

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**TENDENCIA EN LA COBERTURA ESPACIAL DE LA NIEVE Y LA LÍNEA DE NIEVE
EN UNA CUENCA ANDINA UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES.
CUENCA PILOTO EMBALSE EL YESO.**

**DIEGO MEDINA C.^{1,2}, LINA CASTRO^{1,2}, TOMÁS R. BOLAÑO ORTIZ¹, FLORENCIA
RUGGERI¹, XIMENA FADIC¹, TAMARA GORENA HERNÁNDEZ¹, VÍCTOR VIDAL¹,
RAÚL FLORES^{1,2}, FRANCISCO CERECEDA-BALIC^{1,3}**

RESUMEN

La nieve y su cobertura es una de las variables climatológicas más importantes para países como Chile y Argentina, debido a que con su derretimiento aportan grandes volúmenes de agua a los ríos del país, agua que posterior y principalmente es utilizada en agricultura. A pesar de aportar grandes volúmenes de agua, la cantidad y durabilidad de la nieve se ha visto disminuida por diversos factores, entre los cuales podemos encontrar la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura. Este trabajo estimó la tendencia en la persistencia de la nieve (SP) en la Cuenca Embalse El Yeso para el periodo hidrológica 2000-2019 aplicando la prueba no paramétrica de Mann Kendall y el estimador de Theil Sen, encontrando tendencias negativas significativas en gran parte de ella. Por otro lado, se correlacionó las forzantes meteorológicas de precipitación y temperatura de manera lineal y múltiple con el SP, encontrando que dichas variables predicen en distintos grados el índice de persistencia de la nieve, donde la precipitación tomó mayor relevancia.

¹ Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM), Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

³ Departamento de Química, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

1. INTRODUCCIÓN

La nieve corresponde a precipitaciones en forma de pequeños cristales de hielo, provenientes del vapor de agua condensada. La nieve cubre gran porcentaje de la cordillera de Los Andes tanto en Chile como Argentina, principalmente durante el periodo estacional de invierno. Chile utiliza estos volúmenes de agua aportados por el derretimiento de la nieve y el deshielo de los glaciares para la agricultura, electricidad y agua potable. La mega sequía que afecta a Chile desde el año 2010 (R. D. Garreaud et al., 2020) ha traído consigo bajas precipitaciones y aumento de temperatura, lo que ha afectado la cobertura de la nieve según Saavedra et al. (2018).

El objetivo del presente estudio es estimar y cuantificar la tendencia temporal en la cobertura de la nieve mediante el índice de persistencia de la nieve (SP) (Saavedra et al., 2017) que corresponde a la fracción de cobertura de nieve en el año, utilizando los estimadores no paramétricos de Mann Kendall y Theil Sen para los periodos hidrológicos 2000-2019 en la cuenca Embalse El Yeso. Por otro lado, busca correlacionar de manera lineal y múltiple las forzantes meteorológicas de precipitación y temperatura con SP. Los análisis del estudio se hicieron de manera espacial y temporal, para el cual el SP se calculó para pixeles de 500 por 500 metros entregados por el producto MODIS del satélite Terra. La metodología planteada, corresponde a una metodología similar a la planteada por Saavedra et al. (2018), diferenciando algunas obtenciones de datos como precipitación y temperatura, además de análisis en la línea de nieve.

2. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca Embalse El Yeso es una subcuenca de la cuenca del Río Maipo ubicada en los 33°S 70°W situada administrativamente en la región Metropolitana de Chile (Figura 1). Cuenta con un área de 350 [km²] y un rango de elevaciones entre los 2500-6000 [m]. El Yeso presente un clima mediterráneo, de régimen nival, en el cual los veranos son cálidos y secos, mientras que en invierno es frío. Durante los últimos 20 años se han registrado en la cuenca temperaturas medias anuales de 9 [°C] y precipitaciones acumuladas promedio anual de 620 [mm] aproximadamente. La cuenca cuenta además con el Embalse El Yeso ubicado en la zona baja de esta, el cual cubre un área de 8.7 [km²], además de variados glaciares ubicados en la zona norte y sur de la cuenca, en los que se encuentran los glaciares Bello, Yeso y Pirámide, entre otros, en elevaciones por sobre los 4000 [m].

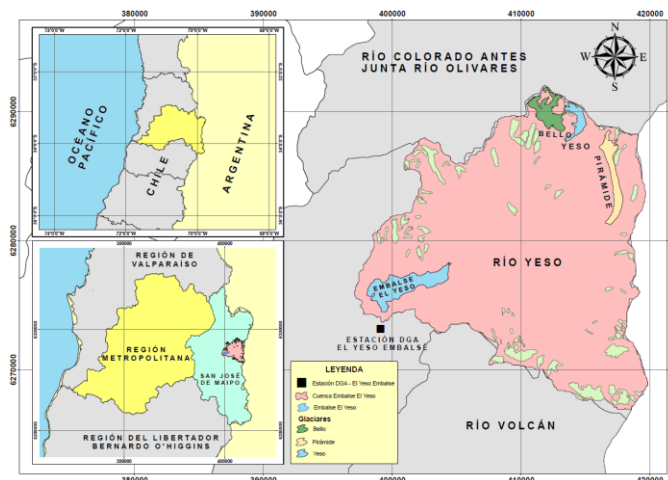


Figura 1. Mapa de la zona de estudio, Cuenca Embalse el Yeso.

