

Listas de contenidos disponibles en [CienciaDirecta](#)

Int J Appl Earth Obs Geoinformación

revista Página de inicio: www.elsevier.com/locate/jag

Patrones espaciotemporales de la minería de litio y degradación ambiental en el Salar de Atacama, Chile

wenjuan liu^a, Datu B. Agusdinata^{a,*}, Soe W. Myint^b^aEscuela de Sostenibilidad, Universidad Estatal de Arizona, EE. UU.^bFacultad de Ciencias Geográficas y Planificación Urbana, Universidad Estatal de Arizona, EE. UU.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave:

minería de litio
Salud Ambiental
cambio de uso del suelo
condición de sequía
Landsat
Patrones espaciotemporales

RESUMEN

Las tecnologías emergentes de vehículos eléctricos y la transición global a la energía renovable han impulsado significativamente la producción de baterías de litio en los últimos diez años. Sin embargo, los posibles impactos adversos que acompañan a esta transición requieren un examen más detenido. El propósito de esta investigación es evaluar el impacto ambiental y su posible correlación con la minería de litio en el Salar de Atacama, el sitio de extracción de litio más grande del mundo. Usando imágenes Landsat y productos terrestres MODIS, investigamos las áreas mineras para (1) determinar el área y la tasa de cambio a lo largo del tiempo, (2) analizar patrones espaciotemporales de cambios en parámetros ambientales clave y (3) realizar análisis de regresión entre minería de litio actividades y degradación ambiental entre 1997 y 2017. Usamos cinco parámetros ambientales para nuestro análisis: Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Temperatura de la superficie terrestre durante el día (Day-LST), Índice de humedad del suelo (SMI), Temperatura de la superficie terrestre durante la noche (Night-LST) y Evapotranspiración neta (ET). Nuestro análisis muestra que las operaciones de minería de litio se han expandido rápidamente en un 7,07 % anual. Nuestro análisis de tendencias de series temporales basado en píxeles para cada pila de imágenes, utilizando la prueba de Mann-Kendall y el coeficiente de pendiente de Sen, muestra una degradación significativa en los últimos 20 años, que incluye (1) disminución de la vegetación, (2) aumento de las temperaturas diurnas, (3) tendencia decreciente de la humedad del suelo, y (4) aumento de la condición de sequía en las áreas de reserva nacional. Sin embargo, no se observa una degradación sustancial en LST y ET nocturnos en el área de estudio. Nuestros análisis de la relación entre las actividades mineras y la degradación ambiental también indican que la continua expansión de la minería de litio tiene fuertes correlaciones negativas con el NDVI y el SMI, y una fuerte correlación positiva con el LST. Identificamos las actividades de minería de litio como uno de los principales factores de estrés para la degradación ambiental local. Los resultados proporcionan una línea de base para evaluar los futuros impactos socioambientales de la minería de litio en la región. Anticipamos que nuestro análisis ayudará a informar a los reguladores ambientales y mineros, a los responsables de la toma de decisiones de la industria del litio y a los administradores de parques nacionales para brindar una mejor gestión de los sitios de producción de litio más grandes del mundo para un futuro sostenible. Identificamos las actividades de minería de litio como uno de los principales factores de estrés para la degradación ambiental local. Los resultados proporcionan una línea de base para evaluar los futuros impactos socioambientales de la minería de litio en la región. Anticipamos que nuestro análisis ayudará a informar a los reguladores ambientales y mineros, a los responsables de la toma de decisiones de la industria del litio y a los administradores de parques nacionales para brindar una mejor gestión de los sitios de producción de litio más grandes del mundo para un futuro sostenible. Identificamos las actividades de minería de litio como uno de los principales factores de estrés para la degradación ambiental local. Los resultados proporcionan una línea de base para evaluar los futuros impactos socioambientales de la minería de litio en la región. Anticipamos que nuestro análisis ayudará a informar a los reguladores ambientales y mineros, a los responsables de la toma de decisiones de la industria del litio y a los administradores de parques nacionales para brindar una mejor gestión de los sitios de producción de litio más grandes del mundo para un futuro sostenible.

1. Introducción

El mundo está cambiando cada vez más hacia sistemas de transporte basados en energía sostenible, en los que formas más sostenibles de producción y consumo de energía son oportunas y muy necesarias. Sin embargo, los impactos ambientales potenciales junto con la transición requieren un examen más detenido (Agusdinata et al., 2018). Tal transformación de energía e infraestructura de apoyo se basan, entre otras cosas, en baterías de iones de litio como almacenamiento eficiente de energía de alta densidad (Jaskula, 2017). En respuesta al aumento de la demanda de litio para aplicaciones de baterías, la producción mundial de litio aumentó un 12 % en 2016 (IFC (Corporación Financiera Internacional), 2017) y se prevé que siga creciendo rápidamente en un futuro próximo (Deetman et al., 2018).

La mayor parte de la producción mundial de litio tiene lugar en América del Sur

donde se concentra el 70% de las reservas mundiales (Jaskula, 2018). Chile, como productor líder, absorbe en promedio el 38% de la producción mundial de litio en los últimos veinte años (Figura 1). La industria minera de litio en Chile comenzó a fines de la década de 1970 y experimentó una expansión dramática y continua en la producción desde 1997, de 4500 ton/año a 14,100 ton/año en 2017 (Jaskula, 2018; Joyce, 1998). Los sitios de extracción de litio están ubicados en el Salar de Atacama (ASF), norte de Chile, donde el clima extremadamente árido y la topografía única producen agua subterránea salina que contiene 0,15% de litio que sirve como la principal fuente de agua para la extracción de litio (Salas et al., 2010; Tran y Luong, 2015). Generalmente, el agua subterránea salina (salmuera) que contiene litio se bombea a través de una cascada de estanques donde las impurezas o subproductos como halita, sylvanite y carnalita se precipitan por la evaporación solar, el viento y los aditivos químicos a una concentración de

*Autor para correspondencia en: School of Sustainability, Arizona State University, Wrigley Hall, 352, 800 Cady Mall, Tempe, AZ 85287, EE. UU.

Dirección de correo electrónico: bagusdin@asu.edu (DB Agusdinata).

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.016>

Recibido el 27 de enero de 2019; Recibido en forma revisada el 18 de abril de 2019; Aceptado el 23 de abril de 2019

0303-2434/ © 2019 Publicado por Elsevier BV

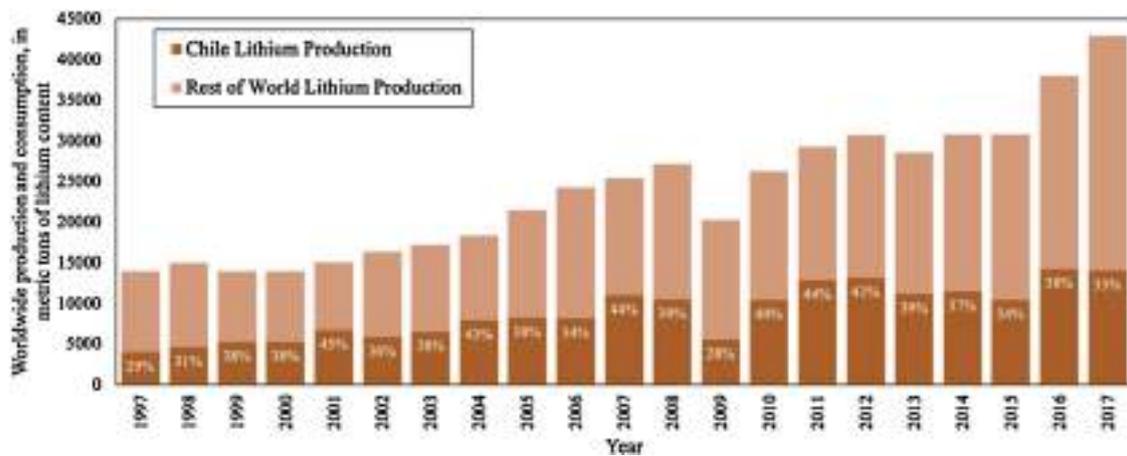


Figura 1. Producción de litio a nivel mundial y en Chile entre 1997 y 2017. (Fuente de datos: USGS Mineral Commodity Summaries between 1998 and 2018 (Anónimo, 2019)).

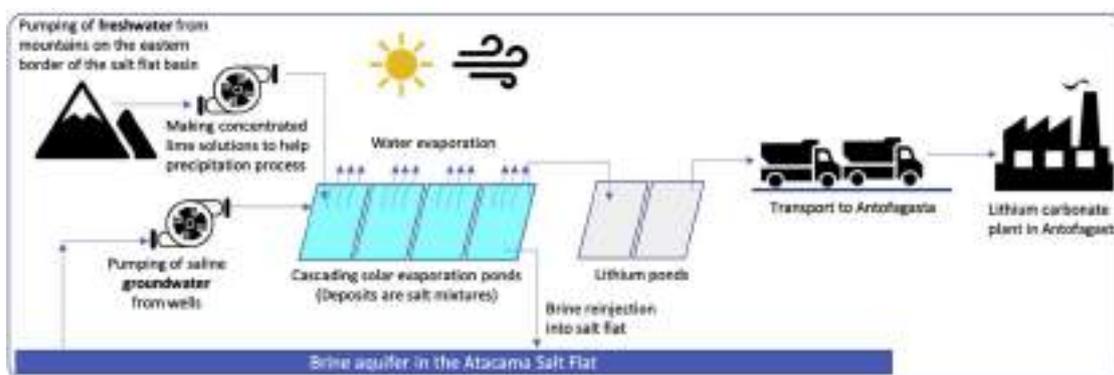


Figura 2. Representación esquemática del proceso de extracción de litio en el ASF. La tecnología de extracción actual concentra la salmuera a través de aditivos químicos y evaporación por energía eólica y solar. La sal concentrada de litio luego se transporta a Antofagasta para su posterior purificación y producción de carbonato de litio.

aproximadamente 6000 ppm (Tran y Luong, 2015; Flexer et al., 2018).

Posteriormente, la salmuera concentrada se transporta de regreso a la planta de recuperación en Antofagasta para su futura purificación y procesamiento. Una representación esquemática general para el proceso de extracción de litio en el ASF se muestra en Figura 2.

El uso del agua y las amenazas potenciales para la flora y la fauna locales son dos de las principales preocupaciones de sostenibilidad impulsadas por la extracción de litio (Flexer et al., 2018). En el proceso de extracción de litio, se evapora el 95% del agua de salmuera extraída (Habashi, 1997) y el agua dulce se bombea directamente desde las montañas en el borde oriental de la ASF. Si bien el agua de salmuera no es apta para el consumo humano o agrícola, se encuentra en relación hidrodinámica con el entorno (Marazuela et al., 2019a). Como resultado, el proceso de minería intensivo en agua en esta región muy árida puede causar efectos adversos sobre el agotamiento de los acuíferos (Babidge y Bolados, 2018), equilibrio hídrico y ecosistemas (Flexer et al., 2018; Babidge y Bolados, 2018), que suscitan preocupación entre las poblaciones locales, los ambientalistas y las autoridades gubernamentales. En la última década, la autoridad regional emitió una gran cantidad de permisos mineros para satisfacer la creciente demanda mundial de carbonato de litio, por lo que la escala de producción ampliada puede causar cambios en el paisaje y el microclima del entorno circundante, lo que resulta en conflictos sociales entre las empresas mineras y las comunidades locales (Molina Camacho, 2016).

