

CAPÍTULO 4

Explotación del litio en la Puna Austral: implicancias ambientales

María del Carmen Aranda Álvarez

Introducción

El **litio**, el más liviano de los metales y uno de los más reactivos, se ha transformado en un elemento clave para los avances tecnológicos. Además de su uso en farmacología, de largo desarrollo, es el componente esencial de las baterías incorporadas en la mayoría de los dispositivos electrónicos de consumo masivo. Sus aplicaciones también se han extendido a la formulación de grasas lubricantes, cementos y cerámicos, y a la preparación de aleaciones livianas para la industria aeronáutica, aeroespacial y automotriz (Baran, 2017, p. 5; Calvo, 2017, p. 70). En las últimas décadas, debido a las preocupaciones asociadas con los combustibles fósiles –reservas que tienden a agotarse y emanaciones de dióxido de carbono que contaminan la atmósfera–, se ha impulsado la generación de baterías de ion-litio, de alta densidad energética, que posibilitan la conversión de automóviles a combustión por otros de tipo eléctrico o híbridos (Alonso, 2017, p. 50). La importancia estratégica del litio y el cambio en su fuente de provisión, de rocas a salmueras, disminuyendo los costos de explotación (López de Azarevich *et al.*, 2020, p. 222), ha provocado un importante aumento de su producción en respuesta a una creciente demanda por parte de la industria de baterías.

Las mayores reservas mundiales del litio en salmueras –fluido subterráneo de altísima salinidad de los salares–, se encuentran en los Andes Centrales, precisamente, en el llamado “**Triángulo del Litio**”, una región que comprende a los salares de altura de la Puna argentina y chilena y del Altiplano boliviano, debiendo incluirse también el peruano (Alonso, 2017, pp. 49-50; Calvo, 2017, p. 70). El consecuente establecimiento de empresas mineras en esta región, ha resultado en transformaciones sociales, económicas y ambientales. En Argentina, la minería del litio se posiciona como uno de los principales asuntos de la agenda política y económica nacional, no sólo por las regalías que obtienen las provincias andinas, sino también por las expectativas que genera el establecimiento de sus proyectos para la promoción del desarrollo local y regional. Por otro lado, el uso de agua en el proceso de obtención de litio, es una de las temáticas más controvertidas, ya que la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra condicionada por las características áridas que presenta el ambiente de la Puna (Aranda Álvarez, 2018, p. 36).

En este contexto, en que la “economía” y el “ambiente” mantienen una relación dialéctica compleja, la rápida incursión de la minería del litio en los salares puneños, ha promovido la realización de trabajos científicos desde diversas disciplinas. Se indaga sobre el elemento, su génesis, aplicaciones y técnicas de extracción. Asimismo, se realizan estudios sobre la gestión ambiental y el desarrollo sustentable de la explotación. En esta última línea de investigación, se inscribe el presente capítulo, con el propósito de contribuir al conocimiento acerca de las implicancias ambientales de la explotación del litio en salmueras, considerando los aspectos físico-naturales y socio-territoriales de la Puna Austral. En esta región se emplaza la mayoría de los proyectos y se encuentra el más antiguo de ellos, el “Fénix” (figura 1), en producción desde el año 1997.

Figura 1. Proyecto Fénix. Puna Austral



1) Ubicación de la Puna Austral y el Salar del Hombre Muerto; 2) Proyecto Fénix, Salar del Hombre Muerto Fuente: 1) elaborado por María del Carmen Aranda Álvarez sobre imágenes Google Satellite y WMS/IGN; 2) Imagen Google Satellite.

El procedimiento metodológico que permite alcanzar esta propuesta, se basa en el estudio del medio ambiente transformado o en transformación por su relación con la actividad minera. Según la Primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, el medio ambiente se define como: “el conjunto de elementos físicos, químicos, biológicos y de factores sociales, capaces de causar efectos directos o indirectos, a corto o largo plazo, sobre los seres vivos y las actividades humanas” (Foy, 1998). De este concepto se infiere claramente que el

ambiente es objeto de estudio, tanto de las ciencias sociales como de las naturales (Gianuzzo, 2010, p.132). En base a este enfoque holístico, se analizarán las implicancias ambientales de la minería del litio, a partir de la indagación bibliográfica de diferentes disciplinas del conocimiento.

La riqueza de los salares

A diferencia del oro, la plata o el cobre, el litio no pertenece a los metales nativos, es decir que no se encuentra en una forma metálica en la naturaleza. Se presenta como iones libres en salmueras de **salares**, en ciertas rocas y arcillas, y en aguas continentales y marinas. Si bien los mares y océanos alojan millones de toneladas de litio, su extracción, con la tecnología actual, resultaría antieconómica. Por su parte, las rocas pegmatíticas litíferas⁷⁰ han sido explotadas con éxito en Australia, Estados Unidos y China, al igual que en Argentina. No obstante, gran parte de la producción mundial de litio proviene de las **salmueras** debido a la gran diferencia de costos para su explotación.

Las reservas de litio en salmueras a escala global, comprobadas para el año 2019, son de 40 millones de toneladas, de las cuales, aproximadamente el 80 %, se encuentra en el Triángulo del Litio. Argentina es el segundo productor mundial de litio, después de Chile, proveniente de salmueras y el tercero, luego de Australia y nuestro país vecino, si se incluye la explotación desde las pegmatitas (Alonso, 2020, pp. 152-153, 158).

