



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

Análisis de trayectorias extremas mediante modelo HYSPLIT, para eventos dentro de Chile continental

Memoria de Título presentada por

Matías Sebastián Belmar Bustos

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Álvaro Ossandón

Octubre de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis de trayectorias extremas mediante modelo HYSPLIT, para eventos dentro de Chile continental

Nombre del candidato(a): Matías Sebastián Belmar Bustos

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Álvaro Humberto Ossandón Álvarez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 30-10-2025

Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 30-10-2025

Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS DE TORMENTAS EXTREMAS MEDIANTE MODELO HYSPLIT, PARA EVENTOS DENTRO DE CHILE CONTINENTAL

Matías Belmar¹, Álvaro Ossandón¹

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago/Valparaíso, Chile.

Resumen

Conocer los factores que gatillan o favorecen los fenómenos de precipitación extrema es de alto interés, ya que cuando se logran identificar patrones de comportamiento, se pueden generar o mejorar los modelos predictivos que caracterizan el inicio, la duración y la intensidad de dichas precipitaciones. En este estudio, se analizan las zonas de generación de las tormentas extremas para el territorio de Chile continental, mediante la obtención de trayectorias de humedad del aire, usando el modelo *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT). Para ello, primeramente, se regionalizó el país en función de series de tiempo de precipitaciones máximas mediante un análisis de agrupamiento con el método *k-medoids*, lo que permitió definir zonas homogéneas y detectar los eventos extremos más representativos en cada una de ellas. Posteriormente, estos eventos fueron incorporados en el modelo HYSPLIT, con el cual se realizaron análisis de trayectorias hacia atrás en el tiempo para rastrear el origen y el desplazamiento de las masas de aire asociadas. Esta aproximación, permitió obtener un conjunto de trayectorias plausibles para los eventos, destacando patrones espaciales recurrentes en las fuentes de humedad que alimentan las precipitaciones extremas en distintas zonas del país.

Los resultados obtenidos muestran que las fuentes de humedad que alimentan los eventos extremos en Chile presentan una marcada variabilidad en sus orígenes. En las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y el norte de Antofagasta, las precipitaciones extremas se asocian principalmente a aportes continentales de gran escala, con una influencia destacada de la cuenca amazónica. En contraste, en el sur de Antofagasta y en la región de Coquimbo, la humedad que sustenta los eventos extremos proviene mayoritariamente de fuentes costeras.

Desde la región de Valparaíso hasta el norte de Los Lagos, los eventos extremos muestran una marcada influencia oceánica, caracterizada por trayectorias de origen tropical estrechamente asociadas a ríos atmosféricos y moduladas por fenómenos macroclimáticos como el Anticiclón del Pacífico Sur, el cual favorece la convergencia de vapor de agua hacia el continente. Por otro lado, en el sur de Los Lagos, Aysén y Magallanes, las limitaciones en la calidad de los datos no permiten caracterizar de manera precisa el origen de la humedad asociada a las precipitaciones.

En conjunto, los resultados revelan una transición espacial coherente con los mecanismos de aporte de humedad, que evoluciona desde flujos continentales y amazónicos en el norte hacia una dominancia oceánica y frontal en el centro y sur del país.

Palabras claves: Clustering; k-medoids; HYSPLIT; Extreme Precipitation; Back Trajectory Analysis

Índice

1	Introducción.....	5
2	Objetivos	6
2.1	Objetivo General (OG).....	6
2.2	Objetivo específico 1 (OE1).....	6
2.3	Objetivo específico 2 (OE2).....	6
2.4	Objetivo específico 3 (OE3).....	6
3	Zona de estudio.....	6
3.1	Base de datos	8
4	Metodología.....	9
4.1	Clasificación del territorio.....	9
4.1.1	Filtrado de información.....	9
4.1.2	Ventana de estudio.....	9
4.1.3	Agrupación de datos.....	10
4.2	Obtención de trayectorias.....	12
4.2.1	Modelo de trayectorias: HYSPLIT	12
4.2.2	Eventos de precipitaciones máximas diarias	12
4.2.3	Parámetros de generación de trayectorias	12
4.3	Zonas de generación.....	13
4.3.1	Filtrado de casos relevantes.....	13
4.3.2	Identificación de zonas de generación	14
5	Resultados.....	14
5.1	Filtrado de estaciones.....	14
5.2	Ventana de Estudio	14
5.3	Agrupación de datos.....	16
5.4	Precipitaciones extremas por Zona Característica:	19
5.5	Zonas de generación.....	20
5.6	Trayectorias por zona característica.....	23
6	Discusión de los resultados obtenidos.....	27
7	Conclusión.....	28
8	Referencias	29
9	Anexos.....	32
9.1	Puntos de máxima humedad específica.....	32

1 Introducción

Durante el último tiempo, fenómenos como las inundaciones han azotado cada vez de forma más frecuente el globo, dejando a su paso efectos como múltiples fatalidades, desapariciones, cortes de energía, y daño a la infraestructura, entre otros (UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, 2015; Wang & Gu, 2016; Cornwall, 2021; Dalagnol et al., 2022), resultando de manera general en un empobrecimiento de la calidad de vida de todos los afectados. En el caso de Chile, estas inundaciones son mayoritariamente producto de eventos de precipitación extrema (Rojas et al., 2014a), y se proyecta que el cambio climático solo aumente cada vez más la severidad y la frecuencia de este tipo de eventos (Bozkurt et al., 2018).

Establecer relaciones entre las distintas variables hidrológicas para explicar el comportamiento dinámico de las fuentes de humedad es algo que se ha llevado a cabo en diversos estudios (e.g. Kumar, 2015; Zeng et al., 2017), empleando para ello herramientas de Machine Learning orientadas a identificar patrones, predecir variables hidrológicas y realizar simulaciones, entre otras aplicaciones (Jung, 2022).

Estas metodologías contribuyen a optimizar los modelos predictivos actuales, lo que permite generar pronósticos más precisos y con mayor anticipación. De este modo, la población puede prepararse de manera oportuna y mitigar con mayor eficacia los efectos adversos asociados a eventos extremos.

Entre las variables hidrológicas vinculadas a precipitaciones extremas, destacan las zonas de generación de humedad, es decir, aquellas regiones desde donde se origina el vapor de agua que posteriormente se transforma en precipitación extrema, y cuya variabilidad espacial y temporal constituye un aspecto clave en su caracterización.

Parte del proceso de identificar qué es una lluvia extrema, consiste en entender el contexto en el que éstas se desarrollan. Dada su geografía, Chile cuenta con una diversidad de zonas climáticas, en las cuales la magnitud de un evento extremo varía fuertemente dependiendo de qué zona se esté analizando. Por ello, es necesario en una primera instancia regionalizar el país en función de sus precipitaciones características. La agrupación espacial de observaciones es una práctica común en climatología, ya que permite resumir grandes cantidades de información de manera concisa. Estos grupos, o “clusters” se pueden obtener mediante métodos de *clustering*, los cuales agrupan las observaciones (en este caso, datos de precipitación) en función de sus similitudes.

Algunos de los métodos de *clustering* más utilizados en la actualidad son, por ejemplo, los *Self Organizing Maps* (SOM), los cuales agrupan grandes cantidades de datos con alta dimensionalidad y los proyectan en una rejilla bidimensional en donde son agrupados (Kohonen, 1990). Otro ejemplo son los métodos de *k-means* y *k-medoids* (Bao, 2021; Leonard Kaufman & Peter J. Rousseeuw, 1987), que dividen la información entregada en un número predefinido de grupos. Mientras que *k-means* utiliza como centroide la media de cada grupo, *k-medoids* selecciona representantes reales, manteniendo un mejor control de la información ante la presencia de valores extremos.

Una vez definidas las regiones geográficas a partir de las precipitaciones características, e identificados los eventos más relevantes en cada una de ellas, resulta fundamental analizar el comportamiento de las masas de aire previo a dichos eventos, con el fin de determinar el momento y lugar en que se produce la captación de humedad que alimenta la precipitación. Para este propósito diversas instituciones y centros de investigación han desarrollado modelos climáticos, los cuales permiten simular variables atmosféricas con resolución horaria a escala global. Entre estas variables se incluye la humedad, lo que posibilita realizar un seguimiento espacial de su evolución dentro del dominio simulado. Uno de los modelos más utilizado corresponde a HYSPLIT (Stein et al., 2015), el cual ha sido ampliamente usado tanto dentro como fuera del país para determinar la dispersión en el aire de la humedad, así como aerosoles, cenizas, entre otros. La utilización del modelo HYSPLIT para determinar las zonas de generación de tormentas extremas, mediante trayectorias que se mueven hacia atrás en el tiempo, o “back trajectories” ha sido extensamente utilizado y probado tanto para el estudio de precipitaciones extremas particulares (Nie & Sun, 2022; Vicencio Veloso, 2020) como para un espectro más amplio, temporal y espacialmente (e.g Bracken et al., 2015).

Dentro de Chile, también existe un amplio registro de la utilización del modelo HYSPLIT para explicar las zonas de generación de precipitaciones extremas (Caballero, 2023; Jordan et al., 2019; Meseguer-Ruiz et al., 2020; Vicencio Veloso, 2020), sin embargo, estos estudios son exclusivos a fenómenos en la zona norte de Chile, dejando un vacío a la pregunta de las zonas de generación en el resto del país.

Con el objetivo de identificar las zonas de generación de humedad que dan origen a precipitaciones extremas en Chile continental, este estudio emplea registros de precipitación diaria de la DGA y un proceso de regionalización del territorio. A partir de esta clasificación, se analizan las trayectorias atmosféricas asociadas a eventos extremos mediante el modelo HYSPLIT, lo que permite comprender de manera integral los orígenes y dinámicas de la humedad vinculada a lluvias intensas en distintas regiones del país.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General (OG)

Identificar las zonas de generación de tormentas extremas para el territorio de Chile continental.

Para la realización del OG se debe cumplir previamente con los siguientes objetivos específicos (OE):

2.2 Objetivo específico 1 (OE1)

Clasificar el territorio de Chile continental en distintas zonas (clústeres) de precipitación característica.

2.3 Objetivo específico 2 (OE2)

Identificar las distintas trayectorias de humedad previas a un evento de precipitación extrema.

2.4 Objetivo específico 3 (OE3)

Establecer zonas de generación de tormentas extremas para cada clúster estudiado

3 Zona de estudio

El territorio de Chile continental se caracteriza por su gran longitud (alrededor de 4200km de norte a sur) y su estrechez (en promedio 180km). Se extiende desde la latitud $\sim 17^{\circ}\text{S}$ a la $\sim 57^{\circ}\text{S}$, dotando así al territorio de múltiples y variados climas. Debido a esto, el país se suele catalogar en 5 macrozonas (Figura 1):

- Norte Grande: Caracterizado por un clima desértico absoluto, con precipitaciones casi nulas en la costa y lluvias estivales en altiplano, en donde la vegetación es escasa.
- Norte Chico: Posee un clima semiárido, con precipitaciones invernales concentradas y una vegetación estepa arbustiva, más abundante que en el Norte Grande. Marca la transición desde el clima desértico hacia el clima mediterráneo a medida que avanza hacia el sur.
- Zona Central: Predomina el clima mediterráneo, caracterizado por precipitaciones invernales y un déficit hídrico en verano. Esta zona corresponde al principal espacio agrícola y urbano del país.
- Zona Sur: Posee un clima templado oceánico y abundantes precipitaciones a lo largo del año. Las temperaturas son moderadas y disminuyen hacia el sur.
- Zona Austral: Se observa clima templado frío lluvioso y polar oceánico, con precipitaciones abundantes, las cuales en parte son en forma de nieve, fuertes vientos y alta nubosidad. Las frías temperaturas favorecen la presencia de glaciares y ecosistemas subantárticos.

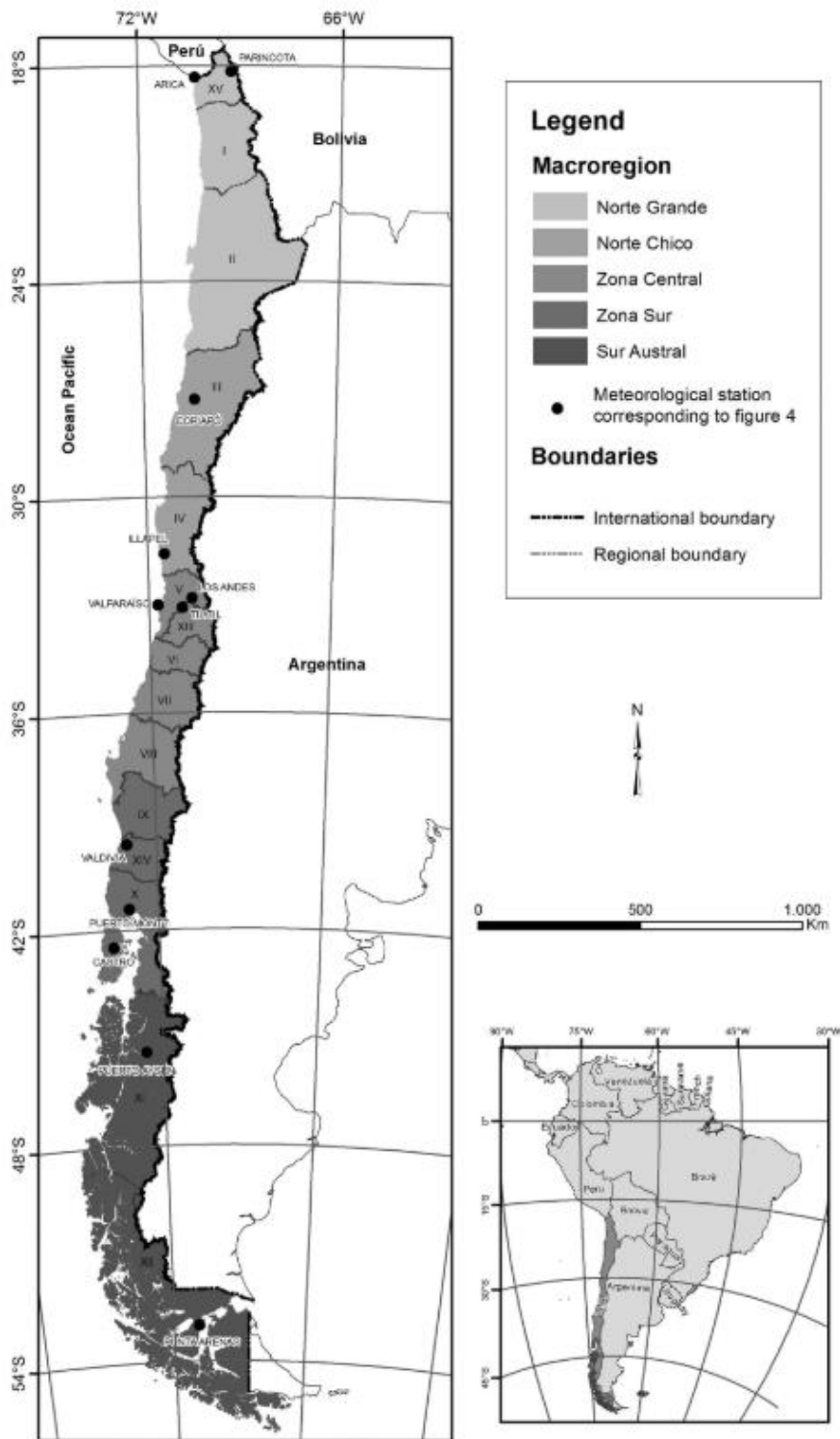


Figura 1: Macrozonas climáticas de Chile. Fuente: (Sarricolea et al., 2017)