Este estudio tiene como objetivo examinar los cambios espacio-temporales en el ambiente del Salar de Atacama (ASF) y sus alrededores, respondiendo a las siguientes dos preguntas de investigación: (1) ¿Qué partes del área de estudio han experimentado degradación ambiental en los últimos 20 años (1997–2017), en términos de uso de la tierra minera, cobertura vegetal y microclima? y 2) ¿Cuál es la relación entre la expansión

industria del litio y patrones dinámicos de degradación ambiental en esta área. Teniendo en cuenta los desafíos en la cuantificación de la dinámica espaciotemporal de la producción minera de litio y los impactos ambientales en esta área, proponemos un enfoque de detección remota para analizar estas dinámicas, proporcionando información de referencia confiable de las condiciones ambientales para las comunidades locales, los tomadores de decisiones estatales, los funcionarios de administración del parque y Gerentes industriales de minería de litio.

La cuestión de la degradación ambiental relacionada con la minería de litio no ha sido abordada en gran medida por la literatura existente debido a la lejanía del sitio y la escasez de datos confiables. La investigación cualitativa se ha realizado en esta zona para documentar los intensos conflictos entre las comunidades y las empresas mineras por el agua y la tierra. Babidge (2016) estudió el valor en disputa de los recursos en esta área a través de entrevistas con líderes comunitarios, trabajadores mineros y pueblos indígenas. El estudio analiza cómo la mercantilización de los recursos naturales causada por la industria minera del litio está cambiando la disponibilidad de agua y otros factores ambientales, lo que a su vez afecta el sustento de la economía agropastoral tradicional de las comunidades. Babidge (2013) también investigó los valores morales cuestionados arraigados en la “asociación” entre las empresas mineras y las comunidades indígenas en las comunidades vecinas a través de entrevistas, observaciones y reuniones. El estudio documentó los cambios negativos provocados por la minería de litio en la ASF, como el acceso limitado a los antiguos territorios de pastoreo, la contaminación y el rápido cambio en la cultura tradicional y las prácticas sociales. Sin embargo, estos cambios, así como la relación entre los cambios ambientales y la producción de litio, no se han cuantificado adecuadamente.

Además, el tema de la justicia ambiental ha estado llamando la atención en las disputas por recursos limitados en el desierto de Atacama.

Romero et al. (2012) exploró el desarrollo minero y la injusticia ambiental en el desierto de Atacama mediante la evaluación del balance hídrico en cuencas hidrográficas seleccionadas donde se concentran principalmente las operaciones mineras. Se aplicó el mapeo GIS para explorar la relación espacial de los sitios mineros, las áreas de conservación, las tierras indígenas y las inversiones económicas. Sin embargo, el documento cubría todos los tipos de minería en el norte de Chile, incluidos el cobre, el oro y otros minerales, por lo que es posible que no refleje las características únicas de la minería del litio. Además, la discusión de estas relaciones espaciales no cuantificó la posible relación causal entre el desarrollo minero y los parámetros ambientales.

La literatura existente centrada en la cuantificación de los impactos ambientales de la minería de litio en América del Sur es limitada en términos del número de publicaciones y la metodología de investigación (Agusdinata et al., 2018). La evaluación del ciclo de vida es la metodología más común aplicada para cuantificar los impactos ambientales generales causados por la producción de carbonato de litio. Sello et al. (2012) evaluó los impactos ambientales del ciclo de vida de la producción de carbonato de litio en el desierto de Atacama mediante el examen de la demanda de energía acumulada (CED), el potencial de calentamiento global (GWP) y EI99, que es un indicador de ponderación promedio que combina diferentes categorías de impacto. Sin embargo, el estudio se centró en gran medida en el consumo de energía y las emisiones de carbono de la minería de litio y no capturó los patrones espaciotemporales de impacto en el paisaje y el ciclo del agua local, que son de gran importancia considerando el clima local extremo.

La literatura actual mostró que el enfoque de detección remota se había aplicado ampliamente para explorar la dinámica del paisaje y las funciones de los servicios del ecosistema. Ishtiaque et al. (2016) examinó la dinámica del ecosistema del bosque de manglar a través del producto Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) comparando cinco parámetros ecológicos, incluido el Porcentaje de Cobertura de Árboles (PTC), el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), la Productividad Primaria Neta (NPP), el Índice de Área de Hoja (LAI) y Evapotranspiración (ET). Luego se desarrolló un modelo de regresión de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) basado en píxeles para el análisis de tendencias de series temporales para detectar los cambios espaciotemporales de la salud del ecosistema. Estoque et al. (2018) evaluó los impactos ambientales en los bosques de manglares de Myanmar causados por la deforestación a través de la temperatura de la superficie terrestre (LST), ET, NPP terrestre y PTC utilizando productos terrestres MODIS. El estudio también cuantificó los cambios temporales en el área de deforestación de manglares a través de imágenes Landsat. Wang et al. (2016) estudió el patrón espaciotemporal de la intensidad de la isla de calor urbana superficial en el área metropolitana de Phoenix y la relación con el uso de la tierra y la cobertura del suelo (LULC) utilizando imágenes MODIS LST y mapas LULC clasificados generados a partir de imágenes Landsat. También se realizó un análisis de tendencias de series temporales utilizando el modelo de regresión OLS para examinar la importancia estadística del cambio de temperatura en cada píxel.

Para examinar los cambios espaciotemporales en el entorno de la ASF y las áreas circundantes, primero presentaremos la topografía única, los atributos del paisaje y la importancia de la biodiversidad de nuestra área de estudio. Luego presentamos el análisis de tendencia de la serie temporal y los hallazgos. La última sección analiza las posibles correlaciones entre la industria del litio en expansión y los patrones de degradación ambiental, y señala otros posibles factores de estrés ambiental que afectan los cambios ambientales en el área de estudio.

2. Área de estudio

El Salar de Atacama (ASF) (Fig. 3), ubicado en la Región de Antofagasta, Norte de Chile, es el tercer salar más grande del mundo (alrededor de 3000 km²), brindando servicios ecosistémicos cruciales a las comunidades locales y diversas especies de flora y fauna. Geográficamente, el salar es un *endorreica intramontana* cuenca (es decir, un valle lleno de aluvión dentro de cadenas montañosas con un sistema de drenaje cerrado) delimitado por altas montañas a cada lado (Fig. 3a). A diferencia de otros salares, la topografía es de un alto nivel de rugosidad y rara vez está cubierta por aguas poco profundas debido al rápido proceso de evaporación (Kampf et al., 2005), cuatro

sectores de la Reserva Nacional Los Flamencos (Fig. 3)- Soncor (S.4), Laguna de Aguas de Quelana (S.5), Valle de La Luna (S.6), Tambillo (S.7) - ubicados en nuestra zona de estudio fueron creados en 1990 y están regidos por la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF). El área S.4 y S.5 están formadas por lagunas permanentes que albergan una diversidad de biodiversidad y sirven como un importante centro de anidación de flamencos. Las áreas S.6 y S.7 están cubiertas en su mayoría por suelos yermos y crestas de sal, pero aún proporcionan hábitats para diversas especies.

Las precipitaciones en la ASF son escasas y se concentran mayoritariamente en la época estival entre enero y marzo, con una precipitación anual de 10 mm en el salar y de 140 mm en la alta montaña (Salas et al., 2010). Conocida como una región de gran altitud, la elevación de esta área de estudio disminuye gradualmente desde los sectores montañosos circundantes hacia el centro del salar, desde 3300 a 2300 m sobre el nivel del mar en promedio (Fig. 3a). El clima local es árido y templado, con la temperatura máxima diaria de 24,3 °C en verano de diciembre a febrero y la temperatura media mínima de 0,3 °C en invierno de junio a agosto.

El área incluida en este estudio cubre la ASF y sus asentamientos rurales circundantes en el límite norte y este de la ASF (Fig. 3a), cubriendo un área total de 8284 km². Los tipos de uso de la tierra en la cobertura del suelo en el área de estudio son en su mayoría suelos estériles, asentamientos rurales agrupados en los márgenes norte y este, y estanques mineros en el centro de ASF. Se pueden encontrar oasis de vegetación escasamente agrupados a lo largo de los arroyos y lagunas y cerca de los asentamientos humanos. Los estanques mineros se pueden distinguir claramente de los alrededores en el centro de ASF por su color cian brillante. San Pedro de Atacama, ubicado a 55 km al norte de ASF, es la ciudad más grande de esta comuna (la división administrativa de tercer nivel de Chile), y otras comunidades están escasamente distribuidas a lo largo del margen nororiental.

3. Materiales y métodos

3.1. Materiales

Este estudio utilizó imágenes Landsat anuales con series temporales que abarcan desde 1997 hasta 2017. Específicamente, se seleccionaron dos imágenes de la mejor calidad para cada año, una de enero a febrero y otra de junio a julio. Seleccionamos imágenes adquiridas aproximadamente al mismo tiempo tanto en verano como en invierno del año para minimizar la variación estacional y la variación espectral provocada por los efectos fenológicos. Se excluyeron las imágenes con ruido de rayas en el invierno de 2008, el invierno de 2011, el verano de 2012 y el verano de 2013. Se utilizó un total de 37 imágenes Landsat con una resolución espacial de 30 m para derivar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la temperatura de la superficie terrestre durante el día (Day-LST), el índice de humedad del suelo (SMI) y las áreas mineras. Los detalles sobre la fecha de adquisición y la cobertura de nubes se pueden encontrar en la Información complementaria (SI-Tabla 1).

También utilizamos el producto de datos de nivel 2 del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) para los indicadores ambientales que no se pueden derivar directamente de las imágenes de Landsat. Específicamente, este estudio utilizó la capa de temperatura nocturna del producto MODIS LST de 8 días (MOD11A2) de 2000 a 2017 y seleccionó imágenes con la misma fecha de adquisición con las imágenes de Landsat. El producto de ET anual MODIS (MOD16A3) de 2000 a 2014 también se utilizó para mapear la dinámica de la pérdida de agua debido a la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas (Mu et al., 2007). Por lo tanto, para este estudio se recopilaron un total de 36 imágenes de Night-LST y 15 imágenes de Net ET, ambas con una resolución espacial de 1 km.

3.2. Procesamiento de imágenes

Examinamos los indicadores ambientales más utilizados, NDVI, LST en el día y la noche, SMI y ET, y el área de producción minera para detectar tendencias estadísticamente significativas de degradación ambiental. Seguimos el proceso del método de análisis de tendencias basado en píxeles ampliamente aplicado en estudios de teledetección (Ishtiaque et al., 2016; Estoque et al., 2018; Wang et al., 2016; Fan et al., 2017). El flujo de trabajo detallado del procesamiento y análisis de imágenes se muestra en Figura 4.

