



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Análisis de los ríos atmosféricos en la costa de Chile y su influencia en las precipitaciones extremas utilizando algoritmo de detección de imágenes

Memoria de Título presentada por

Benjamín Carlos Diego Bernal González

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Joaquín Meza Araya

AGOSTO, 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

**ANÁLISIS DE LOS RÍOS ATMOSFÉRICOS EN LA COSTA DE CHILE Y
SU INFLUENCIA EN LAS PRECIPITACIONES EXTREMAS UTILIZANDO
ALGORITMO DE DETECCIÓN DE IMÁGENES**

AUTOR:

BENJAMÍN CARLOS DIEGO BERNAL GONZÁLEZ

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de
INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Profesor Guía:

Nombre Miembro 1 Comisión:

Nombre Miembro 2 Comisión:

Valparaíso, Chile, Agosto de 2024

ANÁLISIS DE LOS RÍOS ATMOSFÉRICOS EN LA COSTA DE CHILE Y SU INFLUENCIA EN LAS PRECIPITACIONES EXTREMAS UTILIZANDO ALGORITMO DE DETECCIÓN DE IMÁGENES

Benjamín Bernal¹, Joaquín Meza²

1 Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Los ríos atmosféricos (AR) son estructuras estrechas y alargadas que se mueven en la atmósfera y transportan grandes cantidades de vapor de agua. A menudo, estos ríos atmosféricos se encuentran con terrenos elevados, provocando un ascenso del vapor de agua. En consecuencia, este se condensa y genera precipitaciones, las que pueden ser beneficiosas o inducir peligros como inundaciones o deslizamiento de tierra. En el caso de Chile, los AR son responsables de cerca de la mitad de las precipitaciones anuales y de los eventos de precipitaciones extremas (Viale et al., 2018).

Además, el aumento de las temperaturas a nivel global producto del cambio climático es un problema que ha cobrado cada vez más relevancia en los últimos años. En el caso de los AR, se ha identificado que el aumento de las temperaturas globales puede tener un efecto significativo en sus características. En particular, en el futuro se espera que haya una disminución del 10 % en la cantidad de AR en el planeta. Sin embargo, esta disminución será compensada por AR más largos, anchos e intensos (Espinoza et al., 2018).

Es por esta razón que resulta fundamental entender la influencia de los AR en los eventos climáticos extremos en Chile. Para abordar esta problemática, se utilizará el algoritmo de detección de imágenes propuesto por Mundhenk et al (2016) y se adaptará a las condiciones de la costa chilena utilizando datos de Reanálisis Climático del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de los Estados Unidos (CFSR). Una vez detectados, se estudiará su influencia con los eventos de precipitaciones extremas. Con esto, se espera explorar la relación entre los AR y eventos de precipitaciones extremas y así mejorar la gestión de los recursos hídricos del país

Palabras claves: Ríos atmosféricos, Precipitaciones extremas, Cambio climático

1. Introducción

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta el mundo actualmente, según lo establece el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en su informe de Desarrollo Humano (2007-2008). El cambio climático pone en riesgo a todos los seres vivos que habitan la Tierra y el mar, aumentando las temperaturas, modificando los patrones de precipitación y creando un alza en los niveles del mar (COP25 et al., 2019), (IPCC, 2007a y 2013). Estos cambios ponen en grave peligro el bienestar social y los ecosistemas (Parry, 2007).

Una de las principales causas del cambio climático es el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), el cambio en el uso del suelo mediante la deforestación y el deterioro del bosque nativo (CONAMA, 2007), entre otros. Los cambios en la concentración de los GEI conllevan a cambios globales en la ocurrencia de eventos extremos como huracanes, inundaciones y sequías (Houghton, 1996). Para el caso de las precipitaciones extremas, existe una gran incertidumbre y heterogeneidad en sus proyecciones. Sin embargo, según el IPCC (2013), se espera un incremento en la cantidad y frecuencia de los eventos climáticos extremos.

Chile, caracterizado por su complejo escenario geográfico y alta variabilidad climática, se encuentra altamente expuesto a los efectos del cambio climático. De acuerdo con el artículo 4.8 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), esta vulnerabilidad del país se deriva de varios factores. Entre ellos se encuentran la presencia de áreas bajas en la costa, la existencia de regiones áridas y forestales, la susceptibilidad a desastres naturales, la presencia de zonas propensas a sequías, así como la presencia de ecosistemas montañosos, como la cordillera de los Andes. Es por ello por lo que Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático (CEPAL, 2012).

En particular, en la región centro-sur de Chile, se observa un proceso gradual de desertificación. Según Dai (2011), aproximadamente el 25 % de la prolongada sequía entre 2010 y 2015 podría estar relacionada con el cambio climático. Esta sequía, la más larga desde mediados del siglo pasado, ha provocado déficits de precipitación que van desde el 25 % hasta el 45 % (Garreaud et al., 2017). Además, las proyecciones de cambio climático concuerdan en un clima con menos precipitaciones, entre un 30 % menos a finales del siglo XXI y mayores temperaturas, alrededor de 4° más a finales del siglo XXI en Sudamérica (IPCC AR6, 2022). Los impactos continuos de esta sequía han causado pérdidas en diversos sectores productivos del país y han afectado profundamente a los ecosistemas locales.

Ante este panorama, se hace necesario explorar el impacto del cambio climático considerando la ubicación espacial, temporal y magnitud de las precipitaciones, con el fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos. Bajo este contexto, un mejor entendimiento de los fenómenos meteorológicos relacionados con los eventos de precipitaciones extremas es indispensable para obtener pronósticos climáticos más precisos.

Los eventos de precipitaciones extremas, según la dirección meteorológica de Chile se definen como fenómenos meteorológicos de poca frecuencia y que su ocurrencia es superior al percentil 90 de la estimación de la función de densidad de probabilidad observada. Estos eventos extremos pueden ser considerados una de las amenazas climáticas más significativas en las zonas afectadas, influyendo fuertemente en la productividad agrícola (Warner et al., 2012), (Lamjiri et al., 2017), Núñez y Vargas (1998), en la infraestructura, en la población vulnerable, la biodiversidad, entre otros.

Los eventos extremos de precipitación varían dependiendo de la ubicación geográfica (Bell et al., 2004). Las proyecciones de los indicadores de precipitación, son coherentes en apreciar que para el periodo 2071-2100, la precipitación media diaria incrementará en un 6 % en relación con el periodo 1961-1990 (Alexander et al., 2006), IPCC (2007). Este incremento es mayor en latitudes medias y altas en los continentes (Watterson and Dix, 2003), IPCC (2007). Además, durante los últimos 50 años, se da cuenta de un aumento en los eventos de precipitaciones extremas en las zonas centro y sur del país. (Villarroel et al., 2006).

Es por lo anterior, que en el último tiempo, ha llamado la atención de la comunidad científica la relación entre los eventos de precipitaciones extremas y el fenómeno meteorológico de los Ríos atmosféricos (AR, por sus siglas en inglés). Si bien este fenómeno climático ha sido altamente estudiado en la costa oeste de los Estados Unidos, pero no lo suficientemente estudiado en Chile. Desde un punto de vista cualitativo, un AR se define como una región de la baja troposfera (primeros 3 kilómetros) que se caracteriza por exhibir una notable acumulación de humedad y vientos intensos (Ralph et al., 2004). Estos fenómenos se manifiestan con una configuración alargada y relativamente estrecha (longitud/anchura=7) (Newell et al., 1992), lo que les confiere una apariencia distintiva y una influencia significativa en el comportamiento climático de las regiones por donde atraviesan.

La presencia de un AR a menudo desencadena condiciones meteorológicas extremas, que pueden incluir lluvias intensas, tormentas y eventos de inundación en las áreas afectadas. (Gimeno et al., 2014). Desde una perspectiva climática, los ríos atmosféricos desempeñan un papel fundamental al ser responsables del 84 % y el 88 % del transporte meridional de flujo de humedad en los Hemisferios Norte y Sur, respectivamente (Guan and Waliser, 2015).

Según las proyecciones, (IPCC AR6, 2022), el aumento de las temperaturas globales provocarán una disminución del 10 % en la cantidad de AR a nivel mundial. No obstante, esta reducción será compensada por una intensificación de los ríos atmosféricos restantes, que serán más largos, anchos e intensos (Espinoza et al., 2018). Ante este panorama, resulta crucial comprender en mayor profundidad la influencia de los AR en la ocurrencia de eventos climáticos extremos en Chile, dado que Chile es el país que concentra la mayor cantidad de impactos de ríos atmosféricos (ver figura 3).

Se han realizado diversos esfuerzos para analizar, identificar y caracterizar los Ríos Atmosféricos en distintas partes del mundo. Uno de los primeros esfuerzos para llevar a cabo esta tarea fue desarrollado por Zhu and Newell (1998), donde ellos propusieron un nuevo algoritmo para estudiar los flujos de vapor de agua utilizando datos de viento y humedad. Posteriormente Guan and Waliser (2015), de manera global usaron distintos criterios para detectar los AR según las características del transporte integrado de vapor de agua (IVT). De manera local en la Antártica Gorodetskaya et al. (2014), quienes combinaron la acumulación y tasas de nieve caída derivada de radares para investigar los patrones de transporte de humedad. En el Reino Unido Lavers et al. (2012), quienes desarrollaron un algoritmo que utiliza la extensión espacial de los campos de IVT para la detección de Ríos atmosféricos. El entendimiento de estos fenómenos 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., 2017a), (Neiman et al., 2011), (Ralph and Dettinger, 2012).

En la costa oeste de Estados Unidos, los AR han sido ampliamente estudiados, según se ha documentado los AR contribuyen con alrededor del 30 % y 50 % de la precipitación anual (Dettinger et al., 2011), (Rutz et al., 2014), (Ralph et al., 2013), además de presentar una alta contribución a los eventos de precipitaciones extremas (Ralph and Dettinger, 2012), (Lamjiri et al., 2017).

Para el caso de la costa oeste de América del sur, debido a su cercanía al océano pacífico y su topografía es que se encuentra altamente afectada por los Ríos atmosféricos (Viale and Nuñez, 2011), (Garreaud, 2013). Sin embargo, para el territorio nacional los estudios aún no son suficientes, siendo el más destacado el realizado por Viale et al. (2018), quienes cuantifican el impacto de los ríos atmosféricos en las precipitaciones del sur de Sudamérica, mediante un algoritmo de detección basado en el campo de IVT. En el caso de Chile, los AR desempeñan un papel fundamental en el ciclo hidrológico y en la generación de precipitaciones, siendo responsables de aproximadamente la mitad de las precipitaciones anuales y de los eventos de precipitaciones extremas (Viale et al., 2018). Estos eventos pueden tener consecuencias tanto beneficiosas, al contribuir al abastecimiento de agua, como peligrosas, al generar inundaciones y deslizamientos de tierra. Según Viale

et al. (2018) son aportes de ríos atmosféricos entre un 45 % y un 60 % de la precipitación anual en la zona subtropical de Chile y entre el 40 % y el 55 % en latitudes medias (Entre Concepción y Cochrane).

Los ríos atmosféricos, como menciona Lavers et al. (2016), se pueden evaluar con mayor exactitud que las precipitaciones. Por lo tanto, si contamos con información más precisa sobre un AR que se aproxima al continente, entonces podríamos estimar con más días de anticipación la precipitación, lo que permitiría considerar de manera más precisa el caudal en los ríos y/o la acumulación de nieve.

Producto de lo mencionado anteriormente, el presente informe tiene como objetivo identificar los ríos atmosféricos en la costa de Chile y su particular relación con los eventos de precipitaciones extremas en la cuenca del Río Maipo. Para ello, se empleará un algoritmo de detección de imágenes, basado en técnicas de procesamiento de imágenes, propuesto por Mundhenk et al. (2016). Este algoritmo será adaptado a las condiciones específicas de la costa chilena, utilizando 43 años (1979 a 2022) de datos de Reanálisis Climático del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de los Estados Unidos (CFSR) y registros de precipitaciones diarias según distintas estaciones de la cuenca del Río Maipo.

Se espera que los resultados de este estudio contribuyan a mejorar la comprensión de la relación entre los ríos atmosféricos y los eventos de precipitaciones extremas en la costa de Chile, lo que a su vez permitirá fortalecer la gestión de los recursos hídricos del país. Los resultados obtenidos serán de relevancia tanto para el ámbito científico como para la toma de decisiones en materia de adaptación al cambio climático y la planificación de medidas de mitigación frente a los eventos climáticos extremos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Identificar los ríos atmosféricos, y la relación de estos con la ocurrencia de eventos de precipitaciones extremas en Chile mediante datos de Reanálisis.

2.2. Objetivos Específicos

- Construir el Campo de Transporte de vapor de agua (IVT) mediante el uso de datos de Reanálisis del Sistema de Pronóstico Climático (CFSR)
- Implementar el algoritmo de detección de AR basado en técnicas de procesamiento de imágenes en las costas de Chile propuesto por (Mundhenk et al., 2016).
- Asociar los eventos de precipitaciones extremas con los Ríos atmosféricos identificados

3. Metodología

El estudio se inicia con la descarga de 43 años de datos de vientos horizontales y humedad específica interpolados del catálogo CFSR con resolución espacial de $0,5^\circ$ latitud x $0,5^\circ$ longitud y temporal de 6 horas en superficies isobáricas. A continuación, se genera el campo de vapor de agua y se integra en el algoritmo de detección. Simultáneamente, se obtienen los datos de precipitación diaria de 46 estaciones situadas en la cuenca del Río Maipo. Estos datos se utilizan luego para identificar las tormentas de acuerdo con la escala de precipitación R-Cat establecida por Ralph and Dettinger (2012).

Una vez identificados los ríos atmosféricos y las tormentas extremas, se procede a cruzar la información con el fin de encontrar correlaciones entre los ríos atmosféricos y los eventos de precipitaciones extremas.

