

Análisis de los eventos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en el Gran Mendoza, Argentina

Assessment of precipitation events affecting the distribution of drinkable water in the Gran Mendoza area, Argentina

JUAN ANTONIO RIVERA^{1,2}  0000-0001-7754-1612

GEORGINA MARIANETTI¹  0000-0003-3760-6404

MACARENA SCAGLIONE²  0000-0002-2195-5987

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT CONICET Mendoza. Argentina

² Universidad Juan Agustín Maza. Argentina

Resumen

En la cuenca del río Mendoza, la ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas en los meses de verano provoca procesos de erosión severa, flujos de derrubios e inundaciones repentinas que modifican la turbiedad del río Mendoza. El exceso de sedimentos arrastrados durante la ocurrencia de estos eventos afecta el trabajo de las plantas potabilizadoras, ocasionando cortes en el abastecimiento de agua potable en el Gran Mendoza, la cuarta urbe más poblada de Argentina. A partir de esta problemática, este trabajo presenta una caracterización de los eventos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en esta región, considerando 13 casos de estudio a lo largo del período 2013-2020. Se utilizaron estimaciones satelitales de alta resolución espacial para cuantificar las precipitaciones, las cuales se validaron con datos de seis estaciones meteorológicas a lo largo de la cuenca. En base al análisis de composiciones de un conjunto de variables meteorológicas se obtuvieron dos configuraciones sinópticas que favorecen la ocurrencia de precipitaciones intensas: un sistema de baja presión en altura frente a las costas de Chile y una anomalía térmica que genera convección aislada en los valles de la cuenca. Estos resultados podrían utilizarse para la generación de sistemas de alerta temprana que mejoren el manejo de los recursos hídricos.

Palabras clave: flujos de derrubios; lluvias intensas; sedimentos; Andes; forzantes sinópticos.

Fechas • Dates

Recibido: 2022.02.08
Aceptado: 2022.06.14
Publicado: 2022.06.28

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Juan Antonio Rivera
jrivera@mendoza-conicet.gob.ar

Abstract

In the Mendoza river basin, the occurrence of heavy rainfall events in the summer months causes severe erosion processes, debris flows, and flash floods that modify the turbidity of the Mendoza river. The excess of sediments dragged during the occurrence of these events affects the functioning of the water treatment plants, which causes cuts in the supply of drinking water in the Gran Mendoza area, the fourth most populated city in Argentina. Based on this issue, this paper presents a characterization of precipitation events that affect the distribution of drinking water over the region, considering 13 case studies over the period 2013-2020. High-resolution satellite estimates were used for the quantification of precipitation, which were validated with data from six meteorological stations throughout the basin. Based on a composite analysis considering a set of meteorological variables, two synoptic configurations that favor the occurrence of heavy precipitation were obtained: a mid-troposphere low pressure system off the coast of Chile and a thermal anomaly that generates isolated convection in the valleys of the basin. These results could be used to create early warning systems to improve water resource management.

Keywords: debris flows; heavy rainfall; sediments; Andes; synoptic forcings.

1. Introducción

A lo largo del oeste de Sudamérica, la Cordillera de los Andes provee los recursos hídricos que sostienen los ecosistemas andinos y las actividades de casi 90 millones de personas en siete países (Arias et al., 2021).

Diversas componentes de la criósfera (nieve, hielo, permafrost) desempeñan un papel fundamental en estos ambientes, conformando el origen de los principales ríos del continente, cuyas aguas se utilizan para consumo humano, generación de energía hidroeléctrica, agricultura, recreación e industria, entre otros usos (Huss et al., 2017).

El rol de las lluvias en la hidroclimatología regional toma relevancia en las porciones medias y bajas de las principales cuencas andinas del centro-oeste de Argentina, donde episodios de lluvias intensas y de corta duración durante los meses de verano suelen generar crecidas repentinas (Páez et al., 2013; Vich et al., 2014). Con lo cual, la variabilidad climática en diversas escalas temporales juega un papel fundamental en la regulación de la disponibilidad de agua en esta región.

La ocurrencia de sequías suele ser uno de los factores más importantes en la disponibilidad de agua potable en escala interanual, tal como documentaron diversos autores considerando casos en Europa (Van Loon et al., 2014), África (Wright & Jacobs, 2016), Asia (Firoz et al., 2018), Oceanía (Neal et al., 2014) y América (Benotti et al., 2010). Asimismo, el cambio climático observado en la Cordillera de los Andes a lo largo del último siglo, se hace evidente con el incremento en las temperaturas y la consecuente reducción de los glaciares y otros cuerpos de hielo (Pabón-Caicedo et al., 2020; Vuille et al., 2018), así como en la ocurrencia de eventos hidroclimáticos extremos (Poveda et al., 2020), que afectan sensiblemente la disponibilidad de agua y las actividades socio-económicas vinculadas a este recurso. En este sentido, el Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2022) indica que los principales impactos del cambio climático se asocian a una reducción de la seguridad hídrica, con restricciones en el acceso a agua para consumo humano tanto en calidad como en cantidad.

Específicamente, el centro-oeste de Argentina atraviesa un período de sequía hidrológica que se extiende desde el año 2010 a la actualidad, en el cual la escasa acumulación de nieve generó déficits en los caudales de los ríos de la región (Rivera et al., 2021a), con la consecuente reducción en el volumen de agua embalsada para irrigación, consumo humano y otros usos comunes (Rivera et al., 2021b). Una de las poblaciones más grandes del centro-oeste de Argentina corresponde al área urbana del Gran Mendoza (32,9° S, 68,8° O), la cual alberga aproximadamente 1,25 millones de habitantes (Gobierno de Mendoza, 2021), siendo la cuarta aglomeración más poblada del país de acuerdo al censo nacional del año 2010 (INDEC, 2010). El abastecimiento de agua potable en el Gran Mendoza depende de los caudales del río Mendoza y sus principales tributarios, las cuales se originan principalmente por el derretimiento de la nieve estacional y el aporte de los glaciares andinos. Diversas plantas potabilizadoras de agua, distribuidas a lo largo del tramo superior y medio de la cuenca del río Mendoza, toman agua de los principales ríos y embalses para su tratamiento. Los sistemas de distribución de agua, tanto potable como para riego, presentan una baja eficiencia debido a la falta de impermeabilización, lo cual genera grandes pérdidas de agua por infiltración y afecta negativamente al acceso al agua potable de las poblaciones vulnerables situadas en las zonas del oeste del área urbana (Díaz-Caravantes et al., 2020). Con lo cual, existe el desafío de incrementar la seguridad hídrica regional mediante un manejo eficiente y sustentable del agua por parte de los organismos encargados de esta tarea.

Sumado a la variabilidad climática en escala interanual y a las tendencias climáticas de largo plazo, son cada vez más frecuentes eventos meteorológicos extremos que ponen en riesgo la disponibilidad de agua potable en el Gran Mendoza (SAyDSN, 2015). La ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas en los meses de verano provoca procesos de erosión severa, flujos de derrubios e inundaciones repentinas que modifican la turbiedad de las aguas que reciben el río Mendoza, los arroyos y cursos de agua secundarios de dicho río (Moreiras, 2006). El exceso de sedimentos arrastrados por el agua durante la ocurrencia de estos eventos intensos de lluvia obliga a interrumpir la toma de agua para su potabilización a lo largo de los principales ríos de la cuenca. Sumado a ello, se realizan cortes programados en el suministro de agua potable en el Gran Mendoza, con la finalidad de dar mantenimiento al Embalse Potrerillos (remoción de sedimentos) para preservar su vida útil. Estos cortes pueden afectar a más de un millón de habitantes en la época del año en la que el consumo del recurso se incrementa (Vélez et al., 2002).