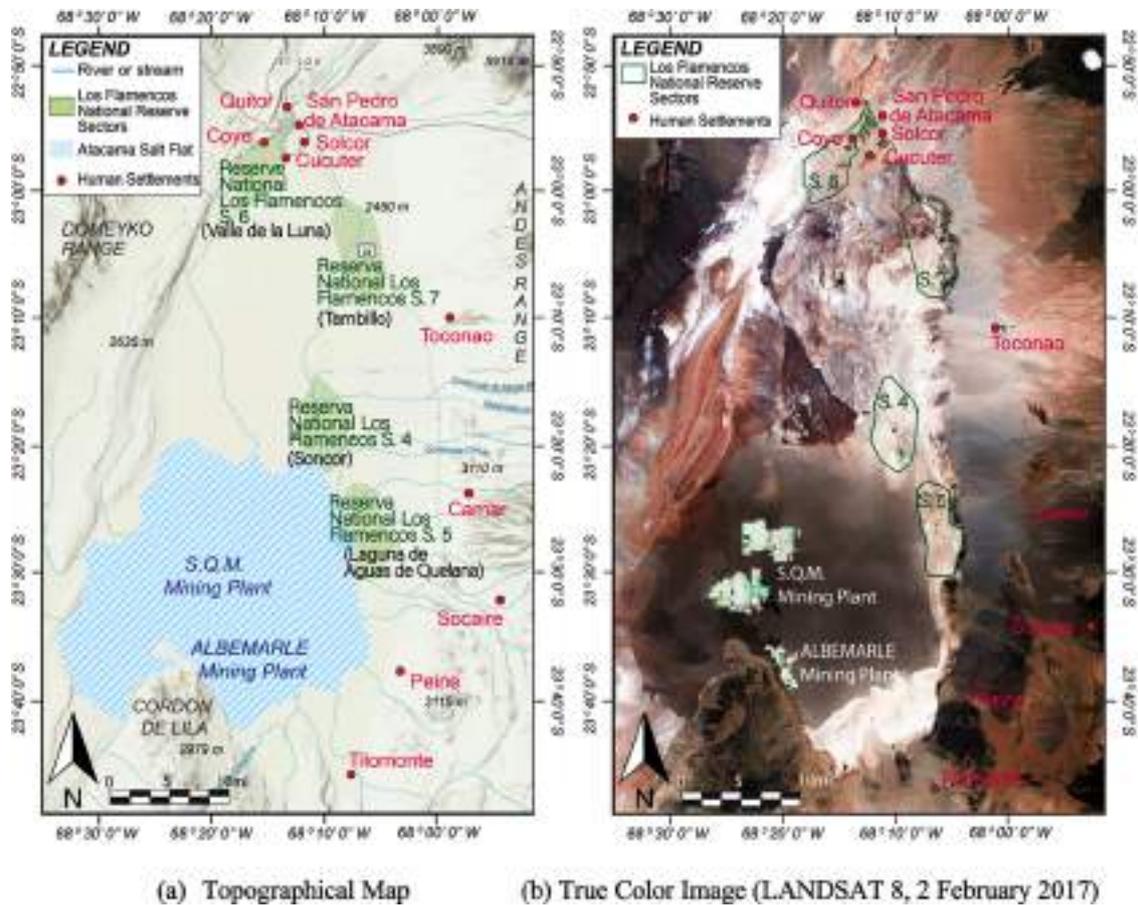


Fig. 3. Mapa del área de estudio en la ASF. El área de estudio incluye asentamientos rurales aledaños a ASF en el límite norte y este (punteado rojo), empresas mineras en el centro de ASF (color cian) y cuatro sectores de la Reserva Nacional Los Flamencos (S.4, S.5, S.6 y S.7) acotados en el recuadro verde.

Usamos el NDVI como indicador para mapear la biomasa verde, considerando sus usos extensivos en la identificación de la cobertura terrestre (De Fries y Townshend, 1994; Hansen et al., 2000), estudios fenológicos (Lee et al., 2002; Red et al., 1994; Studer et al., 2007), y evaluar las respuestas ecológicas al cambio ambiental (Pettorelli et al., 2005). Para nuestro estudio, el NDVI (Corriendo, 1990; Myneni et al., 1995) se calcula para cada imagen Landsat como:

$$NDVI = \frac{RIN - ROJO}{NIR + ROJO} \quad (1)$$

donde NIR y RED se refieren a las cantidades de luz roja e infrarroja cercana, respectivamente, reflejada por la vegetación y capturada por el satélite. En total, se generaron 35 imágenes NDVI para el período de estudio de 1997 a 2017, con un valor de píxel válido que va de -1 a 1.

Los datos satelitales proporcionaron la única posibilidad de medir LST en áreas amplias con alta resolución temporal (Li et al., 2013), proporcionando evaluaciones más precisas sobre el efecto isla de calor urbano (Ngie et al., 2014) y estudios de cambio climático en diversas escalas espaciales (Yang et al., 2013). En este estudio, usamos LST para mapear el espacio-temporal cambios de microclima y efectos de calentamiento en el área de estudio. los

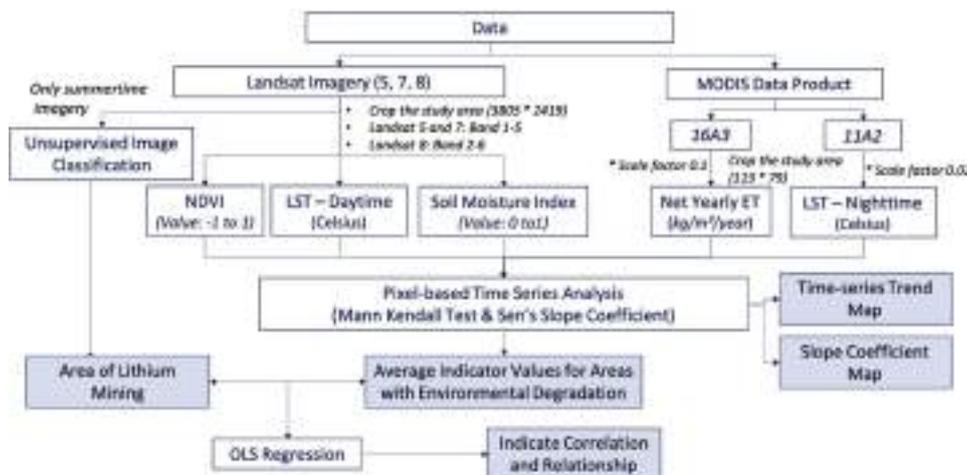


Figura 4. Diagrama de investigación que representa el flujo de trabajo del procesamiento y análisis de imágenes.

LST se recupera de las imágenes de Landsat de acuerdo con el método validado por (Avdan y Jovanovska (2016)), como (Artis y Carnahan, 1982):

$$s = \frac{BT}{\left\{1 + \left(\frac{\lambda BT}{\rho}\right) \epsilon_{\tau_s}\right\}} \quad (2)$$

donde T_s es la LST en Celsius, BT es la temperatura de brillo del sensor en Celsius, λ es la longitud de onda de la radiancia emitida, ρ es la emisividad de la superficie terrestre y se calcula mediante la constante de Boltzmann, la constante de Planck y la velocidad de la luz. Se obtuvo un total de 35 imágenes LST para el período de estudio de 1997 a 2017 con una resolución espacial de 30 m.

La humedad del suelo es otro aspecto clave examinado en este estudio para monitorear las condiciones de sequía en el área. Utilizamos el método desarrollado y validado por Zhan et al. (2007) para recuperar la humedad del suelo Índice (SMI) de imágenes Landsat, que se calcula como:

$$MI = 1 - \frac{1}{\sqrt{M \cdot (RR_{NIR} + SE_{NORROJO})}} \quad (3)$$

donde RR_{NIR} y RR_{ROJO} se refieren a la reflectancia corregida atmosféricamente de la banda NIR y la banda roja respectivamente, y M es la pendiente de la línea del suelo que se extrae utilizando la reflectancia NIR y la banda roja del área de estudio (Zhan et al., 2007). En total se procesaron 35 imágenes SMI con un rango válido de 0 a 1 entre 1997 y 2017 a una resolución espacial de 30 m. Mientras tanto, las capas de imagen de MODIS LST nocturno y Net ET se procesaron multiplicando con sus factores de escala y se convirtieron a Celsius y kg/m²/año, respectivamente.

3.3. Clasificación de imágenes para minería y no minería

Dado que el público conoce poco sobre la capacidad de extracción en el área de estudio, los datos de teledetección brindan una oportunidad perfecta para monitorear la escala de expansión de la extracción de litio. Por lo tanto, decidimos clasificar las imágenes para áreas mineras y no mineras para el período 1997–2017. Solo usamos las imágenes Landsat de verano para la clasificación, ya que la producción de litio es más distinguible del suelo de fondo durante los meses de verano.

Realizamos una clasificación no supervisada para áreas mineras utilizando el algoritmo de análisis de datos de autoorganización iterativa (ISODATA). Creamos 100 clústeres utilizando una iteración máxima de 10 y un umbral de convergencia de 0,95. Los grupos se identificaron como mineros o no mineros a través de la interpretación visual de la imagen Landsat que se muestra en diferentes combinaciones de bandas y con referencia a las imágenes de Google Earth. La clasificación errónea es inevitable en cada clasificación de imágenes. Por lo tanto, también empleamos imágenes de Google Earth para ayudar a identificar áreas mal clasificadas y luego corregimos manualmente las áreas mal clasificadas usando la herramienta "Relleno de área" en el software ERDAS Imagine.

Para evaluar adecuadamente la clasificación, realizamos una evaluación de precisión para cada imagen clasificada. Para cada imagen clasificada, creamos 200 puntos de validación aleatorios estratificados con puntos mínimos de 100 para cada clase. La precisión del productor, la precisión del usuario, la precisión general y el coeficiente Kappa para 20 imágenes clasificadas se calcularon a partir de la matriz de errores y se informaron en Información complementaria (SI-Tabla 2). Dado que el área de operación de minería dentro del ASF se puede distinguir fácilmente del suelo estéril de fondo, logramos una precisión general superior al 97 % y un coeficiente Kappa general superior a 0,95.

El área de minado resultante se utiliza para calcular el área de expansión de cada año como la diferencia en el área de minado entre dos años consecutivos y la tasa de expansión promedio (Seto et al., 2011) como $\frac{1}{d} \left(\frac{MA_{2017}}{MA_{1997}} - 1 \right)$, donde MA_{1997} y MA_{2017} son el área de minería en 1997 y 2017 respectivamente, y d es el lapso de tiempo del estudio en años.

3.4. Análisis de tendencias de series de tiempo

El procedimiento de procesamiento de imágenes generó cinco pilas de imágenes Landsat y MODIS para 1997–2017 y 2000–2017, respectivamente. Es decir, NDVI, LST y SMI de imágenes Landsat; LST y ET nocturnos de imágenes MODIS. Con estas pilas de imágenes procesadas, realizamos un análisis de tendencia en cada pila de píxeles de estos indicadores para explorar si se puede detectar una tendencia creciente o decreciente. La prueba estadística no paramétrica de la prueba de Mann-Kendall (MK) (hombre, 1945; Kendall, 1948) se selecciona para lograr este propósito porque puede funcionar de manera sólida en relación con el tamaño de muestra relativamente pequeño, el posible problema de no normalidad y la relación no lineal con la secuencia de años. Más específicamente, los valores de píxeles de serie temporal de cada pila de píxeles correspondiente de cada producto Landsat y MODIS se extraen y aplican en la prueba MK. Las pilas de píxeles con un valor p calculado de 0,10 que muestran una tendencia monótona detectable se conservan para generar el mapa de tendencias de series temporales. También aplicamos el estimador de pendiente de Sen (Sen, 1968) para calcular el coeficiente de pendiente para pilas de píxeles que muestran una tendencia monótona detectable a lo largo del tiempo. Posteriormente, se genera el mapa de coeficientes de pendiente que muestra la tasa de cambio para cada pila de imágenes durante el período de estudio.