La Puna: geología y geomorfología

El conocimiento, que actualmente se tiene sobre el litio en los salares de la Puna argentina, comenzó hace un siglo, cuando el químico y geólogo Luciano Catalano descubrió su potencial en la década de 1920. Las investigaciones intensivas, en los salares de la Puna, comienzan en la década de 1970, etapa en la que el litio tenía fines de uso militar y aeroespacial. En 1980, el geólogo Igarzábal y el ingeniero Poppi, publicaron estudios sobre la tipología de las salmueras, y el origen y evolución de las cuencas andinas (Alonso, 2020, pp. 155, 158-159). En 1990, Igarzábal y Alonso propusieron clasificar a los salares como “cristalinos” y “terrosos”, predominando las facies evaporíticas, en los primeros, y facies clásticas o terrosas, en los segundos (Igarzábal y Alonso, 1990 citado en Alonso, 2020, p. 158). Los aportes de Ricardo N. Alonso, doctor en

⁷⁰ Las pegmatitas son rocas filonianas o subvolcánicas que tienen un tamaño de grano muy grueso, superior a 20 mm, incluso en ocasiones con cristales muy grandes. Se trata de rocas ígneas intrusivas originadas a partir de magma que se ha solidificado en grietas o fisuras. Predominantemente son de composición granítica (cuarzo, feldespato y mica) pero esta característica no es excluyente. Su importancia radica en los minerales que pueden contener. Las pegmatitas con espodumeno (silicato de aluminio y litio) son una de las fuentes de este metal (Etcheverry *et al.*, 2020, p. 33).

ciencias geológicas, actualmente continúan y forman parte de la bibliografía de los más importantes artículos científicos sobre los Andes, la Puna, las salmueras y el litio.

Los Andes Centrales, se extienden aproximadamente desde los 15° a los 40° de latitud sur, y comprenden diferentes elementos geológicos y unidades geomorfológicas (May *et al.*, 2011, p. 248). Aún en formación, son producto de la subducción⁷¹ de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana. Antes de su existencia, en su lugar, se extendía un mar cálido y diversos cuerpos de aguas dulces y/o salobres. Luego de millones de años, durante el Oligoceno-Mioceno⁷², al producirse la fusión de la placa de Nazca, un canal de magma atravesó la corteza para formar la actual cordillera volcánica, la Zona Volcánica Central (Alonso, 2017, p. 54). Al norte de los 28° de latitud sur, las Cordilleras Oriental y Occidental –ambas con cumbres de más de 6000 metros de altura– encierran una amplia meseta que ronda los 4000 m s. n. m., conocida como Altiplano, en Perú y Bolivia, y Puna, en Argentina y Chile (May *et al.*, 2011, p. 248; García *et al.*, 2013, p. 303).

Turner (1970) fue quien diferenció la Puna argentina del Altiplano boliviano. La **Puna** presenta características geológicas distintas a la porción norte (Altiplano), una mayor elevación (Turner, 1970 citado en Ramos, 2017, p. 44) y una topografía más joven, identificada por cuencas y cordilleras (Munk *et al.*, 2016, p. 359). Las depresiones menores están ocupadas por lagunas, salitrales o barreales, mientras que en las cuencas más amplias, se encuentran los grandes salares representando el nivel de base (Hongn y Seggiaro, 2001, p. 27). En el año 1984, Alonso, Gutiérrez y Viramonte propusieron dividir a la Puna en dos sectores, separados por el lineamiento de Calama-Olacapato-Toro: la Puna Septentrional o Jujeña, donde las rocas más antiguas afloran son ordovícicas (era Paleozoica)⁷³, y la **Puna Austral** o salto-catamarqueña (figura 1), donde afloran las rocas proterozoicas, pertenecientes al eón Precámbrico (Alonso *et al.*, 1984 citado en Ramos, 2017, p. 45). La Puna Austral, es más árida, por lo que también es llamada Puna desértica, y presenta una superficie mayor de salares que la Puna Septentrional.

Una provincia evaporítica

La Puna se define como una provincia evaporítica, donde los **salares** se desarrollan hasta niveles profundos (Alonso, 2006, p. 155). Igarzábal (1984) destaca que la presencia conspicua de salares resulta de la congruencia de cuatro factores: “la existencia de depresiones tectónicas; un clima marcadamente árido, un drenaje predominantemente endorreico y la elevada provisión de sales a partir de la meteorización química” (Igarzábal, 1984 citado en Seggiaro *et al.*, 2007, p. 46).

⁷¹ Ver esquema en el Capítulo 5. *Terremotos: similares magnitudes, diferentes consecuencias... ¿Por qué?*

⁷² Ver su ubicación temporal en el cuadro de eras geológicas en Capítulo 2. *El Antropoceno: el precio de la tecnología.*

⁷³ Ver su ubicación temporal en el cuadro de eras geológicas en Capítulo 2. *El Antropoceno: el precio de la tecnología.*

El **origen de las depresiones** tectónicas se remonta al periodo del último máximo glacial, en la época pleistocena del periodo Cuaternario (Godfrey *et al.*, 2013, p. 93). En esta época, en las cuencas endorreicas se desarrollaron lagos de agua dulce. Luego, en el Holoceno, estos lagos se desecaron y se salinizaron, formando los salares (Igarzábal, 1984, 1991, citado en Seggiaro, 2015, p. 46).

La **aridez climática** se explica a partir de la ubicación geográfica de la Puna. En el oriente, la altura de la barrera orográfica produce el frenado de los vientos húmedos del anticiclón del Atlántico y de las lluvias que provienen desde la cuenca del Amazonas (Alonso, 2006, p. 160; Alonso, 2017, p. 55). Al oeste, los Andes Centrales constituyen un obstáculo para la circulación atmosférica sobre casi la totalidad de América del Sur, de lo que resulta la llamada “Diagonal Árida” (May *et al.*, 2011, p. 248). Además, a estas latitudes, el Océano Pacífico está controlado por la corriente fría de Humboldt, lo que disminuye la evaporación y la formación de nubes en el océano y, por lo tanto, la llegada de precipitaciones al continente (Alonso, 2017, p. 55).