Diversos estudios han avanzado en el análisis de eventos de precipitación que ocasionan flujos de derrubios en zonas montañosas, como es el caso de los Alpes (Peruccacci et al., 2017; Saez et al., 2013), los Himalayas (Abraham et al., 2020; Dahal & Hasegawa, 2008), y los Andes (Sepúlveda et al., 2014; Vergara et al., 2020). En particular, sobre los Andes Centrales de Argentina, se analizaron los casos que afectan la circulación a lo largo de la traza de la ruta internacional N°7, la cual conecta Argentina y Chile (Santos et al., 2015). Estos eventos suelen generar destrucción de la calzada, interrupción de tránsito, afectación del turismo en las zonas andinas, generando pérdidas económicas e incluso fatalidades (Moreiras et al., 2021). Los eventos de flujos de derrubios ocurridos en la cuenca del río Mendoza se asocian a la generación de tormentas convectivas, con acumulados de precipitación diaria de entre 6,6 y 12,9 mm (Moreiras, 2005). No obstante, estos umbrales se determinaron mediante el uso de estaciones meteorológicas que en muchos casos se ubican a distancias considerables de las zonas de ocurrencia de estos fenómenos, lo cual constituye una limitación importante. El efecto acumulativo de las precipitaciones a lo largo del tiempo, típicamente entre 3 y 5 días, también juega un papel relevante para la saturación de los suelos y la generación de flujos de derrubios (Lee et al., 2015; Moreiras et al., 2021). En algunos casos, los eventos responden a aumentos súbitos en la temperatura, que generan un incremento en el nivel

de la isoterma de 0° C, favoreciendo el derretimiento del permafrost y la nieve estacional (Moreiras et al., 2018; Vergara et al., 2022).

La mayoría de los estudios previos abordaron el impacto de las precipitaciones en el tramo superior y medio de la cuenca del río Mendoza y su relación con la ocurrencia de flujos de derrubios y procesos de remoción en masa desde un punto de vista geológico, con foco en el impacto sobre las poblaciones de montaña y la economía regional. No obstante, la hidrología de la cuenca del río Mendoza se ve modificada por el excesivo aporte de sedimentos a los ríos, lo cual afecta la turbidez de las aguas y genera la suspensión de la potabilización, fenómeno que no ha sido foco de estudio hasta ahora. Es por ello que el objetivo de esta investigación consiste en caracterizar los eventos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en el Gran Mendoza, centro-oeste de Argentina. Para ello se generará un inventario de fechas recientes de corte del suministro de agua potable, se utilizarán productos de precipitación de alta resolución espacial y temporal, se cuantificarán las variaciones en el caudal del río Mendoza, y se caracterizará desde el punto de vista sinóptico la circulación atmosférica que favorece la ocurrencia de estos eventos. Esto permitirá complementar las investigaciones previas y mejorar el conocimiento de los eventos de precipitación que generan un alto impacto social, en una región de topografía compleja y que carece de sistemas de alerta temprana para la reducción del riesgo de desastres hidrológicos.

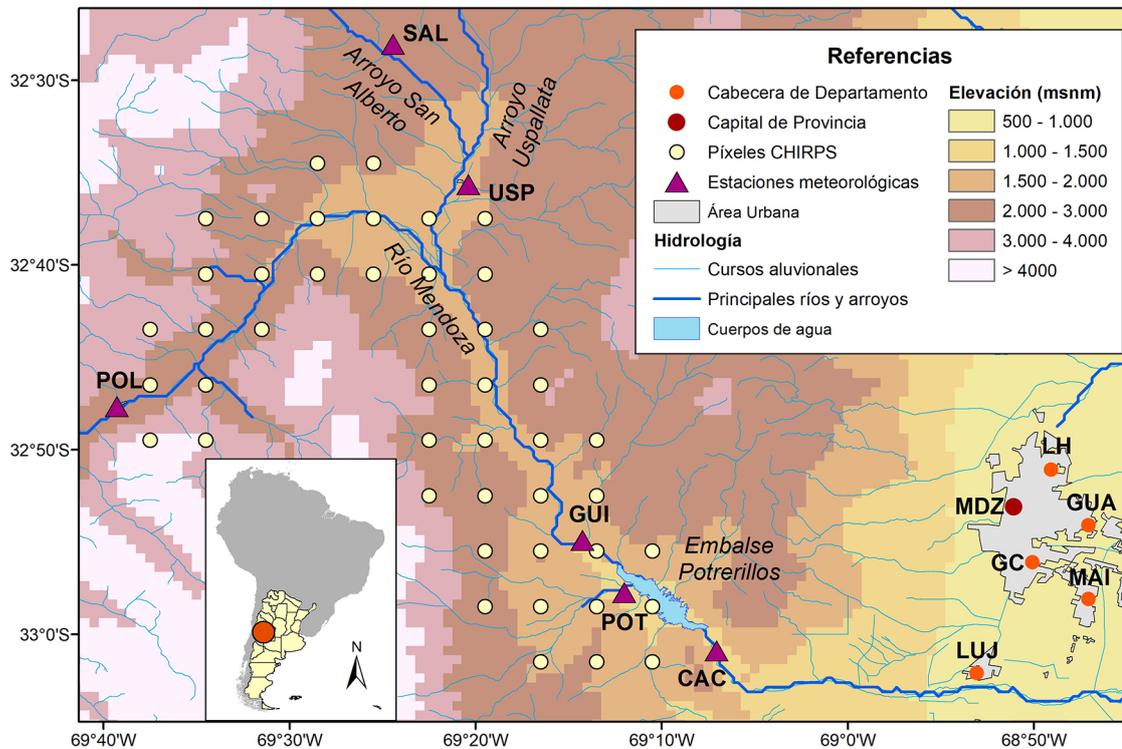
2. Metodología

2.1. Materiales utilizados

Para esta investigación se utilizaron datos observacionales de precipitación diaria en los meses de octubre a marzo del período 2013-2020 obtenidos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH, <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>) para 6 estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de la cuenca superior y media del río Mendoza: Polvaredas, San Alberto, Uspallata, Guido, Potrerillos y Cacheuta (Figura 1). A fin de complementar estos registros, se utilizaron estimaciones de los productos Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS, Funk et al., 2015) y Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System (PERSIANN-CCS, Hong et al., 2004). Las estimaciones CHIRPS poseen una resolución espacial de 0.05° de latitud por 0.05° de longitud y una resolución temporal diaria. Se seleccionaron 46 píxeles del producto CHIRPS distribuidos a lo largo del río Mendoza (Figura 1). Las estimaciones PERSIANN-CCS tienen una resolución espacial de 0.04° de latitud por 0.04° de longitud y resolución temporal horaria. Para este producto se seleccionaron los píxeles correspondientes a la ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas, con el propósito de caracterizar el ciclo diario de los eventos de precipitación que generan cortes en el suministro de agua potable.

Para la determinación de las fechas de corte en el suministro de agua potable se utilizaron los registros de la empresa Aguas Mendocinas (<https://www.aysam.com.ar/>), en el período comprendido entre los años 2013 y 2020. Inicialmente, se seleccionaron 27 casos de corte en el suministro de agua potable. Mediante un análisis de consistencia, se descartaron 14 casos de estudio que no respondieron a factores climáticos, los cuales fueron asociados a tareas de mantenimiento y/o rotura de cañerías (Tabla 1). Las tareas de mantenimiento suelen ocurrir rutinariamente durante los meses invernales, en los cuales el caudal del río Mendoza presenta sus mínimos anuales y tiende a ser más estable.

Figura 1. Área de estudio con las características de la orografía, los ríos y arroyos más importantes, la ubicación de los principales centros urbanos (MDZ: Ciudad de Mendoza; LH: Las Heras; GUA: Guaymallén; GC: Godoy Cruz; MAI: Maipú; LUJ: Luján), los píxeles de las estimaciones CHIRPS y las estaciones hidrometeorológicas (POL: Polvaredas, SAL: San Alberto, USP: Uspallata; GUI: Guido; POT: Potrerillos; CAC: Cacheuta).



Fuente: Instituto Geográfico Nacional; Sistema Nacional de Información Hidrológica; Climate Hazards Center. Elaboración propia.

Tabla 1. Casos de estudio seleccionados y centros urbanos afectados por el corte en el suministro de agua potable en el período 2013-2020.

Fecha de corte del suministro de agua potable	Centros urbanos afectados					
	MDZ	LH	GC	LUJ	GUA	MAI
31/01/2013	X	X	X	X	X	
16/02/2014	X	X	X	X	X	X
29/12/2014	X	X		X	X	
17/02/2015	X	X	X		X	
09/3/2015	X	X	X		X	
31/12/2015		X	X		X	
24/01/2016	X			X		
30/01/2016	X	X	X		X	
23/01/2017			X		X	
07/02/2018		X				
05/01/2020				X		
29/01/2020	X	X	X	X	X	
13/11/2020	X	X	X		X	

Fuente: Aguas Mendocinas. Elaboración propia.

A fin de cuantificar la variación en la hidrología superficial del río Mendoza y cuantificar el cambio en el aporte de sedimentos asociados a la ocurrencia de precipitaciones, se utilizaron mediciones diarias de caudal líquido, sólido grueso y fino, obtenidas en la estación hidrometeorológica Guido, ubicada sobre el cauce del río Mendoza (Figura 1).