El país se encuentra, además, marcado por tres tipos de relieve en toda su extensión. Desde este a oeste, se encuentran: la cordillera de los andes, la cual alcanza altitudes por sobre los 6000m de altura en el norte y el centro; una depresión intermedia, que varía desde altiplanicies áridas en el norte, cuencas en la zona central y hacia el sur se transforma llanuras y cuencas con presencia de lagos de origen glaciar; y la cordillera de la costa, paralela al litoral y la cual se presenta continua en el norte, fragmentada en el

centro y sumergida en el extremo austral, dando origen a archipiélagos y fiordos. Esta variación geomorfológica es representada en la siguiente figura:

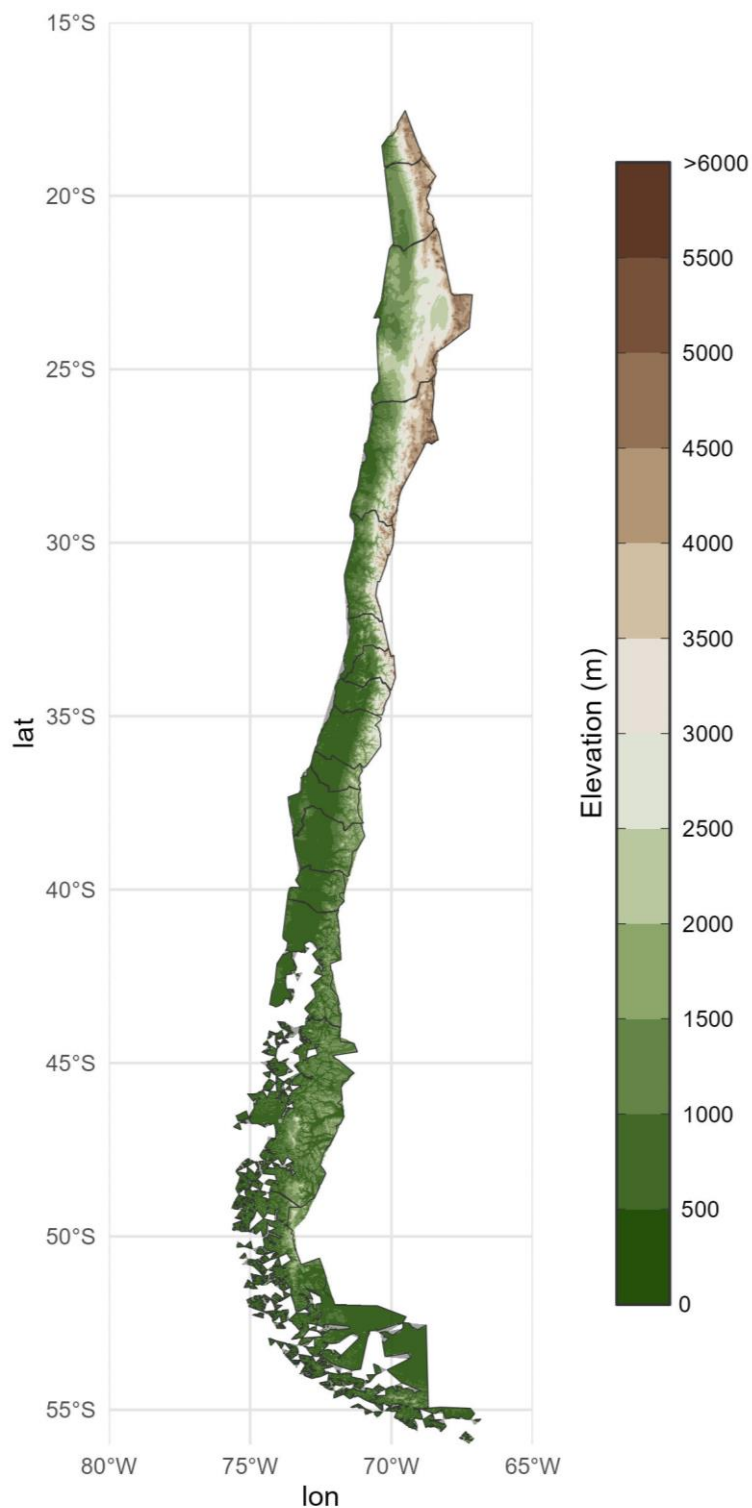


Figura 2: Mapa de elevaciones de Chile continental

3.1 Base de datos

La búsqueda de eventos de precipitaciones extremas se centrará en el territorio de Chile continental, utilizando como fuente principal las observaciones registradas por las estaciones pluviométricas de la

DGA. Esta base de datos contiene información diaria de precipitación proveniente de un total de 875 estaciones distribuidas a lo largo del territorio nacional, abarcando un periodo temporal que va desde el 1 de enero de 1903 hasta el 6 de junio de 2020. Cabe señalar que no todas las estaciones cuentan con registros continuos durante todo este intervalo, presentando en muchos casos vacíos o periodos de operación limitados.

Para el cálculo de trayectorias de humedad mediante el modelo HYSPLIT, se utilizará como fuente de datos el reanálisis atmosférico global NCEP/NCAR (Kalnay et al., 2018), desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Este producto proporciona datos con una resolución espacial de 2.5° de latitud por 2.5° de longitud, disponibles de manera continua desde 1948 hasta la actualidad.

Si bien existen otras fuentes de datos de asimilación atmosférica, como el GDAS (Global Data Assimilation System) y el GFS (Global Forecast System), que ofrecen mayor resolución espacial, su disponibilidad está limitada a periodos más recientes: desde 2004 en el caso de GDAS, y desde 2019 para GFS. Por esta razón, y con el fin de asegurar una mayor cobertura temporal y coherencia en el análisis, se opta por utilizar el reanálisis NCEP/NCAR.

En consecuencia, el análisis de precipitaciones extremas estará acotado a eventos ocurridos desde 1948 en adelante, coincidiendo con la fecha inicial de disponibilidad del reanálisis empleado para las trayectorias atmosféricas.

4 Metodología

4.1 Clasificación del territorio

Con el fin de clasificar el territorio en base a sus series de precipitaciones máximas, es necesario primeramente un proceso de filtrado de información, debido a los vacíos de información con la que las estaciones registran precipitaciones, para luego utilizar métodos de *clustering* que permitan agrupar correctamente las observaciones que pasen el control de calidad.

4.1.1 Filtrado de información

Debido a problemas técnicos en las estaciones, o debido al hecho de que las estaciones fueron instaladas (o comienzan a operar) en distintos años a lo largo de todo el espectro de tiempo, existen vacíos de información que pueden comprometer la robustez del estudio si no se manejan correctamente. Para ello, se deberá filtrar tanto estaciones (componente espacial), como rango de años (componente temporal). Para filtrar la componente espacial, se eliminan del análisis aquellas estaciones que, en la totalidad de su vida operativa, no registren al menos un año de información completa (esto es, un registro de precipitación para cada uno de los días del año). Esto es debido a que no se puede establecer con certeza cual es el comportamiento normal de las precipitaciones a lo largo del año para dicha estación, por lo que no se puede establecer si una precipitación es considerada relevante o no para el análisis.

Una vez identificadas las estaciones que cuentan con al menos un año de información completa, se define el concepto de “Años Útiles” como aquellos años que, independientemente de estar completos o no, registran una precipitación máxima diaria superior al percentil 40 de precipitaciones, calculado a partir de los años con datos completos. Este criterio permite conservar aquellos años con eventos relevantes, incluso en presencia de vacíos de información. El resultado final del proceso de filtrado corresponde a estaciones cuya variabilidad anual de precipitaciones es conocida con suficiente certeza, junto con todos los años en que dichas estaciones presentan registros significativos.

Finalmente, se obtienen las series de precipitaciones máximas diarias para los años significativos de cada estación que cumpla satisfactoriamente los criterios mencionados.

4.1.2 Ventana de estudio

Una vez filtrada la información, se busca identificar aquella ventana temporal continua que maximice la cantidad de estaciones con datos completos o relevantes dentro de su duración. Este enfoque permite

comparar las series de máximas anuales entre distintas estaciones para eventos ocurridos en simultáneo. Es importante destacar que, mientras mayor sea la extensión temporal de la ventana, mayor será la confiabilidad en la detección de relaciones entre estaciones. Sin embargo, esto también implica una mayor probabilidad de disminuir el número de estaciones que cuenten con información completa o representativa a lo largo de toda la ventana. Por ello, se hace necesario encontrar un equilibrio entre la duración del período de estudio y la cantidad de estaciones que pueden ser consideradas en el análisis.

4.1.3 Agrupación de datos

Al momento de agrupar datos, se debe establecer una relación de cercanía (distancia) entre las estaciones, en base a sus series de máximas registradas en un intervalo de tiempo. Para ello, existen distintos métodos buscan minimizar la distancia entre las observaciones pertenecientes al mismo grupo, mientras maximizan la distancia entre los centros de estos. Estos métodos son llamados métodos de clustering.

4.1.3.1 Método de Clustering: k-medoids

El método de clustering seleccionado es *k-medoids*, principalmente debido a su buen desempeño en la agrupación de valores extremos cuando las observaciones presentan baja dimensionalidad (Bracken et al., 2015). Una característica distintiva de este algoritmo es que selecciona como centroides las observaciones reales del conjunto de datos, lo que facilita una interpretación más directa y significativa de los resultados.

La cantidad de clústeres k (es decir, el número de grupos en que se divide la información) puede definirse utilizando el método del coeficiente de silueta (Rousseeuw, 1987), No obstante, en la práctica, esta elección suele implicar cierto grado de subjetividad, ya que también se considera el contexto del estudio y la utilidad interpretativa de los resultados (Degaetano, 2001).

Para este estudio, la distancia entre observaciones se calcula mediante una métrica compuesta que pondera la distancia geográfica y la distancia de Manhattan entre las funciones de distribución empíricas acumuladas (ECDFs), calculadas a partir de las series de máximas de cada estación con información disponible. Este enfoque permite agrupar estaciones según la magnitud relativa de las tormentas que han experimentado, manteniendo la coherencia espacial en los patrones identificados.

4.1.3.1.1 Coeficiente de Silueta

El coeficiente de silueta es una medida que evalúa la calidad del agrupamiento en un análisis de clústeres. Para una observación i asignada al clúster k , este coeficiente se calcula como:

$$s_i(k) = 1 - \frac{d_{ik}}{\delta_{i,k}} \quad (1)$$

Donde:

- d_{ik} representa la distancia intraclúster, es decir, la distancia entre la observación i y el centroide del clúster al que pertenece.
- $\delta_{i,k}$ es la menor distancia entre la observación i y los centroides de los demás clústeres, es decir, el clúster más cercano que no contiene a i

El valor de $s_i(k)$ oscila entre -1 y 1. Valores cercanos a 1 indican que la observación está bien asignada, es decir, que se encuentra más cerca del centro de su propio clúster que de los demás. Valores cercanos a 0 sugieren que la observación está en la frontera entre dos clústeres, y valores negativos indican una asignación posiblemente incorrecta, ya que la observación está más cerca de otro clúster distinto al que fue asignada.

Luego, el valor promedio de todos los coeficientes de silueta se utiliza como medida global del desempeño del agrupamiento, este promedio permite comparar, por ejemplo, distintas configuraciones

en donde varíen los valores de k , permitiendo elegir el número óptimo de clústeres al maximizar el valor del coeficiente.

4.1.3.1.2 Distancia de Manhattan

La distancia de Manhattan es una medida que se utiliza comúnmente en análisis de clústeres para calcular la cercanía entre observaciones. Esta distancia se define como la suma de las diferencias absolutas entre las coordenadas correspondientes de dos puntos en un espacio multidimensional.

Para dos observaciones A y B con n atributos, tal que:

$$A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$$

$$B = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$$

La distancia de manhattan se calcula como:

$$D_m(A, B) = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|$$

Esta medida particularmente útil en situaciones donde se desea reducir la influencia de valores extremos, ya que no se ve tan afectada por grandes diferencias en una sola dimensión como ocurre con la distancia euclidiana.

4.1.3.1.3 Función de distribución empírica acumulada

La función de distribución empírica acumulada (ECDF por sus siglas en inglés), permite representar la distribución de una muestra de datos sin asumir una forma funcional específica. Es especialmente útil para visualizar y analizar el comportamiento acumulado de los datos observados.

Dado un conjunto de datos p tal que:

$$p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$$

La ECDF se define como:

$$\hat{F}_n(p) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1_{\{p_i \leq p\}}$$

En este caso la expresión $1_{\{p_i \leq p\}}$ es una función indicadora que vale 1 si $p_i \leq p$ y 0 en el caso contrario. Es decir, $\hat{F}_n(p)$ representa la proporción de observaciones en la muestra que son menores o iguales a un valor dado p .

4.1.3.1.4 Relación entre estaciones

La relación entre las distintas estaciones se define en base cuanta distancia se encuentre entre sus datos. Para este estudio, se ponderan de igual manera la componente geográfica de latitud y longitud con la componente de precipitación (Mediante la ECDF).

Dadas 2 estaciones i y j , una cantidad de instancias de tiempo T , latitud x y longitud y , se tiene:

$$d_{ij} = \frac{1}{2T} \sum_{t=1}^T |F_{ni}(t) - F_{nj}(t)| \quad (3)$$

$$q_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

$$p_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{i=1}^N q_{ij}} * \max(d_{ij}) \quad (5)$$

Luego, la distancia entre las estaciones se define como:

$$\hat{d}_{ij} = d_{ij} + p_{ij} \quad (6)$$

4.2 Obtención de trayectorias

Para lograr obtener las trayectorias de las masas de aire húmedo previo a un evento de precipitación máxima, y así lograr identificar la zona desde donde se generó dicho evento, se utiliza el modelo HYSPLIT, el cual requiere como input principal la fecha del evento, así como su posición (coordenadas).