La figura 1 presenta un diagrama de flujo con los principales procesos del estudio

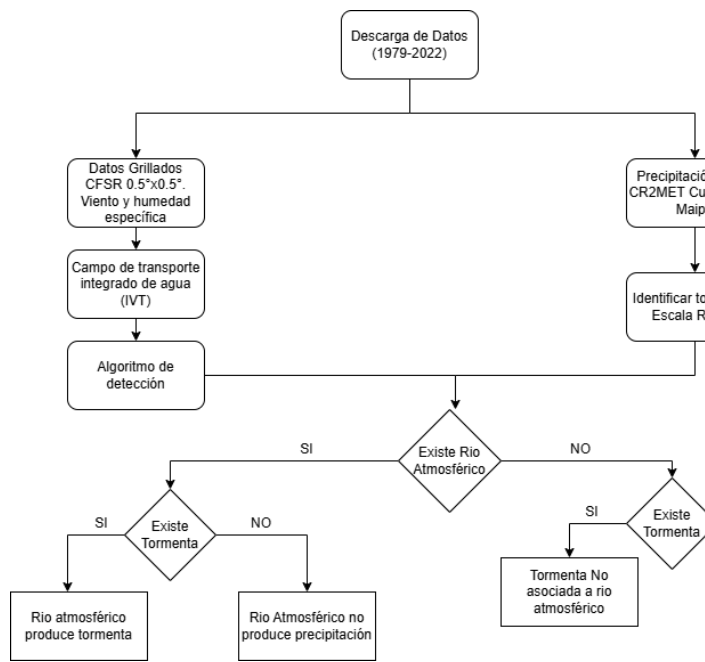


Figura 1: Flujograma procesos metodología

3.1. Precipitaciones extremas

La definición de precipitación extrema carece de un estándar universal y varía según la ubicación y la temporada. Diferentes regiones pueden adoptar definiciones específicas según su contexto. Para el caso del presente trabajo, para caracterizar las precipitaciones extremas se utiliza la escala de precipitación R-Cat definida por Ralph and Dettinger (2012). Esta escala simple fue desarrollada para identificar y comparar las precipitaciones extremas utilizando la precipitación acumulada de 3 días. Aunque los totales diarios son una medida habitual para la precipitación, los totales acumulados durante varios días pueden ser de mayor relevancia práctica en relación con los peligros progresivos, como las inundaciones en ríos importantes y ciertos deslizamientos de tierra. Además, la utilización de totales acumulados de varios días ayuda a mitigar posibles incertidumbres.

La escala R-Cat por su nombre en inglés Rainfall categories presenta 4 categorías que dependen de la cantidad de precipitación acumulada en mm de 3 días. La Tabla 1 presenta los umbrales que definen cada categoría, así como el número total de días y estaciones que alcanzaron esas categorías en todo el dominio analizado.

Tabla 1: Categoría de las precipitaciones utilizadas. Fuente: Adapta de Ralph and Dettinger (2012)

	Precipitación Categoría 1	Precipitación Categoría 2	Precipitación Categoría 3	Precipitación Categoría 4
Umbrales de precipitación acumulada en 3 días [mm]	$200 \leq P < 300$	$300 \leq P < 400$	$400 \leq P < 500$	$P \geq 500$
Nº de eventos que alcanzan la categoría	45	13	5	1

3.2. Ríos atmosféricos

Los ríos atmosféricos (AR), identificados por primera vez por Newell et al. (1992), son estructuras largas y angostas que transportan una alta concentración de vapor de agua, los cuales se desplazan a lo largo de la atmósfera desde regiones tropicales y subtropicales hacia latitudes más altas.

Cuando los AR impactan en las regiones costeras montañosas, el vapor de agua transportado asciende, se condensa y produce las precipitaciones que pueden ser tanto beneficiosas para el balance hídrico como perjudiciales produciendo inundaciones y deslizamientos de tierra. Estos fenómenos meteorológicos han sido ampliamente estudiados en la costa oeste de Estados Unidos, donde se ha comprobado que los AR contribuyen con alrededor del 30 % al 50 % a la precipitación anual.

El vapor de agua transportado por los AR se ha convertido en un tema de interés mundial debido al rol que estos fenómenos desempeñan en las inundaciones (Ralph et al., 2017a). La figura 2 muestra la estructura de un Río atmosférico tocando el continente, donde la cantidad de vapor de agua se concentra principalmente en el centro de la estructura.

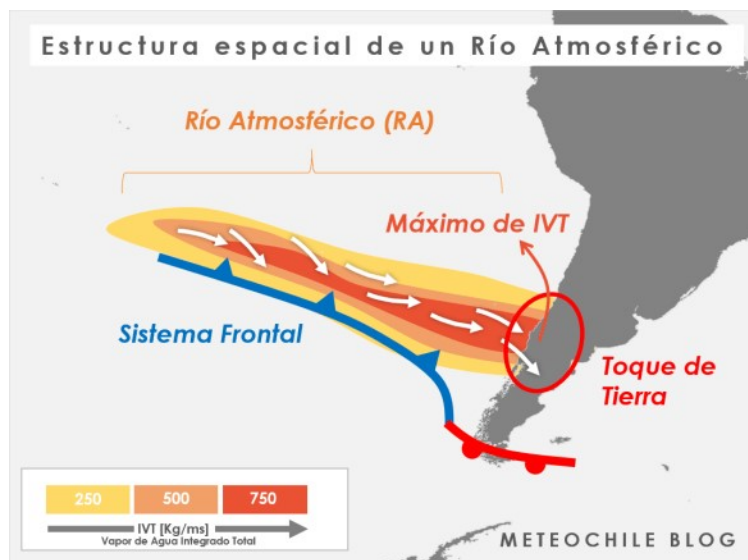


Figura 2: Estructura espacial de un Río Atmosférico tocando tierra.

Fuente: MeteoChile Blog

La gran relevancia de los AR en el país se ve reflejada en la figura 3, adaptada desde Guan and Waliser (2015), donde se muestra la frecuencia en días/año en que un AR toca tierra. Se observa que los AR se concentran a

nivel global en mayor cantidad en Chile, donde en la zona sur incluso se registran 16 AR que tocan tierra por año.

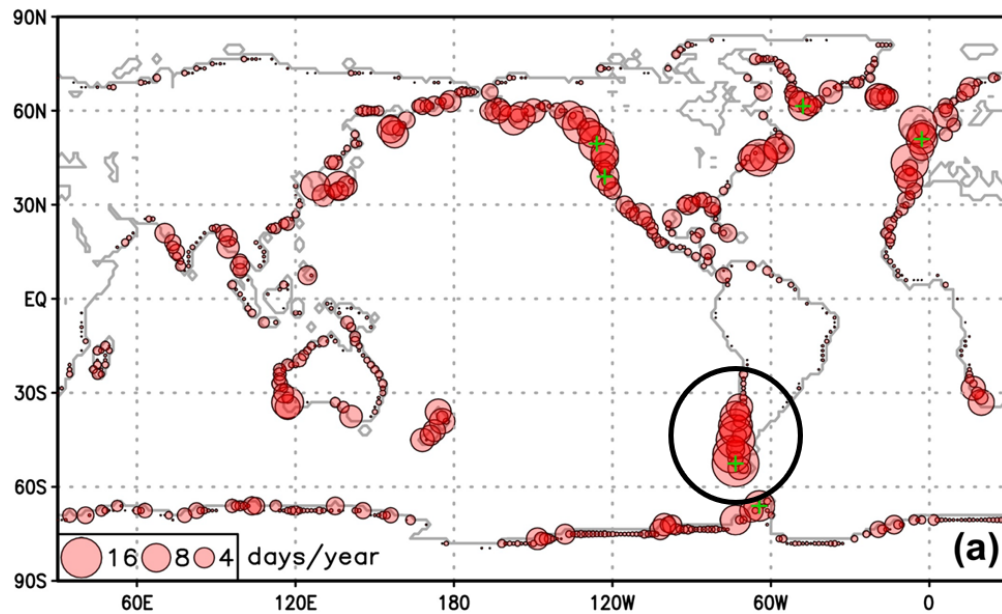


Figura 3: Frecuencia (días por año) de contactos de AR basado en todos los meses comprendidos en el período 1997-2014. Los valores de frecuencia en día por año fueron obtenidos multiplicando la fracción de periodos temporales 6-horarios con contactos continentales de AR (i.e. probabilidad de que exista contacto continental de un AR). Fuente: Adaptación de la figura 8.a Guan and Waliser (2015)

3.2.1. Categoría Río atmosférico

En este estudio se utiliza la escala de categorización de ríos atmosféricos propuesta por Ralph et al. (2019), la cual emplea la magnitud del transporte vertical integrado de vapor de agua y la duración del evento de AR para evaluar la intensidad de los ríos atmosféricos, ofreciendo un método para distinguir entre los efectos que son mayormente favorables y aquellos que son principalmente riesgosos.

La figura 4 muestra las categorías junto con el daño provocado

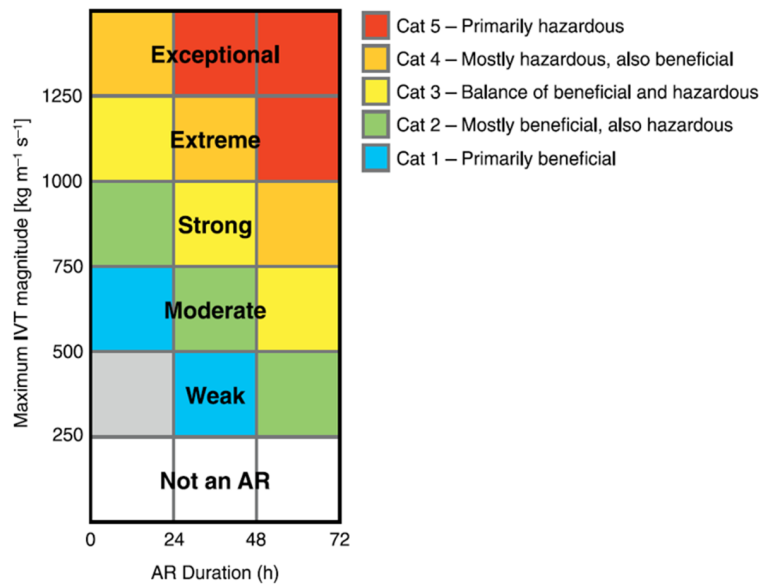


Figura 4: Categorización Ríos Atmosféricos. Fuente: Ralph et al. (2019)

En este estudio se determina que el río atmosférico tiene la duración de 1 día cuando existen condiciones de AR en al menos 1 de las 4 horas de análisis diario. Además, la duración del Río Atmosférico es de 1, 2 o 3 días, dependiendo de si las condiciones se presentan en un solo día, en el día anterior y el mismo día, o en el día anterior, el mismo día y el día siguiente, respectivamente.

3.3. Catalogo CFSR

La base de datos utilizada es el catálogo Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). El CFSR es un conjunto de datos de reanálisis global producido por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos. Este sistema utiliza un modelo numérico de predicción climática para simular las condiciones atmosféricas, oceánicas y terrestres en todo el mundo desde 1979 hasta la actualidad. Las variables de velocidad del viento horizontal y humedad específica presentan datos grillados con resolución de 0,5°x 0, 5° de latitud-longitud y resolución temporal de 6 horas en 37 superficies isobáricas que van desde 1 hPa hasta 1000 hPa

3.3.1. Descarga de base de datos

La plataforma web empleada para la descarga de estos datos es NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (NCAR). La primera función en el código se denomina *name_data_cfsr*. Esta función genera el nombre de archivo correspondiente a los datos meteorológicos del modelo CFSR para una fecha dada, considerando el formato específico según el año, mes y día. El propósito de esta función es crear nombres de archivo para los datos meteorológicos del modelo CFSR correspondientes a fechas entre enero de 1979 y diciembre de 2010.

El diagrama de flujo de la figura 5 muestra la estructura de la función.

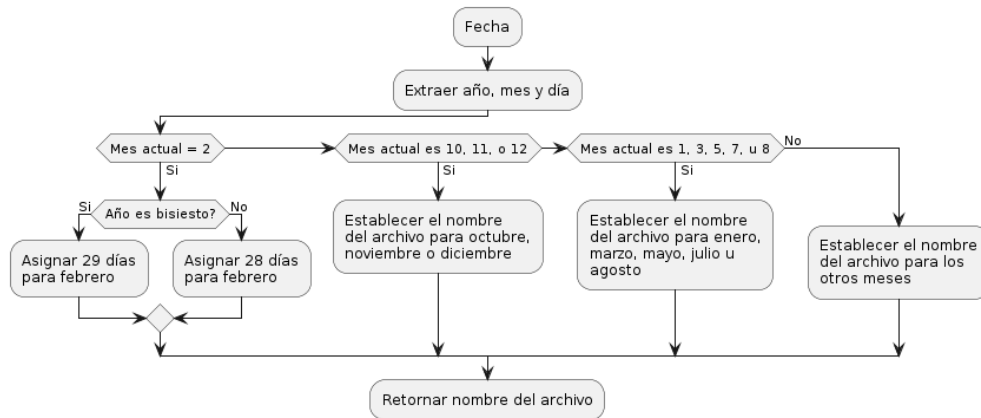


Figura 5: Diagrama de flujo función que entrega el nombre del archivo

A continuación, se define la función *download_datos_ncar*. Esta función descarga los archivos de datos meteorológicos para la región de Chile, abarcando las coordenadas geográficas de 0°N, -130°W, -40°E y -70°S, desde la página del NCAR, utilizando una URL predefinida y el nombre del archivo entregado por la función anterior. Si el archivo no está presente en la carpeta de destino, lo descarga y lo guarda.

El diagrama de flujo de la figura 6 muestra la estructura de la función.

