



Determinación de umbrales críticos de precipitación asociados a impactos para la zona central de Chile

Ricardo Abarca¹, Manuel Olivares¹, Tamara Venegas¹ y Pabla Quintana¹

¹Oficina Estudios Meteorológicos, Dirección Meteorológica de Chile

Resumen

Algunos servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales (SMHN) han implementado un enfoque de pronóstico basado en impacto (PBI), lo cual está alineado con la visión de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Dentro de este contexto, el presente estudio busca determinar los valores de umbrales críticos de precipitación acumulada en la región central de Chile considerando los datos relacionados a impactos hidrometeorológicos registrados por dos instituciones estatales. Preliminarmente, se agruparon los eventos de precipitación de acuerdo a distintas características físicas, con el fin de determinar si existe una relación entre su intensidad y los impactos, demostrándose la existencia de un grupo de eventos severos que causan el 95 % de todos los impactos registrados, el cual se ajusta a la estructura sinóptica de una tormenta cálida, descrita en estudios anteriores. Este resultado otorga la confianza para categorizar los distintos impactos en tres niveles de gravedad, de acuerdo a los tres niveles de advertencia de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), de manera tal que se les pueda asociar umbrales de precipitación. Estos umbrales se obtienen mediante la técnica de aprendizaje de máquina (machine learning) denominada árboles de decisión. Los resultados obtenidos indican que, si bien en muchas ocasiones la precipitación es suficiente para la determinación de un nivel de impacto, existen otras variables meteorológicas que la complementan. Así, este estudio presenta un marco inicial de trabajo para generar alertas por impactos de acuerdo a los tres niveles de advertencia de la DMC.

1 Introducción

A pesar de los avances tecnológicos y el continuo perfeccionamiento de los SMHN, la capacidad de anticipar y gestionar eficazmente los desastres naturales asociados a eventos meteorológicos extremos sigue siendo un desafío (Uccellini and Ten Hoeve, 2019). Además, algunos estudios demuestran que el impacto económico de los desastres naturales asociados a fenómenos meteorológicos está aumentando a nivel mundial debido a los cambios en los factores sociales, como el crecimiento de la población (Changnon, 2003).

La OMM propone a los SMHN que no sólo consideren los elementos meteorológicos que representan una amenaza, sino también los posibles impactos asociados, siendo un camino prometedor para mejorar la preparación y respuesta ante amenazas meteorológicas (OMM, 2015). Este enfoque innovador fortalece a los SMHN en la comprensión de los impactos probables de un evento hidrometeorológico (Potter et al., 2021) y ofrece la oportunidad de mejorar la comunicación y la cooperación interinstitucional en las etapas de optimización y funcionamiento operativo de un sistema de alerta basado en impactos (por ejemplo, Pascal et al., 2006; Paton et al., 1998; Uccellini and Ten Hoeve, 2019; Potter et al., 2021). Aunque países como Inglaterra, Francia y El Salvador han avanzado en la implementación de PBI (OMM, 2015; Kaltenberger et al., 2020; OMM, 2021), este estudio busca explorar y analizar, en una etapa incipiente para la DMC, la determinación de umbrales críticos de precipitación asociados a diferentes categorías de impactos, utilizando algunas sugerencias de profesionales de instituciones vinculadas a la protección civil y datos facilitados por estas.

2 Metodología

2.1 Delimitación temporal y espacial

La principal base de datos de impactos, cuya fuente es SENAPRED (Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres), presenta un catastro oficial desde el año 2015, es por esto que, en este estudio, se trabajó con datos comprendidos entre el 01 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2022. En cuanto a la zona de estudio, esta abarca toda la zona continental correspondiente al área de jurisdicción de pronóstico del Centro Nacional de Análisis (CNA) de la DMC, el cual comprende desde la Región de Coquimbo hasta la Región del Biobío. Adicionalmente, la zona de estudio limita con el océano Pacífico al Oeste y con el límite fronterizo sobre la cordillera de Los Andes al Este (Anexo A).

2.2 Bases de datos y preprocesamiento de la información

2.2.1 Datos de impactos

Los registros de impactos y/o afectaciones generadas por eventos hidrometeorológicos fueron facilitados por SENAPRED, los cuales indican la fecha de inicio y término de los diferentes tipos de impactos y el lugar de ocurrencia. A estos registros se le agregaron los impactos no coincidentes facilitados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), consolidándose así una base de datos final. Los impactos fueron revisados con los registros pluviométricos de estaciones meteorológicas, así como con imágenes satelitales, con el fin de comprobar si el impacto se validaba como uno asociado a un fenómeno hidrometeorológico.

