

# Análisis de los forzantes climáticos y antropogénicos en la reducción de agua en la cuenca del río Copiapó, Chile (28° S) utilizando productos satelitales

Abel González<sup>1</sup>, Cristian Mattar<sup>2</sup>, Héctor H. Sepúlveda<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Magister en Geofísica, Universidad de Concepción, Chile.

<sup>2</sup>Fundación Bioera, Santiago, Chile.

<sup>3</sup>Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Chile - Fundación CEQUA, Punta Arenas, Chile.

**Resumen:** Una escasez hídrica ha estado afectando a Chile en los últimos años. Debido a los efectos negativos que puede generar el déficit de agua en el medio ambiente y en la población, es necesario mejorar nuestro entendimiento sobre la influencia de los factores climáticos y antropogénicos en la reducción hídrica, especialmente en regiones áridas como el norte de Chile. El objetivo principal de este trabajo es evaluar las implicancias de las variables climática y antropogénica en el déficit hídrico de la cuenca del río Copiapó, región de Atacama, Chile. El periodo de estudio comprende entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. Para este análisis se utilizaron los productos satelitales de MODIS (MOD10a2 y MOD16a2) e imágenes Landsat. Información de la extracción de agua obtenida por la Dirección General de Aguas también fue incluida para este estudio. Las variables analizadas incluyen evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>), Equivalente de Agua en la Nieve (SWE) y uso de agua para minería y agricultura. Cambios de SWE en los Andes fueron analizados como variables climáticas, mientras que cambios en la irrigación y extracción de agua para minería fueron utilizados como variables antropogénicas. La cantidad de agua que pierde la cuenca mediante ET<sub>r</sub> fue estimada para cuantificar los cambios en la reducción de agua. Los resultados muestran una reducción significativa ( $p < 0,05$ ) de agua a una tasa de 0,7 Mton/año. Mediante análisis de correlación, se encontró una importante relación entre esta reducción y el consumo del sector minero (-0,52), sugiriendo que el forzante antropogénico influye más que el clima en el déficit hídrico. Un mejor monitoreo de la extracción de agua ayudará a identificar de mejor manera sus efectos en la disponibilidad de agua.

**Palabras clave:** evapotranspiración, irrigación, recursos hídricos, sensor remoto, SWE.

## **Analysis of climatic and anthropogenic forcing in the reduction of water in the Copiapó river basin, Chile (28° S) using satellite products**

**Abstract:** A water shortage has been affecting Chile in recent years. Due to the negative effects that water deficit can generate on the environment and the population, an improved understanding of the influence of climatic and anthropogenic factor on water depletion is needed, especially in arid regions such as northern Chile. The main objective of this study is to assess the implications of climatic and anthropogenic variables on the water deficit of the Copiapó River basin, Atacama region, Chile. The study period spans from 2001/02 to 2021/22 seasons. MODIS satellite products (MOD10a2 and MOD16a2) and Landsat images were used for this analysis. Water extraction information obtained from the Chilean National Water Agency (DGA) was also included for this study. The analyzed variables include actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>), Snow Water Equivalent (SWE), and water use for mining and agriculture. Changes in Snow Water Equivalent (SWE) in the Andes were analyzed as climatic variables, while changes in irrigation and water extraction for mining were used as anthropogenic variables. The amount of water

**To cite this article:** González, A, Mattar, C., Sepúlveda, H.H. 2024. Analysis of climatic and anthropogenic forcing in the reduction of water in the Copiapó river basin, Chile (28° S) using satellite products. *Revista de Teledetección*, 63, 53-63. <https://doi.org/10.4995/raet.2024.20047>

\* Corresponding author: [abgonzalez@udec.cl](mailto:abgonzalez@udec.cl)

lost by the basin through actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) was estimated to quantify changes in water reduction. The results show a significant reduction ( $p < 0.05$ ) of water at a rate of 0.7 Mton/year. Through correlation analysis, an important relationship was found between this reduction and the consumption of the mining sector (-0.52), suggesting that the anthropogenic forcing influences the water deficit more than the climate. Enhanced monitoring of water extraction will contribute to a more accurate identification of its effects on water availability.

**Key words:** evapotranspiration, irrigation, remote sensing, SWE, water resources.

---

## 1. Introducción

Desde el año 2010 una disminución de las precipitaciones ha estado afectando de manera ininterrumpida a la zona central de Chile (30°-38°S) (CR2, 2015; Garreaud *et al.*, 2020). Este fenómeno ha sido denominado Mega Sequía, debido a su inusual duración e intensidad. En efecto, este evento ha superado el promedio de duración de las sequías ocurridas en Chile central desde 1915 (1-3 años) (Garreaud *et al.*, 2020). La Mega Sequía está asociada a un aumento de las temperaturas (Burger *et al.*, 2018) y a una disminución de las precipitaciones (Boisier *et al.*, 2016), generando un retroceso de la cobertura de nieve en los Andes (Malmros *et al.*, 2018; Saavedra *et al.*, 2018; Ruiz Pereira y Veettil, 2019) impactando directamente en la disponibilidad de agua dulce. Al mismo tiempo, el crecimiento económico y demográfico ha provocado una mayor demanda de agua en zonas donde hay escasez de este recurso, estresando los acuíferos y las escorrentías superficiales (Donoso, 2021; Valdés-Pineda *et al.*, 2014).