Para determinar los mecanismos que inciden en la ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas en la cuenca alta y media del río Mendoza, se utilizaron diversas variables meteorológicas en escala diaria obtenidas del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020), con resolución espacial de 0,5°. Estas variables corresponden a la altura geopotencial en el nivel de 500 hPa (Z500), la humedad específica y el vector viento en el nivel de 850 hPa (q850 y V850, respectivamente) y la temperatura a 2 metros (t2m). Complementariamente, se utilizaron datos satelitales de radiación de onda larga saliente (OLR por sus siglas en inglés) de la base de datos interpolados de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés, Liebmann & Smith, 1996), con resolución horizontal de 2,5°.

2.2. Métodos aplicados

Para la validación de los productos CHIRPS y PERSIANN-CCS se realizó un análisis punto-a-píxel (Thiemig et al., 2012), en el que se utilizaron métricas estadísticas como el coeficiente de correlación de Pearson (r), el error absoluto medio (MAE por sus siglas en inglés), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE por sus siglas en inglés) y el sesgo porcentual (PB por sus siglas en inglés). Estas métricas estadísticas fueron utilizadas para la validación de las estimaciones CHIRPS en escala mensual sobre el centro-oeste de Argentina y sus aspectos estadísticos y formulación pueden encontrarse en Rivera et al. (2018). Las precipitaciones de los productos CHIRPS y PERSIANN-CCS se acumularon para los 5 días previos a los eventos de corte de suministro de agua potable seleccionados, considerando el efecto acumulativo de las precipitaciones en la saturación de los suelos y la consecuente generación de flujos de derrubios (Moreiras et al., 2021).

Se estimaron los valores medios de caudal líquido, sólido grueso y fino, medidos en el río Mendoza considerando los registros correspondientes a las fechas anteriores y posteriores más cercanas a la ocurrencia de eventos de corte de suministro de agua potable. Además, se cuantificó el valor medio de caudal líquido, sólido grueso y fino, considerando las fechas en las que no se registraron casos de corte de agua del período entre octubre y marzo. Si bien los caudales sólido grueso y fino se miden en escala diaria, poseen discontinuidades temporales que no permiten un análisis temporal adecuado. Por ejemplo, no es posible obtener valores de referencia para el cálculo de anomalías. No obstante, la comparación en ambas situaciones dará información relevante sobre el rol de las precipitaciones en la interrupción del suministro de agua potable. La diferencia entre los valores medios en cada caso (sin presencia de evento de corte de agua y previo a los eventos de corte de agua) se evaluó a partir del test t de Student para muestras con varianzas diferentes (Ruxton, 2006), para un nivel de significancia del 90%.

Luego se procedió a un análisis de composiciones o “composites” de las anomalías de los campos de Z500, q850, V850, OLR y t2m para las fechas de corte de agua potable, calculadas respecto al período base 1981-2010. El análisis de composiciones consiste en identificar un grupo de casos con características similares, calcular la media global de esos casos utilizando un conjunto de datos reticulados y, por último, presentar un mapa de las anomalías medias compuestas con las características espaciales más destacadas (Boschat et al., 2016; Brown & Hall, 1999). De esta for-

ma, se exploraron los factores sinópticos que explican la ocurrencia de precipitaciones durante las fechas de corte de suministro de agua potable.

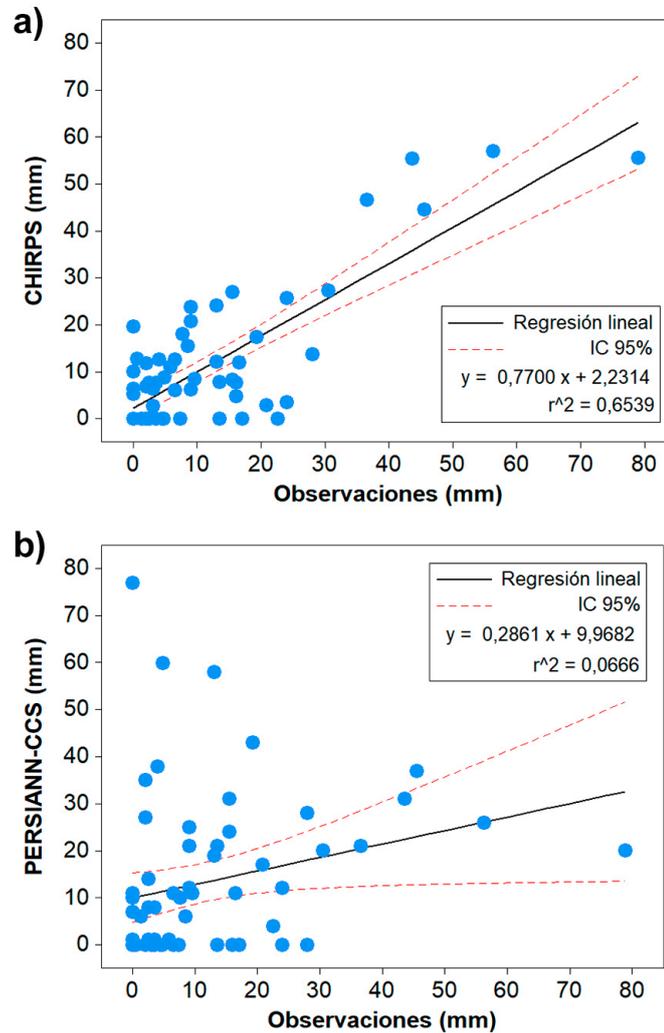
3. Resultados

3.1. Validación de los productos CHIRPS y PERSIANN-CCS

En base a la comparación entre las precipitaciones diarias observadas en las 6 estaciones meteorológicas del área de estudio y las estimaciones satelitales (Figura 2) se observó un mejor desempeño de las estimaciones CHIRPS, lo cual se infiere a partir de la comparación del coeficiente de determinación (r^2) para ambos diagramas de dispersión. En particular, los eventos de precipitación superiores a 30 mm tienden a estar subestimados por las estimaciones CHIRPS (Figura 2a), mientras que en el caso de las estimaciones PERSIANN-CCS, el producto tiende a sobreestimar los eventos de precipitación inferiores a 30 mm (Figura 2b). Todas las métricas estadísticas seleccionadas para la comparación entre las observaciones y las estimaciones de precipitación presentan mejores valores para el producto CHIRPS frente al producto PERSIANN-CCS. El MAE presenta menores valores para CHIRPS (MAE = 6,7 mm) que para PERSIANN-CCS (MAE = 11,8 mm), lo que se traduce en un menor error de estimación por parte de CHIRPS. El PB indica una leve subestimación de las precipitaciones con base en las estimaciones CHIRPS (PB = -3,9 %), mientras que para las estimaciones PERSIANN-CCS se observa una sobreestimación de las precipitaciones (PB = 14,1 %), lo cual se verifica en la Figura 2b. El coeficiente de NSE presenta valores positivos para CHIRPS (NSE = 0,1) mientras que en el caso de las estimaciones PERSIANN-CCS presenta valores negativos (NSE = -0,2), lo cual indica una baja confiabilidad en las estimaciones de precipitación de PERSIANN-CCS. La correlación entre las observaciones de precipitación y las estimaciones CHIRPS presenta un valor de $r = 0,81$ siendo ampliamente superior al obtenido con base en las estimaciones PERSIANN-CCS ($r = 0,26$). Los resultados obtenidos a partir de estas métricas estadísticas indican que las estimaciones CHIRPS presentan un mayor acuerdo con las precipitaciones diarias observadas a lo largo del área de estudio.

Considerando el promedio areal de las precipitaciones para los casos de estudio seleccionados, se observan algunas diferencias marcadas según el caso seleccionado (Tabla 2). Los acumulados observados van de los 1,2 mm el 28 de diciembre de 2014 a los 45 mm el 16 de febrero de 2014. Cabe destacar que estos acumulados representan las observaciones de 6 estaciones meteorológicas a lo largo de la porción media y alta de la cuenca del río Mendoza, con lo cual es posible que existan eventos asociados a precipitaciones no registradas por estas estaciones. Salvo para el caso registrado el 9 de marzo de 2015, en todos los eventos las estimaciones CHIRPS y PERSIANN-CCS detectan acumulados de precipitación sobre la zona de estudio. En este caso, para los días 8 y el 9 de marzo los productos CHIRPS y PERSIANN-CCS registraron precipitaciones únicamente al este de la región de estudio (resultado no mostrado). Por ejemplo, el evento más importante, registrado a mediados de febrero de 2014, representó un exceso de 36 % respecto al acumulado mensual promedio de febrero para la estación meteorológica Guido, lo cual da cuenta del carácter inusual de la lluvia acumulada en la región. Para este caso, se observa un valor sobreestimado de acuerdo a CHIRPS (52,9 mm) y subestimado considerando PERSIANN-CCS (26 mm). En promedio, las observaciones presentan un acumulado de 11,7 mm por caso, el cual es levemente subestimado por CHIRPS (10,1 mm) y es sobreestimado por PERSIANN-CCS (14,2 mm).

