tomar decisiones sobre la calidad de la salmuera a tratar y el punto de toma del mismo. Se planificaron nuevas campañas de muestreo para consolidar la base de datos analítica y evaluar la eficiencia del sistema de filtrado bajo diferentes condiciones de operación.

Se repitió el ensayo de Hidrocarburos totales del petróleo (TPH), ver Anexo 8. Tomando los siguientes puntos de proceso:

1. Salida del tanque 21, posterior al reposo (toma del punto medio).
2. Salida del sistema de filtrado (último filtro con vellón)
3. Salida del tanque 01 (post calentamiento a 60°).
4. Eluato de proceso.
5. Salida de la RO (ósmosis inversa), concentradora de litio.

El nuevo ensayo, permitió comparar los resultados con el primer muestreo (primeros 3 puntos de toma de muestra coincidentes) y a su vez, se agregaron nuevos puntos en relación con el resto de las operaciones en planta.

Se realizó un último muestreo, a través del proveedor BHY S.A, para realizar una comparativa de los TPH en los distintos puntos analizados previamente (en laboratorio distinto), véase Anexo 9. A su vez se incorporó el parámetro de análisis BTEX - Benceno - Tolueno - Etilbenceno y Xilenos, para determinar la concentración de compuestos orgánicos volátiles.

Se tomaron muestras en los siguientes puntos:

1. Salida del tanque 21, posterior al reposo (toma del punto medio).
2. Salida del sistema de filtrado (último filtro con vellón)

3. Salida del tanque 01 (post calentamiento a 60°).
4. Salida del filtro manga (previo ingreso a las columnas de adsorción selectiva).
5. Eluato de proceso (corte 2 “Q2”).
6. Salida de la RO (ósmosis inversa), concentradora de litio.

Se incorporó el punto (salida del filtro manga) para determinar si existe alguna modificación en la concentración de hidrocarburos gracias al material filtrante del vellón y la manga.

Se detalla que el punto 5, eluato de proceso, corresponde al Corte 2; ya que es el que ingresa a la ósmosis inversa para concentración. Se expone el análisis de los resultados mencionados en el punto IX *Riesgos y supuestos*. del presente informe

2.3. Ingeniería Conceptual Extendida de Nanoburbujas

Durante el año 2024, fuera del presente marco de asistencia, se realizaron en Y-TEC ensayos experimentales utilizando salmuera de formación de Palmar Largo, orientados a evaluar la remoción de hidrocarburos disueltos mediante un sistema de oxigenación por nanoburbujas. Los resultados demostraron la eficacia del método en la mejora del potencial redox y en la oxidación de compuestos orgánicos residuales, constituyendo un antecedente técnico relevante para el desarrollo actual.

Con base en estos antecedentes, el **12 de agosto de 2025** se llevó a cabo una reunión técnica entre el equipo de Y-TEC y el equipo del proyecto, en la cual se acordó que, mientras se recopilaban datos operativos actualizados, se utilizarían los caudales de diseño definidos en la etapa de prefactibilidad. En dicha instancia se recomendó además que la inyección de nanoburbujas se realizara posterior al reposo en el tanque 21 y luego del filtrado, a fin de evitar la generación de emulsiones que pudieran comprometer la eficiencia del sistema.

Posteriormente, durante la **semana del 9 de septiembre de 2025**, un representante de Y-TEC efectuó un relevamiento preliminar en la planta piloto para identificar los espacios disponibles y las

condiciones operativas necesarias para la integración del Sistema de Tratamiento por Nanoburbujas (STNB).

A partir de estos intercambios técnicos y de los nuevos datos obtenidos en planta, se avanzó en la elaboración de la **ingeniería conceptual del STNB (véase Anexo 4)**, adaptada a las condiciones reales del proceso piloto. Esta memoria define las bases de diseño para su futura implementación, considerando un reservorio de tratamiento de 15 m³ y priorizando el aprovechamiento de la infraestructura edilicia existente para minimizar intervenciones estructurales.

El dimensionamiento y la selección tecnológica fueron desarrollados específicamente para la composición y características de la salmuera local, tomando como referencia los resultados de prefactibilidad de 2024. Para este caso, se destaca que se tomaron las peores características de la salmuera, (mayor concentración de hidrocarburos). Estos parámetros pueden ser ajustados, en base a las condiciones del líquido a tratar al momento de operar en un futuro el STNB. Se establecieron parámetros de operación orientados a alcanzar niveles de oxígeno disuelto superiores al 250% y potenciales redox cercanos a 300 mV, valores que maximizan la oxidación y remoción de hidrocarburos en salmueras de formación.

Se estableció el criterio técnico de aplicar nanoburbujas luego del reposo y filtrado, para evitar emulsiones que comprometan el rendimiento de los equipos, con los siguientes criterios de operación:

- Caudal máximo operativo 15m³/día
- Disminución de contenido de HTP por debajo de 0,5 ppm
- Tiempo de tratamiento promedio entre 10 y 12 horas

Tabla 2

Diferentes escenarios de concentraciones y tiempos de tratamiento para un mismo STNB

CAPACIDAD OPERATIVA MÁXIMA	COMPUESTO/PARAMETRO	RANGO DE CONCENTRACIÓN [ppm]		TIEMPO DE TRATAMIENTO A "NO DETECTABLE" [HORAS]	CAPACIDAD DEL NANOGENERADOR
15 m3/día	HTP	MINIMO	1 a 3	2 a 3	40,9 a 62,5 m3/h
		INTERMEDIO	7 a 15	6 a 7	
		MÁXIMO	20 a 50	10 a 15	
	BENCENO	MINIMO	0,02 a 0,3	10	
		INTERMEDIO	0,5 a 1	12	
		MÁXIMO	>1,5	15	
	TOLUENO	MINIMO	0,01 a 0,05	5	
		INTERMEDIO	0,05 a 0,3	10	
		MÁXIMO	>0,4	15	
	XILENOS	MINIMO	0,02 a 0,05	2	
		INTERMEDIO	0,05 a 0,08	5	
		MÁXIMO	>0,4	7	

La Tabla 2 muestra diferentes escenarios de tiempos de tratamiento para concentraciones de mínima, intermedia y máxima, respecto a hidrocarburos totales de petróleo (HTP), benceno, tolueno, xilenos totales (en el caso de la salmuera de REFSA, durante la instancia de diseño del proceso no se detectó presencia de etilbenceno). En el caso de BTX los tiempos corresponden hasta valores de concentraciones por debajo del límite de detección <0,01 ppm y para HTP hasta valores < 0,5 ppm. Los detalles de diseño y calidad de agua a tratar se expresan en el Anexo 4.

2.4. Resultados Clave

- ✓ Se optimizó el sistema de filtrado con la instalación y acondicionamiento de lechos filtrantes de carbón activado y vellón, estableciendo protocolos de mantenimiento y reemplazo.
- ✓ Los ensayos de reposo y filtrado demostraron una reducción efectiva de hidrocarburos en la salmuera, gracias a la decantación natural en el tanque 21 y al posterior tratamiento en filtros. Para todos los casos, se obtuvo un valor de medición menor a 0.5 ppm de TPH (límite mínimo de detección por la técnica EIR – infrarrojo). Con respecto a la concentración de Litio, para todos los casos se mantuvo por encima de las 60 ppm (detección por ICP).
- ✓ Se obtuvieron muestras representativas en distintos puntos del proceso, que permitirán validar la eficiencia del sistema.

- ✓ Se culminó la ingeniería conceptual de nanoburbujas, incluyendo relevamiento en planta piloto.

3. Procesos de Planta: Adsorción Selectiva, Oxidación, Concentración, y Carbonatación

3.1. Ensayo a escala laboratorio de adsorción/desorción y estabilidad de resinas.

La tarea fue asignada a Lucas Mardones, quien junto a su equipo realizó dos tipos de ensayos (batch y continuo) utilizando una muestra de resina virgen, salmuera real y artificial.

- **Ensayo en batch**, a temperatura ambiente colocando la resina con salmuera real, con agitación y recambios de salmuera cada 2hs (para exponerlo a condiciones exigentes respecto a la exposición de hidrocarburos). El recambio constante dificulta el calentamiento dado que se debe filtrar el sólido para colocar la nueva salmuera, por lo que no se puede ensayar el efecto con la condición real del proceso (60°C).
- **Ensayo en continuo en columna rellena**, a la temperatura del proceso (60°C), con activación de la resina y con pasaje de corriente para la desorción. Es el que más se asemeja a las condiciones de operación de la planta piloto, pudiéndose evaluar la capacidad de retención de litio y la corriente de elución del proceso.

Para efectuar los ensayos mencionados a priori; se tomaron 25 litros de agua de formación en Palmar Largo, la misma fue filtrada previamente por tres filtros (incluido vellón) y enviada refrigerada hasta Buenos Aires. También se remitió resina de adsorción selectiva virgen (sin uso previo en planta piloto).

Una vez recibidas las muestras, se caracterizó la salmuera para determinar cationes, aniones, hidrocarburos totales de petróleo (TPH) e hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos “BTEX”).

Resultados de las experiencias: Los ensayos en columna rellena y flujo continuo de salmuera a 60°C, muestran:

- Eficiencia de retención de litio del 90% para el primer paso. Existe un muy pequeño descenso de la retención (posiblemente por estar el lecho más cerca a la saturación) al llegar al último paso.
- Eluciones: se destaca el aumento de la concentración del litio y una gran disminución de los otros cationes.
- Hidrocarburos: los valores de HTP se mantienen por debajo de 0,5 ppm en todos los casos y para el tolueno desciende de 0,04 ppm (valor original) a menos de 0,01 ppm, posiblemente por la volatilización del tolueno y su retención sobre la resina. En el benceno pasa de un valor inicial 0,47 ppm a 0,02 ppm en el primer paso (más del 95% de disminución), que se mantiene casi constante en las otras etapas, (solo hay un muy pequeño aumento). En las eluciones hay bajas cantidades de benceno, indicando que se mantiene (total o parcialmente) en la columna, posiblemente retenido en la resina.

Se concluye que, tomando en cuenta las condiciones evaluadas la resina no presentaría una afectación significativa a corto plazo. Se podría suponer que es altamente probable que ésta retenga parte del benceno (considerando la baja concentración de la molécula en las corrientes de eluato). Considerando esto último, la resina puede terminar contaminada o dañada en largos períodos de operación en detrimento de la productividad o de la calidad del eluido y/o del producto final.

3.2. 3.2 Preparación de Salmuera Artificial para prueba de ósmosis inversa y resto de procesos.

Se prepararon 120 litros de salmuera artificial concentrada (20.000 ppm Li) utilizando carbonato de litio (25 kg + $\frac{3}{4}$ de bolsa), ácido clorhídrico y cloruro de sodio. Esta solución fue destinada a ensayos de ósmosis inversa en concentrado, realizados la semana del 25 de agosto.

Previo al ensayo se limpió la membrana de ósmosis con agua desmineralizada. Luego se adicionó el concentrado preparado, al tanque oxigenador (alimentación de ósmosis) mezclando el mismo con agua demi y ajustando parámetros de operación a **700 ppm Li y 19.700 μ S** de conductividad. El sistema logró concentrar la salmuera hasta **2.200 ppm Li** y la conductividad alcanzó valores aproximados de (40.000–50.000 μ S), a confirmar con resultados de laboratorio de BHY S.A (el proveedor del equipo tomó muestras para análisis y se aguardan los resultados).

El líquido concentrado, resultante de la ósmosis, continuó evaporándose en tanque evaporador hasta incrementar su concentración a 10.000 ppm. de Li, momento a partir del cual se encuentra apta la solución para la reacción de carbonatación, con carbonato de sodio. A escala piloto, se logró realizar la **carbonatación de concentrado de ósmosis a partir de salmuera artificial**, obteniendo carbonato de litio sólido.

3.3. Ensayos de proceso con salmuera real.

3.3.1. Ensayos en laboratorio:

Se realizaron ensayos de adsorción, elución y carbonatación empleando tanto salmuera artificial como real, utilizando una columna con una muestra de la misma resina empleada a escala piloto.

Adsorción: se trabajó con soluciones de 900–1.000 ppm Li (artificiales) para adsorción y 50–70 ppm Li para elución, registrando descensos de conductividad que confirman la ocurrencia del proceso. También se realizaron adsorciones y eluciones en laboratorio, utilizando salmuera real del proceso; y agua litiada (preparación a 50 ppm de Li aproximado para elución). La actividad requiere de calentar el líquido a 60° previo paso por buretas (se simulan las condiciones de operación de la planta).

Elución: se obtuvieron corrientes eluidas con concentraciones variables, generalmente entre **200 y 400 ppm Li**, con algunos picos mayores.

Carbonatación: se concentró el eluato obtenido del proceso mencionado recientemente calentando la solución en laboratorio (evaporando) y luego se realizó la reacción de carbonatación empleando una solución de carbonato de sodio (Soda Ash) ambas a 85°C con agitación constante; precipitando carbonato de litio sólido, validando la factibilidad de la etapa final a escala de laboratorio. Para obtener dicho producto, se realizó la filtración en caliente y se completó el proceso secando en estufa.

3.3.2. Operaciones en planta piloto:

3.3.2.1. Proceso de Adsorción con Elución sin cortes.

Para una primera instancia se pusieron en funcionamiento progresivamente una a una las **columnas de adsorción selectiva (3 de 4 en operación)**. Se realizaron corridas completas de adsorción (12 horas por ciclo) y elución (2 horas por ciclo), **sin separación en cortes** del eluato (se acumularon las corridas totales). Normalmente, en procesos de DLE, la elución se separa en fracciones (Q1, Q2, Q3) de acuerdo con su caracterización (concentración de litio, sodio y conductividad principalmente) con el fin de optimizar el proceso, separando aquella corriente con alta concentración de litio y bajo sodio, para su siguiente procesamiento.

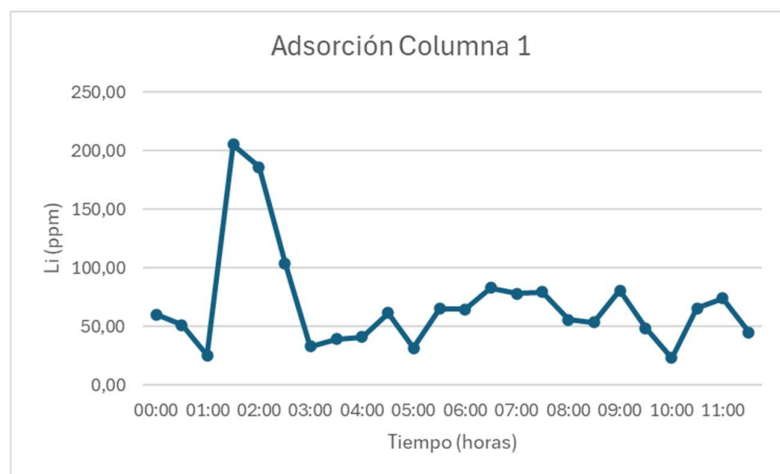


Figura 3
Curva de Adsorción Columna N°1

En una curva ideal de adsorción, se observaría que las mediciones de de litio son inicialmente bajas y menores a 50 ppm (es decir, por debajo de la concentración inicial en este caso) y van aumentando en la medida en la que la columna va adsorbiendo y se va saturando de litio. Una vez que se “satura”, la columna al no poder continuar adsorbiendo, se observaría que la concentración de salida es igual a la concentración inicial (50ppm promedio). Este comportamiento, no puede observarse en el gráfico correspondiente a la adsorción realizado sobre la primera columna Figura 3, y se estima que ocurre por las altas desviaciones que presenta el equipo de medición turboespec e-400a bajas concentraciones. Si bien los resultados obtenidos presentan desviaciones respecto a lo ideal, este proceso es verificado al realizar el proceso de elución (o desorción) en las condiciones determinadas por los profesionales expertos (caudales específicos y temperatura) y mediciones finales del eluato obtenido. En la curva de elución, de la columna uno Figura 4. se observa que la concentración de litio es inicialmente baja (se debe a que pudo quedar algo de líquido de la adsorción), hacia el tercer punto aumenta y luego desciende progresivamente. En esta instancia el agua litiada comienza a favorecer la interacción dentro de la columna permitiendo la desorción del litio y el consiguiente arrastre en las corrientes de eluato. Si bien, se observan desviaciones entre las

mediciones consecutivas, esta curva muestra un comportamiento similar al ideal. A continuación, en las Tabla 3 se encuentra caracterizado el eluato final (acumulado) obtenido de la experiencia.

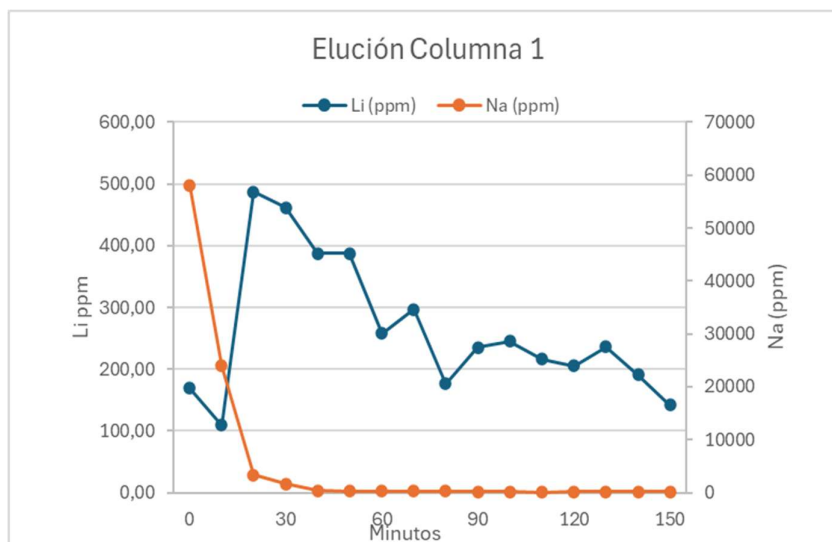


Figura 4
Curva de Elución Columna N°1

Tabla 3
Caracterización de Eluato (almacenado en tanque 03) con turboespec e-400 para Li y Na y Conductímetro Adwa

ELUATO FINAL	
Li (ppm)	228,84
Conductividad (mS/cm)	3,75
Na (ppm)	313,23
TDS (ppm)	1990

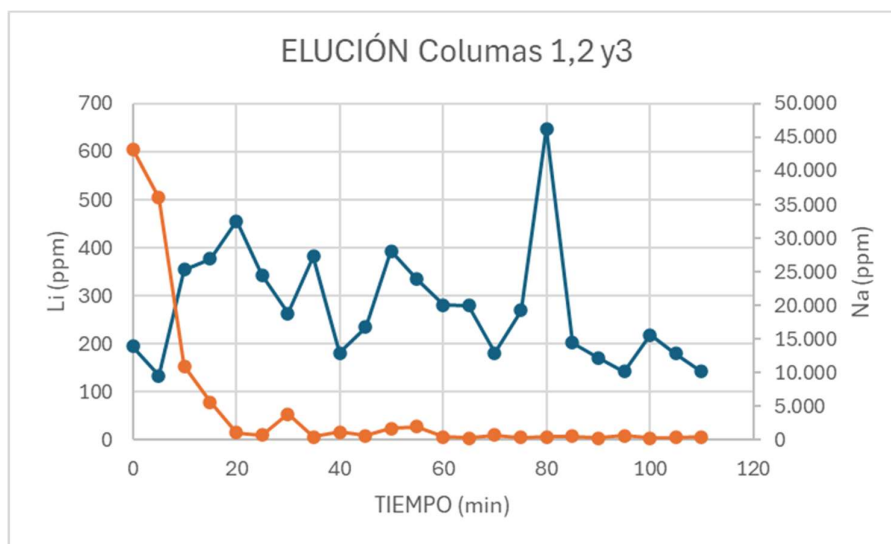


Figura 5
Curva de Elución Columnas 1, 2 y 3

Tabla 4
Caracterización con Turboespec e-400 de eluato obtenido

ELUATO					
Li (ppm)	Li med(ppm)	CV Li	Na (ppm)	Na med(ppm)	CV Na
296,928	304,38	11%	2080,51	1895,57	19%
343,984			2037,43		
312,23			2109,28		
264,365			1355,05		

3.3.2.2. Proceso de Adsorción con implementación de elución con cortes.

Conforme se avanzó en la realización de procesos de adsorción/elución, estudiando las respectivas curvas se realizaron los primeros ciclos con cortes Q1 y Q2 Figura 6 y se caracterizaron estos eluatos por separado. Esta primera separación diferencia aquel volumen con alta cantidad de sodio que no puede ser procesado por la ósmosis a diferencia del segundo corte. Esta limitación radica en evitar que las membranas de la ósmosis inversa se saturen o dañen y favorecer la selectividad del ion Litio, por lo que se limita a procesar eluatos que no superen una conductividad máxima de 20

mS/cm de acuerdo a indicaciones del proveedor. Una alta concentración de sodio en la corriente a procesar por ósmosis inversa provoca una deficiencia en la concentración de litio en esta operación. Un ejemplo de los resultados de esta operación se observa en las Tablas 6 y 7 donde se parte de un eluato de concentración promedio 291,5 ppm de Li y se obtiene una concentración de 1080,8 ppm de Li (promedio de dos mediciones puntuales, no corresponde a acumulado total). Por otra parte, el Q1 cuyas características se expresan en la Tabla 5 con el fin de no desperdiciar el litio retenido, se envía directamente al evaporador hasta tanto se puedan evaluar otro tipo de mejoras como ser el re-procesamiento.