3. METODOLOGÍA

Datos

El producto satelital empleado fue el MOD10A2 V.6, máxima cobertura de nieve en intervalos de 8 días en píxeles de 500 [m]. MODIS es un Espectrorradiómetro de 36 bandas espectrales a bordo de los satélites Terra y Aqua (Hall et al., 2002). Se utilizó el producto de cobertura máxima de nieve y mínima cobertura de nubes en intervalos de 8 días. El área de estudio quedó cubierta por una sola imagen satelital, de la cual se descargaron productos para los periodos hidrológicos 2000-2019, sumando un total de 920 archivos MODIS.

Se utilizó la precipitación mensual y la precipitación acumulada anual por cada año hidrológico del periodo de estudio. Además, se utilizó la temperatura media mensual y la temperatura media anual. Los datos fueron obtenidos de la estación pluviométrica “El Yeso Embalse” desde el sitio web de la Dirección General de Aguas de Chile (DGA) (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/>)

La topografía del lugar se obtuvo del Modelo de Elevación Digital (DEM) desarrollado por la NASA la resolución espacial del DEM fue reducida de 90 a 500 metros utilizando remuestreo para coincidir este con la resolución espacial del producto MOD10A2.

Cuantificación de la persistencia de la nieve y la tendencia temporal

Para cuantificar la cobertura de la nieve, se utilizó el concepto de persistencia de la nieve (SP) empleado por Saavedra et al. (2017), el cual corresponde a la fracción de tiempo con presencia de nieve para cada año hidrológico en el periodo 2000-2019. Para ello, se calculó el SP para cada píxel de 500 por 500 metros mediante un código en el software R. Se encontraron aquellos píxeles donde el índice de cobertura de nubes (NDI) superaba el 30% para evitar la mala estimación de SP y se clasificó la cuenca según el porcentaje de SP obtenido para la mayor cantidad de píxeles. El concepto de SP y NDI se muestran en la ecuación 1 y 2 respectivamente.

$$SP = \frac{S}{n - ND} \cdot 100 \quad [1]$$

$$NDI = \frac{ND}{n} \cdot 100 \quad [2]$$

Donde SP corresponde a la persistencia de la nieve que varía entre 0 y 100%, S corresponde al número de intervalos de tiempo de 8 días donde el píxel se ha clasificado como nieve, n corresponde al total de periodo de 8 días por año, ND corresponde al número de intervalo de 8 días en que el píxel fue clasificado como sin dato (nube, saturación, pérdida de dato) y NDI corresponde al porcentaje de nubes detectado para el píxel en el año que varía entre 0 y 100% .

Posteriormente, se utilizaron los estadígrafos no paramétricos de Mann Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1955) para mostrar la significancia de la tendencia de SP estimada por cada celda a nivel anual, para posteriormente estimar la razón de cambio de la tendencia de SP mediante el estimador de Theil Sen (Theil, 1950; Sen, 1968). La estadística se realizó utilizando el paquete “modifiedmk” de R (Patakamuri et al., 2020), para el cual se considera tendencia significativa si el valor de p-value es menor o igual a 5%.

Para correlacionar la tendencia de SP con las forzantes meteorológicas, se realizó una correlación lineal entre SP y la precipitación acumulada anual y entre SP y la temperatura media anual. Se verificó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro Wilk en R y se correlacionó mediante el coeficiente de Spearman (r) debido a la no normalidad de los datos utilizando el comando “cor.test” del software estadístico. Por otro lado, se correlacionó la tendencia de SP de manera múltiple utilizando el paquete “relaimpo” de R (Groemping & Matthias, 2013) en donde las forzantes meteorológicas de precipitación acumulada anual y temperatura media anual predicen el valor del SP. Se obtuvo el coeficiente de determinación (r^2) y se calculó la importancia relativa, la cual determinó el porcentaje de incidencia de la precipitación y temperatura en r^2 según el enfoque Lindeman, Merenga y Gold (LMG) (Grömping, 2006).

Respecto a la línea de nieve, se realizó un análisis por cada imagen satelital de cada año, en donde se obtuvo la mínima elevación en que se detectó nieve, en la cual se verificaron píxeles aledaños en donde se encontrase la mínima elevación para asegurar que la detección satelital era correcta. Además, se aplicaron los estadígrafos antes mencionados a la serie de promedios anuales de la línea de nieve.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cuenca Embalse El Yeso presenta valores de SP promedio entre 25% y 100% (Figura 2) para el periodo hidrológico 2000-2019, siendo mayor la SP a medida que se incrementa la elevación. La cuenca se divide en tres zonas, zona de nieve intermitente ($7\% \leq SP < 30\%$), zona de nieve estacional ($30\% \leq SP < 90\%$) y zona de nieve permanente ($SP \geq 90\%$) en donde cada zona corresponde a 1% (3.5 km^2), 79% (276.5 km^2) y 20% (70 km^2) del área total de la cuenca respectivamente. La Figura 3 muestra la elevación media en bandas de 50 metros, en donde se obtuvo el promedio de SP para cada una de ellas. La zona de nieve estacional se definió cuando SP estuviese entre 30% y 90%, el cual se presentaba en el rango de elevaciones entre los 2500 y 4250 [m]. La relación elevación vs SP para el tramo estacional muestra una relación lineal entre ellas. En cambio, la zona de nieve permanente, definida cuando el $SP > 90\%$, se encuentra sobre los 4250 [m] sin tener una relación lineal y donde se ubican glaciares como Bello, Yeso y Pirámide. Por otro lado, se ignoró la zona de nieve intermitente debido a su bajo porcentaje de área total.

