



Universidad de Concepción

RÍOS ATMOSFÉRICOS Y SU IMPACTO EN LA HIDROLOGÍA

Lucía Scaff / Mario Lillo Saavedra
Ricardo Oyarzún Lucero / Angélica Jara Ríos



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Ríos atmosféricos y su impacto en la hidrología.

Lucía Scaff, Mario Lillo Saavedra,

Ricardo Oyarzún Lucero y Angélica Jara Ríos.

Enero 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

RÍOS ATMOSFÉRICOS Y SU IMPACTO EN LA HIDROLOGÍA

Lucía Scaff / Mario Lillo Saavedra
Ricardo Oyarzún Lucero / Angélica Jara Ríos

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Lucía Scaff

Ingeniera Civil
PhD, University of Saskatchewan.
Investigadora Postdoctoral CRHIAM,
Universidad de Concepción.



Mario Lillo Saavedra

Dr. en Informática,
Universidad Politécnica de Madrid.
Profesor Titular de la
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Asociado CRHIAM.



Ricardo Oyarzún Lucero

PhD en Engineering Science,
Washington State University, USA.
Profesor Titular
Departamento de Ingeniería de Minas,
Facultad de Ingeniería, Universidad de la Serena.
Investigador Asociado CRHIAM.



Angélica Jara Ríos

Astrónoma
Mg (c) Meteorología y Climatología,
Universidad de Chile.

RESUMEN

En este documento se presenta un resumen descriptivo y simplificado de lo que se conoce hasta el momento en la literatura científica de los ríos atmosféricos, y cómo se ha utilizado en grupos interdisciplinarios para mejorar el pronóstico del tiempo y todo lo que ello implica en el manejo temprano de eventos extremos, y la flexibilidad de la operación de embalses. Además, se presenta una visión de hacia dónde va este tema de investigación y cómo se podría incorporar como una herramienta beneficiosa en términos de gestión en Chile. Permitiendo así contribuir a dar seguridad hídrica a las zonas potencialmente afectadas (ya sea en forma favorable o desfavorable) por su ocurrencia.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y los eventos meteorológicos extremos representan graves amenazas para los sistemas agrícolas, principalmente en lo que a disponibilidad hídrica se refiere. Así entonces, se pone en entredicho nuestra capacidad de alcanzar la seguridad alimentaria tanto a nivel local como mundial antes de 2030, como lo plantea la Organización de las Naciones Unidas en sus Objetivos de Desarrollo Sostenible. Hoy en día el cambio climático desafía los avances logrados en materia de desarrollo tecnológico de los sistemas agropecuarios y agroalimentarios en las últimas décadas. Por ello, se requiere un nuevo enfoque que oriente las adaptaciones necesarias para abordar de manera conjunta la seguridad alimentaria y crear sistemas resilientes.

En particular, en lo que se refiere a recursos hídricos, en la última década se han visto variaciones en la precipitación de la zona centro-sur de Chile, las que pueden ser parcialmente atribuidas al cambio climático, la megasequía, y a otros factores que requieren más estudios (Garreaud *et al.*, 2019). Se necesita, por ejemplo, mejorar el entendimiento de cuánto, cómo y dónde cae lluvia y nieve, en particular en zonas de alta montaña, para disminuir la incertidumbre asociada a la disponibilidad de recursos hídricos.

Esto adquiere una especial relevancia si se considera que, tanto la lluvia como las otras componentes del ciclo hidrológico, han mostrado fuertes cambios en su régimen de lo que nosotros conocemos como normal, y es-

tán ambos proyectados a seguir cambiando bajo un clima más cálido. En este contexto, la incorporación de un mejor entendimiento de fenómenos meteorológicos relacionados con la generación de precipitación es necesario para el avance hacia pronósticos certeros y oportunos, permitiendo así una efectiva planificación y adaptación. Así entonces, la caracterización de los eventos de precipitación asociados a los llamados ríos atmosféricos adquiere especial interés.

Un río atmosférico es una región en el aire que contiene una alta cantidad de humedad y que es transportada con fuertes vientos. Su entendimiento ha permitido en variadas regiones del mundo mejorar el pronóstico de eventos hidrometeorológicos extremos y estimar su aporte a la disponibilidad hídrica (Ralph *et al.*, 2017). El fenómeno de ríos atmosféricos fue inicialmente publicado por Zhu and Newell en el año 1998 en su artículo *A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers* (Zhu & Newell, 1998), pero solo han cobrado una real popularidad en los últimos 20 años (Figura 1). Este aumento en su notoriedad se debe al incremento de nuestra capacidad actual para poder modelar y predecir mejor este fenómeno.

Los ríos atmosféricos pueden tener impactos tanto positivos como negativos en el medio ambiente y la sociedad. Los impactos positivos tienen que ver con el aporte a los recursos hídricos, pues son los que proveen el agua de forma eficiente a alguno de los sistemas frontales que llegan a las costas chilenas. Por ejemplo, en Chile entre un 45% y un 55% del total de agua caída entre la región del Biobío y Aysén son aportes de ríos atmosféricos (Viale *et al.*, 2018). Por otra parte, se pueden producir efectos negativos cuando un sistema frontal se intensifica y se acopla con un río atmosférico muy persistente, desencadenando un evento extremo que puede ocasionar crecidas en los ríos, anegaciones por lluvias intensas y posibles zonas de deslizamiento de tierras en lugares de montaña muy empinados.