4.2.1 Modelo de trayectorias: HYSPLIT

El Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, o HYSPLIT, es un modelo desarrollado por la NOAA que permite simular el transporte, dispersión y deposición de partículas, gases o contaminantes en la atmósfera. Es ampliamente utilizado para estudiar trayectorias de masas de aire, contaminantes atmosféricos, cenizas volcánicas, humo de incendios forestales, entre otros.

Las trayectorias analizadas en este estudio corresponden a trayectorias hacia atrás (*back-trajectories*), las cuales permiten simular y rastrear el origen de una masa de aire que alcanza un punto determinado. En particular, se busca identificar la procedencia de las tormentas extremas registradas en la base de datos de precipitaciones de las estaciones de la DGA.

Para realizar las simulaciones, HYSPLIT requiere datos meteorológicos (como GFS, GDAS, NAM, NCEP/NCAR entre otros). Estos datos están estructurados en grillas espaciales y temporales que definen:

- Resolución espacial: El tamaño de cada celda en grados de latitud/longitud, lo cual determina el nivel de detalle del campo atmosférico.
- Resolución temporal: La cantidad de actualizaciones de las condiciones meteorológicas por día. Permite definir distintas horas de inicio de modelación para un mismo día.
- Resolución vertical: Niveles de altitud o presión atmosférica al que inicia la modelación. Permite definir las distintas alturas a la que comienza la modelación.

4.2.2 Eventos de precipitaciones máximas diarias

Utilizando las distintas zonas de precipitación características, se recopilan todos los registros de precipitaciones diarias disponibles por zona, y se consideran como eventos extremos todas aquellas cuya magnitud (en [mm]) se encuentren por sobre el percentil 99 (McPhillips et al., 2018) de su zona correspondiente.

4.2.3 Parámetros de generación de trayectorias

Dado que se conoce únicamente la fecha en la que ocurre el evento y no la hora exacta, se generan trayectorias cada 6 horas el día de ocurrencia del evento (esto es, 4 horas de inicio distintas en las que se realiza la simulación), a intervalos de 500 metros desde 0 a 5000 metros sobre el nivel del suelo. Esto genera un total de 44 simulaciones por evento extremo, las cuales corresponden a trayectorias en una grilla de 2.5° x 2.5°, que es la que ofrece el reanálisis NCEP/NCAR. A su vez, cada una de las simulaciones realizadas ofrece información horaria sobre las partículas contenidas en la *back-trajectory*, es decir, un total de 192 mediciones por simulación que ofrecen distintos parámetros tales como posición, radiación solar, presión, temperatura, humedad, entre otros. Las *back-trajectories* obtenidas tienen una longitud de 8 días (192 h), ya que se estima que el tiempo de residencia de la humedad en la atmósfera es aproximadamente esta cantidad de tiempo (Trenberth, 1998).

4.3 Zonas de generación

La identificación de las zonas de generación de humedad para cada evento es posible tras un proceso de filtrado de las simulaciones generadas. Este filtrado se basa en las distintas variables meteorológicas provistas por el modelo HYSPLIT, lo que permite seleccionar únicamente aquellas *back-trajectories* que representan de mejor manera el fenómeno analizado. Este enfoque no solo reduce significativamente los tiempos de procesamiento, sino que también mejora la precisión y fidelidad de los resultados presentados en este informe.

4.3.1 Filtrado de casos relevantes

El filtrado considera como criterio principal la humedad específica de cada simulación, utilizada como indicador del contenido de humedad en las masas de aire. A partir de esta variable, es posible identificar la trayectoria más representativa del evento observado y, con ello, determinar las zonas de generación asociadas a cada evento.

En particular, se seleccionará para cada evento la trayectoria que presente la mayor disminución en humedad específica a lo largo de su recorrido (Figura 3). Esta caída se interpreta como una posible pérdida de vapor de agua asociada a una precipitación, por tanto, se vincula directamente con los eventos extremos registrados. La magnitud de esta pérdida se calcula como la diferencia entre el valor máximo de humedad específica registrado durante la trayectoria y el valor correspondiente a la hora inicial de la simulación (que coincide con el lugar y momento del evento de precipitación).

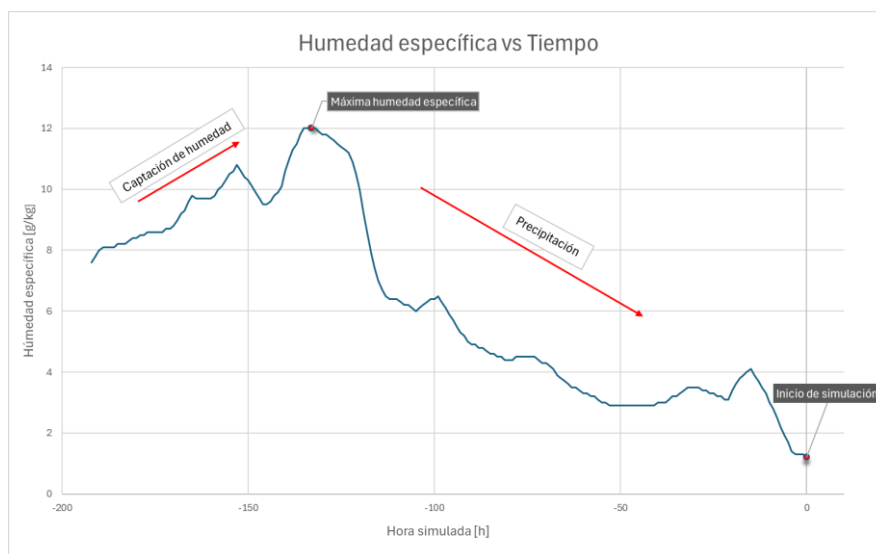


Figura 3: Humedad específica versus tiempo (ejemplo)

A su vez, el aumento y la disminución de humedad específica en la simulación de cada masa de aire estudiada pueden ser vistos como captación de humedad y precipitación, respectivamente.

Este criterio permite identificar las simulaciones más estrechamente vinculadas a las condiciones iniciales de tiempo y posición del evento, al utilizar la humedad específica como indicador de la cantidad de agua presente en la masa de aire analizada.

Al considerar el punto de máxima humedad específica como referencia, este representa la instancia en que la masa de aire ha acumulado la mayor cantidad de vapor de agua, pudiendo emplearse como un indicador de una zona de generación.

4.3.2 Identificación de zonas de generación

El punto de máxima humedad específica dentro de cada trayectoria, asociado a una hora y posición geográfica determinada, se interpreta como el momento de captación de humedad por parte de la masa de aire simulada. Esta definición corresponde a una modificación de la metodología propuesta por Abel et al. (2022), la cual se basa en la identificación de máximos locales de humedad específica. Dicha aproximación puede introducir sesgos al omitir máximos globales relevantes para el presente estudio. En consecuencia, se optó por considerar el máximo global de humedad específica a lo largo de cada trayectoria, garantizando así una representación más coherente del punto de mayor adquisición de vapor de agua. Esta metodología también es utilizada por Bracken et al. (2015), obteniendo resultados satisfactorios en su análisis.

Los puntos resultantes son posteriormente representados mediante una Estimación de Densidad por Núcleo (KDE) (Chen, 2017), un método estadístico no paramétrico que permite estimar la distribución de probabilidad de un conjunto de datos sin asumir una forma teórica predeterminada. Las regiones con mayor densidad de puntos, o *hotspots*, corresponden a las zonas de generación de humedad identificadas en este análisis.

5 Resultados

5.1 Filtrado de estaciones

Tras filtrar las estaciones que cuentan con información suficiente y relevante, se identificaron 808 estaciones que cumplen con el criterio definido en el marco teórico: disponer de al menos un año con datos completos de precipitación. A estos años completos se suman registros de años con datos parciales, siempre que estos superen el percentil 40 de precipitación correspondiente a cada estación, estos son llamados “Años Útiles”. La cantidad de Años Útiles obtenidas por estación son mostrados en la Figura 4, en donde se puede observar como la cantidad de estaciones va decayendo drásticamente a medida que la exigencia de la cantidad de Años Útiles aumenta. Esto implica que el análisis posterior tendrá que ser considerando una cobertura temporal acotada.

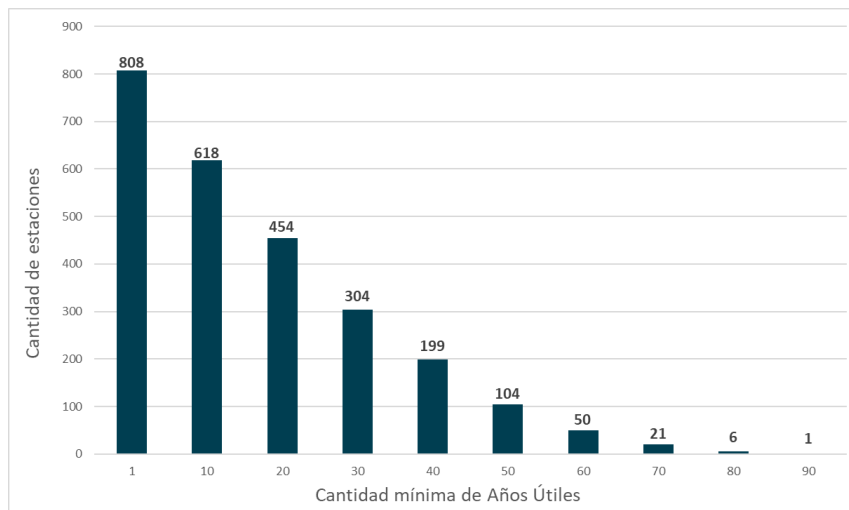


Figura 4: Cantidad de Años Útiles por estación

5.2 Ventana de Estudio

Se debe encontrar el periodo de tiempo continuo o “Ventana de Estudio” que maximice la cantidad de estaciones (referidas en este estudio como “Estaciones Útiles”) que posean Años Útiles para la totalidad de su duración. Por una parte, si bien una Ventana de Tiempo de mayor duración implica una mayor confiabilidad en los datos, la cantidad de Estaciones Útiles para la totalidad de este periodo se verá reducido, lo que se traduce en una menor cobertura del territorio. Teniendo en cuenta este enfoque, se realiza una búsqueda para una Ventana de Estudio de duración de 30, 25, 20 y 15 años.

En la Tabla 1 se puede observar como la cantidad de Estaciones Útiles aumenta a medida que la Ventana tiene una extensión más acotada, y como el periodo asociado a cada Ventana cambia en función de la duración de esta. De manera general, la cantidad de Estaciones Útiles es significativamente menor que las 808 estaciones filtradas inicialmente, lo que evidencia la presencia de vacíos de información o años sin registros de precipitación relevantes en la mayoría de las estaciones.

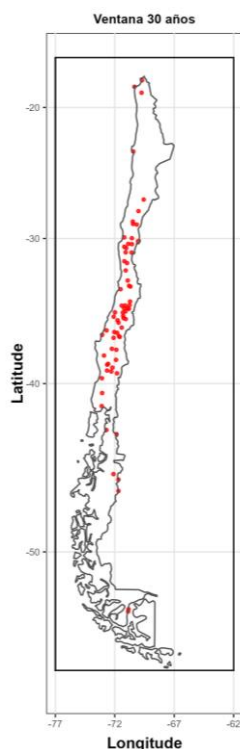
Tabla 1: Cantidad de Estaciones Útiles por extensión de Ventana

Duración de la Ventana	Periodo	N° de Estaciones Útiles
30 años	1976-2005	69
25 años	1982-2006	92
20 años	1996-2015	127
15 años	2000-2014	178

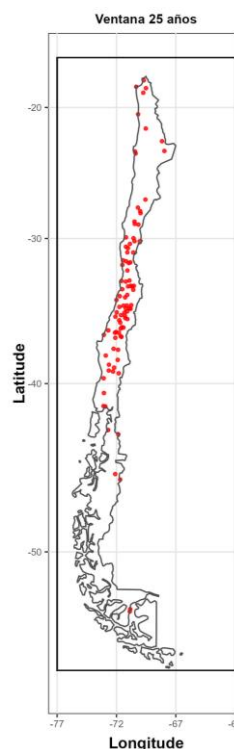
La Figura 5 muestra la distribución de las Estaciones Útiles según cada Ventana de Estudio, evidenciando un comportamiento inversamente proporcional entre la extensión de la Ventana y la cobertura espacial. Las Ventanas más largas (Figura 5.a y 5.b) presentan menor densidad de Estaciones Útiles, mientras que las más cortas (Figura 5.c y 5.d) muestran el efecto contrario. En general, se concentra un mayor número de Estaciones Útiles entre las latitudes 28°S y 40°, intensificándose esta concentración a medida que la extensión de la Ventana se reduce. Por sobre los 25°S, en la zona norte, se observa un patrón similar, aunque menos marcado. Adicionalmente, al sur de los 42°S, pocas estaciones cumplen con el criterio de Años Útiles, incluso para las ventanas más cortas, reflejando una baja densidad de datos que limita la confiabilidad de los análisis en esta región.

En base a cantidad de estaciones y a la cobertura observada en la Figura 5, se utilizará una Ventana de duración 20 años (Figura 5.c), ya que representa un equilibrio adecuado entre confiabilidad y cobertura espacial sobre el territorio.

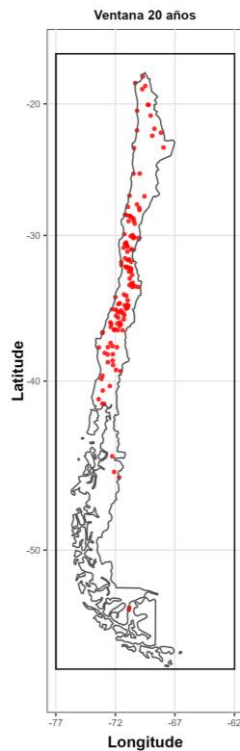
a)



b)



c)



d)

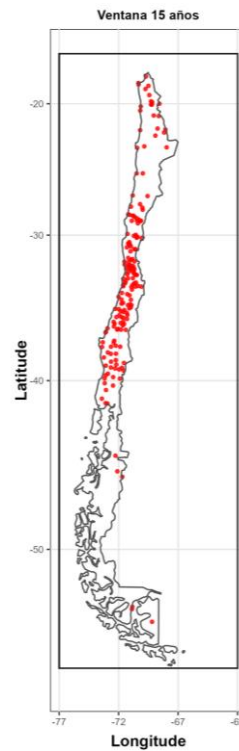


Figura 5: Cantidad de Estaciones Útiles por Ventana utilizada. Ventanas de (a) 30 años, (b) 25 años, (c) 20 años y (d) 15 años.

