

HUELLA HÍDRICA COMO INDICADOR DEL CONSUMO DE AGUA EN LA MINERÍA DEL LITIO EN LA PUNA ARGENTINA

Paula V. Arias Alvarado¹, Walter F. Díaz Paz^{1,2*}, Ariela G.J. Salas Barboza^{1,2}, Lucas Seghezso²,
Martín A. Iribarnegaray²

¹Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales, Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina.

²Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina.

*Tel. +54-387-4255516; e-mail: wfdiaz@conicet.gov.ar

RESUMEN: Frente a las proyecciones de crecimiento en la producción de litio surgen algunas preocupaciones en torno al desconocimiento general que existe respecto al consumo tanto de agua dulce como de salmuera por parte de dicha actividad. El objetivo de este trabajo fue estimar el consumo de agua en la minería del litio en la Puna Argentina empleando el indicador de la huella hídrica. Para el abordaje metodológico, se analizó, revisó y procesó la información del Estudio de Impacto Ambiental y Social (EIAyS) del proyecto Olaroz, en la provincia de Jujuy. Se determinó que el volumen de agua empleado en el proyecto minero está representado en su totalidad por la huella hídrica *azul*, la cual se estima en 584,1 m³/tn de Li₂CO₃ producido. El 92% del valor global del indicador está asociado al consumo de salmuera, mientras que el 8% restante está implicado en el consumo de agua dulce. La huella hídrica podría servir como un indicador que contribuya, desde una perspectiva técnica, al análisis y discusión de los consumos de agua en la extracción y el procesamiento del litio, así como también su potencial impacto en el ciclo hidrológico local.

Palabras clave: huella hídrica, minería del litio, Puna, transición energética, salmuera, agua dulce.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de concretar una *transición energética verde*, con el fin de descarbonizar la matriz energética global, está generando presiones ambientales en las regiones de producción de materias primas (Marconi *et al.*, 2022). Algunas de estas presiones están vinculadas con el acceso, uso y abastecimiento de bienes y servicios ambientales como el agua y la tierra (Liu *et al.*, 2019; Escosteguy y Díaz Paz, 2021). En todos los casos, la producción de estas materias primas, denominadas *minerales estratégicos* tiene como protagonista a la actividad minera (Agusdinata *et al.*, 2021). Esta actividad, según las estimaciones globales de consumo de agua en diferentes industrias, compromete el 3% de la totalidad de agua dulce disponible en fuentes superficiales y subterráneas (Meißner, 2021). Sin embargo, desde una dimensión más amplia, deben considerarse las características de acceso y abundancia local de los recursos hídricos en las áreas afectadas por dicha actividad (Northey *et al.*, 2016), debido a que en la mayoría de los casos es llevada a cabo en regiones donde existen de forma natural condiciones de estrés hídrico (Alvarez *et al.*, 2021). En este contexto, a pesar de que la minería a nivel global realiza un consumo relativamente bajo del recurso, su práctica puede representar un importante consumo a nivel local con posibilidades de profundizar aún más las condiciones de escasez hídrica (Thomashaussen *et al.*, 2018).

En Argentina la producción de los *minerales estratégicos* para la actual transición energética se concentra principalmente en la producción de litio (Murguía, 2022), el cual se obtiene mediante la técnica evaporítica a partir de la explotación de salmuera natural bombeada directamente desde los salares de la Puna (Flexer *et al.*, 2018; Baspineiro *et al.*, 2020). Argentina se posiciona a nivel mundial

como el cuarto país exportador de litio después de Australia, Chile y China (USGS, 2021). Actualmente solo dos proyectos se encuentran en explotación: (i) Olaroz, situado en el salar homónimo en la provincia de Jujuy y (ii) Fénix, situado en el Salar del Hombre Muerto en Catamarca. No obstante, se espera que para 2025, con la puesta en producción de al menos 6 proyectos más: (i) Cauchari-Olaroz, (ii) Centenario-Ratones, (iii) Mariana, (iv) Sal de Oro, (v) Sal de Vida, (vi) Tres Quebradas y la expansión de la planta de producción del proyecto Fénix, Argentina alcance niveles de exportación de 144000 toneladas (tn) de Carbonato de Litio Equivalente (LCE), posicionándose a escala regional como el país líder en exportaciones del mineral (SIACAM, 2022).

Frente a las proyecciones de crecimiento en la producción de litio surgen algunas preocupaciones desde el territorio, principalmente en torno al desconocimiento general que existe respecto al consumo de agua por parte de la minería del litio (Clavijo *et al.*, 2022; Díaz Paz *et al.*, 2022), incluyendo el consumo de agua dulce de forma directa, y la extracción de salmuera (Baspineiro *et al.*, 2021). Algunas investigaciones llevadas a cabo en el Salar de Atacama en Chile indican que la actividad minera en torno a la producción de litio ya evidencia impactos ambientales asociados a la alteración en la dinámica del balance hidrológico del salar y la afectación de las condiciones ambientales locales (Liu *et al.*, 2019; Marazuela *et al.*, 2019; Marazuela *et al.*, 2020). Específicamente, los bombeos de salmuera natural y su posterior evaporación de la fase líquida representan una descarga adicional a la descarga natural propia del salar (Marazuela *et al.*, 2020). Esto provoca que en la ecuación de balance hidrológico las descargas sean aún más acentuadas de lo que cabría esperar dadas las condiciones climáticas de extrema aridez de la región (Marazuela *et al.*, 2019). Este efecto de alteración en la dinámica natural del salar podría provocar situaciones de intrusión salina en reservorios de agua dulce (Gajardo y Redón, 2019). Sin embargo, pese a estas evidencias, aún no existe consenso respecto a la forma de evaluar el consumo de agua por parte de la minería del litio (Ejeian *et al.*, 2021).