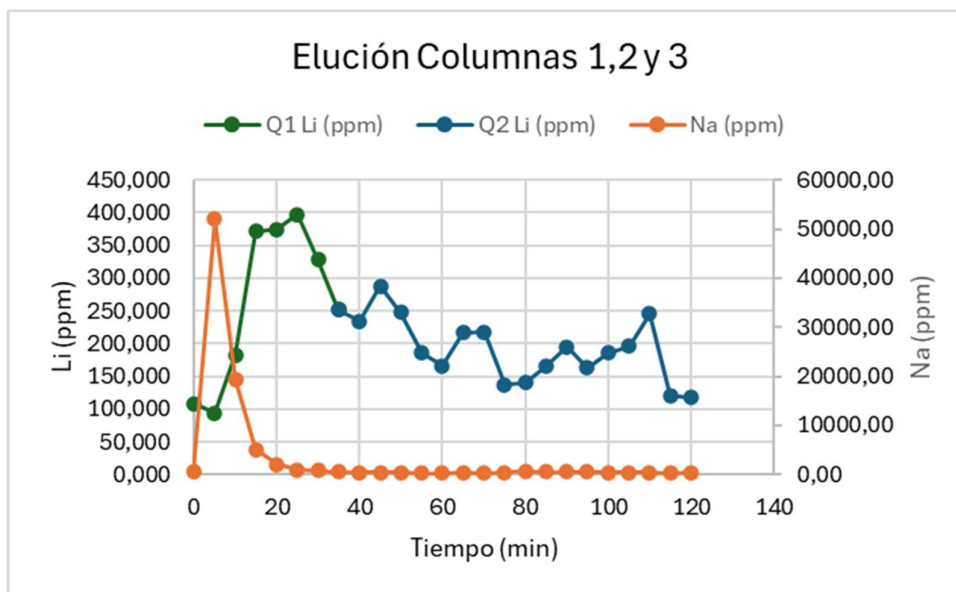


Figura 6

Curva de Elución Columnas 1 2 y 3 con separación por cortes para ciclos de adsorción de 12hs.

Tabla 5

Caracterización del primer corte de Eluato.

ELUATO Q1 TK006					
Li (ppm)	Li med(ppm)	CV Li	Na (ppm)	Na med(ppm)	CV Na
283,92	346,70	17%	16875	16862,633	6%
400,763			17939,3		
355,413			15773,6		

Tabla 6

Caracterización del segundo corte de Eluato.

ELUATO Q2 TK019					
Li (ppm)	Li med(ppm)	CV Li	Na (ppm)	Na med(ppm)	CV Na
291,361	291,484	2%	1391,39	1619,92	14%
286,329			1851,66		
296,762			1616,71		

Tabla 7

Mediciones del concentrado obtenido por ósmosis inversa.

OSMOSIS		
Li (med)	Li med(ppm)	CV Li
999,886	1080,798	11%
1161,71		
Volumen procesado: 1300 litros		
Volumen concentrado obtenido: 250 litros		

La mezcla del Q1 y Q2 (luego del procesamiento por ósmosis) se evapora el tiempo suficiente para alcanzar la concentración mínima necesaria para carbonatar de 6500 ppm de Li. En la Tabla 8 se observa el resultado de esta operación.

Tabla 8

Caracterización del concentrado post evaporación (segundo paso de concentración).

CONCENTRACIÓN POR EVAPORACIÓN TK007					
Li (ppm)	Li med(ppm)	CV Li	Na (ppm)	Na med(ppm)	CV Na
8980,89	8861,82	1,9%	42456	42466,67	0,03%
8668,2			42483,6		
8936,36			42460,4		

El proceso, en su secuencia completa, busca incrementar progresivamente la concentración de litio hasta alcanzar el orden de **5500-6500 ppm tras evaporador**, condición requerida para la carbonatación.

Reacción de carbonatación: En una primera instancia se carbonató un concentrado con salmuera artificial de concentración aproximada de 10800 ppm de Li (luego de la evaporación); se llevó al tanque 9 (reactor) y se inició su calentamiento con vapor directo hasta alcanzar una temperatura de 85°C. Al mismo tiempo, en el tanque 008 se preparó una solución de soda ash con 8kg de Na_2CO_3 y 100 litros de agua demi también 85°C con agitación constante. Ambas soluciones, alcanzadas las condiciones de temperatura (85-90°C) se mezclaron en el reactor con agitación constante. El producto resultante se apreció con una coloración lechosa, la cual al parar la agitación se desdobló en dos fases precipitando el carbonato de litio. Finalizada la reacción se pasó por el filtro prensa y una vez escurrido y oreado el producto se retiró de las placas del equipo el producto final.

3.4. Evaluación de medición de litio en distintas instancias del proceso.

Se estableció un esquema de muestreo y control en diferentes etapas: salida de tanque 21, columnas de adsorción, elución, concentrado. Con especial énfasis en los procesos internos de planta (adsorción/elución, concentración en distintos pasos). Las mediciones se realizan con el equipo **Turboespec e-400**, que presenta desviaciones, por lo que se aplican calibraciones con patrones y se complementa con determinaciones de **pH, conductividad y TDS**. Este control es clave para elaborar balances de masa y cuantificar recuperaciones.

3.4.1. Análisis de funcionamiento del equipo de medición de Litio, Turboespec e-400.

Se mantuvieron reuniones con el proveedor, para analizar el funcionamiento del equipo, se realizaron pruebas de mediciones bajo diferentes criterios, las cuales se adjuntan en Anexo 10, las pruebas se realizaron calibrando el equipo con distintas soluciones patrón para conocer el nivel óptimo de funcionamiento.

Asimismo, se determinó la concentración de litio y sodio con el equipo de planta de las muestras enviadas al laboratorio Alex Stewart para poder realizar una comparación de estas. En la primera, ver tabla 9, se muestran los resultados promedio de 3 mediciones con el turbospec y el coeficiente de variación de estas mediciones consecutivas. Se observa en este caso, en la determinación de sodio menos variación entre mediciones, es decir mayor precisión. A su vez, tanto para sodio como para litio muestran mayor desviación a concentraciones bajas.

En la segunda, Tabla 10 se comparan los resultados de las determinaciones de planta con las del laboratorio externo, se concluye que a concentraciones bajas presenta mayor variación (menor exactitud); también el patrón de sodio presenta mayor desviación en general, y esto puede deberse a que solo se cuenta con un patrón de 1000 ppm para calibrar el equipo de planta. Para evidenciar este ejemplo tomando la muestra A7, resultan del equipo turbospec mediciones más precisas (reproducibilidad de mediciones) mientras que no se acercan al valor estimado por el laboratorio (poca exactitud si se lo considera como valor real). Cabe destacar que para las calibraciones de litio se cuenta con patrón de 1000 ppm de litio (utilizado para medición de muestras de concentraciones menores o iguales a 1000 ppm) y de 10000 ppm Li (empleado para medir concentrados mayores a 1000 ppm de litio). En líneas generales se puede concluir que el equipo turbospec e-400 a concentraciones bajas (especialmente menores a 100 ppm) presenta coeficientes de variación elevados.

Tabla 9

Mediciones con turbospec e-400 de muestras enviadas a laboratorio externo

Muestra	Punto de muestreo	Tipo de muestra	ppm Li medio	CV Li	ppm Na medio	CV Na
A1	TK001	ADF	98,06	22,9%	97932,2	0,2%
A2	TK006	Salmuera agotada (adsorción)	68,01	23,0%	67525,9	0,6%
A3	TK004	Q1 eluato	156,28	23,9%	22244,4	0,4%
A4	TK003	Q2 eluato	362,66	30,3%	3159,9	3,3%
A5	Tk blanco 200l	Q3 eluato	336,88	34,6%	1192,2	34,7%
A6	TK005	Concentrado RO	1121,19	5,6%	6394,1	2,9%
A7	TK007	Concentrado pre carbonatación	6426,42	2,3%	39256,6	0,4%
A8	TK010	Sobrenadante post carbonatación	949,53	2,5%	75260,0	0,7%
A9	TK017	Agua dulce del Potrillo	24,70	11,4%	165,7	23,9%
A10	TK017	Agua rechazo de agua demi	63,33	23,5%	800,3	14,0%
A11	TK016	Agua demi	18,60	26,7%	134,5	19,8%
A12	TK002	Agua litiada	58,55	29,8%	853,0	10,7%

Tabla 10

Comparativa de mediciones turboespec e-400 vs. análisis con ICP laboratorio Alex Stewart

Muestra	Punto de muestreo	Tipo de muestra	ppm Li medio (turbospec)	ALEX ST ppm Li	CV Li	ppm Na medio (turbospec)	ALEX ST ppm Na	CV Na
A1	TK001	ADF	98,06	61	33%	97932,2	89033	7%
A2	TK006	Salmuera agotada (adsorción)	68,01	12	99%	67525,9	89466	20%
A3	TK004	Q1 eluato	156,28	188	13%	22244,4	24851	8%
A4	TK003	Q2 eluato	362,66	186	46%	3159,9	887	79%
A5	Tk blanco 200l	Q3 eluato	336,88	240	24%	1192,2	1630	22%
A6	TK005	Concentrado RO	1121,19	1266	9%	6394,1	6706	3%
A7	TK007	Concentrado pre carbonatación	6426,42	6227	2%	39256,6	86517	53%
A8	TK010	Sobrenadante post carbonatación	949,53	1119	12%	75260,0	104125	23%
A9	TK017	Agua dulce del Potrillo	24,70	1	130%	165,7	76	52%
A10	TK017	Agua rechazo de agua demi	63,33	<1		800,3	450	40%
A11	TK016	Agua demi	18,60	<1		134,5	<2	
A12	TK002	Agua litiada	58,55	60	2%	853,0	594	25%

3.4.2. Actividades de laboratorio y capacitación del personal operativo.

Se desarrollaron actividades de laboratorio vinculadas a los ensayos de adsorción, elución, concentración y carbonatación. En paralelo, se capacitó al personal operativo en el manejo de columnas, caldera, ósmosis y equipos auxiliares. Se implementaron **turnos de trabajo (mañana y tarde, con guardias mínimas en fines de semana)** para asegurar continuidad de los procesos. Se documentaron protocolos y se registraron videos de operación. Los turnos de trabajo fueron modificándose en base a las alteraciones en los ciclos de producción, culminando las tareas con el

equipo de operarios divididos en dos turnos, más el equipo técnico asesor. Se adjunta en Anexo 10 *Operativos*, el organigrama de trabajo.

3.5. Análisis técnico de factibilidad. Incluye la repetición de ciclos de producción empleando salmuera real.

3.5.1. Monitoreo del sistema de filtrado:

Se realizaron muestreos diarios para evaluar el agua de formación a procesar. La primera determinación es cualitativa (apreciación de aspecto, color, turbidez y aroma) para seleccionar el punto de apertura del tanque 21; la siguiente determinación se realiza con el equipo de laboratorio turbospec y pHímetro midiendo concentración de sodio, litio y pH. También, previo a los diferentes procesos se realiza la inspección del material filtrante para realizar los cambios necesarios. Se lleva un registro del insumo añadido.

3.5.2. Ciclos de adsorción de 12hs:

Se realizaron ciclos sucesivos manteniendo las condiciones mencionadas en el punto (implementación de cortes de elución) con registro y análisis de los resultados.

Se realizó el muestreo de un ciclo de adsorción/elución para elaborar el perfil de columnas, resultados respaldados por el laboratorio Alex Stewart (Anexo 8), empleando un procedimiento de muestreo dispuesto por los consultores (Anexo 7) La precisión de estos datos dan soporte a las mediciones realizadas en planta.

Se realizó un lote de carbonatación a partir de 220 litros de concentración aproximadamente de 8000 ppm de litio correspondiente a la mezcla de concentrados de sucesivos ciclos previos de 12 hs.

3.5.3. Ciclos de adsorción de 10, 8 y 6hs

A la espera de los resultados del laboratorio, y con el análisis continuo de los datos obtenidos en planta a cargo del consultor, se realizaron procesos de 10, 8 y 6hs de adsorción con 1- 1:10hs de elución. Se mantuvieron caudales para la adsorción de 2-3 l/min y para la elución de 3,5-5,5 l/min, siendo ambas operaciones a 60°C. Durante este ciclo de 6 hs. se obtienen resultados óptimos de la adsorción de litio y permite la realización de más de un ciclo diario, obteniendo así mayor volumen para procesamiento posterior sin perder eficiencia del proceso.

Para ello se estandarizaron caudales operativos, temperatura de trabajo y preparación del agua litiada para el eluato y la soda ash para carbonatación, a modo de obtener resultados representativos para analizar los rendimientos.

Se realizaron seguimientos de tiempos de operación, volumen y concentración (medido con turbospec e-400) de sodio y litio para las diferentes etapas: caracterización de eluato Q1, Q2 y Q3; procesamiento de Q2 por ósmosis inversa, concentración por evaporación y seguimiento de reacción de carbonatación (medido en el sobrenadante durante la misma). A su vez se caracterizó a modo de registro diario el ADF de ingreso y el agua litiada para los diferentes ciclos.

En cuanto a la concentración por ósmosis inversa, mediante ajustes de caudales y presiones se logró obtener concentraciones máximas de hasta 2000 ppm Li en muestras a tiempos puntuales obteniendo promedios de concentrados que rondan los 1000 ppm (promedio de 3 mediciones). Cabe destacar que los resultados obtenidos dependen de la calidad del eluato de ingreso (concentración de litio y sodio promedio).

Tabla 11

Mediciones de concentración de litio y conductividad de un proceso de ósmosis inversa.

Fecha: 16/10/25

Ósmosis Q2- CONCENTRADO			
Hora	σ (mS/cm)	Media Li (ppm)	CV Li
21:04	0,0387	243,40	29%
21:24	20,3	1504,74	7%
21:34	22,9	1626,74	4%
21:44	23,8	1642,38	5%
21:54	24,8	1568,71	4%
22:04	18,9	1646,59	4%
22:14	23,7	1922,11	2%
22:24	22,6	1895,47	3%

Promedio (ppm) 1506,27

Volumen procesado: 1651 litros

Tiempo de proceso: 1:26hs

Tomando valores promedios de los ciclos de 6hs se determinó que la tasa de evaporación estimada es de 78-79 litros /hora. Considerando un promedio de 12 ciclos se obtienen 207 litros de concentrado a 6500 ppm Li con un tiempo de evaporación de 13hs 48', partiendo de 1284 litros de concentrado de ósmosis inversa (procesamiento de Q2). Cabe destacar que la tasa mencionada es un valor promedio, debido a que puede variar en función de la cantidad de vapor añadida al tanque (por apertura de la válvula) que a su vez depende del volumen que ocupa el concentrado en su interior (cuanto más lleno se encuentre el evaporador, se aporta menos vapor debido a que éste rebalsa al entrar en ebullición).

En total se realizaron 3 ciclos de 10 hs. 2 ciclos de 8hs y 36 ciclos de 6 hs. de adsorción de los cuales se logró obtener carbonato de litio para estos ciclos anteriormente mencionados (1 lotes para los ciclos de 12/10hs; 1 lotes para los ciclos de 8/6hs; 2 lotes para ciclos de 6hs). Además de los lotes mencionados en puntos anteriores de salmuera artificial y de 12hs de adsorción.

Reacciones de carbonatación: Las condiciones de reacción para todos los lotes, se mantuvieron en 85-90°C, con agitación constante. En la tabla 12 se resumen los lotes de carbonato de litio obtenidos, las condiciones iniciales del concentrado, y la cantidad de carbonato de sodio añadido.

En los primeros, se realizaba una reacción de carbonatación empleando una solución de soda ash, pero luego se implementó la carbonatación “en seco” para lo cual se agregaba al concentrado el Na_2CO_3 directamente en estado sólido. Esto disminuye la cantidad de agua demi a emplear además de evitar la dilución de la solución a concentrar. Las reacciones fueron seguidas con medición de litio del sobrenadante en laboratorio (previamente filtrado), a partir de la cual se agregó carbonato en consecuencia (hasta disminución de la concentración de litio dentro de un rango de 500-800 ppm). El lote 2 y 3 corresponde a una reacción con doble abatimiento, donde el sobrenadante de la primera reacción demarcó una concentración de litio de 4000ppm indicando que el primer precipitado es presumiblemente carbonato de Calcio y Magnesio.

Tabla 12

Cuadro resumen de reactivos y productos de las reacciones de carbonatación.