Existen ejemplos de casos documentados como la crecida en la represa Oroville el año 2017 en el estado de California, E.E.U.U., causada por la alta intensidad de lluvias relacionada con un río atmosférico (Ralph *et al.*, 2019). Otro ejemplo se encuentra en la literatura científica en el Ártico y la Antártica. Los ríos atmosféricos amplifican los periodos cálidos en el Ártico (Hegyi & Taylor, 2018), aumentando la pérdida de masa de hielo y la pérdida de masa en la Antártica por los vientos de sotavento que se intensifican luego de su paso (Bozkurt *et al.*, 2018; Wille *et al.*, 2019).

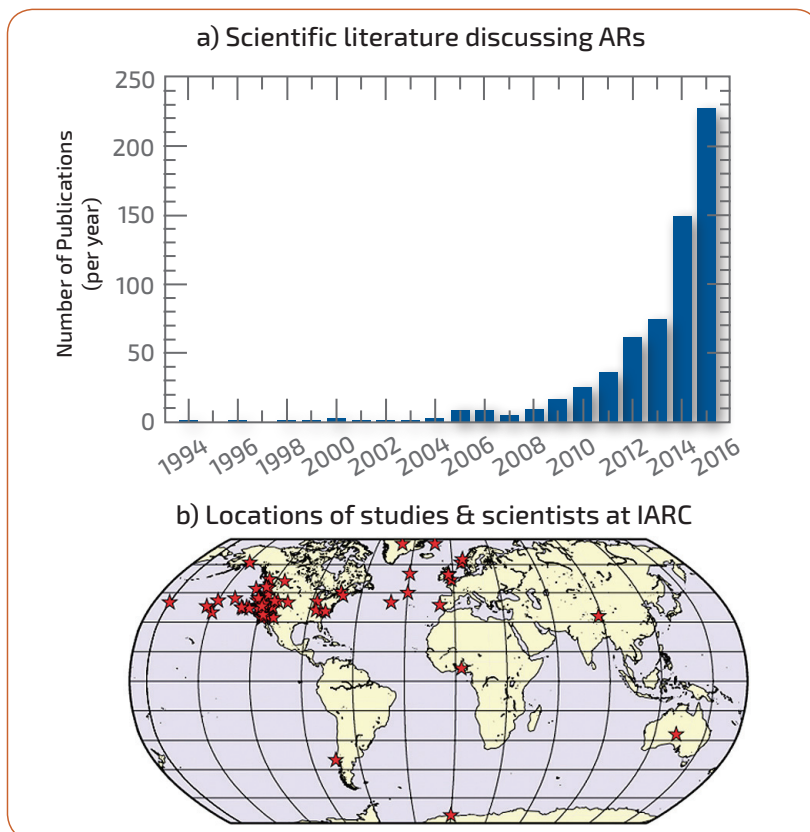


Figura 1.

Número de publicaciones científicas por año que discuten la presencia de ríos atmosféricos (a) y la ubicación de los sitios de estudios y de los investigadores que se dedican a esta área de investigación (b).
Fuente: Ralph, F. M., *et al.*, (2017).

¿QUÉ SON LOS RÍOS ATMOSFÉRICOS?

La mejor forma de imaginar un río atmosférico es pensar en un río en el aire que, en vez de llevar agua líquida, lleva agua en estado gaseoso, más conocido como vapor de agua (Figura 2). Así entonces, los ríos atmosféricos son un corredor de humedad muy eficiente, que logra transportar agua en forma de vapor desde el océano, por cientos de kilómetros hasta los continentes. En el caso de Chile, los ríos atmosféricos vienen desde el Océano Pacífico, y normalmente tocan tierra en la ladera Oeste de los Andes entre la zona centro y sur.



Figura 2.

Recreación gráfica de un río atmosférico en la costa del estado de California. Fuente: Publicado por la revista *Scientific American* (Ralph, 2022). Crédito de la imagen a Mark Ross.

¿POR QUÉ SON IMPORTANTES EN CHILE CENTRO-SUR?

A lo largo de la costa del Pacífico la llegada de los ríos atmosféricos es más frecuente entre los 38° y 50°S, ocurriendo un promedio entre 35 a 40 veces por año. Su frecuencia decrece rápidamente hacia el sur y norte de este rango de latitudes, así como al este de los Andes (Figura 3, Viale *et al.*, 2018).

En ocasiones los sistemas frontales que llegan a la zona centro-sur de Chile se asocian a ríos atmosféricos, lo que se observa particularmente en los meses de invierno meteorológico (junio, julio y agosto) al norte de 43°S (a modo de referencia, el sur de la Región de Los Lagos está a 43°S aproximadamente), tal como se observa en la Figura 3. Lo interesante es que cuando los frentes se asocian a ríos atmosféricos, la precipitación media diaria es 2 a 3 veces mayores que en otro tipo de tormentas. La contribución de lluvia promedio de los ríos atmosféricos depende de la región y el mes, siendo mayor durante la temporada de invierno (Figura 4).