En Argentina el conocimiento científico respecto a las implicancias ambientales de la minería del litio aún es muy escaso y en muchos casos se encuentra bajo estricto control de las empresas (Díaz Paz *et al.*, 2022), sumado a ello, tampoco existen estudios hidrogeológicos suficientes para caracterizar la dinámica natural de los salares de la Puna (Sticco *et al.*, 2018). Ante la inminente puesta en producción de nuevos proyectos mineros es necesario avanzar con estudios orientados a abordar estos aspectos (Marconi *et al.*, 2022), los cuales deben ser llevados a cabo desde un enfoque global, considerando la sinergia de los impactos ambientales ocasionados en una misma cuenca por el consumo de agua de diferentes proyectos mineros (Chen *et al.*, 2020).

El objetivo de este trabajo es estimar el consumo de agua en la minería del litio en la Puna Argentina. Para ello se propone cuantificar el indicador de la huella hídrica (HH) tomando como caso de estudio el proyecto Olaroz. El abordaje metodológico propuesto se basa en el *Manual de Evaluación de la Huella Hídrica* (Hoekstra *et al.*, 2011). La hipótesis planteada sostiene que la HH es un indicador apropiado para evaluar los consumos de agua en la minería del litio, que permite estimar de forma integral los volúmenes de agua utilizados e identificar las etapas de producción implicadas.

METODOLOGÍA

Estudio de caso

El proyecto Olaroz se localiza al noroeste de la República Argentina, en el departamento Susques, provincia de Jujuy (Figura 1). Altitudinalmente se emplaza a los 3900 ms.n.m y pertenece al sistema ambiental Puna (Alonso, 2008). La operación del proyecto se encuentra a cargo de la subsidiaria argentina Sales de Jujuy S.A. (SdJ), una *Joint Venture* conformada por la empresa australiana Orocobre, la compañía japonesa Toyota Tsusho TTC (accionistas del 91,5% del capital invertido), y la empresa estatal Jujuy Energía y Minería Sociedad del Estado (JEMSE) (accionista del 8,5% del capital invertido) (Orocobre, 2021). El proyecto Olaroz inició su producción de carbonato de litio en el año 2015 y concentra su operación en la explotación de salmuera natural bombeada directamente desde el Salar Olaroz. Como producto final de las operaciones del proyecto se obtienen 2 productos: (i) carbonato de litio primario y (ii) carbonato de litio grado batería, la diferencia entre ambos está dada por la pureza y concentración final de litio, la cual se mide en unidades de LCE (Meng *et al.*,

2021). El proyecto cuenta con una capacidad instalada en la planta de producción y procesamiento de 17500 tn/año, y durante el año 2021 el nivel de producción alcanzado fue de 12611 tn, de las cuales el 86% se destinó a la fabricación de baterías para autos eléctricos (Orocobre, 2021). Actualmente, SdJ se encuentra finalizando la etapa de ampliación y expansión de la capacidad de producción del proyecto, con la cual se espera alcanzar un nivel de producción de 25000 tn/año para el año 2023 (Orocobre, 2021).

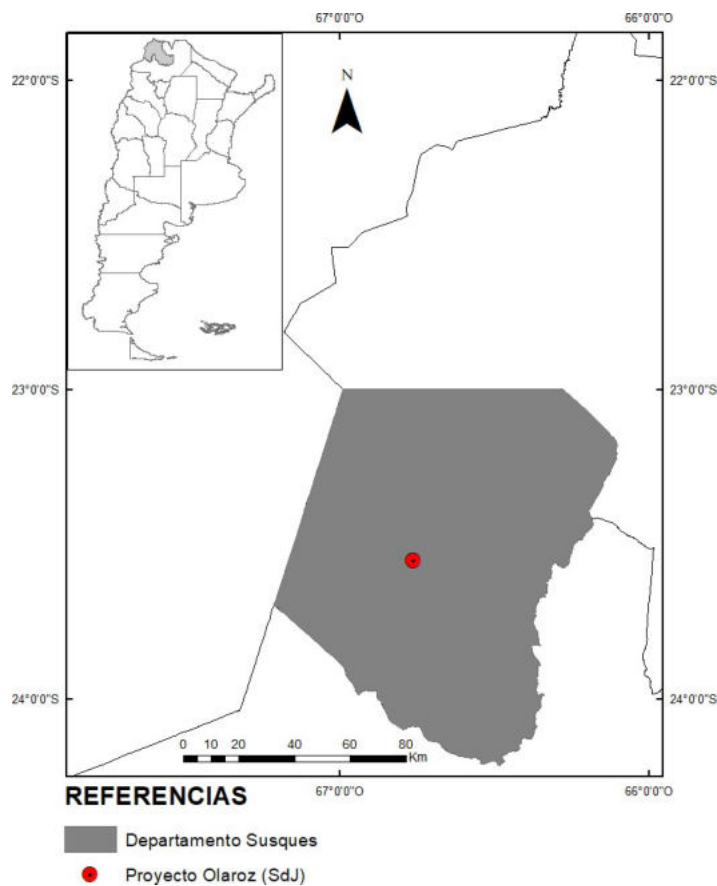


Figura 1. Ubicación del proyecto Olaroz

El abordaje metodológico de este trabajo consistió en el análisis, revisión y procesamiento de información proveniente de diferentes fuentes de datos (Figura 2). Los aspectos técnicos vinculados al proceso de producción empleado por SdJ, el nivel de producción, los volúmenes y frecuencias de bombeos (tanto de salmuera como agua dulce), se determinaron a partir de la información contenida en el Estudio de Impacto Ambiental y Social (EIAyS), expediente IIA MT0655-134-2018, actualización 2020 y 2021, presentado por la empresa SdJ ante la Secretaría de Minería e Hidrocarburos de la provincia de Jujuy (SMeH). Los datos vinculados a aspectos sociodemográficos de las diferentes comunidades determinadas como Área de Influencia Directa (AID) del proyecto Olaroz, fueron obtenidos de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina (INDEC, 2010)¹ y la Dirección Provincial de Estadística y Censos de la Provincia de Jujuy (DIPEC, 2010)².