	Lote 0	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Lote 6
Fecha	10/8/2025	24/9/2025	9/10/2025	10/10/2025	23/10/2025	13/11/2025	27/11/2025
Detalle	salmuera artificial		1° abatimiento	2° abatimiento	rxn en seco	rxn en seco	rxn en seco
Li promedio (ppm)	10000	8000	7864,1	4000 (sobrenadante)	5799,91	6426,42	5578,35
Na promedio (ppm)			63697,9		56736,9	39256,6	77950,83
Volumen concentrado		220	170	8	340	200	333
Cantidad de Na_2CO_3 (kg)	8	8	8	8	29	16,25	25
Cantidad agua demi (l)	100	100	100	100			
Cantidad de Li_2CO_3 (kg)			5,14	1,95	15,72	5,9	12,52

Una consideración importante es que, si bien el filtro prensa es muy usado en escalas chica/mediana y proporciona una buena claridad de filtrado, esta operación discontinua presenta mucho trabajo en cuanto al manejo de la torta de prensado, además de que en las placas y el material filtrante queda retenido parte del producto. Por lo que mejorar esta unidad operativa podría dar mejores rendimientos. Entre las opciones posibles se puede considerar: filtros de vacío continuos, Centrífugas (tipo peeler/pusher, Nutsche (filtro Nutsche agitado).

3.5.3.1. Implementación de corte Q3: Su uso para preparación de agua litiada:

Como mejora, se implementó durante el proceso de elución un nuevo corte de eluato Q3

Figura 7, correspondiente a una corriente de menor concentración de litio y bajo sodio el cual fue empleado en varias oportunidades para preparación de agua litiada. Esto adquiere importancia en la disminución de costos, ya que además de evitar el requerimiento de concentrado de cloruro de litio para su preparación (elaborado previamente con ácido clorhídrico y carbonato de litio grado industrial) disminuye el volumen de agua demi necesaria.

Se estima que, a modo de ejemplo, para preparar 1250 litros de agua litiada se utilizan 280 litros de Q3 a 216 ppm de Litio; se debe contemplar que esta última concentración es mínimamente variable entre ciclos, por lo que se re-calcula el volumen adecuado para cada caso. En caso de utilizar el concentrado ya mencionado, se utilizó entre 1900 y 2000 ml por ciclo para 1250 litros de volumen final; es decir se utilizó 1248 litros de agua demi en comparación con los 970 litros de agua empleados al añadir Q3. En la Tabla 13 se puede ver las características del eluato de un ciclo.

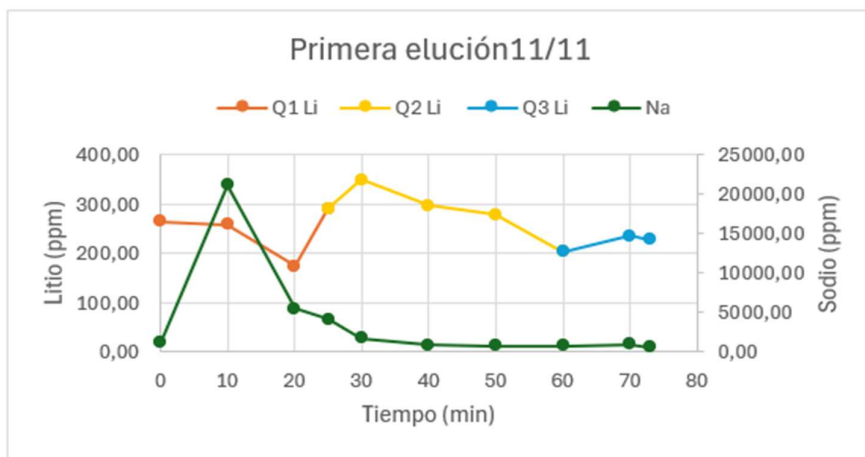


Figura 7

Perfil de elución con 3 cortes de eluatos

Tabla 13

Caracterización de los cortes de eluatos, Q1, Q2 y Q3

	Eluato Q1	Eluato Q2	Eluato Q3
Li promedio (ppm)	157,65	269,36	197,05
Na promedio (ppm)	16411,33	1114,39	700,07
pH	6,68	6,67	6,41
Conductividad (mS/cm)	116,4	10,54	6,64
Volumen (l)	381	571	169

3.5.3.2. Prueba de ciclo nocturno: adsorción en frío.

Se realizaron pruebas para la implementación de un tercer ciclo de adsorción/elución el cual inicia durante la noche (al finalizar los dos ciclos diarios). Para ello se estableció un caudal bajo de ingreso de agua de formación a las columnas aproximadamente de 1,7l/min para favorecer la interacción de los iones litio con la resina, dado que este proceso se realiza en frío y no a 60°C como los anteriores. Esto adquiere su importancia dado que reduce la necesidad de personal durante la noche al mismo tiempo que no se consume combustible para la caldera, reduciendo así los costos operativos. Al iniciar la jornada del día siguiente se comienza con la elución en caliente para así obtener el nuevo eluato.

3.5.4. Prueba de ciclos de 7hs de adsorción/ 1.25 hs de elución

Contemplando los resultados del perfil de columnas enviado al laboratorio Alex Stewart (*Informe 24/10/25 Anexo 8*) y por pedido de un equipo consultor Aspire Consulting se implementó una serie de 8 ciclos de 7hs de adsorción con 1.25 hs (tomando los datos de los 3 primeros para los respectivos cálculos). Esta prueba práctica se fundamenta en que, a partir de las 7hs de proceso, como se puede apreciar en el siguiente gráfico Figura 8, se empieza a “perder” litio por la corriente de salmuera agotada, es decir, hasta ese punto se obtiene una eficiente adsorción en las resinas. Se establecieron caudales operativos de 2,33 l/min para la adsorción y 4,55l/min para la elución. Para este último proceso se realizaron 3 cortes Q1 a los 35 minutos, Q2 desde los 35 a los 65 minutos, y Q3

desde el minuto 65 hasta terminar la operación, para ello se prepararon 1500 litros de agua litiada. Los resultados y análisis concluyentes de estas operaciones se adjuntan en el Anexo 3.

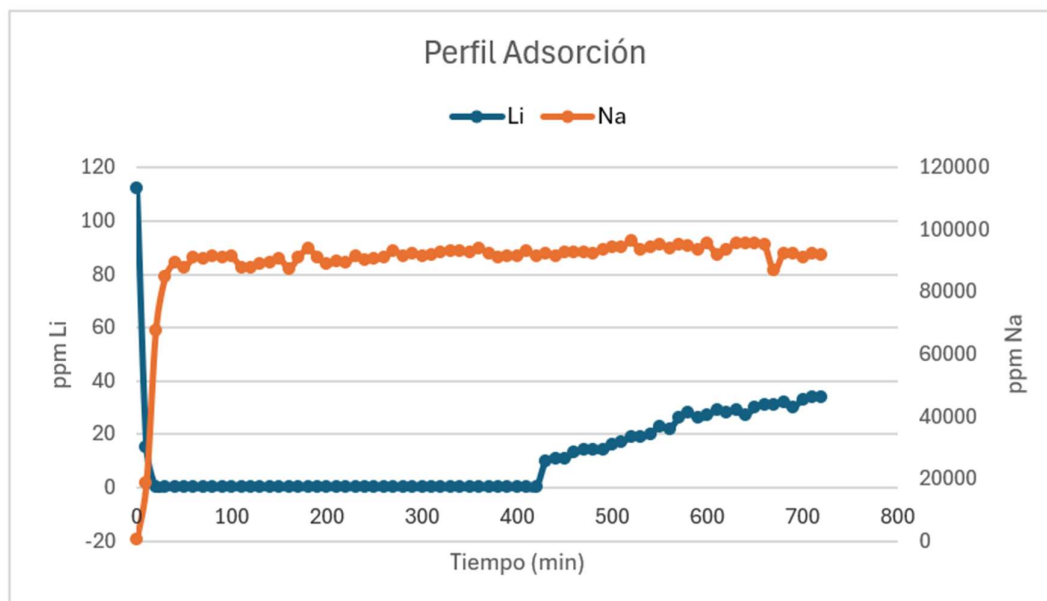


Figura 8
Perfil de adsorción datos del laboratorio Alex Stewart. Anexo 8

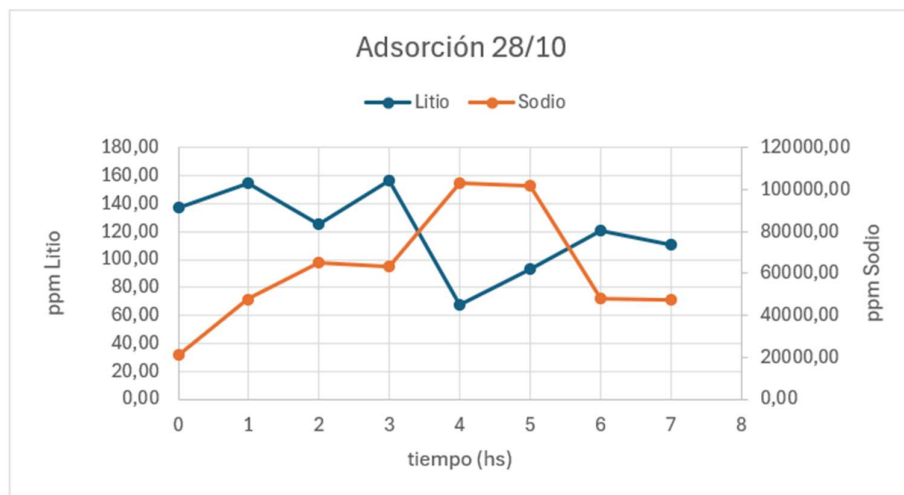


Figura 9
Perfil de adsorción, ciclos de 7hs de adsorción/1:25hs elución.

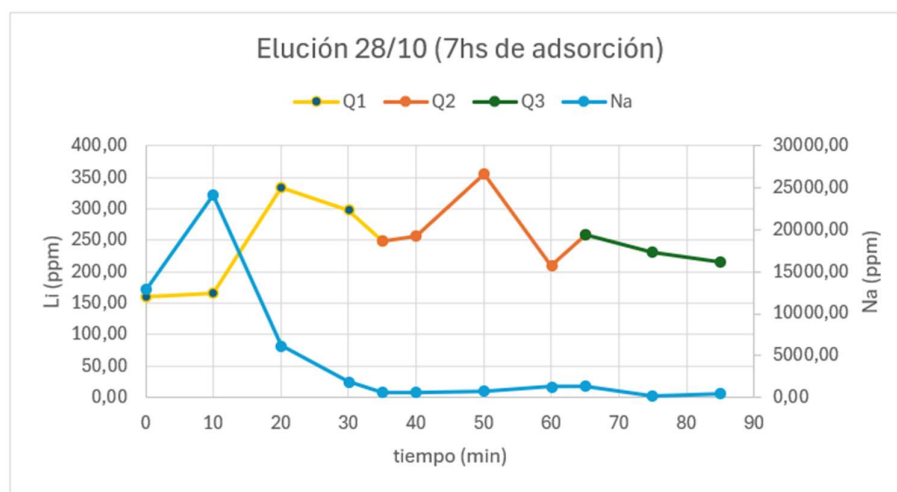


Figura 10
Perfil de elución, ciclos de 7hs de adsorción/1:25hs elución.

Tabla 14

Caracterización de cortes de eluatos, correspondientes a un ciclo de adsorción de 7hs y elución 1:25hs.

	Eluato Q1	Eluato Q2	Eluato Q3
Li promedio (ppm)	278,99	286,34	165,273
Na promedio (ppm)	11206,20	882,49	816,77
pH	6,52	6,44	6,37
Conductividad (mS/cm)	47,7	5,45	3,65
Volumen (litros)	565	518	332

3.5.5. Caracterización del proceso y balance de masa.

Con los resultados del muestreo de perfil de columnas (proceso de 10hs de adsorción) del laboratorio

Alex Stewart (Anexo 8) se obtuvieron los siguientes rendimientos (Tabla 15):

Tabla 15

Cálculo de Rendimiento de adsorción y elución.

Caudal (l/min)	Li en ADF (mg/l)	Volumen Total ADF (l)	Li Total Adsorbido (g)	Li Total No Adsorbido (g)	Rendimiento Adsorción (%)
2,5	60	81,4725	62,5725	23,85	72%

Caudal (l/min)	Agua Litiada Li (mg/l)	Volumen Total Elucion (l)	Li Total Desorbido (g)	Li Total No Desorbido (g)	Rendimiento Elucion (%)	Rendimiento Elucion con
4,50	60	315	63	22	74%	58%

En fechas posteriores se envió al mismo laboratorio un muestreo de los diferentes puntos del proceso completo: Agua de formación de ingreso; agua litiada para proceso de elución; eluatos Q1, Q2 y Q3 (correspondiente a un proceso de 6hs de adsorción); concentrado post RO; concentrado post evaporación (previa carbonatación); sobrenadante post reacción de carbonatación); agua demi, rechazo de agua demi, y agua dulce del potrillo. Estos resultados permiten tanto la caracterización de los diferentes puntos, como la realización del balance de masa y sirven de respaldo para las mediciones realizadas en la planta. Ver informe en Anexo 8.

A continuación, en la Tabla 16 Se presenta un cuadro resumen con valores promedios (concentración de litio y sodio) de los procesos de adsorción/elución en sus diferentes ciclos realizados en la planta, los resultados del muestreo enviado al laboratorio, así como también se expresa la

evaluación de selectividad y el factor de enriquecimiento para los diferentes casos. La relación Na/Li en el proceso de elución fue menor a la relación Na/Li del ADF de alimentación para todos los casos, lo que indica que el proceso fue selectivo para el litio mejorando el rendimiento de separación. Esto mismo se comprueba con el factor de enriquecimiento, el cual es un índice de mejora que nos dice cuánto se logró concentrar respecto de la composición inicial. Un Factor $F < 1$ indica enriquecimiento de litio.

Tabla 16

Cuadro resumen proceso de adsorción/elución y análisis de selectividad.

		Pocesos 6hs sin cortes Q3	Pocesos 6hs con cortes Q3	Procesos 7hs	Resultados Alex St.
ADF	Li promedio (ppm)	113,70	79,85	67,8	61
	Na promedio (ppm)	68960,66	68853,00	51845,1	89033
Agua litiada	Li promedio (ppm)	60,32	56,44	53,4	60
	Na promedio (ppm)	227,97	286,08	198,2	594
Q1	Li promedio (ppm)	231,61	217,07	273,6	188
	Na promedio (ppm)	17996,85	21911,38	9046,4	24851
Q2	Li promedio (ppm)	276,79	276,18	293,1	186
	Na promedio (ppm)	1127,01	941,94	839,3	887
Q3	Li promedio (ppm)		222,85	219,61	240
	Na promedio (ppm)		941,94	584,66	1630
Evaluación de selectividad	Na/Li ADF	606,53	862,25	764,45	1459,56
	Na/Li Q1	103,74	134,63	40,17	189,51
	Na/Li Q2	4,15	2,98	2,67	2,33
	Na/Li Q3		3,94	2,32	5,76
Factor de enriquecimiento	F1 (q1/adf)	0,171	0,156	0,053	0,130
	F2 (q2/adf)	0,01	0,003	0,003	0,002
	F3 (q3/adf)		0,005	0,003	0,004

Comparando los diferentes datos promedios se puede observar en primer lugar las discrepancias entre las concentraciones de ADF, atribuidos principalmente al error de medición del Turbospec para muestras de baja concentración también en las mediciones de sodio debido al uso de un único patrón de 1000 ppm para la calibración del equipo (aumenta el error a altas concentraciones).

Evaluando el factor de enriquecimiento para Q2, se observa que es igual en procesos de 6 y 7hs, por lo tanto, esta información nos permite determinar que el proceso más corto (6hs) es el más productivo, dado que introduce la posibilidad de realización de dos a tres ciclos diarios, aumentando la cantidad procesada por día, y reduciendo los costos operativos del proceso más largo. Por lo tanto, se toma el ciclo de 6hs de adosrción como base para el análisis económico, los datos aquí expuestos harán énfasis en los resultados de dicho proceso principalmente.

En la siguiente tabla se muestran los resultados promedios de los diferentes ciclos realizados en la planta piloto.

Tabla 17

Resumen de datos (promedio de procesos realizados en planta piloto)

Pocesos 6hs con cortes Q3		
Fechas	7/11 al 26/11	
Nº Ciclos de 6hs	1	12
Li en ADF (ppm)	79,85	
Li en agua litiada (ppm)	56,44	
Vol x col adsorción (l)	989,89	47514,48
Vol x col elución (l)	287,2	13787,71
Vol promedio Q1 (l)	394,538	4734,46
Li promedio Q1	217,071	
vol promedio q2(l)	594,615	7135,38
Li promedio Q2	276,18	
vol promedio q3(l)	170,6	2046,77
Li promedio Q3	222,85	
V (l) Post RO	107,031	1284,37
Li post RO (ppm)	1049,47	
tiempo de RO (min)	48,74	584,87
Q1conc. (l) x ciclo	13,176	158,11
Hs de evaporación Q1	4,889	58,67
Q2conc. (l)	17,281	207,37
V concentrado final (l)		201,15
Hs de evaporación Q2 (post RO)	1,15	13,81

A continuación, se procede a realizar el balance de masa considerando estimaciones de los valores de los cationes relacionados con el análisis del laboratorio: ver desarrollo completo en Anexo

1.

ADSORCIÓN			ELUCIÓN			Recuperación global 70,35% Porcentaje de litio alimentado que se recupera en el eluato
Masa adsorbida (g) =min-mout (g)			Masa eluida (g) = m total cortes - m agua litiada			
mad, Li	268,6702	85%	mel, Li	222,427	82,79%	
mad, Na	-69682,7378	recuperació	mel, Na	11285,901	recuperación de	
mad, ca	-1291,6498	n de litio de	mel, Ca	211,830	litio	
mad.mg	-65,1015	la resina	mel. Mg	38,149		

Figura 11

Balance de masa y rendimiento Adsorción/elución

Los valores negativos indican aumento en la salida: consistente con intercambio iónico/arrastre de sales del lecho. También puede deberse a error de medición, dado que la muestra analizada en el laboratorio de salmuera agotada correspondió a un momento determinado y no a un volumen final, dado que, por las capacidades de la planta no se podía almacenar por completo dicha cantidad.

Se observa que los resultados de recuperación de litio del proceso adsorción/elución son algo mayores a los realizados por el perfil de columnas. Frente a esto se recuerda que se parten de promedios de datos experimentales, existe error de medición del equipo a bajas concentraciones, además de que el análisis del perfil de columnas fue hecho en base a una sola columna.

Para continuar con el desarrollo, se toma para el procesamiento el Q2 (buena concentración de Li y bajo Na) acumulado de 12 ciclos, con el fin de obtener luego del procesamiento por ósmosis, el volumen necesario para evaporar y concentrar. El Q1, debido a la alta concentración de sodio es inadmisibles para su procesamiento por RO y por el elevado costo que implica concentrarlo (para llevarlo de alrededor de 200 a 6500 ppm) se decide no contemplarlo en esta base de cálculo y considerar a posterior su re-proceso (inyectarlo como alimentación de la adsorción) para optimizar el proceso.