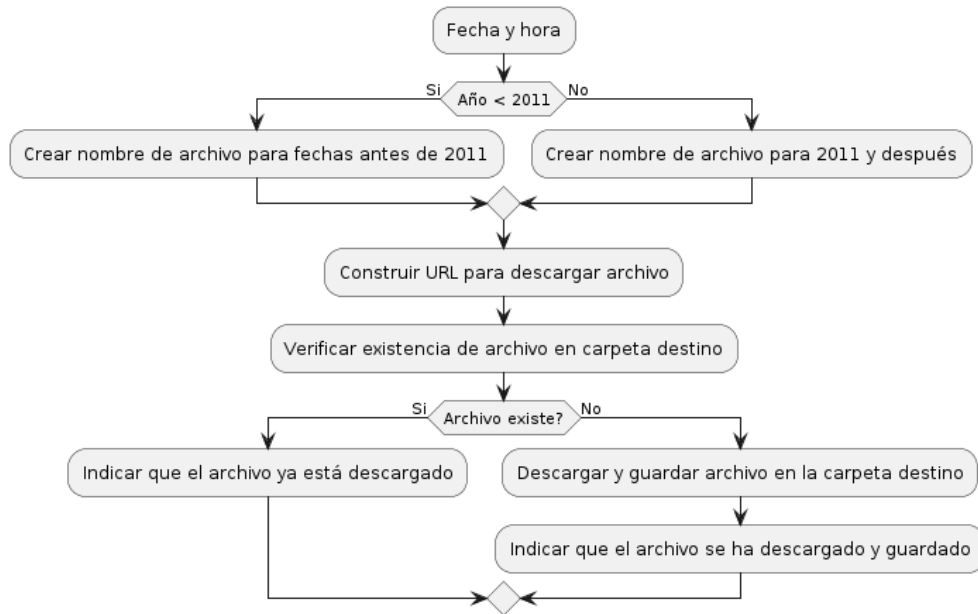


Figura 6: Diagrama de flujo función que descarga los datos

3.4. Transporte de vapor de agua (IVT)

El criterio que se ha escogido en esta investigación es análogo al utilizado en Viale et al. (2018), el cual emplea umbrales de transporte de vapor de agua (IVT) en la columna de aire.

Los límites de la integral utilizados en este trabajo van desde 1 hPa hasta 1000 hPa (en total 37 niveles con valores de presión y velocidad del viento).

Según Lavers et al. (2012) la magnitud de IVT se calcula mediante la expresión 1

$$IVT = \sqrt{\left(\frac{1}{g} \int_{10^5 Pa}^{100 Pa} qu, dp\right)^2 + \left(\frac{1}{g} \int_{10^5 Pa}^{100 Pa} qv, dp\right)^2} \quad (1)$$

donde g es la aceleración gravitacional, q es la humedad específica, u es el viento zonal, v es el viento meridional y dp es la diferencia de presión entre niveles de presión adyacentes.

3.4.1. Construcción del campo IVT

Se genera la función *cfsr_to_ivt*. Esta función toma los datos de humedad específica y viento, y calcula el valor correspondiente del Transporte Integrado de Vapor (IVT) para cada latitud, longitud y nivel de presión. Esta función procesa datos meteorológicos del modelo CFSR o CFSRv2 para calcular el campo de IVT sobre la región de Chile y guarda el archivo en formato .npz.

El diagrama de flujo de la figura 7 muestra la estructura de la función.

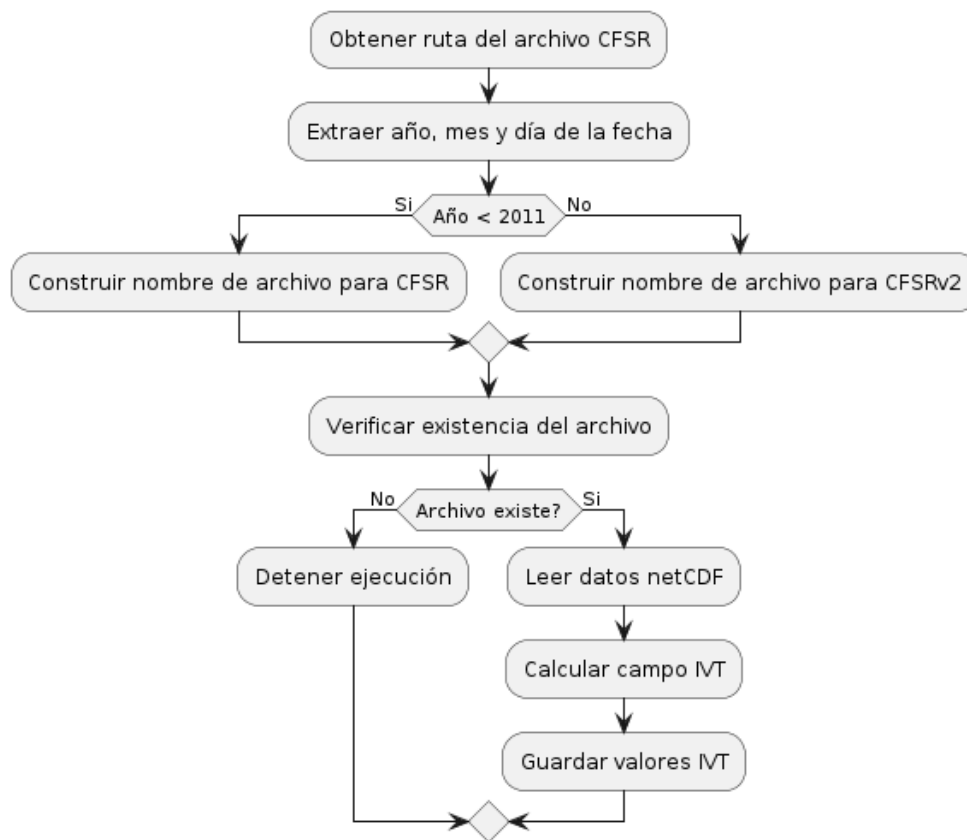


Figura 7: Diagrama de flujo función que calcula campo IVT

3.5. Algoritmo de detección de Río Atmosférico

El algoritmo utilizado en este informe es una modificación del propuesto por Mundhenk et al. (2016) el cual está enfocado en la costa oeste de Estados Unidos. Este algoritmo, esta basado en ocurrencias, es decir, en cada paso de tiempo se analiza si se cumplen los criterios geométricos y de intensidad requeridos. El algoritmo comienza con la lectura de los datos de IVT ya calculados, entonces se va examinando cada periodo de 6 horas por separado y luego se aplican distintos filtros de imágenes.

La implementación del algoritmo en las costas de Chile requiere considerar las coordenadas geográficas específicas de la región de interés. En este contexto, se han realizado adaptaciones esenciales para asegurar que el algoritmo funcione adecuadamente en el contexto geográfico de las costas de Chile.

Para definir las coordenadas geográficas que abarcan la región de interés en las costas chilenas, se ha utilizado un conjunto de datos de coordenadas de latitud y longitud. El código en Python proporcionado carga estas coordenadas desde archivos de texto y realiza un ajuste del Rango de Longitud. Originalmente, las coordenadas de longitud se encuentran en un rango de 0 a 360 grados. Para que se ajusten al rango de -180 a 180 grados, que es más comúnmente utilizado en las bibliotecas de geoprocésamiento y análisis geoespacial en Python, se ha restado 360 a cada elemento de la matriz de coordenadas de longitud. Además, se define una grilla con resolución de 10° donde la longitud va desde 120°W a 40°W y la latitud desde 10°S a 60°S

El diagrama de flujo de la figura 8 muestra la estructura de la función que calcula los ríos atmosféricos.

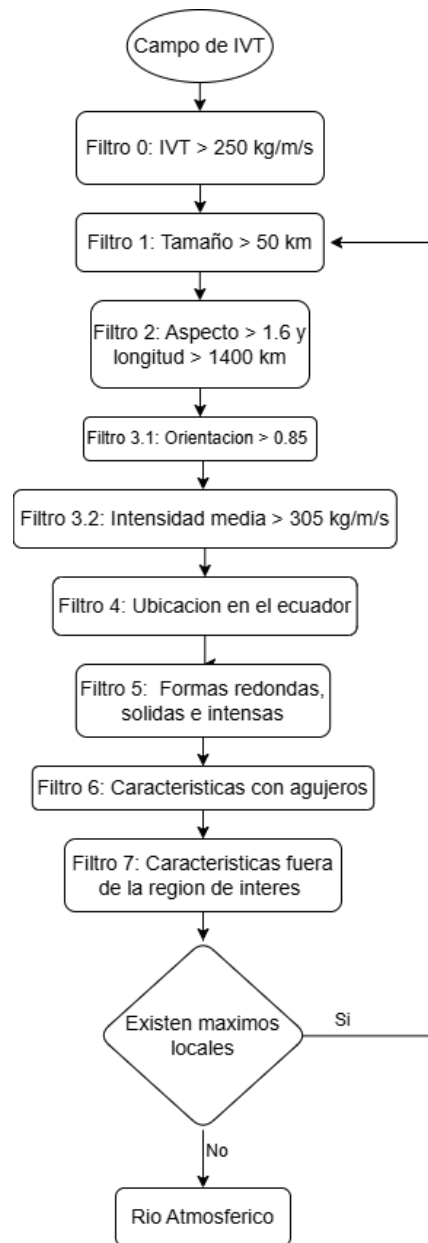


Figura 8: Diagrama de flujo función de detección de Ríos atmosféricos

3.5.1. Descripción filtros utilizados

Filtro 0: IVT mínimo.

El valor de $250 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ es conservador por diseño según Mundhenk et al. (2016)

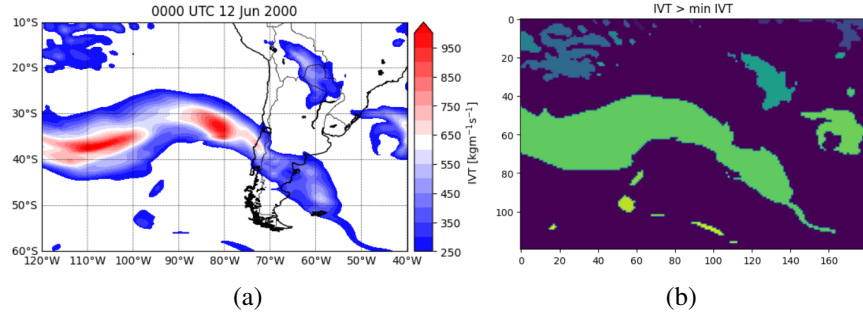


Figura 9: Secuencia de aplicación de Filtro 0 para (a) AR con fecha 2000/06/12 0000 UTC (b) Después de aplicar el filtro 0.

Filtro 1: Tamaño mínimo de las características o blobs.

Con el fin de considerar características a gran escala (tamaño mínimo de 200 píxeles).

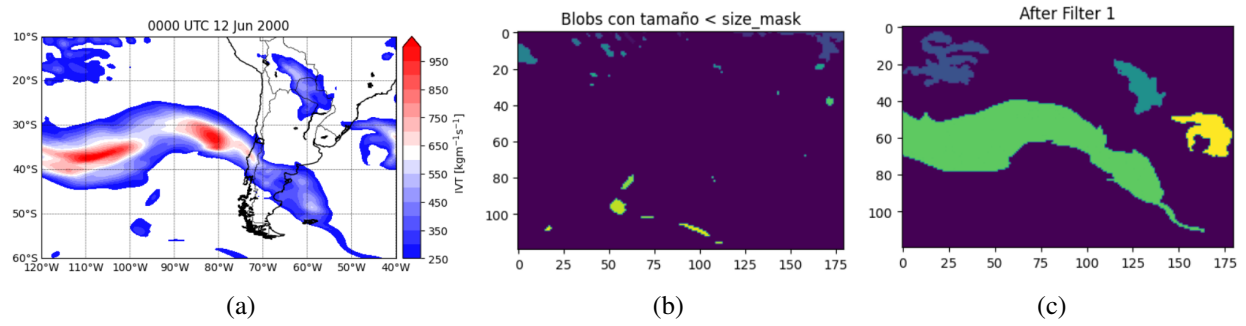


Figura 10: Secuencia de aplicación de Filtro 1 para (a) AR con fecha 2000/06/12 0000 UTC solo con filtro 0. (b) Blobs que no cumplen con el tamaño mínimo y (c) Después de aplicar el filtro 1.

Filtro 2: Aspecto y longitud mínima.

Relación $\text{largo}/\text{ancho} \geq 1,6$ con el fin de que las características sean similares a las de una pluma.

Longitud mínima de 1400 km. Dado que se utilizan datos de CFSR el cual tiene datos en cuadrículas con resolución de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de latitud-longitud.

Considerando 1 grado de latitud como 111 km entonces la cuadrícula de $0,5^\circ$ tiene $0,5 \cdot 111 = 55,5$ [km de latitud].

$$\text{pixel} = \frac{1400[\text{km}]}{55,5[\text{km}]} \approx 25 \quad (2)$$

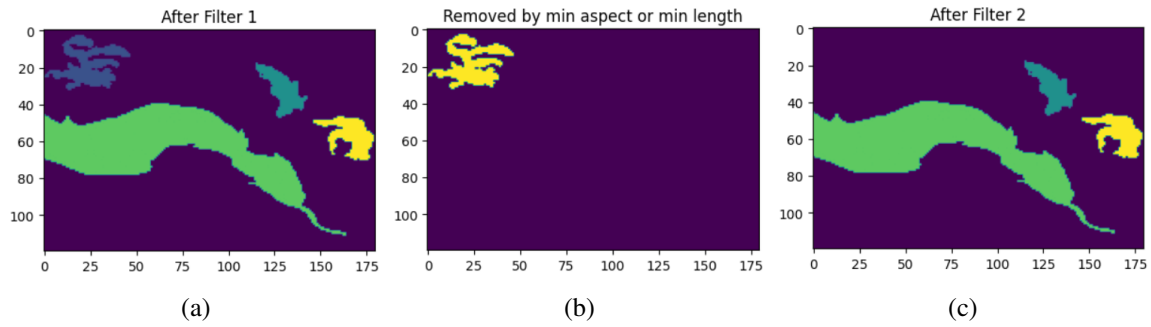


Figura 11: Secuencia de aplicación de Filtro 2 para (a) AR con fecha 2000/06/12 0000 UTC después de filtro 1. (b) Blobs que no cumple con relación de aspecto o longitud mínima y (c) Después de aplicar el filtro 2.

Filtro 3.1: Orientación mínima.

Calculada como la orientación del eje mayor con respecto al eje horizontal, con el fin de considerar solo características que se dirigen hacia Chile.