¹[INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina](https://www.indec.gov.ar/) (último acceso: mayo 2022)

²[Población – DiPEC \(jujuy.gob.ar\)](https://www.dippec.gub.ar/) (último acceso: mayo 2022)

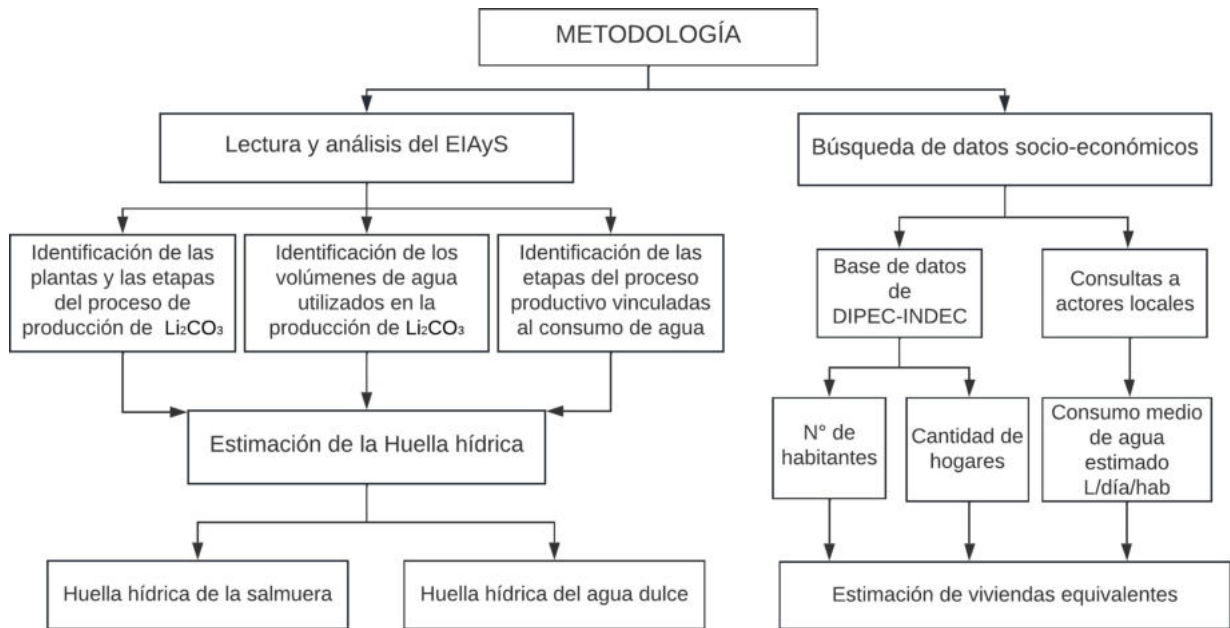


Figura 2. Diagrama de la metodología propuesta

HH como indicador del consumo de agua

La HH es un indicador multidimensional que permite realizar una evaluación global del consumo de agua de una determinada región, país o de un determinado producto (Hoekstra *et al.*, 2011). Este indicador permite estimar e identificar los volúmenes de agua consumidos según diferentes fuentes (agua verde y azul), y los volúmenes utilizados en la asimilación de una determinada carga contaminante (agua gris) (Hoekstra *et al.*, 2011). De esa forma, el indicador global de la HH se encuentra integrado por tres componentes: (i) *HH verde*, (ii) *HH azul* y (iii) *HH gris*. La *HH verde* representa el volumen total de agua consumida proveniente directamente de las precipitaciones, la cual se almacena de forma transitoria en los primeros horizontes del suelo inmediatamente después de haber cesado el evento meteorológico. La *HH azul* es el volumen de agua asociada a la extracción o retención de una fuente (superficial y/o subterránea) para satisfacer el requerimiento hídrico de un proceso antrópico y que no retorna a la cuenca de origen. Finalmente, la *HH gris* es el volumen teórico de agua dulce que se requeriría para diluir o asimilar una carga de contaminantes tomando como base concentraciones en el entorno natural y estándares de calidad de agua del ambiente. De los tres componentes del indicador global de la HH, únicamente se asocian a procesos mineros la *HH azul* y la *HH gris* (Peña y Huijbregts, 2014); esto se debe a la definición conceptual y empírica de la *HH verde*, la cual se asocia principalmente a la actividad agrícola (Hoekstra, 2017).

La estimación de la HH como indicador del consumo de agua se realizó siguiendo la propuesta metodológica realizada por Hoekstra *et al.* (2011) en el *Manual de Evaluación de la Huella Hídrica*. Sobre esta propuesta original, se aplicaron las adaptaciones en el cálculo sugeridas por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), en la *Guía Metodológica para el cálculo de la HH en una cuenca* (CTA, 2013). La ecuación matemática que define la *HH azul* en unidades de m³ de agua consumida o utilizada en el proceso de producción/tn del producto final obtenido es la siguiente:

$$HH\ azul = \sum \frac{Q_e - Q_s}{P_m} \quad (1)$$

Donde:

Q_e =caudal de entrada [m³], representa el volumen que se extrae de una cuenca e ingresa en el ciclo productivo.

Q_s =caudal de salida [m³], representa el volumen de agua que sale del ciclo productivo y retorna a la cuenca de origen. En el retorno a la cuenca, se considera únicamente al volumen de agua que ingresa bajo las mismas condiciones y características fisicoquímicas con las cuales fue extraído inicialmente.