3.5. Análisis de correlación

El otro objetivo principal de este estudio es explorar los posibles impactos de las expansiones de la minería de litio en el medio ambiente local. El análisis de regresión ha sido ampliamente utilizado por los estudios de teledetección para establecer relaciones entre varias variables biofísicas detectadas remotamente (Wang et al., 2017; Chen et al., 2006; Carretero, 1998; Schiebe et al., 1992). Para lograr esto, aplicamos el método de regresión de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) (Acero y Torrie, 1980) para medir el efecto de la expansión minera sobre cada variable ambiental. En el modelo de regresión, el valor anual de las áreas para la operación minera es la variable explicativa, y la variable de respuesta correspondiente es el valor medio anual de cada variable ambiental para las áreas con una tendencia de degradación detectable. Se considera que los modelos de regresión con un valor p calculado de 0,05 y un $R^2 > 0,5$ indican una fuerte correlación.

Para separar el efecto de la variabilidad climática y la minería sobre los cambios negativos en NDVI, excluimos los píxeles que tenían correlaciones relativamente fuertes entre NDVI y SMI en el análisis de regresión, considerando SMI como un indicador del impacto del clima. Solo píxeles con correlación débil o nula entre NDVI y SMI (valor absoluto del coeficiente de correlación de Pearson $< 0,4$ (Nishishiba et al., 2014)) se conservan para el análisis de regresión.

4. Resultados y análisis

4.1. Cambios de series temporales de minería

Los cambios en el área minera en el ASF se determinaron a través del proceso de clasificación de imágenes utilizando las imágenes Landsat. Entre 1997 y 2017, se estimó que las operaciones de extracción de litio aumentaron de 20,54 km² a 80,53 km² (Figura 5). Durante los últimos veinte años, con una tasa de expansión promedio de 7.07% por año, la industria minera en la ASF se ha expandido acumulativamente alrededor de 60 km², cuatro veces la escala de producción en 1997. Espacialmente, las operaciones mineras comenzaron desde los estanques originales desarrollados en 1997 y se expandió gradualmente a través de los años (Figura 6). Una serie de pequeños estanques separados en la esquina central izquierda y suroeste podrían ser estanques experimentales para futuros propósitos de expansión.

Nuestro análisis también muestra una tendencia general de aumento continuo en el área de extracción de litio y un patrón fluctuante del área expandida anual (Figura 5). Sin embargo, ciertos años mostraron un área de expansión relativamente mayor, como 1999, 2009 y 2010, lo que indica dos actividades importantes en expansión en los últimos veinte años, una para SQM, una empresa minera

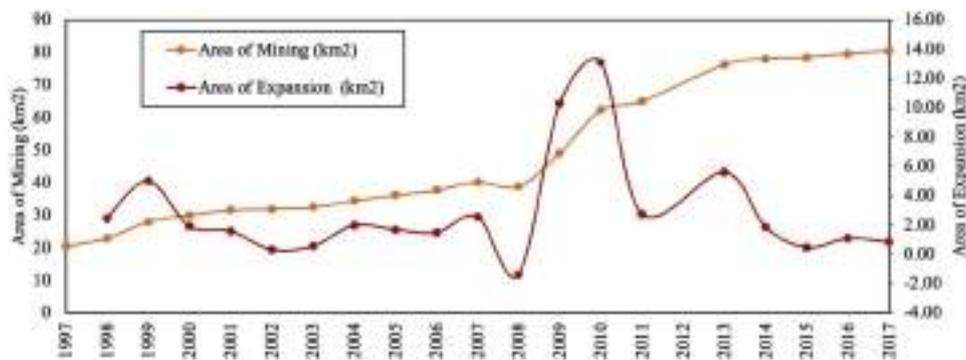


Figura 5. Área de minería de litio y área de expansión anual en la ASF entre 1997 y 2017. La industria de minería de litio se ha expandido acumulativamente alrededor de 59.99 km² en los últimos 20 años y alcanzó cuatro veces su escala de producción en 1997. Los resultados detallados están disponibles en Información complementaria (SI-Tabla 3).

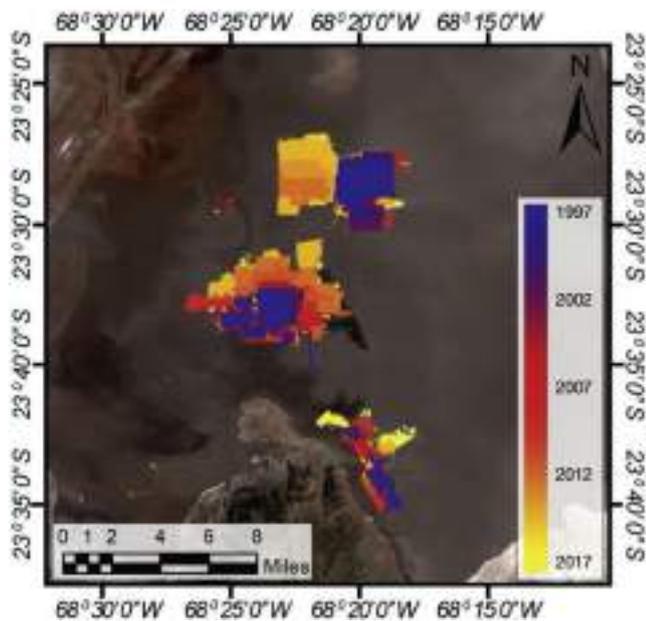


Figura 6. Mapa espacial del área de extracción de litio en ASF entre 1997 y 2017. El color que pasa de azul intenso a amarillo brillante representa el área de extracción recientemente desarrollada cada año.

empresa, incursionando en el mercado del litio y la otra por recuperarse de la crisis económica.

4.2. Cambios de series temporales de degradación ambiental

4.2.1. Cubierta vegetal

NDVI detecta la respuesta de las variedades de vegetación a la perturbación ambiental local con un rango válido de -1 a 1. El valor positivo de 0 a 1 corresponde a la cobertura de vegetación desde arbustos dispersos o pastizales hasta dosel denso, y el valor hacia -1 indica la ausencia de la vegetación y la presencia de cuerpos de agua. Por lo tanto, un cambio negativo de NDVI en este estudio puede implicar la degradación de una densa cubierta arbórea a matorrales, de matorrales o pastizales a suelo yermo, o de suelo yermo a estanques de operación minera.

Los cambios negativos de NDVI son evidentes dentro del ASF (Figura 7a), con valores de NDVI que disminuyeron en promedio de 0,0102 a -0,4077, lo que representa un cambio en la cobertura terrestre de suelo estéril a estanques mineros en los últimos 20 años. La tendencia decreciente del NDVI también es notable en las áreas habitadas por humanos del norte, donde las aldeas se distribuyen en grupos (figs. 7a, 10a). En estas áreas, los valores de NDVI se redujeron de al menos 0,025 a un máximo de 0,7331 a un valor promedio de 0,1612 en un área de 3,4281 km² durante los últimos 20 años, lo que indica una tendencia de degradación hacia arbustos o pastizales y una tendencia general de escasos

áreas con vegetación.

En cuanto a los sectores de reserva nacional, también es detectable la tendencia decreciente del NDVI (Figura 7a). Los valores de NDVI del sector S.6 y S.7 descendieron de un máximo de 0,2925 y 0,3095 a aproximadamente 0,0850 y -0,0337, respectivamente, indicando la degradación de las tierras con vegetación. En el sector S.4 y S.5, los valores de NDVI disminuyeron aproximadamente desde un amplio rango de -0,2617– 0,2047 a un valor promedio de -0,0853. Dichos cambios, sin embargo, no pueden clasificarse únicamente como degradación de la vegetación ya que estos sectores están compuestos principalmente por lagunas.

Los cambios negativos de NDVI en la mayoría de las áreas de nuestro sitio de estudio no son detectables. Sin embargo, todavía se puede detectar una disminución de los valores de NDVI en áreas de asentamientos rurales aislados o funciones importantes del ecosistema, como a lo largo de arroyos y cerca de humedales. Nuestro análisis muestra los cambios negativos anuales en los valores NDVI (Figura 7b). Las áreas mineras tuvieron una disminución anual promedio de 0,0086 en los valores de NDVI, que es más rápida que la disminución anual promedio de 0,0037 en los valores de NDVI para los asentamientos humanos en el Norte.

4.2.2. Temperatura de la superficie terrestre

Nuestro estudio muestra que las áreas que rodean los sitios mineros dentro de la ASF están experimentando el nivel más severo de aumento en el LST diurno (Figura 8a), mientras que la tasa de aumento es más lenta que otras áreas (Figura 8b). Durante los últimos 20 años, la LST diurna en áreas dentro de la ASF aumentó de aproximadamente 28,4 °C en verano y 8,32 °C en invierno a 32,9 °C y 14,11 °C con una tasa promedio de 0,74 % y 2,68 % por año, respectivamente. La tendencia creciente del LST diurno también es evidente en las áreas habitadas por humanos del norte, donde un total de 5,09 km² El área está experimentando un clima local más cálido durante el día a un ritmo que oscila entre 0,127 °C y 0,455 °C por año (Figura 10b). El sector de reserva nacional S.5 y S.7 se ven más afectados por el aumento del LST diurno, en comparación con otros sectores de reserva. En concreto, unos 12,42 km² el sector S.5 y 10,19 km² el sector S.7 han experimentado una tendencia creciente de LST diurno con una tasa promedio de 0,231 °C y 0,259 °C por año, respectivamente. Los márgenes del ASF también han mostrado una tendencia creciente de LST diurno en grupos, mientras que otras áreas de aumento de LST se distribuyen en un patrón disperso.

Por el contrario, en términos de LST nocturno, no se detectó una tendencia creciente ni decreciente en nuestro sitio de estudio. Dado que el sitio de estudio está ubicado en una región desértica árida, el rápido proceso de enfriamiento del suelo del desierto hace que la temperatura de la superficie terrestre vuelva rápidamente al equilibrio con la temperatura del aire durante la noche.