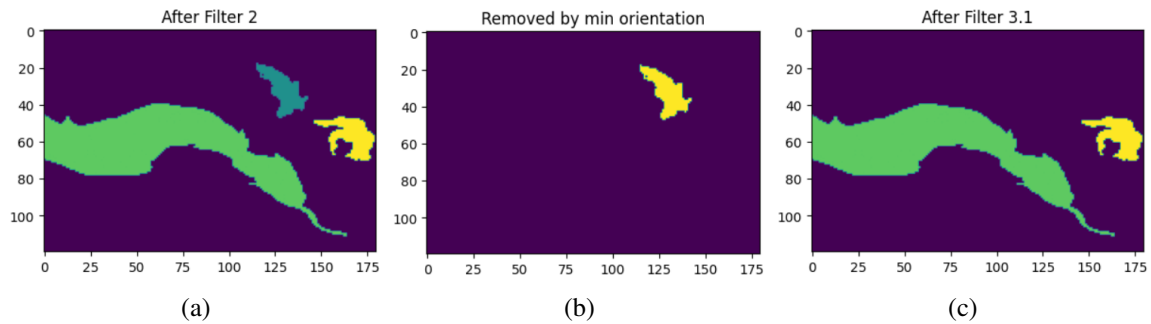


Figura 12: Secuencia de aplicación de Filtro 3.1 para (a) AR con fecha 2000/06/12 0000 UTC después de Filtro 2. (b) Blob que no cumple con la orientación mínima y (c) Después de aplicar filtro 3.1

Filtro 3.2: IVT medio ≥ 305

Se cree que características débiles con ivt medio menor a $305 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ están asociadas con aumentos de humedad amplios y de baja frecuencia (Mundhenk et al., 2016).

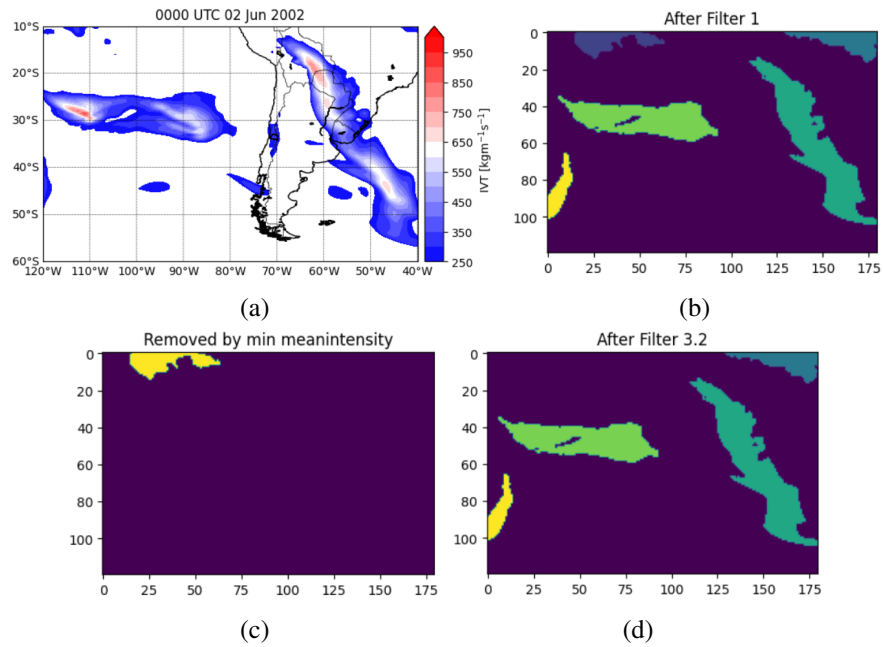


Figura 13: Secuencia de aplicación de Filtro 3.2 para (a) AR con fecha 2002/06/02 0000 UTC. (b) Después de aplicar filtro 1. (c) Blob que no cumple intensidad promedio mínima y (d) Después de aplicar filtro 3.2

Filtro 4: Características cercana al ecuador.

Se eliminan las características ubicadas en latitudes menores a 20° (consideradas cercanas al ecuador).

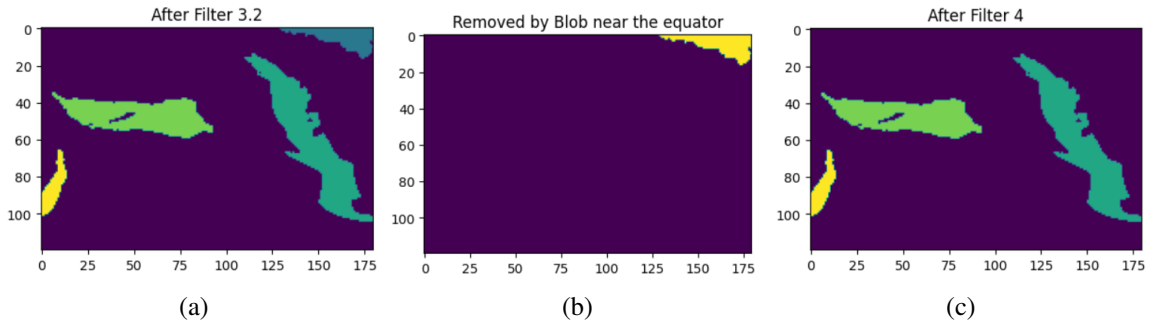


Figura 14: Secuencia de aplicación de Filtro 4 para (a) AR con fecha 2002/06/02 0000 UTC después de filtro 3.2 (b) Blob cercano al ecuador y (c) Después de aplicar filtro 4.

Filtro 5: Características o blobs redondos y solidos.

Elimina manchas redondas, solidas e intensas que pueden ser tormentas tropicales.

No se muestra flujograma de aplicación del filtro ya que no ha sido necesario utilizarlo.

Filtro 6: Características con agujeros.

Elimina manchas que tienen agujeros ($\text{área del blob} - \text{área rellena} \leq -5$)

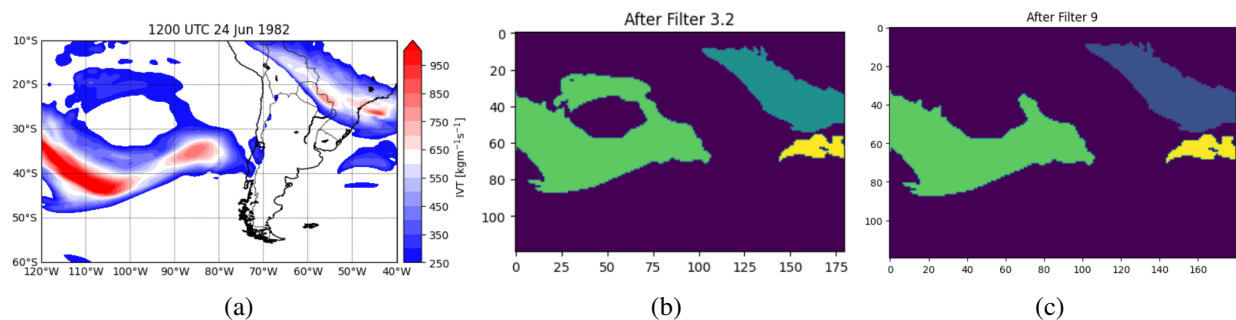


Figura 15: Secuencia de aplicación de Filtro 6 para (a) AR con fecha 1982/06/24 1200 UTC. (b) Después de filtro 3.2 y (c) Después de aplicar filtro 6.

Filtro 7: Características o blobs fuera de la región de interés.

Elimina manchas fuera de la región y que pueden ser ciclones tropicales. (características ubicados en latitudes mayores a 55°).

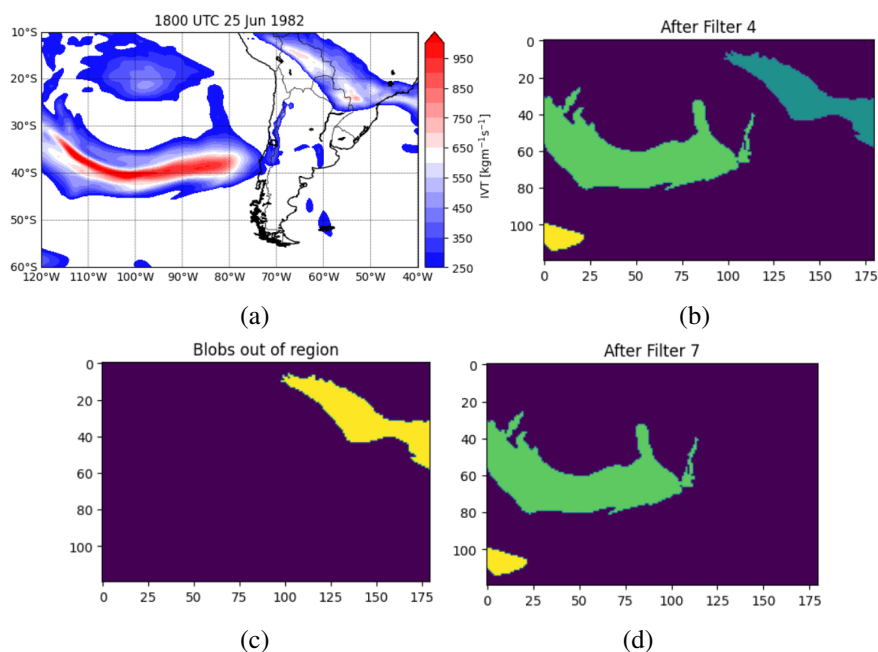


Figura 16: Secuencia de aplicación de Filtro 7 para (a) AR con fecha 1982/06/25 1800 UTC. (b) después de filtro 4 (c) Blob fuera de la región (d) Después de aplicar filtro 7.

3.6. Detección de Ríos atmosféricos

Existen varios métodos para la detección de AR, que varían en su complejidad y precisión. Uno de los métodos más comunes es la utilización de imágenes satelitales de vapor de agua, que permiten visualizar la humedad en la atmósfera y la trayectoria de los AR. Otro método es la utilización de radio sondeos, que miden la temperatura, la humedad y la presión atmosférica en diferentes altitudes para detectar patrones asociados con los AR. También se pueden utilizar modelos numéricos de predicción del clima para simular la formación y

movimiento de los AR. Estos modelos se basan en la utilización de ecuaciones de la física de la atmósfera y pueden proporcionar información detallada sobre la intensidad y trayectoria de los AR.

En este informe, para la detección de los AR en la cuenca del Río Maipo se creó especialmente la función *detectar_ra_cuenca*, la cual busca las posiciones de valores en la matriz de IVT filtrada por la función Mundhenck. Luego, convierte estas posiciones a coordenadas de mapa y determina si existe IVT en una cuenca específica. Finalmente, devuelve un mensaje indicando si hay IVT en la región y en la cuenca.

El diagrama de flujo de la figura 17 muestra la estructura de la función detectar río atmosférico en la cuenca.

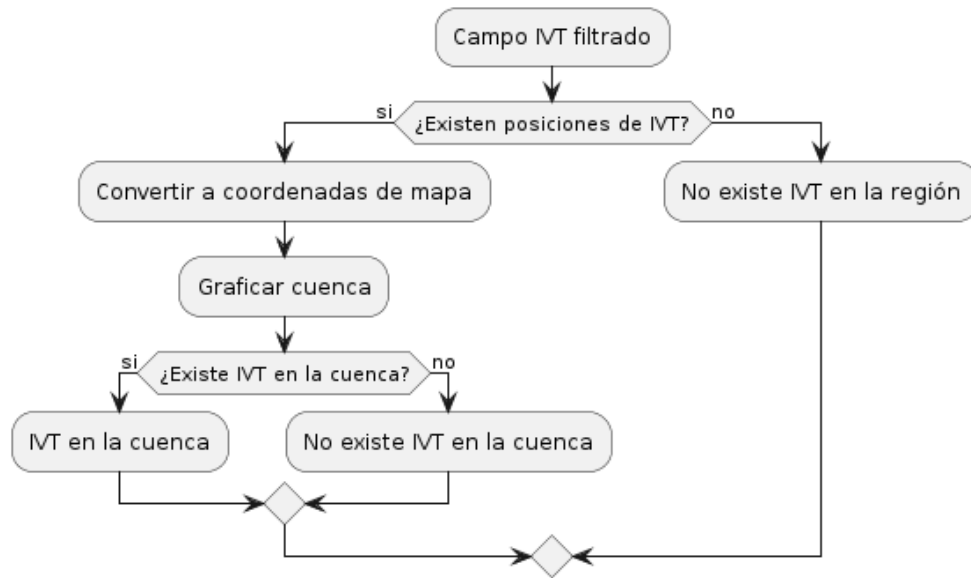


Figura 17: Diagrama de flujo función de detección de Ríos atmosféricos en la Cuenca Del Río Maipo

4. Caso de Estudio

El caso de estudio de esta memoria corresponde a medir la hora y el día en que los Ríos Atmosféricos tocan la cuenca del río Maipo y correlacionarlos con las precipitaciones en la zona. La cuenca del río Maipo se encuentra situada en la zona central de Chile, entre $32^{\circ}55'$ - $34^{\circ}15'$ de latitud Sur y $69^{\circ}46'$ - $71^{\circ}43'$ de longitud Oeste, siendo prácticamente coincidente en sus límites con la región Metropolitana. La cuenca comienza en las laderas del volcán Maipo a 5.523 m.s.n.m. y recorre una longitud de 250 kilómetros hasta desembocar en al Océano Pacífico, cubriendo una superficie aproximada de 15.000 km^2 .