P_m =nivel de producción [tn], representa la cantidad de unidades obtenidas del producto final en el

ciclo productivo.

Para la estimación de la *HH azul* en torno a la producción de Li_2CO_3 del proyecto Olaroz se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: (i) *escala temporal de producción en estudio*: año 2021, para lo cual, se consideró el volumen de salmuera bombeada durante el año 2020. Esto se fundamenta en las características de la tecnología evaporítica en cuanto al tiempo transcurrido hasta alcanzar una concentración mínima aceptable de iones Li^+ en la salmuera concentrada (12 a 24 meses) (Flexer *et al.*, 2018). (ii) *ciclo de producción considerado*: desde el bombeo de salmuera natural en el salar hasta el secado y empaquetado final del Li_2CO_3 , (iii) *nivel de producción*: sobre el total de producción anual (12611 tn), se consideró una producción mensual uniforme y constante (1050,9 tn/mes), (iv) *tipo de recurso hídrico utilizado en la producción*: reservas subterráneas de agua dulce y salmuera natural. Con relación al recurso hídrico utilizado, la incorporación de la salmuera natural como un componente más, está asociada, por un lado, a que a pesar del elevado contenido de sales disueltas (lo cual la vuelve inadecuada para su uso directo), sus propiedades físicas y químicas originales se conservan en la estructura molecular (Ejeian *et al.*, 2021). Además, se considera también la relación que este tipo de recurso hídrico presenta con el balance hidrogeológico regional y en la interacción de las reservas de agua dulce-salmuera (Sticco *et al.*, 2018; García *et al.*, 2020). Del mismo modo, en este trabajo la denominación utilizada para referirse al *agua no salobre*, como agua dulce, y no como *agua fresca* o *industrial* está fundada en que, a pesar de que según los estándares de calidad el Código Alimentario Argentino no es apta para el consumo humano ni animal (Orocobre, 2021), en la región las comunidades locales la emplean para dichos usos y la misma representa su única fuente de aprovisionamiento (Díaz Paz *et al.*, 2022). La denominación de *agua fresca* o *agua industrial* es planteada por las empresas mineras con fines netamente productivos, intentando desvincularla de su valor de uso para satisfacer las necesidades humanas.

Con el fin de visualizar y analizar los valores obtenidos de HH de forma integral con el contexto socioambiental en torno al proyecto, los valores de HH se normalizaron en términos de *viviendas equivalentes* (VE) (Lombrano, 2009). A este fin, se definió una VE teniendo en cuenta el módulo habitacional del departamento Susques (4,38 personas) según datos del INDEC (2010) y un consumo por persona de 80 L/día (estimado con base en información recabada en campo por el equipo de trabajo). Teniendo en cuenta estos datos, se contempló un consumo de agua de 350,4 L/día por vivienda.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Plantas y etapas del proceso productivo involucradas en el consumo de agua

A partir del análisis de la información contenida en el EIAyS se determinaron 3 plantas del proceso productivo involucradas en el consumo de agua (Tabla 1). Estas plantas comprenden la siguiente secuencia de etapas del proceso productivo: (i) acondicionamiento de pH y temperatura de la salmuera bombeada, (ii) ingreso a la planta de carbonatación, (iii) secado, y (iv) molienda y empaquetado.

Tabla 1. Plantas de producción involucradas en el consumo de agua dulce

Planta	Tipo de consumo	Proporción de agua dulce involucrada (%)
Limming	Indirecto	54,8
Cloración	Indirecto	3,3
Producción Li_2CO_3	Directo	41,9

En la Figura 3 se presenta la clasificación del tipo de consumo de agua implicado en las diferentes plantas y etapas del proceso productivo. El volumen de agua utilizado se clasificó como: (i) *consumo directo*, aquel volumen asociado únicamente a la precipitación y purificación de los iones litio

presentes en la salmuera concentrada, bajo la forma de Li_2CO_3 y (ii) *consumo indirecto*, volumen de agua implicado en el desarrollo de etapas previas y posteriores a la precipitación y purificación del Li_2CO_3 , el cual está vinculado con la obtención de reactivos e insumos productivos como ser la activación de la *soda ash* (Na_2CO_3), y las actividades de limpieza y mantenimiento de instalaciones y equipos. Según los datos del EIAyS de SdJ, durante el período 2021 el volumen promedio mensual de agua dulce utilizada en el ciclo productivo ascendió a 42840 m^3/mes , de los cuales 23472 m^3/mes (54,8%) se destinaron a la planta de limming³ y 19368 m^3/mes (41,9%) a la planta de producción de Li_2CO_3 . Del volumen destinado a esta última planta 640,8 m^3/mes (3,3%) fueron destinados a la planta de cloración.