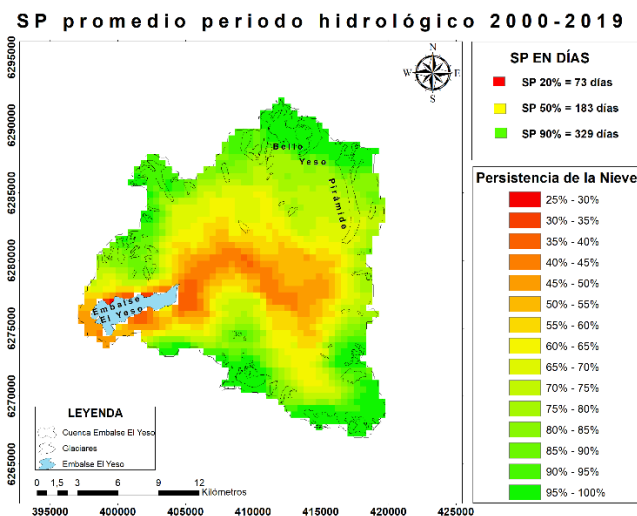


Figura 2. Mapa de SP promedio años hidrológicos 2000-2019.

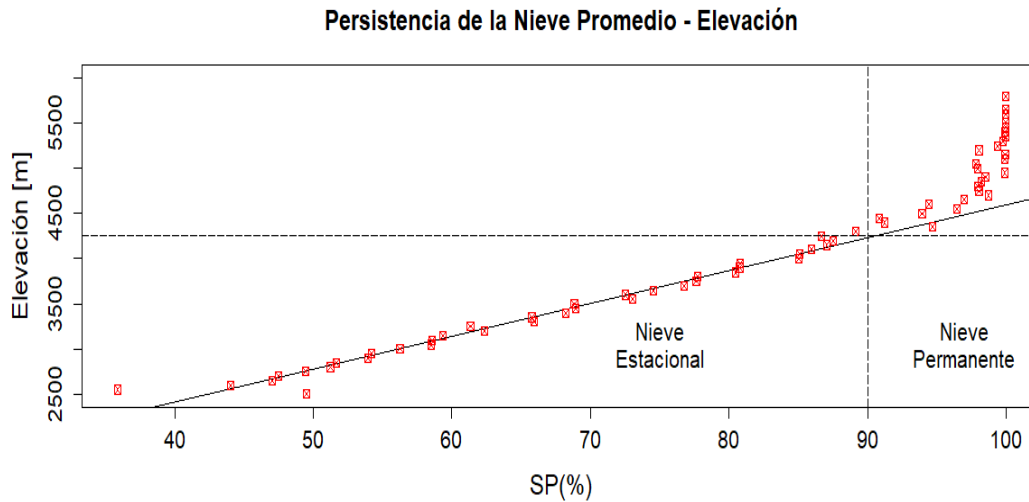


Figura 3. SP promedio años hidrológicos 2000-2019 en bandas de elevación de 50 metros, en donde se limita zona de nieve estacional y permanente, tanto en SP como en elevación.

Para evaluar la tendencia temporal en cada píxel y con ello tener una evaluación espacial de esa variación a nivel de cuenca, se aplicaron las pruebas de Mann Kendall (MK) y Theil Sen (TS) a cada uno de los píxeles para el periodo de tiempo hidrológico 2000-2019. Para ello, se emplearon los valores de SP por año por píxel y se aplicaron los estadígrafos antes mencionados. La Figura 4 se muestra la variación espacial de MK (Figura 4a.), la significancia de esa tendencia (Figura 4b.), el estimador de TS (Figura 4c.) y el estimador de TS normalizado (Figura 4d.). En la Figura 4a. es posible observar los valores del estadístico Z de MK variando entre -4.4 y 1.6, y mostrando que el 93% de la cuenca presenta una tendencia negativa, o una disminución del SP en el tiempo. El 88% del área total donde muestra significancia en esa disminución (Figura 4b), con tasas que variaban entre $-0.5\% \text{ año}^{-1}$ y $-1.75\% \text{ año}^{-1}$ para el 77% de la cuenca (Figura 4c.), lo que se traduce entre 2 a 6 días menos de nieve al año. La Figura 4d se muestra el estimador de Theil Sen Normalizado, figura en la cual se observa un comportamiento uniforme de la cuenca con una tasa de cambio aproximada de $-2\% \text{ año}^{-1}$ o 7 días menor de nieve por año.

Los resultados de la tendencia de SP han demostrado que la cobertura nival cubre la totalidad de la cuenca en el periodo invernal pero que a lo largo del tiempo la cantidad de días al año con nieve ha disminuido de manera significativa en más del 50% del área. Los valores encontrados, a pesar de que pertenecen a un corto periodo de estudio, son similares a los encontrados por autores como Saavedra et al. (2018) y Malmros et al. (2018) en el periodo 2000-2016. Saavedra et al. (2018) estimó que en los Andes bajo los 33°S el SP disminuye a una tasa de cambio entre -0.5% y -1.5% de SP, traduciéndose de 2 a 5 días menos de nieve al año, lo que es concordante por lo encontrado por el presente estudio. Malmros et al. (2018) encontró una gran concentración de cobertura de nieve utilizando el índice Snow Cover Extent (SCE) similar al SP. Su estudio demostró que el 74% de la cobertura de la zona centro del país se encuentra entre los 3250 y 4000 metros, lo cual también es coincidente con lo observado en la Figura 3. Adicionalmente, Malmros et al. (2018) también encontró una disminución de la cobertura de nieve para el periodo 2000-2016 de $0.35 [\% \text{ año}^{-1}]$, lo que significa entre 1 y 2 días menos de nieve al año, lo que se similar a lo encontrado por Saavedra et al. (2018) y este trabajo.