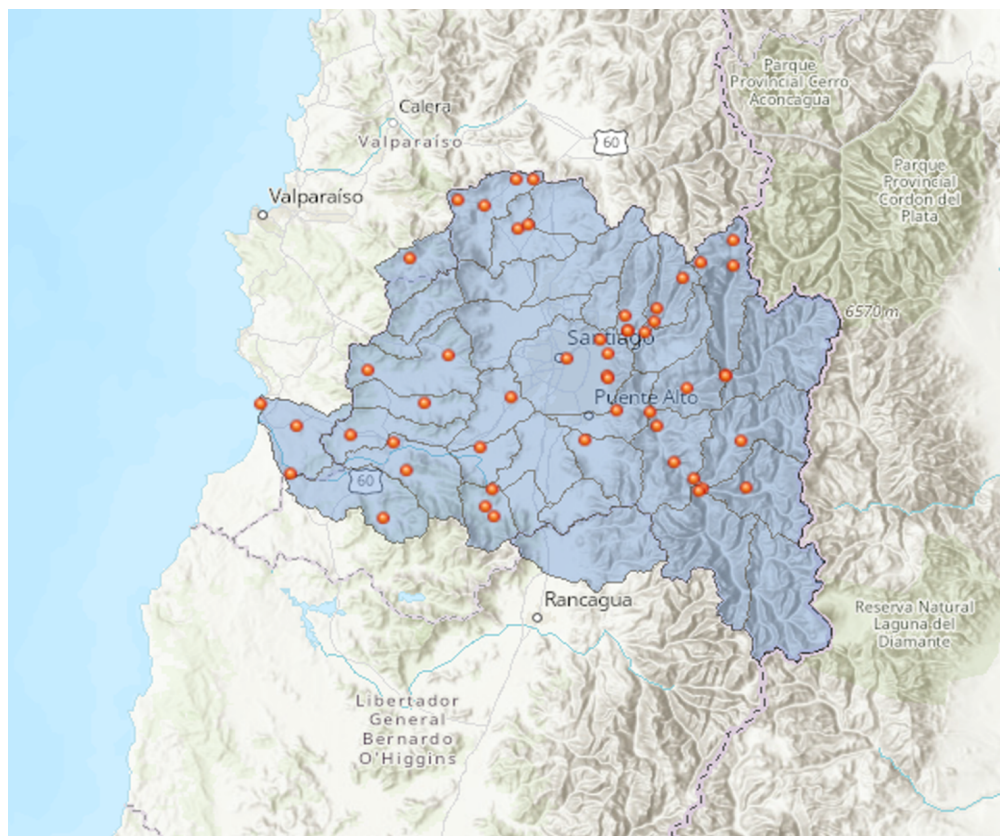


Figura 18: Geografía de la cuenca del Río Maipo junto con las estaciones meteorológicas consideradas
Fuente: Adapta de ArcGIS

La hidrología predominante en la cuenca del Maipo puede ser clasificada como mixto según la ubicación. Por ejemplo en la parte alta de la cuenca, predomina el régimen nival, mientras que en la parte más baja el régimen pluvial. En la zona media, existe tanto un componente nival como pluvial, esto producto de las precipitaciones en forma líquida y sólida. (Cade-Idepe, 2004). En cuanto a las precipitaciones, se concentran principalmente durante los meses de mayo a septiembre, marcando un punto máximo en los meses de junio y julio como muestra la figura 19

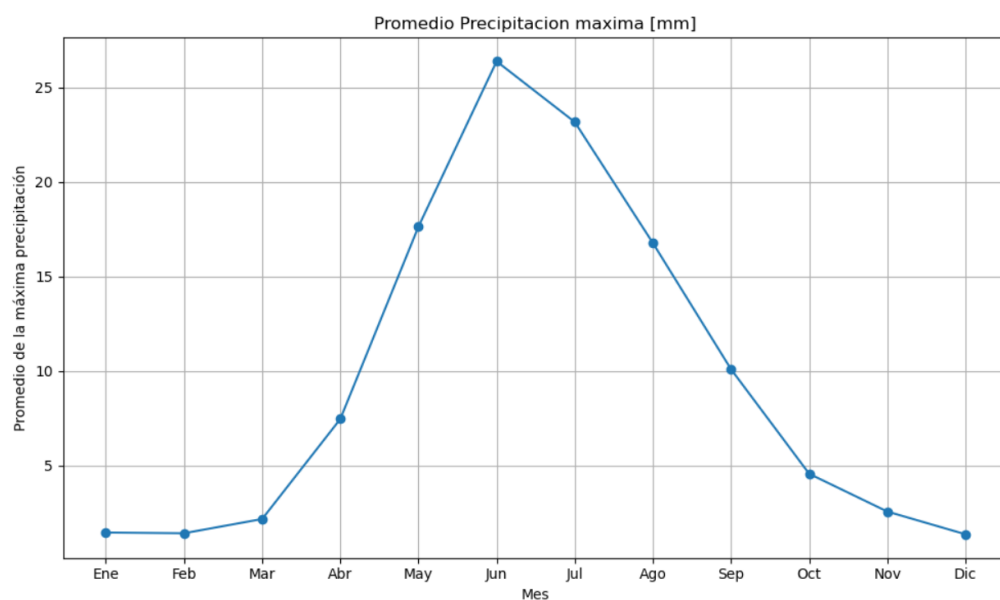


Figura 19: Precipitación máxima promedio a lo largo de los meses

En este informe, los datos de precipitación son obtenidos del explorador climático CR2, específicamente se extraen los datos de las 46 estaciones ubicadas en la cuenca del Río Maipo que muestra la tabla 2

Tabla 2: Estaciones meteorológicas Cuenca Río Maipo

ESTACIÓN	Latitud S	Longitud W	Altitud (msnm)	Periodo
CALEU	33° 00' 20"	70° 59' 37"	1120	01/01/1979 - 31/12/1982
ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE	33° 48' 16"	70° 52' 42"	350	01/06/1988 - 31/12/1988
CERRO CALAN	33° 23' 42"	70° 32' 12"	848	01/01/1979 - 31/12/1982
FUNDO MARRUECOS	33° 33' 19"	70° 49' 21"	430	01/06/1989 - 31/12/1992
IBACACHE ALTO	33° 28' 50"	71° 16' 53"	169	01/04/1988 - 31/12/1991
LA OBRA RECINTO EMOS	33° 35' 29"	70° 29' 07"	796	01/01/1995 - 31/12/1998
MAITENES	33° 31' 52"	70° 15' 43"	1143	01/01/1990 - 31/12/1993
QUEBRADA MACUL	33° 30' 08"	70° 30' 52"	950	29/04/2003 - 31/12/2006
QUEBRADA RAMON	33° 25' 58"	70° 32' 04"	730	01/05/1980 - 31/12/1980
RINCON DE LOS VALLES	32° 56' 51"	70° 45' 12"	955	01/01/1979 - 31/12/1982
RÍO MAIPO EN EL MANZANO	33° 35' 51"	70° 22' 46"	850	01/01/2010 - 31/12/2013
RÍO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	33° 22' 14"	70° 27' 04"	966	01/01/1996 - 31/12/1999
RÍO MOLINA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	33° 22' 25"	70° 23' 47"	1158	01/01/2007 - 31/12/2010
RÍO VOLCAN ANTES QUELTEHUES	33° 48' 34"	70° 12' 37"	1365	01/01/2012 - 31/12/2015
SAN GABRIEL	33° 46' 57"	70° 14' 22"	1266	01/01/1979 - 31/12/1982
TERRAZA OFICINA CENTRAL DGA	33° 26' 55"	70° 38' 39"	560	01/01/1979 - 31/12/1982
ANTUPIREN	33° 29' 48"	70° 30' 59"	904	01/08/1979 - 31/12/1982
EL VERGEL	33° 41' 45"	70° 55' 25"	340	01/04/1988 - 31/12/1991
ESTERO PUANGUE EN RUTA 78	33° 39' 41"	71° 20' 13"	93	01/01/1987 - 31/12/1990
ESTERO YERBA LOCA EN PIEDRA CARVAJAL	33° 13' 19"	70° 16' 25"	3250	21/04/2011 - 31/12/2014
FUNDO LAS BATEAS	32° 56' 51"	70° 48' 24"	810	01/11/1985 - 31/12/1988
HUENCHUN ANDINA	33° 04' 21"	70° 46' 03"	590	01/01/1995 - 31/12/1998
LA DEHESA	33° 19' 45"	70° 31' 43"	920	01/01/1990 - 31/12/1993
LOS GUINDOS	33° 53' 27"	71° 14' 01"	125	01/06/1989 - 31/12/1992
MALLARAUCO	33° 34' 18"	71° 06' 06"	176	01/01/1991 - 31/12/1994
QUEBRADA RAMON RECINTO EMOS	33° 25' 59"	70° 30' 51"	845	01/01/2008 - 31/12/2011
RÍO MAIPO EN QUELTEHUES	33° 49' 01"	70° 13' 25"	1317	01/04/2017 - 31/12/2020
RÍO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS GP	33° 22' 14"	70° 27' 03"	966	20/04/2016 - 31/12/2019
RÍO OLIVARES ANTES JUNTA RÍO COLORADO	33° 29' 35"	70° 08' 15"	1500	01/01/2011 - 31/12/2014
RUNGUE EMBALSE	33° 01' 12"	70° 54' 29"	700	01/01/1979 - 31/12/1982
SAN JOSE DE MAIPO RETEN	33° 38' 11"	70° 21' 25"	943	01/01/1979 - 31/12/1982
CARMEN DE LAS ROSAS	33° 45' 36"	71° 09' 27"	165	01/01/1979 - 31/12/1982
EL YESO EMBALSE	33° 40' 33"	70° 05' 19"	2475	01/01/1979 - 31/12/1982
ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	33° 20' 40"	70° 21' 50"	1350	01/01/2007 - 31/12/2010
HUENCHUN EMBALSE	33° 05' 08"	70° 48' 06"	556	01/04/1988 - 31/12/1991
LA ERMITA CENTRAL EN BOCATOMA	33° 20' 29"	70° 21' 49"	1350	01/04/1987 - 31/12/1990
LAGUNA ACULEO	33° 53' 09"	70° 52' 39"	360	01/11/1988 - 31/12/1991
LAS MELOSAS	33° 53' 58"	70° 11' 53"	1527	01/01/1979 - 31/12/1982
LOS PANGUILES	33° 26' 20"	71° 01' 31"	190	01/11/1980 - 31/12/1983
MELIPILLA	33° 40' 49"	71° 11' 60"	168	01/01/1979 - 31/12/1982
PIRQUE	33° 40' 26"	70° 35' 12"	659	01/01/1979 - 31/12/1982
RÍO COLORADO ANTES JUNTA RÍO OLIVARES	33° 29' 42"	70° 08' 14"	1500	01/01/2011 - 31/12/2014
RÍO MAIPO ANTES SAN ALFONSO	33° 44' 06"	70° 18' 04"	1092	01/01/2009 - 31/12/2012
RÍO MAPOCHO EN RINCONADA DE MAIPU	33° 29' 60"	70° 49' 08"	440	01/01/1999 - 31/12/2002
RÍO SAN FRANCISCO ANTES JUNTA ESTERO YERBA LOCA	33° 18' 31"	70° 21' 26"	1550	01/01/2013 - 31/12/2016
VALLE OLIVARES	33° 11' 15"	70° 06' 44"	2787	01/03/2014 - 31/12/2017

5. Análisis de resultados y discusión

En este capítulo se exponen y discuten los resultados arrojados por el algoritmo. En primera instancia se analizan diversos aspectos del fenómeno, comenzando con su impacto estacional y su contribución a las precipitaciones extremas. A continuación, se examina el IVT de los AR y se proporciona una clasificación según la escala de Ralph et al. (2019). Finalmente, se proyecta el comportamiento futuro de los AR y su posible impacto en la cuenca bajo diferentes categorías de tormentas.

5.1. Impacto estacional de los ríos atmosféricos en la Cuenca del Río Maipo

La frecuencia mensual de los AR se calculó como el número promedio de días por mes que cumplen las condiciones AR en la cuenca. Para definir un día con condiciones AR se debe cumplir que al menos uno de los cuatro intervalos de reanálisis (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 horas UTC) en los que se analiza el IVT cada 6 horas, presente condiciones de AR en la cuenca. La figura 20 muestra que los ríos atmosféricos se concentran principalmente en los meses fríos, esto es en el segundo trimestre del año. Sin embargo, es importante destacar que todo el año existen condiciones AR en la cuenca. Estos resultados concuerdan con los estudios previos en la costa de América del sur obtenidos por Viale et al. (2018).

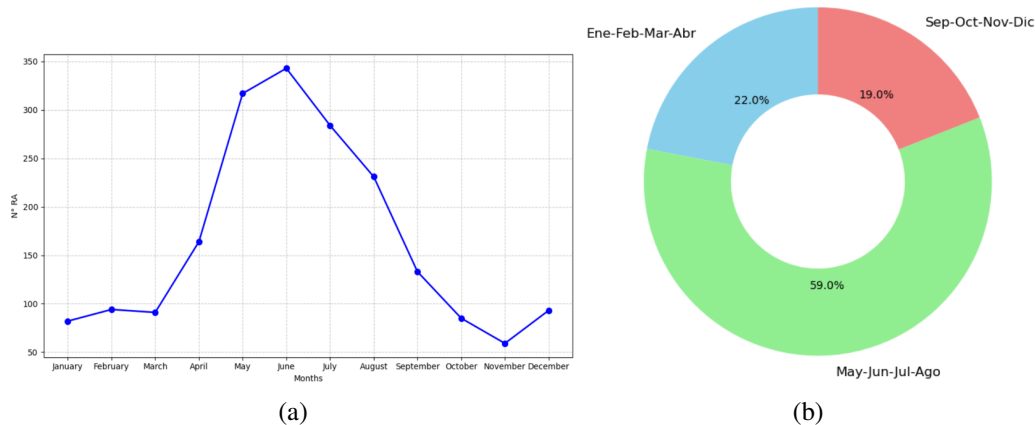


Figura 20: (a) Ríos Atmosféricos según el mes (b) Ríos Atmosféricos agrupados por trimestre

A continuación, se procederá a analizar las tendencias estacionales del impacto e influencia de los ríos atmosféricos. La figura 21 a) muestra el número total de Ríos atmosféricos en el contexto de los que provocaron lluvias y los presentes en la Cuenca del Río Maipo, a lo largo de los meses del año. Para este caso se considera un día con precipitación cuando al menos una estación registra precipitaciones mayores a 5mm. Esto se define a modo conservador considerando que en la literatura en general se define un día con lluvia cuando la precipitación es mayor a 1mm.

Los Ríos atmosféricos que provocaron lluvias (línea roja) y los presentes en la Cuenca del Río Maipo (línea azul) muestran una clara estacionalidad, con un aumento significativo durante los meses de invierno (mayo a septiembre). En particular, se observa un máximo en mayo, junio y julio, lo cual es consistente con los patrones climáticos típicos de la región, donde los inviernos son más lluviosos. La cantidad de Ríos atmosféricos en el Pacífico (línea verde) se mantiene relativamente constante a lo largo del año, con valores promedio de 30 AR por mes, indicando que prácticamente todos los días ocurren condiciones AR en el Pacífico.