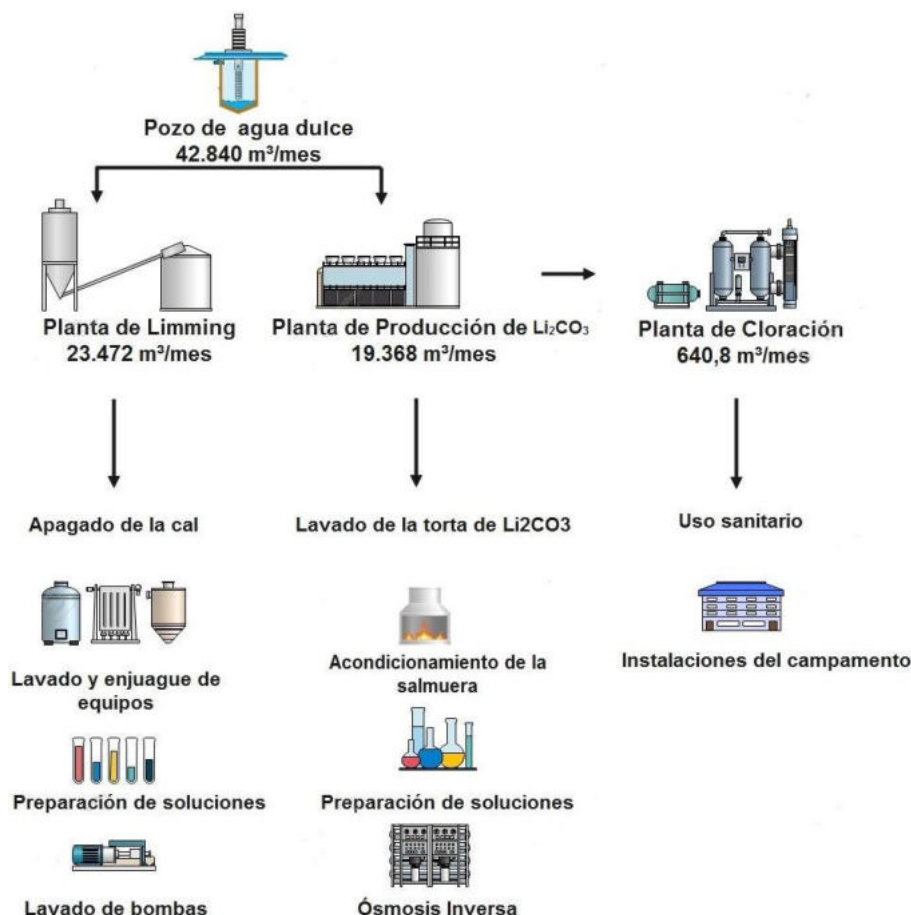


Figura 3. Plantas de producción involucradas en el consumo directo e indirecto de agua dulce

Estimación del indicador de HH

El volumen total estimado para el indicador de la HH está representado en su totalidad por la *HH azul*, esto se debe a que el agua que abastece a las plantas y a las diferentes etapas del proceso productivo proviene netamente de fuentes subterráneas. La *HH gris* se asume como despreciable, ya que debido a las técnicas empleadas por SdJ para el tratamiento de sus efluentes industriales y de los provenientes de instalaciones sanitarias, no se generan residuos líquidos debido a la evaporación total de los mismos.

La *HH azul* total del ciclo productivo para el proyecto Olaroz está conformada por la sumatoria de la *HH azul* debido al consumo de agua dulce y la *HH azul* debido a la evaporación de salmuera. La *HH azul* promedio de agua dulce del ciclo productivo analizado asciende a 46,7 m^3/tn (Tabla 2), de este

³ Del inglés *lime* (cal), el limming es la denominación técnica utilizada para hacer referencia al proceso de preparación de la solución de Na_2CO_3 al 28%, para hacer reaccionar con la salmuera concentrada en iones Li^+ a fin de obtener la precipitación del Li_2CO_3 .

monto, el 54% (25,5 m³/tn) está implicado en el desarrollo de etapas del ciclo productivo indirectamente vinculadas con la producción de Li₂CO₃. La activación de la *soda ash* es el principal componente de la *HH azul* de agua dulce del proyecto. El período de máximo consumo de agua dulce ocurre de octubre a febrero (Tabla 2) ya que, considerando la existencia de una relación inversamente proporcional entre el tiempo de concentración evaporítica y la ocurrencia de precipitaciones (Choubey *et al.*, 2016), es una forma de asegurar que la evaporación ocurra en las piletas durante toda la época seca, sin alterar la concentración de sales por efecto de disolución debido al aporte de las precipitaciones. El análisis comparativo entre los bombeos de agua dulce para el procesamiento industrial y el volumen de agua estimado para consumo humano arroja un valor equivalente a 4545,3 VE. En este sentido, considerando las 854 viviendas existentes en el departamento Susques, el proyecto Olaroz comprometió en el ciclo productivo un consumo equivalente a 5 veces el consumo de toda la población departamental. Respecto a los bombeos de salmuera, durante la etapa de concentración evaporítica, el volumen es igual a 52284,3 VE, lo cual representa aproximadamente 61 veces el consumo de la población departamental.

En términos globales, la *HH azul* total del ciclo productivo del proyecto Olaroz, considerando tanto el consumo de agua dulce como el de salmuera, se estima en 584,1 m³/tn. El 92% del valor global de *HH azul* está asociado al consumo de salmuera, mientras que el 8% restante (46,7 m³/tn), está implicado directa o indirectamente con el consumo de agua dulce. Teniendo en cuenta la producción total anual alcanzada por SdJ durante el año 2021 (12611 tn de Li₂CO₃), el consumo de agua dulce en el proceso de producción ascendió a 589168 m³, mientras que el consumo de salmuera se estimó en 6777192,5 m³. En ambos casos, es importante destacar la proximidad que existe entre el valor estimado de *HH azul* de agua dulce (46,7 m³/tn) y *HH azul* de salmuera (537,4 m³/tn) con algunas estimaciones ya publicadas. Flexer *et al.* (2018) estimaron un consumo de agua dulce entre 5 y 50 m³/tn de Li₂CO₃ producido, mientras que en el último reporte elaborado por Orocobre (2021) se informa un consumo de agua dulce de 48,8 m³/tn de Li₂CO₃ producido. Por su parte, respecto al consumo de agua durante la etapa evaporítica, Flexer *et al.* (2018) sugieren que se pierde a la atmósfera aproximadamente 500 m³/tn de Li₂CO₃, el cual potencialmente podría ser recuperado y destinado a múltiples usos, entre ellos abastecer el mismo requerimiento hídrico de agua dulce del proceso productivo basado en la tecnología evaporítica (Baspineiro *et al.*, 2020).