4.2.3. Humedad del suelo y evapotranspiración

Nuestro estudio encuentra que un total de 2214,5 km² Las áreas en el sitio de estudio están experimentando una tendencia significativamente decreciente de la humedad del suelo en los últimos 20 años. En estas áreas, el SMI disminuyó de al menos 0,004 unidades de índice a un máximo de 0,96 a un rango de 0,00002 a 0,9, con una tasa de disminución máxima de 0,0368 en los valores de SMI por año. Es notable que la creciente condición de sequía prevalece en nuestra área de estudio sin un

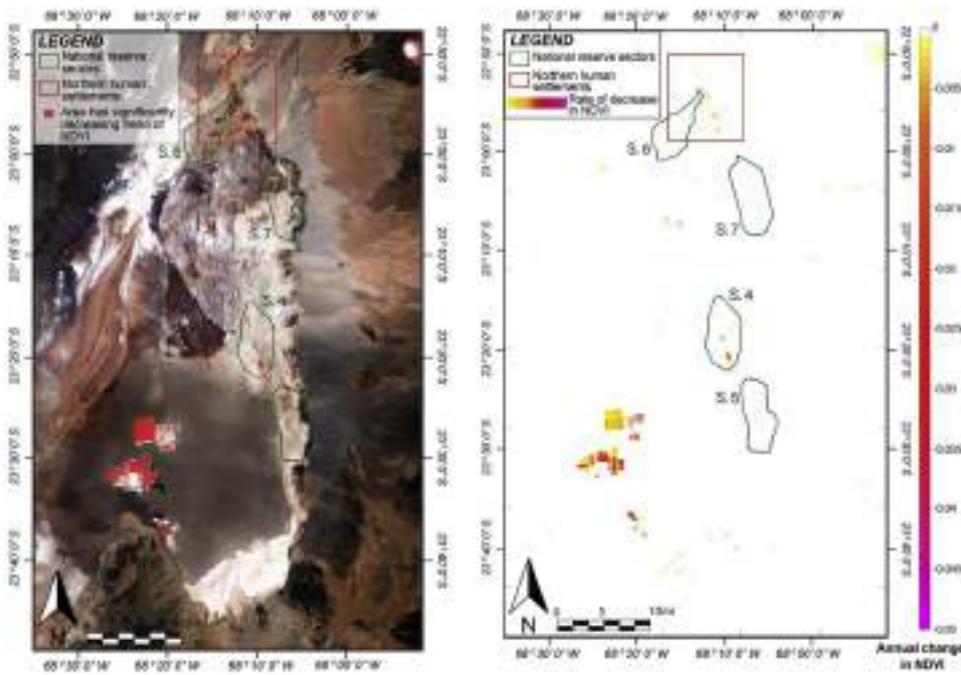


Figura 7.(a) Mapa de áreas que experimentan una tendencia significativamente decreciente del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y (b) Mapa de la tasa de disminución anual en NDVI para el área significativamente reducida de NDVI entre 1997 y 2017. Los cambios negativos de NDVI son evidentes dentro del ASF, zona norte de asentamientos humanos y algunos sectores de reserva nacional. Las áreas mineras dentro de ASF están experimentando una disminución anual más rápida en NDVI en comparación con otras áreas.

patrón claro de distribución espacial (Figura 9a). Los bordes de los estanques mineros y los márgenes sureste del ASF tienen una tasa de disminución más rápida en comparación con las áreas circundantes (Figura 9b). Los asentamientos humanos en el lado norte también tienen una condición de sequía creciente con una tasa de disminución anual en SMI de 0.0018, sin embargo, el patrón espacial aún no está claro para estas áreas (Figura 10C).

La ET neta media anual para nuestro sitio de estudio es de 48,97 kg/m²/año en los últimos 20 años, mientras que casi todas las áreas no tienen una tendencia detectable de cambio. Solo dos píxeles en el noreste de ASF han experimentado una pérdida de ET a razón de 0,89 kg/m²por año.

4.3. Relación de las actividades mineras y la degradación ambiental

Dado que nuestro análisis solo detectó cambios en NDVI, LST diurno y

SMI para el área de estudio, examinamos el efecto de la minería de litio en estos cambios. Excluimos píxeles con valores negativos de NDVI para detectar el efecto de la minería en la degradación de la vegetación. También excluimos las variabilidades climáticas en los cambios negativos en el NDVI al retener solo los píxeles con una correlación débil o nula entre el NDVI y el clima. Nuestros resultados muestran que la expansión de las operaciones de litio tiene fuertes correlaciones negativas con NDVI y SMI y fuerte correlación positiva con LST (Figura 11).

Se encuentra que el área de minería tiene una fuerte correlación negativa con los valores medios de NDVI para las vegetaciones que tienen cambios negativos detectables de NDVI (valor p = 0,000, R² = 0,9027). La pendiente de la función de regresión indica que expandir 1 km² de área minera podría disminuir el valor promedio de NDVI en la degradación de la vegetación en 0.0014 (Figura 11a). La relación entre el área minera y la media.

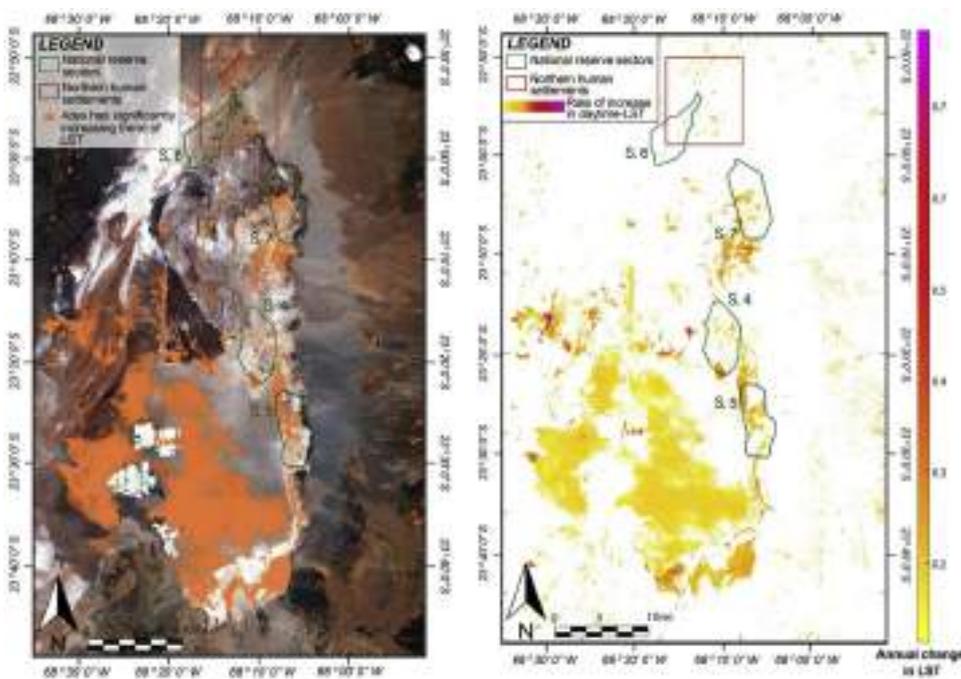


Figura 8.(a) Mapa de áreas que experimentan una tendencia significativamente creciente de la temperatura de la superficie terrestre (LST) durante el día y (b) Mapa de la tasa de aumento anual en LST para LST significativamente mayor área entre 1997 y 2017. Las áreas que rodean las operaciones mineras están teniendo el nivel más severo de aumento en el LST diurno en términos de las áreas de impacto, mientras que el aumento es más lento que otras áreas. Los sectores reservados nacionales S.4, S.5 y S.7 también se ven muy afectados por el aumento de LST.

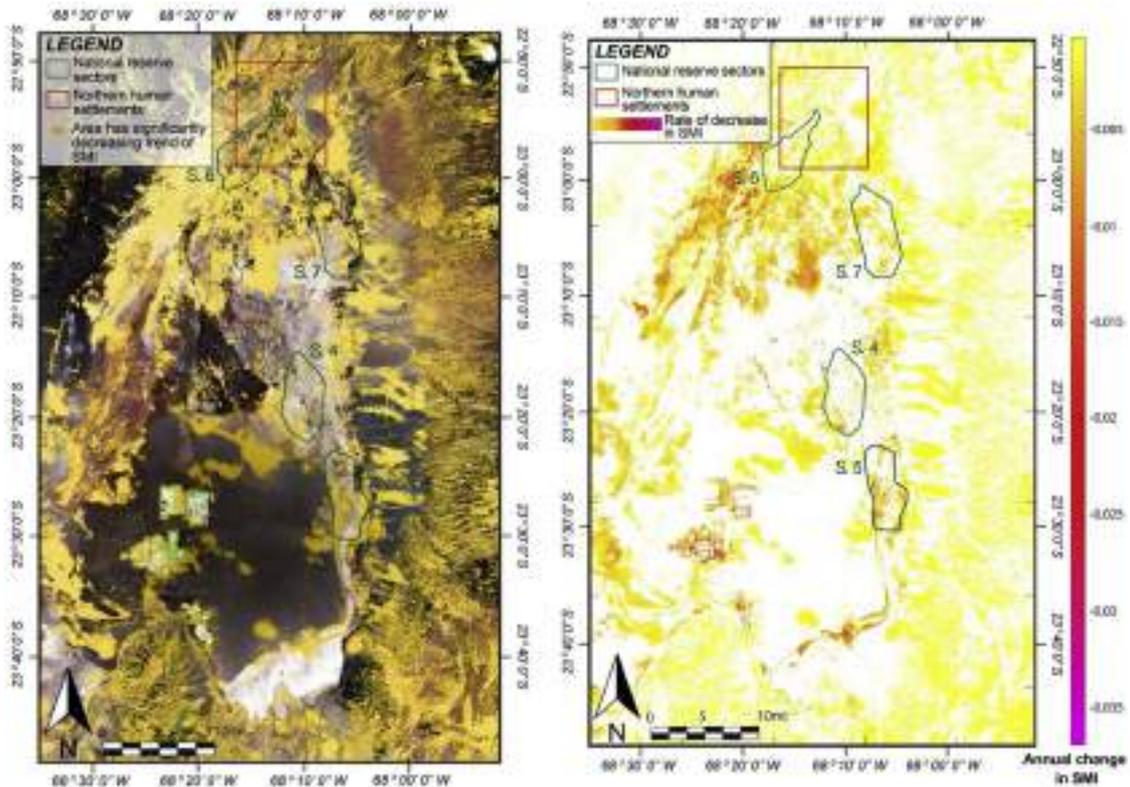


Figura 9.(a) Mapa del área que experimenta una tendencia significativamente decreciente de la humedad del suelo y (b) Mapa de la tasa de disminución anual del índice de humedad del suelo (SMI) para el área significativamente disminuida del SMI entre 1997 y 2017. La tendencia decreciente de la humedad del suelo prevalece en el estudio incluyendo sectores de reserva nacional. Los bordes de los estanques de litio y los márgenes sureste de la ASF muestran una tasa de disminución más rápida en comparación con las áreas circundantes.

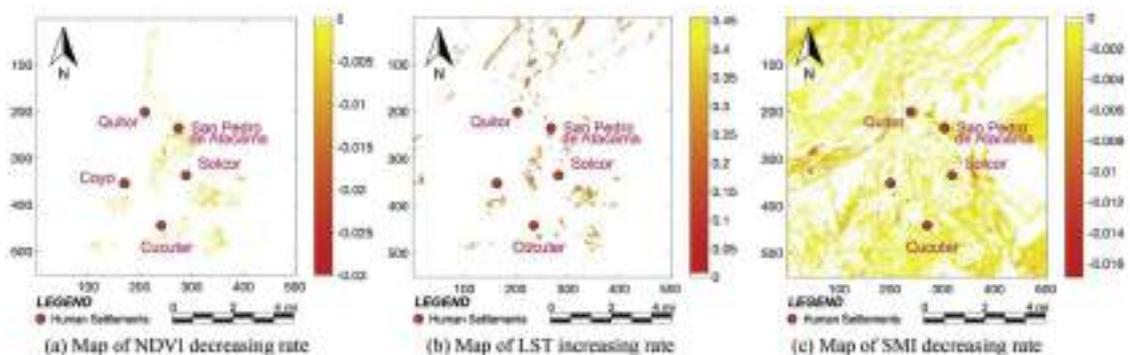


Figura 10.Cambio anual de degradación en los asentamientos humanos del norte en (a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), (b) Temperatura de la superficie terrestre durante el día (LST) y (c) Índice de humedad del suelo (SMI). Estas áreas están experimentando una degradación de la cubierta vegetal a un ritmo similar y un clima más cálido a un ritmo relativamente más rápido. La creciente condición de sequía prevalece en la mayoría de las áreas sin un patrón espacial claro.