El **drenaje endorreico** resulta de las características del sistema hidrogeológico. Los ingresos de agua a la cuenca del salar están representados por las escasas precipitaciones pluviales y/o nivales (de la Hoz *et al.*, 2013, p.61), mientras que los egresos naturales son casi exclusivamente por evaporación. Debido a estas condiciones de aridez, la mayoría de los ríos de la Puna son de régimen intermitente, de lo que resulta un exiguo escurrimiento superficial. Al contrario, los suelos porosos facilitan la infiltración del agua. Una parte del flujo subterráneo puede brotar como manantiales y formar vegas y si, en su recorrido se aproximan a cámaras magmáticas activas⁷⁴ o regiones de alto grado geotérmico, se convierten en aguas termales (Alonso, 2017, p. 55). Otra parte de las aguas subterráneas descarga directamente en el salar, y debido a la escasa profundidad del nivel freático, conforma una zona de contacto de agua dulce con la salmuera (García *et al.*, 2020 p. 52).

Los **procesos de meteorización** varían en el salar, constituyendo tres sub-ambientes: un ambiente externo, formado por aluviones clásticos pedemontanos y dominado por la meteorización física; un ambiente de transición, donde se combinan procesos de meteorización física y química, con sedimentos clásticos y evaporíticos; y un ambiente central, donde predominan las evaporitas como resultado de la meteorización química. Las **evaporitas** son sedimentos precipitados a partir de salmueras, es decir que se originan en el mismo salar, a diferencia de los sedimentos clásticos que provienen de la destrucción de una roca madre. En el ambiente evaporítico abundan las salmueras metálicas, portadoras de elementos químicos de gran importancia económica, como el **litio**, el potasio, el boro y el magnesio. Estos elementos fueron fundamentalmente acarreados al salar por los flujos de aguas provenientes de las termas y manantiales (Alonso, 1999, pp. 1907-1908; Alonso, 2006, p. 164).

Los factores geofísicos le otorgan a la Puna su calidad de provincia evaporítica, rica en minerales como el litio. Por otro lado, estos mismos factores, representan condiciones climáticas y

⁷⁴ Ver Capítulo 6. *Paradoja volcánica: creación y destrucción.*

edáficas desfavorables para la vida animal y vegetal y, por consiguiente, para el establecimiento de poblaciones humanas. Cabrera fue uno de los pioneros en describir la fitogeografía de esta región. Las asociaciones vegetales predominantes son las estepas arbustiva y gramínea, abiertas y discontinuas. Pero, en las zonas más favorecidas por la presencia de agua, como en las vegas y en los márgenes de las lagunas y salares, crecen pastizales de gramíneas, graminoides y juncáceas (Cabrera, 1951, p. 52; Paoli *et al.*, 2002, 88). Por su parte, la fauna es rica en roedores y reptiles. Entre las especies de mayor porte, se encuentran los camélidos –guanaco (*Lama guanicoe*), vicuña (*Vicugna vicugna*) y llama (*Lama glama*) –, el zorro colorado (*Pseudalopex culpaeus*) y el puma (*Puma concolor*); y entre las aves, se destaca el cóndor andino (*Vultur gryphus*), como especie emblemática (Paoli *et al.*, 2002, 91).

Desarrollo económico y conflicto ambiental

La Puna Austral resulta inapropiada para el desarrollo de grandes concentraciones poblacionales. Sin embargo, desde tiempos prehispánicos, ha sido habitada por diversas comunidades dispersas en extensos territorios. Actualmente, en Argentina, estas comunidades se emplazan en el sector occidental de las provincias de Salta y Catamarca. En Salta, ocupan la parte oeste del **departamento de Los Andes** (San Antonio de los Cobres, capital del departamento, se ubica en el sector NE, fuera de la Puna Austral), donde se encuentran las siguientes poblaciones rurales: Tolar Grande, con 230 habitantes; Santa Rosa de los Pastos Grandes, con 168 habitantes y Olacapato, con 218 habitantes (*City Population*, Salta, 2010). En Catamarca, la Puna Austral se extiende casi en la totalidad del área del **departamento de Antofagasta de la Sierra**, con 1436 habitantes. Su capital, homónima, para el año 2010 contaba con 730 habitantes, distribuyéndose el resto en las localidades rurales de Antofalla, Los Nacimientos, El Peñón y otros caseríos (*City Population*, Catamarca, 2010).

Entre las **actividades productivas** de las comunidades puneñas, la ganadería extensiva es la más importante. Se crían ovinos, caprinos y camélidos, principalmente llamas. La disponibilidad de forraje y la distribución de las aguadas, en la mayoría de los casos, obliga a practicar la trashumancia. Los campos altos, piedemontes y serranías son pastoreados en la estación lluviosa, mientras que las ciénagas se utilizan en épocas críticas. La agricultura de subsistencia se reduce a pequeños sembradíos de papa, maíz, haba y algunas especies forrajeras. Otras actividades, que generan ingresos a los lugareños, son la producción de bloques de sal, la venta de artesanía al turismo y el trabajo temporal que requiere la instalación de empresas mineras. Así también, es habitual que alguno de los miembros de las familias obtenga algún ingreso extrapredial⁷⁵ relacionado con planes y programas sociales estatales. En este precario contexto laboral,

⁷⁵ Ingresos obtenidos por fuera de la propia explotación.

es muy común que los jóvenes migren hacia las grandes ciudades en busca de alternativas laborales (Paoli *et al.*, 2002, pp. 64, 266-267).