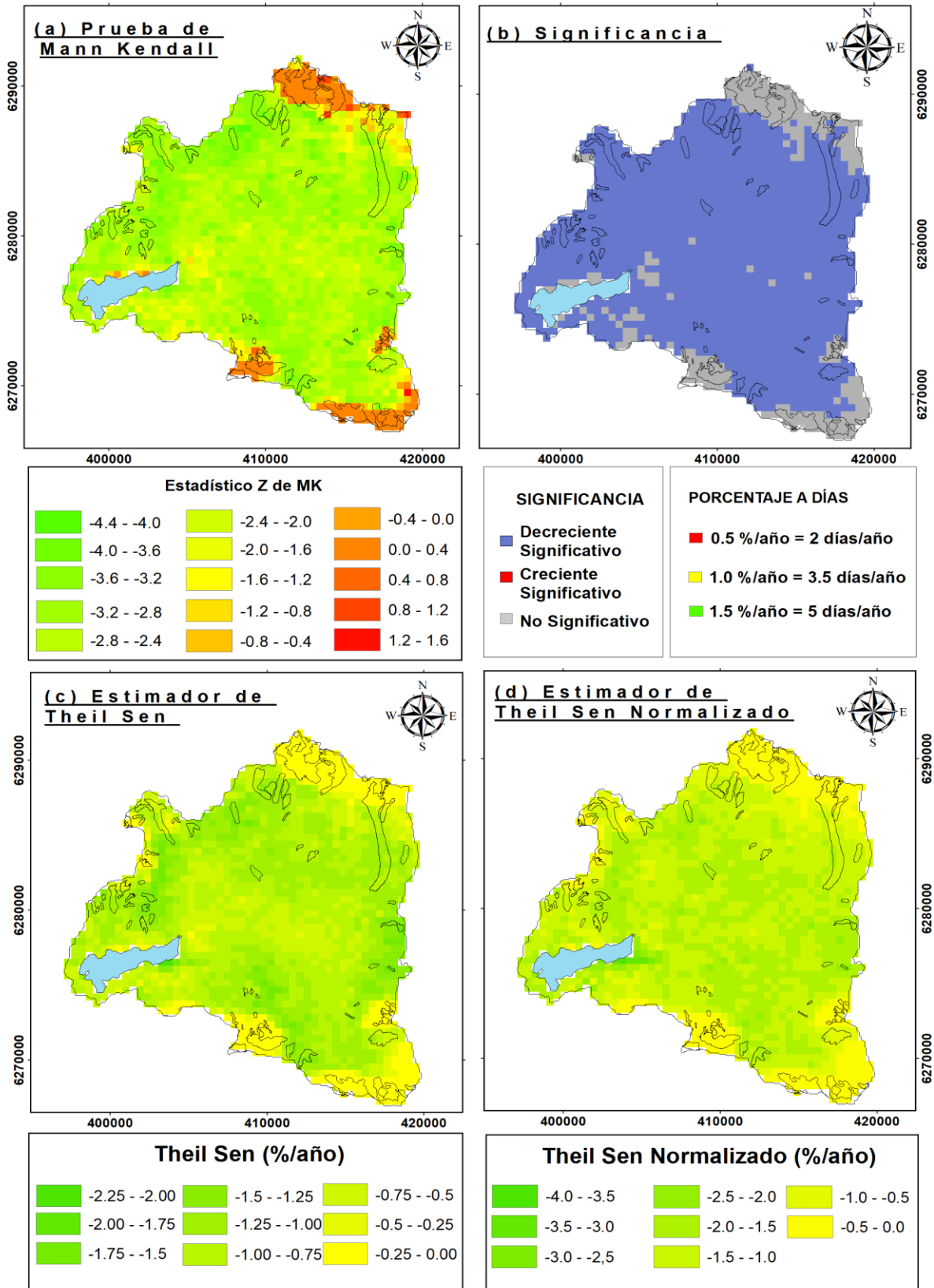


Figura 4. Resultados Estadísticos de (a) Mann Kendall, (b) Significancia de Mann Kendall, (c) Theil Sen, (d) Theil Sen Normalizado

Con relación a la conexión de las forzantes meteorológicas con SP, es necesario estudiar si existe tendencia en las variables, para lo cual también se empleó MK y TS a los registros de precipitación acumulada anual y la temperatura media anual para los periodos hidrológicos 2000-2019. La Figura 5 y 6 muestran la tendencia de la precipitación acumulada anual y la temperatura media anual respectivamente para la estación El Yeso Embalse, en donde se asumió uniformidad de estas forzantes en toda la cuenca. En la Figura 5 se observa la disminución de la precipitación acumulada, en donde el periodo de estudio presenta una tendencia negativa significativa con una razón de cambio de $-39.13 \text{ [mm año}^{-1}\text{]}$, es decir, 783 [mm] menos durante los últimos 20 años. Por su parte, la temperatura muestra una tendencia positiva no significativa durante el periodo de análisis (Figura 6), sin embargo, presenta una tasa de cambio de $0.056 \text{ [}^\circ\text{C año}^{-1}\text{]}$, lo que se traduce a 1.12 [°C] de aumento de temperatura desde el año 2000 hasta el 2019.