El caso de la cuenca del río Copiapó (CRC), localizada en la zona centro-norte del país, es un ejemplo de cómo las variables climáticas y antropogénicas han estado provocando un importante déficit hídrico (Donoso, 2021; HIDROMAS CEF, 2013; Oyarzún y Oyarzún, 2011; Suárez *et al.*, 2014). En efecto, en las últimas décadas la demanda hídrica ha ido aumentando a medida que la actividad agrícola y minera se expande. Mientras las áreas cultivables han crecido hasta alcanzar cerca de 15 000 ha en 2015 (Rinaudo y Donoso, 2019), una mayor inversión en proyectos mineros (COCHILCO, 2018) han provocado no solo un aumento en el requerimiento de agua para esta actividad, sino que también ha generado un aumento en la tasa de crecimiento de la población por una mayor oferta de empleo (INE, 2017), contribuyendo a una mayor demanda por

agua potable. Por otro lado, la disponibilidad de agua depende del derretimiento de la cobertura de nieve en los Andes (Donoso *et al.*, 2020). En estas latitudes, la acumulación de nieve es susceptible a variables climáticas como la temperatura del aire, el viento (Gascoin *et al.*, 2013; Jara *et al.*, 2021; Réveillet *et al.*, 2020) e índices climáticos como ENSO (Saavedra *et al.*, 2018). En efecto, durante la fase cálida/fría de ENSO, hay una tendencia a precipitaciones por sobre/debajo de lo normal (Fernández y Gironás, 2021). Debido a la aridez, cambios menores en el clima pueden afectar de manera importante en el almacenamiento de agua de la cuenca.

Considerando los posibles efectos del consumo excesivo de agua y la variabilidad de la cobertura de nieve sobre los recursos hídricos de la CRC, es necesario tener una mayor comprensión en cómo estos factores pueden estar influyendo en el déficit hídrico. Actualmente, la información respecto a la extracción y uso de recursos hídricos es limitada (Donoso, 2021). Por lo tanto, es necesario evaluar otros parámetros hidrológicos que permitan analizar los cambios en la disponibilidad de agua. La evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) es una variable importante en el ciclo hidrológico (Castro y Gironás, 2021), especialmente en ambientes áridos donde muchas veces alcanza valores que superan a la tasa de precipitación (Johnson *et al.*, 2010; Meza, 2013). Se han estudiado procesos hidrológicos mediante la estimación de ET<sub>r</sub> aplicando sensor remoto (Anderson *et al.*, 2012; Hernández-López *et al.*, 2016; Johnson *et al.*, 2010; Montecino *et al.*, 2016) permitiendo solucionar el problema de falta de información en terreno.

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es evaluar las implicancias de las variables climáticas y antropogénicas en el déficit hídrico de la CRC para el periodo comprendido entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. Para ello,

analizaremos la variabilidad de la oferta de agua proveniente de la cobertura de nieve como forzante climático. Luego, evaluaremos los cambios espaciales de superficies de cultivos irrigados y la demanda de agua del sector minero como forzantes antropogénicos. Finalmente, cuantificaremos los cambios de reducción de agua estimando la cantidad de agua que pierde la cuenca mediante la evapotranspiración real. Los resultados de este trabajo nos permiten evaluar cuál es el principal forzante en la reducción de agua que afecta en la CRC.

## 2. Área de estudio

La cuenca del río Copiapó está localizada en la región de Atacama, norte de Chile, entre las latitudes 27°S y 29°S y está delimitada por la cordillera de los Andes hacia el este y por el océano Pacífico al oeste (Figura 1). La cuenca se caracteriza por tener un clima árido, dentro del desierto de Atacama (Juliá *et al.*, 2008), con un promedio anual de precipitación de 28 mm y temperatura media anual de 15,2° C en la parte central. El principal afluente superficial es el río Copiapó, alcanzando una longitud de 162 km y se origina a una elevación de 1230 msnm donde convergen los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. Su caudal promedio es de 2,4 m<sup>3</sup>/s, alcanzando valores máximos en

los meses de verano debido al derretimiento de la nieve (Houston, 2006b). La agricultura y minería son las principales actividades económicas de la zona (Rinaudo y Donoso, 2019). Ambos sectores, representan cerca del 90% del consumo total de agua (Donoso *et al.*, 2020). El sector agrícola corresponde a superficies de cultivos irrigados que comprenden principalmente de parrones de uva (79%), olivos (17%) y, en menor cantidad, hortalizas (Partarrieu *et al.*, 2009). Es importante mencionar que la vegetación natural es escasa, una característica atribuible al clima árido predominante (Juliá *et al.*, 2008). Se destaca la presencia limitada de vegetación en la costa, principalmente cactáceas, y algunas plantas de tipo matorrales en la zona cordillerana (DGA, 2004).

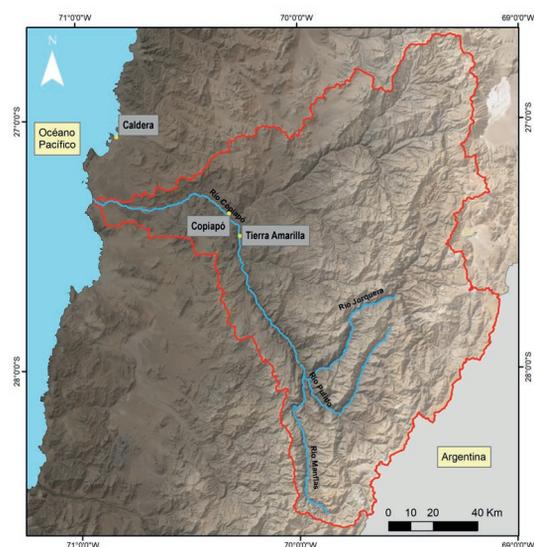
## 3. Materiales

Los datos utilizados para este trabajo fueron recolectados de diferentes fuentes, incluyendo estudios sobre los recursos hídricos en informes hechos por instituciones gubernamentales y otras publicaciones científicas. También, se utilizaron distintos productos satelitales que contienen series de datos con resolución espacial y temporal aplicables para la escala del área de estudio.