Los **servicios públicos básicos** presentan deficiencias para las poblaciones de la Puna, dificultando aún más las condiciones de vida. La energía eléctrica en la mayoría de las localidades se genera mediante la utilización de motores de combustión interna y otro tipo de generadores. El agua para consumo humano proviene de cuerpos hídricos subterráneos, de donde suele extraerse de pozos con baldes, y no se dispone en la cantidad y/o calidad requerida. Solo las localidades más numerosas poseen hogares con servicio de agua potable y saneamiento básico, presentándose problemas de carencia en los parajes y pequeñas poblaciones. La inversión pública suele ser insuficiente para mejorar las condiciones habitacionales (Paoli *et al.*, 2002, pp. 171, 266, 269). La inversión privada, representada por la minería, suele generar grandes expectativas por un desarrollo regional. Sin embargo, es común que la instalación de proyectos mineros sólo traslade beneficios económicos a la localidad más cercana al emprendimiento (Aranda Álvarez, 2018, p. 63). De todas formas, en los últimos años, estas expectativas se han visto renovadas con la llegada de numerosas compañías mineras de litio a la Puna Austral.

El Estado nacional, a través de su **legislación**, ha sido un actor altamente influyente en el devenir de las inversiones mineras. A partir de la década de 1990, Argentina inicia un proceso de transformación e inserción internacional para el sector minero, opta por desregular la actividad y adapta la legislación para favorecer a la inversión privada. La Reforma Constitucional de 1994, la reforma del Código de Minería de 1995 y las legislaciones provinciales al respecto, son algunos de sus instrumentos. Durante 2004 se pone en marcha, desde la Presidencia de la Nación, el Plan Minero Nacional “La Argentina Minera” (Aranda Álvarez, 2018, pp. 57-58), considerando a la minería una actividad productiva sustentable de gran ayuda para el crecimiento productivo, el incremento del empleo, el aumento de las exportaciones y la generación de divisas (Secretaría de Minería, 2004). Luego de las reformas legislativas, a nivel nacional y provincial, se sucedieron varios periodos de fuertes inversiones con el objetivo de detectar concentraciones favorables de litio. Fue a partir del año 2010, que se inicia el llamado “**boom del litio**”, cuando decenas de empresas comienzan sus estudios exploratorios en unos veinte salares. En esta etapa se descubren salmueras ricas en litio hasta los 500 metros de profundidad (Alonso, 2020, p. 160). En el año 2015, luego de un periodo de altibajos que acompañaron a las crisis económicas, comienzan a llegar nuevos capitales, que actualmente se traducen en proyectos en diversas etapas de avance (Alonso, 2017, p. 63).

En total, tres proyectos han avanzado a la etapa operativa y han logrado exportar su producción. El más antiguo es el proyecto “Fénix” de Minera del Altiplano FMC Lithium (actualmente Livent) que, desde el año 1997 produce carbonato de litio, en el Salar del Hombre Muerto (Cataramarca), y cloruro de litio, en su planta ubicada en la ciudad de Güemes (Salta). Recientemente, el proyecto “Sal de los Ángeles”, ubicado en el salar Diablillos (Salta), también ha realizado su primera exportación de cloruro de litio (*Mining Press*, 2020). En Jujuy, región de la Puna septentrional, se localiza otro de los proyectos en etapa operativa, “Salar de Olaroz” que produce carbonato de litio, desde 2015.

En la Puna Austral se concentran la mayoría de los nuevos proyectos mineros en etapas menos avanzadas (Scheingart y Rajzman, 2021, pp. 27, 34-38, 42). En esta región se espera un crecimiento económico a partir de la minería, por lo que las empresas suelen ser bienvenidas por la comunidad. Sin embargo, es común que surjan conflictos, principalmente por la ocupación de tierras, debido a las concesiones otorgadas a las empresas, y por el uso del agua que conlleva la actividad. La propiedad territorial es una de las cuestiones más problemáticas ya que los pobladores descendientes de pueblos originarios fundamentan, por derecho natural, la propiedad de las tierras que ocupan y ocuparon sus antepasados. Sólo unos pocos obtienen su título de posesión veinteañal, siendo lo más usual tramitar un título comunitario de tierras. El otro problema es el uso del agua en la minería como consecuencia de la escasez de agua superficial y subterránea. Los conflictos surgen cuando la comunidad ve amenazada la provisión de agua que necesita para su subsistencia (Paoli *et al.*, 2002, pp. 112, 171, 258).

Explotación del litio: el método evaporítico

El método evaporítico, propio de los salares, consiste en la extracción del litio por evaporación solar de la salmuera. Las decisiones para el inicio de un proyecto de explotación en los salares, difieren de las correspondientes a la minería clásica. McCord y su equipo expresan al respecto: “Una de las diferencias más notables, además del estado líquido de la mena, es que se trata de reservas variables en el tiempo, tanto en volumen como en ley⁷⁶” (McCord *et al.*, 2011 citado en Hernández *et al.*, 2013, p. 319). Por estas razones, la metodología para la evaluación de soluciones salinas subterráneas se basa fundamentalmente en la hidrogeología (Hernández *et al.*, 2013, p. 319). Las variaciones en volumen pueden resultar de las diferentes características espaciales y temporales de la salmuera, y también como consecuencia de los procesos de extracción que pueden modificar la dinámica de todo el salar, más allá del área de explotación (Schalamuk *et al.*, 2005, citado en Hernández *et al.*, 2013, p. 322).

Por lo tanto, en las primeras fases de la minería evaporítica se realiza el **reconocimiento hidrogeológico** y se cuantifican las reservas de las salmueras. Asimismo, se evalúan las condiciones de disponibilidad del agua dulce para uso industrial y humano en la actividad. La localización de reservorios con agua dulce en la Puna es una tarea que está condicionada por los aspectos climáticos y por los mecanismos de recarga, que determinan la cantidad y calidad del recurso hídrico (García *et al.*, 2020, pp. 45-46). Luego, la etapa exploratoria incluye la **perforación de pozos** para la obtención y análisis de muestras de salmuera, en las que se evalúa la composición, conductividad eléctrica, pH, temperatura, densidad y se determinan las variaciones laterales y en profundidad de las diferentes muestras. Si el reservorio tiene concentraciones de

⁷⁶ La ley de mineral se refiere al contenido del elemento útil de un mineral encontrado en una roca, expresado en %. Se puede ampliar el concepto en el Capítulo 3. *Johannesburgo (Sudáfrica): el legado de la explotación aurífera.*

interés en el contenido de litio y posee reservas económicamente rentables, es posible avanzar a la etapa de explotación (García *et al.*, 2013, pp. 304, 309).