Para el proceso de ósmosis (ver figura 12) inversa se utilizaron los caudales registrados en el equipo: Qc: caudal de concentrado y Qp: caudal de permeado. Además de las concentraciones y

volúmenes de partida. Se adopta un factor de concentración de litio de 3,8; correspondiente a un rechazo supuesto de $\approx 60\%$, dentro del rango esperable para membranas de ósmosis inversa, quedando por debajo del máximo teórico de 5,56 definido por la relación de caudales y volúmenes del equipo

Cálculo de masa= Ci. V

CONCENTRACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA				
masa (g) /n°Ciclos	Entrada		Salida	
	x ciclo	12	x 12 ciclos	
mLi	164,2	1970,6	112,3	1347,9
mNa	783,3	9399,4	593,4	7120,5
mCa	16,2	194,5	14,7	175,8
mMg	3,2	38,9	3,3	39,1
mK	99,4	1192,8	82,2	986,5
mB	14,0	168,5	8,1	97,7
Volumen (l)	594,62		107,03	1284,37
tiempo de operación (min)	48,74			
Caudal permeado Qp (l/min)	10			
Caudal concentrado Qc (l/min)	2,2			
%R= Qc/(Qc+Qp)	18%	% Recuperación del concentrado		
Recuperación de Litio %	68%			

Figura 12
Balance de masa y recuperación RO.

CONCENTRACIÓN POR EVAPORACIÓN				
masa (g) /n°Ciclos	Entrada		Salida	
	1	12	1	12
mLi	112,326	1347,91	112,326	1347,91
mNa	593,374	7120,49	1556,517	18678,21
mCa	14,651	175,81	96,279	1155,35
mMg	3,256	39,07	20,631	247,58
mK	82,210	986,52	483,689	5804,27
mB	8,140	97,67	18,339	220,07
Volumen (l)	107,03	1284,369	17,28	207,37
Recuperación de Litio %	100%		Ybrine%	16%
Rendimiento evaporación	84%			

Figura 13
Balance de masa evaporación

Para la concentración por evaporación, ver Figura 13, de acuerdo con datos experimentales se toma como tasa de evaporación: 78 litros/h: por lo tanto, la evaporación del volumen de 207,4 litros de concentrado de correspondiente a 12 ciclos de Q2 demora en evaporarse alrededor de 13:49 hs.

CARBONATACIÓN

Considerando el volumen de 12 ciclos y una pérdida de 3% entre la sal

$$V = 201,15 \text{ litros}$$

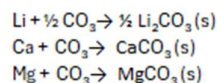
Datos iniciales:

masas (g) mi	
mLi (g)	1307,47
mNa (g)	18117,86
mCa (g)	1120,69
mMg (g)	240,15
mK (g)	5630,15
mB (g)	213,47

Masas molares y pesos moleculares g/mol

Li ₂ CO ₃	73,89
Na ₂ CO ₃	105,99
CaCO ₃	100,09
MgCO ₃	84,31
Li	6,94
Ca	40,08
Mg	24,305

Estequiometría



Cálculo n° de moles = mi/PMi			Cálculo moles de Na ₂ CO ₃ requeridos	
nLi	188,40	moles	nNa ₂ CO ₃ , Li	94,20
nCa	27,96	moles	nNa ₂ CO ₃ , Ca	27,96
nMg	9,88	moles	nNa ₂ CO ₃ , Mg	9,88
			total	132,04 moles

Masa de Na₂CO₃ requerido puro 13994,97 gramos

Considerando una pureza de 83-85% de Na₂CO₃ y pasando a kg

83%	16,86 kg
85%	16,46 kg

Carbonato de litio teórico a obtener (puro)	6,96 kg
Carbonato de calcio precipitado	2,80 kg
Carbonato de magnesio precipitado	0,83 kg
Masa total sólido obtenido (kg)	10,59 kg
(sin considerar arrastre de solubles)	

Se asume un contenido de solubles arrastrados de 10% m/m sobre el producto, consistente con una operación de carbonatación sin tren de purificación ni lavado del sólido.

El producto total obtenido es de 11,77 kg (considerando solubles)

PUREZA ESTIMADA	59%
m Carbonato litio/ m total	

Figura 14

Balance de masa y molar- Reacción de carbonatación

Procediendo con el balance para la reacción de carbonatación se considera un volumen inicial con una pérdida del 3% respecto al concentrado de evaporación, por oclusión entre cristales de sal en las etapas de evaporación, consistente con una pequeña fracción de concentrado retenida en el lecho salino.

De acuerdo con el balance de masa, considerando los datos prácticos promedios de ciclos de 6hs de adsorción con 1hs 10' de elución, y concentrando y carbonatando el volumen correspondiente a repetición de 12 ciclos sucesivos, se necesitan en promedio 16,5 kg de carbonato de sodio (considerando la pureza del 85%) para reaccionar con 201 litros de concentrado a 6500 ppm y obtener 10,6 kg teóricos; además, considerando que la planta no cuenta con un sistema de lavado, esta masa sería un tanto mayor al considerar el arrastre de contaminantes solubles (Na, K, B), estimados en un 10% p/p sobre el producto, por lo tanto el contenido total pesa aproximadamente 11,77 kg, según cuánta solución queda atrapada en la torta de prensado.

Dadas las características actuales de la salmuera procesada y operaciones unitarias de la planta, los 10,6 kg contendrían solo 7 kg de carbonato de litio teóricos. Realizando una estimación, mediante la masa de carbonato de litio en relación con la masa total de producto, la pureza ronda el 59%. Es decir, sin incorporar procesos de purificación previos, y lavado posterior, la pureza del producto obtenido se ve comprometida.

Por otra parte, las muestras sólidas de los diferentes lotes de carbonato de litio obtenidos en la planta piloto se analizaron en el Alex Stewart, (informe 30/12/25, Anexo 8). En base a los mismos se realizó la estimación del cálculo de pureza arrojando los siguientes resultados (ver tabla 18).

Tabla 18

Pureza de lotes de carbonato de litio obtenidos en planta.

PUREZA	% con Li		% con CO ₃	
	Li ₂ CO ₃ base húmeda	Li ₂ CO ₃ base seca	Li ₂ CO ₃ base húmeda	Li ₂ CO ₃ base seca
A . Li ₂ CO ₃ 10/10	72%	76%	67%	70%
B - Li ₂ CO ₃ 09/10	6%	8%	44%	56%
C- Li ₂ CO ₃ 12/09	90%	102%	86%	98%
D-Li ₂ CO ₃ 30/10	38%	40%	58%	61%
E- Li ₂ CO ₃ 13/11	48,18%	48,22%	73,6%	73,7%

La muestra C corresponde al lote realizado el 10/09 con salmuera artificial, por lo que estrictamente no representa al proceso para nuestro análisis. La muestra B y A, fueron las reacciones con doble abatimiento (mencionado en la página 43 del presente informe). Se puede observar en la tabla 21, como la muestra B posee una pureza del 8% de carbonato de litio en base seca, mientras que el cálculo realizado en base a CO₃ indica un porcentaje muy superior del orden de 44-56% (en base húmeda y seca según corresponda). Esto nos indica que, durante el primer abatimiento precipitó principalmente carbonato de calcio y magnesio, en lugar de carbonato de litio, verificando lo esperado. Durante el segundo abatimiento, con el agregado de más Na₂CO₃ al sobrenadante de la primera reacción, precipitó el Li₂CO₃ deseado; mostrando este producto una pureza del 76% (calculado en base a la concentración de litio en base seca); la diferencia con de la determinación de la pureza en base a CO₃ ~76 % (por Li) y ~70 % (por CO₃) indica que no todo el CO₃ está como Li₂CO₃ o que hay dispersión analítica. Por último, las muestras D y E tienen una impureza inferior al 50% calculada en función a la concentración de litio, contrastando con la pureza determinada en base a CO₃ >60%; que indica que no todo el carbonato presente es carbonato de litio. Este análisis de laboratorio arroja resultados de

pureza inferiores *al 59% calculado teórico*, demostrando que es necesario añadir al proceso operaciones de purificación y lavado con el fin de mejorar la calidad del producto.

También, se analizó el precipitado salino resultante del proceso de evaporación con el fin de determinar si en éste queda retenida una cantidad de litio considerable del proceso. Se tomaron dos muestras del fondo del tanque en el mismo momento (corresponden al mismo proceso y lugar), y se analizó por ICP la presencia de iones, además de sulfatos, cloruros y alcalinidad. En la tabla 19 se declaran los resultados de las concentraciones de litio y sodio correspondientes a los informes del 17/12/25 (ver anexo 8)

Tabla 19

Resultados de precipitado salino del proceso.

Fecha de informe: 17/12/25

Muestra	Análisis	Li (ppm)	Na (ppm)
F	Sólido precipitado	1167,13	371668,8
G	Sólido precipitado	867,15	362996
F	Líquido precipitado	8000	68796
G	Líquido precipitado	7263	77133

Se observa que en ambas muestras sólidas queda retenida una porción de litio de 800-1200 ppm, mientras que el precipitado es mayormente cloruro de sodio. A su vez, en las muestras líquidas la concentración de litio es elevada, propio de un concentrado post evaporación. De esto se deduce que queda una porción importante de concentrado de litio depositado entre la sal de los tanques, difícil de recuperar. Es probable que este desbalance influya en los errores de medición de los diferentes volúmenes y cantidades estimadas.

3.6. Resultados Clave

- ✓ Se realizaron **ensayos de adsorción, elución y carbonatación a escala laboratorio**, empleando salmueras artificiales y reales, con resultados positivos en la obtención de carbonato de litio sólido.
- ✓ A escala piloto, se pusieron en funcionamiento las **4 columnas de adsorción selectiva**, logrando corridas de adsorción/elución con acumulación de eluatos. Se separó en cortes y se perfilaron las columnas para optimizar la calidad del eluato. La concentración de eluato obtenido oscila entre las 200 a 300 ppm.
- ✓ Se realizó la **carbonatación de un concentrado de ósmosis artificial**, obteniendo carbonato de litio sólido.
- ✓ Se obtuvo carbonato de litio sólido a partir de salmuera de proceso, a escala piloto, empleando concentrados resultantes de la ósmosis inversa y evaporación en los respectivos tanques y de los diferentes ciclos estudiados
- ✓ Se estudiaron y ajustaron los parámetros de los diferentes ciclos de adsorción/elución para obtener mayor eficiencia en los mismos.
- ✓ Se realizó un perfil de columnas en laboratorio externo para respaldar los resultados y aportar datos y mejoras al proceso de planta.
- ✓ Se realizaron muestreos de control de TPH y BTEX para diferentes puntos del proceso.
- ✓ Se enviaron muestras al laboratorio externo de ADF, eluatos, agua litiada, aguas para proceso, y concentrados para realizar la caracterización del proceso, cálculos de balances de masa y rendimientos.
- ✓ Se envió a analizar la composición de muestras sólidas de carbonato de litio de diferentes lotes de proceso y muestras de precipitado salino.
- ✓ Se determinó la pureza de los productos sólidos obtenidos en la planta piloto.

- ✓ Se comprobó la factibilidad técnica mediante la repetición de lotes de producción.
- ✓ Se fortalecieron las capacidades del personal mediante capacitación, turnos operativos y generación de protocolos, garantizando la continuidad de las operaciones piloto.
- ✓ Se realizó el balance de masa del proceso con los datos prácticos del proceso.
- ✓ Se documentaron los avances, problemas y resoluciones en partes diarios.
- ✓ Las actividades se complementaron con reuniones semanales de seguimiento técnico entre el equipo de expertos, personal de planta y actores involucrados

4. Eje 4 – Estimación de Reservas de Litio

Estimación de reservas en áreas Palmar Largo, Surubí y El Chivil (provincia de Formosa)

Las reservas de litio de la provincia se encuentran asociadas al volumen de **agua de formación** producido en la explotación de hidrocarburos de los yacimientos **Palmar Largo, Surubí y El Chivil**. En consecuencia, la disponibilidad del recurso está directamente vinculada a la producción de agua de formación de estos campos.

El cálculo de reservas se llevó a cabo mediante un **análisis declinatorio exponencial** de los yacimientos, con horizonte temporal hasta diciembre de 2040. Este análisis se aplicó tanto a la producción de petróleo como a la de agua de formación, proyectando su comportamiento futuro.

Para la estimación se consideraron los siguientes supuestos:

1. No se incorporan nuevos pozos ni se habilitan pozos cerrados.
2. Se mantiene constante el sistema de extracción.
3. Se aplican concentraciones de litio constantes, con valores mínimo y máximo obtenidos de análisis de laboratorio.
4. No se consideró límite económico para la explotación.

Una vez proyectados los volúmenes de agua de formación, se calculó la **producción anual de ion litio** en toneladas, aplicando las concentraciones de referencia.

Los resultados obtenidos muestran una **tendencia decreciente** en la producción esperada de litio, en línea con la declinación natural de los yacimientos:

En el escenario **máximo**, la producción parte de **344 toneladas en 2025** y desciende a **132 toneladas en 2040**.

En el escenario **mínimo**, los valores varían de **248 toneladas en 2025** a **95 toneladas en 2040**.

Resultados Clave

- ✓ Se estimaron las reservas de litio en las áreas Palmar Largo, Surubí y El Chivil mediante análisis de declinación exponencial de producción.

- ✓ El cálculo evidencia una **reducción progresiva** del recurso disponible hacia 2040, reflejando la declinación de los yacimientos.
- ✓ La proyección marca un rango de 344–248 toneladas de litio en 2025, con descenso a 132–95 toneladas en 2040, según escenario de concentración considerado.
- ✓ El análisis constituye un escenario conservador, ya que no contempla la incorporación de pozos adicionales ni modificaciones operativas.

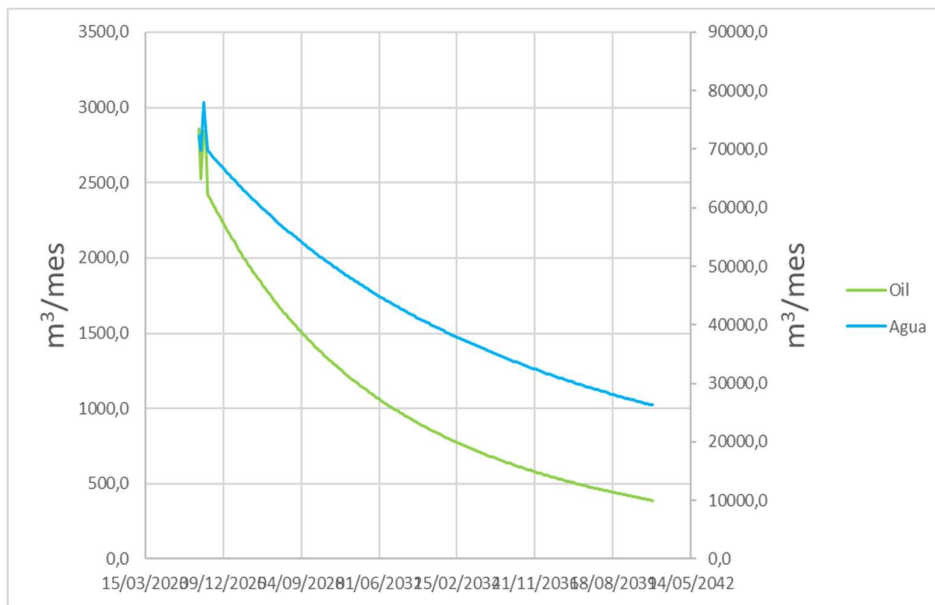


Figura 15
Producción de Petróleo y Agua de Formación. Estimaciones

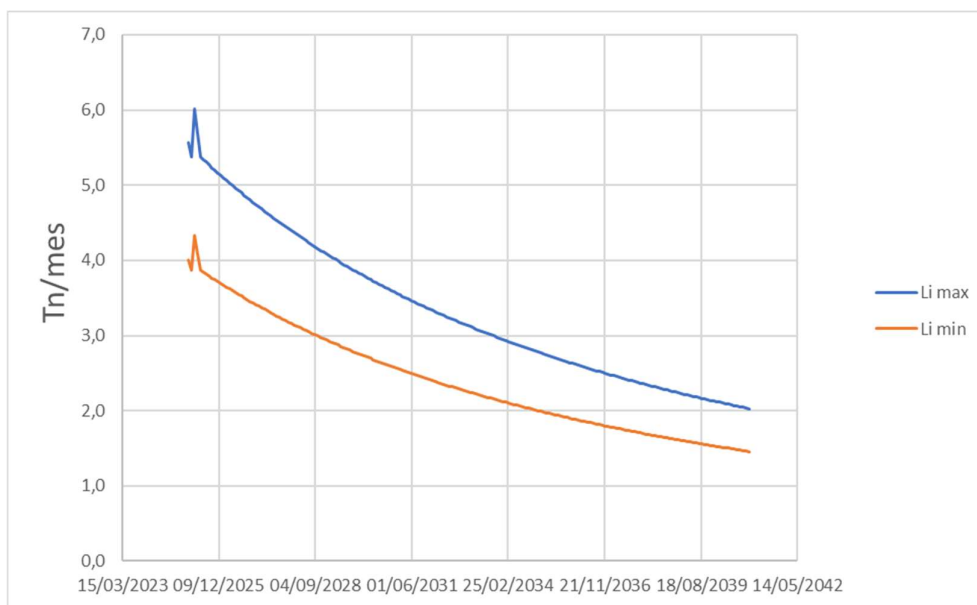


Figura 16
Producción de ion Li. Estimación

Tabla 20
Producción esperada de ion Li. (Por Año)

año	CO ₃ Li _{max}	CO ₃ Li _{max}
	73.8909 g/l	73.8909 g/l
	Tn	Tn
2025	344	248
2026	314	226
2027	290	209
2028	270	194
2029	251	181
2030	235	169
2031	220	158

2032	206	148
2033	194	139
2034	182	131
2035	172	124
2036	163	117
2037	154	111
2038	146	105
2039	139	100

5. Eje 5. Costeo y Viabilidad Económica

Se toman para el cálculo la repetición de ciclos diarios de adsorción de 6hs, a partir de la cual se consideran dos alternativas: la primera, la realización de dos ciclos diarios y la segunda con el agregado de un tercer ciclo. Dentro de dichas estimaciones se tuvieron en cuenta tres posibles escenarios:

- **OPCIÓN 1 PESIMISTA.** Consideraciones: Actividad petrolera baja + Litio: El litio debe ayudar a cubrir y participar de los costos del yacimiento. 50% Litio / 50% Petroleo. Escenario Desfavorable. Pesimista. El Costo de manejo de ADF desde las baterías, hasta la planta de tratamiento y luego la inyección a las napas a través de pozos inyectores. En el Anexo 1 se detalla la base del cálculo presentada por REFSA. Se toma **U\$S 1,7 / m3 ADF costo inyección promedio del año 2026**. Se considera para este escenario, el 50% del valor del costo unitario actual.
- **OPCIÓN 2 - MODERADA –** Consideraciones: Actividad Petrolera mínima + Litio. Se mantiene la actividad para poner foco en el aprovechamiento del Litio. Moderada. Se considera el 50% del costo del escenario "Opción 1".

