



Evidencias Técnicas del Impacto Negativo de la Explotación del Litio en los Humedales y Recursos Hídricos de los Salares de la Puna Altoandina



Wetlands
INTERNATIONAL

Evidencias Técnicas del Impacto Negativo de la Explotación del Litio en los Humedales y Recursos Hídricos de los Salares de la Puna Altoandina

Informe técnico elaborado para el Programa Conservando los Humedales Altoandinos para la Gente y la Naturaleza de Wetlands International / Fundación Humedales



Diciembre 2020

Elaboró el Equipo de profesionales:

Geólogo Marcelo Sticco - UBA

Abogada Gabriela Guerra - UBA

Licenciada Verónica Kwaterka - UBA

Geólogo Santiago Valdés – UBA

Foto de tapa: Calma Cine

Índice

1	Resumen ejecutivo	3
2	Introducción	5
3	Descripción ambiental y de la explotación del litio	7
3.1	Características generales del ambiente donde se produce la explotación	7
3.2	Los humedales en las cuencas altoandinas	9
3.3	Características de la explotación de litio por evaporación	10
4	Impactos negativos en los recursos hídricos y en los humedales	13
4.1	Impactos en Argentina	16
4.2	Impactos en Bolivia	21
4.3	Impactos en Chile	22
5	Conclusiones	26
6	Recomendaciones	27
6.1	Recomendaciones técnicas para la gestión ambiental	27
6.2	Recomendaciones para la incorporación de tecnología al diseño de las explotaciones	29
6.3	Recomendaciones para la implementación de políticas públicas	31
7	Nota sobre la etapa de cierre de yacimiento	32
8	Bibliografía	33
8.1	Bibliografía citada	33
8.2	Bibliografía consultada	34
9	ANEXO MATRIZ DE IMPACTOS	35

1 Resumen ejecutivo

El presente estudio tiene por objetivo la identificación y valoración de las evidencias técnicas sobre los impactos negativos de la explotación de salmueras de litio en los recursos hídricos y humedales del área de la Puna Altoandina de la Argentina, Bolivia y Chile, el área comúnmente denominada como “Triángulo del litio”.

En términos generales, las cuencas de esta región se caracterizan por estar delimitadas por cordones serranos y desarrollar un lago o salar en el centro de la cuenca. El modelo hidrogeológico adoptado para el análisis –y aplicable a todas las cuencas altoandinas– es el propuesto por Rosen (1994) que las denomina *playa* (no confundir con la playa marina) y las define como *cuencas intracontinentales que presentan balance hídrico negativo y una franja capilar suficientemente somera como para que se produzca el fenómeno de evaporación desde la superficie freática*.

Según este modelo, el equilibrio hidrológico principal que gobierna estas cuencas consiste en la recarga de agua por precipitaciones en los cordones montañosos marginales y la descarga por evaporación de la freática en los sectores centrales. Debido al clima árido y seco, los excedentes de agua que generan las lagunas y humedales son mantenidos en el tiempo por el aporte de agua freática y, en menor medida, por ríos perennes (en caso de existir).

Los ambientes de humedal se desarrollan en aquellos sectores de la cuenca donde las condiciones geomorfológicas favorecen la acumulación de agua o humedad freática y, por tanto, constituyen el último eslabón de una cadena cuyo equilibrio es frágil ya que cualquier alteración del ciclo hidrológico, en estas condiciones de extrema aridez, puede repercutir negativamente en la superficie freática y en todos los elementos que de ella dependen.

En el marco de una transición energética hacia tecnologías más limpias, el principal desafío de la industria humana consiste en compatibilizar la explotación de los recursos naturales con la preservación del ambiente y los derechos de las comunidades locales. En este punto, los tiempos de producción, los métodos utilizados, el diseño de las instalaciones principales del yacimiento y de la infraestructura asociada pasan al primer plano de la discusión como aquellos factores –elementos que– además de posibilitar la extracción del mineral deben garantizar que la interacción con el medio ambiente resulte lo más armónica posible.

La evaluación de impactos en los humedales (ver Anexo Matriz de Impactos), se hizo teniendo en cuenta las características naturales únicas del medio ambiente en que se desarrolla esta actividad y las características generales de los proyectos mineros, evaluando sus diferentes etapas, a saber, **prospección, exploración, explotación o producción y cierre de yacimiento**; ya que la etapa del proyecto es la que determina la escala espacio temporal de los impactos. De todas ellas, la etapa de producción es la que más impacto produce en el ambiente –en particular en los humedales– y sobre la que se cuenta con mayor documentación, por tanto, se procedió a analizar en cada país testigo –Argentina, Bolivia y Chile– los impactos negativos. La etapa de cierre de yacimiento merece una mención aparte debido a que de ella depende la restauración del ambiente una vez finalizada la extracción, sin embargo, aún no existen en Latinoamérica cierres de yacimiento para los proyectos de producción de litio y, por esta razón, no se cuenta con material técnico para hacer una evaluación. Se ha realizado una proyección preliminar del **pasivo ambiental** del proyecto Olaroz - Cauchari en Argentina generado por la indebida disposición final de los Residuos Peligrosos provenientes de las cuantiosas sales de descarte sin litio, de mantenerse las inadecuadas prácticas actuales, este alcanzaría un valor mínimo de **USD 450.000.000.-** (cuatrocientos cincuenta millones de dólares de EEUU), lo cual implicaría que el proyecto sea insostenible en lo económico y ambiental.

De los tres países bajo análisis, sólo dos presentan proyectos en etapa de explotación. Chile, el más avanzado de los tres, cuenta con varios proyectos en etapa de explotación y una rica cultura institucional de control que ha generado multiplicidad de documentos, investigaciones y registros de la actividad extractiva. El salar de Atacama, considerado de referencia a nivel internacional, posee una explotación que ha sido prudentemente

organizada para el nivel tecnológico que se ha decidido utilizar. Sin embargo, luego de treinta años de explotación, se han detectado graves problemas debido a la intensidad de extracción de fluidos, que ha ido aumentando con los años más allá de lo que el ambiente podía soportar, ya que el impacto negativo en los recursos hídricos y humedales resulta evidente y está bien documentado. El descenso generalizado de la superficie freática, la desecación de algarrobos e incluso leves modificaciones en algunas variables climáticas de la cuenca han sido registradas tanto por la autoridad ambiental chilena como por trabajos científicos.

Por otra parte, la experiencia Argentina, más reciente, cuenta con un solo proyecto en etapa temprana de explotación –el salar de Olaroz - Cauchari en la provincia de Jujuy– y otros tantos en etapa de prospección o exploración. La explotación del salar de Olaroz - Cauchari (caso testigo) aún no es tan intensa como la del Salar de Atacama pero el impacto ambiental registrado es muy elevado a causa de la débil cultura institucional provincial, que no establece adecuados controles para este tipo de ambiente frágil, y de una práctica empresarial que no presta la debida diligencia al cuidado del ambiente, externalizando los costos de los pasivos ambientales por ella generada.

La ausencia de una red de monitoreo ambiental impide cuantificar el impacto sin embargo, según surge de los documentos publicados por la misma minera, desde su misma concepción, el yacimiento fue construido con infraestructura precaria, sin tener en cuenta las delicadas condiciones naturales de la cuenca y priorizando la maximización de ganancias a expensas de una mínima inversión en infraestructura. El resultado esperable es la alteración del ciclo hidrológico de la cuenca debido a la interrupción de la circulación de agua hacia las zonas de descarga naturales y un elevado riesgo de contaminación irreversible de las fuentes de agua dulce a causa de las instalaciones inadecuadamente construidas e incorrectamente ubicadas.

Para sistematizar la información y facilitar las comparaciones, se elaboró una **Matriz de Impactos** (Anexo) donde se resumen los principales impactos ambientales detectados, sus características, la fuente de información y una clasificación que indica si éstos son demostrados o probables. Los principales impactos documentados e identificados fueron los siguientes:

Salinización de suelos y humedales, Contaminación de suelos con residuos peligrosos, Modificación del flujo natural superficial del agua, Alteración del ciclo de precipitación de sales, Alteración del balance hídrico, Pasivo ambiental. Violación de la Ley 24051. Dto. 831/93. Requisitos tecnológicos en las operaciones de eliminación (artículo 33, anexo iii,) - Operaciones de eliminación no aceptables. Riesgo de rotura de piletas de evaporación por flujos torrenciales y/o terremotos. Salinización de humedales y suelos con sales exóticas. Salinización de reservas hídricas subterráneas de agua dulce en el Abanico Archibarca en Jujuy. Afectación de la flora autóctona. Alteración de sistema lacustre / humedal. Aumento del 90% de la salinidad y acidez de los suelos.

Sobre esos conocimientos, los proyectos productivos deben ser capaces de alcanzar la viabilidad económica evitando a toda costa el indeseable “negocio rápido”, que maximiza ganancias a costa de externalizar pasivos y vulnerar reglamentaciones. Para esto último la investigación científico-técnica y rol del Estado como regulador juegan un papel esencial. Por otra parte, al día de hoy, las empresas no han mostrado un gran desarrollo en esta dirección, más bien se han limitado a aplicar la tecnología más elemental existente (piletas de evaporación) con el menor cuidado del ambiente al construir las instalaciones.

La base para materializar cualquier emprendimiento es el conocimiento previo del sistema natural a intervenir, sus posibilidades y limitaciones, y la institucionalización efectiva del territorio de acuerdo a las leyes vigentes u otras que, necesariamente, deberán ser sancionadas. Esto requiere inversión específica para la elaboración de mapas temáticos del territorio, el seguimiento de las principales variables ambientales (precipitación, temperatura y variables atmosféricas en general; evaporación, niveles freáticos, composición química de las aguas y una larga lista de etcéteras) y modelos integradores que den cuenta de cómo interactúan los elementos naturales entre sí y cuál es su dinámica. La ubicación de las instalaciones al borde de la cuenca para preservar los abanicos, el uso de pozos horizontales (de eficiencia probada en la industria petrolera), los métodos de

separación del litio por vía húmeda sin evaporación, con reinyección y recuperación secundaria son algunas posibles propuestas que servirían para organizar la explotación y quitarle presión a las cuencas.

Por último, un nuevo paradigma de explotación es posible a través de la combinación de empresas responsables, Estado presente y Sociedad Civil activa.

2 Introducción

El elemento litio se ha utilizado tradicionalmente para la fabricación de vidrios, cerámicas, lubricantes, medicamentos psiquiátricos, grasas lubricantes, aire acondicionado, polímeros y metalurgia, entre otros. Sin embargo, producto del crecimiento exponencial de la industria electrónica de dispositivos portátiles energéticamente recargables, la demanda internacional de litio ha aumentado en los últimos años por ser un mineral con excelentes propiedades para la fabricación de baterías recargables de celulares y computadores (Henríquez 2018).

En el año 2016 la demanda mundial de litio para la fabricación de baterías recargables alcanzó un 39% y para la fabricación de vidrios y cerámicas un 30%, experimentando un alza significativa respecto, por ejemplo, al año 2011, donde alcanzó un 29% en el primer caso y un 35% en el segundo. En el año 2015, los principales consumidores de litio fueron Corea del Sur con 16 mil toneladas de carbonato de litio, Estados Unidos con 13 mil, Japón con 12 mil, China con 11 mil, Bélgica con 8 mil y Alemania con 3 mil cuyo destino fue principalmente la industria tecnológica de computadores, celulares y autos eléctricos (Dirección de Economía Minera Argentina 2017).

Es en este último ámbito, la industria automotriz, donde la demanda de litio está experimentando la mayor alza, ya que es el componente principal de las baterías de los vehículos eléctricos e híbridos. Muchas empresas automotrices ya están disputándose la vanguardia tecnológica para liderar el mercado de los autos eléctricos que se proyecta como dominante en el futuro (Zicari 2015). Esto ha provocado un aumento exponencial de la demanda mundial de litio, además de consolidarlo como elemento estratégico, que alcanzó, en el año 2016, 201 mil toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE) y se estima que para el año 2021 alcance 372.288 toneladas de LCE de las cuales un 57% sería destinada para la fabricación de baterías siendo un 37% para autos eléctricos (COCHILCO 2017).

En términos geológicos, y de acuerdo a fuentes mineras gubernamentales, cuando se habla de **recursos** se remite a concentraciones minerales que se identifican y estiman por medio de exploraciones, muestreos y reconocimientos, los cuales son de interés económico y con perspectiva para su eventual extracción; en cambio, las **reservas** son la fracción del recurso mineral que es medido e indicado, siendo económicamente extraíble dentro de un escenario productivo, tecnológico y medioambiental contemplado en un plan minero. La importancia comercial y estratégica del litio ha motivado numerosas mediciones respecto a las reservas y recursos existentes en el mundo, sin embargo, éstas no necesariamente coinciden (Henríquez 2018).

A nivel mundial –y según la Dirección de Economía Minera de Argentina y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)– las mayores reservas potenciales de litio se encuentran en salares (58%), específicamente en los salares altoandinos del Cono Sur. De este total el Triángulo del Litio concentra el 68% de dichos recursos, del cual Bolivia alcanza un 30%, Chile un 21% y Argentina un 17%. En la Tabla 1 se resumen los principales proyectos de explotación de litio en los salares de la Puna Altoandina. Cabe aclarar que lo expuesto en dicha tabla es lo que las empresas declaran formalmente a

las autoridades, lo cual suele llevar a interpretaciones divergentes entre lo declarado y la situación real de avance del proyecto.