Para llevar a cabo la **explotación** se realizan perforaciones que llegan hasta la zona saturada de salmuera, entre 50 y 200 metros de profundidad, luego se instalan los pozos con la bomba para su extracción (Porta y Miguel, 2020, p. 133). El fluido, la salmuera, se opera en enormes piletas, llamadas “pozas”, de baja profundidad –aproximadamente 30 centímetros– y decenas de hectáreas de superficie, construidas en las márgenes del salar. En las pozas, por evaporación solar, comienzan a precipitar secuencialmente un conjunto de sales –sodio, potasio, magnesio– debido a la solubilidad diferencial, resultando un porcentaje mayor de litio. Este proceso suele demorar entre 18 y 24 meses, hasta que la concentración de litio es de alrededor de un 6%. Posteriormente, este concentrado, rico en cloruro de litio (LiCl), es sometido a un proceso de purificación, y mediante el agregado de carbonato de sodio (Na₂CO₃), se genera el carbonato de litio (Li₂CO₃). El carbonato de litio es la materia prima para producir hidróxido de litio (LiOH) o cloruro de litio (LiCl) de alta pureza. A partir del cloruro de litio, por electrólisis de sales fundidas, se obtiene el litio metálico, utilizado para la fabricación de baterías (Porta y Miguel, 2020, p. 133; de la Hoz *et al.*, 2013, p. 63).

El método evaporítico no consume energía artificial, depende de la composición química de la salmuera y de las condiciones meteorológicas del lugar -radiación solar, vientos, velocidad de evaporación y régimen de lluvias- (Calvo, 2017, p. 73). “A diferencia de (...) la minería metálica a gran escala, no comparte la voladura de montañas ni el uso masivo de explosivos y cianuro” (Aranda, 2011, párr. 6). Debido a estas características, la minería del litio en salmueras, es considerada como una “minería limpia”. No obstante esta calificación, puede generar externalidades negativas en el medio físico natural y en los pobladores bajo su área de influencia sino se considera el delicado equilibrio de los sistemas hidrogeológicos del salar (Porta y Miguel, 2020, p. 129).

El aumento de las presiones antrópicas, como el bombeo que se realiza para la extracción, puede provocar, a largo plazo, modificaciones en la densidad de la salmuera, la profundización de los niveles piezométricos y cambios en la estabilidad de la interfaz agua dulce/agua salada en el salar, produciendo mezclas y otras alteraciones hidrodinámicas e hidroquímicas (García *et al.*, 2020, p. 49, 55). Por otro lado, el proceso de la separación del litio del resto de los compuestos –calcio, magnesio, boro, hierro, aluminio y trazas de otros metales– (Calvo, 2017, p. 73) genera desechos que suelen acumularse y ser expuestos a los vientos, lo que representa un potencial contaminante para el aire, los suelos y cuerpos de agua (Aranda Álvarez, 2018, p. 42). Otro aspecto a considerar es que los salares presentan comunidades microbianas únicas, claves para la existencia de otros organismos, ya sea por su rol trófico, estructural, metabólico o funcional, en distintos hábitats. Actualmente, se discuten los efectos a nivel microbiano, que puede ocasionar la extracción de salmuera para la industria del litio en salares altoandinos (Dorador Ortiz, 2021, pp. 164-165).

En el desértico ambiente de la Puna Austral, como se ha mencionado, es primordial evaluar la disponibilidad de agua dulce de calidad, necesaria para el uso minero e industrial (García *et al.* 2020, p. 51). Los procedimientos de separación y purificación para arrastrar la solución que contiene litio, requieren de un elevado consumo de agua dulce, la cual debe extraerse en inmediaciones del área de explotación o bien importarse de otra cuenca cercana (Porta y Miguel,

2020, p. 133). No es necesario que la calidad del agua equipare a la del consumo humano, pero deben considerarse valores máximos de boro, arsénico, magnesio y sílice, ya que interfieren en el proceso productivo para la obtención de carbonato de litio (García *et al.*, 2020, 51). De todas formas, la localización de fuentes de agua que presenten bajos contenidos de estos elementos es muy difícil en esta región, ya que son parte de las rocas y sedimentos de origen volcánico que caracterizan al ambiente de la Puna. Por lo tanto, el uso de agua dulce para la minería podría competir con el agua que es apta para el consumo humano y fundamental para mantener el equilibrio de los ecosistemas (Porta y Miguel, 2020, 133).

Tomando una concentración de litio de 1 g/L, cada tonelada de litio extraída representa la evaporación un millón de litros de salmuera, por lo que la pérdida de agua por evaporación no es despreciable más aún por tratarse de zonas desérticas (Calvo, 2017, p. 73).

Legislación y gestión ambiental

En la Puna, los derechos para el uso de agua quedan, en general, establecidos por usos y costumbres, aunque formalmente están regidos por los códigos correspondientes. Por otra parte, el nivel de eficacia en la aplicación y control de la legislación del agua suele ser muy bajo, lo que resulta en su incumplimiento (Paoli *et al.*, 2002, p. 220). En cuanto a la normativa minera, está representada por un conjunto de leyes comunes a toda la minería metalífera, y no se encuentra ninguna normativa específica referida a la extracción e industrialización del litio.