Los valores de SMI para áreas con una tendencia significativamente decreciente de la humedad del suelo también muestran una fuerte correlación negativa (valor $p = 0,000$, $R_2 = 0,6476$). El resultado implica que a medida que el área minera aumenta 1 km², el valor de SMI disminuye en 0.0007 (Figura 11b).

Se examinó la relación entre la expansión minera y LST tanto para el verano como para el invierno. La regresión del LST medio del verano en el área de minería tiene un valor p calculado de $0,05$ (valor $p = 0,013$) mientras que $R_2 \leq 0,5$ ($R_2 = 0,3103$). Consideramos que la expansión minera aún tiene cierto poder explicativo para el aumento de la temperatura en verano ya que la relativamente pequeña R_2 valor puede atribuirse al pequeño tamaño de la muestra. El área minera muestra una fuerte correlación con el aumento de la temperatura en invierno con un valor p calculado de $0,05$ y $R_2 > 0,5$ (valor $p = 0,001$, $R_2 = 0,5109$). Con base en los resultados de nuestra regresión, a medida que la operación minera se expande 1 km², la LST diurna aumenta 0,0486 °C en verano y 0,0763 °C en invierno correspondientemente (Figura 11 discos compactos).

5. Discusión

5.1. Áreas afectadas por la degradación ambiental

Con respecto a la primera pregunta de investigación (*¿Qué partes del área de estudio han experimentado degradación ambiental en los últimos 20 años (1997–2017), en términos de uso de la tierra minera, cobertura vegetal y microclima?*), los análisis de los indicadores ambientales examinados en este estudio demuestran que la ASF y sus áreas circundantes están experimentando una degradación ambiental en términos de degradación de la cubierta vegetal, clima local más cálido y condiciones cada vez más secas. Aunque la tasa general de degradación es relativamente lenta, las áreas afectadas son amplias, incluidas las salinas, las aldeas habitadas por humanos y las áreas reservadas nacionales. Sin embargo, este estudio no detectó suficientes cambios en la LST nocturna y la ET en los últimos 20 años. Este resultado indica que la resolución relativamente baja de MODIS puede no ser apropiada para el

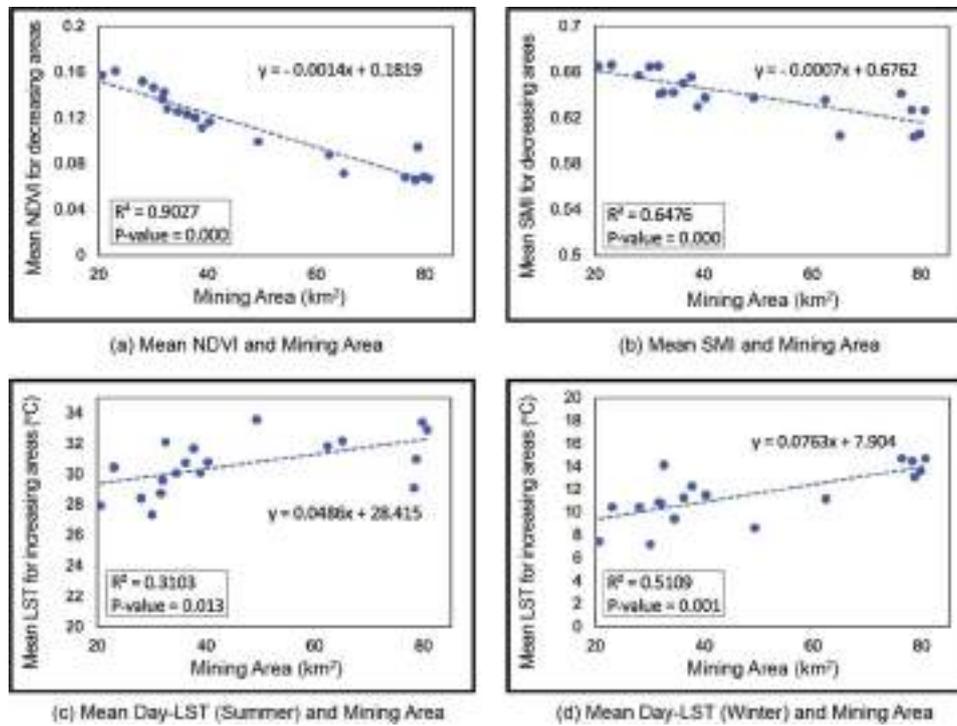


Figura 11. Correlación de la expansión de la minería de litio y la degradación ambiental. La expansión minera tiene suficiente poder explicativo para sugerir la degradación de la cubierta vegetal, el clima local más cálido y las condiciones más secas en esta área de estudio durante los últimos 20 años.

tabla 1
Área total de degradación ambiental.

Indicadores Área de estudio	NDVI		LST		SMI		
	Área (km ²)	Tasa promedio (Valor NDVI/año)	Área (km ²)	Tasa promedio (°C/año)	Área (km ²)	Tasa Media (valor SMI/año)	
Área total de estudio	59.94	-0,0041	919.31	0.2231	2214.51	-0,0024	
Asentamientos humanos del norte	3.43	-0,0037	5.09	0.2354	72.16	-0,0018	
Reserva Nacional Los Flamencos	S.4	0,45	-0,0039	5.03	0.2439	21.69	-0,0035
	S.5	0.18	-0,0028	10.19	0.2309	20.05	-0,0033
	S.6	0.10	-0,0007	0.10	0.1999	25.23	-0,0034
	S.7	0.04	-0,0036	12.42	0.2588	26.00	-0,0030

ambiente de ASF donde las características naturales y artificiales están escasamente distribuidas. En general, la creciente condición de sequía prevalece en nuestra área de estudio, donde el 26,7% del área total tiene suelos cada vez más secos (tabla 1).

Las áreas ubicadas en operaciones mineras están experimentando una tasa de degradación ambiental comparativamente más rápida, especialmente por convertir las salinas en estanques de operación y aumentar las condiciones de sequía. Aunque el aumento de la temperatura es relativamente lento en estas áreas, las áreas cercanas a los sitios de operación todavía experimentan un clima más cálido a un ritmo más rápido que el promedio. En general, grandes áreas dentro de ASF se ven afectadas por el clima más cálido y la transformación de la tierra en estanques mineros.

Las áreas de asentamientos humanos en el norte están experimentando una degradación ambiental a un ritmo similar al nivel promedio (tabla 1). Durante los últimos 20 años, 3,43 km² de las tierras con vegetación en la región septentrional poblada por humanos ha sufrido degradación, incluida la desaparición de la cubierta arbórea y el cambio a una vegetación escasa y de menor densidad. La tendencia de degradación de los oasis de vegetación en áreas agrupadas por humanos puede confirmar los resultados de un estudio empírico (Babidge y Bolados, 2018) afirmando que muchos lugareños abandonaron sus tierras agrícolas debido a la falta de agua. Además, 5,09 km² de estas áreas están pasando por un clima cada vez más cálido, y 72,16 km² están cambiando a condiciones mucho más secas (tabla 1).

Cuatro sectores de reserva nacional en nuestra área de estudio están afectados por la

aumento de la condición de sequía, mientras que S.5 y S.7 se ven aún más afectados por el clima más cálido. Un total de 92,97 km² de las tierras reservadas nacionales están experimentando una condición de sequía significativamente creciente en el suelo; y 27,74 kilómetros² están calentando durante el día durante los últimos 20 años (tabla 1). Sin embargo, las áreas con el valor decreciente de NDVI en el sector S.4 y S.5 no pueden considerarse simplemente como la cubierta vegetal en degradación ya que estos sectores están compuestos por humedales y lagunas. Aún faltan unos 0,14 km² de las tierras con vegetación en el S.6 y S.7 se degradan.

Las variabilidades climáticas en el período de estudio también pueden afectar las condiciones ambientales examinadas en el área de estudio, incluso después de que hayamos reducido ciertas variabilidades de los cambios climáticos locales en el proceso de selección de datos y prueba de tendencia estadística. En el ambiente desértico, los eventos de precipitación poco comunes pueden contribuir considerablemente menos que los factores de estrés antropogénicos de impacto intensivo en el ambiente local. Marazuela et al. (2019b) observaron la disminución de la tasa de evaporación después de las operaciones mineras en el ASF, lo que indica una disminución de la capa freática y el agotamiento de la humedad del suelo debido a las actividades mineras. Los cambios a corto plazo en el clima local también pueden tener una influencia limitada en la salud de la vegetación en el entorno hiperárido. Diaz et al. (2019) encontró que las plantas anuales y perennes son extraordinariamente resistentes en respuesta a la variabilidad climática en un marco de tiempo interanual (años a décadas). Además, las plantas herbáceas que son relativamente vulnerables a

Tabla 2

Ponderación de conjuntos de cuatro escenarios.

Escenarios	NDVI estandarizado cambio	LST estandarizado cambio	SMI estandarizado cambio
escenario 1	0.33	0.33	0.33
Escenario 2	0.5	0.25	0.25
Escenario 3	0.25	0.5	0.25
Escenario 4	0.25	0.25	0.5

variabilidades de corto plazo, tienen una baja presencia en el Desierto de Atacama. Sin embargo, la investigación existente aún es inadecuada para proporcionar una referencia sólida a la variabilidad climática local en temperatura y precipitación. Por lo tanto, el impacto de la variabilidad climática en las degradaciones ambientales identificadas en este estudio aún necesita un escrutinio futuro.

5.2. Índice de degradación ambiental

Para proporcionar la salud ambiental general del área de estudio, introdujimos un Índice de Degradación (DI) utilizando una combinación ponderada de cambios en los indicadores ambientales examinados en este estudio. En primer lugar, conservamos todos los píxeles que mostraban cambios ambientales negativos y estandarizamos la tasa de cambio de cada indicador en el rango de 0 a 1, que corresponde a cambios de relativamente lentos a rápidos. Luego, los indicadores estandarizados se ponderaron y sumaron para generar DI con un rango válido de 0 a 1. Los valores de DI resultantes se clasificaron en 6 clases: sin degradación (DI = 0), apenas degradado (0–0,2), menos degradado (0,2–0,4), moderadamente degradado (0,4–0,6), muy degradado (0,6–0,8), gravemente degradado (0,8–1). Consideramos cuatro escenarios con diferentes conjuntos de ponderación, [Tabla 2](#). Para cada píxel, el escenario que produjo el DI más bajo se seleccionó como el mejor escenario, y la diferencia entre el DI más bajo y el DI medio de cuatro escenarios se definió como incertidumbre. El área con incertidumbre alta indica que el grado de degradación podría ser peor que en el mejor de los casos. Posteriormente, generamos: (1) un mapa del mejor escenario DI y (2) un mapa de incertidumbre DI que muestra la distribución espacial de la menor degradación ambiental posible y su incertidumbre. El mapa resultante para cada escenario se proporciona en la Información Suplementaria (SI-Fig. 1).

El mejor de los casos ([Figura 12a](#)) e incertidumbre del escenario ([Figura 12a](#)) el mapa revela algunas ideas sobre el nivel y la incertidumbre de la degradación. La mayoría de las áreas en la región de estudio están apenas o menos degradadas con una incertidumbre relativamente baja. Sin embargo, algunas áreas de asentamientos humanos (resaltadas en recuadro rojo) en la parte norte de la región muestran un nivel de degradación de moderado a alto con una incertidumbre relativamente alta. Las áreas mineras dentro de la ASF están moderadamente degradadas con alta incertidumbre. La mayoría de las áreas de reserva nacional (S.4-S.7) tienen una degradación menor o nula, mientras que algunas áreas todavía muestran un nivel de degradación de moderado a alto. Otras áreas que muestran un nivel de degradación moderado o alto también tienen un nivel de incertidumbre relativamente alto.