- OPCIÓN 3 - OPTIMISTA – Consideraciones: Actividad Petrolera media con rentabilidad adecuada + Litio. 80% Petroleo / 20% Litio. Escenario Favorable. Se considera el 20% del costo del escenario "Opción 1". Ver desarrollo completo en Anexo 1.

Cabe mencionar que para poder tener una estimación lo más precisa posible, se registró durante los diferentes ciclos de producción en la planta piloto, la mayor cantidad de datos relevantes posibles; eso incluye: tiempos de cada operación, frecuencia de cambio de material filtrante y peso, cantidad de agua producida, cantidad y frecuencia de preparación de productos químicos, entre otros.

Determinación del costo unitario

Alternativa 1: dos ciclos diarios de 6hs de adsorción

Tabla 21

Cuadro resumen de costos unitarios. Alternativa 1.

A- DETERMINACIÓN DEL COSTO UNITARIO			
CARBONATO DE LITIO Li_2CO_3			
Costo Unitario Total	\$	1.040,43	\$ 1.040.434,96
COSTO UNITARIO VARIABLE	\$	531,19	\$ 531.185,63
Materia Prima e Insumos	\$	16,59	\$ 16.585,09
Mano de Obra directa	\$	208,38	\$ 208.375,32
Energía - Fuerza electro motriz	\$	3,12	\$ 3.120,15
Energía - Vapor - Combustible	\$	204,15	\$ 204.148,53
Agua Dulce - Demi	\$	98,96	\$ 98.956,54
COMPONENTES COSTO FIJO	\$	509,25	\$ 509.249,33
Carga Fabril	\$	424,44	\$ 424.443,67
Gastos administrativos	\$	81,78	\$ 81.776,88
Gastos Comercialización	\$	3,03	\$ 3.028,77
		U\$S / kg Li_2CO_3	U\$S / Tn Li_2CO_3

Se observa en la tabla 21 el elevado costo unitario de la tonelada de carbonato de litio producido en la planta piloto excede por demás el costo comercial del producto, además se debe tener en cuenta que al momento actual la planta no contiene operaciones unitarias

destinadas a la purificación, por lo que el producto final es de una calidad muy inferior a la unidad de precio comparada (grado batería).

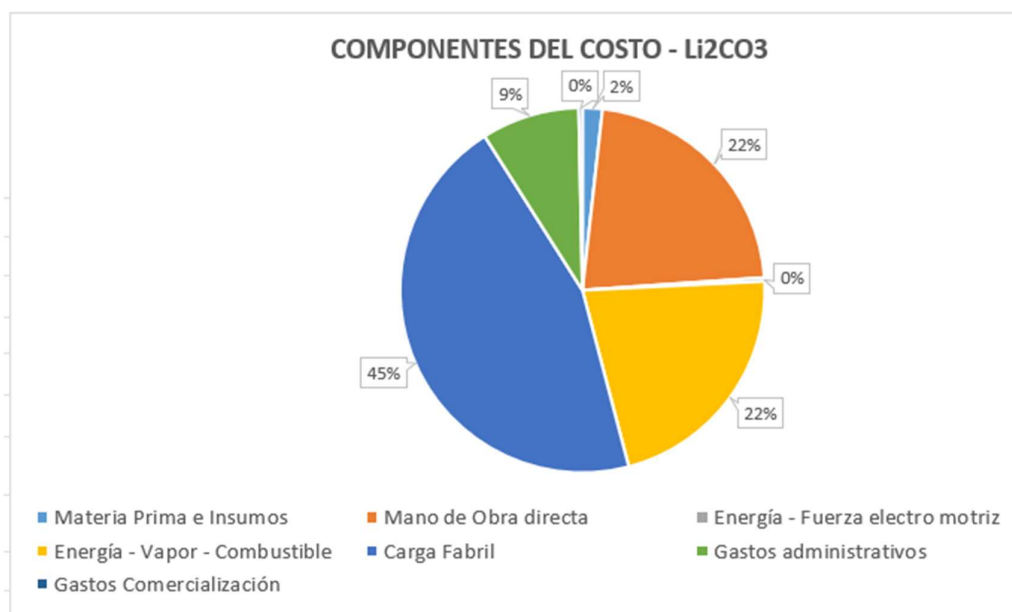


Figura 18

Componentes del costo asociados al carbonato de litio – Alternativa 1

Los costos de materia prima incluyen: Costos de adquisición de ADF, materiales para el acondicionamiento de salmuera (carbón activado, vellón, agua para limpieza), resina, carbonato de litio y ácido clorhídrico (preparación de agua litiada); carbonato de sodio para carbonatación y bolsas para envasado. Se destaca que el 76,01% del costo total de estos ítems, corresponden al hecho del origen donde se encuentra presente el litio (Agua de Formación con presencia de Hidrocarburos), con lo cual esto es un valor que se atribuye directamente a esta actividad vinculada con la actividad hidrocarburífera. En la minería convencional de salares este costo sería significativamente menor.

Otras consideraciones:

Costos de mano de obra directa: Se plantean 2 supuestos. Por un lado 16 operarios lo cual corresponde a la situación experimentada en la planta piloto en estos meses que duro el estudio. Por

otro lado, la situación de mínima, con 11 operarios capacitados. Este valor podría bajar a valores límites de 5 operarios si se logra la automatización de la planta en gran parte del proceso, lo cual también se puede replicar en la situación de escala industrial. (se estima en aproximadamente 10–15 % del CAPEX total de planta). Para el presente análisis se selecciona la opción más ajustada de 11 operarios capacitados.

Para el costo de mano de obra, se optó por la opción más eficiente, considerando que los operarios ya fueron entrenados y formados y que las instalaciones poseen ciertas medicaciones estructurales que permiten que el trabajo y la operación en la planta piloto sea normal, y con los valores de eficiencia de proceso llevados al máximo de sus rendimientos. Dicho costo ronda U\$S83.42 / kg de Li_2CO_3 . Luego este costo varía según la cantidad de personas y el nivel de producción, siendo el valor más desfavorable de este costo, U\$S 413,91/ kg de Li_2CO_3 .

Energía: Se considera el costo energético suponiendo la situación de conexión directa del abastecimiento eléctrico de la planta piloto al sistema de interconectado provincial, ya que sería la situación de mediano plazo más probable y ajustada a una situación de proyección industrial. La componente del costo por la potencia instalada se considera en el apartado de carga fabril.

Vapor y combustible de caldera: Respecto al sistema de vapor, se consideraron las componentes de combustible como también de consumos de químicos y otros para mantener adecuadamente el sistema. En el anexo de partes diarias (Anexo: operativo) se hace referencia a las problemáticas presentadas en los equipos de proceso y la caldera es un factor que se debe considerar y prestar atención para trabajar preventivamente para que brinde los servicios constantemente a toda la línea de producción.

Alternativa 2: tres ciclos por día de 6 horas de adsorción. Opción Optimista

Tabla 22

Cuadro resumen de costos unitarios. Alternativa 2.

A- DETERMINACIÓN DEL COSTO UNITARIO			
CARBONATO DE LITIO Li_2CO_3			
Costo Unitario Total	\$	629,77	\$ 629.769,74
COSTO UNITARIO VARIABLE	\$	387,27	\$ 387.270,06
Materia Prima e Insumos	\$	10,40	\$ 10.402,39
Mano de Obra directa	\$	86,28	\$ 86.283,77
Energía - Fuerza electro motriz	\$	3,12	\$ 3.120,15
Energía - Vapor - Combustible	\$	202,28	\$ 202.279,96
Agua Dulce - Demi	\$	85,18	\$ 85.183,79
COMPONENTES COSTO FIJO	\$	242,50	\$ 242.499,68
Carga Fabril	\$	202,12	\$ 202.116,03
Gastos administrativos	\$	38,94	\$ 38.941,37
Gastos Comercialización	\$	1,44	\$ 1.442,27
		U\$S / kg Li_2CO_3	U\$S / Tn Li_2CO_3

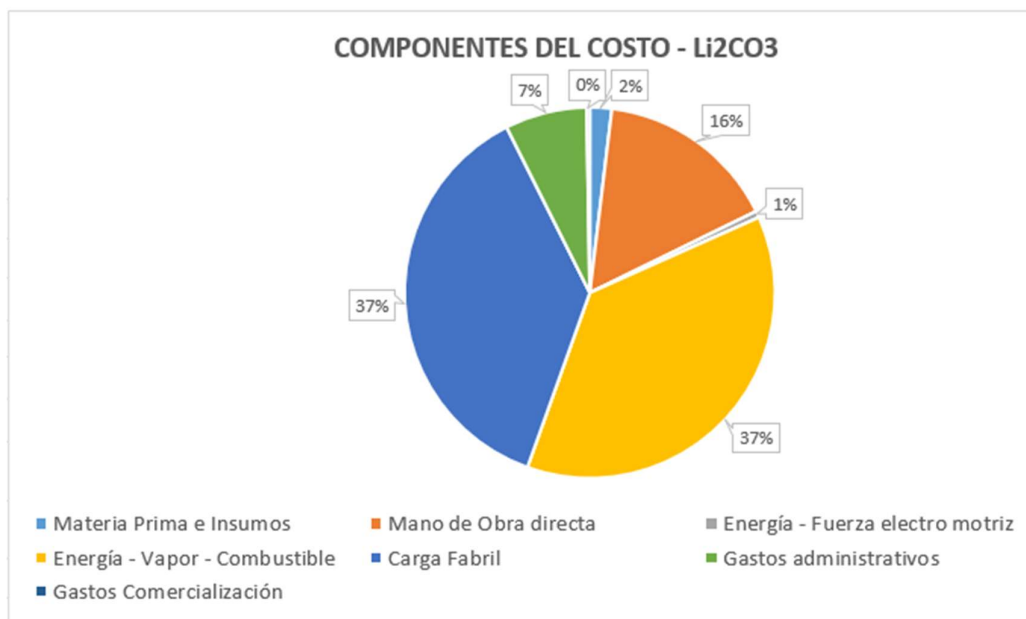


Figura 18

Componentes del costo asociados al carbonato de litio – Alternativa 2

Se puede observar, comparando las tablas 21 y 22, que existe un costo unitario mucho menor con la realización de un tercer ciclo, considerando que aumenta la cantidad de producto diario

obtenido. En el gráfico de torta (Figura 18) observamos que la carga fabril sigue dominando la composición de los costos, pero aumenta el porcentaje de energía debido al incremento de vapor requerido para el tercer ciclo.

6. Eje 6 - Otras Alternativas

Propuestas de alternativas de uso de la Planta piloto y su tecnología, si se declara no factible.

6.1. Tratamiento de salmueras con TPH

El tratamiento de salmueras mediante tecnologías físico-químicas (TPH) constituye una necesidad operativa inherente al funcionamiento del yacimiento de Palmar Largo. La planta piloto no orientaría esta alternativa a clientes externos, sino que actúa como infraestructura interna indispensable para garantizar el cumplimiento de las obligaciones ambientales asociadas a la extracción de hidrocarburos. La normativa vigente exige que las salmueras generadas en el proceso productivo sean tratadas antes de su disposición o eventual reúso, evitando impactos sobre el suelo, acuíferos y ecosistemas circundantes.

Contar con capacidad propia de tratamiento reduce la dependencia de servicios externos, disminuye costos logísticos y asegura continuidad operativa incluso en escenarios de restricciones regulatorias o climáticas. Además, permite transformar un pasivo ambiental en un flujo controlado y gestionado dentro del mismo yacimiento, mejorando la trazabilidad y reduciendo riesgos sancionatorios. Desde el punto de vista económico, el tratamiento interno de salmueras evita gastos recurrentes asociados al transporte, disposición y contratación de terceros, lo que convierte a la planta piloto en un activo estratégico que contribuye directamente a la sostenibilidad operativa del campo.

6.2. Producción de NaCl y KCl

La producción de NaCl y KCl a partir de la concentración y cristalización de salmueras puede orientarse hacia el mercado agropastoril y ganadero. En el sector rural, las sales minerales se utilizan ampliamente como suplementos para ganado bovino, caprino y ovino, así como en mezclas para nutrición animal, bloques minerales y formulaciones para mejorar la ingesta de electrolitos en condiciones de calor extremo, muy frecuentes en Formosa.

Este enfoque reduce las exigencias de pureza y habilita un mercado más accesible, con menor barrera de entrada y demanda estable. La región cuenta con una base ganadera significativa, especialmente en los departamentos de Patiño, Bermejo y Ramón Lista, donde los productores adquieren sales minerales de proveedores externos, lo que abre una oportunidad para sustituir parte de ese abastecimiento con producción local.

Además, la producción de NaCl y KCl puede integrarse como subproducto del tratamiento de salmueras (opción 1). Durante el proceso de acondicionamiento físico-químico, es posible recuperar fracciones salinas que, mediante etapas adicionales de concentración y secado, pueden transformarse en sales aptas para uso ganadero. Esto permite valorizar un residuo del proceso, reducir costos de disposición y generar un producto comercializable con bajo CAPEX incremental.

En conjunto, esta alternativa se vuelve más atractiva cuando se la considera como un aprovechamiento secundario del tratamiento de salmueras, con un mercado rural cercano, estable y menos exigente en términos regulatorios

6.3. Desmineralización y reúso de agua (incluye agua desmineralizada y uso doméstico no potable)

Produce agua tratada mediante DLE y RO, apta para procesos industriales y para usos domésticos no potables en el campamento. En Formosa, donde el agua subterránea muchas veces presenta elevada salinidad, esta alternativa tiene un mercado inmediato: industrias que requieren

agua de proceso (arroz, jugos, textiles, hospitales), edificios con sistemas HVAC y el propio campamento del yacimiento Palmar Largo, que hoy depende de agua mineral para tareas básicas. La reducción de costos logísticos y la mejora operativa hacen que esta alternativa tenga una viabilidad económica muy alta, con demanda real y comprobable.

6.4. Centro de investigación universitario

Transforma la planta en un espacio de investigación aplicada, formación técnica y servicios analíticos. En la región existen universidades (UNaF, UTN), institutos técnicos y organismos públicos que requieren infraestructura para prácticas, ensayos y proyectos de innovación. Aunque el retorno económico es moderado, la demanda institucional es real y el impacto social es muy alto, fortaleciendo capacidades locales.

6.5. Producción de fosfato de litio (Li_3PO_4)

El consultor Manuel Saravia propone como alternativa la producción de fosfato de litio un **material catódico** ampliamente utilizado en baterías de ion-litio, especialmente en vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento de energía y electrónica de consumo. Es apreciado por su **alta seguridad, estabilidad térmica, larga vida útil y bajo impacto ambiental**.

Se produce a partir de carbonato de litio, que se mezcla con reactivos que contienen hierro y fosfato y se hacen reaccionar en caliente para formar el LiFePO_4 .

Durante el trabajo en la planta piloto se replicaron experiencias en laboratorio para obtener dicho producto, tomando una muestra de concentrado post evaporación (de la planta) a aproximadamente 5000 ppm de litio y pH=4. La misma se filtró y se llevó a pH=11; luego se observó el cambio de color de transparente a blanco, se dejó en reposo para decantación y se observó la separación de fases, precipitando hidróxido de magnesio (fase inferior blanco, fase intermedia transparente y fase superior cristales); se extrajo la parte transparente y se filtró, se le añadió desoxina trimax (desoxidante, fosfatizante) produciéndose una reacción exotérmica, el químico se agregó hasta

cesar la reacción obteniéndose como producto final el fosfato de litio Li_2PO_4 . De esta manera se comprueba la posibilidad de obtención de este producto, considerando los cambios pertinentes en caso de escalarlo a proceso piloto o industrial.

Este proceso permite sintetizar un precursor clave para baterías LFP, un mercado global en expansión. Si bien en Formosa no existen fabricantes de baterías, sí hay empresas interesadas en precursores y un mercado nacional creciente vinculado a electromovilidad. La producción puede orientarse a exportación o a cadenas de valor emergentes en Argentina (Jujuy, Catamarca, Buenos Aires). Es una alternativa de alto valor agregado y con demanda asegurada a nivel nacional e internacional. Los detalles del análisis económico-financiero para este producto se encuentran en el Anexo 2.

6.6. Agua para calderas (DLE + RO)

Genera agua de alimentación para calderas industriales, reduciendo incrustaciones y consumo energético. En el NEA operan industrias alimentarias, papeleras, textiles, refinerías y hospitales que utilizan vapor y requieren agua tratada. La demanda es estable y el servicio puede ofrecerse tanto a plantas industriales como a contratistas de mantenimiento. Es una alternativa de rápida adopción y retorno atractivo.

6.7. Agua para torres de enfriamiento (DLE + RO)

Produce agua de aporte con baja dureza y sólidos disueltos, permitiendo aumentar ciclos de concentración y reducir purgas. El mercado regional incluye hospitales, shoppings, edificios públicos, cervecerías, embotelladoras y plantas industriales con sistemas HVAC. La demanda es transversal y creciente, especialmente en instalaciones que buscan reducir costos operativos y consumo de agua.

6.8. Agua para industria química y farmacéutica (alta pureza)

Genera agua purificada o ultrapura mediante RO, EDI y pulido final. En Formosa y provincias cercanas existen laboratorios cosméticos, farmacéuticos, hospitales y universidades que requieren

agua de alta calidad para formulaciones, limpieza y ensayos. Aunque el mercado es más pequeño, es de alto valor y con barreras de entrada que favorecen la diferenciación.

Estas tres últimas propuestas expuestas por el equipo Aspire Consulting (ver anexo 3) confluyen en la instalación de una planta de tratamiento de agua multipropósito que pueda tomar diversas fuentes de agua (agua de formación, efluentes industriales) y producir agua de alta calidad para la venta a clientes industriales. Este modelo de negocio se basa en la creciente necesidad de las industrias de asegurar un suministro de agua confiable y de alta calidad, al tiempo que cumplen con regulaciones ambientales más estrictas. En la tabla 23 se detallan los dos productos potenciales a obtener.

Tabla 23

Alternativas para uso de Planta piloto

Equipo	Función en el Nuevo Proceso	Productos y Mercados Potenciales
Unidad DLE (Intercambio Iónico)	Ablandamiento y Purificación Primaria: Remoción de dureza (Ca^{2+} , Mg^{2+}) y otros iones específicos que son perjudiciales para ciertos procesos industriales.	Agua para Torres de Enfriamiento: Previene incrustaciones y mejora la eficiencia. Agua para Agricultura de Alta Tecnología: Evita la obstrucción de sistemas de riego por goteo.
Equipo de Ósmosis Inversa (OI)	Desalinización y Producción de Agua de Alta Pureza: Produce agua con muy bajo contenido de sales, ideal para procesos industriales sensibles.	Agua de Alimentación para Calderas: Evita la corrosión y la formación de depósitos, mejorando la seguridad y la eficiencia energética. Agua para la Industria Química y Farmacéutica: Cumple con los estrictos requisitos de calidad para la producción de químicos y medicamentos.

Finalmente se presenta en la tabla siguiente una matriz de decisión contemplando los aspectos clave para cada alternativa.

Tabla 24

Matriz de decisión de alternativas para Planta Piloto.