Los primeros intentos de subsanar este vacío jurídico se dieron en el año 2017, cuando las provincias litíferas y la Nación acordaron la creación de la **Mesa del Litio en Salares**, una instancia de diálogo, integrada por profesionales de distintas disciplinas, con la tarea de generar acuerdos y protocolos para el estudio, exploración y explotación del litio, y con el propósito de establecer pautas normativas ambientales para la adecuada explotación del recurso (Porta y Miguel, 2020, p. 131).

En las grandes empresas mineras, la gestión ambiental tiene un peso muy importante en su sistema organizativo, no sólo como cumplimiento de la normativa legal, sino como un componente integral del desarrollo sostenible de la actividad, articulando aspectos ambientales, sociales y económicos. Si bien, la extracción de recursos naturales no renovables no permite hablar de forma explícita o directa, de una minería sostenible, el proyecto “Minería, Minerales y Desarrollo Sostenible⁷⁷” (MMSD, por sus siglas en inglés), propone pautas para que la minería compense esta falencia. El **enfoque “blando” del desarrollo sostenible**, concebido por el MMSD, tiene en cuenta la noción de “capital” como un elemento central para su propuesta. Esta implica que las diversas

⁷⁷ Creado en el año 2000, en asociación entre el Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (Carmona García *et al.*, 2017, p. 51).

formas de capital –natural, manufacturado, humano, social y financiero- son “intercambiables”, considerando que las generaciones venideras podrían recibir menores cantidades de un capital, en tanto una mayor cantidad de otro lo compense (Carmona García *et al.*, 2017, 51).

El Consejo Internacional de Minería y Metales (*ICMM*, por sus siglas en inglés), una organización que fomenta prácticas orientadas al desarrollo sostenible y la producción responsable de los recursos de minerales y metales, ha elaborado 10 principios que las empresas asociadas deberían cumplir: 1) Realizar prácticas de negocios éticas y mantener la transparencia en la gobernanza con el propósito de respaldar el desarrollo sostenible; 2) Integrar estrategias de desarrollo sustentable en el proceso de toma de decisiones; 3) Apoyar los derechos humanos y el respeto por culturas, costumbres y valores, tanto de los empleados como de otros grupos afectados por las actividades empresariales; 4) Implementar estrategias de gestión de riesgo basadas en información válida; 5) Optimizar el desempeño en salud y seguridad con el objetivo de lograr la ausencia de daños; 6) Mejorar el desempeño ambiental en cuestiones como el uso del agua y el consumo de energía; 7) Favorecer la conservación de la biodiversidad y la integración en la planificación territorial; 8) Contribuir en el diseño, uso, reutilización, reciclaje y disposición responsables de los productos de la empresa que contengan metales y minerales; 9) Colaborar con el desarrollo social, económico e institucional de las comunidades ubicadas en las áreas de operación de la empresa; y 10) Implementar con las partes interesadas mecanismos de información, comunicación y participación, efectivos y transparentes (*International Council on Mining & Metals*, 2020, pp. 3-11).

Como contrapartida, el **enfoque “duro” del desarrollo sostenible** sostiene que las diferentes formas de capital no son intercambiables, ya que algunos tipos de capital, como el natural, pueden sufrir daños irreversibles y dejar de estar disponible para generaciones futuras, por lo que no debería ser objeto de lucro. Teniendo en cuenta el enfoque “blando”, que incluye la suma de los aspectos sociales y económicos a los ambientales, es posible aplicar el término sostenibilidad a aquellas empresas mineras que cumplan las pautas establecidas por el *ICMM* (Carmona García *et al.*, 2017, p. 51).

La propuesta del enfoque blando del desarrollo sostenible de la *ICMM* en el inicio de este siglo, se enmarca en una nueva etapa en la minería, donde las empresas deben minimizar el impacto negativo de sus actividades extractivas y compensar a la comunidad por el despojo permanente de sus recursos no renovables. Esto implica no sólo el cumplimiento de las normativas sobre el cuidado ambiental, sino ir más allá e involucrarse con los asuntos socio-territoriales en pos de un mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes. Los departamentos de responsabilidad social que forman parte de la gestión de las grandes empresas dan cuenta de este necesario acercamiento a la comunidad. No obstante, los avances que se están logrando en la gestión empresarial para el desarrollo socio-económico de las comunidades de la Puna Austral, los beneficios de la minería del litio no se han visto reflejados en la reducción de los índices de pobreza ni en el bienestar general los pueblos cercanos a los proyectos mineros (Porta y Miguel, 2020, p. 130).

A modo de cierre

En el ambiente de la Puna, donde confluyen numerosos proyectos mineros y comunidades que desarrollan actividades de subsistencia en un territorio de extrema aridez, el impacto de la minería podría poner en riesgo el sistema hídrico del salar, los ecosistemas asociados y la calidad de vida de los habitantes que dependen de los servicios del salar para sobrevivir. Por lo que es necesario que se realicen estudios sobre las consecuencias del uso de agua y la generación de desechos, en el proceso de explotación y procesamiento del litio.

Es importante avanzar en acuerdos entre el Estado, las empresas y los representantes comunales, de esta forma se crearían las bases para una gestión donde la minería resulte en un desarrollo económico sustentable, conforme las empresas actúen de acuerdo a una legislación de protección ambiental, y donde la comunidad, a escala regional, tenga una participación real en los beneficios de la minería y garantizada la continuidad de sus actividades de subsistencia.

¿Sabías que en Argentina está en marcha un proyecto para la fabricación de baterías de litio?

Un verdadero crecimiento económico, a escala nacional, sería posible no solo por la explotación del recurso, sino también por la industrialización del principal producto al que se destina el litio metálico. YPF, conjuntamente con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, el Ministerio de Defensa, el Ministerio de Producción de la Provincia de Buenos Aires, el CONICET y la Universidad Nacional de La Plata, están proyectando la primera fábrica de baterías de ion litio de Argentina.