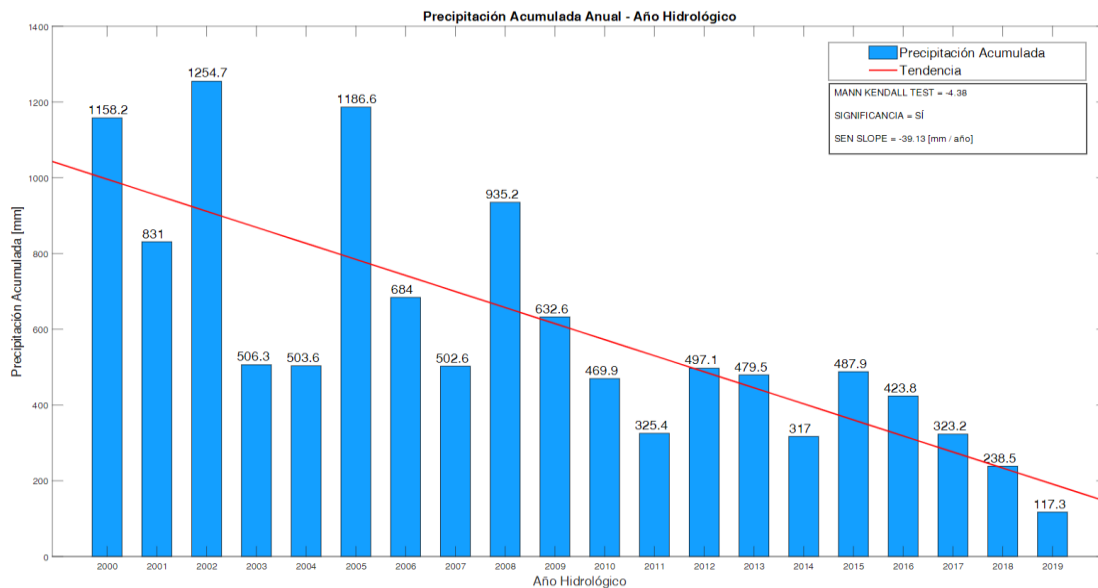


Figura 5. Histograma de Precipitación Acumulada Anual con Tendencia para periodo de estudio.

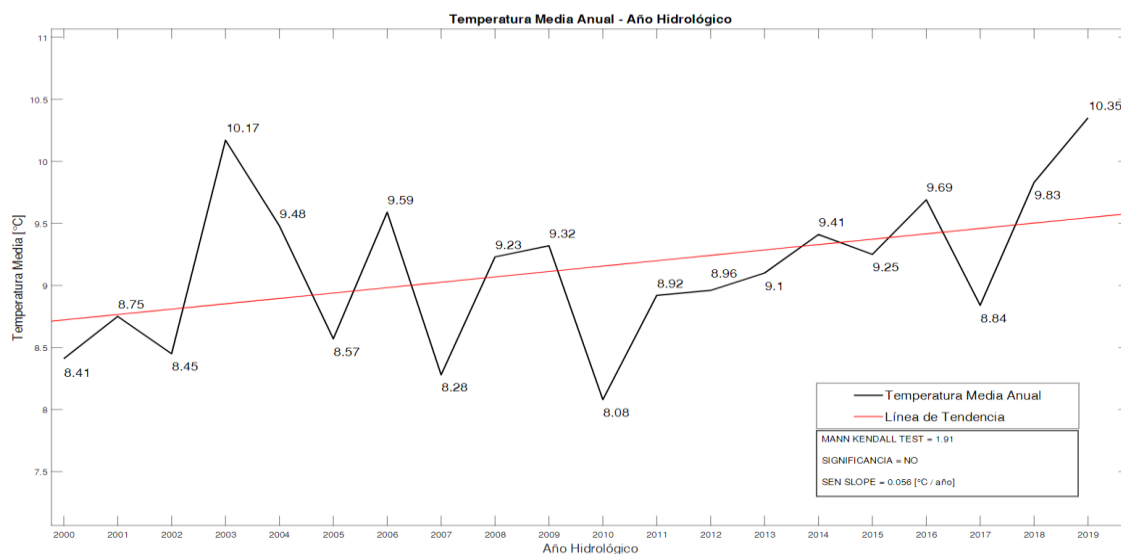


Figura 6. Temperatura Media Anual con Tendencia para periodo de estudio.

Con las tendencias observadas, es posible conectar dichas variables con el SP promedio mediante el análisis de correlación. Dado que las series no tienen una distribución normal se empleó el estadígrafo no paramétrico de correlación de Spearman. Como se esperaba, los resultados mostraron que la precipitación presenta una relación directa con la variación del SP, con valores moderados a altos entre 0.7-0.9 (Figura 7a). Por otro lado, la temperatura media anual se correlaciona de forma inversa con el SP con coeficientes de determinación bajos entre -0.15 y -0.4 (Figura 7b), implicando así que la variación de SP se relaciona en mayor medida con la presencia de precipitación y en una menor medida con la temperatura media anual. Cabe destacar que la correlación presenta significancia en toda la cuenca, excepto en zonas bajas y altas, correspondiente las cercanías del embalse el Yeso (2500 metros) y la zona de glaciares de la cuenca (>4000 metros) respectivamente. Por otro lado, la conexión del SP con las forzantes meteorológicas fue valorada a partir de una regresión lineal múltiple, entregando coeficientes de determinación en el rango de 0.5 a 0.7 (Figura 8) para elevaciones entre los 2500 y 4250 metros, mientras que elevaciones mayores no presentan una correlación significativa. La precipitación fue la que tuvo mayor importancia relativa, ya que aportó hasta en un 90% en el valor de r^2 (Figura 9a), en tanto, la temperatura aportó entre 10% y 20% al coeficiente de determinación (Figura 9b), sin embargo, la temperatura tomó mayor relevancia en los pixeles donde el SP era más grande.