Con relación al consumo por tipo de recurso hídrico utilizado en la producción (reservas subterráneas de agua dulce y salmuera natural), es importante destacar algunos aspectos vinculados a cada uno de ellos. Por un lado, el consumo de agua dulce en torno al proyecto Olaroz podría representar una forma de competencia por el uso y acceso al recurso. Esto se debe principalmente a que en la región habitan de forma preexistente al proyecto 10 comunidades locales, quienes utilizan el agua dulce para múltiples fines: (i) consumo humano, (ii) ganadería y (iii) agricultura (Díaz Paz *et al.*, 2022). Pese a esta situación, algunos actores insisten en definir y clasificar el agua dulce de la Puna como *agua fresca* o *de uso industrial* (Orocobre, 2021). Esta definición voluntaria o involuntariamente invisibiliza y simplifica el complejo escenario local en el cual la minería del litio se constituye como un nuevo actor que utiliza el recurso, con potencial riesgo de afectación futura de la disponibilidad de agua dulce. Según lo establecido en el EIAyS de SdJ, esta definición se sustenta en que, de acuerdo con los estándares de calidad de agua para consumo humano, establecidos en el Código Alimentario Argentino, el agua de la Puna presenta de forma natural umbrales de sólidos totales disueltos superiores al valor máximo recomendable. Pese a esta situación, y considerando que esta es la única fuente de abastecimiento natural existente en la región, las comunidades locales realizan un uso directo del agua dulce disponible tanto para consumo humano como para el desarrollo de diferentes actividades productivas (Deniau *et al.* 2021).

Respecto al consumo de salmuera es importante destacar la relevancia biofísica y ecosistémica que guarda la conservación de los salares en el sostenimiento de innumerables especies de flora y fauna (Obaya, 2021a; Marconi *et al.*, 2022). Sumado a ello, estos humedales también cumplen un rol preponderante en la absorción y fijación de CO₂ (Mignaqui, 2019), y regulan y contribuyen al equilibrio hidrológico regional (Sticco *et al.*, 2018; García *et al.*, 2020). Todos estos aspectos deben ser estudiados y analizados en detalle, e incorporados en la planificación estratégica, teniendo en

cuenta que la *transición energética verde* demandará una intensificación de la producción de litio (Gajardo y Redón, 2019). Lo anteriormente mencionado se sustenta en las diferentes posturas y discursos que plantean a la salmuera como un insumo netamente productivo y de muy bajo costo (Orocobre, 2021), que carece de otra utilidad posible, intentando alejarla de la definición natural e intrínseca de recurso hídrico.

Tabla 2. Huella hídrica azul mensual de agua dulce asociada a las plantas de producción

Mes	Plantas de producción			HH azul total de agua dulce (m ³ /tn)
	Limming (m ³ /tn)	Cloración (m ³ /tn)	Producción Li ₂ CO ₃ (m ³ /tn)	
Enero	36,4	0,9	27,8	65,2
Febrero	30,3	0,8	23,1	54,3
Marzo	23,9	0,6	18,3	43,0
Abril	16,7	0,4	12,7	29,9
Mayo	18,9	0,5	14,4	33,9
Junio	27,6	0,7	21,1	49,5
Julio	17,9	0,4	13,7	32,2
Agosto	12,9	0,3	9,8	23,1
Septiembre	24,0	0,6	18,3	43,0
Octubre	27,0	12,2	20,6	59,9
Noviembre	29,4	0,8	22,5	52,7
Diciembre	41,7	1,1	31,9	74,7
HH azul total de agua dulce (m ³ /tn)	25,5	1,6	19,6	46,7

A pesar de la marcada escasez hídrica regional que caracteriza al ambiente de la Puna, los reclamos y las principales preocupaciones locales que emergen desde el territorio no giran en torno a un desabastecimiento actual del recurso hídrico (Díaz Paz *et al.*, 2022), sino más bien, en el temor ante escenarios futuros de agotamiento y salinización de las fuentes de agua dulce existentes (Deniau *et al.*, 2021). Esta situación desencadena una serie de conflictos socioambientales entre los diferentes actores involucrados (Escosteguy *et al.*, 2021; Clavijo *et al.*, 2022), quienes se posicionan material y discursivamente de acuerdo con el rol que ocupan dentro de la red de la minería del litio (Díaz Paz *et al.*, 2022). Por su parte, las comunidades locales reclaman transparencia en el manejo y gestión del agua, el territorio y los salares (Clavijo *et al.*, 2022). En contraposición, las empresas mineras y el Estado aseguran que la minería del litio es llevada a cabo bajo estrictos controles ambientales y cumpliendo acuerdos internacionales de Responsabilidad Social Empresaria (Orocobre, 2021; SIACAM, 2022). Sin embargo, tal como señalan Steinmetz y Fong (2019), Obaya *et al.* (2021b) y Marconi *et al.* (2022), aún son múltiples los desafíos a superar en cuanto al conocimiento científico vinculado a los recursos hídricos de la Puna.

Los resultados obtenidos brindan una primera aproximación al estudio del consumo de agua en la minería del litio, no obstante, es necesario profundizar las investigaciones y la articulación con diferentes organismos, a fin de concretar un abordaje más amplio a escala espacio-temporal. En este sentido, cabe destacar que según la información contenida en el EIAyS se pudo determinar que SdJ realiza una recirculación y reuso del agua dulce utilizada tanto en la planta de limming como en la planta de producción de Li₂CO₃, sin embargo, no se pudo establecer la tasa o intensidad de reutilización. En futuros trabajos este debe ser un aspecto para profundizar debido a que quizás podría implicar una disminución de la *HH azul*.

Finalmente, si bien la HH no es un indicador de los impactos sociales y ambientales del consumo de agua, es una herramienta útil para estudiar, discutir y poner en contexto los consumos de agua asociados a la producción del litio. La estimación de la HH en el contexto minero de expansión en la producción de litio podría servir como un indicador que contribuya desde una perspectiva técnica a mejorar la gestión de los recursos hídricos en la minería del litio.