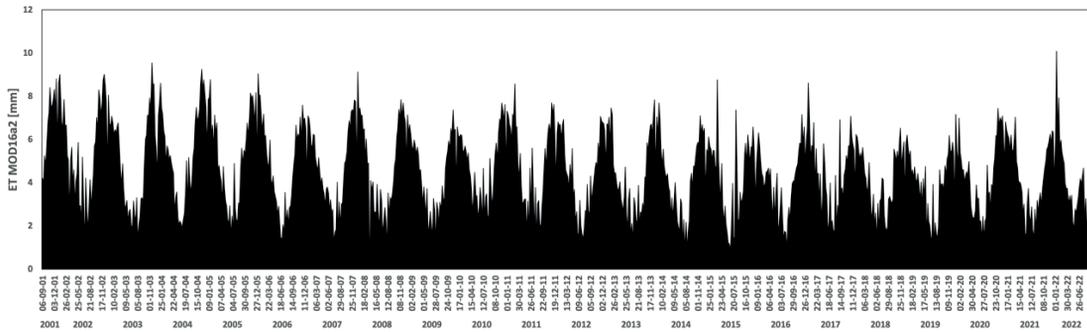
### 3.1. Sensor remoto

Las imágenes satelitales utilizadas para este trabajo incluyen la colección de imágenes Landsat 5, 7 y 8 y los productos MOD16a2 y MOD10a2 de MODIS. Estos datos fueron obtenidos desde *Google Earth Engine* (GEE), una plataforma que permite procesar y analizar productos satelitales sin descargarlos (Gorelick *et al.*, 2017), a excepción de MOD10a2, el cual fue descargado desde la página web de la NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/>) y procesado en ArcGIS 10.5.

Se recopilaron 965 imágenes de MOD16a2 entre el 6 de septiembre de 2001 y el 29 de agosto de 2022 para generar una serie de tiempo de evapotranspiración real (ETR) (Figura 2). Para el análisis de la cobertura de nieve se utilizaron 948 imágenes de MOD10a2 obtenidas entre el 6 de marzo de 2001 y 29 de agosto de 2021 para generar una serie de tiempo del área de la cobertura de nieve que incluye los meses de otoño e invierno del periodo 2001/02-2021/22 (Figura 3). Desde MOD10a2 se utilizó la banda “Maximum\_Snow\_Extent” que



**Figura 1.** Delimitación de la cuenca del río Copiapó (en rojo) y ubicación de la ciudad de Copiapó y Tierra Amarilla.



**Figura 2.** Series de datos de ET MOD16A2 de MODIS para el periodo comprendido entre 6 de septiembre de 2001 y 29 de agosto de 2022. Cada columna muestra el valor de ET promedio [mm] para cada imagen de la serie.

entrega la extensión máxima de la cobertura de nieve dentro de los 8 días que abarca cada imagen (Riggs y Hall, 2015).

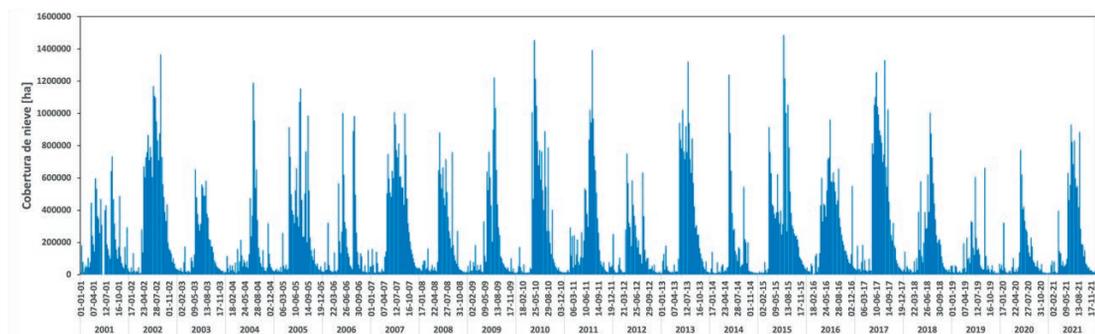
Con respecto a las imágenes Landsat, estas fueron procesadas para estimar los cambios de la superficie cubierta de cultivos durante el periodo de estudio. Seleccionamos imágenes libres de nubosidad y obtenidas en los meses de verano austral (Tabla 1).

### 3.2. Demanda hídrica

Datos de extracción de agua para la actividad minera fue incluida en nuestro análisis debido a que es la segunda mayor demanda de agua por sector después de la agricultura (Donoso *et al.*, 2020). Para ello, se recolectaron las estimaciones del consumo de agua por parte de la minería dentro de la cuenca del río Copiapó desde un estudio solicitado por la DGA (HÍDRICA Consultores

**Tabla 1.** Imágenes utilizadas para la obtención de área de cultivos. Se seleccionaron escenas libres de nubosidad y capturadas en verano para capturar la máxima irrigación. La escena utilizada para el año 2013 fue obtenida en mayo debido a que Landsat 8 comenzó a recopilar imágenes en marzo de ese año. No hay escena del año 2012 debido a que Landsat 5 y Landsat 8 no producían imágenes en ese periodo y Landsat 7 presentaba problemas en sus productos.