Los ríos atmosféricos que tocan tierra, a menudo conducen a fuertes precipitaciones especialmente en regiones costeras montañosas, donde los efectos orográficos intensifican en gran medida la precipitación, causando, en algunas ocasiones, inundaciones y deslizamientos de tierra.

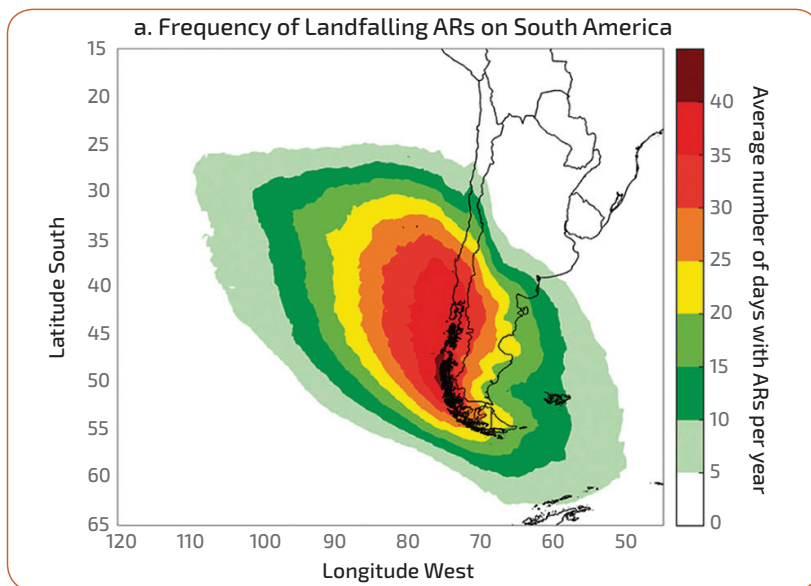


Figura 3.

Conteo de los ríos atmosféricos que tocan tierra en Sudamérica entre el 2001 y el 2016. Fuente: Viale *et al.*, (2018).

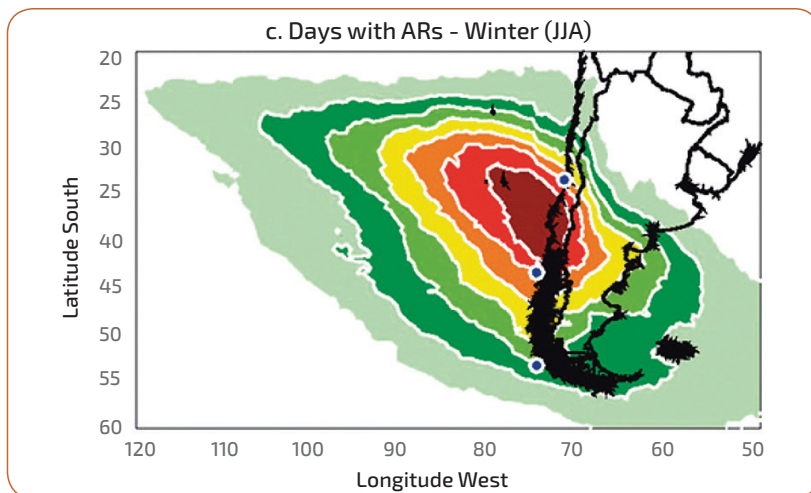


Figura 4.

Conteo de los ríos atmosféricos que tocan tierra en Sudamérica en invierno (junio, julio y agosto). Los puntos azules son para referencia de Santiago a 33.5°S, Isla de Chiloé a 43.5°S y Punta Arenas a 53.5°S. Fuente: Viale *et al.*, (2018).

RELACIÓN CON LA HIDROLOGÍA

En las regiones subtropicales (más al norte o sur de los trópicos) y de latitudes medias (alrededor de los 30-40°S), aproximadamente la mitad de los eventos con tasas de precipitación bien por encima del promedio ocurren en condiciones de ríos atmosféricos (Saavedra *et al.*, 2020; Viale *et al.*, 2018). La mayoría de ellos producen precipitaciones beneficiosas, pero también inducen peligros como inundaciones y remociones en masa producto de las precipitaciones extremas. Los ríos atmosféricos se caracterizan por ser transportadores de abundante humedad, por lo que, en presencia de terrenos elevados, como la cordillera de la Costa o la cordillera de Los Andes, el vapor transportado asciende, se condensa, y produce nubosidad y precipitación.