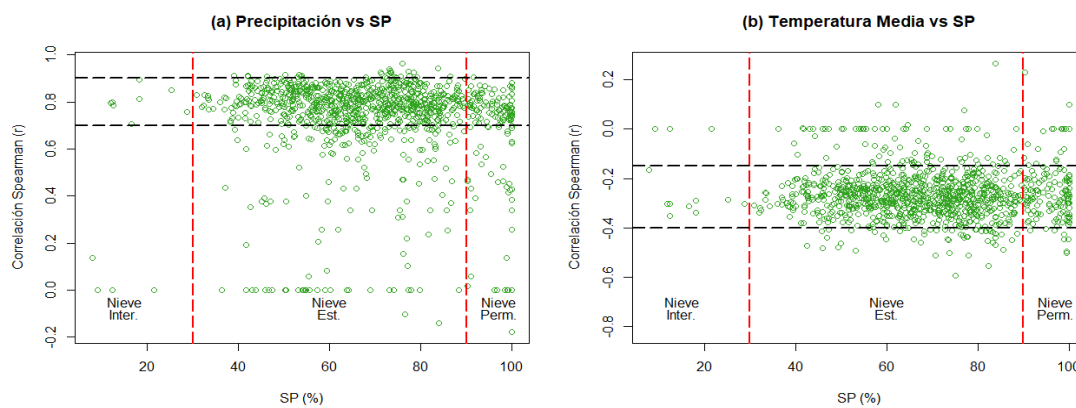


Figura 7. Correlación de Spearman respecto SP con (a) Precipitación, (b) Temperatura.

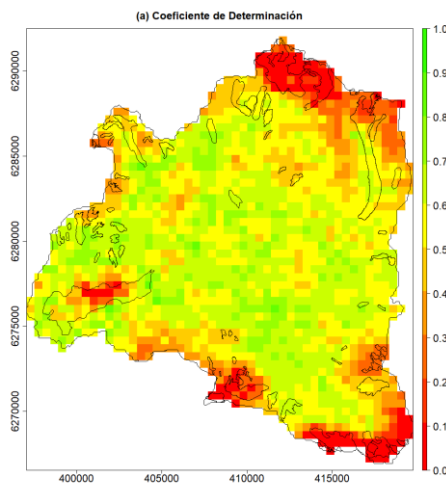


Figura 8. Coeficiente de Determinación (r^2) para regresión múltiple de SP con Precipitación y Temperatura como predictores. Se presenta escala de 0 a 1.

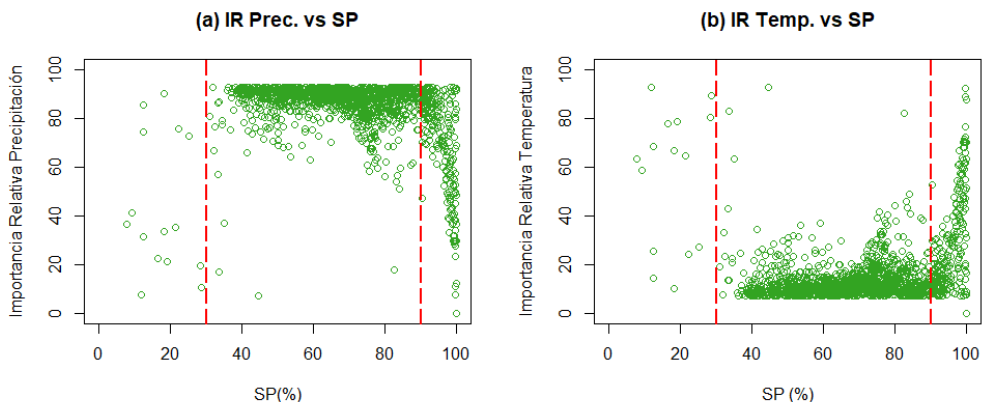


Figura 9. Dispersión del SP con importancia relativa de (a) Precipitación Media Anual (b) Temperatura Media Anual

Los resultados expuestos en las figuras anteriores muestran una disminución en la precipitación, un aumento para la temperatura media, una disminución del SP con altas correlaciones entre ellas. (R Garreaud, 2011) evaluó los cambios observados en Chile Central durante el siglo XX y proyectados al siglo XXI, con una tendencia significativa de $0.28 [^{\circ}\text{C} \text{ década}^{-1}]$ para la temperatura, y una no significativa para la precipitación en la estación del Embalse el Yeso, lo que difiere, en términos de significancia, de lo evaluado en el presente trabajo, pero que si coincide en orientación de esas tendencias. Lo anterior a lo mejor se debe al periodo empleado para realizar el análisis, (Garreaud, 2011) empleó el periodo 1980 y 2015, comparado con el periodo 2000-2019, donde desde el 2008 a la fecha, Chile ha evidenciado una disminución constante de la precipitación y un incremento de la temperatura. Autores como Saavedra et al. (2018) y Malmros et al. (2018) también encontraron la magnitud en la que se correlaciona la cobertura de la nieve con las forzantes meteorológicas. Los análisis de Saavedra et al. (2018) mostraron una correlación entre el cambio negativo del SP con la disminución de la precipitación y un aumento en la temperatura del aire, cuya magnitud a su vez cambia dependiendo de la latitud y elevación tal como se muestra en la Figura 7a y Figura 7b. Por su parte, Malmros et al. (2018) reveló una tendencia significativa en la precipitación de $-4 [\text{mm} \text{ año}^{-1}]$ y en la temperatura de $0.05 [^{\circ}\text{C} \text{ año}^{-1}]$, además de mostrar una correlación significativa entre la extensión de cobertura de nieve y el índice climático El Niño – Oscilación Sur (ENOS).