En general, la mayoría de las áreas están apenas o menos degradadas con incertidumbres bajas, mientras que las áreas moderadamente degradadas también se asocian con una mayor incertidumbre, lo que implica que estas áreas pueden experimentar un peor nivel de degradación. Por lo tanto, sugerimos que las áreas moderadamente a altamente degradadas pueden necesitar más atención por parte de los tomadores de decisiones locales y los inspectores ambientales, especialmente en áreas con asentamientos humanos y tierras reservadas a nivel nacional.

5.3. Estrés antropogénicos en el medio ambiente local

Con respecto a la segunda pregunta de investigación (*¿Cuál es la relación entre la industria del litio en expansión y los patrones dinámicos de degradación ambiental en esta área?*), se encuentra que la rápida expansión de las operaciones de extracción de litio en ASF tiene una fuerte correlación con la degradación ambiental en curso en el área de estudio.

La industria del litio en expansión puede ser uno de los factores estresantes ambientales importantes para la salud general del medio ambiente local, especialmente por los factores que examinamos.

Para complicar el tema de los impactos ambientales de la minería, las empresas mineras de litio en la ASF se han estado acusando entre sí de extraer más salmuera de la permitida desde 2013. El impacto causado por la extracción de litio es difícil de rastrear porque las empresas mineras hicieron cambios en la forma en que monitorear pozos sin autorización, según un regulador ambiental de Chile ([Reuters, 2018](#)). La degradación ambiental identificada en este estudio concuerda con los resultados de un estudio sobre la disponibilidad de agua en la ASF realizado por CORFO ([CORFO, 2018](#)), que salía más agua y salmuera del sistema a través del bombeo y la evaporación que la que regresaba a través de las precipitaciones. Estos resultados también son consistentes con los hallazgos de los informes de inspección del gobierno ([SMA, 2016](#)) que alrededor del 32,4% de los árboles nativos de algarrobo en la propiedad de SQM (una empresa minera) estaban muriendo desde 2013. La desaparición de los árboles nativos de algarrobo, que son especies tolerantes a la sequía al enviar raíces a lo profundo del subsuelo para sobrevivir, implica un agua escasez en el acuífero ASF y puede actuar como una señal de alerta temprana de problemas de escasez de agua.

Sin embargo, los posibles factores de estrés ambiental distintos de la industria minera, como el turismo en auge y el aumento de la población, también pueden tener impactos negativos en la salud del medio ambiente local. La explosión del turismo en la región de ASF desde la década de 1990 ha aumentado drásticamente la población local, así como los flujos de turistas ([RIDES \(Investigación y Recursos para el Desarrollo Sostenible\), 2005](#)). Durante las temporadas altas, la población de turistas podría llegar a más del doble de la población local ([RIDES \(Investigación y Recursos para el Desarrollo Sostenible\), 2005](#)). En los últimos 15 años, el número de turistas atraídos por la Reserva Nacional Los Flamencos se ha multiplicado por doce, alcanzando los 0,4 millones de turistas en 2016 ([INE \(Instituto Nacional de Estadística de Chile\), 2003,2017](#)). La floreciente industria del turismo puede aumentar tanto el uso directo como indirecto del agua, por lo tanto, agregar estrés hídrico a destinos que ya tienen miedo al agua ([Gössling et al., 2012](#)). Basado en un consumo de agua diario estimado de 200 L/turista en Chile ([Gössling, 2006](#)), al menos unos 83.736.800 L de agua se consumieron en 2016 en la ASF si cada turista solo pasa un día allí. El aumento de los flujos de turistas podría ejercer más presión sobre la sequía local y el clima más cálido a través del consumo de agua, pero también puede presentar otros impactos ecológicos en el ecosistema local, como la degradación de la vegetación y la producción de desechos.

El notable crecimiento de la población impulsado por el auge de la industria del litio y las oportunidades turísticas también podría haber contribuido a la degradación ambiental identificada en este estudio de manera tanto directa como indirecta. Actualmente, según el censo nacional de 2017 ([INE \(Instituto Nacional de Estadística de Chile\), 2018a](#)), la población local se ha duplicado en los últimos 15 años y alcanza los 10.996 en 2017, superando la población proyectada en casi un 40% ([INE \(Instituto Nacional de Estadística de Chile\), 2018b](#)). Por lo tanto, el aumento resultante del consumo de agua y otras actividades humanas podría atribuirse al clima local más cálido y seco. Por otro lado, la disponibilidad de mano de obra asalariada proporcionada por la industria minera del litio ha atraído una gran fuerza laboral y ha llevado significativamente a la mayoría de los aldeanos a cambiar del estilo de vida agrícola y pastoril a una economía monetaria neoliberal ([Babidge, 2013](#)). Hoy en día, más y más aldeanos han trabajado como trabajadores asalariados o contratistas para las empresas de litio, dejando la agricultura como solo un complemento de una economía monetaria ([Babidge, 2013](#)). Por lo tanto, la menor atención a los sitios de pastoreo y agricultura podría explicar en parte la degradación de la vegetación.

6. Conclusiones

Se investiga que la industria minera en continua expansión es uno de los factores ambientales críticos para la salud general del medio ambiente local. Otros posibles factores estresantes, como la explosiva industria del turismo y el aumento de la población, aún no se han investigado.

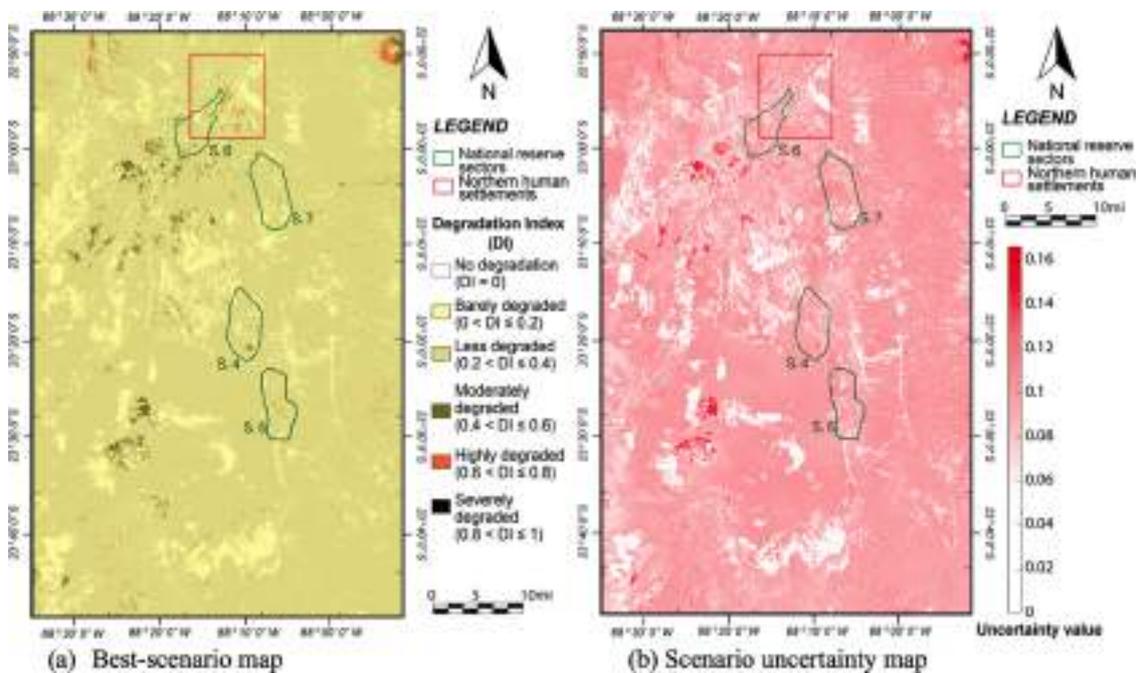


Figura 12.(a) Mapa espacial que muestra el mejor escenario de degradación ambiental basado en los cuatro escenarios diferentes examinados en el área de estudio; (b) Mapa espacial que muestra la incertidumbre en el mapa del mejor escenario; el color más profundo en rojo indica un mayor nivel de incertidumbre en comparación con otros escenarios.

lo que puede requerir futuras investigaciones para detectar sus efectos en el medio ambiente local. En sus esfuerzos por gestionar la futura expansión de la minería de litio, los formuladores de políticas deben prestar más atención a las áreas que han experimentado un aumento de LST, una disminución de NDVI y un aumento de las condiciones de sequía en el suelo, especialmente en tierras reservadas nacionales. Anticipamos que nuestro análisis de la minería de litio y la degradación ambiental ayudará a los reguladores mineros, los reguladores ambientales locales, los tomadores de decisiones de la industria del litio y los administradores de parques nacionales a brindar una mejor gestión de los sitios de producción de litio más grandes del mundo para un futuro sostenible y que nuestro análisis ayudará en futuras investigaciones para revelar otros factores de estrés para la degradación ambiental local y los posibles impactos a lo largo de la ruta de transporte basada en litio.

Reconocimiento

Los autores agradecen a los revisores anónimos por sus comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Apéndice A. Datos complementarios

Los datos complementarios asociados con este artículo se pueden encontrar, en la versión en línea, en <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.016>

Referencias

- Agusdinata, D., Liu, W., Eakin, H., Romero, H., 2018. Impactos socioambientales de extracción de mineral de litio: hacia una agenda de investigación. *Reinar. Res. Letón*. 13 (12), 123001.
- Resúmenes de productos minerales de USGS. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mercancia/litio/>.
- Artis, DA, Carnahan, WH, 1982. Estudio de la variabilidad de la emisividad en la termografía de Áreas urbanas. *Sensores Remotos Entorno*. 12 (4), 313–329.
- Avdan, U., Jovanovska, G., 2016. Algoritmo para el mapeo automatizado de la superficie terrestre temperatura utilizando datos satelitales LANDSAT 8. *J. Sens*. 2016, 1–8.
- Babidge, S., 2013. "Socios": la moralidad cuestionada de las "sociedades" en indígenas Relaciones comunidad-empresa minera, Norte de Chile. *J. Lat. Soy. Caribe antropopol.* 18 (2), 274–293.
- Babidge, S., 2016. Valor en disputa y una ética de los recursos: agua, minería e in-pueblos indígenas del desierto de Atacama, Chile. *Aus. J. Anthropol.* 27 (1), 84–103.
- Babidge, S., Bolados, P., 2018. Neoextractivismo y Ritual Indígena del Agua en Salar de Atacama, Chile. *Lat. Soy. Perspectiva*. 45 (5), 170–185.
- Carter, G., 1998. Bandas de onda e índices de reflectancia para la estimación remota de

fotosíntesis y conductancia estomática en copas de pino. *Sensores Remotos Entorno*. 63 (1), 61–72.