Figura 2. Diagrama de dispersión entre las observaciones de precipitación y las estimaciones satelitales (panel a, CHIRPS; panel b, PERSIANN-CCS) en la cuenca media y alta del río Mendoza. La línea negra representa la regresión lineal de los datos, mientras que las líneas punteadas muestran el intervalo de confianza para el nivel de 95%.



Fuente: Sistema Nacional de Información Hidrológica; Climate Hazards Center; Center for Hydrometeorology and Remote Sensing. Elaboración propia.

Tabla 2. Precipitación media observada sobre la región de estudio durante cada uno de los eventos seleccionados, considerando los datos de las estaciones meteorológicas y las estimaciones CHIRPS y PERSIANN-CCS.

Evento	PP Observada	PP CHIRPS	PP PERSIANN-CCS
31/01/2013	8,2 mm	9,5 mm	6,8 mm
16/02/2014	45,0 mm	52,9 mm	26,0 mm
29/12/2014	1,2 mm	0,1 mm	5,3 mm
17/02/2015	9,9 mm	11,2 mm	1,2 mm
09/3/2015	4,5 mm	0,0 mm	0,0 mm
31/12/2015	6,3 mm	8,6 mm	38,8 mm
24/01/2016	13,6 mm	19,7 mm	11,7 mm
30/01/2016	4,2 mm	1,2 mm	1,2 mm
23/01/2017	12,8 mm	5,3 mm	21,0 mm

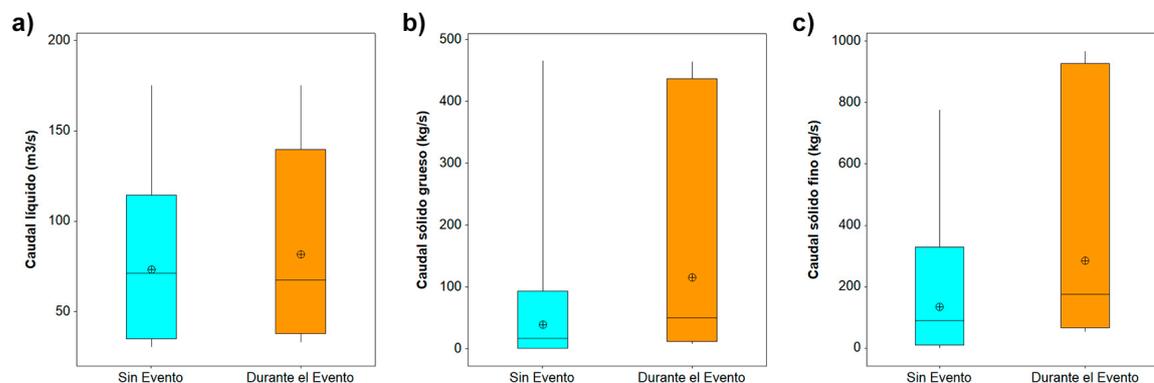
Evento	PP Observada	PP CHIRPS	PP PERSIANN-CCS
07/02/2018	16,1 mm	3,5 mm	8,3 mm
05/01/2020	3,7 mm	5,1 mm	20,7 mm
29/01/2020	16,4 mm	13,4 mm	35,3 mm
13/11/2020	10,5	0,2 mm	7,7 mm
Promedio	11,7 mm	10,1 mm	14,2 mm

Fuente: Sistema Nacional de Información Hidrológica; Climate Hazards Center; Center for Hydrometeorology and Remote Sensing. Elaboración propia.

3.2. Variaciones en el caudal líquido y sólido

Se observó un contraste en los valores de caudal líquido y sólido asociado a la ocurrencia de eventos de precipitación (Figura 3). El test de diferencia de medias indica que no existe una diferencia significativa en los caudales líquidos durante los eventos de precipitación, lo cual se evidencia en la Figura 3a, y da cuenta del rol primordial de la temperatura y la acumulación nival en el invierno precedente sobre esta variable (Masiokas et al., 2010). No obstante, se observa una mayor frecuencia de caudales superiores a 120 m³/s durante los eventos de precipitación en relación a los períodos previos a estos eventos. El valor medio de caudal sólido grueso y fino es en promedio significativamente mayor durante los casos asociados a la ocurrencia de precipitaciones respecto a los casos en los cuales estos eventos no ocurrieron (Figura 3b, 3c). Esto da cuenta del proceso erosivo asociado a las precipitaciones en la cuenca alta y media del río Mendoza, que genera un arrastre de sedimentos hacia el cauce del río. Se observa que las muestras que no corresponden a eventos de precipitaciones presentan valores elevados de caudal sólido (Figura 3b, 3c). Los mismos pueden estar asociados a precipitaciones que pudieron no haber ocasionado la interrupción del suministro de agua potable. Asimismo, podrían vincularse a incrementos en la temperatura del aire, que generen aporte de sedimentos por derretimiento de permafrost (Moreiras et al., 2018).

Figura 3. Box-plots de la distribución de los valores de caudal líquido (panel a) caudal sólido grueso (panel b) y caudal sólido fino (panel c) para las observaciones sin evento de precipitaciones (cajas celestes) y durante el evento de precipitaciones (cajas naranjas). Cada diagrama muestra la mediana (línea horizontal negra dentro de la caja), la media (punto dentro de la caja) y el primer (P10) y noveno decil (P90). Los bigotes se extienden hasta los valores extremos de cada muestra.

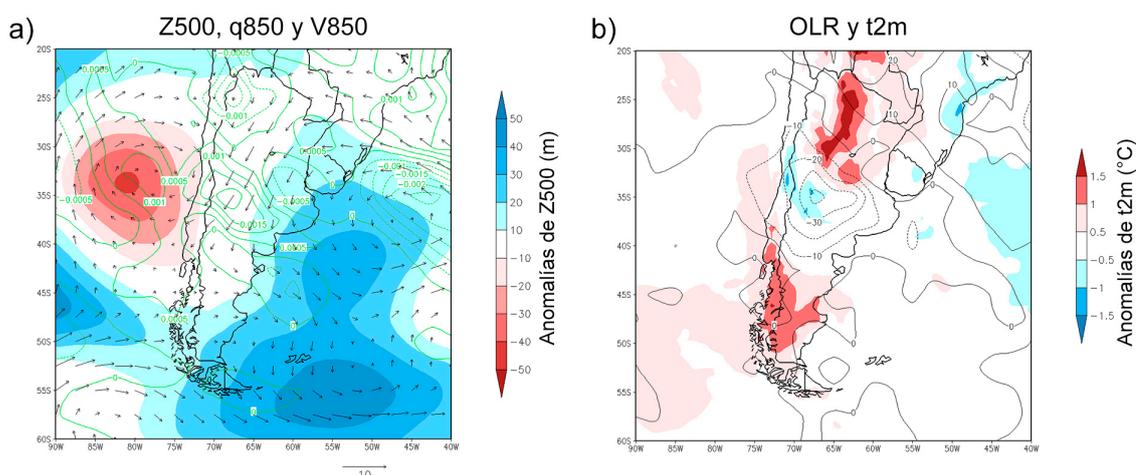


Fuente: Sistema Nacional de Información Hidrológica. Elaboración propia.