Tendencia en la Línea de Nieve.

Con relación a la línea de nieve, la elevación de la llamada “isoterma cero” se determinó asumiendo que esa elevación corresponde a la mínima observada con nieve en las imágenes MODIS. En la Figura 10 se muestra un diagrama de cajas con el conjunto de elevaciones mínimas con nieve por cada año hidrológico (Figura 10a) y la obtenida por periodo invernal Abril-Agosto (Figura 10b). En las figuras se puede observar que aproximadamente desde el año 2009 existe un aumento en la dispersión de la caja, implicando que la línea de nieve llega a elevaciones más altas y existe un mayor rango de variación en los datos. En la Figura 10b se ve una mediana casi invariante en el tiempo, lo que se traduce a que la cuenca durante el periodo invernal llega a la mínima elevación, es decir, la cuenca está cubierta completamente de nieve el 50% del tiempo. Con el valor promedio de la línea de nieve por año, se calcularon los estadísticos de MK y TS con el fin de definir si existe

algunas tendencias, su significancia y magnitud. Los resultados mostraron una tendencia positiva significativa con una pendiente de TS igual a 12.63 [m año⁻¹] según la Figura 11.

La Figura 10a y Figura 10b muestran puntos que sobresalen de los diagramas de caja o puntos espurios. Dichos puntos corresponden a elevaciones por encima de los 5000 m (R Garreaud, 2015) y que calzan con los glaciares de la zona. En Chile Central la línea de nieve durante los meses de invierno se deposita generalmente en elevaciones que rondan los 2400 m (R Garreaud, 2015), pero cuya tasa de cambio a lo largo de estos últimos 20 años ha cambiado, según nuestro estudio, en el orden de los 13 [m año⁻¹], valor similar al estimado por Saavedra et al. (2018), el cual encontró que la línea de nieve para los 33°S disminuía entre 10 a 30 metros al año.

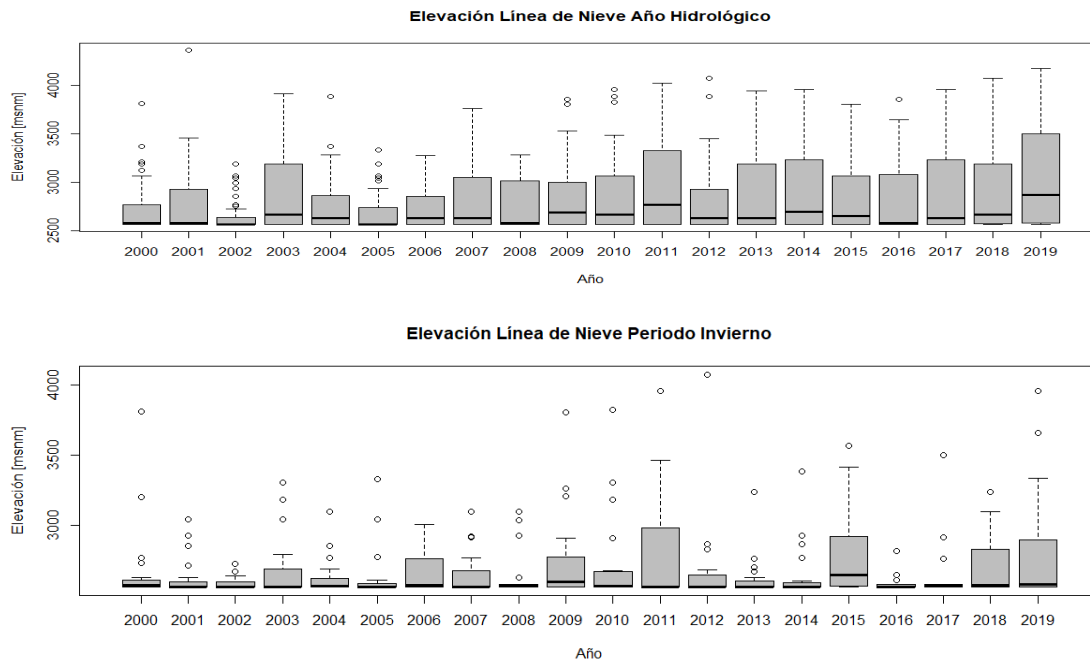


Figura 10.- Elevación de la línea de Nieve para (a) Año Hidrológico, (b) Periodo de Invierno.