Tabla 1. Principales proyectos de litio en Argentina, Chile y Bolivia. Fuente: modificado de COCHILCO (2017)

Proyecto	Empresa	País Provincia- Región	Puesta en marcha proyectado	Etapas	Capacidad de producción (LCE)	Tipo de proyecto
Olaroz - Cauchari	OROCOBRE	Argentina Jujuy	2020	Prefactibilidad	25.000	Nuevo
Fenix	Livent (ex FMC)	Argentina Catamarca	2020	Factibilidad	16.000	Expansión
Olaroz Fase 2	OROCOBRE	Argentina Jujuy	2020	Factibilidad terminada	25.000	Expansión
Centenario Ratones	ERAMET	Argentina Salta	2021	Factibilidad	20.000	Nuevo
Rincón Lithium Fase 1	Rincón Ltd Sentient Equity Partners	Argentina Salta	2021	Factibilidad	25.000	Nuevo
Sal de los Angeles	Lithium X	Argentina Salta	S/D	Factibilidad terminada	20.000	Nuevo
Rincón	Bacanora Minerals	Argentina Salta	S/D	Factibilidad terminada	50.000	Nuevo
Sal de Vida	Galaxy	Argentina Catamarca	S/D	Factibilidad terminada	25.000	Nuevo
Ampliación del Salar del Carmen	SQM	Chile Antofagasta	2020	Construcción	45.000	Expansión
Producción de sales Maricunga	Simco	Chile Atacama	2020	Factibilidad terminada	14.300	Nuevo
La Negra 3	Albermarle	Chile Antofagasta	2021	Factibilidad	42.5000	Expansión
Ampliación Carbonato de Litio	SQM	Chile Antofagasta	2022	Factibilidad terminada	110.000	Expansión
Proyecto Blanco	Mineras Salar Blanco	Chile Atacama	2022	Factibilidad terminada	20.000	Nuevo
Salar de Uyuni	Yacimientos de Litio Bolivianos	Bolivia Potosí	S/D	Piloto	15.000	Nuevo

3 Descripción ambiental y de la explotación del litio

3.1 Características generales del ambiente donde se produce la explotación

Las cuencas de la puna altoandina poseen dos características estructurales principales: se encuentran rodeadas por cordones serranos y desarrollan un lago o salar en el centro de la cuenca. Esta configuración permite distinguir *a priori* dos subambientes; por un lado los **cordones montañosos marginales que rodean la cuenca**, donde se concentran las precipitaciones, las pendientes son más elevadas y hay mayor desarrollo de lo que técnicamente se denomina sedimentación clástica¹; y, por otra parte, **el sector central de la cuenca** donde las pendientes del terreno son muy bajas (subhorizontales), las precipitaciones, menores y la sedimentación dominante es la evaporítica² aunque, dependiendo la cuenca, puede existir alternancia con sedimentación clástica. Sin embargo, para alcanzar un conocimiento preciso de la dinámica de estas cuencas y su relación con los humedales es necesario recurrir a un modelo que, además de las características tectónicas, incorpore la dinámica hidrogeológica al análisis.

El ambiente hidrogeológico general al que pertenecen las cuencas altoandinas se denomina formalmente en la literatura como *playa*³ (Gilbert 1875, Russel 1885, Snyder 1962, Mabbut 1977) y, de acuerdo a la definición más moderna e integradora propuesta por Rosen (1994) consiste en cuencas intracontinentales que presentan balance hídrico negativo y una franja capilar suficientemente somera como para que se produzca el fenómeno de evaporación desde la superficie freática. Dado que este modelo interpreta con claridad estos complejos sistemas, según nuestra opinión, resulta aplicable a todas las cuencas altoandinas. En el presente documento el término *playa*, en el sentido que le da Rosen (1994) y *cuenca altoandina* serán considerados sinónimos.

El funcionamiento hidrogeológico general de la *playa* –de la cual como se verá más adelante los humedales constituyen un frágil componente– consiste en la **recarga** de agua por precipitaciones en los sectores montañosos marginales y su **descarga** por evaporación en el sector central de la misma. El **tránsito** del agua desde las áreas de recarga hacia la zona de descarga se produce primero a través de valles y quebradas y, una vez que abandona el frente montañoso, da lugar a una importante geoforma conocida como **abanico aluvial** a través de la cual el agua transita por flujo subterráneo y, en menor medida, por flujo superficial en canales intermitentes sobre la superficie del abanico que funcionan durante los eventos de precipitación (Figura 1). En algunas ocasiones, estas cuencas llegan a desarrollar ríos permanentes que son alimentados por el acuífero freático, aunque, en general, debido a la extrema aridez del clima de esta región, los abanicos aluviales, ya sean aislados o coalescentes⁴, son los que cumplen el importante rol de conducir el

¹ “Sedimentación clástica” se refiere a la acumulación de fragmentos de roca producidos por meteorización de diferentes tamaños: gravas, arenas y arcillas.

² “Sedimentación evaporítica” se refiere a la acumulación de minerales producto de la precipitación de sales a partir de una salmuera.

³ El vocablo “playa” fue tomado de la lengua española por autores angloparlantes para referirse al tipo de cuencas descritas por Rosen (1994). Una reapropiación de este término por autores hispanohablantes consiste en la alocución “playa-lake” que suele verse en muchos textos, especialmente en Argentina. La realidad es que existen múltiples términos –formales e informales– en la lengua española para referirse a estas cuencas y para este trabajo, por simplicidad, se decidió utilizar el término “playa” en el sentido explicado en el texto.

⁴ Los abanicos aluviales pueden encontrarse de forma aislada o pueden superponerse los unos a los otros de modo que su clásica geometría en forma de letra delta tiende a desdibujarse. En estos casos la coalescencia de abanicos suele denominarse “bajada”.

agua dulce de recarga hacia la zona de descarga, de forma tanto subterránea como superficial, durante los eventos climáticos que generan excedente hídrico extraordinario.

En la zona de descarga la evaporación se produce en los cuerpos de agua aflorantes (lagunas estacionales/perennes) o desde el agua contenida en el acuífero freático. El fenómeno de capilaridad eleva a la superficie el agua de la napa donde es evaporada, este proceso tiene un límite fundamental que ha sido denominado como *profundidad de extinción*, esto implica que, a partir de determinada profundidad del pelo de agua, el ascenso por capilaridad no logra elevar el agua hasta la zona donde se produce la evaporación y, por tanto, el proceso se detiene.

Producto de la evaporación, en cualquiera de las formas antes mencionadas, se produce la concentración de sales que da lugar a las salmueras ricas en recursos minerales. Entonces, resumiendo, la precipitación de agua dulce en las zonas altas fluye hacia el centro de la cuenca donde predominan los fenómenos de evaporación. El tránsito del agua se produce por medio de los abanicos aluviales de forma tanto subterránea como superficial.

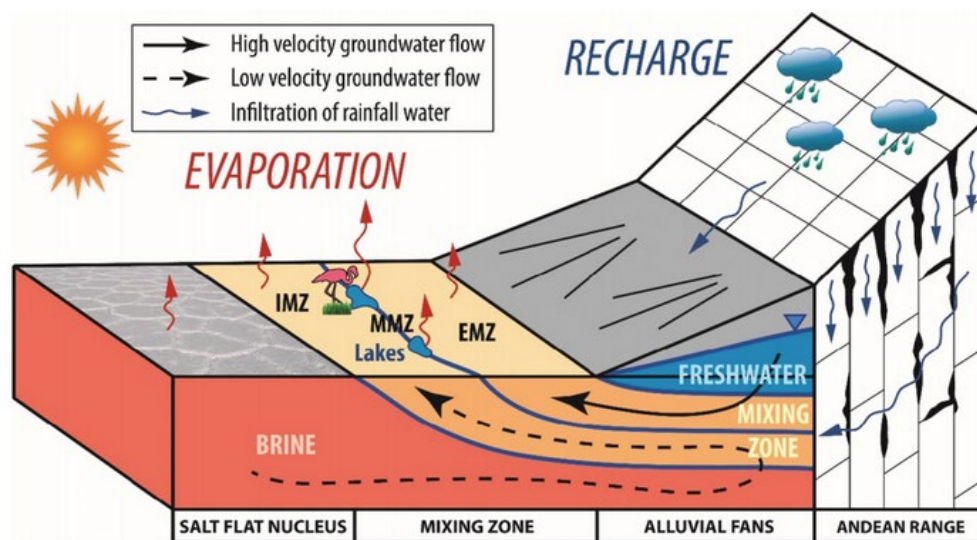


Figura 1. Modelo hidrogeológico conceptual de los salares altoandinos. Puede verse la recarga en las sierras, la distribución de agua dulce a través de los abanicos y la descarga por evaporación. (Marazuela et al., 2019).

La dinámica de las aguas subterráneas en el centro de la cuenca está gobernada por la interfaz entre las aguas dulces que bajan de los abanicos aluviales y la salmuera que se encuentra en el centro de la cuenca. Resulta posible, entonces, definir dos áreas diferentes en cuanto al flujo subterráneo de las aguas: (1) el *núcleo del salar*, hidrodinámicamente aislado, donde se encuentra la salmuera y (2) la *zona de mezcla* donde se produce la interfaz agua dulce – salmuera.

El *núcleo del salar* es un área hidrodinámicamente aislada con un flujo subterráneo característico que consiste en el hundimiento de las aguas más densas en las zonas donde la evaporación es más intensa (sobreconcentración de sales) y el ascenso del agua menos densa por los laterales. Esta celda convectiva se encuentra aislada ya sea por los extremos de la cuenca o por la presencia de la zona de mezcla.

En la *zona de mezcla* se produce el “choque” entre las aguas dulces que descienden desde los abanicos y la celda convectiva del núcleo del salar. Se genera así un flujo de ascenso, una

elevación de la carga hidráulica, que aproxima la napa a la superficie e incluso logra hacerla aflorar generando cadenas de lagunas. Es en la **zona de mezcla** donde se desarrollan los principales ambientes de tipo humedal y, al mismo tiempo, donde ocurre la mayor evaporación de la cuenca.

Desde el punto de vista del **tiempo de residencia** del agua en la cuenca pueden distinguirse tres ciclos interconectados en un frágil equilibrio: (a) el **ciclo superficial**, que dura un año y es el que utilizan las comunidades locales para la “siembra” de sal común; (b) el **ciclo subterráneo somero o subsuperficial**, que se extiende durante varios años y se trata de las capas freáticas, ubicadas a pocos metros de profundidad, y de los manantiales de agua dulce utilizados para consumo humano y del ganado y, por último, (c) el **ciclo subterráneo profundo**, con aguas que permanecen décadas o siglos en circulación, se hallan a decenas o centenas de metros de profundidad, poseen baja salinidad, se localizan en los bordes de la cuenca (por debajo de los denominados abanicos aluviales) y se hallan en equilibrio dinámico con las salmueras (aguas muy saladas) del centro de la cuenca.

Lo notable de este ambiente, reconocido por varios autores (Marazuela *et al.* 2019, Scheihing & Tröger 2017, Rosen 1994), consiste en la delicadeza de su equilibrio natural. El fenómeno más intenso es la evaporación que ocurre de forma constante durante todo el año, más allá de la variación estacional en intensidad. Las precipitaciones, escasas y fuertemente localizadas en la zona alta, representan el único aporte de agua a la cuenca, de modo que, el sistema se encuentra casi permanentemente bajo un estrés hídrico que amenaza interrumpir los ciclos de circulación. De alterar este balance, la escasa humedad que da lugar a los ambientes de humedal desaparecería (principal impacto directo mensurable), por tanto, resulta claro que cualquier explotación de recursos que quiera realizarse en estos ambientes debe ser hecha con cuidado de no alterar su frágil dinámica, todo un desafío para la industria moderna.

3.2 Los humedales en las cuencas altoandinas

Los **ambientes de humedal** son, en general, variados y cuentan con múltiples denominaciones, no todas ellas formales. Cursos de agua, lagunas, aguada, barreal, salar, ciénago, colcha, pajonal, bofedal son algunos de los múltiples ambientes de humedal que pueden encontrarse en las cuencas altoandinas (Amaya *et al.* 2019), sin embargo, como propuesta alternativa, es posible simplificar su estudio a partir de unas pocas características elementales.

Estos ambientes tienden a producirse en aquellas áreas de la cuenca donde la poca humedad disponible es suficientemente persistente a lo largo del año como para posibilitar su desarrollo; entonces, son los factores hidrogeológicos –una combinación de la hidrología y la geomorfología locales– los que determinan su existencia y dinámica (Kandus & Minotti 2018). Bajo una mirada hidrogeológica, las condiciones que deben producirse para que pueda desarrollarse un ambiente de humedal son principalmente tres: (1) emplazamiento geomorfológico favorable, (2) balance hídrico positivo y (3) desarrollo de biota adaptada a las condiciones de anoxia (Figura 2).

Por emplazamiento geomorfológico favorable se entiende aquellas zonas que permiten la acumulación y permanencia de agua; en el caso de las cuencas altoandinas estas zonas se encuentran generalmente en la llanura de inundación de los ríos (lecho mayor), depresiones del terreno con proximidad a la freática, zona de mezcla de aguas y el núcleo del salar.

Por otra parte, debido a las escasas precipitaciones de la zona y a la existencia de una estación seca durante el invierno, el balance hídrico resulta negativo y constituye el verdadero limitante ambiental para el desarrollo de humedales. Entonces, los humedales son mantenidos por la presencia de la capa freática, ya sea subsuperficial o aflorante, en las locaciones antes mencionadas. Es por esta razón que se los considera, en el marco de las cuencas altoandinas, como el último eslabón de una frágil cadena tensionada por la falta de agua.

Dado que la actividad minera del litio implica la extracción de grandes volúmenes de agua, tanto de la salmuera portadora del recurso mineral, como de agua dulce para el proceso industrial, el principal riesgo para los humedales de una cuenca es la **alteración, parcial o total, del ciclo hidrogeológico que les da sustento.**

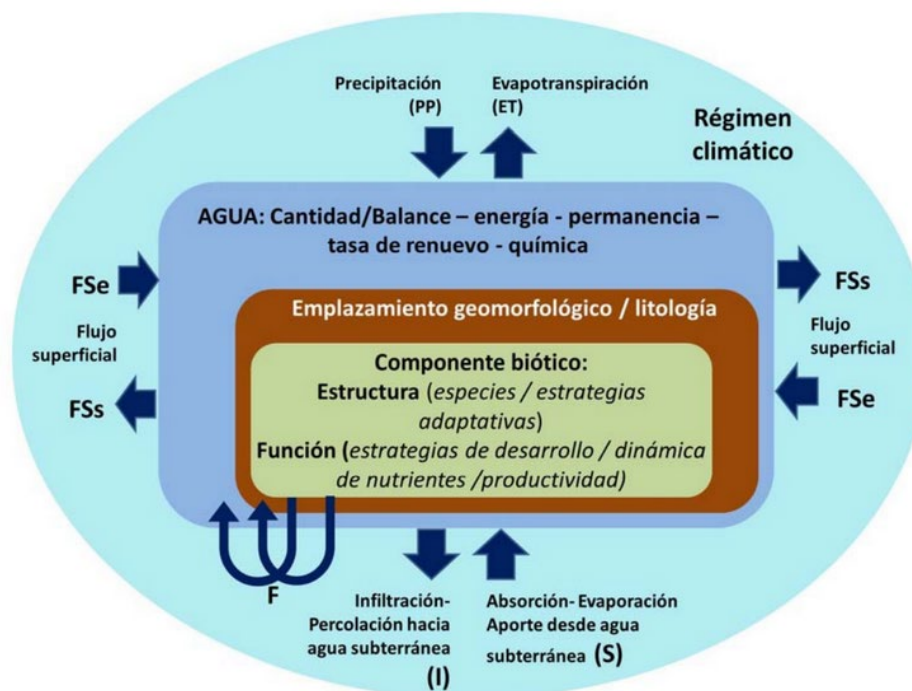


Figura 2. Esquema de los factores que determinan la existencia de un humedal (Kandus & Minotti 2018).