3.3. Factores dinámicos

En primera instancia, se graficaron los campos de anomalías de las variables meteorológicas seleccionadas para cada fecha de análisis de forma individual (resultado no mostrado). Luego se realizaron las composiciones correspondientes a dos posibles configuraciones sinópticas responsables de la ocurrencia de precipitaciones intensas en el área de estudio. Por un lado, la configuración denominada “tipo B” posee como característica relevante la presencia de una anomalía ciclónica en niveles medios de la tropósfera frente a las costas de Chile, centrada aproximadamente en 33° S y 80° O (Figura 4a). Esto se observó para los casos correspondientes al 31/03/2013; 16/02/2014; 29/12/2014; 31/12/2015; 24/01/2016; 30/01/2016; 05/01/2020; 29/01/2020 y 13/11/2020. Este sistema de baja presión en altura favoreció la inestabilidad atmosférica y en consecuencia el desarrollo de tormentas sobre gran parte del centro-oeste de Argentina. Además, una anomalía anticiclónica centrada en 37° S y 47° O frente a las costas de Argentina y Uruguay favoreció el ingreso de humedad proveniente del Océano Atlántico y del noreste de Argentina y sur de Brasil, lo cual se evidenció a través de la composición del viento y la humedad específica en el nivel de 850 hPa. De hecho, los máximos de anomalía positiva de humedad específica en el mismo nivel se ubican en el centro-oeste de Argentina (Figura 4a). Esta configuración del campo de presión en niveles medios de la tropósfera se caracteriza por generar precipitaciones importantes, tanto convectivas como estratiformes. Esto se verificó a partir de las anomalías de OLR, las cuales presentan valores negativos sobre el centro-oeste de Argentina, indicando la presencia de convección anómala en dicha región (Figura 4b). Asimismo, se observaron anomalías de temperatura negativas en buena parte de la región de estudio, las cuales pueden asociarse a la persistencia de cielo nublado y con lluvias.

Figura 4. Climatología sinóptica de los casos identificados como tipo B. a) Anomalías de altura geopotencial en el nivel de 500 hPa (Z500, sombreados), humedad específica (contornos verdes) y vector viento en el nivel de 850 hPa (q850 y V850, respectivamente). b) Anomalías de onda larga saliente (OLR, contornos negros) y temperatura a 2 metros (t2m, sombreados).

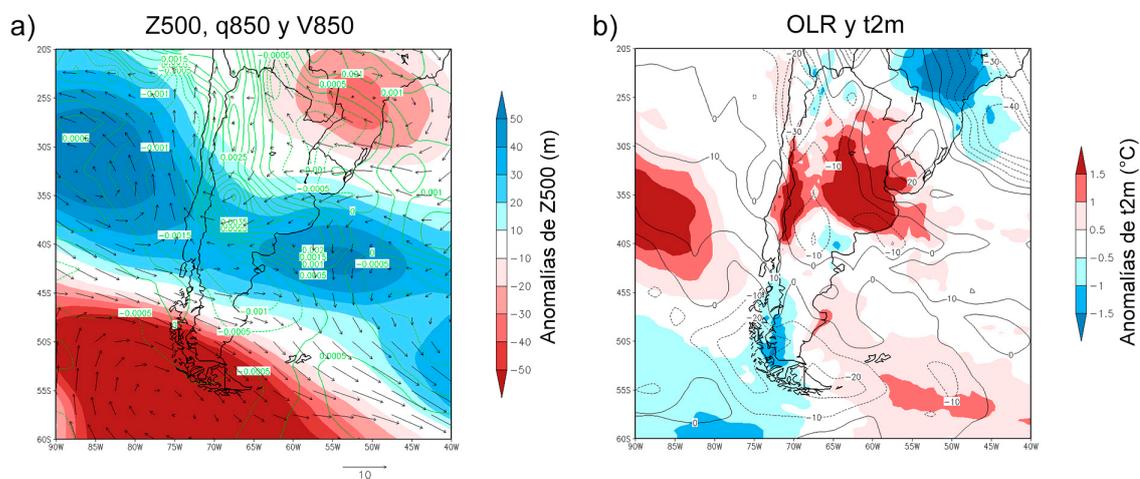


Fuente: Reanálisis ERA5; Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos. Elaboración propia.

Por otro lado, en la configuración denominada “tipo A” se observa una importante anomalía anticiclónica frente a las costas de Chile centrada en aproximadamente 32° S y 85° O, que se extiende sobre buena parte del centro de Argentina y el Océano Atlántico frente a las costas de la Patagonia norte (Figura 5a), identificada durante los días 17/02/2015, 09/03/2015, 23/01/2017 y 07/02/2018. Además, una fuerte anomalía ciclónica ubicada al sudoeste del extremo sur de

Sudamérica favoreció la intensificación del viento del oeste (oestes) alrededor de 45° S. Si bien las anomalías anticiclónicas son características de condiciones de estabilidad atmosférica (buen tiempo), se observó una advección de humedad desde el Océano Atlántico hacia el centro-oeste de Argentina, que generó anomalías positivas de q850. Mediante el análisis de las composiciones de OLR y t2m (Figura 5b), se observa que la región de estudio presentó importantes anomalías cálidas, en particular a lo largo de la Cordillera de los Andes entre 30° S y 40° S. Estas anomalías favorecen el calentamiento de masas de aire que, en presencia de anomalías positivas de humedad específica, pueden generar tormentas aisladas de gran intensidad (Calori et al., 2016; Vergara et al., 2020). Al generarse la convección de forma aislada, el campo de anomalías de OLR no permite identificar de forma precisa la zona de formación de tormentas, aunque sobre la región de estudio se presentaron anomalías negativas de esta variable.

Figura 5. Ídem Figura 4 para los casos tipo A.

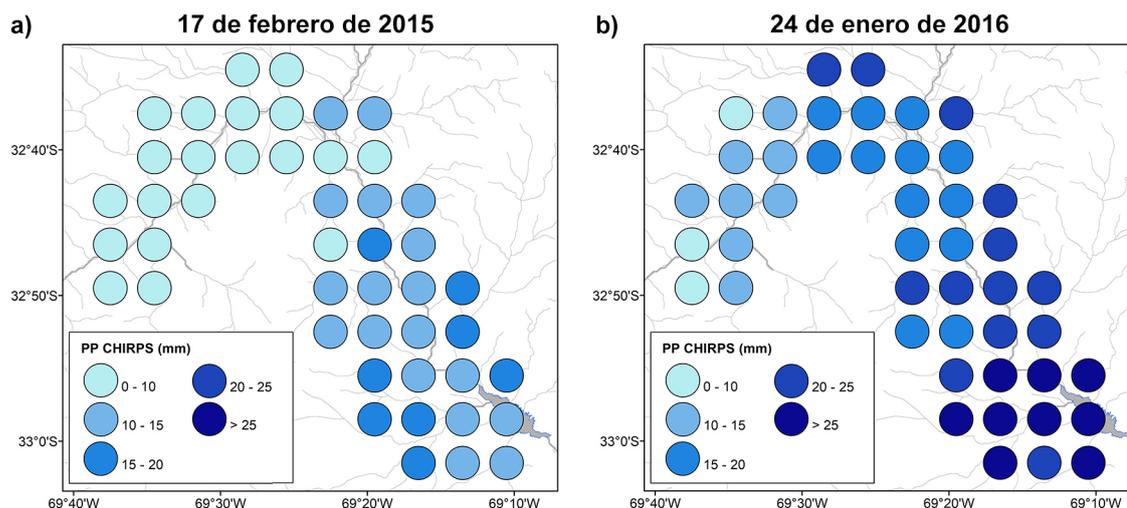


Fuente: Reanálisis ERA5; Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos. Elaboración propia.

A modo de ejemplo, se muestra la distribución espacial de las precipitaciones estimadas a partir de CHIRPS para los eventos del 17 de febrero de 2015 (tipo A, Figura 6a) y 24 de enero de 2016 (tipo B, Figura 6b). En ambos casos se observa que las mayores precipitaciones se estiman para la zona ubicada entre Uspallata y Potrerillos (ver Figura 1). Los días previos al 17 de febrero de 2015 se estimaron precipitaciones que superaron los 15 mm en 8 de los píxeles seleccionados, generadas a partir de procesos de convección aislada sobre los valles. En particular, esto se dio en la zona de las nacientes del río Blanco, en las estribaciones del Cordón del Plata (33° S, 69° 20' O). Estos acumulados de lluvia fueron suficientes para afectar la turbiedad del agua e impedir el funcionamiento de las plantas potabilizadoras Benegas y Alto Godoy, afectando potencialmente a más de 600.000 habitantes (Gobierno de Mendoza, 2021) de los centros urbanos correspondientes a la ciudad de Mendoza, Godoy Cruz, Guaymallén y Las Heras (Tabla 1). En el caso del evento registrado el 24 de enero de 2016, se observa que los acumulados de precipitación fueron mayores en comparación con el evento anterior, un resultado que está en parte asociado al forzante dinámico encargado de favorecer la ocurrencia de tormentas convectivas generalizadas (Figura 4; Camisay et al., 2020). Los píxeles cercanos a la localidad de Potrerillos registraron un estimado de precipitación superior a 25 mm. Al oeste de Uspallata, en la zona del río Ranchillos y la Quebrada Seca, zonas propensas a la ocurrencia de flujos de detritos, las estimaciones CHIRPS indican acumulados de entre 15 y 25 mm. En particular, este evento de lluvias intensas generó la ocurrencia de diversos aludes a lo largo de la traza de la ruta internacional N° 7, ocasionando interrupciones

en el tránsito con un total de más de 3000 personas aisladas en diversos tramos del corredor vial (Gobierno de Mendoza, 2016). Con lo cual, puede verificarse que no sólo la distribución de agua potable se ve afectada durante este tipo de eventos, sino que además las actividades socio-económicas de la región relacionadas con el turismo y el transporte internacional de mercancías sufren impactos significativos.