5.3 Agrupación de datos

Una vez definida la Ventana de estudio e identificadas las Estaciones Útiles asociadas, estas se agrupan mediante el método *k-medoids*. El procedimiento de agrupamiento considera tanto las ECDF de las series de máximas anuales como la posición geográfica de cada estación. Al variar la cantidad de grupos k y calcular el coeficiente de silueta correspondiente, se obtiene el gráfico presentado en la Figura 6, donde se observa que el valor máximo del coeficiente se alcanza al trabajar con 2 grupos. No obstante, esta solución resulta insuficiente para diferenciar el territorio nacional en patrones que sean relevantes y útiles para los objetivos del estudio.

Tal como se mencionó anteriormente, el coeficiente de silueta constituye una referencia inicial sobre la calidad del agrupamiento, pero su interpretación debe considerar tanto el contexto como los fines prácticos del análisis. En este sentido, se opta por una segmentación en 6 clústeres, ya que corresponde al mayor valor del coeficiente dentro de un rango intermedio de agrupaciones, tomando en cuenta el número de estaciones disponibles. De esta forma, se logra un balance adecuado entre la coherencia interna de los grupos y la calidad general del agrupamiento.

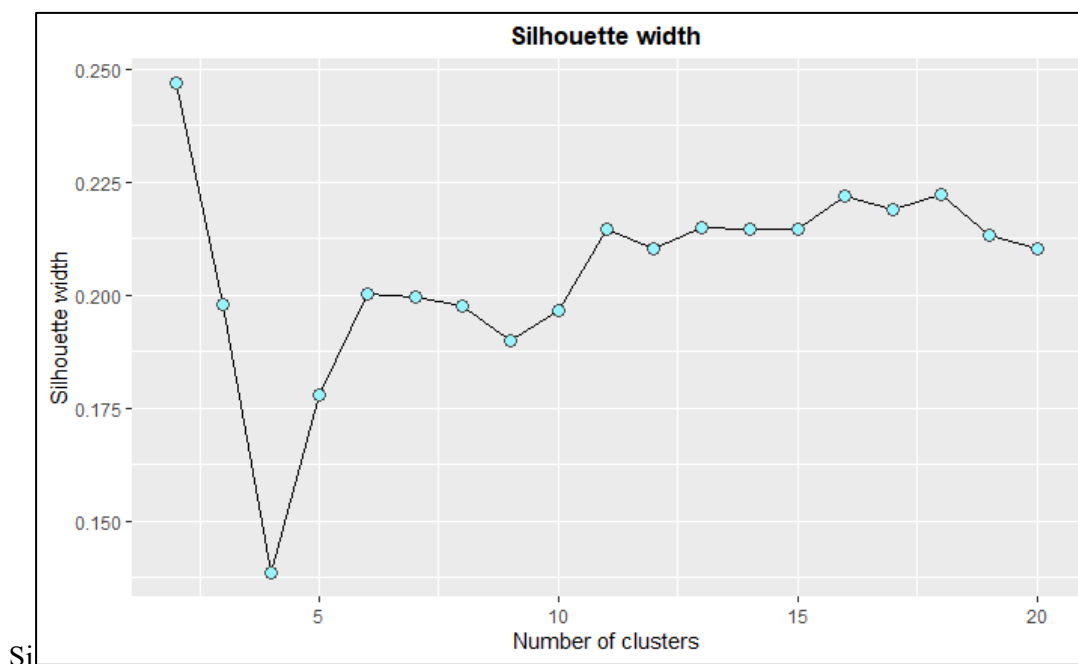


Figura 6: Coeficiente de silueta.

La agrupación de las Estaciones Útiles en 6 clústeres y su representación gráfica en el territorio se muestran en la Figura 7, en donde se aprecian las distribuciones de cada grupo. El clúster 1 está significativamente concentrado a lo largo de las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá, así como en el sector cordillerano de la región de Antofagasta. Por su parte, las estaciones del clúster 2 se localizan principalmente en la zona occidental de Antofagasta y se extienden hacia la región de Atacama. El clúster 3 presenta una concentración predominante en casi la totalidad de la región de Coquimbo, con algunas observaciones dispersas en la región de Valparaíso, donde se superponen con estaciones del clúster 4. Este último se distribuye de manera uniforme por Valparaíso y las regiones Metropolitana, O'Higgins y Maule. El clúster 5 comparte algunas ubicaciones con el grupo 4 dentro de la región del Maule, pero además abarca de forma exclusiva las regiones de Ñuble, Biobío, La Araucanía y Los Ríos. Asimismo, en la región de Aysén, algunas estaciones del clúster 5 se superponen con estaciones pertenecientes al clúster 6. Desde esta zona hacia el sur, la densidad de estaciones disminuye notablemente, encontrándose únicamente un número reducido de estaciones correspondientes al clúster 6. Con respecto a este último grupo, el análisis pierde confiabilidad debido a la poca información disponible.

Las superposiciones observadas corresponden a zonas donde la componente basada en la comparación de las ECDF de las series máximas tiene mayor peso que la distancia geográfica a los centros de los clústeres. Este comportamiento es esperado al realizar agrupaciones fundamentadas en parámetros distintos o adicionales a la ubicación espacial.

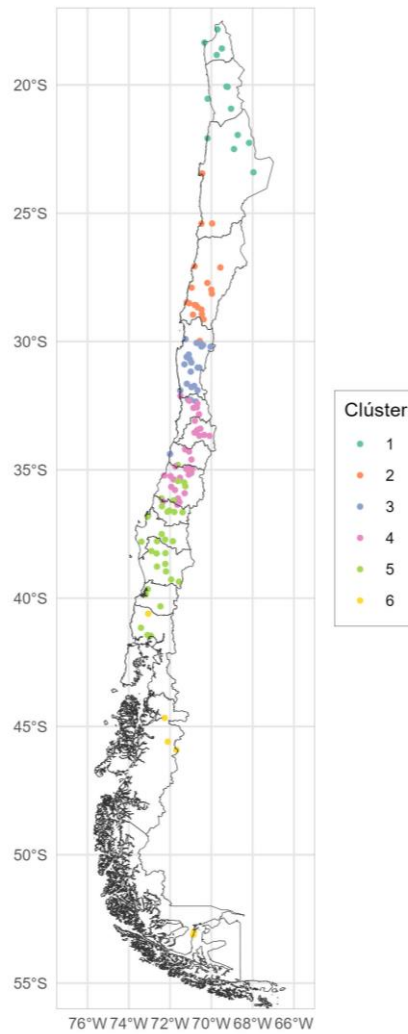


Figura 7: Agrupación de Estaciones Útiles mediante k-medoids

La Figura 8 representa las áreas que mejor contienen las distintas observaciones mediante polígonos, ya que la nube de puntos puede no ofrecer una delimitación clara y precisa de las zonas obtenidas. Para simplificar, en aquellos lugares en donde dos clústeres coexisten, se consideró únicamente el clúster con mayor presencia. Se decide desestimar el clúster 6 en su totalidad, así como el análisis para estaciones y precipitaciones al sur de la latitud 42°S, debido a la falta de información relevante para esta zona.

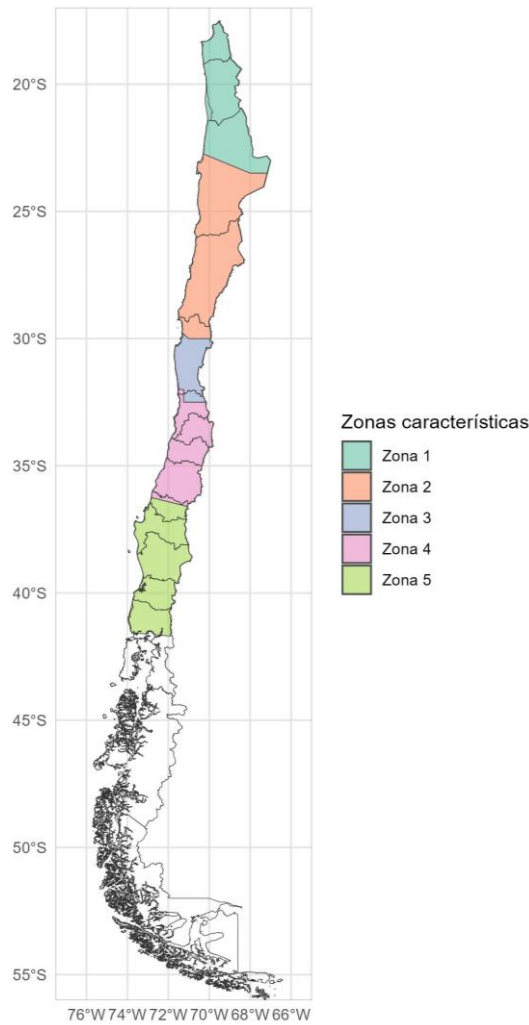


Figura 8: Representación visual de las zonas de precipitación características

5.4 Precipitaciones extremas por Zona Característica:

Una vez definidas las distintas zonas de precipitación característica del país, se recopilan todas las estaciones ubicadas dentro de cada zona, junto con sus respectivos registros diarios de precipitación. Para cada zona se identifican como precipitaciones extremas aquellos eventos cuya magnitud [mm] supera el percentil 99 del total de registros contenidos en dicha zona. De este modo, se extrae desde la base de datos la latitud y longitud de la estación que registró el evento, así como la fecha en que este ocurrió. La Tabla 2 resume la cantidad de eventos extremos identificados por cada zona, en donde se puede observar que la cantidad de simulaciones en las Zonas 1, 2 y 3 se mantiene similar, mientras que en las Zonas 4 y 5 aumenta drásticamente.

Tabla 2: Cantidad de simulaciones por zona

Nº Zona	Cantidad de Eventos
1	693
2	870
3	505
4	2537
5	5990

5.5 Zonas de generación

Luego de identificar los puntos de máxima humedad específica respectivos a cada trayectoria, para cada una de las Zonas (presentados en la sección de Anexos: 9.1), se utiliza para visualizar de mejor manera las Zonas un enfoque basado en Kernel Density Estimation (KDE) (Chen, 2017), que permite una caracterización más robusta del patrón espacial. Esta técnica resalta las áreas de mayor concentración y suaviza la variabilidad local, lo que facilita la identificación de *hotspots* o zonas de densidad elevada que podrían pasar desapercibidas en un mapa de puntos. Dado que la cantidad de eventos disponibles por zona (indicada en la Tabla 2) presenta una variabilidad considerable, se opta por una distribución relativa mediante el método KDE, mostrada en la Figura 9. La escala de colores representa la densidad relativa de trayectorias esperadas dentro del área delimitada por el contorno, normalizada de manera que la integral de la densidad sobre el área total sea igual a 1 para todas las Zonas. De este modo, valores de densidad más altos indican una mayor concentración de trayectorias en las áreas respectivas a dichos valores sin estar condicionados por la cantidad de observaciones iniciales.

La Figura 9.a presenta la distribución espacial de las posiciones identificadas como zonas de generación de humedad para tormentas extremas sobre la Zona 1. Se observa una marcada concentración de orígenes al norte y noreste de la región objetivo, abarcando principalmente sectores del Chaco boliviano, el sur de la cuenca amazónica y áreas de Bolivia, Paraguay, Brasil y Argentina. Adicionalmente, se identifica una concentración de puntos de origen cercanas al sector costero del Norte Grande, así como una menor densidad hacia sur de Sudamérica, correspondientes a trayectorias menos frecuentes.

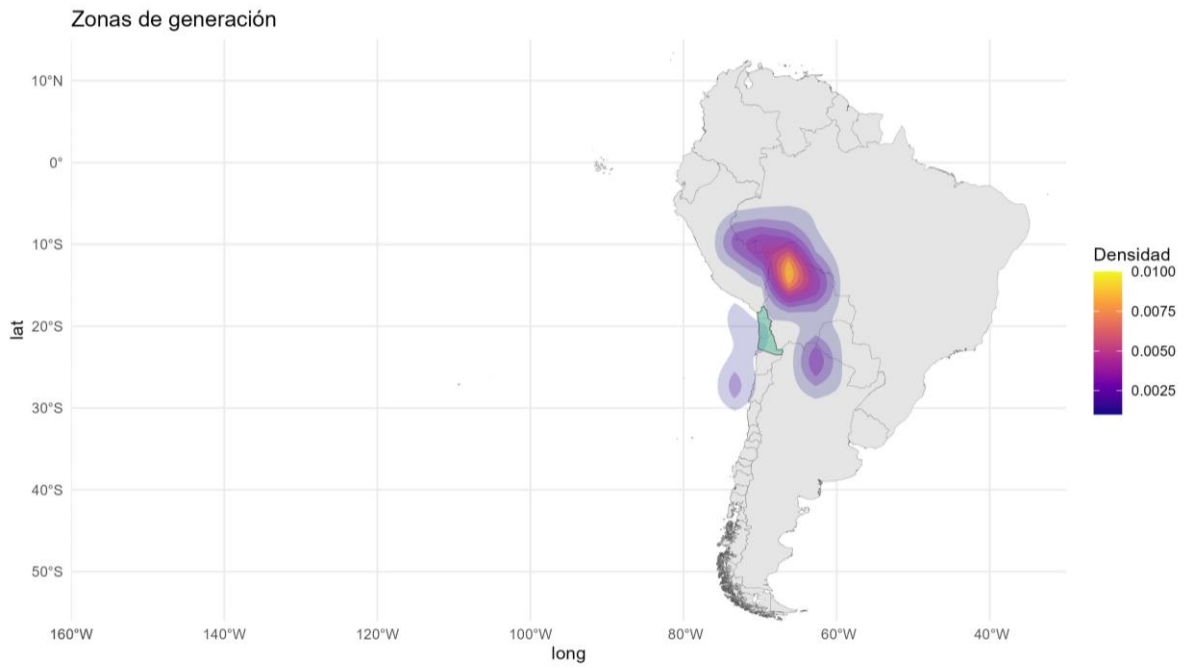
Para la Zona 2, la Figura 9.b muestra una franja continua de orígenes sobre el océano Pacífico, ubicada aproximadamente entre los 10°S y 30°S, que se extiende desde la costa del país (en torno a los 72°W) hasta más allá de los 160°W. Destaca, además, una elevada concentración de zonas de generación en la costa norte, particularmente entre los 20°S y 30°S. Asimismo, se registran orígenes dispersos en la cuenca amazónica y en el norte de Argentina, lo que sugiere aportes secundarios de humedad desde el interior del continente

De manera similar, la Zona 3, representada en la Figura 9.c evidencia también una distribución de orígenes oceánicos, concentrados principalmente entre los 10°S y 30°S los cuales se extienden desde la costa del país hacia el Pacífico central, más allá de los 160°W, con una densidad levemente mayor posicionada cerca de la latitud 21°S y longitud 137-138°W. Se registran también orígenes adicionales en el norte de Argentina, aunque con menor densidad que los observados en el dominio oceánico, lo que confirma el rol predominante del transporte de humedad desde el Pacífico en esta región.