Beneficio: Recursos hídricos

Un aspecto beneficioso de los ríos atmosféricos es que, al ser considerados en la operación de embalses, permiten aumentar la flexibilidad en la operación de estos sistemas, pues integran un pronóstico más certero previo a un evento de precipitaciones. Esta relación entre la mejora del pronóstico y el manejo de los recursos hídricos lleva entonces a una gestión más eficiente del agua a lo largo de la temporada de acumulación. La implementación de esto es posible por el trabajo interdisciplinario de los diferentes actores que participan en el desarrollo del pronóstico, su operación y la comunicación directa con los operadores de embalses. Este sistema se ha implementado en variados puntos a lo largo del estado de California en EE.UU. Un ejemplo claro es en la cuenca del río Ruso en el lago Mendocino, al norte de la ciudad de San Francisco, donde la operación ha sido mejorada (Sonoma Water, 2020) a partir de su interacción en tiempo real con las oficinas de pronósticos de ríos atmosféricos a partir de la perspectiva FIRO (por sus siglas en inglés *Forecast-Informed Reservoir Operations*).

Los beneficios han sido claros y evidentes, no sólo en el control más preciso de crecidas, sino que también en atenuar las señales de periodos de sequías. Más aún, en el embalse *New Bullards Bar* en la cuenca del río Yuba, se planea construir un vertedero de crecidas para controlar eventos relacionados con ríos atmosféricos y así mejorar la flexibilidad de operación del embalse (Yuba Water, 2022).

Otro beneficio que tiene directa relación con el estudio de los ríos atmosféricos ocurre cuando están asociados con un frente frío, pues la

precipitación se presenta después de que desciende la temperatura de la superficie. La baja altura de la isoterma 0°C (la línea imaginaria que divide la zona donde la precipitación es líquida de aquella donde es sólida) sería beneficiosa para aumentar la acumulación de nieve en la cordillera durante la tormenta. Esta acumulación de nieve aporta a la reserva de agua en las cuencas para ser utilizada en los meses de verano cuando ocurre el derretimiento de la nieve.

Un ejemplo de este tipo de eventos ocurrió en la zona centro de Chile en julio del año 2022 donde una serie de ríos atmosféricos impactaron en la zona centro-sur (ejemplo, Figura 5b). Los eventos de precipitación tuvieron un aporte positivo a la acumulación de nieve en la zona centro de Chile (Figura 6) con un incremento en la altura del manto de nieve de 78% en promedio (DGA 2022). Aunque estos eventos influenciaron favorablemente en los recursos hídricos, también ocurrieron interrupciones en la conectividad de la parte alta de la región del Biobío y daños en la infraestructura vial (Mesa de noticias de El Mostrador, 2022).

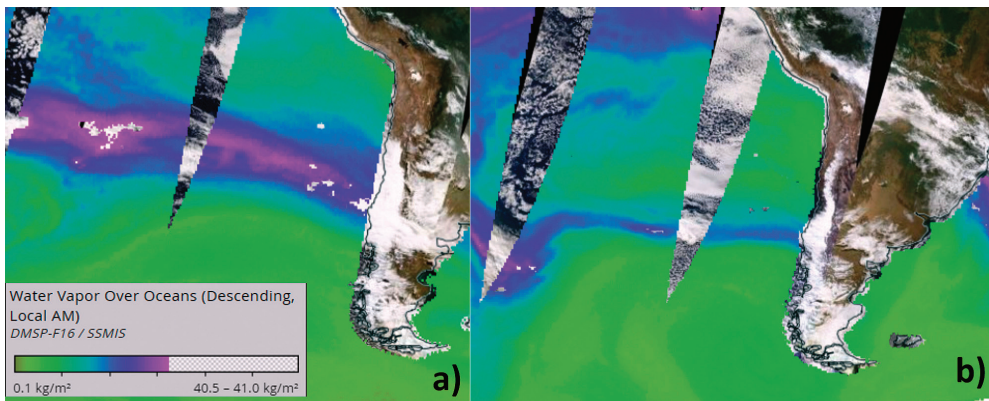


Figura 5.

Ejemplos de ríos atmosféricos que tocaron tierra en las costas chilenas en la zona centro - sur (a) 11 de julio de 2006, con desbordes del río Biobío en el sector de Hualqui y de los ríos Andalién y del estero Nonquén en Concepción, Región del Biobío; y (b) 12 de julio de 2022, con aportes al manto de nieve y desborde de los ríos Pichilo y Laraquete en la comuna de Arauco, Región del Biobío. El color indica el valor de vapor de agua que representa al río atmosférico. Fuente: Worldview Nasa.