Satélite	Código de la colección de imágenes	Fecha
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	25-01-02
Landsat 7	LANDSAT/LE07/C01/T1_8DAY_NDVI	10-02-03
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-04
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-05
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	25-01-06
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	11-12-06
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	25-01-08
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-09
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	02-02-10
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	01-01-11
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	05-05-13
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	10-02-14
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-15
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-16
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	17-01-17
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	10-02-18
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	09-01-19
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	17-01-20
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	02-02-21
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	19-12-21



**Figura 3.** Series de datos de cobertura de nieve MOD10A2 de MODIS para el periodo comprendido entre 1 de enero de 2001 y 31 de diciembre de 2021. Cada columna muestra el valor de superficie cubierta de nieve [ha] para cada imagen de la serie.

SPA, 2018), generando una serie de datos de extracción de agua anual para el periodo 2001-2017 (Tabla 2).

**Tabla 2.** Registro de la demanda hídrica anual del sector minero de la cuenca del río Copiapó. (Fuente: HÍDRICA Consultores SPA, 2018).

Año	Agua extraída [Mton]	Año	Agua extraída [Mton]
2002	9,1	2010	19,3
2003	8,7	2011	19,7
2004	10,6	2012	21,2
2005	12,6	2013	18,4
2006	11,7	2014	17,5
2007	16,6	2015	17
2008	17,9	2016	18,2
2009	18,6	2017	17,2

## 4. Metodología

El estudio de las implicancias de las variables climáticas y antropogénicas en la reducción de agua fue realizado a través de un análisis de correlación entre la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) y estas variables. En primer lugar, estimó el Equivalente de Agua en la Nieve (SWE) para las estaciones de otoño e invierno y total (otoño + invierno) como variable climática. Luego, se calculó un estimativo de agua utilizada para la irrigación que junto a los datos de extracción de agua del sector minero fueron considerados como factores antropogénicos.

### 4.1. Estimación de SWE

SWE es la cantidad de agua líquida contenida en la nieve, por lo tanto, su estimación depende del

volumen y densidad de la cobertura de nieve. Los píxeles de MOD10a2 categorizados como nieve fueron convertidos a unidades de área y multiplicados por la profundidad mínima y máxima estimada en el trabajo de Jara *et al.* (2021) (0,1 y 2,1 m). Con respecto a la densidad, se consideraron los valores mínimo y máximo de densidad de la nieve, los cuales son 350 y 800 kg/m<sup>3</sup> para la nieve fresca y húmeda, respectivamente. De esta manera se obtuvieron dos escenarios posibles de SWE considerando los valores extremos de la profundidad y la densidad. Según Jara *et al.* (2021), cerca del 70% de la nieve acumulada se pierde por efectos de la sublimación superficial y por el viento. Por lo tanto, consideramos solo el 30% de SWE como agua disponible para la recarga de la cuenca.

### 4.2. Obtención de la cantidad de agua utilizada para la irrigación

La estimación de la cantidad de agua utilizada para la irrigación se obtuvo a partir de los cambios en la superficie de cultivos desde las temporadas 2001/02 a 2021/22. Estos cambios fueron estimados desde imágenes de NDVI de la colección de Landsat procesadas en GEE (Tabla 1). Una vez seleccionada las imágenes, estas se sometieron a un filtro para contar los píxeles que representan superficie de cultivos. Para diferenciar estas superficies con aquellas libres de vegetación, se determinó un umbral de NDVI igual a 0,2 con aquellos píxeles con valores igual o mayor a este umbral categorizados como cultivos. La selección del umbral para determinar la superficie de cultivo se basa en las definiciones proporcionadas por

la USGS (<https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/ndvi-foundation-remote-sensing-phenology>). Una vez obtenida las áreas de cultivos para cada temporada, estas fueron divididas por tres tipos de cultivos predominantes en el área de estudio: uva de mesa, olivo y hortalizas. La proporción de superficie por tipo de cultivo fue obtenida a partir de un estudio de la DGA en 2010 (DICTUC, 2010) (Tabla 3). Luego, a cada cultivo fue asignado un intervalo de riego siguiendo los datos del informe de la Universidad de Chile en 2016 (Bennison *et al.*, 2016) cuyas estimaciones tienen valores mínimos y máximos de riego (Tabla 3).

**Tabla 3.** Proporción de la superficie agrícola por tipo de cultivo (DICTUC, 2010) y estimación de agua para riego por cultivo en la cuenca del río Copiapó (Bennison *et al.*, 2016). Para este trabajo, el riego de tomate fue considerado como la cantidad de agua utilizada para el riego de hortalizas. Unidades de riego [ $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ]  $\times 1000$ .