Los Ríos atmosféricos que afectan la Cuenca del Rio Maipo (figura 21 b, cajas azules) son siempre más numerosos que los que provocan lluvias (cajas rojas) en todos los meses, lo que sugiere que no todos los Ríos atmosféricos en la Cuenca del Rio Maipo resultan en precipitaciones (solo un 69 % aproximadamente). La diferencia entre ambas curvas es más notoria en los meses de mayor actividad (mayo a septiembre), lo que puede indicar que, durante estos meses, aunque la presencia de Ríos atmosféricos es alta, no todos logran desencadenar lluvias. Durante los meses de verano (enero a marzo), la actividad de Ríos atmosféricos que provocan lluvias y los que están en la Cuenca del Rio Maipo es mínima, reflejando las condiciones típicamente secas de la temporada.

El grafico ilustra claramente la estacionalidad de los Ríos atmosféricos y su impacto en las precipitaciones, con una mayor incidencia durante los meses de invierno en la Cuenca del Rio Maipo. La presencia continua de Ríos atmosféricos en el Pacifico sugiere una fuente constante de humedad que se traduce en precipitaciones bajo ciertas condiciones, probablemente influenciadas por factores locales como la topografía y condiciones atmosféricas regionales.

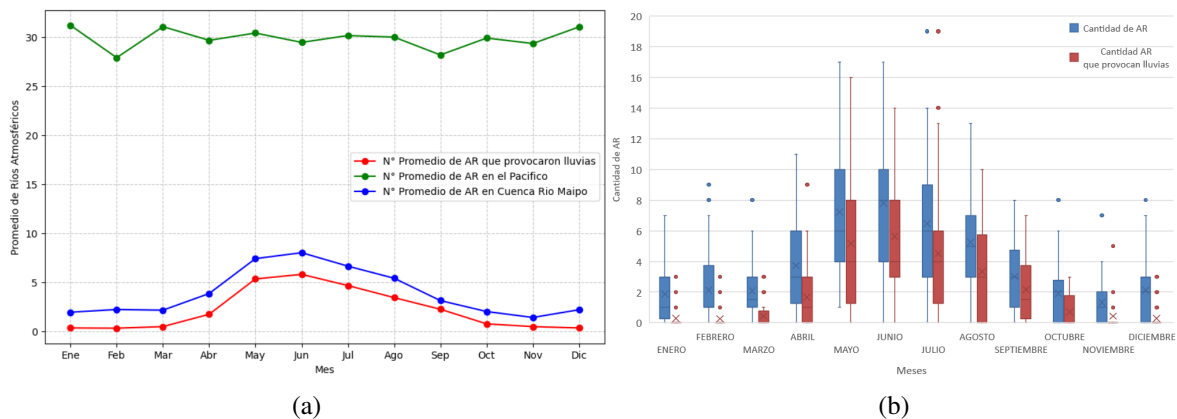


Figura 21: Promedio de días con condiciones de AR

5.2. Ríos atmosféricos y su contribución a las precipitaciones extremas

En esta sección se utilizan los registros obtenidos de las 46 estaciones consideradas en este estudio (ver tabla 2). Siguiendo la metodología de Viale et al. (2018), se ha calculado la contribución de los ríos atmosféricos a la precipitación anual. La precipitación anual se define como el promedio de precipitación registrado por las 46 estaciones de la cuenca.

La precipitación proveniente de condiciones AR se obtiene de igual forma que la precipitación anual, pero solo considerando los días en que existen condiciones AR en la cuenca

La figura 22 muestra la contribución de los Ríos atmosféricos (AR) a la precipitación anual desde 1979 hasta 2022. Se presenta la precipitación total anual (barras azules) y la precipitación en días con condiciones AR (barras rojas). Además, el porcentaje que representa la precipitación en días con AR respecto a la precipitación total se muestra encima de cada barra.

Los Ríos atmosféricos contribuyen de manera significativa a la precipitación total. En algunos casos, representan más del 50 % de la precipitación anual, como en los años 1987 (78 %), 1997(53 %), 2000 (65 %), y 2008 (73 %). Este alto porcentaje indica que los eventos de Ríos atmosféricos tienen una influencia importante en la precipitación anual.

Los datos muestran una notable variabilidad interanual en la contribución de los AR a la precipitación. Años como 1982 y 1987 muestran una alta influencia de los AR, mientras que otros años como 1996 (28 %) y 2019 (21 %) tienen una contribución mucho menor. Esta variabilidad sugiere que la influencia de los AR no es constante y puede estar influenciada por otros factores climáticos y atmosféricos, así como la categoría del AR. Se obtiene en promedio para los 43 años de análisis que los ríos atmosféricos contribuyen en un 53 % a la precipitación total anual registrada en la cuenca del río Maipo. Además, los resultados indican que los años más lluviosos son los que a su vez tienen mayor contribución de ríos atmosféricos.

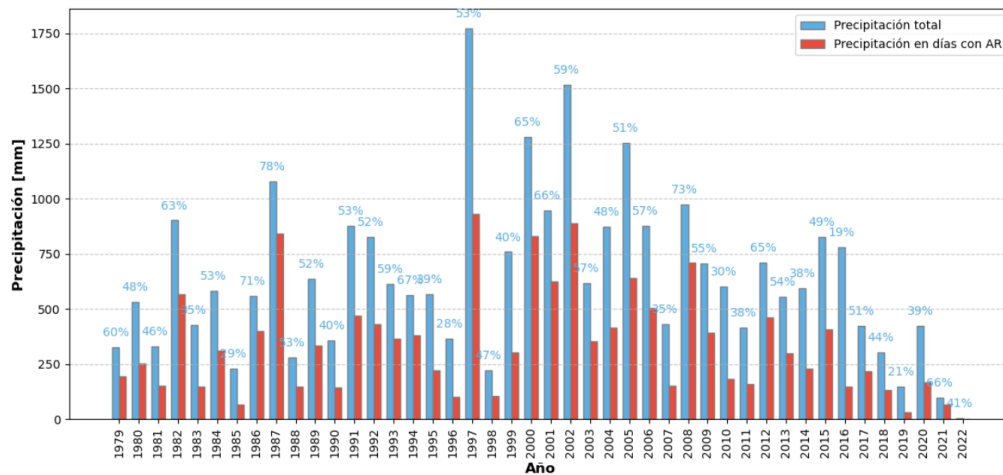


Figura 22: Contribución anual de los Ríos Atmosféricos a la precipitación

La figura 23 muestra la precipitación promedio mensual en condiciones de AR y sin estas condiciones. Las barras azules representan la precipitación promedio en días con AR, mientras que las barras amarillas muestran la precipitación promedio en días sin AR. El análisis se realiza mes a mes a lo largo de los 43 años de análisis.

La precipitación promedio en días con AR alcanza su punto máximo durante los meses de invierno (junio a agosto), con junio y julio mostrando los valores más altos, aproximadamente 17mm. Incluso en los meses de menor precipitación total, como enero y febrero, la presencia de ríos atmosféricos todavía contribuye a un aumento notable en la precipitación promedio en comparación con los días sin AR.

Enero y diciembre, que generalmente son meses más secos, aun muestran que los eventos de AR pueden aportar una cantidad significativa de precipitación. Los datos resaltan la importancia de los Ríos atmosféricos en el régimen de precipitaciones de la cuenca del río Maipo. Los AR son responsables de los valores más altos de precipitación mensual y son cruciales para comprender la variabilidad y los extremos de la precipitación anual. Los meses con mayor precipitación promedio coinciden con los periodos de mayor actividad de AR, lo que indica que estos eventos meteorológicos son un factor determinante en el clima de la región. Esto sugiere que la frecuencia y la intensidad de los AR tienen una influencia significativa en los patrones de lluvia, contribuyendo tanto a las lluvias intensas como a la distribución general de la precipitación a lo largo del año.

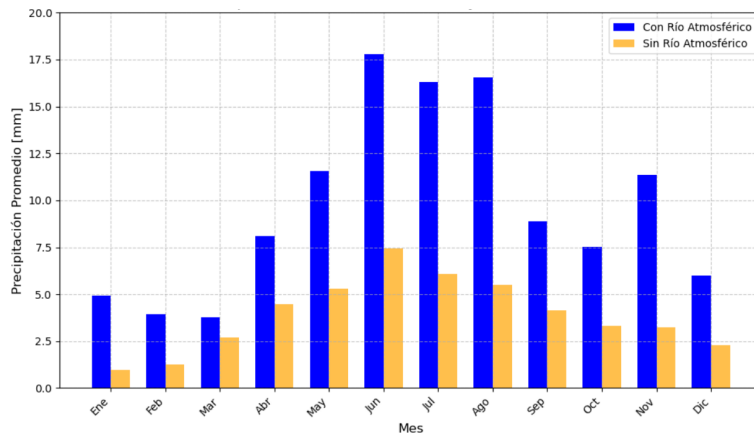


Figura 23: Precipitación promedio para los días con y sin condiciones AR

Respecto a la influencia de las condiciones AR con los eventos de precipitación extrema se analiza la cantidad de días con condiciones AR en la cuenca para diferentes categorías de tormentas definidas en la tabla 1 y para otras categorías de interés presentadas en la figura. Se observa que a medida que aumenta la cantidad de precipitación, hay una tendencia a un mayor porcentaje de días con condiciones de río atmosférico. Esto sugiere que los eventos de precipitación más intensa están más asociados con condiciones de río atmosférico.

Los datos muestran que existieron condiciones de río atmosférico para todos los días en que las tormentas fueron de categoría R-CAT3 y R-CAT4. Las categorías de tormentas de menor intensidad, como la precipitación entre 50 y 100mm y entre 50 y 200mm, también muestran proporciones significativas de días con condiciones de AR, aunque en menor medida que las tormentas más intensas. Esto indica que, aunque las tormentas moderadas tienen una menor asociación con condiciones AR, aún pueden estar relacionadas con este fenómeno atmosférico en la cuenca.

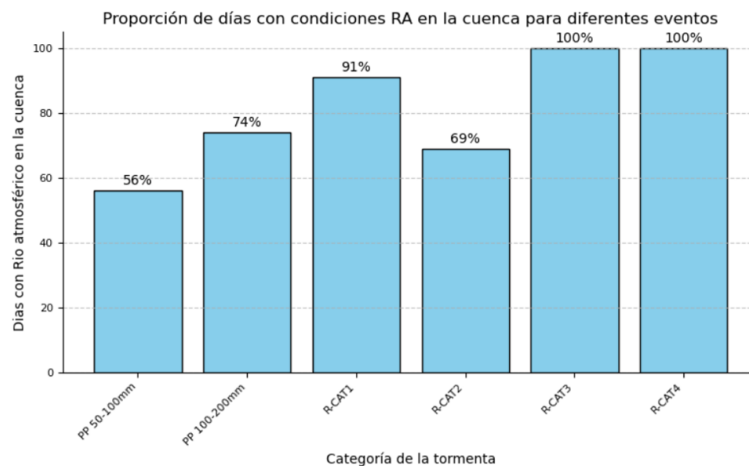


Figura 24: Ríos atmosféricos y su contribución a las precipitaciones extremas

5.3. Transporte de vapor de agua (IVT) de los ríos atmosféricos

En esta sección se analiza la influencia del valor de IVT en los Ríos atmosféricos que tocan la cuenca y aquellos que solo se forman en el pacifico. Para el caso en que las condiciones AR solo se forman en el pacifico, se calcula el promedio mensual del IVT maximo de cada rio atmosferico a lo largo de los 43 años de análisis. Para la condicion en que los AR tocan la cuenca del Rio Maipo, se calcula el IVT promedio dentro de la cuenca, lo anterior resulta en la figura 25. Existe una clara estacionalidad en el IVT asociado con los AR que tocan la cuenca y los que provocan lluvias, con maximos en los meses de mayo y junio, respectivamente. Los rios atmosfericos en el Pacifico tienen una variacion mucho menor a lo largo del ano, sugiriendo que la fuente de vapor de agua en el Pacifico es relativamente constante.

Los rios atmosfericos que provocan lluvias tienen los valores de IVT mas altos durante todo el ano y en particular en junio, lo que indica que durante este mes los rios atmosfericos son mas eficientes en transportar vapor de agua y generar precipitaciones. A partir de septiembre, tanto los AR que tocan la cuenca como los que provocan lluvias muestran una disminucion en IVT, alcanzando sus valores mas bajos en diciembre. Esto podria indicar una menor actividad de AR impactando la cuenca y provocando lluvias durante la primavera y verano

Este grafico revela patrones estacionales en el transporte de vapor de agua por rios atmosfericos y su impacto en la cuenca, con maximos en otoño e invierno, y una disminucion significativa en verano

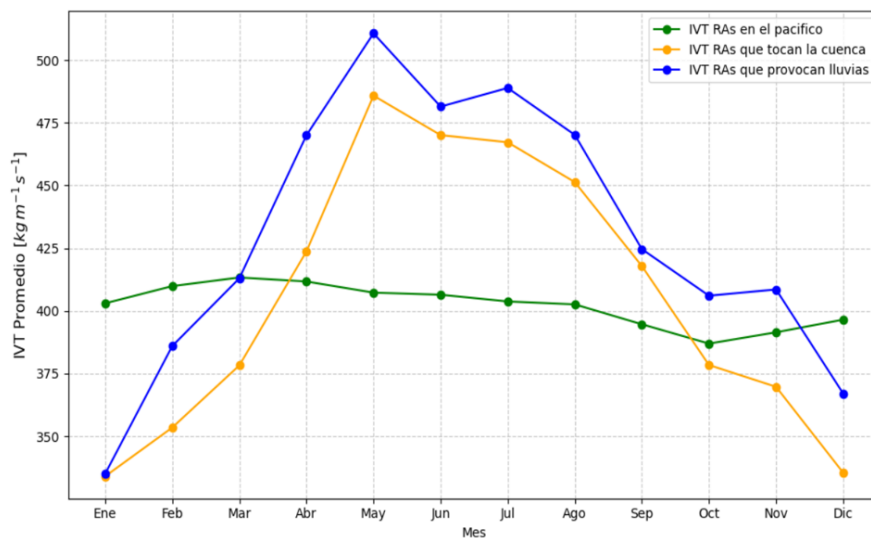


Figura 25: Media mensual IVT Máximo

La figura 26 muestra el IVT promedio de todos los días en la cuenca junto con la precipitación máxima registrada por las 46 estaciones consideradas. La figura 26 a) muestra que existe una tendencia ascendente general, lo que sugiere que a medida que aumenta la precipitación máxima, el IVT promedio también tiende a incrementarse. No obstante, la relación no es perfectamente lineal. Se observa una dispersión considerable en los datos, especialmente en los valores de precipitación más bajos (por debajo de 100 mm).