CONCLUSIONES

La *HH azul* global del ciclo productivo 2021 del proyecto Olaroz asciende a 584,1 m³/tn. Si se considera un consumo de agua por vivienda de 80 litros/persona, el consumo de agua dulce del proceso productivo es de 4545,3 VE, unas 5 veces más que el consumo de agua para uso humano de todo el departamento Susques. Por su parte, en relación con la salmuera extraída para su evaporación, equivale al consumo de 52284,3 viviendas, unas 61 veces el consumo de agua dulce del departamento. Claro está que, en relación con la salmuera, su uso como fuente de agua para la población es muy limitado y conlleva un esfuerzo tecnológico y de inversión muy grande.

Con relación al proceso productivo empleado por SdJ, se determinó que la preparación y activación de la *soda ash* involucra las etapas del proceso productivo que concentran el 54,8% del consumo total de agua dulce. La incorporación de la salmuera en el cálculo de la HH es el componente de mayor importancia para el uso del agua en torno al proyecto Olaroz, ya que contribuye en un 92% al valor global del indicador. Sin embargo, es importante destacar que, por un lado, la salmuera es un componente vital del ciclo hidrológico y su sobreexplotación puede afectar la calidad de los acuíferos, y por otro, la zona donde están ubicados los salares es desértica, el agua dulce un recurso escaso y sus diferentes usos se encuentran en competencia. Del mismo modo, aún no se han abordado estudios orientados a determinar el volumen de agua dulce implicado en el desarrollo de diferentes actividades productivas locales, las cuales son externas a los intereses productivos de las empresas mineras, y que con la puesta en operación de nuevos proyectos mineros podrían ver afectado su abastecimiento.

A pesar de las limitaciones propias del indicador, el cual no permite identificar ni cuantificar impactos ambientales, los resultados obtenidos en este trabajo se presentan como un primer aporte técnico a la discusión y contextualización del consumo de agua en la producción de litio. En el actual contexto global de escasez hídrica y de comercialización de materias primas, como el Li₂CO₃ para la transición energética *verde*, sería pertinente incluir en estudios futuros un análisis de las exportaciones y flujos de agua virtual en torno a la producción de litio en Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Fundación Nacional Suiza para la Ciencia a través del proyecto LITHIUM (The global political ecology of lithium commodity chain), y por el proyecto PIP N° 11220200100239 (Ecología política de la red de producción de litio en Argentina) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET). Agradecemos a la Secretaría de Minería e Hidrocarburos de la provincia de Jujuy por su predisposición y cooperación en el acceso al EIAyS. También hacemos extensivo nuestro agradecimiento a las comunidades locales del departamento de Susques, provincia de Jujuy, quienes amablemente dedicaron su tiempo a conversar con nosotros. De igual forma, agradecemos a la Dra. Soledad Rodríguez por su colaboración en la interpretación y verificación metodológica desde una perspectiva química.

REFERENCIAS

- Agusdinata D. B., Eakin H., & Liu W. (2021). Critical minerals for electric vehicles: a Telecoupling review. *Environmental Research Letters* 17, 1, 013005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4763>
- Alonso, R. (2008). *La Puna Argentina: ensayos geológicos, históricos y geográficos de una región singular*. 1° ed. Salta: Crisol Ediciones. 320pp
- Álvarez-Pugliese C. E., Machuca-Martínez F., & Pérez-Rincón M. (2021). Water foot print in gold

- extraction: A case-study in Suárez, Cauca, Colombia. *Heliyon*, 7(9), e07949.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07949>
- Baspineiro C. F., Franco J., Flexer V. (2020). Potential water recovery during lithium mining from high salinity brines. *Science of the Total Environment*, 720, 137523.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137523>
- Baspineiro C. F., Franco J., Flexer V. (2021). Performance of a double-slope solar still for the concentration of lithium rich brines with concomitant fresh water recovery. *Science of The Total Environment*, 791, 148192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148192>
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) y Cosude. (2013). Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca-La Evaluación de la Huella Hídrica en la Cuenca del Río Porce. Editorial: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. ISBN:978-958-8470-22-1, 121p.
- Chen H. L., Liu Y., Gong X. Z., Hao L. W., Sun B. X., Li X. Q. (2020). A Review on Water Footprint Research of Materials Industry. *Materials Science Forum* 993, 404-413. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.404>
- Clavijo A., Díaz Paz W. F., Lorca M., Olivera Andrade M., Iribarnegaray M. A., Garcés I. (2022). Environmental information access and management in the Lithium Triangle: is it transparent information?. *Journal of Energy and Natural Resources Law*, 40, 3, 293-314.
<https://doi.org/10.1080/02646811.2022.2058770>
- Deniau Y., Herrera V., Walter M. (2021). Mapeo de resistencias frente a los impactos y discursos de la minería para la transición energética en las Américas. *EJAtlas/Mining Watch Canadá*. (Noviembre 2021).
- Díaz Paz W.F., Escosteguy M., Clavijo A., Seghezze L., Iribarnegaray M. A. (2022). Transición energética y producción de litio: principales debates y desafíos para la gestión del agua en Argentina. En: Brannstrom C., Seghezze L., Gorayeb A. eds. (2022), *Metodologías e Abordagens para a Descarbonização Justa na América do Sul*. Universidade Federal do Ceará. ISBN: 978-85-7621-326-0. 460p.
- Ejeian M., Grant A., Shon H. K., Razmjou A. (2021). Is lithium brine water?. *Desalination*, 518, 115169. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115169>
- Escosteguy M., y Díaz Paz W.F. (2021). Cooperación birregional justa para una recuperación verde. Reflexiones a partir del caso de la producción de litio en Argentina. En: Fundación EU-LAC. eds. (2021). *Oportunidades de la asociación estratégica birregional a la configuración de una recuperación más verde*.
- Flexer V., Baspineiro C. F., Galli C. I. (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, 1188-1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- Gajardo G., Redón S. (2019). Andean hypersaline lakes in the Atacama Desert, northern Chile: Between lithium exploitation and unique biodiversity conservation. *Conservation Science and Practice*, 1, 9, e94. <https://doi.org/10.1111/csp2.94>
- García R., Kruse E. E., Etcheverry R. O., Tessone M. O. R., Moreira P., Díaz F. J. (2020). Características hidrogeológicas de los salares en la Puna Argentina. En: Díaz J.,F. coord. (2020), *El litio en Argentina: visiones y aportes multidisciplinares desde la UNLP*. ISBN: 978-987-8348-83-4. 49-60p. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/121331>
- Hoekstra A. Y. (2017). Water footprint assessment: evolution of a new research field. *Water Resources Management*, 31, 10, 3061-3081. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>
- Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya M. M., Mekonnen M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge. ISBN:978-1-84971-279-8
- Liu W., Agusdinata D. B., Myint S. W. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.016>
- Lombrano A. (2009). Cost efficiency in the management of solid urban waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 601-611. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.017>
- Marazuela M.A., Vazquez Suñé E., Ayora C., García Gil A., Palma T. (2019). Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Science of the Total Environment* 651, 668- 683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.190>
- Marazuela M. A., Vázquez-Suñé E., Ayora C., García-Gil A. (2020). Towards more sustainable brine