3.3 Características de la explotación de litio por evaporación

La minería de litio utiliza técnicas diferentes a aquellas empleadas en la minería tradicional, donde el mineral se extrae en estado "sólido" de una roca. En estos casos, el elemento es extraído de las salmueras (agua con alta concentración de sales) que se encuentran en la zona núcleo de los salares contenidas en los sedimentos clásticos y/o evaporíticos.

El método adoptado en el Triángulo del Litio, para la producción de sales de litio comercializables, consiste en la evaporación de las salmueras en grandes piletones o pozas. Es importante señalar que, aunque este método es el más económico, también existen otros métodos, como la extracción por "vía húmeda" (patentado por el INQUIMAE, un instituto UBA - CONICET de Argentina), de eficacia probada para separar el litio y que implica un menor costo para el medio ambiente.

El método de evaporación de salmuera requiere de las siguientes instalaciones básicas: (1) pozos de extracción de salmuera o agua dulce, (2) piletas de evaporación, (3) planta de producción de

litio, (4) infraestructura básica asociada. Una breve descripción de cada elemento se presenta a continuación:

- **Pozos de extracción de agua dulce o salmuera:** La extracción de la salmuera rica en litio se realiza mediante pozos verticales con filtros que llevan una bomba de impulsión. Dependiendo de la escala del yacimiento se utilizan desde decenas hasta centenas de pozos y su distribución depende de las condiciones naturales del acuífero; por lo general los pozos que extraen salmuera se localizan en el sector centro del salar mientras que los pozos de agua dulce se ubican en los abanicos cercanos, en el borde de la cuenca.
- **Piletas de evaporación:** consisten en excavaciones someras del terreno cubiertas con membrana geotextil donde se deposita la salmuera para ser secada al sol, luego se levanta la costra salina. Suelen ubicarse cerca de las reservas de agua dulce en el borde de la cuenca, sobre los abanicos aluviales, y ocupan cientos de hectáreas.
- **Plantas de producción de litio:** son las “fábricas” donde se producen los compuestos derivados de la salmuera y que posteriormente serán comercializados; el carbonato de litio (Li_2CO_3) es el más elemental de ellos (menor valor agregado) pero existen otros como el cloruro de litio (LiCl), el hidróxido de litio (LiOH) o compuestos complejos. Es importante destacar que se requieren importantes volúmenes de agua dulce en relación a la limitada tasa de recarga anual en zonas áridas para la producción de sales comercializables, es decir, la producción local representa un factor de presión más sobre los acuíferos dulces.
- **Infraestructura asociada:** para poner en funcionamiento el yacimiento y vincular sus diferentes partes entre sí, se requieren obras de infraestructura elemental como caminos de acceso al yacimiento y a cada pozo, líneas eléctricas para alimentar la planta y el motor de las bombas y los acueductos que mueven la salmuera desde cada pozo hasta la zona de las piletas de evaporación. Todo este sistema, visto desde el aire, asemeja a una gran grilla que puede introducir impactos en el medio ambiente y, por tanto, su diseño y construcción deben ser tenidos en cuenta a la hora de una evaluación de impacto.

Cada proyecto tiene, además, un ciclo de vida general que puede resumirse brevemente en cuatro etapas: (1) la **prospección**, (2) la **exploración** del recurso, (3) la **explotación** y (4) el **cierre de yacimiento**.

Las tareas de **prospección** son aquellas consideradas como "no intrusivas" ya que no se realizan perforaciones ni movimientos de suelo; esta etapa involucra, principalmente, técnicas de geofísica que tienen como objetivo identificar las zonas con salmuera. Entre las técnicas más comunes para la prospección de litio están la tomografía eléctrica, la magnetotelúrica y los sondeos eléctricos verticales. Las tareas de campo son realizadas por un equipo de cuatro o cinco técnicos que se movilizan en un par de camionetas y, en un lapso de menos de cuatro semanas, colocan dispositivos y cables transitorios apoyados en el suelo para registrar el campo eléctrico y magnético del subsuelo. Una vez que finalizan los registros, se retiran todos los instrumentos.

Por otra parte, la etapa de **exploración** involucra técnicas intrusivas ya que se realizan perforaciones verticales en las zonas de interés detectadas en la prospección. La logística es superior puesto que implica la movilización de maquinaria semi pesada, como camiones y camionetas. El objetivo es conocer las distintas capas del subsuelo y obtener muestras de salmuera con litio. Se construyen piletas para el lodo de perforación y se generan residuos de los denominados **cortes** o **cutting** de perforación. Cada perforación dura aproximadamente un mes y, una vez finalizada la tarea, se retiran las maquinarias. Una práctica errónea consiste en abandonar

las labores sin una contención adecuada de los residuos sólidos y líquidos en la misma locación donde se realizó la perforación.

Finalizado el análisis de los recursos y determinada la viabilidad del emprendimiento, se procede a la etapa de **explotación** o **producción** que incluye la construcción de grandes piletas de evaporación y el montaje de una planta o fábrica de procesamiento y refinación del litio. Además se construye una grilla o campo de bombeo de salmuera con decenas a cientos de pozos en las zonas de los salares junto con la infraestructura necesaria para operativizar el yacimiento (caminos, electricidad, acueductos de agua dulce y salmuera). Por otra parte, se bombea agua de baja salinidad de los acuíferos para uso en el proceso industrial.

Por último, el **cierre del yacimiento**, consiste en todas las acciones que llevan a cabo los operadores para levantar las instalaciones y remediar los impactos ambientales que hayan ocasionado durante la explotación. Por desgracia, a pesar de sus consecuencias ambientales y económicas significativas, es la etapa que menos atención recibe, tanto por parte de las empresas como de los Estados. Las regulaciones son mínimas y tampoco se dispone de muchos antecedentes de cierre de minas en los tres países bajo estudio, debido a que el litio que se halla en etapas tempranas de explotación. Esta debilidad reglamentaria y de acciones, ha demostrado, en la industria extractiva en general y en varios países en desarrollo, que ocasiona una transferencia de los costos de las reparaciones de los daños ambientales desde las empresas hacia los Estados y las futuras generaciones.

Por tal motivo, es imperativo que desde las etapas tempranas de los proyectos se pueda cuantificar claramente estos costos económicos a fin de ponderar la viabilidad económica y ambiental del proyecto en su conjunto. Dichos costos deben ser incluidos en los estados contables de las empresas para poder evaluar la renta real del Estado y la sociedad, la cual (como mínimo) debe ser superior al costo del pasivo ambiental. En un esquema de producción privada, donde la ganancia corresponde sólo a la operadora, resulta lógico que quien produce el daño ambiental sea quien pague completamente los costos de la reparación y restitución ambiental, en condiciones aceptables para el desarrollo futuro de las zonas intervenidas por el proyecto.

4 Impactos negativos en los recursos hídricos y en los humedales

La identificación y evaluación de los impactos demostrados se presentan en el Anexo Matriz de impactos.

Un sistema natural puede interpretarse como la interacción de múltiples elementos que desarrollan un equilibrio entre sí. Toda actividad humana genera perturbaciones sobre el sistema natural que tienden a desarrollar un nuevo equilibrio, distinto del original, con el elemento antrópico incorporado. Existe, por tanto, un costo ambiental de base (o mínimo) inevitable y que representa el precio que debe pagarse para sostener la sociedad tecnológica moderna. Sin embargo, este costo mínimo puede asumirse siempre y cuando se hayan llevado a cabo todas las acciones de planificación e investigación necesarias para que el nuevo equilibrio conserve lo máximo posible la oferta de bienes y servicios ecosistémicos que el ambiente ofrece, priorizando como primer paso al Ordenamiento Territorial.

El conjunto de los impactos negativos que la actividad productiva genera, es decir, aquellos que interfieren con el desarrollo de otras actividades o de la vida misma, surgen de una mala interacción entre los procesos naturales ya descritos y las instalaciones que se utilizan para explotar el recurso. En este punto, los tiempos de producción, los métodos utilizados, el diseño de las instalaciones principales del yacimiento y de la infraestructura asociada pasan al primer plano de la discusión como aquellos factores –elementos que– además de posibilitar la extracción del mineral deben garantizar que la interacción con el ambiente resulte lo más armónica posible. En síntesis, el modelo de planta “llave en mano” aplicado indistintamente a una cuenca u otra no nos sirve como sociedad; en cambio, cada explotación debe pensarse en función de las condiciones naturales que el medio propone. Ahí yace el principal desafío de la industria moderna.

El primer elemento a tener en cuenta para la evaluación del impacto de un proyecto minero es la **etapa** en la que se encuentra ya que las acciones llevadas a cabo determinarán la **escala temporal y espacial** de la intervención antrópica sobre el medio ambiente.

Como se señaló anteriormente, la etapa de **prospección** es no invasiva y no debería generar más impacto que el de cualquier investigación científica. Durante la **exploración**, debido a la construcción de pozos, comienza a haber intervenciones en el salar. La naturaleza dispersa y acotada de las obras hace que los impactos sean transitorios y controlados siempre y cuando se las realice con los correspondientes cuidados y atenciones; en caso contrario, si se realizan demasiadas perforaciones o las labores se ejecutan de forma indebida, se pueden producir impactos acumulados significativos.

La etapa de **explotación o producción** es, sin lugar a dudas, la que más impacto genera. Es temporal y espacialmente la más extensa de todas, debido a que las instalaciones involucran superficies grandes del salar y son fijas, ya que permanecen en el sitio de 30 a 40 años. En esta etapa de explotación es donde se producen la mayor cantidad y magnitud de impactos y pasivos ambientales, con consecuencias en el entorno y para las futuras generaciones.

Por tanto, dado el escaso impacto relativo que produce las etapas de prospección y exploración y debido a que no se cuenta con ejemplos de cierre de mina en la nascente industria de explotación de salmuera de litio, el eje de la investigación se ha puesto en los impactos ambientales negativos causados por proyectos en **etapa de explotación o producción**.

En términos generales, durante la etapa de producción, los impactos identificados se han clasificado en cuatro categorías que comprenden: (1) pozos y acueductos, (2) piletas de evaporación, (3) plantas de producción de litio y (4) obras de infraestructura.

1. **Impactos de los pozos y acueductos:** cuando se bombea agua desde un pozo se produce un cono de depresión en el acuífero cuyas dimensiones dependen de las características del material acuífero y del caudal de bombeo. Si se bombea desde pozos cercanos y los conos se superponen, los efectos de depresión de niveles en el acuífero se potencian. Entonces, las áreas más deprimidas del acuífero generan un aumento del flujo subterráneo hacia ellas dando lugar a una alteración de la red de flujo subterráneo que puede ocasionar distintos impactos:
 - **Alteración de humedales:** por agotamiento de manantiales, lagos y lagunas. En ambientes áridos las fuentes superficiales de agua son sostenidas durante todo el año por el aporte del agua subterránea. Si el nivel de los acuíferos disminuye excesivamente, la napa se retira y las fuentes se secan afectando los humedales que dependen de ellas.
 - **Salinización de reservas de agua dulce:** este efecto puede producirse de dos formas, dependiendo de dónde se ubique el bombeo. Si las depresiones se producen en el núcleo del salar, el agua dulce migrará desde los abanicos hacia estos sectores y se salinizará; sin embargo el caso más peligroso resulta al revés. Si el bombeo intenso se produce sobre las reservas de agua dulce de los abanicos, la dinámica de la zona de mezcla puede verse afectada y se producirá la invasión de agua salada desde el núcleo hacia los abanicos. Este daño resulta irreversible ya que los sedimentos quedarán impregnados de sal, produciendo la contaminación de las nuevas recargas.
 - **Disminución o cese de la evaporación:** un descenso excesivo de los niveles freáticos puede provocar que la evaporación desde la superficie freática cese. Como se vio oportunamente, este proceso es responsable de la escasa humedad ambiente que se registra en estas zonas y su disminución sensible o interrupción puede ocasionar cambios de clima a nivel cuenca. Los efectos que han sido medidos consisten en la disminución de la humedad ambiente, aumento de la temperatura diurna y disminución de la temperatura nocturna entre otros (Liu *et al.*, 2019; Scheihing & Tröger, 2017).

Una vez extraída, la salmuera circula por acueductos hacia la planta productora. El agua con alta concentración de sales es naturalmente corrosiva y el material que la contenga debe ser apropiado ya que, de otra forma, estará sujeto a periódicas roturas. Las roturas de los acueductos producen la fuga de aguas muy saladas que son derramadas sin control provocando la **salinización de los suelos**. Además, pueden infiltrarse y ocasionar la **salinización de acuíferos dulces** dependiendo del lugar donde se haya producido el derrame.

2. **Piletas de evaporación:** las piletas de evaporación ocupan extensas superficies de terreno y modifican completamente la superficie natural. Por ejemplo, en el Salar de Atacama representan el equivalente a 7.500 canchas de fútbol y en el proyecto Sales de Jujuy en Argentina, que apenas se halla en su etapa inicial de producción, ocupan el equivalente a 450 canchas de fútbol. Al tratarse de obras de gran extensión que causan una intervención directa en el terreno y contienen materiales exóticos (el lugar natural de la salmuera es bajo la superficie del terreno, no sobre ella) su implementación debería desalentarse en pos del desarrollo de tecnologías más modernas y amigables con el ambiente. Sin embargo, dado

que la industria aún las utiliza, debe prestarse especial atención a su construcción para minimizar los daños al ambiente. Un emplazamiento inadecuado de las piletas puede causar la **interrupción de la red de flujo superficial, impedir la infiltración de agua dulce de recarga** o, en caso de rotura, –ya sea parcial o total– por actividad sísmica, por torrentes de barro (Orocobre, 2019) u otras causas, el derrame de salmuera y la consecuente **salinización de suelos, ríos, arroyos y acuíferos dulces**, si se produce la infiltración.