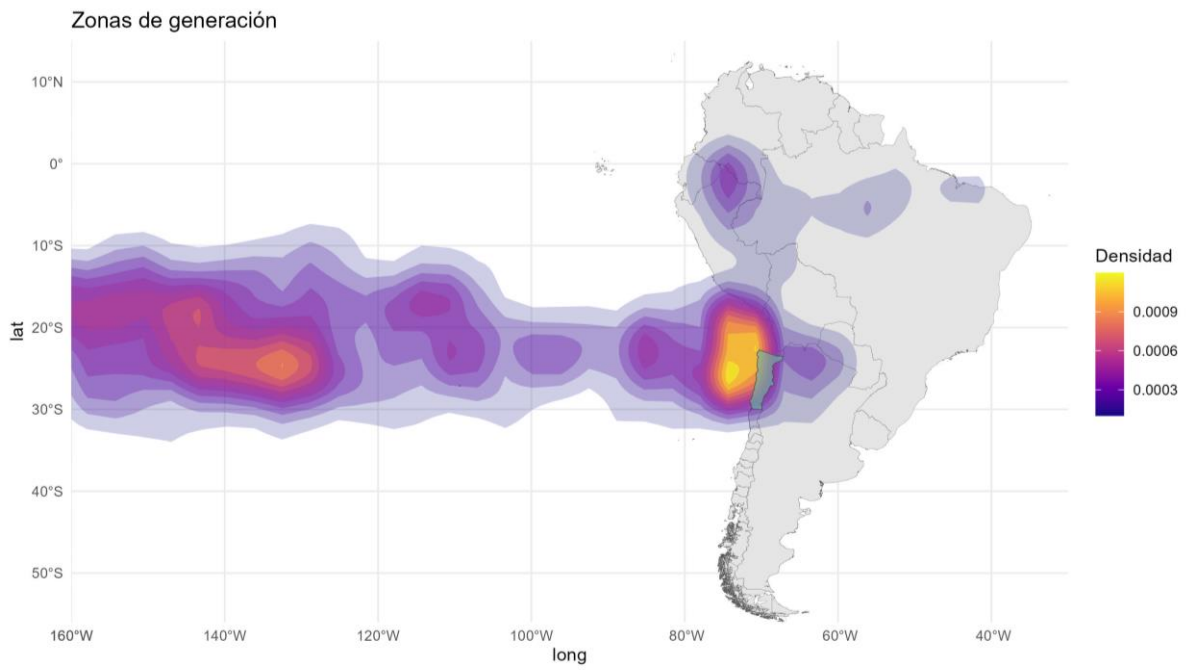
Las Zonas de generación para los sectores 4 y 5, representadas en la Figura 9.d y Figura 9.e, muestran un patrón de orígenes similar, con densidades concentradas principalmente entre las latitudes 15°S y 30°S, y las longitudes 100°W y 160°W. La mayor intensidad se observa en el rango comprendido entre 20°S y 24°S y 120°W y 140°W, lo que evidencia la relevancia del transporte de humedad oceánica en este sector. En contraste con las zonas previamente analizadas, los orígenes localizados en la costa del país se reducen considerablemente y pierden relevancia a escala regional, lo que sugiere que el aporte de las fuentes costeras a las precipitaciones extremas de estos sectores resulta poco significativo.

En resumen, las Zonas analizadas exhiben diferencias claras en cuanto al origen predominante de las masas de aire que generan tormentas extremas. La Zona 1 se distingue por presentar una concentración de orígenes hacia el norte y noreste del área objetivo, reflejando un aporte dominante de humedad continental, vinculado al transporte desde el Amazonas y a la acción de corredores de flujo desde el noreste, mientras que, en contraste, las Zonas 2, 3, 4 y 5 muestran un patrón marcadamente oceánico, con una franja de orígenes sobre el Pacífico subtropical entre 10°S y 30°S, que se extiende desde la costa del país hasta el Pacífico central. Dentro de este grupo se identifican diferencias: en la Zona 2 destacan los aportes costeros en la franja norte (20°S–30°S); en la Zona 3 la distribución oceánica es más homogénea, con menor influencia continental; y en la Zona 4 y 5 la franja oceánica se intensifica entre los 100°W y 160°W, mientras los aportes costeros pierden relevancia.

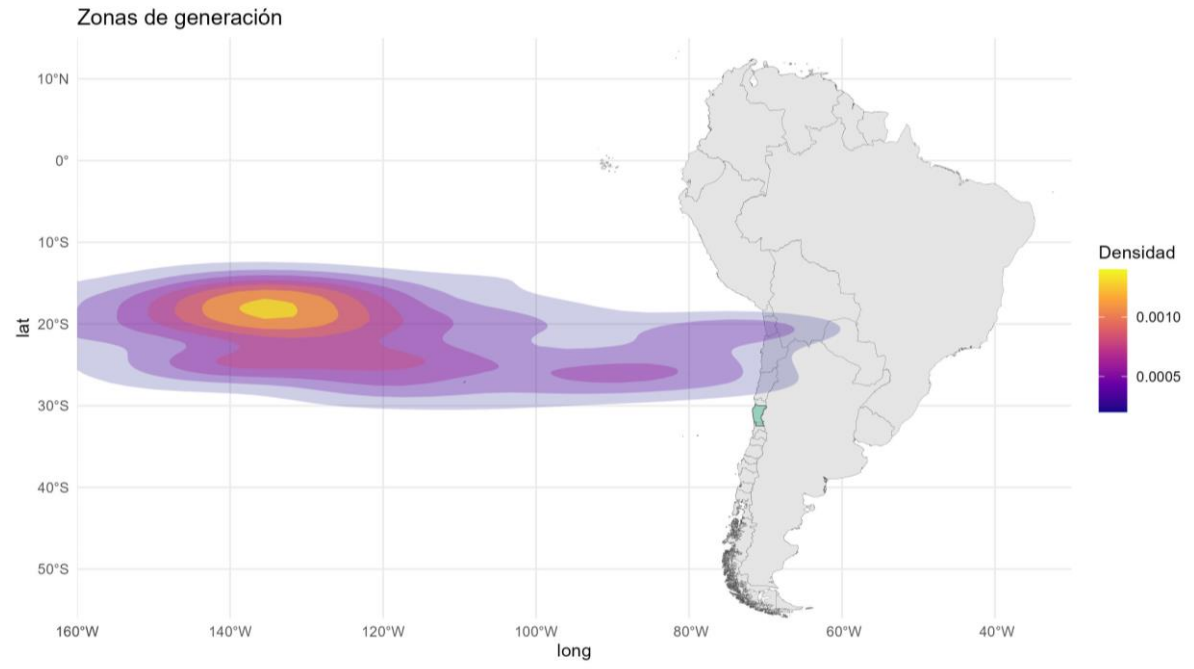
a)



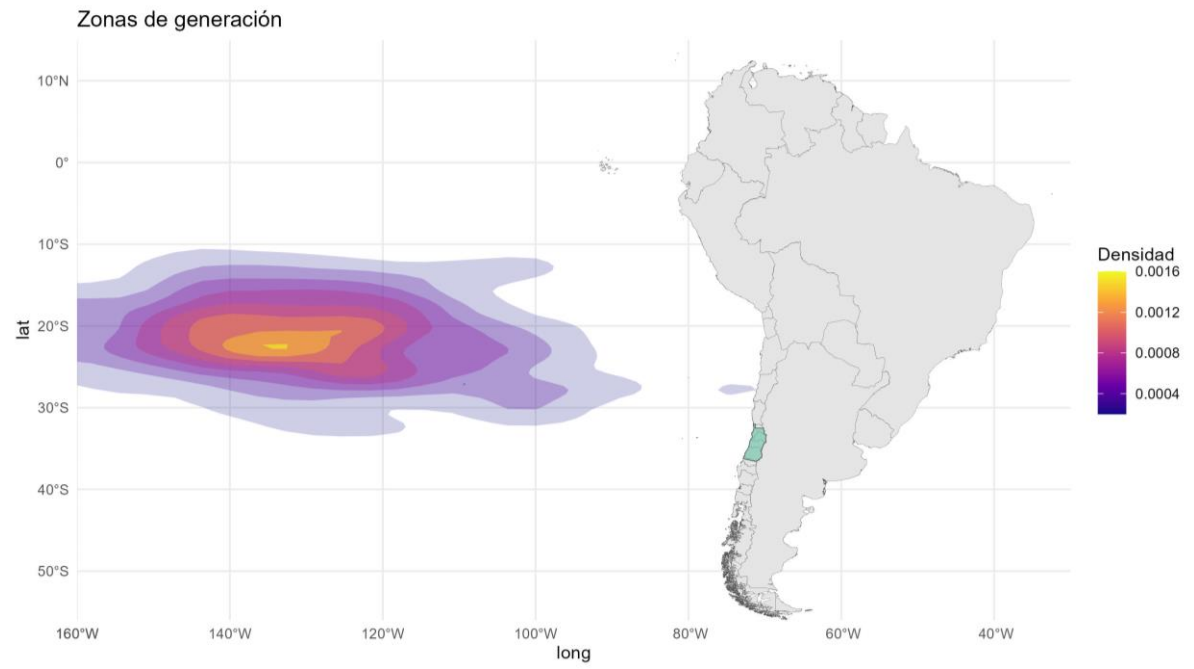
b)



c)



d)



e)

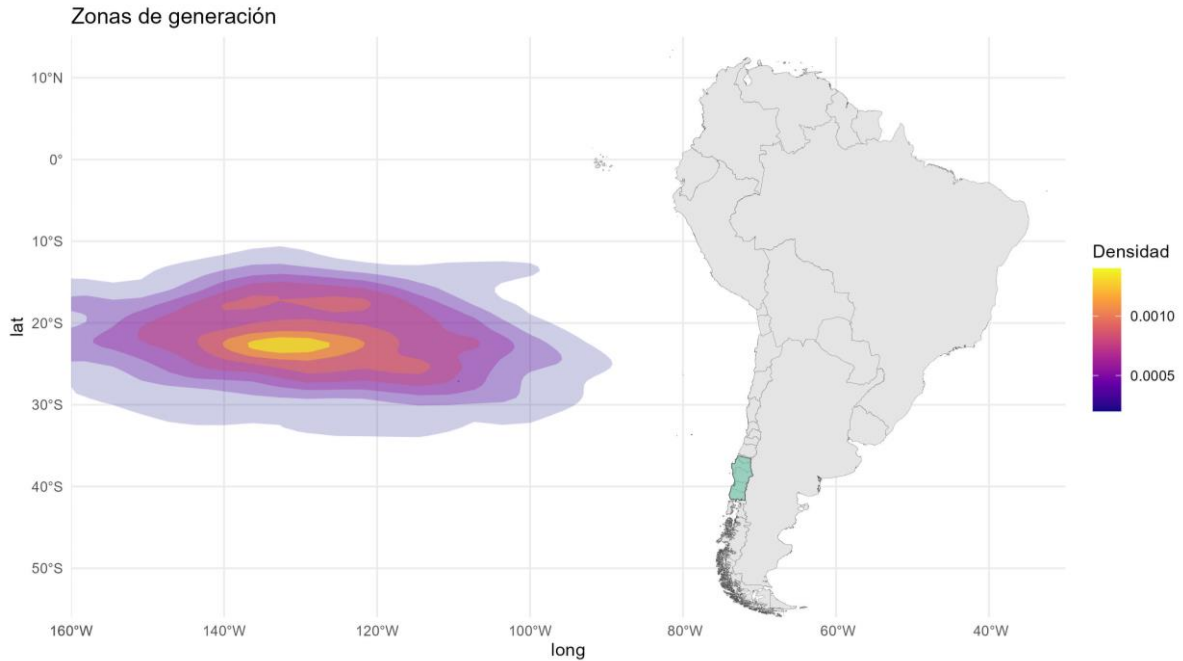


Figura 9: Zonas de Generación mediante KDE, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5. Los parámetros de modelación de la Zona 2 tuvieron que ser modificados dado que el método no converge de manera normal, generando curvas menos suaves. El análisis generado no se ve afectado por esta modificación.

Adicionalmente, se ha realizado un análisis sobre la distribución de las zonas de generación, y la medida en la que aportan a las precipitaciones extremas obtenidas en cada Zona. La Tabla 3 muestra la distribución según el tipo de aporte (oceánico, continental), en donde se evidencia una clara transición espacial en las fuentes de humedad de las distintas Zonas. Mientras la Zona 1 presenta un predominio de aportes continentales, las zonas más australes exhiben una participación casi exclusiva de humedad oceánica. Este patrón indica un cambio en los mecanismos generadores de humedad, desde reciclaje y transporte continental en el norte hacia advección directa desde el Pacífico en el sur.

Tabla 3: Distribución de aportes por Zona

Zona	Nº Aportes continentales	Nº Aportes oceánicos	% Aportes continentales	% Aportes oceánicos
Zona 1	594	99	85.7%	14.3%
Zona 2	77	742	9.4%	90.6%
Zona 3	2	503	0.4%	99.6%
Zona 4	5	2532	0.2%	99.8%
Zona 5	13	5977	0.2%	99.8%

5.6 Trayectorias por zona característica

Además de las estimaciones antes hechas, resulta interesante comprender cómo se comportan las trayectorias que transportan la humedad desde las zonas de generación hasta las Zonas de precipitación. La Figura 10 presenta las trayectorias calculadas, desde la posición de la estación que registró el evento hasta su punto de máxima humedad específica. Para la elaboración de estos gráficos, se seleccionaron aquellas trayectorias que registran la mayor pérdida de humedad específica del conjunto presentado en la Tabla 2 (aproximadamente 70 por Zona), con el objetivo de facilitar la visualización de los patrones principales y evitar la sobrecarga visual que implicaría incluir la totalidad de las trayectorias disponibles.