Alternativa	Viabilidad técnica	Inversión requerida	Demanda de mercado / necesidad	Retorno potencial	Impacto regional / operativo
1. Tratamiento de salmueras con TPH	Alta	Media	Alta (cumplimiento normativo)	Alta	Alta (reducción de costos internos)
2. Producción de NaCl/KCl (sector ganadero, subproducto de salmueras)	Media	Media	Media (uso rural y nutrición animal)	Media	Media
3. Desmineralización y reúso de agua (incluye uso doméstico)	Alta	Media	Alta (industria + campamento)	Alta	Alta (mejora operativa y ahorro logístico)
4. Centro de investigación universitario	Alta	Baja	Media (instituciones locales)	Media	Alta (impacto social y formativo)
5. Producción de fosfato de litio (Li_3PO_4)	Alta	Alta	Alta (mercado nacional e internacional)	Alta	Alta (valor estratégico)
6. Agua para calderas	Alta	Media	Alta (industria regional)	Alta	Alta
7. Agua para torres de enfriamiento	Alta	Media	Alta (HVAC y refrigeración industrial)	Media/Alta	Alta
8. Agua para industria química/farmacéutica	Alta	Alta	Media (laboratorios y hospitales)	Alta	Media

X. RIESGOS Y SUPUESTOS

Riesgos identificados:

Persistencia de hidrocarburos:

Durante el 2024 se realizaron dos análisis en el laboratorio externo Alex Stewart (ver informe en anexo 8) con el fin de evaluar la presencia de hidrocarburos. Parte de los resultados se expresan en la siguiente Tabla 25 que hacen referencia al mismo punto de muestreo de diferentes días durante junio y agosto de ese año. Se puede observar que en junio del 2024 existía una concentración elevada de Hidrocarburos totales de petróleo presentes, y que hacia agosto de ese año la concentración resultante disminuyó hacia el mínimo detectable por el método. La diferencia radica en que en un

principio el agua de formación a tratar ingresaba directamente al proceso sin un reposo previo, mejora implementada previo a realizar el segundo muestreo.

Tabla 25

Antecedentes de TPH

		Fecha del informe		25/6/2024	20/8/2024
Muestra	Punto de muestreo	Tipo de muestra	TPH mg/l	TPH mg/l	
A3A01 /A1	TK21	Salida tk 21	18,5	<0,5	
A3A02 /A2	TK21	Salida tk 21	17,4	<0,5	
A3A03 / A3	TK22	Salida tk 21	41,8	<0,5	
			SIN REPOSO	CON REPOSO	

Si bien la concentración previa a retomar el presente proyecto indicaba una concentración mínima de hidrocarburos totales de petróleo, no determinaba que puedan surgir cambios en la misma. Por lo tanto, se realizó un seguimiento de los diferentes puntos de muestreo a lo largo del proceso con el fin de evaluar la cantidad de tph presentes, eficiencia de remoción de los sistemas filtrantes, y posibles mejoras a implementar.

De acuerdo con los resultados expresados por el laboratorio externo Alex Stewart correspondiente a informes del 15/09/25 y 24/10/25 (Anexo 8). En la Tabla 26 se resumen y comparan los resultados de los ensayos, los mismos muestran una concentración menor a 0,5mg/l de hidrocarburos totales de petróleo (límite inferior detectable por el método) en todos los puntos. Es decir, con el reposo del agua de formación disminuye la concentración de hidrocarburos presentes revalidando la implementación de esta etapa.

Tabla 26

Concentración de TPH para diferentes puntos. Resultados correspondientes a informes del 15/09/25 y 24/10/25 Laboratorio Alex Stewart. Anexo 8.

			15/9/2025	24/10/2025
Muestra	Punto de muestreo	Tipo de muestra	TPH mg/l	TPH mg/l
A1	TK21	Salida tk 21	<0,5	<0,5
A3	TK21	Salida tk 21 a los 10'	<0,5	
B1	FL-3	Salida vellón (post triple filtración)	<0,5	<0,5
B3	FL-3	Salida vellón (post triple filtración) a los 10'	<0,5	
C2	TK001	Salida Tanque calentamiento	<0,5	<0,5
C3	TK001	Salida Tanque calentamiento a los 10'	<0,5	
	TK003	Eluato		<0,5
	TK005	Post concentrado ósmosis		<0,5
	2 FL-1	Salida 1º Filtro carbón		<0,5

Sin embargo, se detecta aroma a hidrocarburos a la salida de las resinas (eluatos), lo que indica que no se logra su remoción completa.

Se destaca que, considerando las jornadas de trabajo realizadas para el presente proyecto, las membranas de la ósmosis de concentrado de litio no mostraron daño aparente por la presencia de hidrocarburos, constatado por el proveedor BHY durante su visita en la semana del 10 al 13/11 Véase Anexo 9. Esto no indica que a un plazo de uso mayor no se generen alteraciones en las mismas y/o disminución de su rendimiento.

Para una evaluación complementaria se enviaron muestras al laboratorio de BHY con el fin de determinar Hidrocarburos totales y los compuestos volátiles BTEX (Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno). En la tabla 27 se resumen los resultados informados.

Tabla 27

Resumen de resultados análisis TPH y BTEX del laboratorio de BHY

Fecha de muestreo: 13-11-25

Muestra	Punto de muestreo	Tipo de muestra	TPH	BTEX			
			Hidrocarburos totales (mg/l)	Tolueno mg/l	Benceno mg/l	Etilbenceno mg/l	xileno mg/l
M5	TK21	tk21- PUNTO MEDIO- ADF	13	0,0765	0,8447	0,0034	0,0332
M4	FL-3	FL-3 Salida filtro vellón	19	0,0366	0,4173	0,0016	0,0141
M1	TK001	ADF en tanque de calentamiento	12	0,0271	0,3196	0,0012	0,011
M3	FL-4	salida filtro 4 previo a las columnas	18	0,0274	0,3333	0,0011	0,0097
M6	TK019	ELUATO q2	2	ND	0,0004	ND	ND
M2	tk005	Concentrado post RO	8	ND	ND	ND	0,0005

Podemos observar que el ADF a procesar ingresa con una concentración apreciable de TPH a diferencia de los resultados expresados por el laboratorio Alex Stewart. La concentración de hidrocarburos totales presenta un comportamiento variable: a la salida del tk21 presenta 13 mg/l; a la salida de la triple filtración aumenta su concentración a 19 mg/l, luego disminuye nuevamente a 12 mg/l en el tanque 001 de calentamiento, lo cual puede deberse a que por el aumento de temperatura se volatilice alguna fracción; y vuelve a aumentar a 18 mg/l. El aumento de la concentración a la salida de los filtros de vellón FL-3 Y FL-4 puede estar indicando la necesidad de cambio del lecho filtrante, recordando que sólo se realizaba el cambio cuando se encontraba visiblemente afectado.

Como es de esperar el eluato Q2 tiene una concentración baja de TPH de 2 mg/l (en comparación con las demás muestras) lo que puede estar indicando que: queda principalmente retenido en la resina y/o se elimina con la salmuera agotada. Al ingresar a la RO este valor aumenta nuevamente su concentración. Este es un problema importante a la hora de considerar el uso futuro del equipo ya que podría ocasionar daños a la membrana. Por otra parte, la presencia de los compuestos volátiles también es un indicador para considerar por la misma razón.

Tabla 28

Cuadro resumen de resultados de TPH para los diferentes puntos de muestreo y laboratorios

Concentración de TPH mg/l							
Punto de muestreo	Laboratorio	Alex Stewart				BHY	Y-TEC
	Detalle/Fecha	25/6/2024	20/8/2024	15/9/2025	24/10/2025	13/11/2025	
TK21	Salida tk 21	18,5	<0,5	<0,5	<0,5	13	<5
		17,4	<0,5				
		41,8	<0,5				
	Salida tk 21 a los 10'	SIN REPOSO	CON REPOSO	<0,5			
FL-1	Salida 1° Filtro carbón				<0,5		
FL-3	Salida vellón (FL-3)			<0,5	<0,5	19	
	Salida vellón FL-3 a los 10'			<0,5			
TK001	Salida Tanque calentamiento tk001			<0,5	<0,5	12	
	Salida Tanque calentamiento tk001 a los 10'			<0,5			
FL-4	salida filtro 4 previo a las columnas					18	
TK003	Eluato				<0,5	2	
TK005	Post concentrado ósmosis				<0,5	8	

Tabla 29

Tabla comparativa de resultados para análisis BTEX de laboratorio BHY e Y-TEC

Muestra de Salmuera salida del FL-3 filtro vellón		
	Laboratorio BHY	Laboratorio Y-TEC
Tolueno mg/l	0,0366	0.04
Benceno mg/l	0,4173	0,47
Etilbenceno mg/l	0,0016	ND
xileno mg/l	0,0141	ND

ND: no detectable

Presencia de Parafinas: la potencial presencia de compuestos de parafinas (alcanos saturados) podría afectar al proceso de nanoburbujas y también a la eficiencia del proceso de adsorción selectiva (por taponamiento de espacios porosos). Teniendo en cuenta que el análisis de TPH indica la carga total de hidrocarburos, es probable que existan en dicha fracción este tipo de compuestos, además de los BTEX.

Presencia de óxido de hierro: el contacto de la salmuera con las cañerías, accesorios y equipos metálicos, generan la aparición permanente de óxido que daña y contamina el fluido del proceso agregando impurezas. Tomando los resultados del laboratorio externo Alex Stewart (*Informe del 24/10/2, Anexo 8*) obtenidos del muestreo para el balance de masa se puede observar en la Tabla 30 que el agua de formación (ADF, muestra A1) ingresa con una concentración de 6mg/l de Hierro, esta concentración disminuye a un valor menor a 0,3 mg/l en los eluatos Q2 y Q3 muestras A4 y A5 respectivamente, donde Q2 es el que, posterior a su oxigenación se procesa por ósmosis inversa. En las siguientes etapas del proceso vuelve a aumentar la concentración de hierro presente, y esto es atribuible tanto a la presencia de óxido presente en los diferentes tanques y serpentín de calentamiento, como al óxido desprendido de las cañerías de vapor y arrastrado por el mismo hacia el concentrado (tanque 9, reactor con calentamiento de vapor directo).

Tabla 30.

Presencia de hierro en puntos del proceso. Informe 24/10/25 Alex Stewart- Anexo 8

Fecha del informe 24/10/2025

Muestra	Punto de muestreo	Tipo de muestra	Fe (mg/l)
A1	TK001	ADF	<6.0
A2	TK006	Salmuera agotada (adsorción)	<6.0
A3	TK004	Q1 eluato	<6.0
A4	TK003	Q2 eluato	<0.3
A5	Tk blanco 200l	Q3 eluato	<0.3
A6	TK005	Concentrado RO	<6.0
A7	TK007	Concentrado pre carbonatación	<6.0
A8	TK010	Sobrenadante post carbonatación	<6.0
A9	TK017	Agua dulce del Potrillo	<0.3
A10	TK017	Agua rechazo de agua demi	<0.3
A11	TK016	Agua demi	<0.3
A12	TK002	Agua litiada	<0.3

Dependencia de equipamiento especializado: El seguimiento y control del proceso con el instrumento Turbospec, resulta esencial. Las mediciones reflejan baja precisión a bajas concentraciones, generando cierta incertidumbre en la caracterización de salmuera, eluatos, perfiles de adsorción/elución y preparación de agua litiada. En búsqueda de soluciones se mantuvieron reuniones virtuales con el proveedor y se realizaron diferentes ensayos con el equipo a fin de determinar las causas de estas. Se concluye que si bien existen factores físicos que puedan generar ciertos errores en las mediciones, la unidad presenta altas desviaciones a bajas concentraciones dado que no fue diseñado para tal fin. Realizar una calibración del equipo resultó innecesario dado que carecería de mejora alguna. Se espera poder adquirir una nueva actualización (dispuesta en el mercado en diciembre 2025).

Limitaciones de filtrado: el sistema de filtros requiere ajustes continuos (lavados, reemplazos de vellón y carbón activado). Un mal protocolo de mantenimiento puede comprometer la eficiencia de remoción.

Supuestos considerados:

- Se mantendrán las concentraciones de litio dentro de los rangos reportados por laboratorios externos.
- Los equipos de ósmosis, evaporación y carbonatación continuarán operativos tras mantenimientos preventivos planificados.
- Los insumos y reactivos (ácidos, carbón activado, membranas, etc.) estarán disponibles en tiempo y forma para la continuidad de los ensayos.

XI.CONCLUSIONES

Síntesis de resultados

Se logró la **puesta a punto de equipos, acondicionamiento de salmueras y ensayos de procesos clave** (adsorción, elución, concentración y carbonatación), con protocolos periódicos de funcionamiento, acondicionado y limpieza para mantener las condiciones óptimas operativas.

Se evidencian **desafíos técnicos en la remoción de hidrocarburos y control de corrosión**, que requieren estrategias complementarias (nanoburbujas, protocolos de mantenimiento, seguimientos con análisis).

El equipo de planta fue capacitado en todas las operaciones, desde los trabajos de laboratorio hasta los procesos a escala piloto, con la obtención final de carbonato de litio, lo cual permitió obtener una formación adecuada y completa del personal.

La estimación de reservas muestra que existe **potencial de producción de litio en la provincia**, aunque decreciente hacia 2040, lo que refuerza la necesidad de procesos eficientes y optimizados.

Se realizaron diferentes ciclos y pruebas de producción. Se establecieron y documentaron parámetros operativos (condiciones de temperatura, caudales, conductividad, tiempos, etc.) para las diferentes etapas a fin de realizar los cálculos pertinentes.

Se comprobó la viabilidad técnica del proyecto con la obtención de 6 lotes de producción obteniendo carbonato de litio y validando la factibilidad técnica del proceso.

Se realizó el balance de masa con los datos de los diferentes ciclos para estimar la cantidad de carbonato de litio a obtener en las condiciones actuales.

Conclusiones de los equipos de expertos

Mining Advisory Service:

El estudio de prefactibilidad actualizado del Proyecto Palmar Largo confirma que, mediante tecnologías de extracción directa de litio (DLE), **es técnica, económica y ambientalmente viable**, tanto para la producción de carbonato de litio equivalente (LCE) como para su conversión a fosfato de litio como producto intermedio o final, según la estrategia comercial adoptada.

Desde el punto de vista técnico, la alternativa de producción de carbonato de litio presenta un esquema de proceso más simple y maduro, con menor número de etapas unitarias y un consumo de reactivos relativamente acotado. Esta opción permite una puesta en marcha más rápida, menores riesgos operativos iniciales y una integración directa con la infraestructura petrolera existente, consolidándose como una ruta base robusta para la monetización temprana del litio recuperado por DLE.

Bajo el desarrollo de los balances con los datos obtenidos en la planta piloto y del laboratorio externo concluye que los costos de la planta piloto están dominados por los consumos térmicos y mano

de obra. Esto ocurre porque: La escala es extremadamente pequeña, la evaporación se realiza sin recuperación de calor, no existen evaporadores multi-efecto, la operación requiere supervisión manual. Por lo tanto, la unidad piloto cumplió con sus objetivos ya que está destinada a validación química y no a producción. Se realiza entonces una extrapolación a un diseño industrial partiendo de los datos de una planta piloto, pero se optimiza el esquema energético reemplazando gasoil por tecnologías más eficientes (gas natural y esquema híbrido solar térmica + gas). Se incorporan a los análisis evaporadores de múltiple efecto y una Ósmosis inversa de doble paso.

El análisis económico–financiero se realiza sobre la proyección industrial e indica que resulta económicamente viable bajo escenarios conservadores de precios. Para una una producción anual estabilizada de 330 toneladas de Li_2CO_3 (considerando 330 días de operación anual) La TIR del proyecto es de un 22%. Realizando un análisis de sensibilidad con precios entre 8.000 y 25.000 USD/t, los resultados muestran que el margen, el margen anual y el VAN se mantienen positivos en todo el rango evaluado, indicando la rentabilidad del proyecto.

El consultor extiende su análisis al uso de GLP como combustible de caldera, combinado con un sistema de evaporación multi-efecto, permite un consumo energético moderado y controlable, compatible con la escala industrial del proyecto. El costo del combustible (10.000-13.500 U\$D/mes) representa una fracción acotada del OPEX total y resulta técnicamente defendible para una planta ubicada en una zona remota como Palmar Largo, Formosa. Ver Anexo 2. Por otra parte, introduce un costo total de automatización de entre 1,16 – 1,43 millones USD, equivalente a aproximadamente 10–15 % del CAPEX total de planta, lo que acompaña a la necesidad de personal operativo, disminuye la variabilidad de costos, mejora la estabilidad de calidad del producto y aumenta la previsibilidad del flujo de caja, impactando positivamente en el VAN y la TIR del proyecto.

Desde el punto de vista ambiental, mantiene ventajas significativas frente a esquemas tradicionales de evaporación, destacándose por su baja huella territorial, ausencia de evaporación

masiva de salmueras, nulo consumo neto de agua dulce y localización en un entorno industrial previamente intervenido. En el plano social, presenta impactos positivos, vinculados a la generación de empleo calificado, la contratación de servicios locales y la transferencia de capacidades técnicas. A su vez, el consultor desarrolla el análisis financiero del Fosfato de litio y compara las ventajas de este producto frente al carbonato de litio en estudio. Se adjunta el informe completo en Anexo 2.

Aspire Consulting

La composición del agua de formación es el factor más crítico para la viabilidad del proyecto. La concentración promedio de litio del ADF se encuentra en el rango técnicamente procesable, pero está por debajo del umbral de 100 mg/L que la literatura especializada considera como óptimo para garantizar la rentabilidad de proyectos de extracción de litio a partir de salmueras geotérmicas o de formación.

El principal desafío técnico reside en la alta concentración de impurezas que acompañan al litio (calcio, magnesio, potasio) lo que complica significativamente el proceso de purificación. Además, la presencia de hidrocarburos introduce una variable adicional que debe ser gestionada para evitar el ensuciamiento de las resinas de intercambio iónico y otros equipos del proceso.

Las pruebas realizadas en la planta piloto sobre el sistema de extracción directo han demostrado que la eficiencia global del proceso, actualmente en un 17%, está muy por debajo de los estándares industriales, que se sitúan entre el 65% y el 80%. Esta brecha se debe principalmente a dos factores: cinética de elución incompleta y a un diseño Hidráulico del Lecho Adsorbente con posible existencia de canalizaciones que limita la transferencia de masa, reduciendo la eficiencia del contacto salmuera/resina.

La unidad de Ósmosis Inversa utilizada muestra un buen desempeño en términos de selectividad, con un rechazo de sales del 95.5%. No obstante, la recuperación de litio en esta etapa es

de solo el 54.3%, lo que indica que una cantidad significativa de litio se pierde en la corriente de permeado. La optimización de la recirculación y el punto de corte son cruciales para mejorar este indicador.