3. **Plantas de producción:** el impacto generado por la planta es equivalente a cualquier instalación donde se realice un proceso industrial. Debe existir la correcta manipulación de sustancias peligrosas y, sobretodo, de los residuos peligrosos que pueden ser producto del proceso industrial o del personal que trabaja en la planta. En particular estas plantas producen emisiones atmosféricas de diferentes sustancias (polvos), que, de no estar contenidas, pueden ocasionar impacto directo en las aguas superficiales de la cuenca, personas, fauna y flora, tal como relatan los habitantes en las áreas próximas a la mina de Sales de Jujuy en Olaroz-Cauchari.
4. **Obras de infraestructura:** en general estas obras involucran movimiento de suelos. Un diseño apropiado puede tener bajo impacto pero si se hace de forma incorrecta puede alterar significativamente la dinámica de toda la cuenca. En aquellas áreas donde las pendientes son bajas (subhorizontales), las pequeñas modificaciones en la altura (menores al metro) de los movimientos de suelo (camino, terraplenes, etc.) pueden **alterar el flujo natural de las aguas superficiales** e incluso **desencadenar inundaciones** ya que funcionan como “diques”, cuya consecuencia es la inundación aguas arriba y la sequía de los suelos, aguas abajo de estos diques. Estos cambios también producen alteración de las pasturas, fuente de alimento de la fauna autóctona, como las vicuñas, una especie protegida por ley. La constante circulación de vehículos ocasiona que se levante polvo y esto puede dañar a humedales y cuerpos de agua.

Para la identificación y evaluación de los impactos se realizó una extensa investigación de documentos escritos y gráficos –de acceso público– provenientes de: publicaciones científicas reconocidas, informes técnicos y financieros de las propias empresas mineras (operadoras), universidades, institutos de investigación y organismos de control estatales.

Las evidencias obtenidas de estos registros de acceso público, han sido clasificadas en dos categorías de impacto, (a) **Impactos demostrados** y (b) **Impactos potenciales**. Impactos demostrados son aquellos en los que la evidencia objetiva es, en sí misma, una prueba del impacto / daño ambiental, por ejemplo, una declaración de un derrame de salmuera en un campo vecino al yacimiento, incluido en un Informe técnico de la empresa minera. Por otra parte, los impactos potenciales son aquellos que identifican y/o describen una condición de vulnerabilidad de daño ambiental probable, pero que aún no se dispone de las evidencias directas de dichos daños. Por ejemplo, la descripción técnica en un Congreso de Hidrogeología, de un pozo de producción de salmuera de litio que muestra la ausencia de aislamiento entre los acuíferos dulces y salados. Sin embargo, la descripción identificada no presenta evidencias directas (Ej. análisis químicos) de la salinización de dichos acuíferos dulces a causa de la ausencia de aislamiento entre acuíferos.

4.1 Impactos en Argentina

La experiencia Argentina en la explotación de sales de litio es reciente, nacida al calor del “boom” del litio que se presenta como una oportunidad para la anhelada transición energética desde los contaminantes combustibles fósiles hacia tecnologías más limpias y respetuosas del medio ambiente.

Existen múltiples proyectos en etapa de prospección y exploración, pero el principal yacimiento de litio en producción de Argentina es Sales de Jujuy que desarrolla su actividad en los salares de Olaroz-Cauchari al sudoeste de la provincia de Jujuy. La ubicación geográfica y las instalaciones se pueden ver en la Figura 3.

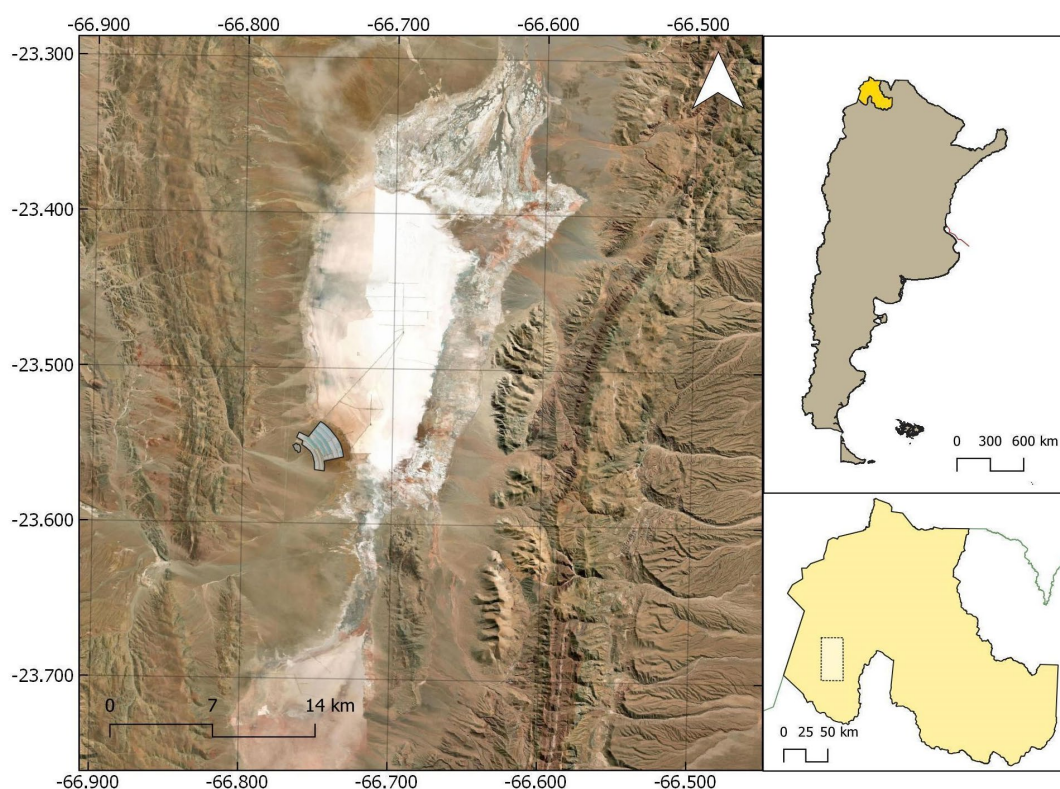


Figura 3. Ubicación del proyecto Sales de Jujuy en el Salar de Olaroz, provincia de Jujuy, Argentina.

La empresa Sales de Jujuy se fundó en el año 2010 como la representante local del proyecto “Operación Conjunta en Salar de Olaroz”, una sociedad anónima integrada por la empresa de minerales industriales Orocobre Limited, la sociedad bursátil japonesa Toyota Tsusho Corporation (TTC) y la empresa del gobierno provincial, Jujuy Energía y Minería Sociedad del Estado (JEMSE). Sus operaciones se localizan en el salar de Olaroz ubicado al suroeste de la provincia. Esta cuenca fue declarada reserva natural por la ley provincial N° 3.820 del año 1981 con el objetivo de conservación de la vicuña. Si bien la norma no prohíbe explícitamente la explotación minera en el ámbito de la reserva, sí aclara que la actividad debe llevarse a cabo con precaución.

El GeoVisor del catastro minero de la provincia de Jujuy muestra el área que comprende la reserva y también las concesiones mineras que se encuentran completamente superpuestas al área de reserva (http://www.mineriajujuy.gob.ar/site/jam_catastro.php). Claramente, la intensidad de ocupación, casi el 100% de la superficie considerada reserva, exige ser precavidos con la

construcción y operación de las minas para cumplir el requisito de preservación de fauna y flora autóctona.

La cuenca de Olaroz responde al modelo general expuesto en la sección 3.1 del presente documento. El sector central del salar se encuentra rodeado de abanicos aluviales que son el vehículo del agua dulce superficial y subterránea hacia el núcleo del salar. Por debajo de ellos se encuentra la zona de mezcla, es decir, la interfaz entre el agua dulce y el agua salada. La recarga principal ocurre en el cordón montañoso marginal y la descarga se produce por evaporación en el centro.

En consonancia con el análisis presentado por Sticco *et al.* (2018) en el *Estudio de los Recursos Hídricos y el Impacto por Explotación Minera de Litio. Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc – Provincia de Jujuy. FARN*, el análisis de los impactos se llevó a cabo utilizando los propios documentos publicados por la empresa, cuyo detalle se presenta en la **Matriz de impactos** (Anexo). Entre los múltiples incumplimientos y daños graves al medio ambiente identificados en los documentos se encuentran: salinización y contaminación de suelos y humedales con sales exóticas y residuos peligrosos, modificación del flujo natural superficial del agua, alteración del ciclo de precipitación de sales, alteración del balance hídrico natural de la cuenca y salinización de reservas hídricas subterráneas de agua dulce en el Abanico Archibarca.

Un sencillo análisis, realizado con imágenes satelitales tomadas del GoogleEarth en conjunto con las fotografías publicadas en los informes de la empresa, expone defectos en el diseño de la red caminera que fue construida sin considerar la geomorfología ni la red hídrica superficial de la cuenca⁵. Los caminos fueron trazados transversales al eje de los abanicos, con materiales precarios y sin alcantarillas o puentes que permitan el flujo natural de las aguas superficiales (Figuras 4 y 5). El resultado es la disección de los abanicos aluviales, lo que representa un bloqueo de los cauces de agua naturales (canales distribuidores). Las imágenes son elocuentes; quizás puedan ser presentadas como aceptables para el público en general pero ningún técnico puede pasarlas por alto como claras evidencias de impacto hídrico.

⁵ Algunos de los caminos señalados pueden corresponder a rutas provinciales. Sea cual sea el caso, el descuido por la protección del territorio de parte de la provincia y/o la empresa resulta evidente.

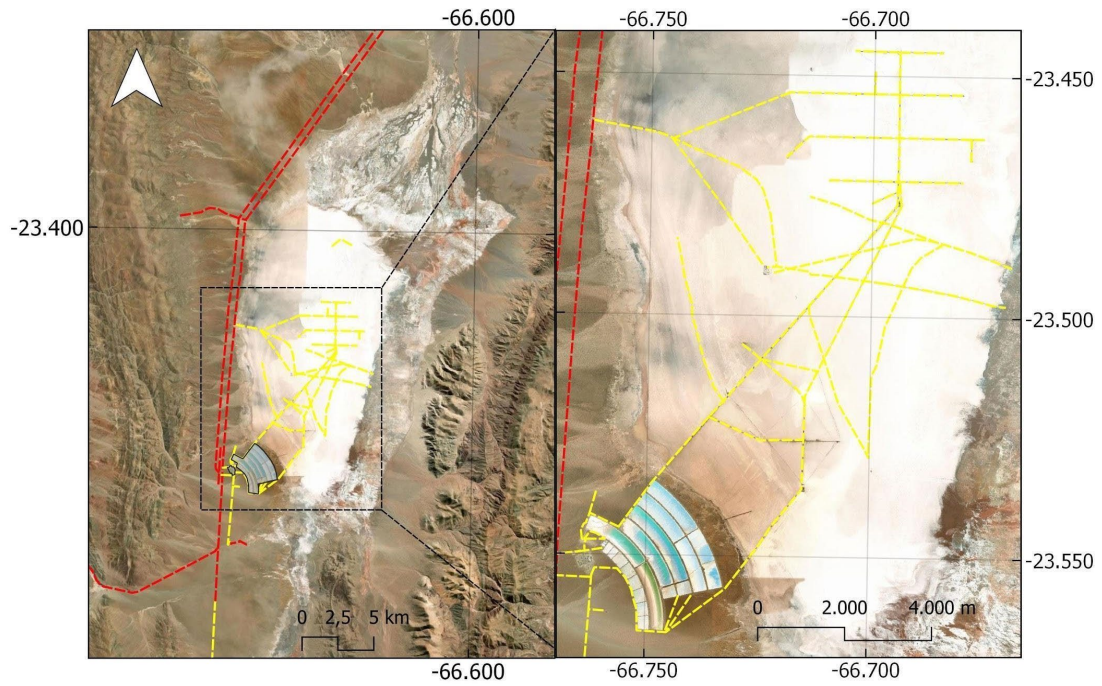


Figura 4. Infraestructura caminera en las imágenes de GoogleEarth. En rojo los caminos que disectan transversalmente los abanicos aluviales que alimentan el salar, en amarillo los caminos que disectan el salar.



Figura 5. Precarias obras de infraestructura caminera. A la izquierda se observan endicamientos producidos por un camino y a la derecha una intervención para que la inundación no afecte el camino.

Tanto los caminos como los acueductos han sido construidos de forma precaria. La salmuera se distribuye por medio de mangueras flexibles superficiales precarias, con el agravante de que no cuentan con válvulas esclusas para bloquear la evacuación de fluido en caso de derrames; este defecto ya ha causado problemas volcando volúmenes de salmuera sobre la superficie del salar y, lo que es peor, sobre la superficie del abanico Archibarca, tal como ha sido constatado por uno de los autores del presente documento en los territorios de la Familia Guitián, estos derrames salinizan suelos y manantiales de agua dulce utilizados previamente a la actividad minera por estas familias originarias del lugar. Se han podido observar también endicamientos causados por terraplenes y alteraciones en la circulación de las aguas superficiales que causan la interrupción del ciclo de formación o “siembra” de la sal común en la superficie de los salares. Esto último sería perjudicial para la actividad económica de las comunidades locales (en Salinas Grandes, Jujuy) que comercializan sal común (de mesa), como una de sus principales actividades económicas.

Otro punto importante consiste en la ubicación de la planta y las piletas de evaporación. La empresa cuenta con 29 piletas de evaporación operativas y con planes para construir aproximadamente 20 más en una segunda etapa de expansión, pero, a diferencia del caso chileno que se verá más adelante, en Jujuy las instalaciones principales fueron construidas directamente sobre un abanico aluvial (Archibarca) y representan un doble riesgo al ambiente: por un lado interrumpen completamente la red hídrica superficial, encargada de conducir los excedentes de precipitación al centro del salar, y por otro lado, ponen en peligro la reserva de agua dulce que se encuentra contenida en los sedimentos altamente permeables del abanico al impedir su recarga por impermeabilización o salinizar las reservas dulces por filtraciones o roturas (Figura 6). Esta situación ha sido caracterizada como de riesgo y no de impacto demostrado ya que no existe una red de monitoreo, ni estatal ni privada, que permita detectar y controlar el daño ambiental.