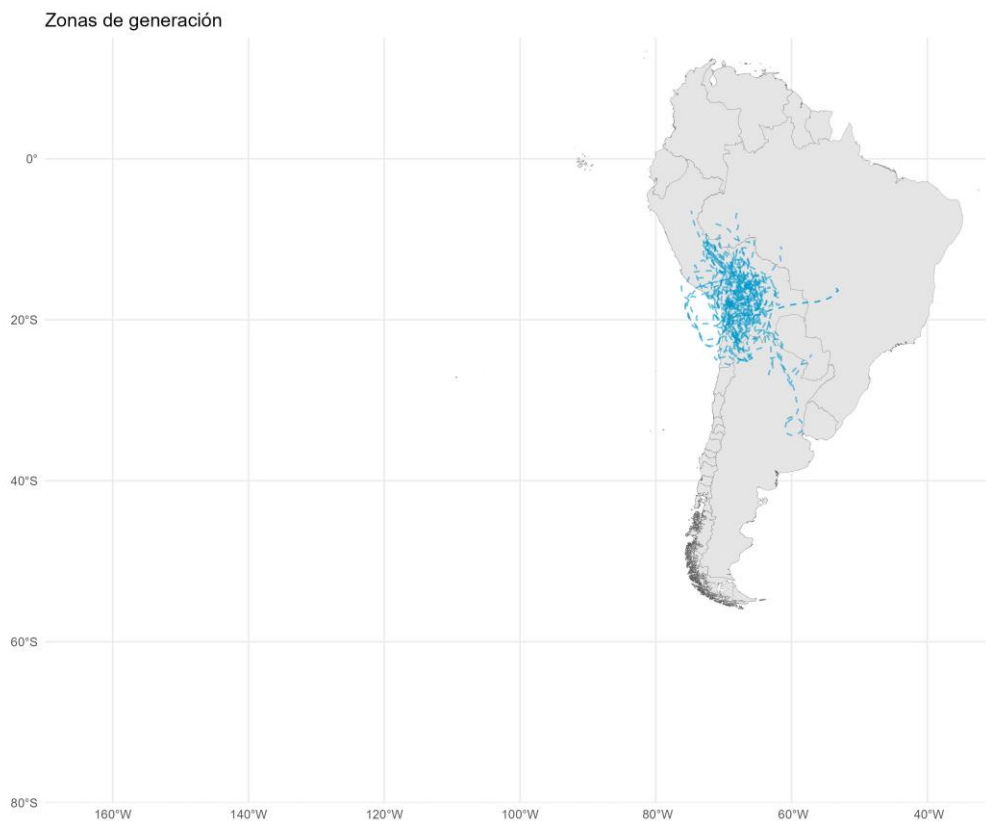
En la Figura 10.a, correspondiente a la Zona 1, se observan trayectorias predominantemente continentales y de corto recorrido, las cuales evidencian un origen asociado principalmente a aportes de humedad fluvial provenientes de la cuenca amazónica.

Por su parte, la Figura 10.b, asociada a la Zona 2, muestra una transición desde aportes continentales hacia aportes oceánicos, cuyos orígenes se ubican al oeste de los 120°W y en latitudes tropicales. Estas trayectorias oceánicas presentan un marcado descenso latitudinal (en algunos casos alcanzando valores por sobre los 60°S) antes de ascender hasta la Zona 2 para precipitar. Este patrón podría estar asociado a la influencia del Anticiclón del Pacífico Sur, cuyo centro se localiza habitualmente entre los 25° y 30°S y los 90° y 105°W (Pizarro A et al., 1994), desplazándose estacionalmente al sur durante el verano y hacia el norte en invierno (Barrett & Hameed, 2017). Este sistema de alta presión actúa como un agente inhibidor del desarrollo de nubosidad y de la ocurrencia de precipitaciones, desviando las trayectorias más directas y favoreciendo aquellas que rodean su periferia antes de alcanzar el continente.

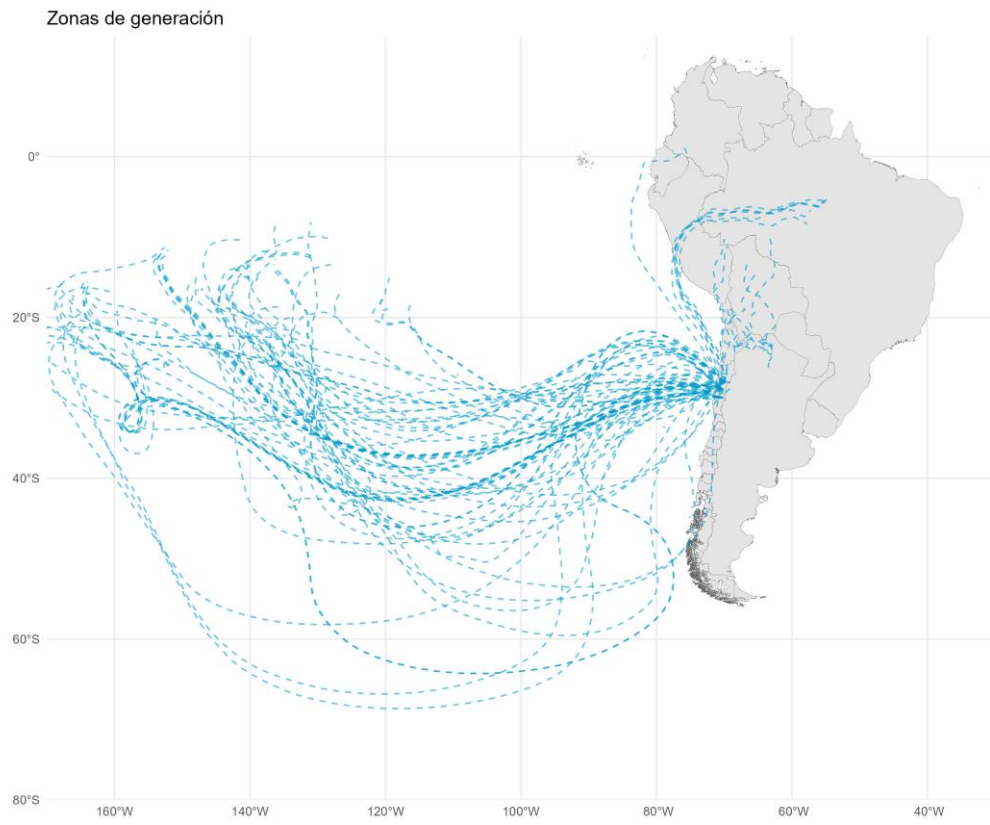
La Figura 10.c, correspondiente a la Zona 3, evidencia una predominancia clara de trayectorias de origen oceánico, con una participación continental prácticamente nula. El patrón de transporte observado se encuentra condicionado por la influencia del Anticiclón del Pacífico Sur, mostrando un comportamiento similar al descrito para la Zona 2. En esta región, las trayectorias tienden a desplazarse bordeando el margen occidental del anticiclón, avanzando progresivamente hacia el sur conforme se aproximan al continente. Este tipo de advección de humedad, que conecta latitudes (sub)tropicales con regiones extratropicales (y polares), está estrechamente asociado a la ocurrencia de ríos atmosféricos (Zhu & Newell, 1998) los cuales constituyen un mecanismo clave en la generación de precipitaciones extremas de la zona (Viale et al., 2018).

Finalmente, las trayectorias asociadas a las Zonas 4 y 5 exhiben un comportamiento análogo al de la Zona 3, aunque con un ligero desplazamiento de los puntos de origen hacia el oeste a al avanzar hacia zonas más australes.

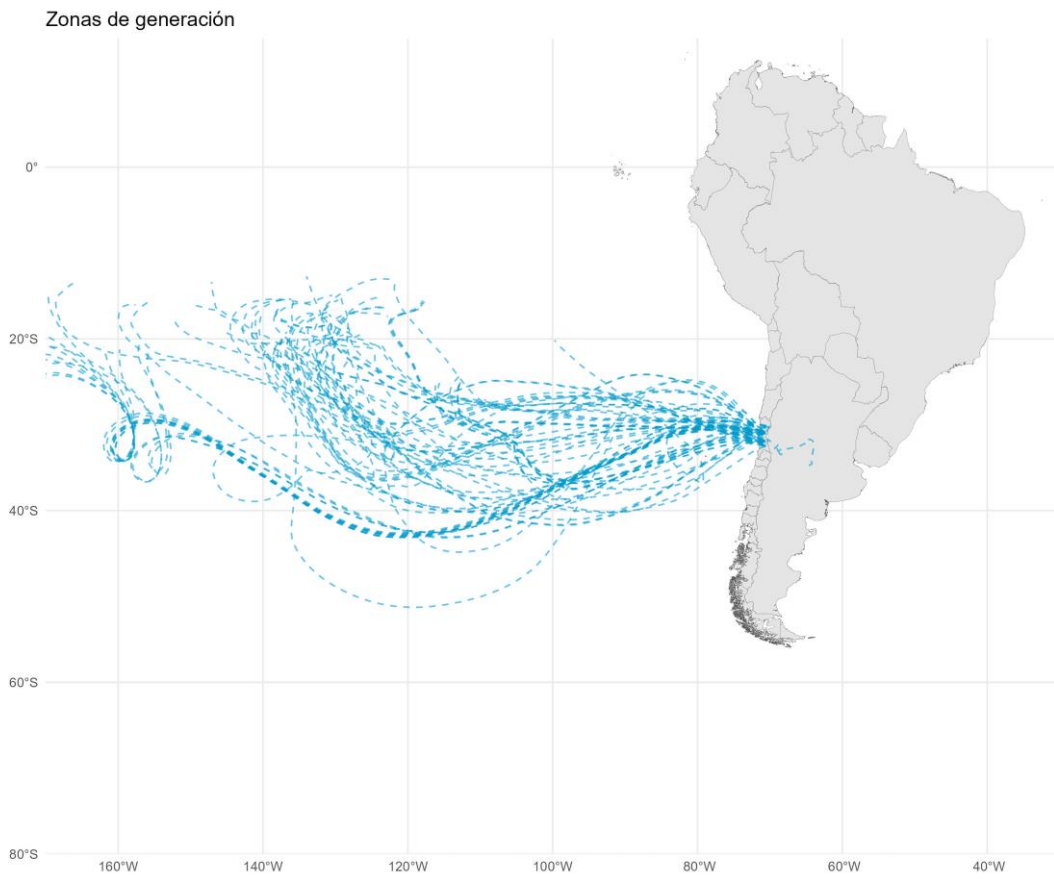
a)



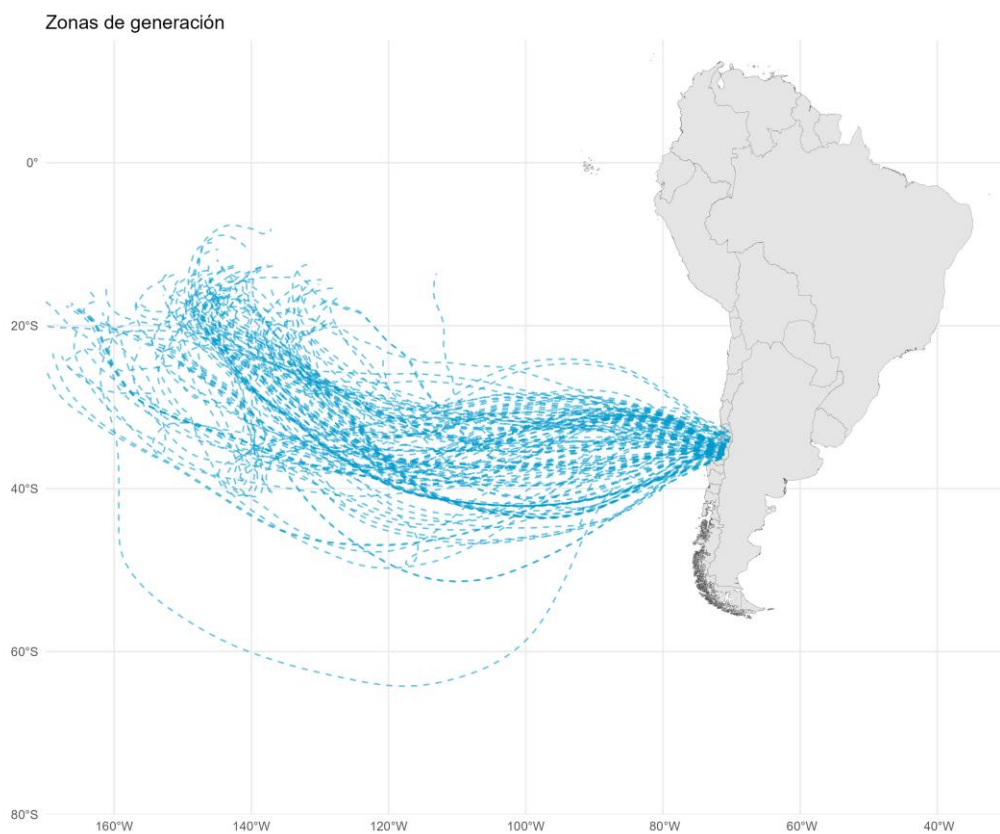
b)



c)



d)



e)

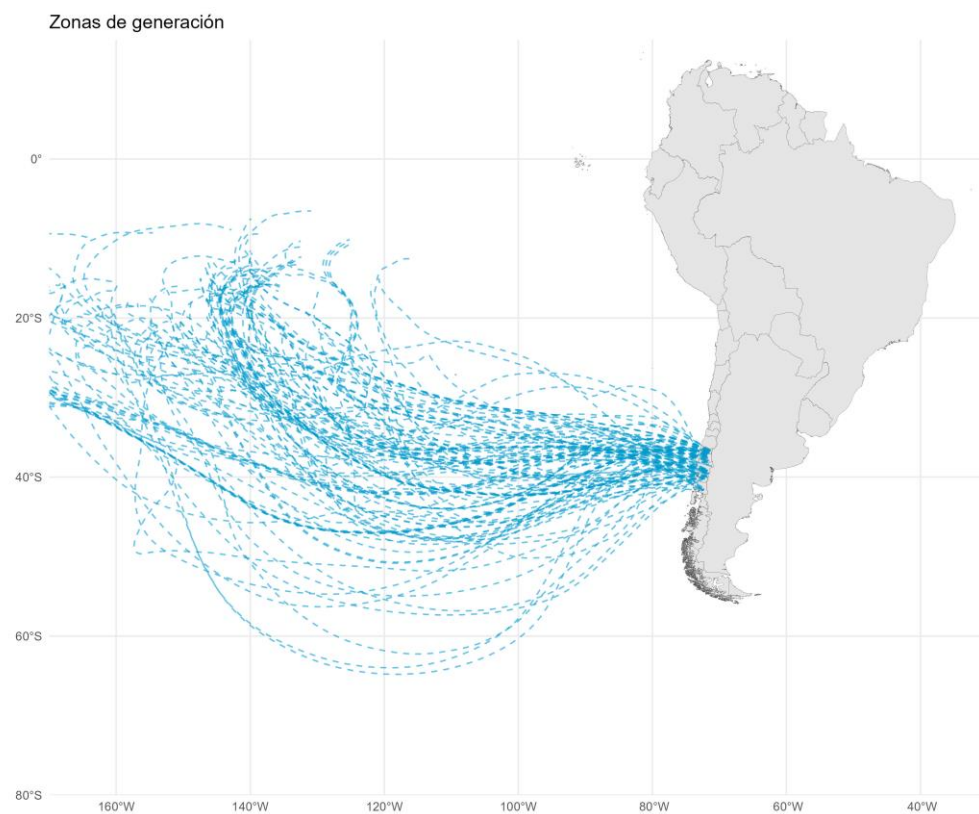


Figura 10: Trayectorias de eventos con mayor pérdida de humedad específica (~70 por Zona) **a)** Zona 1, **b)** Zona 2, **c)** Zona 3, **d)** Zona 4, **e)** Zona 5

6 Discusión de los resultados obtenidos

En esta sección se contrasta la información obtenida a partir de la clasificación territorial, las trayectorias de humedad y las zonas de generación derivadas del análisis, con la literatura existente. Las Zonas características identificadas muestran una notable correspondencia con las macrozonas climáticas de Chile presentadas en la Sección 3 y propuestas por Di Castri & Hajek, (1976), las cuales, a pesar de su antigüedad, sigue siendo ampliamente utilizado como referencia en estudios recientes (e.g. Rojas et al., 2014; Sarricolea et al., 2017). Esta concordancia otorga un respaldo adicional a las subdivisiones identificadas mediante el análisis de *clustering*, sugiriendo que la distribución espacial obtenida refleja patrones climáticos robustos y coherentes con la literatura.