Figura 6. Distribución espacial de los acumulados de precipitación estimados por el producto CHIRPS para los eventos del 17 de febrero de 2015, correspondiente a una configuración tipo A (panel a), y del 24 de enero de 2016, correspondiente a una configuración tipo B (panel b).



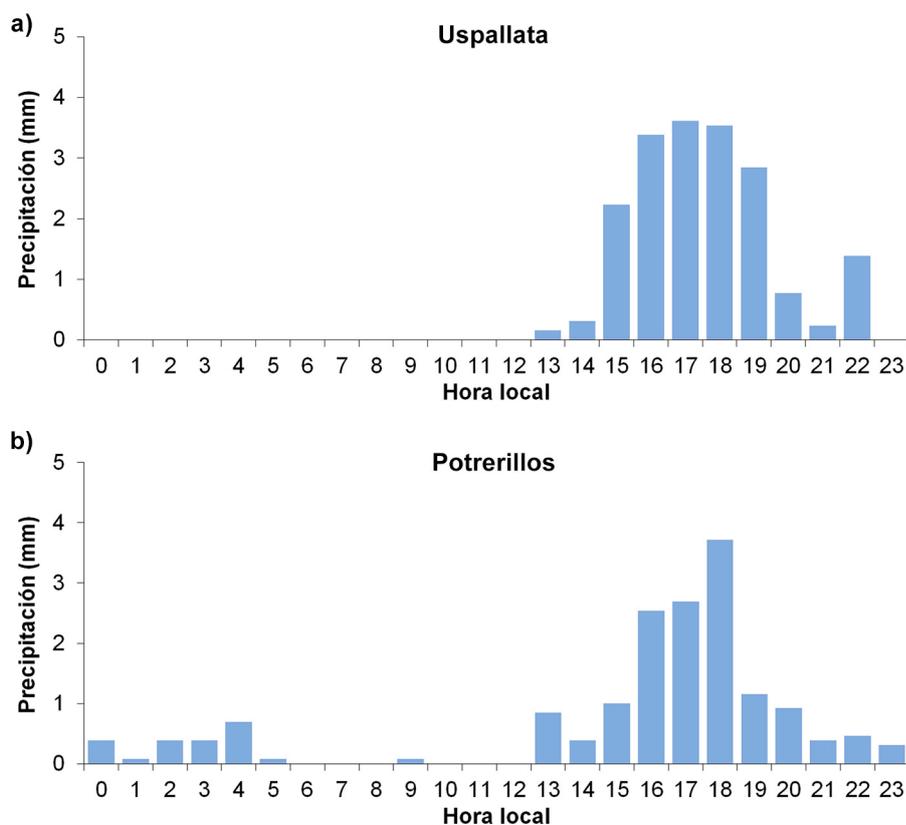
Fuente: Climate Hazards Center. Elaboración propia.

3.4. Ciclo diurno de la precipitación durante los eventos seleccionados

La Figura 7a muestra la distribución horaria de la precipitación media en la ubicación de la localidad de Uspallata considerando los 13 eventos de corte de agua. Se observó que los mayores acumulados de precipitación se presentaron en horas de la tarde, entre las 16:00 y las 18:00, alcanzando valores superiores a los 3 mm/hora. Esto da cuenta de que en muchos casos las precipitaciones suelen concentrarse en cortos períodos de tiempo, lo cual genera un impacto mayor en el aporte de sedimentos al río y los consecuentes problemas para la potabilización de agua. Típicamente, estos eventos se dan entre las 13:00 y las 22:00, sin observarse actividad en horas de la madrugada y la mañana (Figura 7a).

Considerando el píxel correspondiente a la ubicación de la estación meteorológica Potrerillos, se observan diferencias notorias respecto a la distribución temporal de los acumulados de precipitación horaria (Figura 7b). Los máximos acumulados tienden a coincidir en horario con lo observado en Uspallata (entre las 15:00 y las 19:00), aunque con menor intensidad. La mayor intensidad se presenta a las 18:00, de acuerdo con las estimaciones satelitales PERSIANN-CCS, con acumulados superiores a los 3 mm/hora. La diferencia más destacable se asocia a la prolongación de las precipitaciones en horas de la noche, las cuales se extienden durante la madrugada, aunque con menores intensidades.

Figura 7. Distribución horaria de la precipitación media detectada para los 13 casos de estudio por el producto PERSIANN-CCS para el píxel correspondiente a las estaciones Uspallata (panel a) y Potrerillos (panel b).



Fuente: Center for Hydrometeorology and Remote Sensing. Elaboración propia.

4. Discusión

El centro-oeste de Argentina es una región donde se conjugan la ocurrencia de una prolongada sequía desde el año 2010 con un incremento en los eventos de precipitaciones intensas como consecuencia del cambio climático regional (Rivera et al., 2021a; SAyDSN, 2015). Esto ha motivado el desarrollo de planes de manejo de inundaciones urbanas, las cuales afectan frecuentemente el área del Gran Mendoza (Vich et al., 2014), así como la construcción de embalses y reservorios para hacer frente tanto a los períodos de sequía como a las crecidas repentinas (Rivera et al., 2021b).

Los eventos de precipitaciones intensas comprometen la calidad del agua que reciben las plantas potabilizadoras que abastecen al Gran Mendoza, a través de altos niveles de sedimentos acumulados y/o arrastre de contaminantes en la escorrentía superficial. La complejidad topográfica que posee la cuenca media y alta del río Mendoza, junto con la escasez de datos hidrometeorológicos supone un desafío para la comprensión de estos fenómenos. Con lo cual, esta investigación realizó como primer paso una validación de la precipitación diaria estimada por los productos CHIRPS y PERSIANN-CCS, obteniendo una mejor representación de los acumulados de lluvia con base en CHIRPS (Figura 2, Tabla 2). Si bien este producto presenta una leve subestimación de los acumulados de precipitación diaria, resultado obtenido además a escala mensual (Rivera et al., 2018), brinda una alternativa útil para la cuantificación de eventos de precipitación en la re-

gión de estudio, en contraste con otros productos previamente utilizados como CMORPH (Hobouchian et al., 2017; Lauro et al., 2017; Santos et al., 2015). La performance de las estimaciones PERSIANN-CCS es inferior a lo obtenido a través de CHIRPS en la región de estudio (Figura 2, Tabla 2), lo cual podría asociarse a la falta de calibración de este producto con estaciones meteorológicas en superficie. No obstante, el uso de PERSIANN-CCS posibilitó la cuantificación de la precipitación horaria sobre la región de estudio, lo cual permitió identificar diferencias espaciales en la distribución temporal de las precipitaciones a lo largo del área de estudio (Figura 7).

Existen pocos estudios que trabajen con la variación del caudal sólido o de transporte de sedimentos en Sudamérica. Pueden mencionarse los estudios de Morera et al. (2017), que cuantifica los cambios en los sedimentos en suspensión en Perú; Espinoza et al. (2012) y Rivera et al. (2019), que analizan las tendencias en los sedimentos en suspensión a lo largo de los principales tributarios del río Amazonas; y Vergara et al. (2022), que explora el nexo entre deslizamientos de tierra e incrementos en los sedimentos en suspensión en Chile central. Esto destaca el aporte realizado en esta investigación en relación al incremento significativo en el caudal sólido grueso y fino asociado a eventos de precipitaciones intensas en la cuenca media y alta del río Mendoza y su impacto en términos de interrupción del suministro de agua potable. Sin embargo, las mediciones de estas variables sufren de discontinuidades que impiden un análisis adecuado respecto a su variabilidad temporal. Alternativas como el modelado hidrológico de caudales y transporte de sedimentos permitieron identificar los principales mecanismos vinculados a la generación de caudal sólido y su evolución temporal (Slosson et al., 2021), lo cual podría complementar las observaciones sobre la región de estudio.