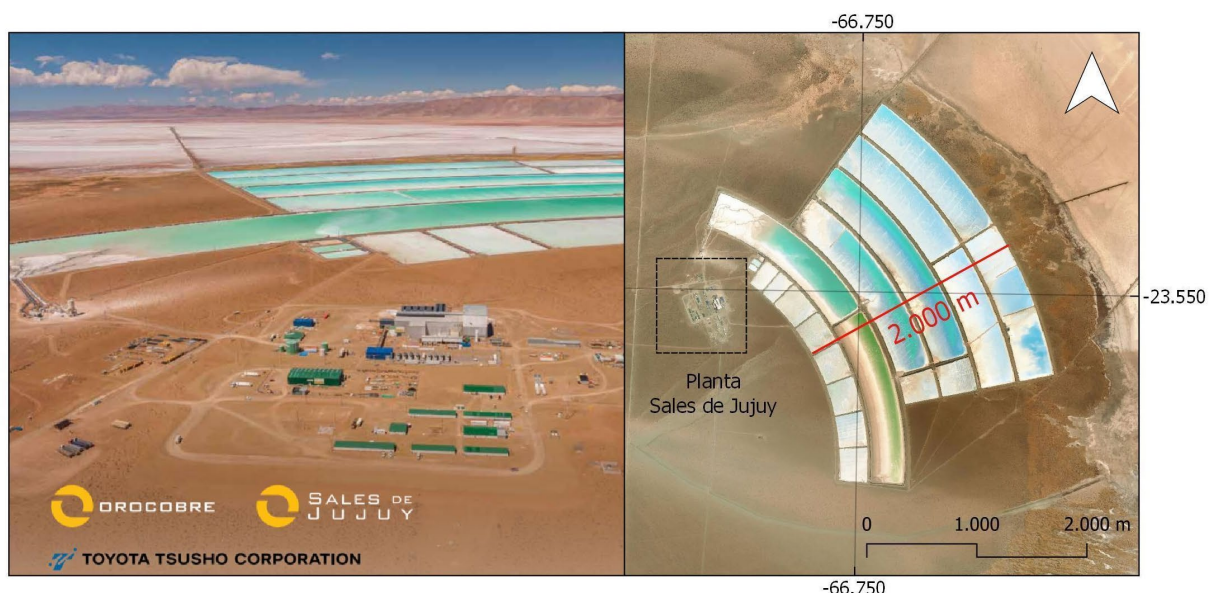


Figura 6. Detalle de las piletas de evaporación de Sales de Jujuy. Fuente: Sales de Jujuy.

Pero el riesgo más significativo encontrado –que requiere mención aparte ya que da cuenta de la cuestionable práctica empresarial de maximizar ganancias a expensas de vulnerar leyes y

derechos– consiste en la “reconversión” de las piletas de evaporación saturadas con sales de descarte en repositorio final de estos residuos (Orocobre, 2019).

En el informe se menciona que la función principal de las piletas no es la disposición de residuos sino contener la salmuera rica en litio durante el proceso de evaporación por un período de 9 a 12 meses; no obstante su origen y función, la empresa propone que, una vez finalizadas las operaciones en Olaroz, las piletas se dejarán con las sales sólidas y se cubrirán con arena, para ser revegetadas con plantas nativas.

De la simple lectura de la “propuesta” surge el **incumplimiento a la Ley 24.051 de Residuos Peligrosos**, concretamente el artículo 33 anexo III de su Decreto reglamentario N° 831/93 sobre “Requisitos tecnológicos en las operaciones de eliminación - Operaciones de eliminación no aceptables”:

“No podrán disponerse en rellenos de este tipo residuos con una o más de las siguientes características:

- *Residuos con contenido de líquidos libres.*
- *Residuos que contengan contaminantes que puedan ser fácilmente transportados por el aire.*
- *Residuos que puedan derramarse a temperatura ambiente.*
- *Residuos que presenten alta solubilidad en agua.*

Deben poseer como mínimo dos capas de materiales de baja permeabilidad. Se debe maximizar su estanquidad a través de barreras naturales y/o barreras colocadas por el hombre, a fin de reducir al mínimo la posibilidad de afectación al medio.”

El decreto también establece que:

“A fin de evitar la migración de contaminantes hacia el subsuelo y aguas subterráneas, un Relleno de Seguridad debe poseer:

- A) Barreras de material de muy baja permeabilidad recubriendo el fondo y taludes laterales.*
- B) Capas drenantes a fin de coleccionar y conducir flujos no deseados.”*

La empresa plantea que el mayor riesgo de falla catastrófica del “residuo” sería un evento meteorológico importante con **lluvias torrenciales e inundación** procedente del abanico Archibarca o un **terremoto** que dañara la estructura las piletas; en ambos casos, el destino final del residuo sería el propio salar, con lo cual no habría daños ambientales.

El residuo es altamente soluble y el abanico sobre el que está dispuesto es un reservorio de agua dulce altamente permeable. No se presentan evidencias técnicas de la estanquidad del relleno, no hay ensayos de permeabilidad ni de resistencia de suelos que aseguren que el relleno puede resistir movimientos telúricos. Por último, en caso de siniestro, la caída del relleno en el salar, a diferencia de lo que supone la empresa, representaría un impacto ya que las sales en cuestión son alóctonas a la superficie del salar porque fueron extraídas de capas profundas, están sobreconcentradas y, eventualmente, mezcladas con otros compuestos.

Resulta comprensible, luego de verificar que los costos ambientales del proyecto Sales de Jujuy son integralmente externalizados y trasladados completamente a la sociedad, al medio ambiente y a las futuras generaciones. En tal sentido hemos estimado que el **pasivo ambiental** resultante de

esta mala práctica es como mínimo de **USD 450.000.000.-**⁶, esto muestra la causa de por qué la empresa cuenta con una de las rentabilidades más altas del mercado mundial del litio (6.020.-USD/ton) sin aplicar ninguna tecnología novedosa (Orocobre, 2019).

4.2 Impactos en Bolivia

La República Plurinacional de Bolivia cuenta con una extensa tradición minera, pero perteneciente al rubro tradicional. Al igual que Argentina, las particularidades de la explotación de salmuera rica en litio han obligado al país a importar o desarrollar técnicas que no habían sido utilizadas hasta el momento y, por tanto, su desarrollo es todavía incipiente.

Los proyectos –o el proyecto– que se realiza por medio de la empresa Yacimientos de Lito Bolivianos (YLB), se encuentra ubicado en el Salar de Uyuni, conocido por ser el desierto de sal más grande y más alto del mundo, con una superficie de casi 10.600 km² y una altitud de 3.650 msnm. La ausencia de trabajos previos, bibliografía general y datos de monitoreo dificulta la evaluación de impactos. La mayoría de los trabajos encontrados tratan sobre la identificación de reservas y recursos en el salar, es decir, se centran en el desarrollo de conocimiento científico básico, propio de la etapa de prospección (Zicari *et al.* 2019).

Sin embargo, debido a que el proyecto en curso se encuentra en etapa piloto y que la intervención antrópica en el salar es despreciable frente a la superficie total (apenas del 1,5 %), no es esperable registrar ningún impacto en estas condiciones. La Figura 7 da cuenta de las pequeñas dimensiones del proyecto y su ubicación marginal en la cuenca.

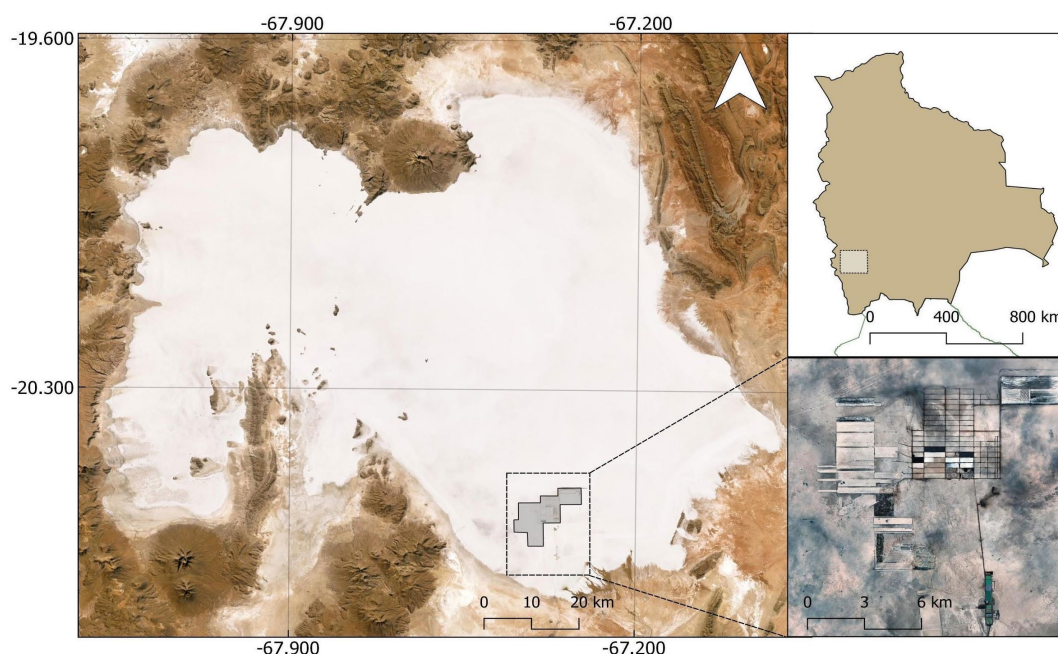


Figura 7. Salar de Uyuni, Bolivia.

⁶ En base a los datos del documento de acceso público: Orocobre (2019). “Waste Storage and Evaporation Facilities”. *Discussion paper*. Se calculó una capacidad de acumulación de residuos de 15 millones de m³, multiplicado por USD30.- por m³, el costo de la disposición final de residuos peligrosos en Argentina, se obtienen USD 450.000.000.-

4.3 Impactos en Chile

En la República de Chile, a diferencia de Argentina y Bolivia, la explotación de sales de litio no es una novedad de los últimos años, más allá de que recientemente haya cobrado impulso por el aumento de la demanda internacional. Debido a su larga tradición minera, el país cuenta con una importante experiencia de gestión y control de los emprendimientos; el Estado monitorea activamente los proyectos mediante organismos descentralizados como el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) que emite, para aquellos proyectos que han culminado el proceso de EIA, un documento denominado Resolución de Calificación Ambiental (RCA) donde se establecen las condiciones, exigencias o medidas que el titular asociado a un proyecto o actividad deberá cumplir durante su ejecución.

La explotación en el Salar de Atacama viene desarrollándose desde el año 1983 por las compañías Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) y Albermarle Corporation (ALB). Esta cuenca comprende la mayor reserva mundial de sales de litio y se encuentra en el sitio más árido del planeta (Figura 8). Su estructura general es la de una *playa* (en el sentido antes descrito) que cuenta con un sistema de lagunas en el margen este del salar (Figura 9). Este ambiente lagunar es sostenido por la freática somera y aflorante de la *zona de mezcla* de aguas y da sustento a un sistema de humedales con estatus de reserva natural conocido como "Laguna de los Flamencos", protegida por el Estado chileno.

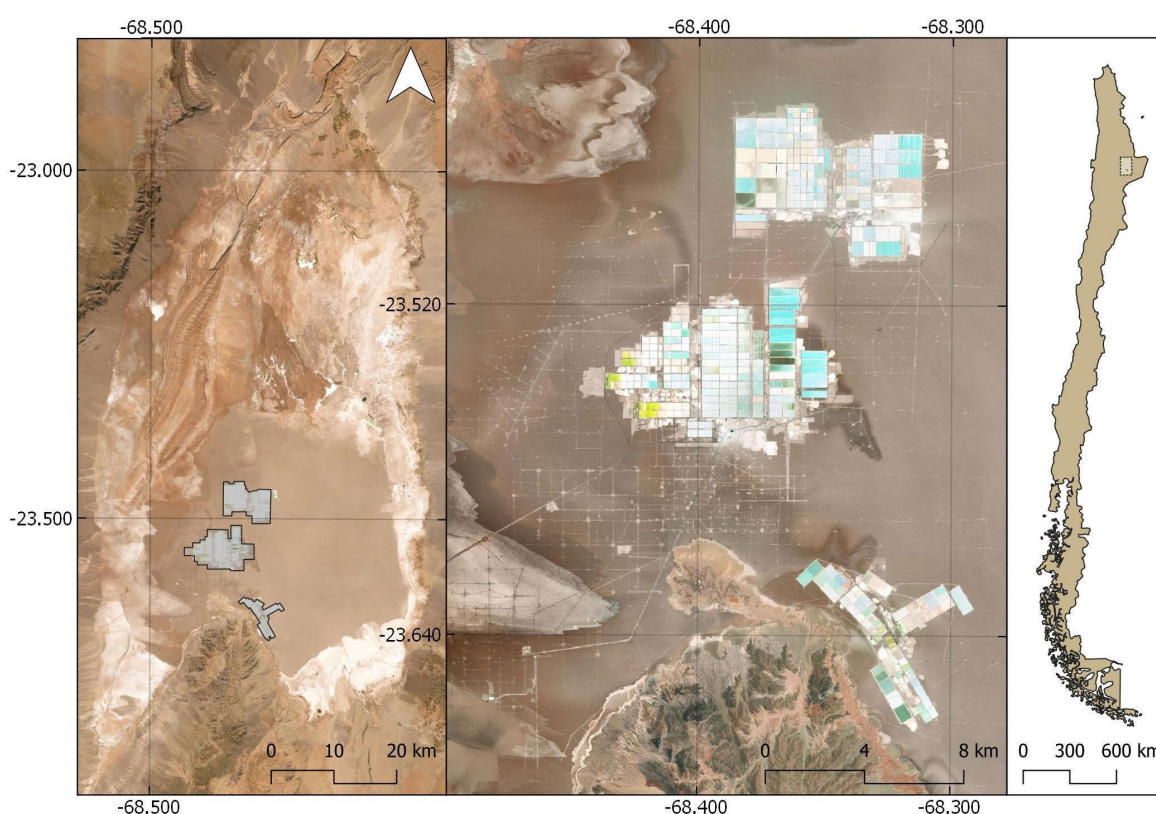


Figura 8. Ubicación y detalle de los proyectos mineros en el Salar de Atacama, Chile.