Las zonas de generación y trayectorias identificadas para la Zona 1 muestran una estrecha concordancia con los resultados reportados por Böhm et al. (2021), quienes relacionan la ocurrencia de ríos atmosféricos de origen amazónico con los eventos de precipitación extrema en el desierto de Atacama. Dicho estudio caracteriza las *back-trajectories* asociadas a estos eventos como flujos provenientes del Amazonas que se desplazan hacia el suroeste, siguiendo una trayectoria que bordea las costas del Norte Grande y del Norte Chico antes de precipitar. Este patrón de transporte podría, a su vez, explicar los aportes costeros observados en la Zona 2, dado que algunas de estas trayectorias amazónicas alcanzarían su máxima captación de humedad sobre las costas del país.

Por su parte, los patrones de las trayectorias correspondientes a las Zonas 3, 4 y 5 muestran una marcada similitud con los resultados presentados por Campos & Rondanelli (2023), quienes identifican un corredor de transporte de vapor de agua desde el oeste en latitudes tropicales durante episodios del fenómeno El Niño. Este corredor se asocia a un aumento en la frecuencia, intensidad y duración de ríos atmosféricos que alcanzan las costas del centro y sur de Chile, los cuales presentan una estrecha relación con la ocurrencia de precipitaciones extremas, al estar presentes en una proporción significativa de los eventos correspondientes al cuartil superior de los registros históricos de precipitación de las estaciones ubicadas en esta zona (Viale et al., 2018). En estas regiones, la mayoría de los ríos atmosféricos se encuentran estrechamente relacionados a sistemas frontales asociados a bajas presiones migratorias del cinturón de los oestes (Dacre et al., 2019), los cuales actúan como el principal mecanismo de ascenso y condensación del aire húmedo proveniente del pacífico (Garreaud et al., 2024; Viale et al., 2018). De manera consistente, Mudiari et al. (2024) realizan un análisis a 50 ríos atmosféricos que alcanzan la costa oeste de Sudamérica e identifican un corredor similar, originado por la convergencia de ríos atmosféricos que transportan humedad desde los trópicos. Estos sistemas, al interactuar con los frentes fríos y cálidos asociados a las depresiones extratropicales, intensifican el transporte de humedad hacia el continente y explican la recurrencia de eventos extremos en las Zonas 3, 4 y 5. Dicho patrón se ve favorecido por la interacción entre el Anticiclón del Pacífico Sur y la circulación ciclónica asociada a sistemas extratropicales, lo que refuerza la influencia combinada de ambos sistemas en el transporte de humedad hacia el continente.

7 Conclusión

El presente estudio propone, en primer lugar, una regionalización del territorio nacional basada en el comportamiento de las precipitaciones extremas registradas por las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA). Posteriormente, se analizan los eventos más significativos de cada región con el fin de identificar las zonas de generación de humedad, es decir, las áreas desde donde las masas de aire captan el contenido de humedad que da origen a las precipitaciones extremas observadas. Estas zonas son presentadas dentro de este reporte como “zonas de generación” o “zonas de origen”.

No obstante, el análisis enfrentó importantes restricciones derivadas de la disponibilidad y calidad de los registros meteorológicos. De un total de 875 estaciones inicialmente consideradas, solo 127 cumplieron con los criterios de calidad establecidos, lo que redujo de manera sustancial la representatividad espacial de los datos. Esta restricción se acentuó particularmente al sur de la latitud 42°S, zona que debió ser excluida del estudio con el fin de priorizar la confiabilidad estadística del conjunto restante y evitar comprometer la solidez metodológica del análisis. Esta escasez de datos pone de manifiesto deficiencias estructurales en el funcionamiento y mantenimiento de la red de estaciones meteorológicas a nivel nacional.

A pesar de estas restricciones, el estudio logró identificar cinco zonas de precipitación en base a sus registros históricos. La Zona 1 presenta un carácter distintivo, ya que sus precipitaciones extremas se originan principalmente a partir de aportes de humedad continental vinculados con la cuenca amazónica. En la Zona 2, en cambio, las precipitaciones extremas muestran un origen marcadamente costero, posiblemente asociado a flujos amazónicos que alcanzan su máxima captación de humedad al desplazarse sobre las costas del Norte Grande y Norte Chico antes de precipitar. Por su parte, las Zonas 3, 4 y 5 exhiben un comportamiento predominantemente oceánico, caracterizado por trayectorias originadas en latitudes tropicales del pacífico coincidentes con ríos atmosféricos. Estas trayectorias muestran un descenso progresivo en latitud antes de alcanzar las costas del país, un patrón que se encuentra modulado por la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur.

En conjunto, los resultados revelan una clara transición espacial en los mecanismos que aportan humedad, pasando de flujos principalmente continentales y amazónicos en el norte a una dominancia oceánica y frontal en el centro y sur del país. La coherencia entre los hallazgos del presente estudio y la evidencia previa refuerza la validez de las zonas identificadas, y sugiere que el transporte de humedad sobre Chile está regulado por una interacción jerárquica de factores sinópticos, en la cual la influencia amazónica, el Anticiclón del Pacífico sur y sistemas guiados por ríos atmosféricos se combinan para dar forma a los patrones asociados a los eventos de precipitación extrema a lo largo del país.

Finalmente, este estudio entrega una base sólida para el desarrollo de análisis posteriores sobre los comportamientos hidroclimáticos de las zonas de generación identificadas y su relación con los eventos extremos que afectan al país, con el propósito de fortalecer los mecanismos actuales de predicción y preparación frente a desastres asociados a este tipo de fenómenos. De manera complementaria, la regionalización propuesta permite reconocer con mayor precisión los patrones espaciales y dinámicos que controlan las precipitaciones extremas en Chile. La consistencia observada entre las zonas de generación obtenidas y las macrozonas climáticas previamente descritas en la literatura respalda la validez del enfoque metodológico adoptado. En conjunto, los resultados no solo aportan evidencia empírica que refuerza clasificaciones anteriores, sino que también ofrecen un marco actualizado y aplicable a futuras investigaciones en materias de gestión del riesgo, planificación territorial y adaptación al cambio climático.

8 Referencias

- Abel, B. D., Rajagopalan, B., & Ray, A. J. (2022). Understanding the Dominant Moisture Sources and Pathways of Summer Precipitation in the Southeast Prairie Pothole Region. *Earth and Space Science*, 9(3). <https://doi.org/10.1029/2021EA001855>
- Bao, C. (2021). K-means clustering algorithm: a brief review. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 4(5).
- Barrett, B. S., & Hameed, S. (2017). Seasonal Variability in Precipitation in Central and Southern Chile: Modulation by the South Pacific High. *Journal of Climate*, 30(1), 55–69. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0019.1>
- Böhm, C., Reyers, M., Knarr, L., & Crewell, S. (2021). The Role of Moisture Conveyor Belts for Precipitation in the Atacama Desert. *Geophysical Research Letters*, 48(24). <https://doi.org/10.1029/2021GL094372>
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3–4), 131–147. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7>
- Bracken, C., Rajagopalan, B., Alexander, M., & Gangopadhyay, S. (2015a). Spatial variability of seasonal extreme precipitation in the western United States. *Journal of Geophysical Research*, 120(10), 4522–4533. <https://doi.org/10.1002/2015JD023205>
- Bracken, C., Rajagopalan, B., Alexander, M., & Gangopadhyay, S. (2015b). Spatial variability of seasonal extreme precipitation in the western United States. *Journal of Geophysical Research*, 120(10), 4522–4533. <https://doi.org/10.1002/2015JD023205>
- Caballero, T. R. (2023). *Análisis de la precipitación pre-altiplánica de verano en el Norte de Chile*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/193130>
- Campos, D., & Rondanelli, R. (2023). ENSO-Related Precipitation Variability in Central Chile: The Role of Large Scale Moisture Transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(17), e2023JD038671. <https://doi.org/10.1029/2023JD038671>
- Chen, Y.-C. (2017). *A Tutorial on Kernel Density Estimation and Recent Advances*.
- Cornwall, W. (2021). Europe’s deadly floods leave scientists stunned despite improvements, flood forecasts sometimes failed to flag risks along smaller streams. *Science*, 373(6553), 372–373. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.373.6553.372/ASSET/FF38E2C6-8279-4A40-82B4-54D1B7E4725B/ASSETS/GRAPHIC/373_372_F1.JPEG
- Dacre, H. F., Martínez-Alvarado, O., & Mbengue, C. O. (2019). Linking Atmospheric Rivers and Warm Conveyor Belt Airflows. *Journal of Hydrometeorology*, 20(6), 1183–1196. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0175.1>
- Dalagnol, R., Gramscianinov, C. B., Crespo, N. M., Luiz, R., Chiquetto, J. B., Marques, M. T. A., Neto, G. D., de Abreu, R. C., Li, S., Lott, F. C., Anderson, L. O., & Sparrow, S. (2022). Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1). <https://doi.org/10.1002/cli2.15>
- Degaetano, A. T. (2001). Spatial grouping of United States climate stations using a hybrid clustering approach. *International Journal of Climatology*, 21(7), 791–807. <https://doi.org/10.1002/joc.645>
- Di Castri, F., & Hajek, E. R. (1976). *BIOCLIMATOLOGIA DE CHILE*.
- Garreaud, R. D., Jacques-Coper, M., Marín, J. C., & Narváez, D. A. (2024). Atmospheric Rivers in South-Central Chile: Zonal and Tilted Events. *Atmosphere*, 15(4), 406. <https://doi.org/10.3390/ATMOS15040406/S1>

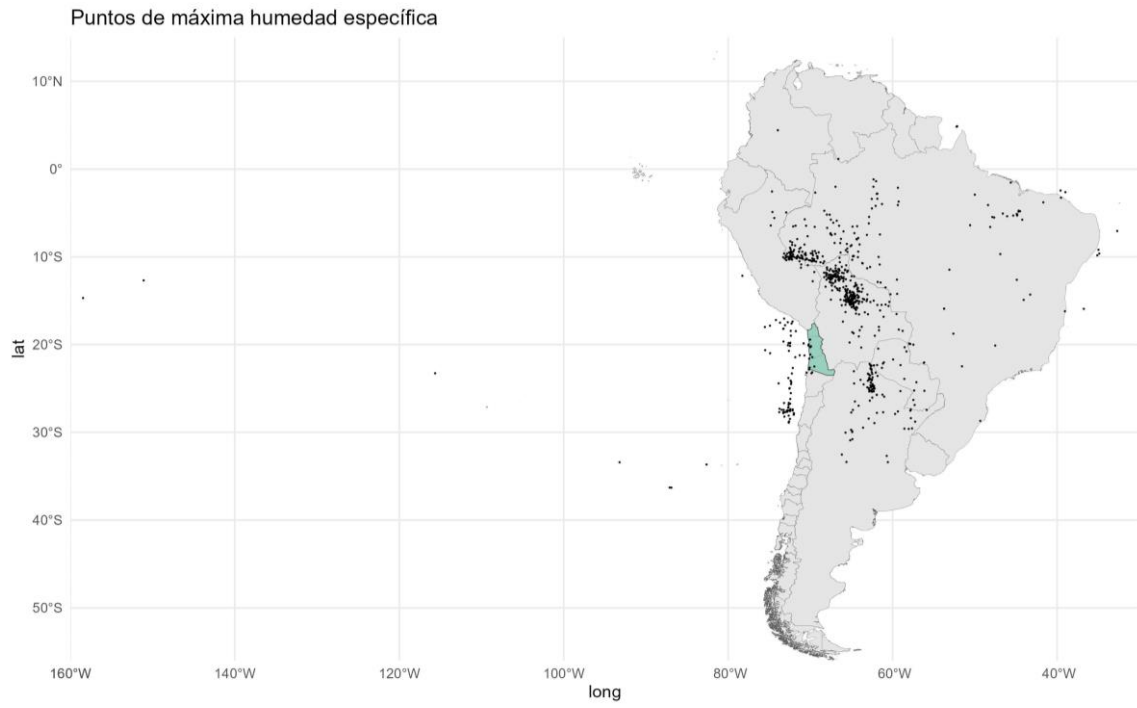
- Jordan, T. E., Herrera L., C., Godfrey, L. V., Colucci, S. J., Gamboa P., C., Urrutia M., J., González L., G., Paul, J. F., Jordan, T. E., Herrera L., C., Godfrey, L. V., Colucci, S. J., Gamboa P., C., Urrutia M., J., González L., G., & Paul, J. F. (2019). Características isotópicas e implicaciones paleoclimáticas del evento de precipitación extrema de marzo de 2015 en el norte de Chile. *Andean Geology*, 46(1), 1–31. <https://doi.org/10.5027/ANDGEOV46N1-3087>
- Jung, A. (2022). *Machine Learning The Basics*. <https://link.springer.com/bookseries/16715>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetiaa, A., ... Joseph, D. (2018). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Renewable Energy: Four Volume Set, 1–4*, 146–194. <https://doi.org/10.4324/9781315793245-16/NCEP-NCAR-40-YEAR-REANALYSIS-PROJECT-KALNAY-KANAMITSU-KISTLER-COLLINS-DEAVEN-GANDIN-IREDELL-SAHA-WHITE-WOOLLEN-ZHU-CHELLIAH-EBISUZAKI-HIGGINS-JANOWIAK-MO-ROPELEWSKI-WANG-LEETMAA-REYNOLDS-ROY-JENNE-DENNIS-JOSEPH>
- Kohonen, T. (1990). The Self-Organizing Map. *Proceedings of the IEEE*, 78(9), 1464–1480. <https://doi.org/10.1109/5.58325>
- Kumar, P. (2015). Hydrocomplexity: Addressing water security and emergent environmental risks. *Water Resources Research*, 51(7), 5827–5838. <https://doi.org/10.1002/2015WR017342>
- Leonard Kaufman, & Peter J. Rousseeuw. (1987). *Clustering by Means of Medoids*.
- McPhillips, L. E., Chang, H., Chester, M. V., Depietri, Y., Friedman, E., Grimm, N. B., Kominoski, J. S., McPhearson, T., Méndez-Lázaro, P., Rosi, E. J., & Shafiei Shiva, J. (2018). Defining Extreme Events: A Cross-Disciplinary Review. *Earth's Future*, 6(3), 441–455. <https://doi.org/10.1002/2017EF000686>
- Meseguer-Ruiz, O., Ponce-Philimon, P. I., Baltazar, A., Guijarro, J. A., Serrano-Notivoli, R., Olcina Cantos, J., Martin-Vide, J., & Sarricolea, P. (2020). Synoptic attributions of extreme precipitation in the Atacama Desert (Chile). *Climate Dynamics*, 55(11–12), 3431–3444. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05455-4>
- Mudiar, D., Rondanelli, R., Valenzuela, R. A., & Garreaud, R. D. (2024). Unraveling the Dynamics of Moisture Transport During Atmospheric Rivers Producing Rainfall in the Southern Andes. *Geophysical Research Letters*, 51(13). <https://doi.org/10.1029/2024GL108664>
- Nie, Y., & Sun, J. (2022). Moisture Sources and Transport for Extreme Precipitation Over Henan in July 2021. *Geophysical Research Letters*, 49(4). <https://doi.org/10.1029/2021GL097446>
- Pizarro A, O., Hormazabal F, S., GONZALEZ C, A., & YAÑEZ R, E. (1994). Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. *Investigaciones Marinas*, 22, 85–101. <https://doi.org/10.4067/S0717-71781994002200007>
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014a). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57(57), 177–192. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014b). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57(57), 177–192. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. In *Journal of Computational and Applied Mathematics* (Vol. 20).
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>

- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Trenberth, K. E. (1998). Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change. *Climatic Change*, 39(4), 667–694. <https://doi.org/10.1023/A:1005319109110/METRICS>
- UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. (2015). *Chile: Floods and Mudslides - Informative Note, 14 April 2015 - Chile | ReliefWeb*. <https://reliefweb.int/report/chile/chile-floods-and-mudslides-informative-note-14-april-2015>
- 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. <https://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*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/179569>
- Wang, L., & Gu, W. (2016). The Eastern China flood of June 2015 and its causes. *Science Bulletin*, 61(2), 178–184. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0967-9>
- Zeng, R., Cai, X., Ringler, C., & Zhu, T. (2017). Hydropower versus irrigation - An analysis of global patterns. *Environmental Research Letters*, 12(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5f3f>
- Zhu, Y., & Newell, R. E. (1998). *A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers*.

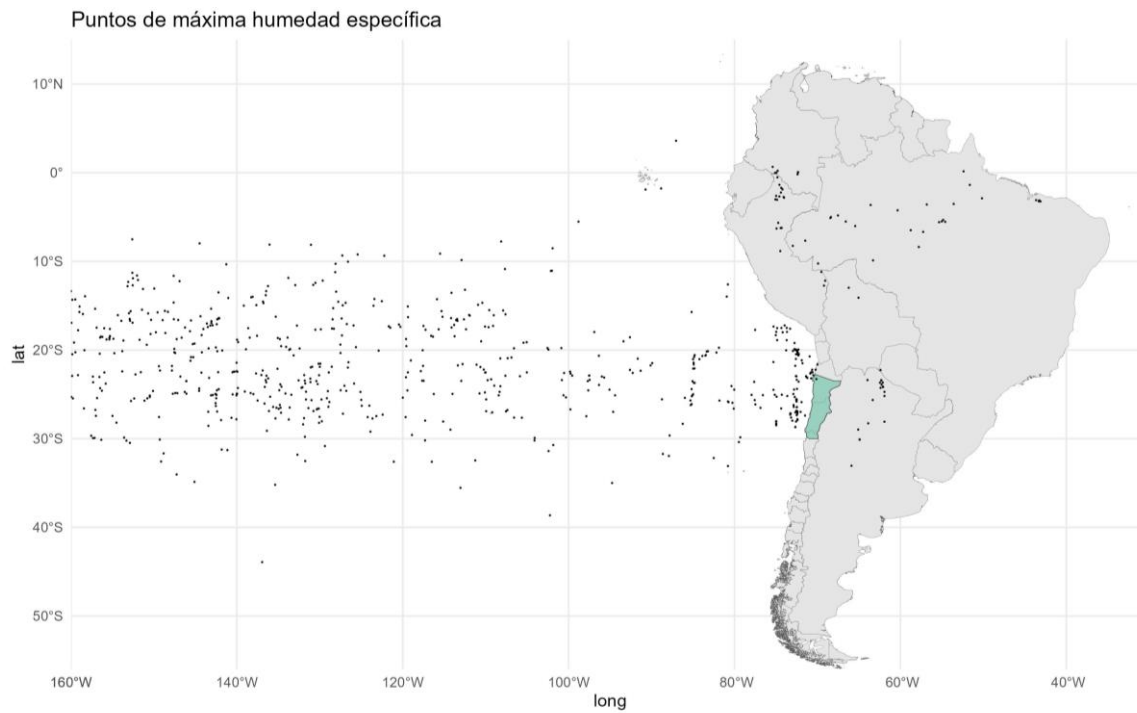
9 Anexos

9.1 Puntos de máxima humedad específica

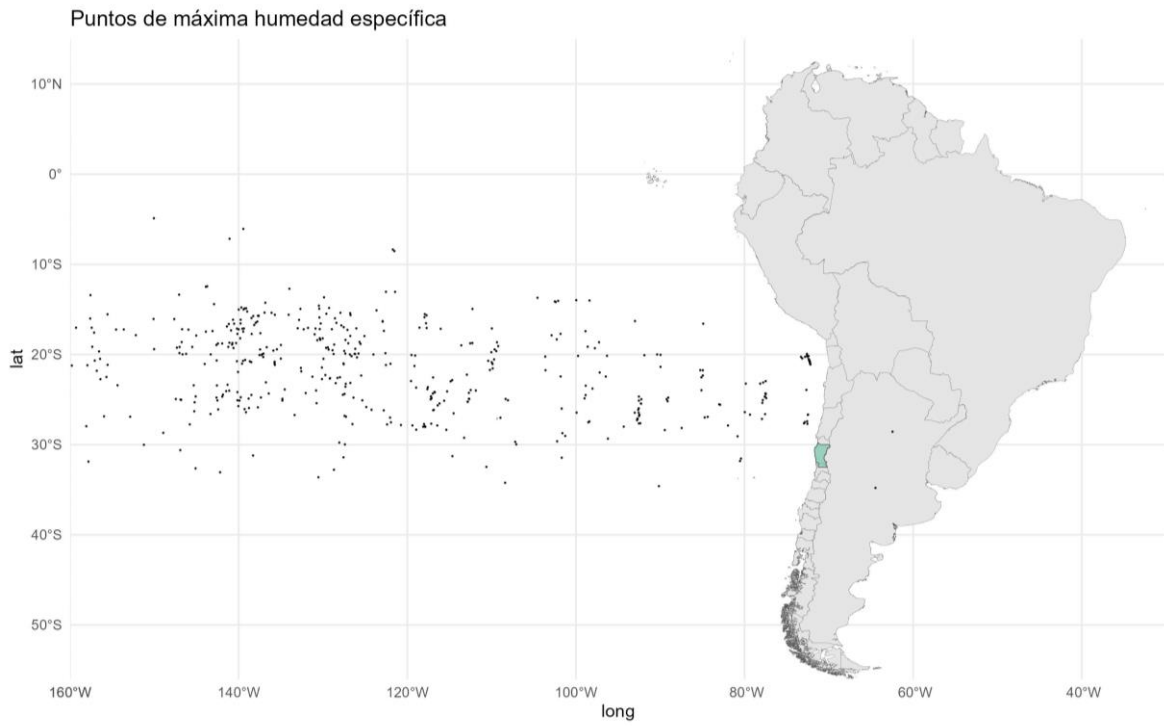
a)



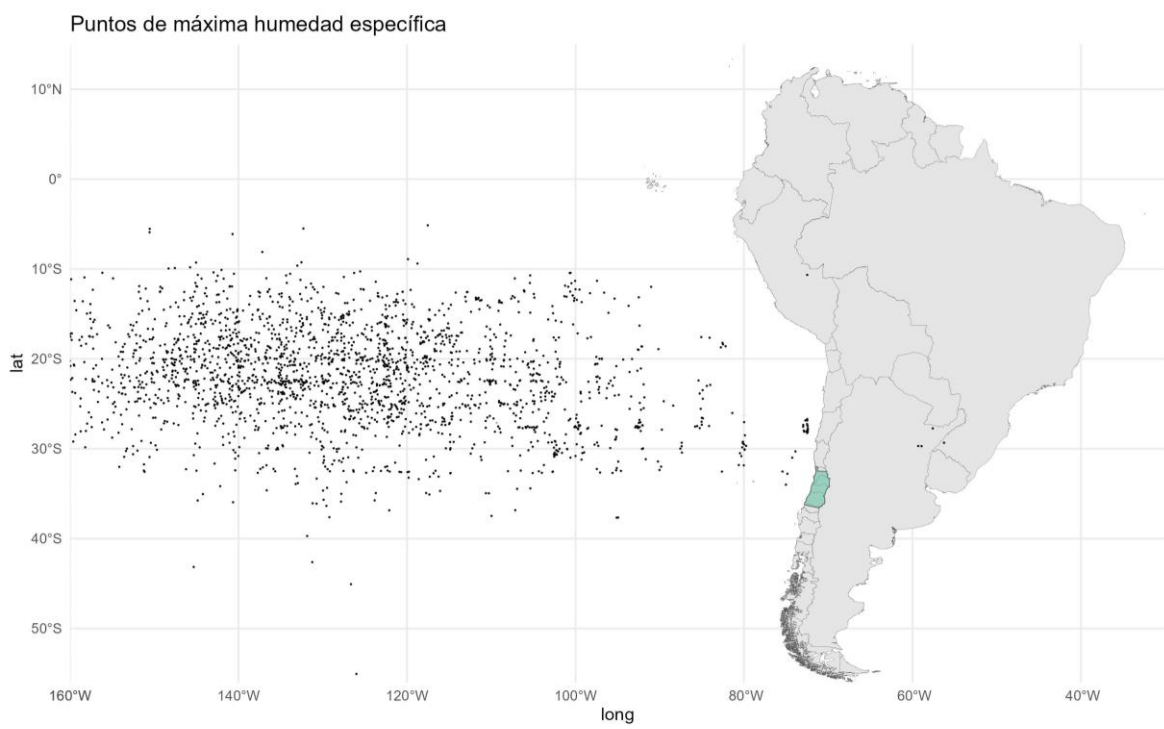
b)



c)



d)



e)

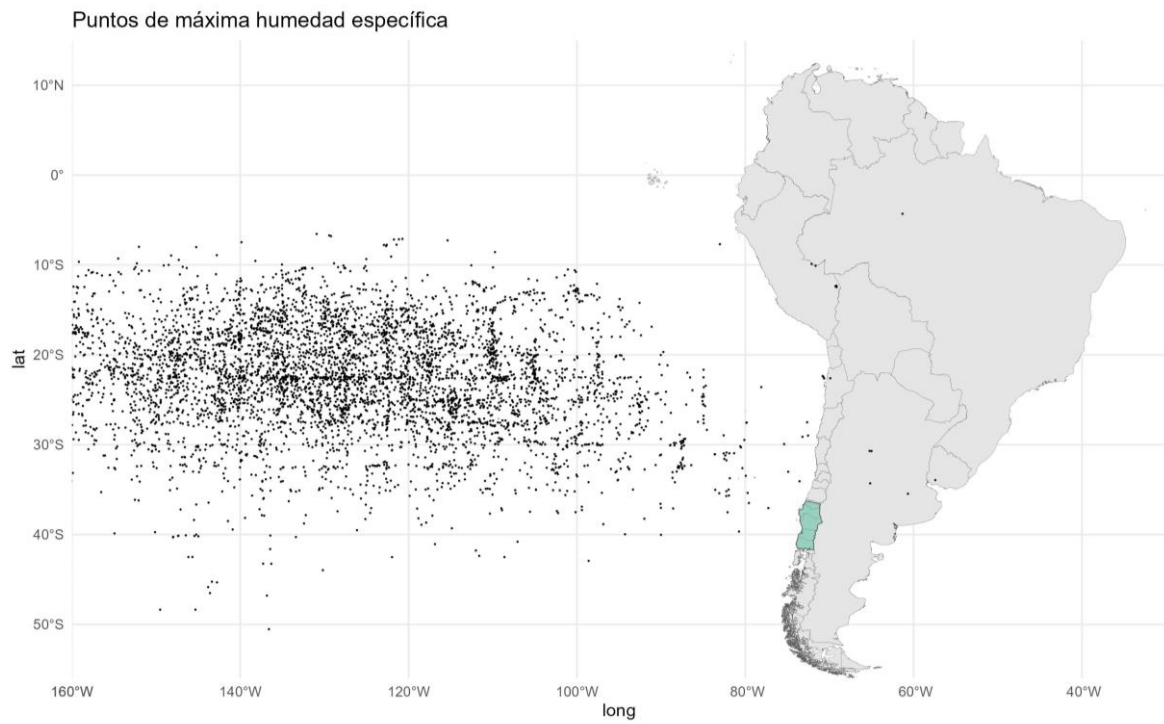


Figura 11: Puntos de máxima humedad específica a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5.