Preguntas para reflexionar

- La minería de litio es muy reciente y las modificaciones en el salar podrían detectarse después de muchos años. Por lo tanto, ¿es posible afirmar que la explotación del litio sea una “minería limpia”?
- El agua es un bien vital para los pobladores de la Puna. En caso de comprobarse que el uso de agua en la explotación del litio afecta la cantidad o calidad para el consumo humano ¿puede considerarse el agua como un capital intercambiable según los criterios del enfoque blando de la sostenibilidad para la minería?

Referencias

- Alonso, R. N. (2006). Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina. *Serie Correlación Geológica*. Temas de la Geología Argentina I, 2(21), 155-170. Tucumán: INSUGEO. Recuperado de <http://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg-21-2-02.pdf>
- Alonso, R. N. (1999). Los salares de La Puna y sus recursos evaporíticos, Jujuy, Salta y Catamarca. En E. O. Zappettini (Ed.) *Recursos Minerales de la República Argentina*. Anales 35, 1907-1921. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR.
- Alonso, R. N. (2017). Depósitos de litio en salares de Argentina. En E. J. Baran, (Ed.). *Litio: un recurso natural estratégico desde los depósitos minerales a las aplicaciones tecnológicas*, 49 – 68). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Edición especial. Publicaciones Científicas 12. Recuperado de <https://docplayer.es/127902845-Litio-un-recurso-natural-estrategico-desde-los-depositos-minerales-a-las-aplicaciones-tecnologicas-editor-enrique-j-baran.html>
- Alonso, R. N. (junio, 2020). Historia del litio en la Puna. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 7(1), 151–162. Salta: Universidad Nacional de Salta-CONICET (INSUGEO-CEGA), Recuperado de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/28639/30446>
- Aranda Álvarez, M. C. (2018). Una minería del agua: Análisis espacio temporal de la región del Salar de Olaroz: Implicancias ambientales, estrategias de sustentabilidad y crecimiento económico local ante la minería del litio (Tesis de grado). Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Recuperado de <https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/tesis/te.1731/te.1731.pdf>
- Aranda, D. (6 de junio de 2011). La fiebre del litio. *Página 12*, Recuperado de <https://www.pagina12.com.ar/diario/sociedad/3-169555-2011-06-06.html>
- Baran, E. J. (2017). Introducción. En E. J. Baran, (Ed.) *Litio: un recurso natural estratégico, desde los depósitos minerales a las aplicaciones tecnológicas*. (230, 5-10). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Edición especial. Publicaciones Científicas N°12. Recuperado de <https://docplayer.es/127902845-Litio-un-recurso-natural-estrategico-desde-los-depositos-minerales-a-las-aplicaciones-tecnologicas-editor-enrique-j-baran.html>
- Cabrera, A. L. (1951). Territorios fitogeográficos de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. 4(1 y 2), 21-63. Recuperado de <https://botanicaargentina.org.ar/wp-content/uploads/2018/09/21-65003.pdf>
- Calvo, E. (2017). Procesos de extracción de litio de sus depósitos en salares argentinos. En E. J. Baran, (Ed.) *Litio: un recurso natural estratégico desde los depósitos minerales a las aplicaciones tecnológicas*. (230, 69-83). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Edición especial. Publicaciones Científicas N°12. Recuperado de <https://docplayer.es/127902845-Litio-un-recurso-natural-estrategico-desde-los-depositos-minerales-a-las-aplicaciones-tecnologicas-editor-enrique-j-baran.html>

- Carmona García, U., Cardona Trujillo, H. y Restrepo Tarquino, I. (junio, 2017). Gestión ambiental, sostenibilidad y competitividad minera. *Contextualización de la situación y retos de un enfoque a través del análisis del ciclo de vida*. DYNA 87(201) pp. 50-58. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/60326/59705>
- City Population, Salta (2010). *Population statistics for countries, administrative divisions, cities, urban areas and agglomerations – interactive maps and charts*. Recuperado de https://www.citypopulation.de/php/argentina-salta_s.php
- City Population, Catamarca (2010). *Population statistics for countries, administrative divisions, cities, urban areas and agglomerations – interactive maps and charts*. Recuperado de https://www.citypopulation.de/php/argentina-catamarca_s.php
- de la Hoz, G. M., Martínez, V. R. y Vedia, J. L. (diciembre, 2013). El litio: desde los salares de la Puna a nuestros celulares. *Temas de Biología y Geología del NOA*, 3(3), 58-67. Instituto de Bio y Geociencias del NOA. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/2588>
- Dorador Ortiz, C. (2021). Conservación de salares: Aprendizajes desde los microorganismos. En R. Morales Bacázar (Coord.) *Salares Andinos. Ecología de Saberes por la Protección de Nuestros Salares y Humedales*, 236, 162-169. Observatorio Plurinacional de Salares Andinos (OPSAL). Recuperado de <https://cl.boell.org/sites/default/files/2020-12/Libro%20Salares%20Andinos%20OPSAL.pdf>
- Etcheverry, R., Tessone, M., Moreira, P. y Kruse, E. (2020) Caracterización geológica de las fuentes actuales y potenciales de obtención de Litio en la República Argentina. Panorama acerca del Mercado del Litio, 31-43. En F. J. Díaz (Coord.). *El litio en la Argentina: visiones y aportes multidisciplinarios desde la UNLP*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Recuperado de <https://unlp.edu.ar/frontend/media/50/35250/03d14e39ff204a5cd0c0ccdefe63a493.pdf>
- Foy, P. C. (1998). Agenda 21. Desarrollo Sostenible: Un programa para la acción. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú - Fondo Editorial Instituto de Estudios Ambientales, 609 p.
- García, R., Kruse, E., Etcheverry, R., Tessone, M. y Moreira, P. (2020). Características hidrogeológicas de los salares en la Puna Argentina. En F. J. Díaz (Coord.) *El litio en la Argentina: visiones y aportes multidisciplinarios desde la UNLP*, 49-59. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Recuperado de <https://unlp.edu.ar/frontend/media/50/35250/03d14e39ff204a5cd0c0ccdefe63a493.pdf>
- García, R., Rocha Fasola, V., Moya Ruiz, F. y Tálamo, E. (2013). Exploración y explotación de salmueras enriquecidas en litio y potasio en salares de la Puna Argentina. En N. González, E.E. Kruse, M. M. Trovatto, P. Laurencena (Eds.). *Temas actuales de la hidrología subterránea* (421, 303-310). La Plata: Edulp. Recuperado de <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/228/204/679-1>
- Gianuzzo, A. N. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientiæ zudia*, 8(1), 129-156. São Paulo. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/ss/a/DcgkTxq9MkKhctCddKDnTMK/?format=pdf&lang=es>
- Godfrey, L. V., Chan, L. H., Alonso, R. N., Lowenstein, T. K., McDonough, W. F., Houston, J.,