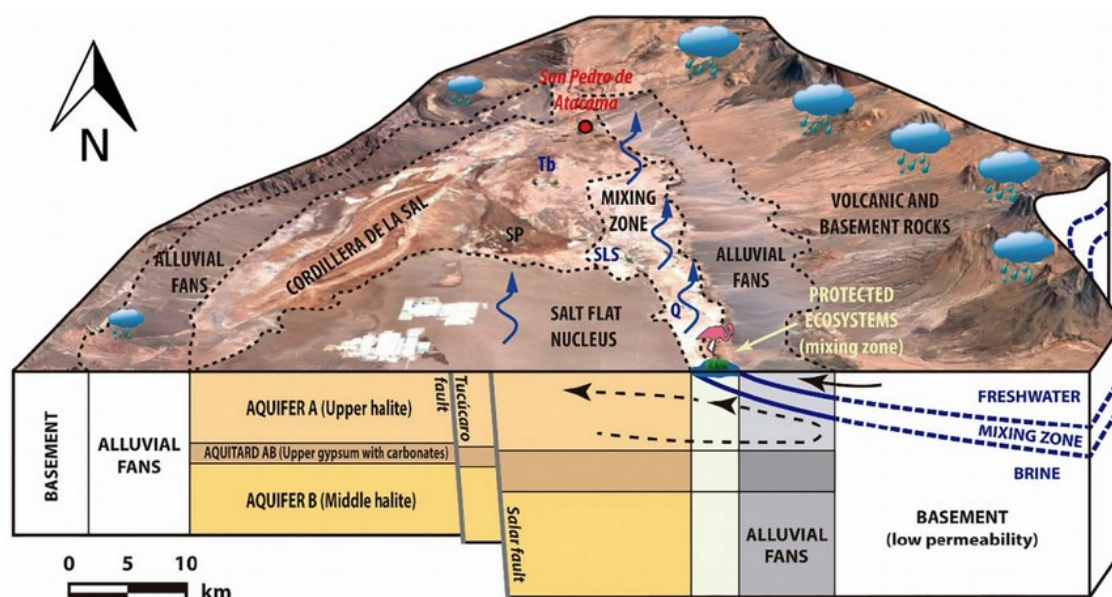


Figura 9. Principales sectores del Salar de Atacama (Marazuela et al. 2019).

Esta cuenca se considera como caso testigo a nivel internacional por dos motivos: (1) cuenta con una extensa red de monitoreo que incluye la observación de distintas variables (lluvias, evaporación, niveles freáticos) y (2) el largo período de actividad extractiva ha generado series temporales de datos ambientales de más de 30 años (Marazuela *et al.* 2019). Este importante nivel de instrumentalización y monitoreo ha permitido desarrollar modelos numéricos de funcionamiento de la cuenca y, mucho más importante, permite comparar las condiciones naturales al inicio de la explotación y en la actualidad, de modo que los impactos sobre el medio natural pueden ser cuantificados.

En principio las instalaciones han sido ubicadas de forma correcta para el tipo de tecnología que se utiliza (método de evaporación). Tanto la planta como las piletas de evaporación fueron situadas en el sector central del salar, de esta forma, preservando los abanicos aluviales que conducen la recarga del núcleo y lejos también de la zona de mezcla. Sin embargo, más allá de la correcta ubicación de las instalaciones, los principales impactos registrados en la cuenca son producto de la intensidad de la explotación y, en algunos casos, de las malas prácticas empresariales.

Existen varios trabajos que evidencian las consecuencias adversas de una explotación desmedida del agua del salar. En general, el principal efecto de la extracción de agua, ya sea de salmueras o de agua dulce para el proceso productivo, consiste en la depresión de los niveles freáticos por debajo de la **profundidad de extinción**, lo que ocasiona la disminución de la humedad de los suelos y, en algunos casos, la desecación de cuerpos de agua superficiales asociados a la freática, situaciones ambas que dañan a los humedales.

La evidencia directa del descenso de la capa freática a nivel cuenca surge del propio sistema de monitoreo empleado por las empresas y el Estado. La comparación del nivel de la napa en el año 1986, en los inicios de la producción, y en el año 2018, luego de 30 años de explotación continua, muestra claramente el significativo descenso de niveles en el sector oriental de la cuenca (más próximo a las plantas de producción) y su extensión hacia el sector oriental donde se encuentra la reserva y el sistema de lagunas (Figura 10). Estos datos, presentados por Marazuela *et al.* (2019), y

el inminente riesgo que señalan los autores motiva su propuesta de rediseño de la red de extracción con pozos de menor caudal y mayor distribución para mitigar los efectos del bombeo sobre los niveles del acuífero.

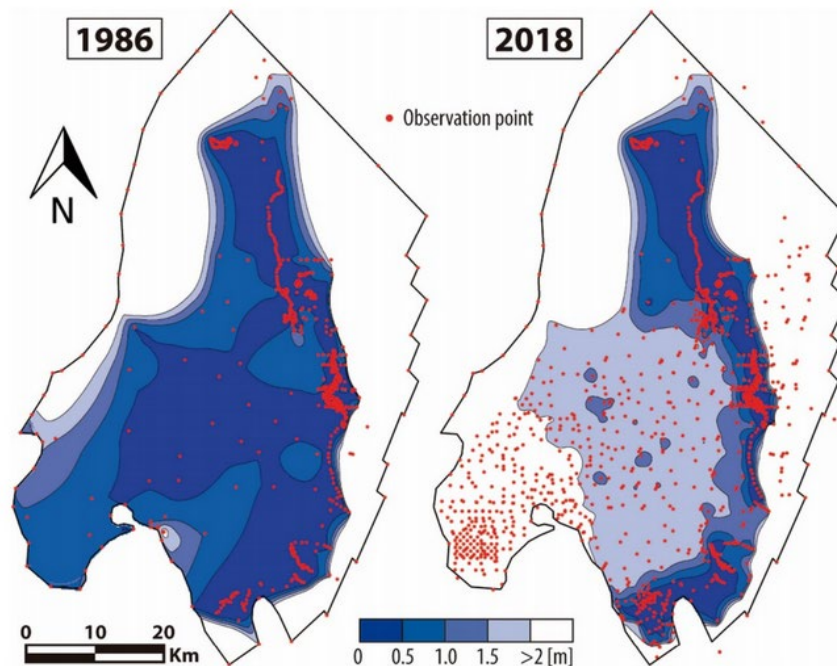


Figura 10. Comparación del estado de la superficie freática (napa) en el año 1986 y el año 2018. En rojo los puntos de observación, los colores azul claro y blanco indican la depresión de la napa (Marazuela et al. 2019).

En otro trabajo de reciente publicación, Liu *et al.* (2019), mediante el uso de una serie de imágenes satelitales del período 1997 - 2017, realizaron el cálculo de indicadores ambientales elementales (*Normalized Difference Vegetation Index, Soil Moisture Index, Land Surface Temperature*) y lograron detectar la evolución negativa de otras variables asociadas al descenso del agua freática. En la zona de la reserva Laguna de los Flamencos, observaron una significativa disminución de la humedad en el suelo (SMI), disminución de la densidad de vegetación (NDVI) y el aumento de la temperatura diurna (LST), efecto que suele ser producto de la ausencia de humedad en el ambiente.

Pero sin dudas, más allá de las evidencias científicas que demuestran el impacto de la explotación, las pruebas más sólidas del desmanejo empresarial son las publicadas por el propio Estado chileno, a través de la denuncia realizada en noviembre de 2016 por la Superintendencia de Medio Ambiente de Chile (SMA), órgano gubernamental descentralizado encargado de la fiscalización de la RCA, contra la operadora SQM. Los informes presentados que sirvieron de base para la denuncia, además de señalar múltiples incumplimientos de los planes de operación presentados por la propia empresa, constataron en terreno la pérdida de vegetación por la desecación y muerte de algarrobos en el área de la reserva (SMA 2016), cuyo detalle se presenta en la **Matriz de impactos** (Anexo).

La lista de infracciones cometidas por SQM incluye: la extracción de salmuera por encima de los límites autorizados, afectación progresiva del estado de vitalidad de algarrobos, entrega de información incompleta de la extracción de agua dulce, niveles de pozos y formaciones vegetales entre 2013 y 2015; el Plan de seguimiento Ambiental Hidrogeológico del lago Peine no permite garantizar la mantención de las condiciones de funcionamiento natural del sistema, falta de registros históricos de meteorología local y monitoreo de variables hidrogeológicas, modificación

sin autorización de las variables de los planes de contingencia incluyendo la cota de los pozos monitores y la alteración de los umbrales de activación. Cabe destacar que los planes de contingencia incluyen detener la extracción de ser necesario para permitir la recuperación del sistema; alterar los umbrales de activación implica seguir operando a sabiendas de que el sistema natural está siendo afectado de acuerdo a la información comprometida por la propia empresa.

Dos importantes consideraciones se pueden extraer de la experiencia chilena, ambas se encuentran en el texto de la denuncia. Por un lado pone de manifiesto las virtudes del sistema público de control, que monitorea activamente las variables ambientales de la cuenca, realiza verificaciones en el territorio y obliga a las operadoras a comprometerse con el cuidado del ambiente para obtener la RCA y así poder operar; por otra parte, las infracciones cometidas por SQM son una prueba clara del desmanejo empresarial, innecesario, que prioriza la ganancia fácil y redundante en el deterioro del medio ambiente y la vulneración de derechos civiles.

Los mismos efectos registrados en el Salar de Atacama fueron identificados y cuantificados en la cuenca de Laguna Lagunillas, ubicada en el norte del país. Esta cuenca se encuentra en explotación desde el año 1982 por la empresa BHP Billiton (BHP), dueña del proyecto de cobre Cerro Colorado. Aunque no se trata de una explotación de salmuera de litio, resulta importante mencionarlo para demostrar los efectos de la sobreexplotación de agua en este tipo de ambientes.

La extracción de agua comenzó en el año 1991 y en el año 2002 la comunidad Aymara local denunció que el humedal de la cuenca junto con cinco manantiales se habían secado por causa de una depresión severa del acuífero freático. A raíz de este hecho, la empresa fue sancionada y acordó ocuparse de irrigar artificialmente el humedal aunque la extracción de agua continuó (Scheihing & Tröger 2017).

La sobreexplotación del recurso, tanto más grave debido a la menor envergadura de la cuenca y el mayor impacto relativo que implica, fue produciendo un deterioro generalizado del ambiente que pudo verse en el desecamiento de manantiales, humedales e incluso cambios en la temperatura general de la cuenca que fueron cuantificados mediante el uso de imágenes satelitales y la comparación entre dos estaciones meteorológicas, una ubicada en la cuenca en cuestión y la otra en la cuenca aledaña del Salar de Huasco (Scheihing & Tröger 2017).

5 Conclusiones

El análisis de las cuencas donde se desarrollan las explotaciones de litio arrojó que para preservar los ambientes de humedal es necesario contemplar el ciclo hidrogeológico de la cuenca como una totalidad integrada para el diseño de la explotación. Sólo de esta forma es posible incorporar la industria al ciclo hidrológico natural del ambiente y preservar los recursos naturales.

En caso contrario, de no contar con un modelo hidrogeológico apropiado para el diseño de explotación y de una red de monitoreo para control de las variables ambientales, el riesgo que se corre es la alteración, parcial o total, del ciclo hidrológico y de cualquier elemento que dependa de él, como los humedales. Las consecuencias pueden ser variables dependiendo de la escala y naturaleza de este impacto, entre las más significativas se encuentran el descenso generalizado de la superficie freática, modificación del balance hídrico natural del agua, la salinización de reservas de agua dulce, contaminación de suelos con residuos peligrosos, el desecamiento de fuentes de agua y humedales, y cambios de clima locales, a nivel cuenca, debido a la pérdida de humedad en el ambiente.

La transición energética hacia las tecnologías verdes, en reemplazo total o parcial de las contaminantes energías fósiles, representa un desafío para las sociedades modernas, a fin de armonizar, en toda la cadena de valor, los principios de sustentabilidad ambiental, soberanía nacional e inclusión social.

El eslabón final de la tecnología limpia –la batería– debe incluir, desde el origen del proceso, que los métodos extractivos de su principal componente –el litio– sean sostenibles social y ambientalmente. El no cumplimiento de estos principios aumentaría la brecha social y las inequidades entre los países desarrollados, principales usuarios de los autos eléctricos, y los países en desarrollo, productores de litio a costa del daño ambiental y social.

En Sudamérica aún no se cuenta con gran experiencia en la materia, a excepción de Chile que posee una larga tradición minera, incluyendo la explotación de salmuera en el Salar de Atacama. Esta condición lo convierte en una guía importante para Argentina y Bolivia, ya sea para replicar sus experiencias virtuosas o bien para anticiparse a los posibles problemas y evitarlos. En este sentido, la investigación científica, la incorporación de tecnología y el rol del Estado como regulador de los proyectos resultan elementos vitales para la administración de ambientes tan frágiles como los humedales altoandinos.

La base para materializar cualquier emprendimiento debe ser el conocimiento detallado del sistema natural, sus posibilidades y limitaciones y también la institucionalización efectiva del territorio de acuerdo a las leyes vigentes u otras que, necesariamente, deberán ser sancionadas. Esto requiere inversión específica para la elaboración de mapas temáticos del territorio, el seguimiento de las principales variables ambientales (precipitación, temperatura y variables atmosféricas en general; evaporación, niveles freáticos, composición química de las aguas y una larga lista de etcéteras) y modelos integradores que den cuenta de cómo interactúan los elementos naturales entre sí, cuál es su dinámica.

Sobre esos conocimientos, los proyectos productivos deben ser capaces de alcanzar la viabilidad económica evitando a toda costa el indeseable “negocio rápido”, que maximiza ganancias a costa de externalizar pasivos y vulnerar reglamentaciones. Para esto último, la investigación científico-

técnica juega un papel esencial. Al día de hoy las empresas no han mostrado un gran desarrollo en esta dirección, más bien se han limitado a aplicar la tecnología más elemental existente (piletas de evaporación) con el menor cuidado del ambiente al construir las instalaciones.

¿Qué características debe tener un proyecto de explotación para que esté bien diseñado? En principio no existe una respuesta única. Si bien las cuencas responden a un modelo hidrogeológico general, que es común a todas, cada una, en virtud de la distribución que tengan sus elementos constitutivos, resulta única a la hora de desarrollar un emprendimiento. Además, el estado político, económico y tecnológico del país que decide explotar sus recursos juega un rol fundamental. El proyecto del Salar de Atacama resultó viable para la tecnología y las condiciones de mercado existentes en la década del 1980, no ocurre lo mismo en el caso del Salar de Olaroz-Cauchari treinta años después con un mercado mundial en alza y la necesidad de invertir en mejoras tecnológicas para evitar los impactos negativos plasmados en este informe, y producir insumos aptos para mercados exigentes –como el europeo–, en términos de cumplimiento de estándares socioambientales.

Así, sobre la base de estas ideas, el eje debe centrarse en el conocimiento preciso del medio natural y la innovación tecnológica para diseñar proyectos integrados de forma armónica con el medio ambiente local. Un nuevo paradigma de explotación es posible, todavía estamos a tiempo, y para ello resulta indispensable la combinación de empresas responsables, Estado presente y sociedad civil activa.