Tipo de cultivo	Porcentaje de superficie	Riego
Uva de mesa	70,6%	11 -15
Olivo	10,1%	7 - 9
Tomate	9,7%	9

### 4.3. Estimación de ETr

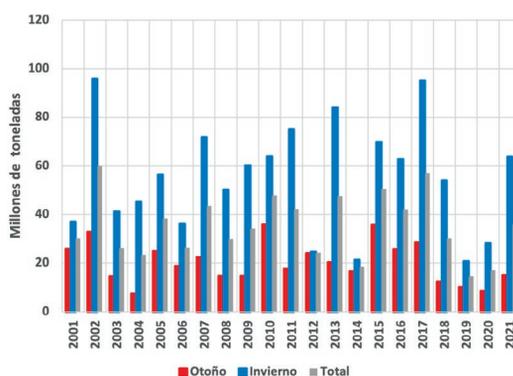
Los valores de ETr de MOD16a2 son obtenidos y procesados desde GEE. Los flujos de agua superficial (que pueden tener influencia en la tasa de evapotranspiración) proveniente del derretimiento de la nieve acumulada durante los meses de otoño e invierno tienen su máximo caudal en los meses posteriores a su acumulación (Houston, 2006b). Por lo tanto, con el objetivo de evaluar la relación con SWE, la estimación de ETr para cada temporada fue considerando los datos obtenidos dentro de un año comenzando desde el 01 de septiembre hasta el 31 de agosto posterior a los meses de otoño e invierno cuando ocurrió la acumulación de nieve que originó estos flujos. Luego, mediante funciones de GEE la colección de imágenes MOD16a2 de la temporada fue reducida a una sola imagen, obteniendo la suma de ETr para cada pixel. Finalmente, los píxeles que contiene esta imagen fueron sumados para obtener el total absoluto de ETr de toda la superficie. La suma total de ETr corresponde a la cantidad de agua líquida total perdida por los procesos evapotranspirativos en cada temporada entre 2001/02 y 2021/22.

### 4.4. Análisis estadístico de las series de tiempo

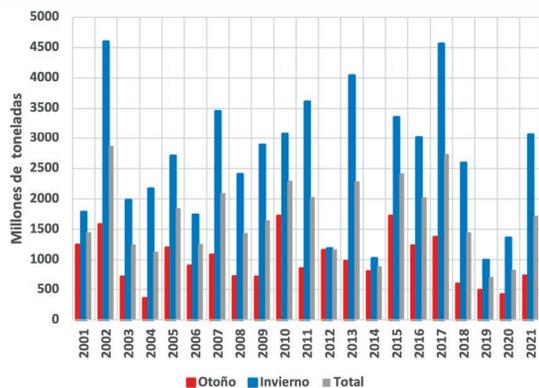
Con los datos obtenidos de ETr, SWE, la cantidad de agua para la irrigación y minería, se crearon series de datos de valores estimativos de agua en unidades de toneladas para cada temporada entre 2001/02 y 2021/22. Para cada serie se estimaron su tasa de cambio aplicando el estimador de tendencia lineal de Theil-Sen (Sen, 1968) y se evaluó la significancia estadística de estas tendencias utilizando el análisis no paramétrico de Mann-Kendall (Hamed y Rao, 1998). Posteriormente, se analizó la relación lineal entre los valores anuales de agua de ETr y las variables climáticas y antrópicas, aplicando el coeficiente de correlación de Spearman.

### 5. Resultados

Las figuras 4 y 5 muestran los valores extremos (mínimo y máximo) estimados de SWE para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) del periodo 2001/02-2021/22 en unidades de millones de toneladas (Mton). La variabilidad de SWE total muestra una tendencia decreciente no significativa ( $p > 0,05$ ). Por estaciones, las series muestran distintas tendencias, mientras en otoño se observa una tendencia decreciente, en invierno se muestra una tendencia levemente creciente. Sin embargo, estas tendencias no son estadísticamente significativas.

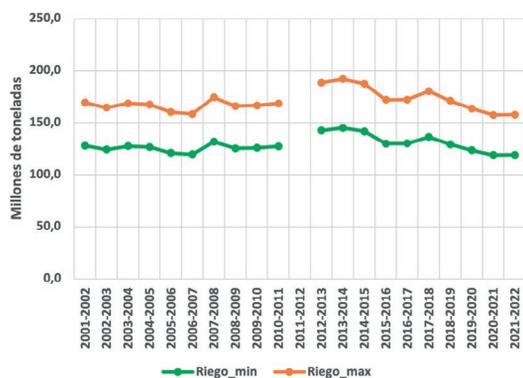


**Figura 4.** SWE mínimo estimado para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) entre 2001-2021. Las estimaciones se realizaron considerando el área promedio de la cobertura de nieve ocurrida durante la estación para las series de otoño e invierno, y el área promedio de la cobertura de nieve durante el otoño e invierno para la serie total. Mientras que se utilizaron los valores mínimos de altura y densidad de la nieve obteniendo los valores mínimos de SWE.



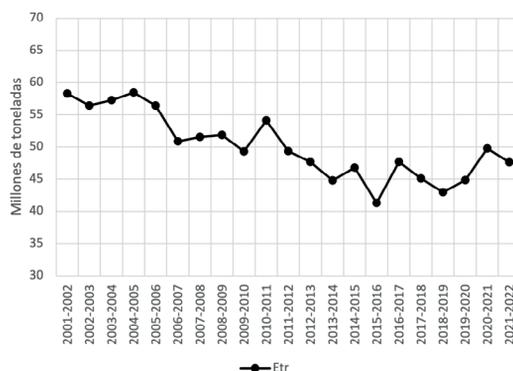
**Figura 5.** SWE máximo estimado para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) entre 2001-2021. Las estimaciones se realizaron considerando el área promedio de la cobertura de nieve ocurrida durante la estación para las series de otoño e invierno, y el área promedio de la cobertura de nieve durante el otoño e invierno para la serie total. Mientras que se utilizaron los valores máximos de altura y densidad de la nieve obteniendo los valores máximos de SWE.