El informe concluye que es factible obtener carbonato de litio grado técnico (>99.3% de pureza) a partir de esta salmuera. Sin embargo, alcanzar este nivel de pureza requerirá un tren de purificación complejo y costoso, compuesto por múltiples etapas para la remoción de las diversas impurezas presentes en la salmuera. La secuencia de purificación propuesta incluye:

- Remoción de Hidrocarburos: Mediante skimmers, coalescedores y filtros de carbón activado.
- Remoción de Dureza (Ca^{2+} y Mg^{2+}): A través de precipitación química y/o intercambio iónico.
- Remoción de Boro y Metales Pesados: Utilizando resinas de intercambio iónico selectivas y procesos de oxidación/precipitación.
- Concentración y Purificación Final: Mediante una combinación de nanofiltración, ósmosis inversa e intercambio iónico para alcanzar la pureza final requerida.

El análisis económico del proyecto revela un panorama desafiante que condiciona su viabilidad comercial. La evaluación financiera, basada en una planta de 300 TPA, arroja los siguientes resultados: Bajo los supuestos actuales de costos y precios, el proyecto no es económicamente viable. El análisis de flujo de caja descontado a 16 años, utilizando una tasa de descuento del 15%, muestra un Valor Actual Neto (VAN) negativo de -\$12.8 millones y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 8.2%, la cual no supera el costo de oportunidad del capital. El período de recupero de la inversión excede el horizonte de evaluación del proyecto.

La viabilidad del proyecto es extremadamente sensible a tres variables clave, que representan los mayores riesgos y, a la vez, las mayores oportunidades de mejora: precio del Carbonato de Litio; costos de Operación (OPEX) e inversión de Capital (CAPEX)

El proyecto *podría alcanzar la viabilidad* bajo ciertas condiciones de optimización y estrategia de implementación:

- ✓ Escenario de Optimización Agresiva: Una combinación de reducción del 30% en CAPEX, 25% en OPEX y un aumento del 30% en los ingresos (precio del litio) resultaría en un proyecto viable, con un VAN de \$4.82 millones y una TIR del 18.5%.
- ✓ Escenario de Desarrollo por Fases: Implementar el proyecto en dos fases, comenzando con una capacidad del 60% y un 50% de la inversión inicial, también se presenta como un escenario viable. Esta estrategia permite reducir el riesgo inicial, validar la tecnología a una escala intermedia y generar flujos de caja antes de comprometer la totalidad de la inversión. Este escenario arroja un VAN de \$2.15 millones y una TIR del 15.7%.

Conclusión integrada

Durante los cuatro meses de duración de este proyecto se logró poner en funcionamiento la planta piloto de extracción de litio en su totalidad, incluyendo todas las operaciones unitarias instaladas que tuvieron como único fin la obtención del carbonato de litio. Además de lograr obtener los datos referidos a los procesos necesarios para realizar balances y estimaciones, durante las diferentes jornadas se pusieron en manifiesto problemáticas y puntos críticos a mejorar en caso de decidir poner en funcionamiento la planta piloto (para otros estudios y/o con alternativas de producción) o de llevar a otra escala el proyecto actual. A continuación, se detallan los mismos:

✓ Presencia de Hidrocarburos:

A pesar de que con el reposo del tanque 21 y el proceso de triple filtrado se ha mejorado la calidad del agua de formación (disminución de concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo) a

un mínimo detectable según análisis del laboratorio Alex Stewart e Y-TEC; esto no implica la nulidad de esta. Se constató (por resultados del laboratorio BHY) la presencia de hidrocarburos en diferentes puntos del proceso como resultado de la acumulación constante durante los ciclos, valor que toma sentido teniendo en cuenta que la corriente de agua de formación a procesar para extraer el litio es 7,4 m³ de ADF por kg de carbonato de litio de acuerdo con las experiencias realizadas en la planta piloto. Estos puntos corresponden principalmente a procesos de filtración (FL-3 previa adsorción y FL-4 post elución) donde parte del vellón, fue reemplazado en proporciones pequeñas, según apreciación visual de apariencia. Cabe destacar, que dicho material filtrante (en las condiciones de cambio mencionados) implica un costo importante del proceso y, por ende, un mayor reemplazo aumentaría considerablemente los mismos. Al mismo tiempo, conocer el tiempo estimado de duración eficiente del vellón involucra la necesidad de enviar muestras al laboratorio con mayor frecuencia. (ver punto IX Riesgos y Supuestos)

Es importante destacar que, mediante el análisis de estabilidad de la resina realizado por Y-TEC (anexo 4), se deduce que la resina no se ve afectada en el corto a mediano plazo por la presencia de TPH, pero deberá evaluarse en un largo plazo la necesidad de recambio del material adsorbente por influencia de hidrocarburos o parafinas debido al elevado volumen de ADF procesado.

Por otra parte, de acuerdo con el último informe del laboratorio de BHY, se reportaron valores de TPH no adecuados para las membranas del equipo de ósmosis inversa. A pesar de lo anterior, *“el equipo se encuentra funcionando en parámetros de diseño, produciendo una calidad de agua acorde”* según la evaluación del proveedor durante la segunda semana de noviembre. Véase anexo 5. En este caso la influencia de costos viene asociado a considerar en los presupuestos pertinentes la limpieza química bianual realizada por BHY, los productos químicos de tratamiento y el volumen de agua demi necesarios para lavar el equipo al finalizar los ciclos de concentración (necesario para su operación eficiente).

Como posibles soluciones a lo anterior encontramos:

Incorporar el equipo de nanoburbujas (véase anexo 4) a la salida del tanque 21 previo al ingreso a las columnas. Esto permitiría la degradación casi completa de los TPH, permitiendo disminuir la necesidad de recambio constante del material filtrante (principalmente vellón). Además, este dispositivo permitirá, mediante reacciones oxidación-reducción la precipitación de diferentes compuestos. También ofrece otras ventajas como optimizar la remoción de finos, coloides y especies parcialmente oxidables; reducir el ensuciamiento de los filtros y del adsorbente, convirtiéndose en una excelente operación de mejora para el pretratamiento. Llevar el equipo a escala industrial deberá incluir el análisis de dimensionamiento adecuado a los nuevos parámetros; a modo general se considera que, si se instala la unidad como pretratamiento de ADF (previo a la etapa de triple filtrado), se incorpora la necesidad de agregar al proceso más tanques de alimentación (además del tk21) o alguno de mayor volumen que permita un reposo previo a la alimentación (suponiendo que la escala industrial requiere un volumen de ADF de $3000\text{m}^3/\text{día}$). Como alternativa a esto último, la segunda opción implica posicionar el equipo para tratar el eluato Q2, con esto se elimina la necesidad de incorporación de los nuevos tanques y conexiones adicionales, pero en consecuencia carga con un aumento de costos atribuidos al material filtrante y recambio de resina por afectación de los TPH presentes en el agua de proceso. La primera alternativa involucra una mayor inversión y costos operativos de material filtrante y resina menores, mientras que la segunda aporta un costo operativo mayor, pero la inversión (por la dimensión del equipo de nanoburbujas) es menor. Para mayor precisión se deberá realizar el análisis económico necesario, además de evaluar en mayor detalle si resulta apropiado el nuevo dimensionamiento de la unidad de nanoburbujas a escala industrial.

✓ **Instalaciones industriales, equipamientos y presencia de oxido:**

Una de las primeras problemáticas que se hicieron presente en este proyecto, fue la gran presencia de óxido. Esto se presenta en casi la totalidad de la planta desde el tanque de provisión

de ADF (tk21) hasta llegar a los procesos más críticos de concentración por evaporación, con excepción de las columnas de extracción de litio donde las conexiones son plásticas. El material de construcción tanto de cañerías de agua de formación, de vapor, de agua de proceso, tanques y otros, son de material de acero galvanizado pintado, lo cual promueve la generación de óxido. Como solución provisoria a fines de poder cumplir con los objetivos de este proyecto se implementaron protocolos y procedimientos con el fin de reducir la presencia de óxido. Estos incluyeron, recirculación de agua de formación sin pasar por los filtros (para no arrastrar la contaminación a estos equipos) previo a realizar el triple filtrado y recirculación de vapor para purgar las líneas. Si bien esto ayuda con el problema mencionado, el ADF y eluatos del proceso se vuelven a contaminar debido a la condición de los tanques, y los sistemas de calentamiento por vapor directo.

En caso de considerar la utilización de la planta piloto o cualquier procesamiento futuro de agua de formación, se deberá cambiar el material mencionado en todas las instancias atendiendo a las condiciones de la salmuera. Llevar el proceso a escala industrial requiere especial atención, consideración e inversión necesaria para este punto. Se deberá analizar el material más adecuado, no sólo en cuanto a costos, sino también a resistencia térmica y mecánica.

Otro punto a tener en cuenta es la necesidad de contar con un sistema colector de efluentes, tanto en la planta piloto como para el nuevo diseño industrial, dado que principalmente durante la etapa de evaporación (considerando el equipo actual utilizado) se obtiene gran cantidad de sal que se debe descartar para iniciar nuevos procesos. Su descarte sobre la base de la planta o sobre el suelo resulta altamente perjudicial para las estructuras como así también para el medio ambiente. Misma situación ocurre con el agua de lavado, y el derrame de ADF.

✓ **Precisión en la medición de concentración de litio en proceso.**

El equipo utilizado Turbospec e-400 presenta desviaciones elevadas (carece de exactitud y poca precisión) en las mediciones de bajas concentraciones (menores a 1000 ppm de Li y aún mayor por debajo de 100 ppm). Esto se pudo corroborar en diferentes instancias por comparación con los resultados de laboratorio de Alex Stewart (véase anexo 8.). Se realizaron dos reuniones con el proveedor y titular de la empresa, Pablo Prado, y luego de analizar la información proporcionada, mencionó que la unidad utilizada fue diseñada para medir a altas concentraciones por lo tanto es esperable tener un error de aproximadamente el 20% a concentraciones menores además de tener en cuenta otros factores que pudieran alterar las mediciones como por ejemplo las condiciones en las que se encuentra el material para tomar las muestras (tubos de vidrio). A su vez enunció una serie de recomendaciones a tener en cuenta para trabajar, como ser: posicionar el equipo en una zona y sobre un soporte estable donde no sufra fluctuaciones de viento, vibración, y otras alteraciones físicas; alejarlo de la fuente de alimentación de corriente (el equipo trabaja con campos electromagnéticos sobre los cuales puede influir). La dificultad que genera este punto es trabajar “a ciegas” durante las primeras etapas del proceso: caracterización de salmuera, eluatos, no poder realizar perfiles de adsorción/elución certeros en caso de querer modificar los cortes, y preparación de agua litiada de manera más confiable; y por lo tanto parte de los resultados siempre están sujetos a este error. Aguas abajo del proceso, el equipo presenta mayor precisión por lo tanto los resultados son más orientativos.

De acuerdo con información revelada por el proveedor, recientemente se ha desarrollado una actualización del sistema (para bajas concentraciones) que ya se encuentra disponible para su adquisición comercial. En caso de continuar con ensayos o trabajos en planta, se recomienda la inversión en dicho software para mejorar la confiabilidad de las determinaciones.

Rendimientos de proceso, ciclos de producción

Como consecuencia del punto anterior, por recomendación de los consultores se realizó un muestreo para elaborar el perfil de columnas de adsorción/elución analizada por el laboratorio Alex

Stewart (anexo 8), el cual permitió comprender a ciencia cierta el funcionamiento de una de las columnas en un ciclo completo y sacar conclusiones respecto a los tiempos de producción, puntos de corte, etc. Debido al alto costo del estudio esto pudo realizarse una sola vez y en una sola columna, al no estar incluido en el presupuesto original.

Mediante estos resultados se validó la reducción del tiempo del ciclo de adsorción y elución, dado que, hasta determinado rango de tiempo, se logra adsorber en la columna el litio de manera eficiente. Además, permitió conocer realmente los parámetros de trabajo a bajas concentraciones, al mismo tiempo de comparar los datos del tubospec e-400 con estos.

Se inició con ciclos de adsorción de 12 horas, luego se redujo a 10, 8 y finalmente 6hs, tiempo que se ajustó con el análisis de las curvas realizadas en el laboratorio de planta y se revalidó con el perfil mencionado recientemente. También se realizó un ciclo de 7hs de adsorción (por análisis de las curvas de laboratorio externo) a pedido del equipo consultor Aspiring Consulting (véase anexo 3) para su análisis. Se decidió tomar los ciclos de 6hs para finalizar el estudio económico- financiero de este proceso por las razones mencionadas en el punto 3.5.5 del presente proyecto.

A partir del estudio de los perfiles de adsorción/elución a cargo del consultor realizados en planta, y con la validación de los datos de laboratorio del perfil de columnas se replicaron sucesivos ciclos de adsorción de 6hs y diferentes pruebas y mejoras sobre éste.

Considerando el perfil de columnas del laboratorio externo se realizó el balance de masa para establecer el rendimiento del proceso de adsorción /elución, arrojando un rendimiento de adsorción del 72% y elución del 74%, con un rendimiento global de la operación del 58%. Se debe considerar que este perfil es basado en el análisis de una sola columna.

Por otra parte, para el mismo proceso utilizando los valores promedios obtenidos en la planta se obtuvieron rendimientos de 85% para la adsorción (reflejando la recuperación de litio de la resina),

82,8% para la elución (recuperación del litio adsorbido), concluyendo en una recuperación global del litio alimentado del 70,3%. La operación de RO tiene una recuperación de concentrado del 18% arrojando buenos valores de concentración dependiendo del eluato a procesar, para el caso de estudio se obtuvo una recuperación de litio del 68%. Para el análisis económico se considera el procesamiento de eluatos q2 con el fin de acumular el concentrado de 12 ciclos consecutivos para iniciar su evaporación. Esta operación tiene el objetivo de alcanzar la concentración adecuada para carbonatar (5500-6500 ppm Li mínimo). Considerando los datos prácticos se alcanza luego de 13:48hs de evaporación, se obtienen 207 litros de concentrado. De acuerdo con el balance de masa y molar, se requieren 16,5kg de carbonato de sodio al 85% de pureza para realizar la reacción de carbonatación, y como producto se obtendrían 10,6 kg de producto. De esta masa, 7kg corresponden a carbonato de litio propiamente dicho, la composición restante corresponde principalmente a carbonato de calcio, magnesio, e impurezas solubles. Sin operaciones de purificación previas y lavados posteriores a la filtración final, la pureza del producto se ve altamente comprometida, reduciendo la eficacia y por sobre todo la eficiencia del proceso en general. La pureza del producto ronda entre un 38-60% según cálculos teóricos y validación con resultados de laboratorio.

El análisis de las corrientes Q2, concentrado RO y pre-carbonatación evidencia que, si bien el sistema DLE logra una separación selectiva eficiente del litio, las etapas posteriores de concentración generan una reconcentración significativa de impurezas críticas (B, Ca, Mg, Sr, Ba, Na, K, Cl^- , SO_4^{2-}).

El tren DLE–RO–Evaporación–Carbonatación puede producir Li_2CO_3 grado batería solo si se incorporan etapas específicas de purificación antes de la evaporación, especialmente: Remoción de boro; pulido de dureza (Ca, Mg, Sr, Ba); y si se optimiza la cristalización y recristalización para controlar Na, K, Cl^- y SO_4^{2-} . Ver desarrollo en anexo 1.

Factibilidad técnica y viabilidad económica:

Según el equipo consultor Apire Consulting:

Con base en la realización de 3 ciclos de adsorción de 7hs y elución de 1hs 25', el equipo de Aspire Consulting presentó su respectivo análisis técnico y económico, basándose en el balance de masa de las operaciones de extracción directa de litio (tomando el corte q2 de la elución) y el proceso de Ósmosis Inversa. El rendimiento global para la adsorción-elución es del 17% bajo las condiciones tomadas del proceso, mientras que la ósmosis presentó una recuperación de litio del 54%. Se concluye que es **factible técnicamente** obtener carbonato de litio de elevada pureza siempre y cuando se incluyan sistemas de purificación adecuados para eliminar la elevada cantidad de contaminantes que presenta la salmuera en sus diferentes estadíos. En cuanto a la **factibilidad económica no es viable** bajo los supuestos actuales de costos y precios. El análisis de flujo de caja descontado a 16 años, utilizando una tasa de descuento del 15%, arroja un VAN negativo y una TIR del 8% (menor al costo de capital) indicando que el proyecto no crea valor y no es atractivo desde el punto de vista económico. A su vez plantean diferentes escenarios de viabilidad, que podrían reducir el CAPEX Y OPEX, para generar posibilidades más atractivas. Cabe destacar, que para el análisis económico- financiero realizado el equipo consultor se basó de fuentes secundarias. Ver desarrollo completo del informe en Anexo 3.

Según la consultora Mining Advisory Service:

El consultor Manuel Saravia por su parte, realizó el balance de masa tomando como base de cálculo los datos prácticos de la planta piloto y los resultados expresados por el laboratorio Alex Stewart. Del desarrollo obtiene una recuperación de litio de adsorción/elución del 80%; y una eficiencia global de captación de litio en el producto del 70%. Los resultados del análisis de costos de la planta piloto están dominados por la mano de obra y altos consumos térmicos, debido a que las operaciones no están diseñadas para producir eficientemente (por pérdida de calor, diseños inadecuados etc), por lo que no expresa eficiencia industrial. Asimismo, se indica que estos costos elevados a una escala industrial adquieren una reducción de hasta 15 veces su valor. A pesar de esto

la factibilidad se sustenta en el aprovechamiento de infraestructura existente (pozos petroleros). Considera que el proyecto es **plenamente factible** ya que utiliza corrientes secundarias de agua que ya están siendo bombeadas, eliminando el riesgo minero tradicional. El enfoque planteado es de "ingeniería de diseño", donde los parámetros de recuperación se asumen óptimos. Presenta un VAN a una tasa del 10% de 5,730,242.88 USD, y una TIR del 22.02%; indicando que el proyecto es **financieramente viable**, crea valor, y cumple con los criterios de rentabilidad exigidos.

Análisis y deducciones finales:

Considerando la resolución de todos los puntos críticos enunciados anteriormente se concluye que **es factible técnicamente producir carbonato de litio a partir de agua de formación**. La pureza por obtener y por lo tanto la ganancia a percibir, depende sustancialmente de la mejora del proceso productivo. Esto implica:

- Instalación del equipo de nanoburbujas
- Cambio de todo el material oxidable del sistema o instalación (en caso de escalado industrial
- Adquirir un equipo de medición de litio que permita de respaldo y seguimiento de los procesos.
- Procesamiento de corte Q2, utilización de Q1 para alimentación aguas arriba del proceso (alimentación de adsorción), y Q3 como solución base para preparación del agua litiada (involucra disminución de costos por menor cantidad de agua demi).
- Mejora el sistema de concentración por evaporación: no existen sistemas de recuperación de calor y el contenido de sal arruina el serpentín de calentamiento.
- Incorporan etapas específicas de purificación antes de la evaporación optimización de cristalización y recristalización.

- Analizar la incorporación de un segundo paso de concentración al proceso de ósmosis inversa.
- Seleccionar un equipo de filtración-prensado diferente al filtro prensa en caso de poder operar industrialmente. Para Li_2CO_3 se tiende a preferir: filtros de vacío continuos con buen sistema de lavado, o centrífugas tipo peeler/pusher. (ver anexo 1)
- Diseñar un equipo de secado que permita obtener el producto en condiciones óptimas.