- Bobst, A. y Jordan, T. E. (2013). The role of climate in the accumulation of lithium-rich brine in the Central Andes. *Applied Geochemistry*, (38), 92-102. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/259133228> The role of climate in the accumulation of lithium-rich brine in the Central Andes
- Hernández, M., Schalamuk, I. B., Gonzalez, N. (2013). La hidrogeología en la evaluación minera de salmueras de interés económico. En N. González, E.E. Kruse, M. M. Trovatto, P. Laurenzana (Eds.). *Temas actuales de la hidrología subterránea*, 318-323. La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. Recuperado de <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/228/204/679-1>
- Hongn, F. D. y Seggiaro, R. E. (2001). *Hoja Geológica 2566-III, Cachi. Provincias de Salta y Catamarca*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, 248. Recuperado de <https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/99/hoja%20Cachi.pdf?sequence=12&isAllowed=y>
- International Council on Mining & Metals (2020). Principios mineros. Estándares de desempeño. Recuperado de https://www.icmm.com/website/publications/es/principios-mineros/principios-mineros_es.pdf
- López de Azarevich, V. L., Schalamuk, I. B. y Azarevich, M. (2020). Proyecto: Instalación de una planta de carbonato de sodio en el noroeste argentino, para la producción de carbonato de litio, 221-231. En F. J. Díaz (Coord.) *El litio en la Argentina: visiones y aportes multidisciplinares desde la UNLP*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Recuperado de <https://unlp.edu.ar/frontend/media/50/35250/03d14e39ff204a5cd0c0ccdefe63a493.pdf>
- May, J. H., Zech, R. y Schellenberger, A., Kull, C. y Veil, H. (2011). Quaternary environmental and climate changes in the Central Andes. *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*, 247-263. Recuperado de http://www.morphohenne.de/2011_May_Ince.pdf
- Mining Press (25 de noviembre de 2020). Sal de los Ángeles concretó su primera exportación China. Recuperado de <https://miningpress.com/nota/333737/sal-de-los-angeles-concreto-su-primera-exportacion-china>
- Munk, L.A., Hynek A., S., Dwight C. B., Boutt, D., Labay, K. y Hillary Jochens, H. (2016). Lithium Brines: A Global Perspective. *Society of Economic Geologists, Inc. Reviews in Economic Geology*, 18, 339–365. Recuperado de https://geoinfo.nmt.edu/staff/mclemore/teaching/documents/14_Munketal.pdf
- Paoli, H. P., Bianchi, A. R., Yáñez, C. E., Volante, J. N., Fernández, D. R., Mattalía, M. C. y Noé, Y. E. (2002). *Recursos hídricos de la puna, valles y bolsones del Noroeste argentino*. Salta: Estación Experimental Agropecuaria. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Recuperado de <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-rhp.pdf>
- Porta, A. A. y Miguel, R. E. (2020). El litio, un recurso de valor estratégico para la región. Análisis de las implicancias ambientales. Perspectivas y propuestas. En F. J. Díaz (Coord.). *El litio en la Argentina: visiones y aportes multidisciplinares desde la UNLP*, 129-140. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Recuperado de <https://unlp.edu.ar/frontend/media/50/35250/03d14e39ff204a5cd0c0ccdefe63a493.pdf>

- Ramos, V.A. (2017). Las provincias geológicas del noroeste argentino. En C. M. Muruaga y P. Grosse (Eds.), *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán*, 42-56. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/320352918_Las_provincias_geologicas_del_noroeste_argentino
- Schteingart, D. y Rajzman, N. (octubre, 2021). Del litio a la batería: análisis del posicionamiento argentino. *Documentos de Trabajo del CCE 16*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Consejo para el Cambio Estructural. Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/03/dt_16_-_litio.pdf
- Secretaría de Minería (2004). Plan Minero Nacional. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Recuperado de http://www.infoleg.gob.ar/basehome/actos_gobierno/actosdegobierno11-5-2009-1.htm
- Seggiaro, R.E., Becchio, R., Bercheñi, V. y Ramallo, L. (2015). *Hoja Geológica 2366-III Susques. Provincias de Jujuy y Salta*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. 414, 1-103. Recuperado de <https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/185/Hoja%20Susques.pdf?sequence=11&isAllowed=y>
- Seggiaro, R. E., Becchio, R., Pereyra, F. y Martínez, L. (2007). *Hoja Geológica 2569-IV, Antofalla. Provincias de Catamarca y Salta*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. 343, Recuperado de <https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/97/Antofalla.pdf?sequence=11&isAllowed=y>