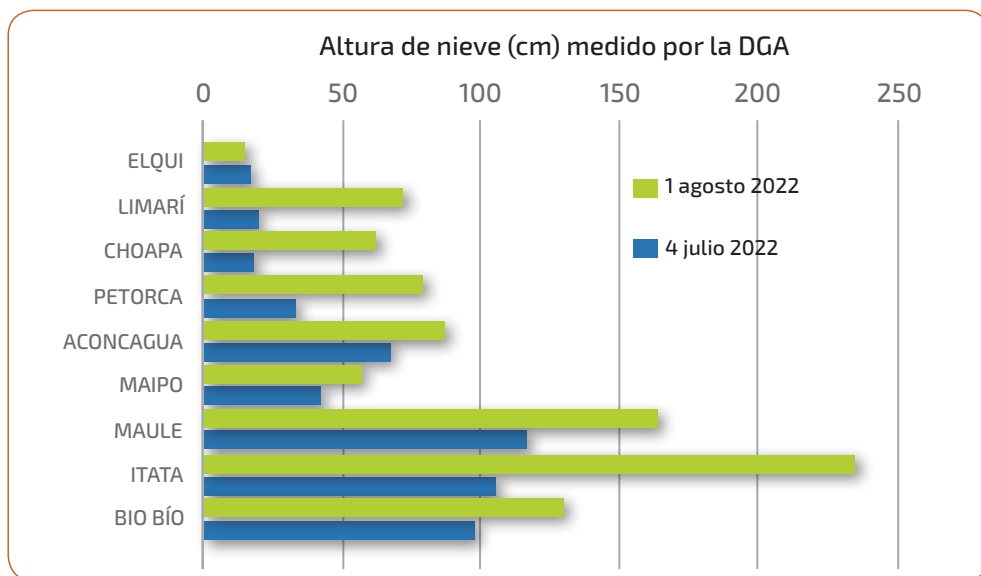


Figura 6.

Cambio en la altura del manto de nieve desde la región de Coquimbo al Biobío. Fuente: DGA.

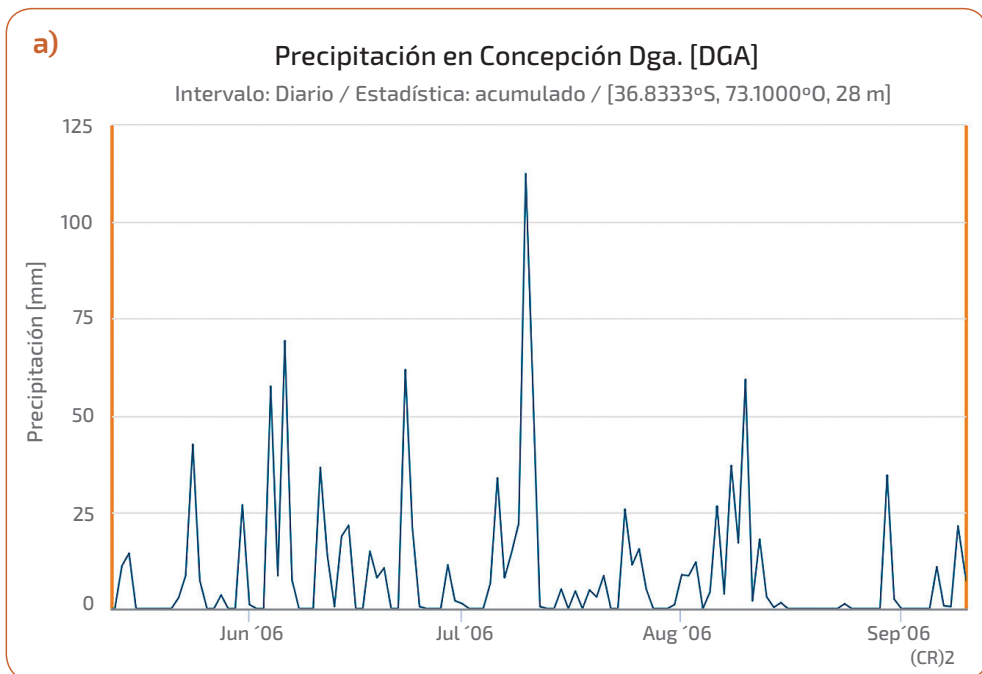
Problema: Eventos extremos

Los ríos atmosféricos no sólo juegan un rol crucial en los recursos hídricos, sino que también pueden provocar fuertes lluvias costeras e inundaciones. Cuando los ríos atmosféricos impactan en las regiones montañosas, con un alto contenido de vapor de agua, pueden producir fuertes precipitaciones orográficas, lo que genera un escenario propicio para crear inundaciones y/o deslizamiento de tierras. En Chile, la mayoría de estos eventos intensos de ríos atmosféricos se concentran en el invierno, duran entre 2 y 3 días, y abarcan un rango latitudinal de aproximadamente 2° (Valenzuela & Garreaud, 2019). Los eventos de precipitación extrema, si bien pueden ocurrir en todas las latitudes, aumentan cuando el terreno es empinado debido a la eficiente producción de precipitación orográfica (típica a lo largo de Chile).

Otro factor por considerar en el desencadenamiento de un evento de crecida o deslizamiento de tierra es la temperatura en que se desarrolla la tormenta. Si la precipitación ocurre en condiciones de temperaturas cálidas,

la línea de temperatura a 0°C estará situada más alto de lo usual, lo que aumentará la superficie que recibe lluvia (Garreaud, 2013), en zonas donde usualmente se esperarían nieve. Esto, puede ocasionar crecidas abruptas de caudales (con posteriores desbordes de los ríos a lo largo de sus cauces) y aluviones o deslizamiento de tierras en la precordillera.