A escala piloto se puede observar en el costeo por menorizado realizado en la experiencia que el costo de la tonelada ronda los U\$S 602.206,31 (considerando la alternativa 2, ver eje 5 del presente informe) el cual tiene en cuenta no solo costos variables sino también costos de carga fabril, administración y otros, por lo que seguir manteniendo en funcionamiento de la planta piloto debe encausar una justificación desde el punto de vista de seguir desarrollando conocimiento y algunos servicios alternativos de aprovechamiento de la tecnología existente.

El experto Manuel Saravia detalla un costeo para la prueba piloto en el cual no contabiliza algunos ítems que consideramos importantes, y en tal sentido hacen la diferencia.

Luego dicho experto realiza un análisis de rentabilidad extrapolando los costos de la situación piloto y otros referidos de la industria debido, a su experiencia y expertís, obteniendo valores de rentabilidad adecuado según su apreciación. Estos valores fueron simulados en una estructura de flujo de fondos (Ver Anexo 1 - Pág. 45 Estructura “Flujo de Fondos MAS Original”) considerando dichos supuestos en el software de simulación Crystall Ball Oracle, el cual realiza un análisis de riesgo probabilístico. Ver Anexo 1 reporte CRYSTAL BALL, “Resultados MAS original” (Pág. 49), con los siguientes resultados probabilísticos respecto a los indicadores de VAN y TIR.

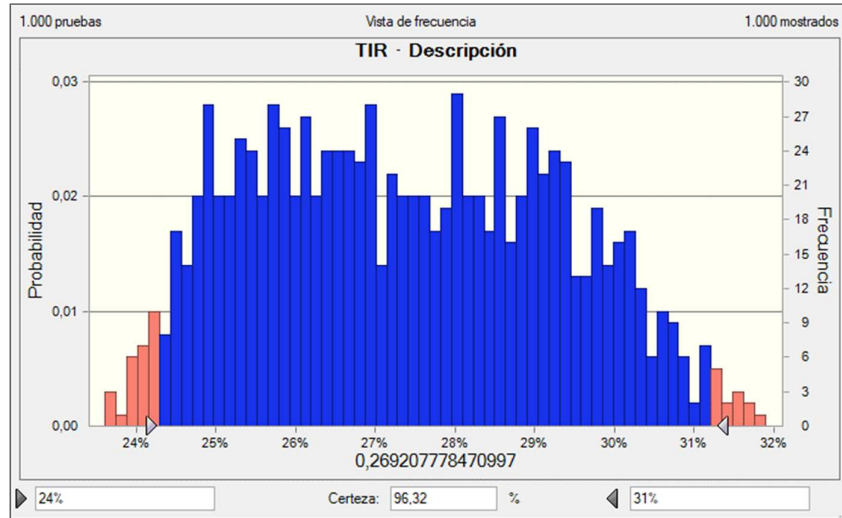


Figura 15

Simulación de TIR según flujo de fondos original de consultora MAS.

Según esta curva de distribución normal, los valores de mayor frecuencia son los que aparecen en el centro de la gráfica, donde podemos interpretar que existe una certeza del 95% dentro del cual los valores reales de la TIR se van a mover entre 24% y 31%. Estos son valores más que satisfactorios para un proyecto de inversión de esta índole, bajo los supuestos considerados.

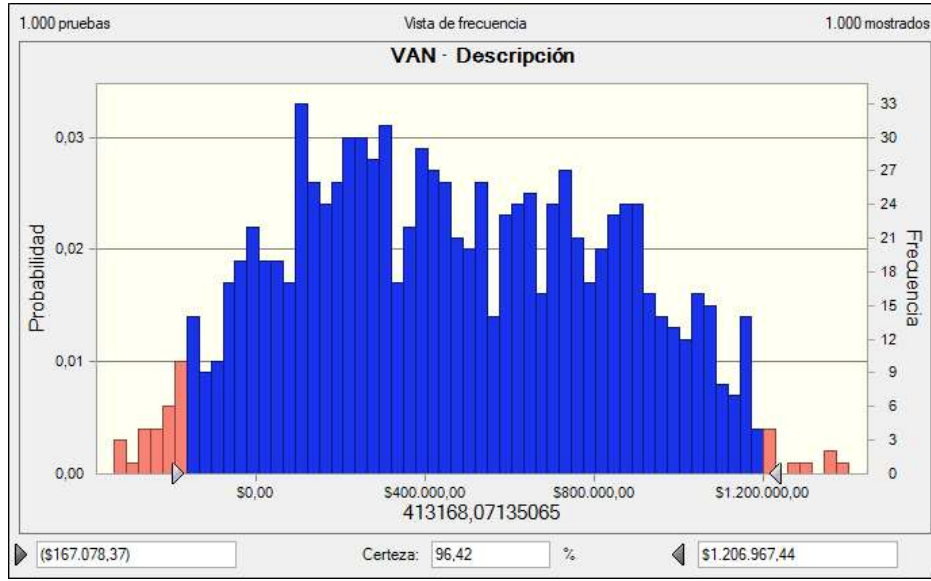


Figura 16

Simulación de VAN según flujo de fondos de consultora MAS.

En el caso del VAN, para un nivel de certeza del 95% entre -\$167078,37 y \$1.206.967,44, donde también que existe alguna probabilidad de que sea negativo indicando la posibilidad de no recuperar la inversión. La tasa de referencia fue del 25% anual.

Así también, este flujo de fondo anterior no incorpora en su estructura el impacto de los impuestos nacionales y provinciales para un proyecto de su tipo, como ser Impuestos a las ganancias (35%), ingresos brutos (3.5%) y regalías por la explotación minera (3%). Otros costos que no incluye esta estructura son los que provienen de trabajar vinculado a la actividad de hidrocarburos, como ser el costo de disponer el agua de formación (ver eje 5 o anexo 1) y el costo de acondicionar para extraer la mayor proporción de los hidrocarburos, como ya se mencionó en la estructura. Asimismo, existe una influencia significativa al incluir el costo del combustible para la generación de vapor, dado que la consultora MAS incluye para su análisis gas natural, el cual no se encuentra disponible en la zona, siendo el combustible competitivo el GLP.

El CAPEX anualizado o depreciación de toda la inversión en activos fijos se prorratea a los 15 años de análisis.

A partir de lo anterior, se ajustó la estructura del flujo de fondos incorporando los siguientes ítems: impuestos nacionales, provinciales y dentro de estos últimos, también los referidos a la actividad minera (regalías), Costos de disposición de ADF (costos de manejo e inyección del ADF de la actividad petrolera), Costos de acondicionamiento del ADF para extraer el hidrocarburo, Costo de Combustible para Generación de Vapor (GLP). Esto se puede corroborar en el ANEXO 1 - Pag.52 Flujo de Fondos MAS Ajustado.

Respecto al Costo de Disposición del ADF se consideró el escenario de menor participación en los costos que son propios de la actividad hidrocarburífera, donde el proyecto litio de la escala industrial asignará un porcentaje mínimo necesario a su estructura de costeo (80% lo asigna a la actividad Hidrocarburífera y el 20% a la actividad Litio Industrial). Ver Anexo 1, pag. 20.

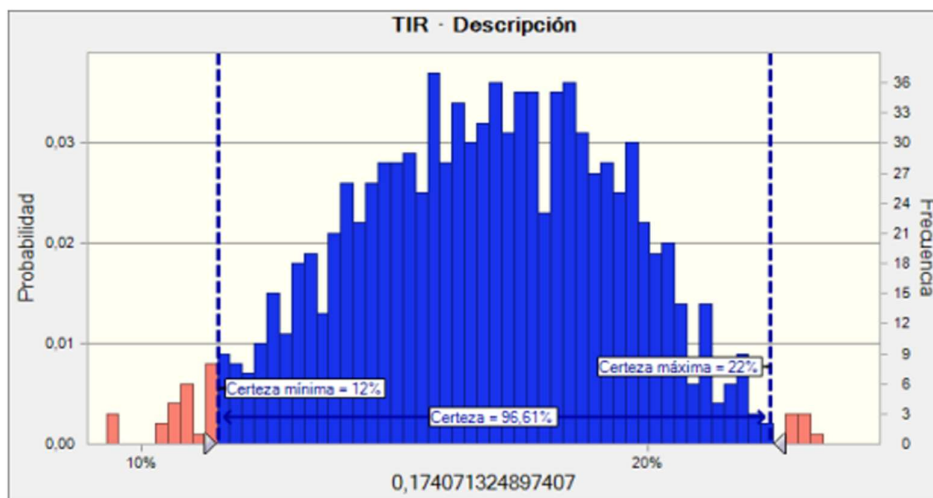


Figura 17
Simulación de TIR según flujo de fondos ajustado.

Podemos interpretar entonces que existe una certeza del 96% que los valores de la TIR bajo estos supuestos se van a mover entre el 12% y 22%, lo cual son valores que comprometen la recuperación de la inversión considerablemente.

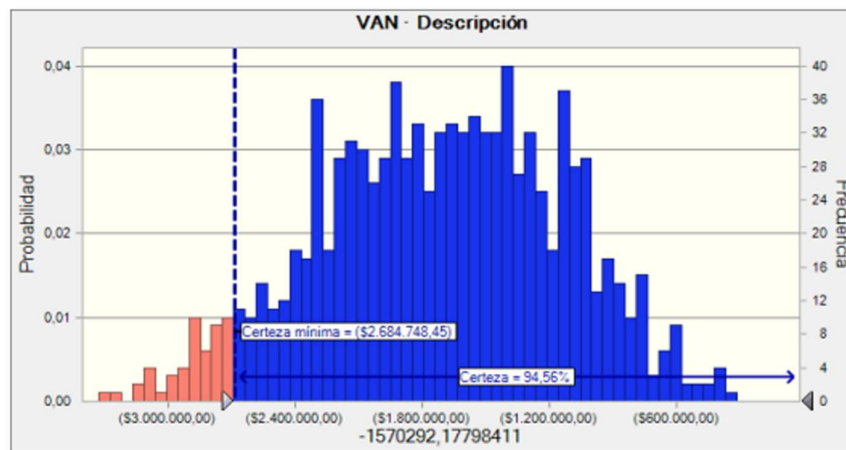


Figura 18

Simulación de VAN según flujo de fondos ajustado.

En el caso del VAN, existe una certeza del 95% de que los valores oscilarán entre (-\$2.684.748,45) y (-\$600.000), y con esto, una alta probabilidad de que sea siempre negativo. La tasa de actualización de referencia es de 25%. Finalmente, existe una alta probabilidad de que no se recupere la inversión.

Para ampliar los escenarios posibles se contempla una **tercera alternativa de análisis** de rentabilidad, con el escenario más desfavorable, en el cual la actividad hidrocarburífera se ve comprometida en su producción (una baja considerable de la producción de crudo) y en este sentido, el costo de disposición del ADF debe ser en gran medida asignado a la planta industrial de litio. Los valores de rentabilidad y recupero de la inversión, son aún más negativos que la anterior corrida.

El 80% de los costos de disposición del ADF deben ser asignado al Proyecto industrial de producción de carbonato de Litio, dejando las demás variables de entradas con los mismos supuestos a la alternativa anterior, donde la actividad Hidrocarburífera mantiene una actividad mínima la cual comparte el 20% del costo, por cuestiones operativas de separación del crudo, gas y agua en el proceso intermedio a la disposición final en la planta de inyección de agua de todos los yacimientos. Se requieren 4,9 m3 ADF / kg de Carbonato de litio, donde el costo de disposición del ADF de formación es de U\$S 1,7 / m3 ADF, esto llevado a costo por tonelada, arroja un valor de U\$S 6.880 / Tn de Carbonato de Litio.

Repasando en la estructura del flujo de fondos (anexo 1, página 58) el costo de producción (antes de impuestos) asciende a U\$S 13.952, comparando con el precio de venta considerado, arroja valores negativos de utilidades con lo cual la rentabilidad y el recupero de la inversión, como se dijo anteriormente, se ven afectados significativamente en comparación a la corrida anterior, poniendo en riesgo la rentabilidad y el recupero de la inversión bajo estos supuestos (VAN= -\$5.711.759,4; TIR= -16%)

Finalmente, **la cuarta alternativa** de rentabilidad considerada es el escenario *más favorable* respecto a las expectativas de precio de venta internacional del Carbonato de litio, el cual según informes recientes podría estar alcanzado valores de U\$S22.000 para el año 2027. Las proyecciones de precios para el año 2025 y su evolución, se cumplieron en la realidad, los cuales fueron evolucionando positivamente (de U\$S8.500 a principios de año, llegando a valores de entre U\$S10.500 y U\$S11.500 actualmente). Se considera el costo de producción más desfavorable correspondiente a la alternativa 3, el cual incluye el costo de disposición del ADF al 80%. Arrojando valores adecuados de los indicadores evaluados: TIR: 26%; VAN: U\$S197.543 (Tasa Actualiz.: 25%), Facturación Anual: U\$S 6.600.000 y PRI (periodo de recupero de la inversión): 4 años. Este último es un escenario positivo y posible si se plantean las condiciones adecuadas.

Reflexión final

La producción industrial de carbonato de litio está estrechamente vinculada a la actividad hidrocarburífera que le da origen. El acceso al litio presente en ADF depende directamente de la operación petrolera; por ello, no resulta viable perforar nuevos pozos con el único objetivo de obtener carbonato de litio, dado el alto nivel de inversión requerido para pozos de 4000 m de profundidad, los rendimientos actuales y los precios vigentes del mercado del litio.

En este contexto, si la producción de hidrocarburos se incentiva —mediante nuevas perforaciones y el aumento de la producción en los pozos existentes—, el sistema productivo de Palmar Largo y de los yacimientos de la zona operaría de manera más eficiente. Bajo los supuestos planteados, la producción industrial de carbonato de litio contribuiría a reducir los costos generales del sistema y generaría una sinergia capaz de aportar beneficios y utilidades suficientes para sostener y expandir la actividad energética de Palmar Largo. Es necesario, por lo tanto, dejar de considerar estas actividades únicamente como “petroleras” y comenzar a abordarlas desde una perspectiva integral de desarrollo energético.

En esta línea, resulta fundamental impulsar inversiones en producción de crudo, evaluar alternativas de agregado de valor mediante refinerías de pequeña escala, y promover inversiones complementarias como la producción de carbonato de litio (y, en el futuro, otras sales). Asimismo, es clave continuar mejorando la eficiencia del sistema mediante iniciativas geotérmicas y otros desarrollos energéticos.

Finalmente, se requiere una estrategia de inversión orientada a consolidar un polo de desarrollo energético basado en conocimiento, innovación y negocios industriales afines, avanzando en el agregado de valor y en la utilización del litio para la fabricación de productos finales y otros bienes y servicios derivados

XII. BIBLIOGRAFÍA

Lithium Harvest. (2025). Direct Lithium Extraction From Produced Water.
<https://lithiumharvest.com/knowledge/produced-water-treatment/direct-lithium-extraction-fromproduced-water/>

Montiel Garza, M. (2019). Metodología para la caracterización del agua de formación en pozos de gas en aguas profundas. Ingeniería Petrolera, 59(3).
<https://biblat.unam.mx/hevila/Ingenieriapetrolera/2019/vol59/no3/2.pdf>

Warren, I. (2021). Techno-Economic Analysis of Lithium Extraction from Geothermal Brines. NREL

XIII. APÉNDICE

Roles y responsabilidades

El equipo de expertos participa en modalidad presencial y remota, asegurando acompañamiento continuo:

- **Manuel Saravia (Coordinador General, Mg. Lic. en Química):** realiza dos visitas técnicas mensuales a planta piloto, lidera la planificación, supervisión de ensayos y definición de lineamientos técnicos.
- **Lucas Mardones (Dr. Ing. en Química):** visitó la planta piloto en septiembre, realizando relevamiento técnico preliminar y aportando a los ensayos de resinas.
- **Mercedes Caprini (Mg. Ing. Química):** participa en modalidad online, aportando experiencia en procesos químicos y diseño de pruebas.

- **Emiliano Silva (Mg. Ing. Electrónica):** asiste de manera remota en el diseño, control y seguimiento de los equipos y sistemas de operación.
- **Nuria Vidal (Dra. Lic. en Geoquímica):** acompaña en modalidad online, recibiendo datos de la planta y solicitando información clave para la ingeniería conceptual (planos, diagramas, especificaciones, caudales, composición de salmueras, etc.).

Además, se realizan **reuniones semanales de coordinación técnica** con el fin de revisar avances, compartir resultados y ajustar protocolos.

Material complementario

- Anexo 1: Balance de masa y análisis económico financiero. Formato PDF
- Anexo 2: Informe consultoría Mining Advisory Service. Formato PDF
- Anexo 3: Informe consultoría Aspire Consulting. Formato PDF
- Anexo 4: Informes de consultoría Y-TEC e Ingeniería Conceptual de Nanoburbujas. Formato PDF
- Anexo 5: Informe BHY. Formato PDF
- Anexo 6: Informes mensuales consultor Manuel Saravia. Formato PDF
- Anexo 7: Procedimientos y Protocolos. Formato PDF
- Anexo 8: Informes del laboratorio Alex Stewart. Formato PDF.
- Anexo 9: Informes de asistencia técnica de BHY. Formato PDF
- Anexo 10: Anexos Operativos Planta Piloto. Formato PDF
- Anexo 11: Diagramas P&ID. Formato PDF

Imágenes de actividades, planta y equipos



Imagen 1. Filtro Multimedia Instalado en ósmosis de agua dulce



Imagen 2. Adición de productos químicos al agua de caldera.



Imagen 3. Operarios desarmando tanque calentador para su limpieza



Imagen 4. Preparación de agua litiada en laboratorio (decantación de sólidos)



Imagen 5. Ensayo de Laboratorio - concentración de eluato



Imagen 6. Tareas de laboratorio



Imagen 7. Muestras de agua para inspección visual del sistema de filtrado



Imagen 8. Ensayo de Adsorción a escala laboratorio



Imagen 9. Primera producción de carbonato de litio - a partir de salmuera artificial



Imagen 10. Secado del carbonato de litio en estufa de laboratorio



Imagen 11. Ajustes en el sistema de filtros



Imagen 12. Operario separando muestras del agua de formación



Imagen 13. Desarme del filtro con Hidrogrúa para su reacondicionamiento



Imagen 14. Cartucho de filtro previo a su reacondicionamiento



Imagen 15. Toma de muestras a la salida del Tanque 21 - de 1000m3



Imagen 16. Reparación de carcasa de filtro - aplicación de antióxido



Imagen 17. Carcasa con aplicación de antióxido



Imagen 18. Limpieza de tanques internos en planta piloto



Imagen 19. Planta piloto - vista desde la zona de ingreso del agua de formación



Imagen 20. Medición de temperatura en concentrado de litio - previo a carbonatación



Imagen 21. Concentración de Cloruro de Litio - previa carbonatación



Imagen 22. Ajustes del Filtro Prensa (para extracción de carbonato de litio)



Imagen 23. Equipo de operarios y parte del equipo técnico del proyecto.