Con respecto a la irrigación, la variabilidad de la cantidad de agua utilizada para los cultivos muestra una tendencia decreciente estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) en el periodo 2012/13 y 2021/22 (Figura 6). La Figura 7 muestra la



**Figura 6.** Irrigación total anual en el periodo 2002-2022. Para la estimación de la irrigación fueron considerados los cambios superficiales de los cultivos capturados desde imágenes de Landsat. La proporción de tipos de cultivos y la cantidad de agua utilizada para cada cultivo fue obtenido desde DICTUC (2010) y del Informe “Eficiencia Hídrica en la Región de Atacama” de la Universidad de Chile (2016). Se asume una proporción y cantidad de riego constante durante el periodo de estudio. La serie no contiene datos del año 2012 debido a que no hay imágenes de Landsat-5 y Landsat-8 para ese periodo y Landsat-7 presentaba problemas en sus productos.

cantidad de agua evapotranspirada por temporada entre 2001/02 y 2021/22. La estimación de ETr total muestra una tendencia decreciente estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ), con una tasa de disminución de 0,7 Mton de agua por año. No obstante, desde la temporada 2016/17 se muestra una tendencia levemente creciente (0,5 Mton por año) sin significancia estadística ( $p > 0,05$ ).



**Figura 7.** Evapotranspiración real anual para el periodo entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. La estimación anual se inicia en el mes de septiembre hasta agosto del año siguiente. Cada valor corresponde a la suma total de agua evapotranspirada de toda la superficie cubierta de vegetación.

La Tabla 4 muestra los resultados de la evaluación de correlación de Spearman entre ETr y las variables climáticas (SWE otoño, invierno y total) y antropogénicas (uso de agua para irrigación y sector minero). La correlación más alta se dio entre ETr y la cantidad de agua extraída para uso del sector minero, con un valor de -0,52. Igualmente, la correlación entre ETr y la irrigación es negativa, aunque de menor magnitud (-0,35). Por otro lado, la correlación entre ETr y SWE (otoño, invierno y total) fue baja, con valores de 0,01, -0,08 y -0,08, respectivamente.

**Tabla 4.** Estimación de correlación de Spearman.

Correlación	
ETr vs. SWE Otoño	0,01
ETr vs. SWE Invierno	-0,08
ETr vs. SWE Total	-0,08
ETr vs. Irrigación	-0,35
ETr vs. Minería	-0,52

## 6. Discusión

La tasa de disminución de agua total evapotranspirada fue de 1,1 Mton/año bajando desde un máximo de 58,5 Mton en la temporada 2004/05 hasta un mínimo de 41,3 Mton en 2015/16. Posteriormente, hay un cambio de tendencia en la variabilidad de ETr interrumpiendo su disminución entre las temporadas 2016/17 y 2021/22 (Figura 7). En ambientes áridos, la tasa de ETr se convierte en una variable importante en el balance hídrico (Castro y Gironás, 2021). En efecto, en la CRC los valores de ETr (Figura 2) supera notablemente la tasa de precipitación media anual (28 mm). Esto implicaría que el agua proviene también de otras fuentes naturales, como la evapotranspiración de capas subsuperficiales. Trabajos como Johnson *et al.* (2010) demuestran que, en ambientes áridos, la tasa de evaporación de agua en capas subsuperficiales está fuertemente controlada por la profundidad del nivel freático. Si bien factores como los cambios en el uso de suelo para cultivos o en la eficiencia en la irrigación pueden cumplir un rol importante en la tasa de ETr, el descenso del nivel freático y del almacenamiento de agua subterránea evidenciado en el área de estudio (e.g. HIDROMAS CEF, 2013; Rinaudo y Donoso, 2019), podría también ser responsable de la disminución de ETr observada en los resultados de este trabajo.

### 6.1. ETr y forzante climático

La variabilidad anual de SWE total y estacional no muestran tendencias decrecientes significativas ( $p > 0,05$ ) durante el periodo 2001/02 – 2021/22, mostrando incluso un leve aumento durante el invierno. Si bien la Mega Sequía ha estado afectando en la zona central del país (Garreaud *et al.*, 2020), generando una disminución en la extensión y duración de la cobertura de nieve (Malmros *et al.*, 2018; Saavedra *et al.*, 2018), nuestros resultados indican que sus efectos no alcanzan zonas tan al norte como en la CRC, al menos de manera significativa como para provocar una reducción de la oferta de agua líquida.

### 6.2. ETr y forzante antrópico

El análisis de correlación muestra una relación lineal negativa y débil entre ETr y la irrigación

(-0,35) ( $p < 0,05$ ). El sector agrícola es el principal demandante de agua en la CRC. Según Donoso *et al.* (2020), los derechos de agua subterránea para la agricultura representan el 73% del total del consumo. Hasta el 2015, la superficie de cultivos había crecido hasta alcanzar cerca de 15000 ha (Rinaudo y Donoso, 2019), mientras que entre el 2001 y 2007 el uso de agua para irrigación no tuvo grandes cambios (HÍDRICA Consultores SPA, 2018). Lamentablemente, no hay mucha información respecto al uso de agua y superficie de cultivos para los siguientes años. Nuestros resultados muestran que a partir de la temporada 2012/13 hay una tendencia decreciente significativa en la tasa de irrigación (Figura 6). Considerando que la irrigación y su eficiencia son un factor determinante en la tasa de ETr, es probable que estos cambios de tendencia pueden explicar la correlación negativa entre ambas variables. Sin embargo, la estimación de los cambios superficiales de cultivos aplicando un umbral de NDVI (0,2) no es completamente robusto, ya que la clasificación de la superficie de cultivos depende de las características de la vegetación, y su capacidad para discriminar entre cultivos y vegetación natural puede ser desafiante. Por lo tanto, esta metodología no tiene en cuenta posibles cambios espaciales de cultivos de manera precisa, lo que puede introducir cierta incertidumbre en nuestras conclusiones.