El impacto de estos eventos en las comunidades y ciudades va desde cortes de suministros básicos, daños en la infraestructura de transporte y habitacional, hasta pérdidas de vidas humanas. Un ejemplo de este tipo de eventos ocurrió el invierno del 2006 (Figura 5a). Entre el 10 y el 13 de julio del 2006 la línea de temperatura de 0°C estaba más alta de lo normal (evento cálido) y dejó un total de precipitaciones de 400 mm en 48 horas en la Región del Biobío (Figura 7a). La apertura de los embalses Pangue y Ralco para el control de crecidas (Gómez, 2006) generó una respuesta rápida en los caudales de los ríos (Figura 7b). Este evento provocó interrupción de servicios básicos, viviendas anegadas, destrucción de cultivos, desplazamientos de tierra, desbordes de ríos y canales. Desafortunadamente, este evento dejó 22 fallecidos en la Región del Biobío y un gasto en rescate y reparación inicial de aproximadamente \$1.200.000.000 pesos chilenos (ONEMI & Departamento de protección civil, 2006).



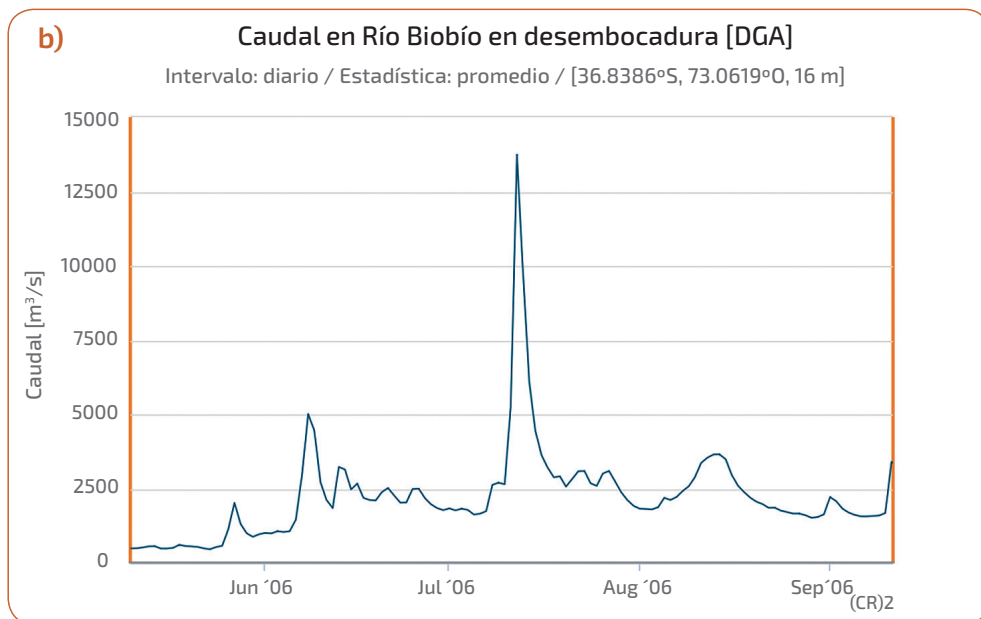


Figura 7.

Evolución de a) la precipitación en Concepción y b) el caudal del río Biobío a la llegada de un río atmosférico en la zona centro-sur de Chile en el invierno del 2006. Fuente CR2.

PROYECCIÓN Y DESAFÍOS

Las proyecciones de cambio climático concuerdan en un clima con menos precipitaciones (30% menos a finales del siglo XXI) y mayores temperaturas (4° más a finales del siglo XXI) en Sudamérica (IPCC AR6, 2022). El calentamiento global lleva a un aumento de la capacidad atmosférica de retener humedad (relación de Clausius-Clapeyron) y a una variación en la circulación sinóptica. Las proyecciones indican un corrimiento hacia los polos de los ríos atmosféricos en conjunto con el mismo desplazamiento que sufrirían los sistemas frontales (Ma *et al.*, 2020).

A nivel global, habrá alrededor de 10% menos de ríos atmosféricos (frecuencia), pero serán más largos, anchos y más intensos si consideramos un escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero (Espinoza *et al.*, 2018). En Sudamérica, sus impactos se concentrarán en la zona centro sur de Chile, con un consenso entre los modelos de aumento de las precipitaciones extremas (Figura 8, Payne *et al.*, 2020), y con incertidumbre en el impacto que tendrán sobre otro tipo de eventos extremos normalmente analizados (ej. el derretimiento repentino de nieve y hielo y eventos de crecidas en los ríos). Este escenario futuro da algunas directrices sobre lo que se debe esperar en torno al impacto de los ríos atmosféricos, y dónde se deberían centrar los esfuerzos en cuanto a la preparación para abordar eventos extremos y el manejo de los recursos hídricos. Tanto el desarrollo de investigación, como el traspaso de información efectiva para el manejo de los recursos, ha mostrado un beneficio significativo en algunas cuencas en California que vale la pena explorar y proyectar en Chile centro-sur.