- Chen, X., Zhao, H., Li, P., Yin, Z., 2006. Análisis basado en imágenes de teledetección de la relación entre isla de calor urbana y cambios en el uso/cobertura del suelo. *Sensores Remotos Entorno*. 104 (2), 133–146.
- CORFO (Corporación de Fomento de la Producción de Chile), 2018. Instructor Fiscal de la División de Sanción y Cumplimiento Superintendencia del Medio Ambiente (en español). Recuperado de. CORFO, Santiago, Chile. <https://www.documentcloud.org/documents/5003677-Presentaci%C3%B3N-CORFO.html#document/p3/a461155>.
- Deetman, S., Pauliuk, S., van Vuuren, D., van der Voet, E., Tukker, A., 2018. Escenarios para crecimiento de la demanda de metales en tecnologías de generación de electricidad, automóviles y aparatos electrónicos. *Reinar. ciencia Tecnología* 52 (8), 4950–4959.
- DeFries, R., Townshend, J., 1994. Clasificaciones de la cubierta terrestre derivadas del NDVI en una escala. En t. *J. Sensores remotos* 15 (17), 3567–3586.
- Díaz, FP, et al., 2019. Impactos multiescala del cambio climático en la diversidad vegetal en el Desierto de Atacama. *globo Cambio Biol.* 2019, 1–13.
- Estoque, R., Myint, S., Wang, C., Ishtiaque, A., Aung, T., Emerton, L., Ooba, M., Hijioka, Y., Mon, M., Wang, Z., Fan, C., 2018. Evaluación de los impactos ambientales y el cambio en el valor del servicio del ecosistema de manglares de Myanmar debido a la deforestación (2000–2014). *globo Cambio Biol.* 24 (11), 5391–5410.
- Fan, C., Myint, S., Rey, S., Li, W., 2017. Evaluación de series temporales de la dinámica del paisaje usando imágenes Landsat anuales y modelos estadísticos espaciales: evidencia de la región metropolitana de Phoenix. En t. *Aplicación J. Observación de la Tierra Geoinf.* 58, 12–25. Flexer, V., Baspinero, CF, Galli, CI, 2018. Recuperación de litio de salmueras: una materia prima vital material para energías verdes con potencial impacto ambiental en su extracción y procesamiento. *ciencia Entorno Total*. 639, 1188–1204.
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C., Ceron, J., Dubois, G., Lehmann, L., Scott, D., 2012. Turismo y uso del agua: oferta, demanda y seguridad. Una revisión internacional. *Recorrido. Administrar.* 33 (1), 1–15.
- Gössling, S., 2006. Turismo y agua. En: Gössling, S., Hall, CM (Eds.), *Turismo & Cambio Ambiental Global: Interrelaciones Ecológicas, Sociales, Económicas y Políticas*. Routledge, Abingdon, Reino Unido, págs. 180–194. Habashi, F., 1997. *Manual de metalurgia extractiva*. Wiley-VCH.
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, JR, Sohlberg, R., 2000. Clasificación mundial de la cubierta terrestre fijación a una resolución espacial de 1 km utilizando un enfoque de árbol de clasificación. En t. *J. Remote Sens.* 21 (6–7), 1331–1364.
- IFC (Corporación Financiera Internacional), 2017. *Tendencias y Oportunidades de Almacenamiento de Energía en Mercados Emergentes*. CFI, Boulder, EE. UU..
- INE (Instituto Nacional de Estadística de Chile), 2003. *Turismo Informe Anual 2002*. INE, Santiago, Chile.
- INE (Instituto Nacional de Estadística de Chile), 2017. *Turismo Informe Anual 2016*. INE, Santiago, Chile.
- INE (Instituto Nacional de Estadística de Chile), 2018a. *Población Nacional y Vivienda Censo Redatam-2017*. Recuperado de. <http://www.ine.cl/estadisticas/demograficas-y-vitales>.
- INE (Instituto Nacional de Estadística de Chile), 2018b. *Estimaciones y Proyecciones de La Población de Chile 1992-2050 Total País*. Recuperado de. <http://www.ine.cl/estadisticas/demograficas-y-vitales>.
- Ishtiaque, A., Myint, S., Wang, C., 2016. Examinando la salud del ecosistema y

- sostenibilidad del bosque de manglares más grande del mundo utilizando productos MODIS multitemporales. *ciencia Entorno Total*. 569–570, 1241–1254.
- Jaskula, BW, 2017. Litio: resúmenes de productos básicos minerales (2017). Estados Unidos Servicio Geológico, Reston, VA.
- Jaskula, BW, 2018. Litio: resúmenes de productos básicos minerales (2018). Estados Unidos Servicio Geológico, Reston, VA.
- Joyce, AO, 1998. Litio: Resúmenes de productos básicos minerales (1998). Estados Unidos Servicio Geológico, Reston, VA.
- Kampf, S., Tyler, S., Ortiz, C., Muñoz, J., Adkins, P., 2005. Evaporación y superficie terrestre presupuesto energético en el Salar de Atacama, Norte de Chile. *J. Hydrol.* 310 (1–4), 236–252.
- Kendall, MG, 1948. Métodos de correlación de rangos, 4ª ed. 1970. Charles Griffin and Co., Ltd., Londres, Reino Unido.
- Lee, R., Yu, F., Price, K., Ellis, J., Shi, P., 2002. Evaluación del patrón fenológico de la vegetación charranes en Mongolia Interior utilizando análisis de series temporales NDVI. *En t. J. Sensores remotos* 23 (12), 2505–2512.
- Li, Z., Tang, B., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, F., Sobrino, IA, 2013. Satélite-temperatura de la superficie terrestre derivada: estado actual y perspectivas. *Sensores Remotos Entorno*. 131, 14–37.
- Mann, HB, 1945. Pruebas no paramétricas contra tendencia. *Econometría* 13, 245–259.
- Marazuela, MA, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., Palma, T., 2019a. Hidrodinámica de cuencas saladas: el ejemplo del Salar de Atacama. *ciencia Entorno Total*. 651, 668–683.
- Marazuela, MA, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., Palma, T., 2019b. El efecto del bombeo de salmuera sobre la hidrodinámica natural del Salar de Atacama: la capacidad amortiguadora de los salares. *ciencia Entorno Total*. 654, 1118–1131.
- Molina Camacho, F., 2016. Dinámica intergeneracional y desarrollo local: minería y la comunidad indígena de Chiu Chiu, provincia de El Loa, norte de Chile. *Geoforum* 75, 115–124.
- Mu, Q., Heinsch, FA, Zhao, M., Running, SW, 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and meteorological globales. *Sensores Remotos Entorno*. 11, 519–536.
- Myneni, R., Hall, F., Sellers, P., Marshak, A., 1995. La interpretación de la vegetación espectral índices de tación. *Trans. IEEE. Geosci. Remoto* 33 (2), 481–486.
- Ngie, A., Abutaleb, K., Ahmed, F., Darwish, A., Ahmed, M., 2014. Evaluación de las isla de calor utilizando imágenes satelitales de detección remota: una revisión. *S.Afr. Geogr. J.* 96 (2), 198–214.
- Nishishiba, M., Jones, M., Kraner, M., 2014. Correlación bivariada. Métodos de investigación y Estadísticas para administradores públicos y sin fines de lucro: una guía práctica. Publicaciones Sage, EE. UU., págs. 223–238.
- Pettorelli, N., Vik, J., Mysterud, A., Gaillard, J., Tucker, C., Stenseth, N., 2005. Usando el NDVI derivado de satélite para evaluar las respuestas ecológicas al cambio ambiental. *Tendencias Ecol. Evol.* 20 (9), 503–510.
- Reed, BC, Brown, JF, VanderZee, D., Loveland, TR, Merchant, JW, Ohlen, DO, 1994. Medición de la variabilidad fenológica a partir de imágenes satelitales. *J. Veg. ciencia* 5 (5), 703–714.
- Reuters, 2018. Una lucha por el agua en Atacama, Chile, plantea interrogantes sobre la minería de litio. publicado el 18 de octubre. Recuperado de <https://www.reuters.com/article/us-chilelithium-insight/a-water-fight-in-chiles-atacama-raises-questions-over-lithiummining-idUSKCN1MS1L8>.
- RIDES (Investigación y Recursos para el Desarrollo Sostenible), 2005. Millennium Evaluación de Ecosistemas: Bienestar humano y manejo sustentable en San Pedro de Atacama, Chile – Informe ejecutivo. PASEOS, Santiago, Chile.
- Romero, H., Méndez, M., Smith, P., 2012. Desarrollo minero e injusticia en el desierto de Atacama en el norte de Chile. *Reinar. Justicia* 5 (2), 70–76. Running, SW, 1990. Estimación de la productividad primaria mediante la combinación de sensores remotos con simulación de ecosistemas. *En: Hobbs, RJ, Mooney, HA (Eds.)*. Detección remota del funcionamiento de la biosfera. Springer-Verlag Inc., Nueva York, EE. UU., págs. 65–86.
- Salas, J., Guimerà, J., Cornellà, O., Aravena, R., Guzmán, E., Tore, C., von Igel, W., Moren, R., 2010. Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile). *Boletín Geológico y Minero* 121 (4), 357–372.
- Schiebe, FR, Harrington Jr, JA, Ritchie, JC, 1992. Teledetección de sensores suspendidos dimensiones: el proyecto Lake Chicot, Arkansas. *En t. J. Sensores remotos* 13 (8), 1487–1509. Sen, PK, 1968. Estimaciones del coeficiente de regresión basadas en la tau de Kendall. *Mermelada. Estadística Asoc.* 63, 1379–1389.
- Seto, KC, Fragkias, M., Güneralp, B., Reilly, MK, 2011. Un metanálisis de la urbanización global expansión de la tierra. *PLoS One* 6 (8), e23777.
- SMA (Superintendencia del Medio Ambiente de Chile), 2016. Formula Cargos Que Indica a SQM Salar SA Recuperado de SMA, Santiago, Chile. <https://www.documentcloud.org/documents/5003676-Formulaci%C3%B3N-De-Cargos.html#document/p14/a4611227>.
- Stamp, A., Lang, D., Wäger, P., 2012. Impactos ambientales de una transición hacia e-movilidad: el papel presente y futuro de la producción de carbonato de litio. *J. Limpio. Pinchar.* 23 (1), 104–112.
- Steel, RG, Torrie, JH, 1980. Principios y procedimientos de la estadística: un estudio biométrico Enfoque, segunda ed. McGraw-Hill, Nueva York.
- Studer, S., Stöckli, R., Appenzeller, C., Vidale, PL, 2007. Un estudio comparativo de satélite y fenología terrestre. *En t. J. Biometeorol.* 51 (5), 405–414.
- Tran, T., Luong, VT, 2015. Procesos de producción de litio. *En: En: Chagnes, A., Świa-towska, J. (Eds.)*, Lithium Process Chemistry 2015. Elsevier, págs. 81–124. Wang, C., Myint, S., Wang, Z., Song, J., 2016. Modelado espacio-temporal del calor urbano isla en el área metropolitana de phoenix: implicaciones del cambio de uso de la tierra. *Sensor remoto* 8 (3), 185.
- Wang, C., Wang, C., Myint, S., Wang, Z., 2017. Determinantes del paisaje del espacio-temporales porales de profundidad óptica de aerosoles en las dos áreas metropolitanas más contaminadas de los Estados Unidos. *ciencia Entorno Total*. 609, 1556–1565.
- Yang, J., Gong, P., Fu, R., Zhang, M., Chen, J., Liang, S., Xu, B., Shi, J., Dickinson, R., 2013. El papel de la teledetección satelital en los estudios de cambio climático. *Nat. Clima Cambio* 3 (1), 875–883.
- Zhan, Z., Qin, Q., Abduwasit, G., Wang, D., 2007. Nueva tecnología basada en el espacio espectral NIR-red método para monitorear la humedad del suelo. *ciencia Ser. de China D Ciencias de la Tierra.* 50 (2), 283–289.