Por otro lado, la relación entre ETr y los cambios en la extracción de agua para uso de la minería muestra una correlación negativa mayor (-0,52) ( $p < 0,05$ ). La minería es el segundo mayor consumidor de agua en la cuenca del río Copiapó, alcanzando el 12% de los derechos de agua subterránea (Donoso *et al.*, 2020) por lo que su extracción excesiva puede afectar a los reservorios. Estudios anteriores han demostrado una constante disminución de agua subterránea y un descenso en los niveles freáticos como consecuencia de una extracción que excede la recarga natural (HIDROMAS CEF, 2013; Rinaudo y Donoso, 2019). Si bien los resultados de ETr en este trabajo indicarían una reducción de agua en la superficie, esto puede estar influenciado por el descenso de los niveles freáticos ocasionado por la extracción excesiva de agua. Es importante mencionar que la serie temporal de datos de extracción de agua abarca solo hasta el año 2017 (HÍDRICA Consultores, 2018), lo que implica que nuestro análisis no cubre todo el periodo estudiado. Esta

restricción temporal puede afectar la integridad de nuestras conclusiones, ya que no contamos con información completa para evaluar los posibles cambios y tendencias en la extracción de agua de la minería durante el periodo completo de estudio.

Desde el 2013, las principales compañías mineras comenzaron a reemplazar pozos de agua subterránea por agua desalinizada. Primero fue la Mina Candelaria en el año 2013 y luego CAP, la segunda mayor compañía minera, adoptando la misma medida en 2014 (Rinaudo y Donoso, 2019). Esto también es observado en los datos de extracción de agua subterránea del informe de HÍDRICA Consultores SPA (2018) (Tabla 2), mostrando una disminución a partir del año 2013. Según sus datos de extracción, a partir de ese año hay una estabilización en la cantidad de agua extraída y esto podría estar generando efectos en el agua subterránea. Si bien encontramos una fuerte correlación entre ETr y la extracción de agua del sector minero, no es suficiente para encontrar alguna causalidad. Una actualización respecto al estado de los niveles de agua subterránea podría entregar más información al respecto.

## 7. Conclusión

Este trabajo ha analizado las implicancias de los factores climáticos y antropogénicos en la reducción de agua en la cuenca del río Copiapó entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. Utilizando productos satelitales, estimamos cambios de SWE, ETr e irrigación permitiendo identificar patrones en sus tendencias durante el periodo analizado. Los datos de SWE son considerados para evaluar el comportamiento de las variables climáticas, mientras que los datos de estimativos de irrigación y de extracción de agua para uso en minería son examinados como variables antropogénicas. La estimación de ETr permite estimar la tasa de cambio en la reducción de agua dentro del área de estudio. La serie de tiempo de ETr muestra que la reducción de agua fue significativa hasta la temporada 2015/16. A través de un análisis de correlación de Spearman se encontró una alta correlación negativa entre ETr y la extracción de agua para uso en minería (-0,52) y en menor medida con los cambios en el uso de agua para la irrigación (-0,35). Mientras que no se identificó correlación importante con SWE estacional o total. El cese de la reducción de agua evidenciada

con los datos de ETr (posterior a la temporada 2015/16) coincide con el inicio del reemplazo de pozos de agua subterránea por el uso de agua desalinizada en las compañías mineras y con una disminución en las áreas de superficie de cultivos irrigadas. Esto demuestra una posible influencia de los forzantes antropogénicos en la reducción de agua. Sin embargo, la escasez de datos de extracción de agua para minería y agricultura hace difícil encontrar una relación directa con la reducción de agua evidenciada en la superficie. Un mayor monitoreo en la extracción de agua podría ayudar a identificar los efectos que estas acciones generan en la disponibilidad de agua. Los resultados de este trabajo proporcionan nuevos datos sobre los principales factores que podrían estar afectando la disponibilidad de agua en el área de estudio. Con el objeto de una gestión sostenible de los recursos hídricos, es imperativo que se actualice el monitoreo de la extracción de agua por parte de los sectores agrícola y minero.

## Referencias

- Anderson, M.C., Allen, R.G., Morse, A., Kustas, W.P. 2012. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>
- Bennison, G., von Igel, W., Haque, N., Román, E., Claro, E. 2016. *Eficiencia hídrica en la Región de Atacama: Evaluación de brechas identificadas a la luz de la experiencia internacional*. Santiago, CSIRO Chile. [https://research.csiro.au/gestion-copiapu/wp-content/uploads/sites/216/2018/01/039-Informe-Final-22-04-2016\\_COMPLETO\\_2.0.pdf](https://research.csiro.au/gestion-copiapu/wp-content/uploads/sites/216/2018/01/039-Informe-Final-22-04-2016_COMPLETO_2.0.pdf)
- Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R.D., Muñoz, F. 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Burger, F., Brock, B., Montecinos, A. 2018. Seasonal and elevational contrasts in temperature trends in Central Chile between 1979 and 2015. *Global and Planetary Change*, 162, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.005>
- Castro, L., Gironás, J. 2021. Precipitation, Temperature and Evaporation. In B. Fernández J. Gironás (Eds.), *Water Resources of Chile*, 8, 31–60. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_3)