La mejora de la certeza del pronóstico de precipitaciones es el objetivo para perfeccionar, a su vez, el pronóstico de caudales y eventos extremos. Sin embargo, el avance en esta materia ha sido lento en las últimas décadas. Los ríos atmosféricos, definidos científicamente por ser un máximo relativo del transporte de humedad en la atmósfera, se pueden predecir con mejor certeza que la precipitación (Lavers *et al.*, 2016).

Si contamos con información más precisa de un río atmosférico que se acerca al continente, se podría entonces confiar en la habilidad para dimensionar con días y/o semanas de anticipación la precipitación, y así la estimación del caudal o acumulación de nieve. Este tipo de mejoras en el estudio de su pronóstico ha llevado a una flexibilización de la operación de embalses, y así al manejo más eficiente de los recursos hídricos, como fue explicado anteriormente. A nivel global, el interés por la mejora del pronóstico extendido (de semanas a meses) y al pronóstico estacional es clave para continuar, y fenómenos como los ríos atmosféricos son los que dan buenas señales de contribuir en este avance (DeFlorio *et al.*, 2019).

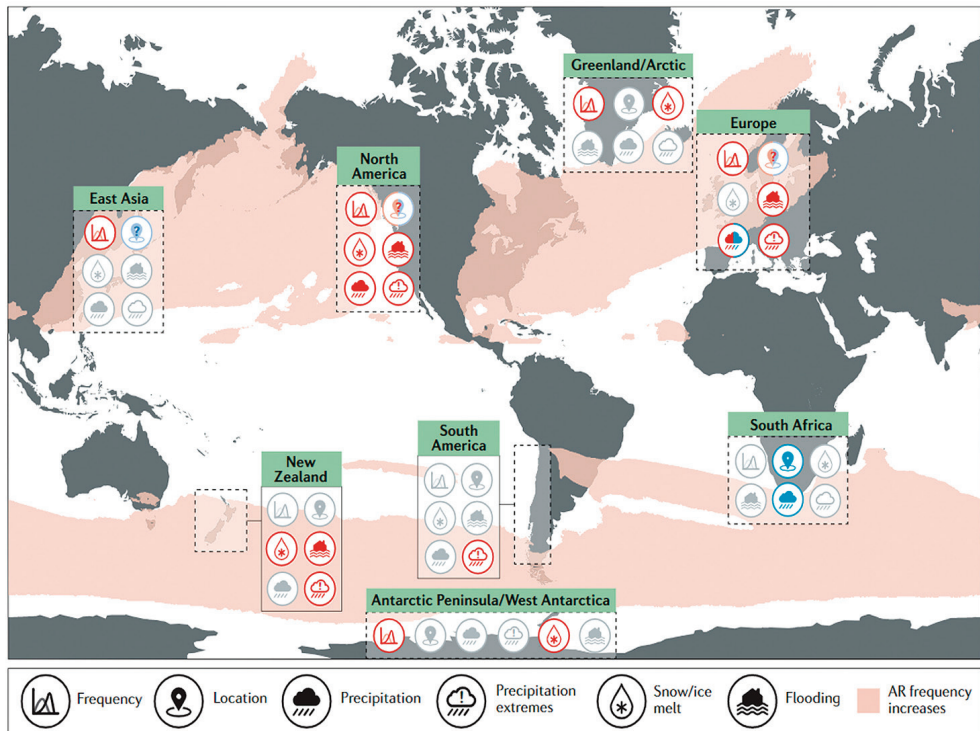


Figura 8.

Cambios proyectados e impactos de los ríos atmosféricos a escala global. Los símbolos rojos muestran aumentos y los azules reducción. Los símbolos grises representan que el cambio es incierto. Fuente: Payne *et al.*, (2020).

CONCLUSIONES

El impacto del estudio de los fenómenos atmosféricos en la mejora del pronóstico meteorológico ha sido gradual en las últimas décadas, creando beneficios en la respuesta temprana de diversos tipos de problemáticas relacionadas con los recursos hídricos. Mirando hacia el futuro, se podrían priorizar dos líneas de trabajo para seguir avanzando en Chile.

Primero, la integración acelerada de los avances científicos en el pronóstico meteorológico y su uso dinámico en la gestión de recursos hídricos, desarrollando enfoques interdisciplinarios como FIRO. Y segundo, el aumento de la inversión en monitoreo meteorológico para tener la habilidad de hacer simulaciones de pronóstico con datos iniciales confiables y que abarquen una cobertura significativa de lo que se busca predecir. Es importante considerar que, tanto para un análisis efectivo de eventos extremos de lluvia como la flexibilización de la gestión de recursos hídricos, se debe estudiar de modo específico en cada caso, considerando el contexto climático, geográfico y social de cada región.