6 Recomendaciones

A lo largo del texto se han ido planteando diferentes problemáticas relacionadas a la explotación de los salares altoandinos en general y asociadas a un tipo de tecnología en particular: el método de evaporación por piletas. También se mencionó que no existe una solución única para cada problema dado que las condiciones naturales y antrópicas pueden variar de cuenca a cuenca, por tanto, un esquema de propuestas del tipo “impacto - solución” puede resultar muy rígido para una planificación general que busca armonizar elementos disímiles e incluso incorrecto en algunos casos puntuales.

Sin embargo, bajo la premisa de integrar armónicamente los proyectos al medio ambiente para lograr el menor impacto posible, se han establecido lineamientos generales con los que todo emprendimiento debería contar.

6.1 Recomendaciones técnicas para la gestión ambiental

Previo a la explotación, es decir, durante las etapas de exploración y planta piloto, se debe realizar una **línea de base ambiental** para la cuenca que alberga los proyectos. La línea de base ambiental tiene que estar fundada sobre un **modelo hidrogeológico** de la **cuenca hídrica mayor** que dé cuenta de la recarga, el tránsito y la descarga de todos los sistemas de agua superficial y subterránea que estén involucrados directa o indirectamente en la explotación, es decir, si se toma agua de ellos o si una toma de agua próxima afecta su dinámica natural.

Esta tarea excede la superficie de cada concesión y puede ser articulada entre el Estado y las empresas, pero no debe dejarse de lado ya que, como se expuso en el cuerpo del informe, la cuenca funciona como un todo integrado y, por tanto, las aparentes "pequeñas" alteraciones del ambiente (por ejemplo nuevos caminos que interfieren el flujo de agua superficial), pueden causar alteraciones que se extienden por decenas de hectáreas. Los principales aspectos hidrogeológicos a tener en cuenta para una línea de base son:

- Mapeo topográfico y geomorfológico de detalle, previo a la explotación, que permita conocer la arquitectura de la cuenca y sus redes hídricas.
- Modelo hidrogeológico que incluya la dinámica de recarga, tránsito y descarga de las aguas superficiales y subterráneas.
- Identificación y censo de la totalidad de los cuerpos de agua superficiales (humedales, manantiales, aguadas, ojos de agua, pozos, etc.).
- Identificación mediante técnicas geofísicas (magnetotelúrica, tomografía eléctrica, sondeo eléctrico vertical, etc.) de las tres masas principales de agua subterránea (dulce, zona de mezcla y salada), determinación precisa de su arquitectura y ubicación espacial.
- Caracterización y mapeo de la flora y fauna silvestre, especialmente de las especies protegidas.
- Identificación y censo de los usuarios de agua preexistentes, tanto humanos como animales.

Además de la línea de base, es necesario contar con un **sistema de monitoreo** de variables ambientales durante el tiempo que dure la explotación. La función principal de este sistema consiste en el monitoreo periódico de la cuenca para así anticipar los posibles impactos negativos antes de que cobren dimensión irreversible y sea posible llevar a cabo las acciones de preservación y recuperación a tiempo.

Las estaciones de monitoreo deben disponerse en función al modelo hidrogeológico y su distribución espacial, al igual que la frecuencia de lectura, deben contar con la densidad de puntos de observación apropiada para que el registro dé cuenta de la evolución de cada elemento relevante de la cuenca. Se sobreentiende que, a medida que los proyectos se extiendan, la red de monitoreo debe crecer de forma proporcional. Las variables de lectura pueden cambiar de acuerdo al modelo hidrogeológico utilizado, pero sin dudas un sistema de monitoreo debe incluir, de mínima, los siguientes ítems:

- **Meteorológicos:** las **estaciones meteorológicas** deben medir las precipitaciones (pluviales y/o nievas), temperatura, presión, humedad, evaporación, dirección y velocidad del viento con un intervalo de lectura de datos de, al menos, cada 1 hora durante las 24 hs. Un criterio posible para su distribución puede ser la diferenciación entre el sector central del salar y el área marginal de recarga, también pueden estar localizadas en los ríos troncales, lagunas o subcuencas principales.
- **Agua superficial:** se realiza por medio de **estaciones de aforo** que miden el caudal de ríos y el nivel de los lagos. Para su correcta instalación debe tenerse en cuenta la sección transversal al cauce en el caso de los ríos y la topobatimetría de los cuerpos de agua importantes. Las **propiedades fisicoquímicas** de estos cuerpos deben medirse con cierta periodicidad ya que pueden resultar útiles para detectar cambios en la zona de aporte o

procesos de alteración por sobreexplotación. La cantidad y distribución de estaciones estará en función de la escala de los elementos presentes en la cuenca.

- **Agua subterránea:** el monitoreo de los recursos subterráneos se realiza mediante **piezómetros**, es decir, pozos de pequeño diámetro encamisados en su totalidad con filtros que sólo permiten el ingreso de agua del acuífero objetivo. El número mínimo de tres piezómetros por acuífero permite registrar la dirección y la velocidad reales del flujo subterráneo. La cantidad y distribución de piezómetros debe estar en función de aquellas características hidrogeológicas que sea necesario monitorear según el modelo, por ejemplo, merecen especial atención los abanicos aluviales con agua dulce, las zonas de recarga y la zona de mezcla que regula el contacto entre aguas.
- **Calidad química de las aguas:** tanto para las aguas superficiales como subterráneas, la calidad fisicoquímica debe ser objeto de monitoreo periódico dado que es una variable sensible a cambios de todo tipo, sobretodo en ambientes metaestables como el que nos ocupa. Los principales parámetros a tener en cuenta son: temperatura (T), pH, salinidad (Sal), conductividad eléctrica (CE), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), iones mayoritarios (bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato, calcio, magnesio, sodio y potasio), isótopos de hidrógeno y oxígeno. La frecuencia debe ser trimestral.
- **Evaporación:** dado que esta variable es de especial atención en este tipo de ambientes áridos, resulta necesario brindarle un tratamiento particular. La evaporación debe ser medida en tanto en superficie, por método de tanques, como por debajo del suelo para evaluar la evaporación desde la superficie freática, para lo cual pueden emplearse lisímetros.

6.2 Recomendaciones para la incorporación de tecnología al diseño de las explotaciones

Para evitar interrupciones en el ciclo hidrogeológico de la cuenca, debe buscarse que la totalidad de las **instalaciones de extracción de agua y producción de sales de litio se ubiquen fuera de las principales áreas de circulación de agua**. Una alternativa posible consiste en llevar las instalaciones hacia los márgenes de la cuenca, lejos de los abanicos, ubicándose en el macizo rocoso, o, en su defecto, en el centro mismo del salar que representa el punto final de disposición de las aguas.

En base al análisis de los proyectos más avanzados en la producción de litio (SQM en Chile y Orocobre en Argentina) se pudo concluir que la grilla de pozos verticales y su infraestructura asociada (caminos, líneas eléctricas, etc.), son las responsables del mayor impacto a los recursos hídricos, a los humedales, al turismo ecológico y a la actividad productiva de las comunidades locales que extraen sal común (cloruro de sodio) para comercializar. Ante la aparente e insoluble dicotomía: "producción de *litio* y *degradación del medio ambiente o conservación del ambiente y atraso económico*", existen técnicas capaces de compatibilizar las actividades preexistentes de las comunidades, la preservación del ambiente y la producción del litio.

Las técnicas de vanguardia para la producción de fluidos, desarrolladas en el denominado "upstream" de la industria gasífera y petrolera, pueden brindar soluciones productivas viables, ya que la producción de litio se asemeja más a este tipo de actividades que a las tradicionales técnicas de explotación minera en roca sólida. En otras palabras, la producción de litio podría considerarse como una técnica minera "no convencional". Esta denominación invita a readecuar las

lógicas tradicionales con nuevas técnicas, que a su vez deben ser inclusivas y ambientalmente sustentables.

Al igual que en la explotación de recursos hidrocarburíferos no convencionales o en la producción en plataformas marinas fuera de la costa (offshore), la construcción de **pozos horizontales** permite bombear el fluido desde un punto distante a su ubicación natural en el sector central del salar, de esta forma, emplazando la infraestructura lejos de las áreas más delicadas (Figura 11). Argentina y su empresa petrolera de bandera, YPF, tienen décadas de experiencia en la construcción y mejora de este tipo de técnicas. Actualmente las ramas horizontales de los pozos que se construyen en la provincia de Neuquén tienen una extensión entre tres y cuatro kilómetros, longitudes compatibles con las dimensiones de los salares de la región Altoandina.

Es cierto que estas construcciones son más caras que las tradicionales verticales, pero se ha verificado que compensan con creces la inversión inicial con un mayor volumen de producción ya que equivalen a varios pozos verticales convencionales. Asimismo en una misma locación superficial se pueden instalar varios ramales (tal como se realiza en las plataformas de off shore) haciendo más eficiente el uso de la superficie del terreno.

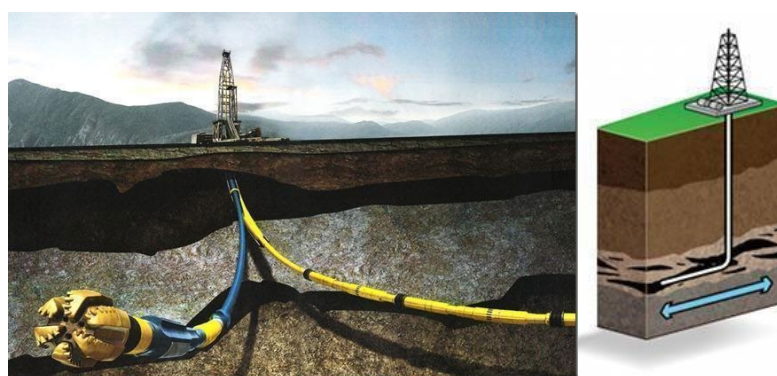


Figura 11. Pozo de bombeo horizontal (<https://www.portaldelpetroleo.com>)

Por otra parte, la tecnología tradicional de piletas de evaporación resulta tanto ineficiente para la industria como altamente invasiva para el medio ambiente, por tanto, los esfuerzos deben orientarse hacia la reducción significativa de su tamaño cuando no al reemplazo liso y llano de esta tecnología por otras más eficientes y amigables con el medio ambiente.

Para ello es necesario invertir en nuevas técnicas de separación del litio como, por ejemplo, las denominadas "vía húmeda" que no utilizan la radiación solar para eliminar el agua y precipitar las sales de donde se extrae el litio. Actualmente hay varias patentes en el mercado que utilizan técnicas electrolíticas, nanotecnología, etc. Si bien se hallan en estado de factibilidad de laboratorio, se hallan listas para escalar una prueba piloto de producción de litio. Sin ir muy lejos, Argentina cuenta con una experiencia de investigación exitosa: la patente internacional del INQUIMAE, un instituto UBA-CONICET, que entre el 2012 y 2017, con fondos públicos verificó que por el método electroquímico se puede recuperar el litio de un modo limpio, rápido, eficiente en energía y muy selectivo. El método en cuestión posee múltiples virtudes. Es más rápido, porque lleva horas en lugar de meses de evaporación durante el día; funciona 24 x 24 hs; es más selectivo, porque se obtiene litio no contaminado con magnesio o sodio; consume muy poca energía porque, como es una batería, la mitad del proceso genera energía que reutilizable en el propio proceso y,

por último, no contamina ya que no genera inmensas toneladas de descartes de sales con sustancias peligrosas.

El proceso industrial de separación por “vías húmedas” implica que el sobrante de agua, es decir más del 99% de la salmuera libre de litio, se puede **reinyectar** en el acuífero para que la presión no baje y así no alterar el equilibrio de las aguas.

6.3 Recomendaciones para la implementación de políticas públicas

Puesto que se trata de una actividad productiva estratégica, además de la sustentabilidad ambiental, los proyectos deben tener sustentabilidad político-social y, para alcanzar esta meta, se requiere la participación activa de todos los actores involucrados. La experiencia de la explotación de enclave y el negocio rápido muestra que el secreto produce conflicto y costos de todo tipo; por otro lado, la apertura y vinculación de actores genera un círculo virtuoso de desarrollo.

El **principio de transparencia** debe regir cualquier emprendimiento, por tanto, toda la información obtenida sobre los recursos naturales, a excepción de aquella que se encuentre explícitamente alcanzada por el secreto industrial en acuerdo a las leyes vigentes, debe ser publicada en todo momento (Ley 25.831 Régimen de libre acceso a la información pública ambiental, Ley Nacional 27.275 de acceso a la información pública, Ley Provincia de Jujuy N° 5.886 de acceso a la información pública, etc.).

La participación civil, en sus diferentes formas, no tiene por qué restringirse al mero rol de fiscalizadora sino que puede involucrarse al punto de asesorar a los Poderes Ejecutivos, Nacional y Provinciales, durante las diferentes etapas de la vida de un proyecto. Asimismo, por tratarse de la explotación de recursos públicos no renovables resulta lógico que también haya participación civil en el destino último de los fondos producto de impuestos y regalías.

Una forma de implementar estas ideas, en línea con la adhesión de la República Argentina a la iniciativa de Transparencia de la Industria Extractiva conocida como EITI (<https://www.argentina.gob.ar/produccion/eiti>), consiste en la conformación de un **Comité Consultivo para un Plan Litio**, el cual se puede constituir con representantes del Estado Nacional y Provinciales, organizaciones libres de la sociedad civil y el sector empresario. La conformación del comité puede abarcar múltiples organismos pertenecientes a los tres sectores:

- Por el Estado: Ministerios, Secretarías y organismos científico - técnicos descentralizados de la esfera pública, tanto Nacionales como Provinciales.
- Por la sociedad civil: comunidades locales que habiten las cuencas, ONGs, Universidades Nacionales, etc.
- Por el sector empresario: operadoras, cámaras empresariales, empresas público - privadas.

El Comité podrá asesorar a la máxima Autoridad del Poder Ejecutivo Provincial (PEP, Gobernador) en las distintas etapas (exploración, explotación y cierre) de los proyectos de litio, desde las fases más tempranas, a fin de evaluar y proponer mejoras a los proyectos presentados por las empresas.

Esto facilitará la toma de decisiones, ya que las mismas surgirán de los consensos entre los tres sectores.

También en este ámbito se podrán discutir Planes de Desarrollo Económico Regional para guiar la asignación de los Fondos económicos provenientes de la producción del litio (regalías mineras, impuestos, tasas, etc.), priorizando a las comunidades y poblaciones localizadas en las áreas de influencia de los yacimientos.