De la figura 26 b) se tiene que las precipitaciones entre 50-100 mm poseen un IVT promedio dentro de la cuenca del Rio Maipo centrado alrededor de $400 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, con un rango intercuartílico que va de aproximadamente 300 a $500 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Para las precipitaciones entre 50 y 200 mm se observa similar al rango anterior, con una mediana ligeramente mayor. Las precipitaciones entre 100 y 200 mm presentan

una mediana del IVT similar, pero el rango es más amplio, extendiéndose hasta cerca de $800 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. Precipitaciones entre 200 y 300 mm muestran un aumento de la mediana y el rango, con valores que alcanzan hasta $1000 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. Las precipitaciones mayores a 400 mm muestran los valores más altos de IVT, con una mediana por encima de $600 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y algunos valores extremos que superan los $1000 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$.

La figura 26 b) muestra que a medida que la precipitación máxima aumenta, la mediana del IVT también aumenta, lo que indica una relación positiva entre el IVT y la precipitación máxima. Los rangos intercuartílicos y las barras de bigotes se disminuyen en las categorías de mayor precipitación, lo que sugiere una menor variabilidad en el IVT para eventos de precipitación más intensa. Los altos valores de IVT en los eventos de precipitación más intensa sugieren que el transporte de vapor de agua es un factor crucial en estos eventos.

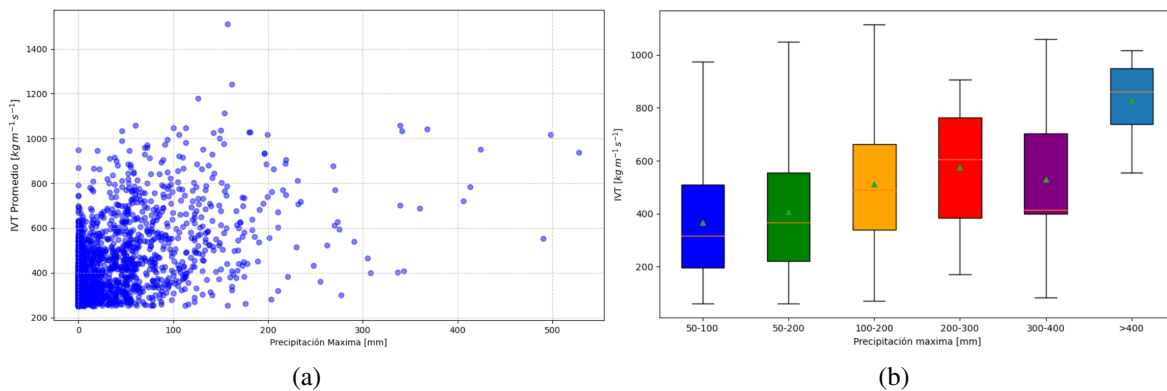


Figura 26: IVT v/s Precipitación

5.4. Clasificación de los ríos atmosféricos

La figura 27 muestra los ríos atmosféricos que tocaron la cuenca en todo el dominio de análisis según su categoría. Los ríos atmosféricos de menor intensidad (CAT1 y CAT2) son mucho más frecuentes que los de mayor intensidad (CAT3, CAT4 y CAT5) tanto anual (figura 27.a) como mensualmente (figura 27.b). Existe una variabilidad considerable tanto a lo largo de los años como dentro de los meses, con una clara estacionalidad que indica que ciertos periodos del año son más propensos a la formación de ríos atmosféricos. El ligero aumento en la frecuencia de los eventos en las últimas décadas podría ser indicativo de cambios climáticos. Se destaca que la gran mayoría de los ríos atmosféricos que tocan la cuenca son de categoría 1, es decir, tiene impactos positivos en la región.

Esta escala presenta dos grandes deficiencias. La primera es que no considera eventos de condiciones AR de poca duración, los cuales pueden producir grandes precipitaciones. En segundo lugar, debido a que la escala no está asociada a una zona en particular, los impactos positivos y negativos que se establecen están gobernados por las condiciones geográficas generales, lo que puede llevar a interpretaciones erróneas sobre los efectos reales en regiones particulares.

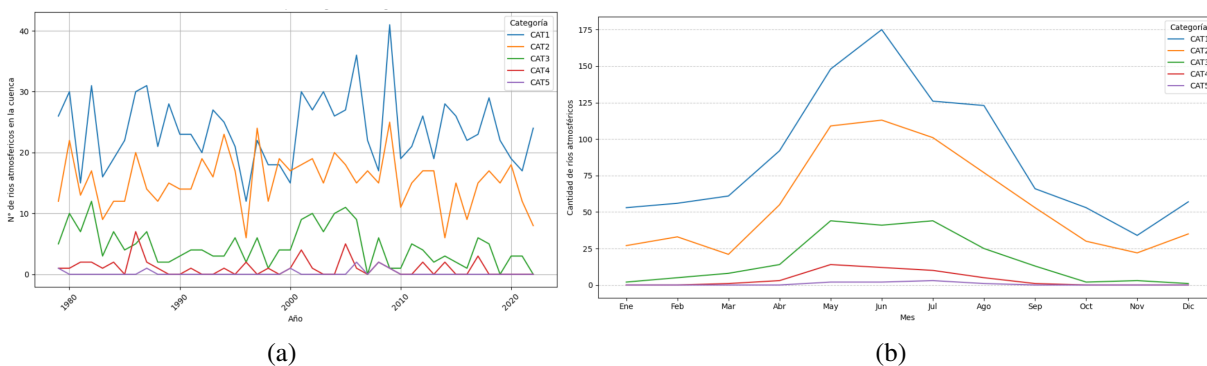


Figura 27: Categorización condiciones AR a nivel anual y mensual

5.5. Proyección de los ríos atmosféricos

La figura 28 muestra la evolución temporal de dos variables relacionadas con los ríos atmosféricos desde 1979 hasta 2022: el IVT Promedio dentro de la cuenca del Rio Maipo (kg/m/s) en el gráfico (a) y el Número de Ríos Atmosféricos en el gráfico (b).

Los gráficos indican una divergencia en las tendencias a largo plazo, es decir, mientras que el IVT promedio muestra un ligero incremento, el número de ríos atmosféricos presenta una ligera disminución. Esto podría sugerir que, aunque hay menos eventos de ríos atmosféricos, los que ocurren transportan más vapor de agua y son mas intensos.

La alta variabilidad interanual en ambas variables resalta la naturaleza dinámica y compleja de los ríos atmosféricos, influenciados por múltiples factores climáticos. Las tendencias observadas podrían estar relacionadas con cambios en patrones climáticos más amplios, como el calentamiento global, que pueden afectar tanto la frecuencia como la intensidad de los ríos atmosféricos.

Los resultados obtenidos en este estudio son congruentes con los pronósticos globales del Center For Western Weather and Water Extremes que indican un aumento del IVT a lo largo de los años.

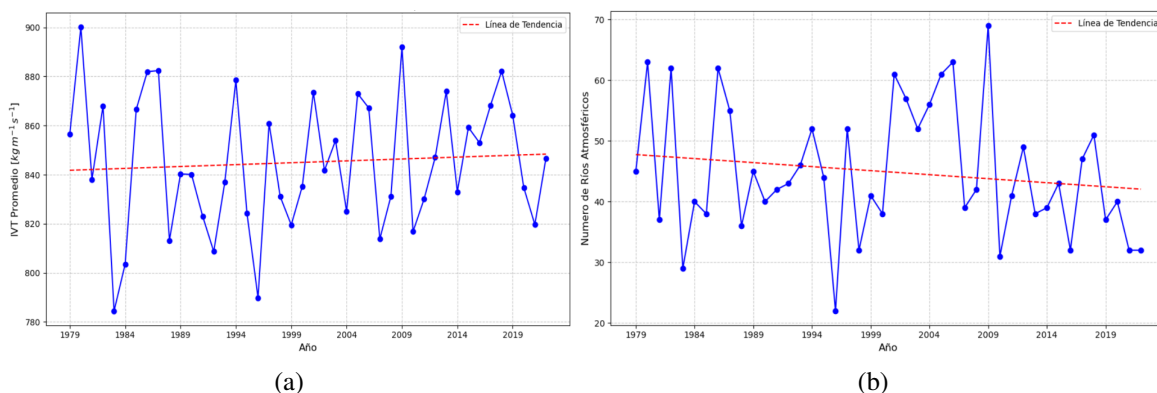


Figura 28: IVT y Cantidad de Ríos Atmosféricos en el dominio

5.6. Caso de estudio evento 13 de junio del 2000.

Los días con las máximas precipitaciones causadas por las condiciones de Ríos Atmosféricos según su categorización se han registrado y se presenta en la tabla 3. Se observa una correlación general entre el valor de IVT y la precipitación máxima. A mayor IVT, parece haber una mayor precipitación máxima, como se observa en los datos del 13-07-1987 (IVT de 937 y precipitación de 528 mm) y del 13-06-2000 (IVT de 1017 y precipitación de 498 mm).

Los eventos que duran más días tienden a asociarse con mayores precipitaciones. Por ejemplo, los eventos del 12-06-2000 y 13-06-2000 duraron 3 días y produjeron precipitaciones de 424 mm y 498 mm, respectivamente. En resumen, la tabla sugiere que hay una fuerte relación entre la IVT, la duración de las condiciones de los ríos atmosféricos y la precipitación máxima. Los eventos más intensos y de mayor duración tienden a generar más precipitaciones y se clasifican en categorías más altas de AR.

Tabla 3: Fechas y categorías AR

Fecha	IVT Cuenca $kgm^{-1}s^{-1}$	Duración condiciones de Río Atmosférico	Precipitación Máxima [mm]	Escala Tormenta	Escala de AR	Intensidad Río atmosférico
03-06-2002	687	1 día	360	R-CAT3	CAT1	Débil
14-07-1987	721	2 días	406	R-CAT3	CAT2	Moderado
13-07-1987	937	2 días	528	R-CAT4	CAT3	Fuerte
12-06-2000	951	3 días	424	R-CAT3	CAT4	Extremo
13-06-2000	1017	3 días	498	R-CAT3	CAT5	Excepcional

Para realizar un análisis más detallado de uno de los días presentados en la tabla anterior, la Figura 29 ilustra la evolución de los ríos atmosféricos que impactaron la cuenca del Maipo el 13 de junio de 2000, uno de los días con mayor acumulación de precipitaciones en todo el dominio considerado, alcanzando un total de 498 mm acumulados en tres días en la Estación El Yeso Embalse. Durante este día específico, se experimentaron cortes de energía eléctrica, cierre de caminos, desprendimientos de rocas y desbordamientos de los ríos Mapocho, Zanjón de Aguada y diversos canales. Esta tormenta provocó alrededor de 9000 damnificados en las regiones V y Metropolitana

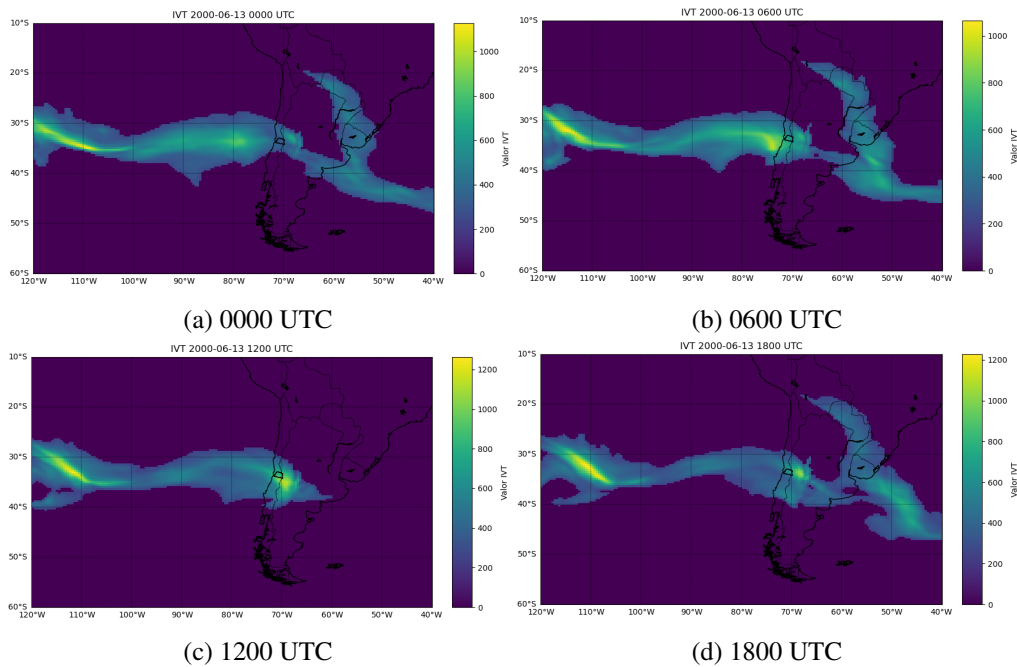


Figura 29: Evolución de Río atmosférico para el día 13-06-2000

La figura 30 muestra el IVT vs Precipitación para el día 13-06-2000. Se observa que el IVT muestra un aumento gradual desde el 7 de junio hasta alcanzar el máximo el 13 de junio. Después del máximo, el IVT disminuye rápidamente hasta el 14 de junio, seguido por una disminución más gradual hasta el 18 de junio. La precipitación máxima sigue una tendencia similar a la del IVT, con un incremento que alcanza su máximo el 13 de junio y luego desciende en los días siguientes. Existe una clara correlación entre el IVT y la precipitación máxima. Cuando el IVT aumenta, la precipitación también lo hace, alcanzando ambos su punto máximo el 13 de junio.

Después del máximo del 13 de junio, tanto el IVT como la precipitación máxima disminuyen rápidamente el 13 y 14 de junio, y luego siguen disminuyendo de forma más gradual hasta el 18 de junio. La precipitación y el IVT casi se estabilizan después del 16 de junio, indicando el fin del evento de río atmosférico.