REFERENCIAS

- Bozkurt, D., Rondanelli, R., Marín, J. C., & Garreaud, R. 2018. Foehn Event Triggered by an Atmospheric River Underlies Record-Setting Temperature Along Continental Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(8), 3871–3892.
- DeFlorio, M. J., Waliser, D. E., Ralph, F. M., Guan, B., Goodman, A., Gibson, P. B., Asharaf, S., Monache, L. D., Zhang, Z., Subramanian, A. C., Vitart, F., Lin, H., & Kumar, A. 2019. Experimental Subseasonal-to-Seasonal (S2S) Forecasting of Atmospheric Rivers Over the Western United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(21), 11242–11265.
- Dirección General de Aguas, 2022: Informe Hidrometeorológico Semanal. <https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Paginas/default.aspx>
- Espinoza, V., Waliser, D. E., Guan, B., Lavers, D. A., & Ralph, F. M. 2018. Global Analysis of Climate Change Projection Effects on Atmospheric Rivers. *Geophysical Research Letters*, 45(9), 4299–4308.
- Garreaud, R. 2013. Warm Winter Storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515–1534.
- Gómez, P., E. M. en I. 2006. Desborde del Bío-bío causa estragos en la Octava Región. <https://www.emol.com/noticias/nacional/2006/07/12/224940/desborde-del-bio-bio-causa-estragos-en-la-octava-region.html>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso-Águila, D. 2019. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A Climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, June, joc.6219.
- Hegyi, B. M., & Taylor, P. C. 2018. The Unprecedented 2016–2017 Arctic Sea Ice Growth Season: The Crucial Role of Atmospheric Rivers and Longwave Fluxes. *Geophysical Research Letters*, 45(10), 5204–5212.
- IPCC AR6, 2022. Regional fact sheet – Central and South America. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/>
- IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Central_South_America.pdf

- Lavers, D. A., Waliser, D. E., Ralph, F. M., & Dettinger, M. D. 2016. Predictability of horizontal water vapor transport relative to precipitation: Enhancing situational awareness for forecasting western U.S. extreme precipitation and flooding. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 2275–2282.
- Ma, W., Chen, G., & Guan, B. 2020. Poleward Shift of Atmospheric Rivers in the Southern Hemisphere in Recent Decades. *Geophysical Research Letters*, 47(21), 1–11.
- Mesa de noticias de El Mostrador, 2022. Reportan desborde de ríos en el Bio Bío y personas aisladas por la nieve en La Araucanía producto del sistema frontal. <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2022/07/12/reportan-desborde-de-rios-en-el-bio-bio-y-personas-aisladas-por-la-nieve-en-la-araucania-producto-del-sistema-frontal/>
- ONEMI, & Departamento de protección civil. 2006. *Informe Sistema Frontal 10 al 13 de Julio 2006*.
- Payne, A. E., Demory, M. E., Leung, L. R., Ramos, A. M., Shields, C. A., Rutz, J. J., Siler, N., Villarini, G., Hall, A., & Ralph, F. M. 2020. Responses and impacts of atmospheric rivers to climate change. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(3), 143–157.
- Ralph, M., 2022. Better Atmospheric River Forecasts Are Giving Emergency Planners More Time to Prepare for Flooding. <https://www.scientificamerican.com/article/better-atmospheric-river-forecasts-are-giving-emergency-planners-more-time-to-prepare-for-flooding/>
- Ralph, F. M., Dettinger, M., Lavers, D., Gorodetskaya, I. v., Martin, A., Viale, M., White, A. B., Oakley, N., Rutz, J., Spackman, J. R., Wernli, H., & Cordeira, J. 2017. Atmospheric rivers emerge as a global science and applications focus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(9), 1969–1973.
- Ralph, M., F., Rutz, J. J., Cordeira, J. M., Dettinger, M., Anderson, M., Reynolds, D., Schick, L. J., & Smallcomb, C. 2019. A scale to characterize the strength and impacts of atmospheric rivers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(2), 269–289.

- Saavedra, F., Cortés, G., Viale, M., Margulis, S., & McPhee, J. 2020. Atmospheric Rivers Contribution to the Snow Accumulation Over the Southern Andes (26.5° S–37.5° S). *Frontiers in Earth Science*, 8(July), 1–11.
- Sonoma Water, 2020. Forecast Informed Reservoir Operations - A Flexible and Adaptive Water Management Approach. sonomawater.org/firo
- Valenzuela, R. A., & Garreaud, R. D. 2019. Extreme daily rainfall in central-southern Chile and its relationship with low-level horizontal water vapor fluxes. *Journal of Hydrometeorology*, 20(9), 1829–1850.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., & Ralph, F. M. 2018. Impacts of atmospheric rivers on precipitation in Southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671–1687.
- Wille, J. D., Favier, V., Dufour, A., Gorodetskaya, I. v., Turner, J., Agosta, C., & Codron, F. 2019. West Antarctic surface melt triggered by atmospheric rivers. *Nature Geoscience*, 12(11), 911–916.
- Yuba Water, 2022. Atmospheric River Control Spillway at New Bullards Bar Dam. <https://www.yubawater.org/252/ARC-Spillway-at-New-Bullards-Bar-Dam>
- Zhu, Y., & Newell, R. E. 1998. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*, 126(3), 725–735.



Universidad de Concepción

RÍOS ATMOSFÉRICOS Y SU IMPACTO EN LA HIDROLOGÍA



Serie Comunicacional CRHIAM