- extraction in salt flats: Learning from the Salar de Atacama. *Science of the Total Environment*, 703, 135605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135605>
- Marconi P., Arengo F., Clark A. (2022). The arid Andean plateau waterscapes and the lithium triangle: flamingos as flag ships for conservation of high-altitude wetlands under pressure from mining development. *Wetlands Ecology and Management*, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s11273-022-09872-6>
- Meißner S. (2021). The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities—A GIS-Based Water Impact Assessment. *Resources*, 10, 12, 120. <https://doi.org/10.3390/resources10120120>
- Meng F., McNeice J., Zadeh S. S., Ghahreman A. (2021). Review of lithium production and recovery from minerals, brines, and lithium-ion batteries. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 42(2), 123-141. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1668387>
- Mignaqui V. (2019). Puna, litio y agua: estimaciones preliminares para reflexionar sobre el impacto en el recurso hídrico. *Revista de Ciencias Sociales, segunda época N°36*, 37-55. <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/3508>
- Murguía D. (2022). Minerales y materias primas críticas: Potencial y oportunidades para Argentina. *Visión de futuro*, 26(1), 81-104. <https://doi.org/10.36995/j.visiondefuturo.2021.26.01.003.es>
- Northey S. A., Mudd G. M., Saarivuori E., Wessman-Jääskeläinen H., y Haque N. (2016). Water footprinting and mining: where are the limitations and opportunities?. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1098-1116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.024>
- Obaya M. (2021a). Una mirada estratégica sobre el triangulo del litio – pensar los recursos naturales como motor de la innovación. *FundAr*, Marzo 2021.
- Obaya M., López A., Pascuini P. (2021b). Curb your enthusiasm. Challenges to the development of lithium-based linkages in Argentina. *Resources Policy*, 70, 101912. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101912>
- Orocobre (2021). Reporte de sustentabilidad. <https://www.orocobre.com/corporate-responsibility/sustainability-report>
- Peña C. A. y Huijbregts M. A. (2014). The blue water footprint of primary copper production in northern Chile. *Journal of Industrial Ecology*, 18, 1, 49-58. <https://doi.org/10.1111/jiec.12036>
- Sistema de Información Abierta a la Comunidad Sobre la Actividad Minera en Argentina (SIACAM) (2022). Informe sobre el estado de la minería en Argentina - Anuncios de Inversión en el Sector Minero, mayo 2022. ESTADO DEL SECTOR MINERO SECMIN MAYO 2022(argentina.gob.ar)
- Steinmetz R. L. L. & Fong S. B. (2019). Water legislation in the context of lithium mining in Argentina. *Resources Policy*, 64, 101510. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101510>
- Sticco M., Scragliari P., Damiani A. (2018). Estudio de los recursos hídricos y el impacto por explotación minera de litio. Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc - Provincia de Jujuy. Fundación Ambiente y Recursos Naturales, August.
- Thomashausen S., Maennling N., Mebratu-Tsegaye T. (2018). A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector. *Resources Policy*, 55, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.012>
- U.S. Geological Survey, USGS (2021). Mineral commodity summaries 2021: U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2021> ISBN 978-1-4113-4398-6

WATER FOOTPRINT AS INDICATOR OF WATER CONSUMPTION IN LITHIUM MINING IN THE ARGENTINE PUNA

ABSTRACT: In view of the projected growth in lithium production, some concerns have been raised as the consumption of fresh water and brine associated with this mining activity is generally unknown. The objective of this article was to estimate the water consumption associated with lithium mining in the Argentine Puna using the Water Footprint Index. The methodological approach was based on the selection of the Olaroz project as a study case and the subsequent analysis, review and processing of information from its environmental and social impact study. The volume of water consumed by the mining project is represented in its entirety by the blue water footprint, estimated at 584.1 m³/tnLi₂CO₃ produced. 92% of the total value of the indicator is associated with brine consumption, while the remaining 8% is due to fresh water consumption. The water footprint could serve as an indicator contributing, from a technical point of view, to the analysis and discussion of water consumption in the extraction and processing of lithium and its possible impact on the local hydrological cycle.

Keywords: water footprint, lithium mining, Puna, energy transition, brine, freshwater.