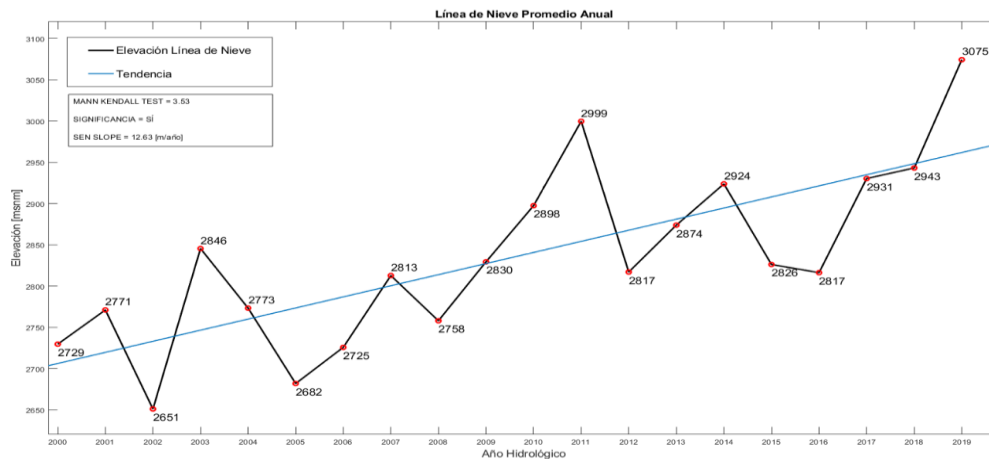


Figura 11.- Elevación Promedio Línea de Nieve por Año Hidrológico.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente artículo presenta el análisis para el periodo de estudio comprendido entre los años hidrológicos 2000-2019, básicamente debido a la disponibilidad de imágenes satelitales MODIS. Es por ello, que se muestra y se compara con estudios similares, considerándose como una aproximación de las tendencias futuras que pudiesen tener las cuencas de la zona central.

En la Cuenca Embalse El Yeso ubicada en los 33°S 70°W con elevaciones en el rango de 2500-6000 metros, se encontraron cambios decrecientes significativos en SP en un 88% del área, cambios negativos significativos en la precipitación acumulada anual y aumentos no significativos en la temperatura media anual. Las correlaciones encontradas mostraron que los cambios en la precipitación y la temperatura están relacionados con los cambios en el SP, siendo mayor esa correlación con la precipitación acumulada anual. Se mostró la velocidad con que el manto de nieve disminuye y como la línea de nieve se incrementa en elevación como se mostró en la Figura 11, lo que ha llevado a menor cantidad de agua aportante a los ríos, y que se ve reflejado en la disminución del parca del embalse el Yeso y del volumen almacenado en los últimos años. Si bien, el presente trabajo muestra el análisis hasta el año hidrológico 2019, sería interesante pensar en agregar los años 2020 y 2021, donde visualmente ha quedado demostrado las consecuencias de la mega sequía que ha afectado a Chile y la poca o nula nieve en la zona cordillerana de Los Andes en la región Metropolitana.

A modo de recomendación, el estudio de la nieve hoy en día es escaso y recién se está considerando su nivel de afectación. Chile es un país que cuenta con gran variabilidad de cuencas pluviales, nivopluviales y nivales, por lo cual, es pertinente no solo estudiar las tendencias que se han presentado en las forzantes meteorológicas sino también estudiar la evaluación de la nieve, y esta variación asociarla tanto con las forzantes como con efectos antropogénicos que sobre esos mantos pueda existir (impacto de los incendios forestales, minería, contaminación por material particulado, entre otros). La cuenca Embalse El Yeso, al ser una cuenca importante para la región metropolitana, requiere un análisis más profundo de su cobertura nival y los cambios futuros en la respuesta hídrica, pues el cambio climático es inequívoco. Se recomienda realizarlo para otras cuencas andinas, usar MODIS u otro tipo de imágenes satelitales como lo son Landsat y Sentinel que cuentan con mayores resoluciones y hasta años de registro (Landsat), e involucrar esto en la modelación hidrológica presente y futura.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Freddy Saavedra (freddy.saavedra@upla.cl), doctor de la Universidad de Playa Ancha de Chile, pues gracias a su artículo de Saavedra et al. (2018) es posible orientar este trabajo con el fin de estimar y cuantificar la cobertura de la nieve en cuencas andinas, en particular en Embalse El Yeso.

En cuanto a la preparación de este manuscrito, fue parcialmente financiada por el proyecto “Modelación hidrológica en la cuenca alta del río Aconcagua incorporando el impacto de la contaminación atmosférica sobre el manto nival cuantificada mediante datos in-situ”, Proyecto Interno USM Multidisciplinario, PI_M_2020_58; y el proyecto Sistema integrado de monitoreo y modelo hidrológico-químico para la gestión de recursos hídricos aplicable a la prevención de desastres naturales y adaptación al cambio climático”, proyecto Fondef IDeA I+D, ID19110359.

REFERENCIAS

- 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.
- Garreaud, R. (2015). Nieve cerca de Santiago: Cada vez más arriba. *Documento Interno CR2*, February, 2.
- Garreaud, René. (2011). *Cambio climático: bases físicas e impactos en Chile*.
- Groemping, U., & Matthias, L. (2013). *Relative importance of regressors in linear models*, R package version 2.2.
- Grömping, U. (2006). Relative importance for linear regression in R: the package relaimpo. *Journal of Statistical Software*, 17(1), 1–27.
- Hall, D. K., Branch, H. S., Goddard, N., Flight, S., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., Goddard, N., Flight, S., Digirolamo, N. E., Bayr, K. J., Dorothy, K., George, A., Vincent, V., Nicolo, E., Klaus, J., Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., Digirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002). *DigitalCommons @ University of Nebraska - Lincoln National Aeronautics and Space Administration MODIS Snow-Cover Products MODIS snow-cover products*. 1–3.
- Kendall, M. G. (1955). Rank correlation methods. 1955. *Charles Griffin, London*.
- 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(February), 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245–259.
- Patakamuri, S. K., O'Brien, N., & Patakamuri, M. S. K. (2020). *Package 'modifiedmk.'*
- Saavedra, F. A., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R., & Sibold, J. S. (2017). A snow climatology of the Andes Mountains from MODIS snow cover data. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1526–1539.
- 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>
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis (Parts 1-3). *Ned. Akad. Wetensch. Proc. Ser. A*, 53, 1397–1412.