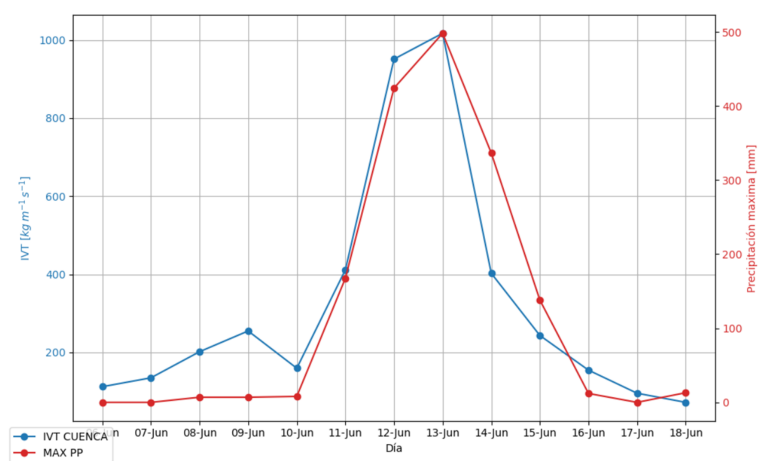


Figura 30: IVT v/s Precipitación día 13-06-2000

6. Conclusiones

En este estudio, se identifican tanto los ríos atmosféricos formados en el pacífico y los que tocan la cuenca del Río Maipo mediante datos de reanálisis provenientes del CFSR. Se evaluó el impacto de los AR sobre las precipitaciones extremas utilizando registros de precipitación proveniente de 46 estaciones ubicadas en la cuenca según la tabla 2. En el periodo 1979-2022 los AR fueron detectados mediante un algoritmo basado en ocurrencias con una resolución temporal de 6 horas. Los ríos atmosféricos son clasificados según la escala propuesta por Ralph et al. (2019) y las tormentas según la escala de precipitación acumulada en 3 días propuesta por Ralph and Dettinger (2012)

Se ha observado que los ríos atmosféricos contribuyen de manera importante a las precipitaciones en todo el dominio analizado predominando en los meses fríos (otoño-invierno), donde estos aumentan en cantidad e intensidad, de todas formas, en los meses de verano la contribución continua, pero en menor medida. Los datos obtenidos sugieren que los ríos atmosféricos contribuyen en un 47 % a la precipitación total anual. En escala mensual, las precipitaciones son entre 2 y 3 veces más intensas que en condiciones no AR. Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con investigaciones previas tanto en Chile como en la costa oeste de Estados Unidos (Viale et al., 2018), (Dettinger et al., 2011), (Neiman et al., 2008).

El análisis de eventos extremos revela que todos los eventos de mayor intensidad (R-CAT3 y R-CAT4) están asociados a la presencia de condiciones AR en la cuenca, mientras que para precipitaciones acumuladas en 3 días en el rango de 50-200mm la presencia de condiciones AR en la cuenca es del 62 %. Los datos muestran que los ríos atmosféricos están presentes en el continente prácticamente todo el año y de manera constante, sin embargo, solo un 13 % logra tocar la cuenca y de estos un 69 % están presentes los días de lluvia. Además, tal como se proyecta el cambio climático, los datos son consistentes en determinar que los ríos atmosféricos con el paso del tiempo han disminuido en cantidad pero aumentado en intensidad (ver figura 28).

Se observa que la influencia del IVT y la categoría de los ríos atmosféricos no es tan clara para tormentas de baja intensidad (R-CAT1, R-CAT2). Por el contrario, para las precipitaciones extremas que clasifican en las categorías más altas aquí definidas, la correlación entre el aumento de IVT y aumento de la categoría de las condiciones AR es notable. La figura 26 b) muestra que las precipitaciones mayores a 400 mm poseen baja dispersión cuando se compara con los valores de IVT. Lo anterior coincide con lo encontrado en la costa oeste de Estados Unidos por Neiman et al. (2008).

En este trabajo se han encontrado asociaciones significativas no solo entre la intensidad de precipitación y las condiciones AR en la cuenca del Río Maipo, sino que también entre el transporte de vapor de agua (IVT) y la intensidad de precipitación. Estos resultados contribuyen a mejorar la comprensión de la relación entre los ríos atmosféricos y los eventos de precipitaciones extremas en la costa de Chile y en específico en la cuenca del Río Maipo

Referencias

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., et al. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- Alfaro, M. D. M. and Huanca, J. M. M. (2021). Estudio de comparación de datos meteorológicos de reanálisis del sistema de predicción del clima (cfsr) y centros nacionales de predicción ambiental (ncep) con datos de la estación del municipio de viacha, la paz: Marcela daniela mollericona alfaro, joel moisés mamani huanca. *Apthapi*, 7(3):2216–2228.
- Bárcena, A., Samaniego, J., Núñez, W. P., Alatorre, J. E., et al. (2020). *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?* United Nations.
- Bell, J. L., Sloan, L. C., and Snyder, M. A. (2004). Regional changes in extreme climatic events: a future climate scenario. *Journal of Climate*, 17(1):81–87.
- Cade-Idepe, D. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. *Cuenca del Río Paicaví. Para la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas*.
- Cambio Climático, O. (2021). Reporte anual de la evolución del clima en Chile 2020. *Santiago de Chile*. Retrieved from http://archivos.meteochile.gob.cl/portaldmc/meteochile/documentos/Reporte2020_edmay2021_DMC.pdf.
- CEPAL, C. d. (2012). Comisión económica para América Latina y el Caribe. *Santiago de Chile*.
- CEPAL, N. (2018). *La ineficiencia de la desigualdad*. CEPAL.
- CEPAL, N. et al. (2015). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible.
- Clark, W. C. and Jäger, J. (1997). Climate change 1995: the science of climate change. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 39(9):23–28.
- CONAMA (2007). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. Santiago, Chile, Departamento de Geofísica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- COP25, C. C., Rojas, M., Aldunce, P., Farías, L., González, H., Marquet, P., Muñoz, J., Palma-Behnke, R., Stehr, A., Vicuña, S., et al. (2019). Evidencia científica y cambio climático en Chile: resumen para tomadores de decisiones.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1):45–65.
- De La Convención, P. D. K. (1998). Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Naciones Unidas*, 25:27.
- Dettinger, M. D., Ralph, F. M., Das, T., Neiman, P. J., and Cayan, D. R. (2011). Atmospheric rivers, floods and the water resources of California. *Water*, 3(2):445–478.
- Dirección Meteorológica de Chile (2021). Eventos Extremos en Chile 2021. *Dirección Meteorológica de Chile: Oficina de Servicios Climáticos*.

- Eiras Barca, J. (2018). Ríos atmosféricos y transporte de humedad tropical: Relevancia para la precipitación extrema y la ciclogénesis explosiva.
- Espinoza, V., Waliser, D., Guan, B., Lavers, D., and Ralph, F. M. (2018). Global analysis of climate change projection effects on atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 45(9):4299–4308. <http://doi.org/10.1029/2017GL076968>.
- Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in central chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5):1515–1534.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12):6307–6327.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., and Veloso-Aguila, D. (2020). The central chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1):421–439.
- Gimeno, L., Nieto, R., Vázquez, M., and Lavers, D. A. (2014). Atmospheric rivers: A mini-review. *Frontiers in Earth Science*, 2:2.
- Gómez Zavala, T. I. (2022). Identificación de patrones de gran escala conducentes a la formación de condiciones de río atmosférico en chile continental.
- Gorodetskaya, I. V., Tsukernik, M., Claes, K., Ralph, M. F., Neff, W. D., and Van Lipzig, N. P. (2014). The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in east antarctica. *Geophysical Research Letters*, 41(17):6199–6206.
- Guan, B. and Waliser, D. E. (2015). Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(24):12514–12535.
- Houghton, J. T. (1996). *Climate change 1995: The science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, volume 2. Cambridge University Press.
- Lamjiri, M. A., Dettinger, M. D., et al. (2017). The impacts of atmospheric rivers on california’s extreme precipitation. In *2017 AGU Fall Meeting*. AGU.
- Lavers, D. A., Pappenberger, F., Richardson, D. S., and Zsoter, E. (2016). Ecmwf extreme forecast index for water vapor transport: A forecast tool for atmospheric rivers and extreme precipitation. *Geophysical Research Letters*, 43(22):11–852.
- Lavers, D. A. and Villarini, G. (2015). The contribution of atmospheric rivers to precipitation in europe and the united states. *Journal of Hydrology*, 522:382–390.
- Lavers, D. A., Villarini, G., Allan, R. P., Wood, E. F., and Wade, A. J. (2012). The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to british winter floods and the large-scale climatic circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D20).
- Mollericona Alfaro, M. D. and Mamani Huanca, J. M. (2021). Estudio de comparación de datos meteorológicos de reanálisis del sistema de predicción del clima (cfsr) y centros nacionales de predicción ambiental (ncep) con datos de la estación del municipio de viacha, la paz. *APTHAPI*, 7:16.

- Mundhenk, B. D., Barnes, E. A., and Maloney, E. D. (2016). All-season climatology and variability of atmospheric river frequencies over the north pacific. *Journal of Climate*, 29(13):4885–4903. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0655.1>.
- Neiman, P. J., Ralph, F. M., Wick, G. A., Lundquist, J. D., and Dettinger, M. D. (2008). Meteorological characteristics and overland precipitation impacts of atmospheric rivers affecting the west coast of north america based on eight years of ssm/i satellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 9(1):22–47.
- Neiman, P. J., Schick, L. J., Ralph, F. M., Hughes, M., and Wick, G. A. (2011). Flooding in western washington: The connection to atmospheric rivers. *Journal of Hydrometeorology*, 12(6):1337–1358.
- Newell, R. E., Newell, N. E., Zhu, Y., and Scott, C. (1992). Tropospheric rivers?—a pilot study. *Geophysical research letters*, 19(24):2401–2404. <http://doi.org/10.1029/92GL02916>.
- Parry, M. L. (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC*, volume 4. Cambridge University Press.
- Payne, A. E., Demory, M.-E., Leung, L. R., Ramos, A. M., Shields, C. A., Rutz, J. J., Siler, N., Villarini, G., Hall, A., and Ralph, F. M. (2020). Responses and impacts of atmospheric rivers to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(3):143–157.
- Payne, A. E. and Magnusdottir, G. (2015). An evaluation of atmospheric rivers over the north pacific in cmip5 and their response to warming under rcp 8.5. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(21):11–173.
- Ralph, F., Coleman, T., Neiman, P., Zamora, R., and Dettinger, M. (2013). Observed impacts of duration and seasonality of atmospheric-river landfalls on soil moisture and runoff in coastal northern california. *Journal of Hydrometeorology*, 14(2):443–459.
- Ralph, F. and Dettinger, M. (2012). Historical and national perspectives on extreme west coast precipitation associated with atmospheric rivers during december 2010. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(6):783–790.
- Ralph, F. M., Dettinger, M., Lavers, D., Gorodetskaya, I. V., Martin, A., Viale, M., White, A. B., Oakley, N., Rutz, J., Spackman, J. R., et al. (2017a). Atmospheric rivers emerge as a global science and applications focus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(9):1969–1973.
- Ralph, F. M., Iacobellis, S., Neiman, P., Cordeira, J., Spackman, J., Waliser, D., Wick, G., White, A., and Fairall, C. (2017b). Dropsonde observations of total integrated water vapor transport within north pacific atmospheric rivers. *Journal of Hydrometeorology*, 18(9):2577–2596.
- Ralph, F. M., Neiman, P. J., and Wick, G. A. (2004). Satellite and caljet aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern north pacific ocean during the winter of 1997/98. *Monthly weather review*, 132(7):1721–1745.
- Ralph, F. M., Rutz, J. J., Cordeira, J. M., Dettinger, M., Anderson, M., Reynolds, D., Schick, L. J., and Smallcomb, C. (2019). A scale to characterize the strength and impacts of atmospheric rivers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(2):269–289.

- Ramos, A. M., Wilson, A. M., DeFlorio, M. J., Warner, M. D., Barnes, E., Garreaud, R., Gorodetskaya, I. V., Lavers, D. A., Moore, B., Payne, A., et al. (2019). 2018 international atmospheric rivers conference: Multi-disciplinary studies and high-impact applications of atmospheric rivers. *Atmospheric Science Letters*, 20(9):e935.
- Rutz, J. J., Steenburgh, W. J., and Ralph, F. M. (2014). Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the western united states. *Monthly Weather Review*, 142(2):905–921.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., et al. (2010). The ncep climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8):1015–1058.
- Scaff, L., Lillo Saavedra, M., Oyarzun Lucero, R., and Jara Rios, A. (2023). Ríos atmosféricos y su impacto en la hidrología. *Serie Comunicacional CRHIAM*, (45).
- Toledo, A. (1998). Programa de las naciones unidas para el medio ambiente-oficina regional para américa latina y el caribe. *Economía de la biodiversidad*.
- Vargas, W. M. and Núñez, M. N. (1989). Interacciones del clima y la sociedad; respuestas sociales y gubernamentales. *Boletín Informativo Techint*, pages 3–3.
- Viale, M. and Nuñez, M. N. (2011). Climatology of winter orographic precipitation over the subtropical central andes and associated synoptic and regional characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4):481–507.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., and Ralph, F. M. (2018). Impacts of atmospheric rivers on precipitation in southern south america. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10):1671–1687. <http://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0006.1>.
- Vicencio Veloso, J. M. (2020). Análisis de un evento extremo precipitación ocurrido en enero de 2020 en el desierto de atacama y su relación con un río atmosférico en la costa occidental de sudamérica.
- Villarroel, C., Rosenblüth, B., and Aceituno, P. (2006). Climate change along the extratropical west coast of south america (chile): Daily max/min temperatures. In *8th ICSHMO conference, Foz de Iguazu*.
- Warner, M. D., Mass, C. F., and Salathé, E. P. (2012). Wintertime extreme precipitation events along the pacific northwest coast: Climatology and synoptic evolution. *Monthly Weather Review*, 140(7):2021–2043.
- Watterson, I. and Dix, M. (2003). Simulated changes due to global warming in daily precipitation means and extremes and their interpretation using the gamma distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13).
- Zhu, Y. and Newell, R. E. (1998). A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly weather review*, 126(3):725–735.