7 Nota sobre la etapa de cierre de yacimiento

Por último, se menciona la necesidad que los estados provinciales, en las etapas iniciales de los proyectos de litio, evalúen y cuantifiquen los costos de los pasivos ambientales en la etapa final o Cierre de mina. Los proyectos actuales, con método de evaporación de salmuera, tienen una alta probabilidad de generación de pasivos ambientales, los cuales no han sido considerados por los Estados en la instancia de aprobación de los proyectos, ni para la solicitud de los seguros o cauciones ambientales que resguardan al Estado Provincial y sus habitantes; tampoco en los costos asociados con estas remediaciones, ni se los ha detectado en los estados contables publicados por las empresas. La estimación de base que hemos calculado, para los residuos peligrosos de las sales de descarte en las ex piletas de evaporación, para el caso de Sales de Jujuy, asciende a USD 450.000.000.- (cuatrocientos cincuenta millones de dólares de EEUU).

Este vacío de cuantificación implica la externalización de costos por el pasivo ambiental generado por las empresas y la absorción de esos costos por parte de los Estados Provinciales y las futuras generaciones. Entre los costos que deberán asumir la sociedad y los Estados se encuentran:

- Salinización irreversible de las reservas de agua dulce ubicadas en los abanicos aluviales cercanos a los pozos de producción de salmuera y los pozos industriales de agua dulce.
- Residuos con constituyentes peligrosos dispuestos en forma insegura en las ex piletas de evaporación.
- Pérdida de los manantiales de abastecimiento de agua de consumo humano y ganado.
- Degradación de humedales impactados por las obras de infraestructura (caminos y ductos).
- Merma o inutilización de la producción de sal común en las salinas.
- Desplazamiento de vicuñas por la degradación de las pasturas y fuentes de agua.
- Salinización de pasturas por derrames de salmuera y emisiones de polvos atmosféricos de la zona de producción.

Todos estos pasivos deben ser valuados económicamente en las instancias tempranas del proyecto a fin de que el Estado pueda exigir la internalización de estos costos a las empresas que lo generan y que, asimismo, pueda evaluar el impacto económico y el daño ambiental que asumen las actuales y futuras generaciones, en caso de incumplimiento por parte de las empresas y de cómo se puede resarcir económicamente al Estado ante este incumplimiento, a fin de remediar el ambiente sin costo para el Estado y la sociedad.

8 Bibliografía

8.1 Bibliografía citada

Amaya, N., Blanco, D., Chamorro Cuestas, A., Gonnet, J., Hegoburu, C. y Sosa, H. (2019). Conservación y manejo de vegas altoandinas en Argentina y Perú. Fundación para la conservación y uso sustentable de los humedales/Wetlands International.

COCHILCO (2017). "Mercado internacional del litio y su potencial en Chile". Comisión Chilena del Cobre. División de Estudios y Políticas Públicas.

Dirección de Economía Minera (2017). "Mercado del litio. Situación Actual y Perspectivas, Informe especial". Ministerio de Energía y Minería de Argentina.

Dirección Nacional de Promoción Minera (2017) "Litio. Una oportunidad. Estado de Situación, mercado, perspectivas". Ponencia presentada en el VI Seminario "Litio en Sudamérica" Catamarca.

Gilbert, G. K. (1875). The Glacial Epoch III. Report on geographical and geological surveys west of the 100th meridian. U. S. Government Printing Office, Washington, 3: 86-104.

Jerez Henríquez, B. (2018). Impacto socioambiental de la extracción de litio en las cuencas de los salares altoandinos del cono sur. Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina, OCMAL. Santiago de Chile

Kandus, P. & Minotti, P. (2018). Propuesta de un marco conceptual y lineamientos metodológicos para el Inventario Nacional de Humedales. Documento elaborado por solicitud del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. C.D. N° 50/2017 MAyDS.

Lithium Americas (2018). NI 43–101 Technical Report: Updated Feasibility Study. Reserve Estimation and Lithium Carbonate Production at the Cauchari-Olaroz Salars, Jujuy Province.

Liu, W. & Agusdinata, DB. & Myint, SW. (2019). Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 80. 145-156. 10.1016/j.jag.2019.04.016.

Mabbutt, J.A. (1977). Desert landforms. An introduction to systematic geomorphology. Volumen 2, Cambridge. The MIT Press Edition. 340 pp.

Marazuela, M. A & Vázquez-Suñé, E. & Ayora, C. & Garcia-Gil, A. (2019). Towards more sustainable brine extraction in salt flats: learning from the Salar de Atacama. Science of The Total Environment.

Marazuela, M. A. & Vázquez-Suñé, E. & Ayora, C. & Garcia-Gil, A. & Palma, T. (2018). Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. Science of The Total Environment. 651.

Orocobre (2019). "Waste Storage and Evaporation Facilities". Discussion paper.

Rosen, M. (1994). The Importance of Groundwater in Playas: A Review of Playa Classifications and the Sedimentology and Hydrology of Playas. Geological Society of America Special Publication, Vol. 289, pp. 1-18.

Russell, I. C. (1883). Playas and playa-lakes. The Popular Science Monthly, 22: 380-383.

SMA (Superintendencia de Medio Ambiente de Chile). (2016). Formula cargos que indica a SQM Salar S.A. Res. EX. N° 1/ROL F-041-2016. <https://www.documentcloud.org/documents/5003676-Formulai%C3%B3N-De-Cargos.html>.

Snyder, C.T. (1962). A hydrological classification of valleys in the Great Basin western USA. International Association of Scientific Hydrology. Volumen 7: 53-59.

Sticco, M., Damiani, A. y Scravaglieri, P. (2018). Estudio de los Recursos Hídricos y el Impacto por Explotación Minera de Litio. Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc – Provincia de Jujuy. FARN

United States Geological Service (2014): "Lithium – For Harnessing Renewable Energy". Informe disponible en: <https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3035/pdf/fs2014-3035.pdf> Recuperado el 2 de Agosto de 2020.

Zicari, J. N. (2015): La producción minera de litio en América Latina y el ascenso económico de China y de Asia Oriental. *Revista Economía*; Lugar: Quito; vol. 67 p. 93 - 112

Zicari, J. N.; Fornillo, B.; Gamba, M. (2019). El mercado mundial del litio y el eje asiático. *Dinámicas comerciales, industriales y tecnológicas (2001-2017)*. *Revista Polis*.

8.2 Bibliografía consultada

Flexer, V., Baspineiro, C. & Galli, C. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of The Total Environment*. 639. 10.1016/j.scitotenv.2018.05.223.

Gajardo, G. & Redón Calvillo, S. (2019). Andean hypersaline lakes in the Atacama Desert , northern Chile : Between lithium exploitation and unique biodiversity conservation. *Conservation Science and Practice*. 1. 10.1111/csp2.94.

Houston, J. (2002). Groundwater recharge through an alluvial fan in the Atacama Desert, northern Chile: Mechanisms, magnitudes and causes. *Hydrological Processes*. 16. 3019 - 3035. 10.1002/hyp.1086.

Houston, J. (2009). A recharge model for high altitude, arid, Andean aquifers. *Hydrological Processes*. 23. 2383 - 2393. 10.1002/hyp.7350.

Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K. & Godfrey, L. (2011). The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. *Economic Geology*. 106. 10.2113/econgeo.106.7.1225.

Izquierdo, AE, Aragón R & Navarro, CJ (2018). Humedales de la Puna: principales proveedores de servicios ecosistémicos de la región. *Serie Conservación de la Naturaleza 24: La Puna argentina: naturaleza y cultura*.

Kampf, S., Tyler, S. , Ortiz, C. & Adkins, P. (2005). Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Journal of Hydrology*. 310. 236-252. 10.1016/j.jhydrol.2005.01.005.

Kampf, S. & Tyler, S. (2006). Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Advances in Water Resources*. 29. 336-354. 10.1016/j.advwatres.2005.02.017.

Marazuela, M.A, Vázquez-Suñé, E., Custodio, E., Palma, T., Garcia-Gil, A. & Ayora, C. (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). *Journal of Hydrology*. 561. 10.1016/j.jhydrol.2018.04.010.

Marazuela, M.Á., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., Garcia-Gil, A. & Palma, T. (2018). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. *Science of The Total Environment*. 654. 10.1016/j.scitotenv.2018.11.196.

Mignaqui, V. (2019). Puna, litio y agua. Estimaciones preliminares para reflexionar sobre el impacto en el recurso hídrico. *UNSAM. Revista de ciencias sociales, segunda época N° 36, primavera 37, pp. 37-55*

Rettig, SL, Jones,, BF, & Risacher, F. (1980). Geochemical evolution of brines in the Salar of Uyuni, Bolivia. *Chemical Geology Volume 30, Pages 57-79*.

Scanlon, B., Keese, K., Flint, A., Flint, L., Gaye, C.B., Edmunds, W. & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*. 20. 3335 - 3370. 10.1002/hyp.6335

9 ANEXO MATRIZ DE IMPACTOS

#	Sitio	EMPRESA	Instalación/ Actividad	Año	Daños ambientales	CATEGORÍA IMPACTO	Evidencia	Fuente
A1	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Derrame de agua salada en campo Quijano	2019	Salinización de suelos y humedales	DEMOSTRADO	Orocobre Annual Report 2019	Capítulo Regulación y desempeño o ambiental. Página 47
A2	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Derrame de combustible en suelo en Tincalayu	2019	Contaminación de suelos con residuos peligrosos	DEMOSTRADO	Orocobre Annual Report 2019	Capítulo Regulación y desempeño o ambiental. Página 47
A3	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Caminos y acueductos en el salar	2019	Modificación del flujo natural superficial del agua. Alteración del ciclo de precipitación de sales. Alteración del balance hídrico	POTENCIAL	Foto en Orocobre Annual Report 2019	Portada Página 2
A4	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Derrame de salmuera en la localidad de Diablillos desde las perforaciones	2016	Salinización de suelos y humedales	DEMOSTRADO	Orocobre Annual Report 2016	Capítulo Regulación y desempeño o ambiental. Página 40
A5	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Derrame de salmuera en la localidad de Diablillos desde las perforaciones	2015	Salinización de suelos y humedales	DEMOSTRADO	Orocobre Annual Report 2015	Capítulo Regulación y desempeño o ambiental. Página 50
A6	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Caminos y acueductos en el salar	2015	Modificación del flujo natural superficial del agua. Alteración del ciclo de precipitación	POTENCIAL	Foto en Orocobre Annual Report 2015	Portada Página 1

#	Sitio	EMPRESA	Instalación/ Actividad	Año	Daños ambientales	CATEGORÍA IMPACTO	Evidencia	Fuente
					de sales. Alteración del balance hídrico			
A7	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Derrame de salmuera en la localidad de Diablillos desde las perforaciones	2014	Salinización de suelos y humedales	DEMOSTRADO	Orocobre Annual Report 2014	Capítulo Regulación y desempeño o ambiental. Página 39
A8	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Piletas de evaporación transformadas en rellenos de residuos	2019	Pasivo ambiental. Viola Ley 24051. Dto. 831/93. REQUISITOS TECNOLÓGICO S EN LAS OPERACIONES DE ELIMINACIÓN (ARTÍCULO 33, ANEXO III). OPERACIONES DE ELIMINACIÓN NO ACEPTABLES.	DEMOSTRADO	Orocobre Waste Storage and Evaporation Facilities Discussion Paper. September 2019	Documento completo
A9	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Piletas de evaporación transformadas en rellenos de residuos	2019	Riesgo de rotura por flujos torrenciales y/o terremotos. Salinización de humedales y suelos con sales exóticas	POTENCIAL	Orocobre Waste Storage and Evaporation Facilities Discussion Paper. September 2019	Documento completo
A10	Argentina Olaroz - Cauchari	OROCOBRE Sales de Jujuy SA	Aislamiento incompleto de los Pozos de producción de salmuera	2018	Salinización de reservas hídricas subterráneas de agua dulce en el Abanico Archibarca	POTENCIAL	Ausencia de aislamiento de cemento en el espacio anular entre los 80 y 135 mbbp.	Congreso Hidrogeolo -gía 2018 Cauchari NI 43-101 Technical Report 2019
C1	Chile Atacama	SQM Salar SA	Extracción de salmuera	2016	Salinización de acuiferos dulces	DEMOSTRADO	INFRACCIÓN 1: Extracción de salmuera por sobre lo autorizado, Considerando 27, durante agosto 2013 y	RES.EX 1 ROL F-041- 2016

#	Sitio	EMPRESA	Instalación/ Actividad	Año	Daños ambientales	CATEGORÍA IMPACTO	Evidencia	Fuente
							agosto 2015	
C2	Chile Atacama	SQM Salar SA	Zona de flora autóctona	2016	Afectación de la flora autóctona	DEMOSTRADO	INFRACCIÓN 2 Afectación progresiva del estado de vitalidad de los algarrobos en el área del Pozo Camar 2. No se informó a la Autoridad desde el 2013	RES.EX 1 ROL F-041- 2016
C3	Chile Atacama	SQM Salar SA	Pozos de agua dulce	2016	Alteración de la calidad de agua dulce	DEMOSTRADO	INFRACCIÓN 3 Entrega de información incompleta de la extracción de agua dulce, niveles de pozos y formaciones vegetales entre 2013 y 2015	RES.EX 1 ROL F-041- 2016
C4	Chile Atacama	SQM Salar SA	Sistema lacustre Peine	2016	Alteración de sistema lacustre / humedal	DEMOSTRADO	INFRACCIÓN 4 Sistema lacustre Peine y el Plan de seguimiento Ambiental Hidrogeológic o. No permite garantizar la mantención de las condiciones de funcionamient o natural del sistema	RES.EX 1 ROL F-041- 2016
C5	Chile Atacama	SQM Salar SA	Suelos	2016	Aumento del 90% de la salinidad y acidez de los suelos	DEMOSTRADO	INFRACCIÓN 5 Falta de registros históricos de meteorología local, monitoreo de variables hidrogeológica s.	RES.EX 1 ROL F-041- 2016

#	Sitio	EMPRESA	Instalación/ Actividad	Año	Daños ambientales	CATEGORÍA IMPACTO	Evidencia	Fuente
C6	Chile Atacama	SQM Salar SA	Acuíferos dulces	2016	Salinización de acuíferos dulces	DEMOSTRADO	INFRACCIÓN 6 Modificación sin autorización de las variables de los planes de contingencia. Modificación de los pozos de monitoreo sin autorización Alteración de los umbrales de activación de los niveles fases I y II	RES.EX 1 ROL F-041- 2016