En cuanto a la predicción de estos fenómenos, Santos et al. (2015) consideraron 4 eventos de precipitación que generaron aludes sobre la ruta internacional N° 7. Los autores identificaron una anomalía negativa de la componente zonal del viento entre los niveles de 850 y 400 hPa como factor más importante para el desarrollo de estos eventos. No obstante, en dos de los casos de estudio identifican un sistema de baja presión en niveles medios de la tropósfera frente a las costas de Chile como responsable de la ocurrencia de importantes acumulados de precipitación. El presente trabajo identifica además una configuración sinóptica que favorece el calentamiento en niveles bajos de la tropósfera sobre la región cordillerana que, sumado al aporte de humedad proveniente del Océano Atlántico, favorece la ocurrencia de episodios de convección aislada sobre los valles de la cuenca del río Mendoza. Este resultado está en línea con lo obtenido por Moreiras (2005), quien identificó el rol del anticiclón del Océano Atlántico en la generación de aludes sobre la precordillera. Respecto al rol de la temperatura, estudios previos dieron cuenta de la ocurrencia de flujos de detritos en la cuenca del río Mendoza como consecuencia de períodos excesivamente cálidos, como fue el caso de los eventos registrados entre el 27 de diciembre de 2015 y el 1 de enero de 2016 (Moreiras et al., 2018). No obstante, el presente trabajo identificó que la precipitación tuvo un rol importante en el desarrollo de dicho evento, en el cual se observó un promedio de 6,3 mm a lo largo de la cuenca media y alta del río Mendoza, siendo sobreestimado por las estimaciones CHIRPS y PERSIANN-CCS (Tabla 2). A fin de mejorar el conocimiento sobre la dinámica de estos fenómenos, es necesario incrementar la cantidad de eventos a analizar, así como también la extensión temporal del período de análisis, de forma tal de obtener una mejor descripción física de los mecanismos que generan interrupciones en el suministro de agua potable en el Gran Mendoza.

Los problemas relacionados a la disponibilidad de agua potable no sólo se evidencian en el Gran Mendoza. Las poblaciones de las áreas rurales de la cuenca del río Mendoza utilizan agua subte-

rránea para el abastecimiento de agua potable, la cual posee alta salinidad y niveles de arsénico que exceden los límites establecidos para el consumo humano (Gomez et al., 2019; Gomez et al., 2014). Esto pone de manifiesto la necesidad de generar mecanismos que garanticen la seguridad hídrica regional frente a la ocurrencia de sequías prolongadas y eventos de precipitaciones intensas. Esta problemática se ve reflejada además en otros países del mundo, como es el caso de México (Díaz-Caravantes et al., 2020), España (Eekhout et al., 2018) o Chile (Muñoz et al., 2020).

5. Conclusiones

Esta investigación permitió avanzar en el conocimiento de las características de los eventos de precipitación que interrumpen el suministro de agua potable en el Gran Mendoza, la cuarta urbe más poblada de Argentina. Se determinó que acumulados de precipitación para los 5 días previos a los eventos, de alrededor de 10 mm en promedio, son los responsables de incrementar significativamente la carga de sedimentos en el caudal del río Mendoza, lo cual obliga a suspender la potabilización de agua.

Los factores sinópticos que favorecen la ocurrencia de precipitaciones intensas a lo largo de la cuenca media y alta del río Mendoza se caracterizan por dos configuraciones dominantes. La configuración tipo A se asocia a la presencia de anomalías anticiclónicas en niveles medios de la tropósfera entre 30° y 40° S sobre buena parte del centro de Argentina y las inmediaciones de los Océanos Atlántico y Pacífico. Esto favorece la ocurrencia de cielos despejados que promueven el calentamiento radiativo, que sumado al aporte de humedad desde el Océano Atlántico, genera la ocurrencia de tormentas aisladas en los valles de la cuenca del río Mendoza. La configuración tipo B muestra la presencia de una anomalía ciclónica en niveles medios de la tropósfera frente a las costas de Chile, centrada aproximadamente en 33° S y 80° O, que favoreció la inestabilidad sobre el centro-oeste de Argentina, sumada a una anomalía de alta presión sobre el Océano Atlántico que permitió el ingreso de humedad hacia la región de estudio y la generación de tormentas generalizadas sobre la cuenca media y alta del río Mendoza. Además, se obtuvo una diferencia en el ciclo diurno de precipitación dentro del área de estudio, con una mayor actividad convectiva en horas de la tarde, que en el caso de la cuenca media del río Mendoza se prolonga hacia la noche.

Se espera que estos resultados sean de utilidad para el manejo de los recursos hídricos regionales, los cuales podrían ser usados como base para el desarrollo de un sistema de alerta temprana frente a estos fenómenos que generan diversos impactos socio-económicos. Teniendo en cuenta la limitada muestra de casos de estudio, se plantea como trabajo futuro incrementar la cantidad de casos a analizar, de forma tal de investigar la variabilidad temporal de los eventos desde una perspectiva interanual. Asimismo, el análisis de las proyecciones futuras en la hidroclimatología regional permitirá identificar la posible evolución de estos fenómenos y sus impactos en una región en la que la demanda por el recurso hídrico es cada vez mayor.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Argentina por la provisión de las observaciones de precipitación y caudal utilizadas en la investigación. Se agradece además al Climate Hazards Center y al Center for Hydrometeorology and Remote Sensing por la provisión de los datos de los productos satelitales CHIRPS y PERSIANN-CCS.

Contribución de autorías

Juan Antonio Rivera ha sido el coordinador de la investigación, generó el diseño del trabajo y elaboró el primer borrador del manuscrito. Georgina Marianetti trabajó en el procesamiento de la base de datos CHIRPS. Macarena Scaglione trabajó en el procesamiento de la base de datos PERSIANN-CCS. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Financiación

Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Análisis de eventos extremos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en el Gran Mendoza: Variabilidad espacio-temporal y forzantes atmosféricos asociados” financiado por la Universidad Juan Agustín Maza.

Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.

Bibliografía

- Abraham, M. T., Satyam, N., Pradhan, B., & Al-Amri, A. M. (2020). Forecasting of Landslides Using Rainfall Severity and Soil Wetness : A Probabilistic Approach for Darjeeling Himalayas. <https://doi.org/10.3390/w12030804>
- Arias, P. A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J. C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., ... van Oevelen, P. J. (2021). Hydroclimate of the Andes. Part II: Hydroclimate variability and sub-continental patterns. *Frontiers in Earth Science*, 8(February), 1–25. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.505467>
- Benotti, M. J., Stanford, B. D., & Snyder, S. A. (2010). Impact of Drought on Wastewater Contaminants in an Urban Water Supply. *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1196–1200. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0072>
- Boschat, G., Simmonds, I., Purich, A., Cowan, T., & Pezza, A. B. (2016). On the use of composite analyses to form physical hypotheses: An example from heat wave – SST associations. *Scientific Reports*, 6(1), 29599. <https://doi.org/10.1038/srep29599>
- Brown, T. J., & Hall, B. L. (1999). The Use of t Values in Climatological Composite Analyses. *Journal of Climate*, 12(9), 2941–2944. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2941:TUOTVI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2941:TUOTVI>2.0.CO;2)
- Calori, A., Santos, J. R., Blanco, M., Pessano, H., Llamedo, P., Alexander, P., & Torre, A. De. (2016). Ground-based GNSS network and integrated water vapor mapping during the development of severe storms at the Cuyo region (Argentina). *Atmospheric Research*, 176–177, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.002>
- Camisay, M. F., Rivera, J. A., Mateo, M. L., Morichetti, P. V., & Mackern, M. V. (2020). Estimation of integrated water vapor derived from Global Navigation Satellite System observations over Central-Western Argentina (2015–2018). Validation and usefulness for the understanding of regional precipitation events. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 197, 105143. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105143>
- Dahal, R. K., & Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100(3–4), 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.014>
- Díaz-Caravantes, R. E., Zuniga-Teran, A., Martín, F., Bernabeu, M., Stoker, P., & Scott, C. (2020). Urban water security: a comparative study of cities in the arid Americas. *Environment and Urbanization*, 32(1), 275–294. <https://doi.org/10.1177/0956247819900468>
- Eekhout, J. P. C., Hunink, J. E., Terink, W., & De Vente, J. (2018). Why increased extreme precipitation under climate change negatively affects water security. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5935–5946. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5935-2018>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Drapeau, G., Martinez, J. M., ... Espinoza, R. (2012). From drought to flooding: understanding the abrupt 2010–11 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environmental Research Letters*, 7(2), 024008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024008>
- Firoz, A. B. M., Nauditt, A., Fink, M., & Ribbe, L. (2018). Quantifying human impacts on hydrological drought using a combined modelling approach in a tropical river basin in central Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 547–565. <https://doi.org/10.5194/hess-22-547-2018>

- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gobierno de Mendoza (2021). Estadísticas Sociales 2021. Principales Indicadores Sociales. Retrieved from <https://www.mendoza.gov.ar/wp-content/uploads/sites/21/2021/02/Informe-Indicadores.pdf>
- Gobierno de Mendoza (2016). Rescataron a todos los vehículos que estaban varados en alta montaña. Retrieved from <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/rescataron-a-todos-los-vehiculos-que-estaban-varados-en-alta-montana/>
- Gomez, L., Canizo, B., Lana, B., Zalazar, G., Wuilloud, R., & Aravena, R. (2019). Hydrochemical processes, variability and natural background levels of Arsenic in groundwater of northeastern Mendoza, Argentina. *Journal of Iberian Geology*, 45(3), 365–382. <https://doi.org/10.1007/s41513-018-00099-0>
- Gomez, M. L., Aranibar, J., Wuilloud, R., Rubio, C., Martínez, D., Soria, D., ... Goirán, S. (2014). Hydrogeology and hidrogeochemical modeling in phreatic aquifer of NE Mendoza, Argentina. *Journal of Iberian Geology*, 40(3), 521–538. https://doi.org/10.5209/rev_JIGE.2014.v40.n3.43302
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hobouchian, M. P., Salio, P., García Skabar, Y., Vila, D., & Garreaud, R. (2017). Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes. *Atmospheric Research*, 190, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.006>
- Hong, Y., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., & Gao, X. (2004). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. *Journal of Applied Meteorology*, 43(12), 1834–1853. <https://doi.org/10.1175/JAM2173.1>
- Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J. J., ... Winder, M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5(5), 418–435. <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>
- INDEC (2010). Censo 2010. Retrieved from <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>
- IPCC (2022). Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Lauro, C., Moreiras, S. M., Junquera, S., Vergara, I., Tournal, R., Wolf, J., & Tutzer, R. (2017). Summer rainstorm associated with a debris flow in the Amarilla gully affecting the international Agua Negra Pass (30°20' S), Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 76(5), 213. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6530-z>
- Lee, S., Won, J.-S., Jeon, S. W., Park, I., & Lee, M. J. (2015). Spatial Landslide Hazard Prediction Using Rainfall Probability and a Logistic Regression Model. *Mathematical Geosciences*, 47(5), 565–589. <https://doi.org/10.1007/s11004-014-9560-z>
- Liebmann, B., & Smith, C. A. (1996). Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1275–1277.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., & Mauget, S. (2010). Intra- to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *Journal of Hydrometeorology*, 11(3), 822–831. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1191.1>
- Moreiras, S. M. (2005). Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslides*, 2(1), 53–59. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0046-4>
- Moreiras, S. M. (2006). Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina: Associated risk and future scenario. *Quaternary International*, 158(1), 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.028>
- Moreiras, S. M., Sepúlveda, S. A., Correas-gonzález, M., Lauro, C., Vergara, I., Jeanneret, P., ... Lara, M. (2021). Debris flows occurrence in the Semiarid Central Andes under Climate Change Scenario. *Geosciences*, 11(2)(43), 1–27. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020043>
- Moreiras, S. M., Vergara, I., Pont, D., & Araneo, D. (2018). Were merely storm-landslides driven by the 2015-2016 Niño in the Mendoza River valley ?, (January), 997–1014. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0959-3>

- Morera, S. B., Condom, T., Crave, A., Steer, P., & Guyot, J. L. (2017). The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Scientific Reports*, 7(1), 11947. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x>
- Muñoz, A. A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garreton, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J. A., ... LeQuesne, C. (2020). Water Crisis in Petorca Basin, Chile: The Combined Effects of a Mega-Drought and Water Management. *Water*, 12(3), 648. <https://doi.org/10.3390/w12030648>
- Neal, B., MacKellar, P., Davies, R. G., & Ampt, E. (2014). Drought response measures in dampening urban demand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 167(8), 435–441. <https://doi.org/10.1680/wama.12.00116>
- Pabón-Caicedo, J. D., Arias, P. A., Carril, A. F., Espinoza, J. C., Borrel, L. F., Goubanova, K., ... Villalba, R. (2020). Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8(March), 1–29. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061>
- Páez, M. S., Moreiras, S. M., Brenning, A., & Giambiagi, L. (2013). Flujos de detritos y aluviones históricos en la cuenca del río Blanco (32°55'-33°10' y 69°10'-69°25'), Mendoza. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 70(4), 488–498.
- Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Gariano, S. L., Melillo, M., Rossi, M., & Guzzetti, F. (2017). Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy. *Geomorphology*, 290(April), 39–57. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.031>
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8(May), 1–32. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Rivera, I. A., Cardenas, E. A., Espinoza-villar, R., Espinoza, J. C., & Filizola, N. (2019). Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira. <https://doi.org/10.3390/w11030514>
- Rivera, J. A., Marianetti, G., & Hinrichs, S. (2018). Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>
- Rivera, J. A., Otta, S., Lauro, C., & Zazulie, N. (2021a). A Decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in Water*, 3(April), 1–20. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544>
- Rivera, J., Lauro, C., & Otta, S. A. (2021b). Cuantificación del déficit hidrológico reciente en la región de Cuyo a partir de indicadores de caudales bajos. *Boletín de Estudios Geográficos*, 116, 23–44. Retrieved from <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/beg/article/view/5511>
- Ruxton, G. D. (2006). The unequal variance t-test is an underused alternative to Student's t-test and the Mann–Whitney U test. *Behavioral Ecology*, 17(4), 688–690. <https://doi.org/10.1093/beheco/ark016>
- Saez, J. L., Corona, C., Stoffel, M., & Berger, F. (2013). Climate change increases frequency of shallow spring landslides in the French Alps. *Geology*, 41(5), 619–622. <https://doi.org/10.1130/G34098.1>
- Santos, J. R., Norte, F., Moreiras, S., Araneo, D., & Simonelli, S. (2015). Predicción de episodios de precipitación que ocasionan aludes en el área montañosa del noroeste de la provincia de Mendoza, Argentina. *Geoacta*, 40(1), 65–75.
- SáyDSN (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación) (2015). Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/natc/argnc3s.pdf>
- Sepúlveda, S. A., Moreiras, S. M., Lara, M., & Alfaro, A. (2014). Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. *Landslides*, 12(1), 115–133. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0539-0>
- Slosson, J. R., Kelleher, C., & Hoke, G. D. (2021). Contrasting Impacts of a Hotter and Drier Future on Streamflow and Catchment Scale Sediment Flux in the High Andes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(8), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2021JF006182>
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., Levizzani, V., & De Roo, A. (2012). Validation of Satellite-Based Precipitation Products over Sparsely Gauged African River Basins. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1760–1783. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-032.1>
- Van Loon, A. F., Tjiedeman, E., Wanders, N., Van Lanen, H. A. J., Teuling, A. J., & Uijlenhoet, R. (2014). How climate seasonality modifies drought duration and deficit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(8), 4640–4656. <https://doi.org/10.1002/2013JD020383>

- Vélez, O. R., Fasciolo, G. E., & Bertranou, A. V. (2002). Domestic wastewater treatment in waste stabilization ponds for irrigation in Mendoza, Argentina: policies and challenges. *Water Science and Technology*, 45(1), 127–132. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0017>
- Vergara, I., Garreaud, R., Moreiras, S., Araneo, D., & Beigt, D. (2022). Exploring the association between landslides and fluvial suspended sediment in a semi-arid basin in central Chile. *Geomorphology*, 402, 108129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108129>
- Vergara, I., M. Moreiras, S., Araneo, Di., & Garreaud, R. (2020). Geo-climatic hazards in the eastern subtropical Andes: Distribution, climate drivers and trends. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1353–1367. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1353-2020>
- Vich, A. I. J., Rodríguez, M. L., Lauro, C., & Vaccarino, E. (2014). Proposals for Flashflood Management in Western Argentina . Case Study : The Metropolitan Area of Greater Mendoza, (March), 37–48.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., ... Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Wright, T., & Jacobs, H. E. (2016). Potable water use of residential consumers in the cape town metropolitan area with access to groundwater as a supplementary household water source. *Water SA*, 42(1), 144–151. <https://doi.org/10.4314/wsa.v42i1.14>