- COCHILCO. 2018. *Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2014 -2023*.
- CR2. 2015. *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. [https://www.uchile.cl/documentos/espanol\\_55984\\_10\\_5251.pdf](https://www.uchile.cl/documentos/espanol_55984_10_5251.pdf).
- DGA. 2004. *Cuenca del Río Copiapó*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Copiapó.pdf>
- División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental - DICTUC. 2010. *Análisis integrado de gestión en cuenca del Río Copiapó*. <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/5287>
- Donoso, G. 2021. Management of Water Resources in Agriculture in Chile and its Challenges. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 48(3), 171–185. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2328>
- Donoso, G., Lictévout, E., Rinaudo, J.-D. 2020. Groundwater Management Lessons from Chile. In *Sustainable Groundwater Management: A Comparative Analysis of French and Australian Policies and Implications to Other Countries* (pp. 481–511). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_25)
- Fernández, B., Gironás J. 2021. Water Resources of Chile, *World Water Resources*, 8, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_2)
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D. 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gascoin, S., Lhermitte, S., Kinnard, C., Bortels, K., Liston, G.E. 2013. Wind effects on snow cover in Pascua-Lama, Dry Andes of Chile. *Advances in Water Resources*, 55, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.11.013>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hamed, K.H., Rao, A.R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. In *Journal of Hydrology*, 204. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hernández-López, M.F., Braud, I., Gironás, J., Suárez, F., Muñoz, J.F. 2016. Modelling evaporation processes in soils from the Huasco salt flat basin, Chile. *Hydrological Processes*, 30(25), 4704–4719. <https://doi.org/10.1002/hyp.10987>
- HÍDRICA Consultores SPA. 2018. *Herramientas de Gestión y Actualización de Los Modelos Numéricos del Acuífero de Copiapó*.
- HIDROMAS CEF. 2013. *Actualización de la demanda hídrica de Copiapó*. <https://www.repositoriodirplan.cl/handle/20.500.12140/25814>
- Houston, J. 2006. Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2181–2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>
- INE. 2017. *Resultados CENSO 2017 por país, regiones y comunas*. <http://resultados.censo2017.cl/>
- Jara, F., Lagos-Zúñiga, M., Fuster, R., Mattar, C., McPhee, J. 2021. Snow processes and climate sensitivity in an Arid Mountain Region, Northern Chile. *Atmosphere*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/atmos12040520>
- Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C., Muñoz, J. 2010. Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4), 624–635. <https://doi.org/10.1080/02626661003780458>
- Juliá, C., Montecinos, S., Maldonado, A. 2008. Características Climáticas de la Región de Atacama. In F.A. Squeo, G. Arancio, J.R. Gutierrez (Eds.), *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*, 3, 25–42. [http://www.observatoriocaldera.cl/territorio/590/articles-64753\\_documento.pdf](http://www.observatoriocaldera.cl/territorio/590/articles-64753_documento.pdf)
- Malmros, J.K., Mernild, S.H., Wilson, R., Tagesson, T., Fensholt, R. 2018. Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072>
- Meza, F.J. 2013. Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate Extremes*, 1, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.07.002>
- Montecino, H.C., Staub, G., Ferreira, V.G., Parra, L.B. 2016. Monitoring groundwater storage in northern Chile based on satellite observations and data simulation. *Boletim de Ciências Geodesicas*, 22(1), 1–15. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000100001>
- Oyarzún, J., Oyarzún, R. 2011. Sustainable development threats, inter-sector conflicts and environmental policy requirements in the arid, mining rich, Northern Chile territory. *Sustainable Development*, 19(4), 263–274. <https://doi.org/10.1002/sd.441>

- Partarrieu, U., Parra, A., Peña, C., Ferrada, F.K., Sepúlveda, A. V., Valenzuela, D.P., Vergara, S. 2009. *Plan de Gestión para la Cuenca del Copiapó* [Management plan for the Copiapó Basin] (Report ADM 5374).
- Réveillet, M., MacDonell, S., Gascoin, S., Kinnard, C., Lhermitte, S., Schaffer, N. 2020. Impact of forcing on sublimation simulations for a high mountain catchment in the semiarid Andes. *Cryosphere*, 14(1), 147–163. <https://doi.org/10.5194/tc-14-147-2020>
- Riggs, G.A., Hall, D.K. 2015. *MODIS Snow Products Collection 6 User Guide*.
- Rinaudo, J.D., Donoso, G. 2019. State, market or community failure? Untangling the determinants of groundwater depletion in Copiapó (Chile). *International Journal of Water Resources Development*, 35(2), 283–304. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1417116>
- Ruiz Pereira, S.F., Veetil, B.K. 2019. Glacier decline in the Central Andes (33°S): Context and magnitude from satellite and historical data. *Journal of South American Earth Sciences*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102249>
- Saavedra, F.A., Kampf, S.K., Fassnacht, S.R., Sibold, J.S. 2018. Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000-2016. *Cryosphere*, 12(3), 1027–1046. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018>
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Suárez, F., Muñoz, J.F., Fernández, B., Dorsaz, J.M., Hunter, C.K., Karavitis, C.A., Gironás, J. 2014. Integrated water resource management and energy requirements for water supply in the Copiapó River basin, Chile. *Water (Switzerland)*, 6(9), 2590–2613. <https://doi.org/10.3390/w6092590>
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J.B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., Helwig, B. 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519(PC), 2538–2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>