2.2.2 Datos de precipitación

Para la obtención de los datos de precipitación se utilizaron estaciones con una resolución temporal de al menos 6 horas, con la condición de que presentaran más del 70 % de valores durante el periodo de estudio. Estas estaciones pertenecen a la DMC, al Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA¹), a la Dirección General de Aguas (DGA) y a la red Agrometeorológica (AGROMET). Además se crearon algunas estaciones sintéticas con datos del reanálisis ERA5² debido a la escasez de estaciones en algunos sectores. De este modo se obtiene una base de datos con registros de precipitación que abarca un total de 168 estaciones (mapa en Anexo B). Posteriormente, para eliminar posibles errores en los datos y completar la información faltante, se utilizó una técnica de validación y reconstrucción similar a la descrita en Gentilucci et al. (2018) y en una norma española de validación de registros meteorológicos (AENOR, 2004).

Con esta base de datos corregida, se obtuvieron los eventos de precipitación. Se define como un evento de precipitación al registro (de 6 horas) consecutivo en el tiempo de al menos una de las estaciones dentro de la zona de estudio. Se considera el inicio de un evento, al primer valor mayor o igual a 1 mm en alguna estación; y el final de un evento, al último registro antes de que ninguna estación indicase montos de precipitación. Estos eventos se combinaron con la base de datos de SENAPRED-SERNAGEOMIN, como una forma de validar los impactos y considerar los eventos de precipitación que no generaron impactos.

2.2.3 Datos adicionales

Luego de diversas reuniones con los meteorólogos pronosticadores del CNA, se determinó un set de variables adicionales, las cuales se extrajeron del reanálisis ERA5. Estas variables son: agua precipitable (PW, por sus siglas en inglés); transporte de vapor agua integrado en la columna vertical de la atmósfera (IVT, por sus siglas en inglés); componentes zonal y meridional del viento

¹Datos provistos por CEAZA, obtenidos desde <https://www.ceazamet.cl/>, 2019.

²Quinta generación de reanálisis atmosféricos del clima global del Centro Europeo para los Pronósticos de Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés). Posee una resolución vertical de 137 niveles; resolución temporal de 1 hora; y una resolución espacial de 0.25° x 0.25° (latitud-longitud). Página web: <https://cds.climate.copernicus.eu>

(los que luego se convirtieron en dirección e intensidad) tanto en 500, 700 y 850 hPa; nivel de isoterma 0°C; altura geopotencial en los niveles de 500 y 1000 hPa; y espesor entre 1000 y 500 hPa. En el caso de la variable isoterma 0°C, los datos provienen de observaciones del radiosonda de Santo Domingo (dato diario a las 12 UTC³), y es obtenida a través de un método descrito en [DMC \(2020\)](#). Una comparación con la isoterma 0°C obtenida del reanálisis ERA5, mostró una alta correlación (0.98), por lo que se decide utilizar los datos del reanálisis, dado que presentan una mejor resolución temporal (1 hora). De todos los datos descargados, se eligieron aquellos valores que corresponden a un punto céntrico en cada región, hacia el sector costero.

También se obtuvieron datos diarios del límite inferior de nieve (cota de nieve) de todas las cuencas ubicadas en la Cordillera de Los Andes dentro de la zona de estudio, esto a partir de la base de datos con la que cuenta el Observatorio de Nieve, plataforma que fue desarrollada por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET) con el apoyo del Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia (CR)² de Chile⁴.

Algunas de estas variables adicionales difieren en su resolución temporal. No obstante, dado que este estudio se enfoca en eventos de precipitación, se obtuvieron los valores mínimo, máximo y promedio de las variables para cada evento.

2.3 Análisis descriptivo

Inicialmente, se realizó una previsualización de los datos de eventos de precipitación que generaron impactos, y la estacionalidad de los registros de SENAPRED-SERNAGEOMIN.

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis principal, el que tiene como objetivo agrupar eventos de precipitación similares mediante el método de k-means, el cual se ha utilizado en estudios similares ([Ling, 1981](#); [Jin et al., 2021](#)). La aplicación de este enfoque se realiza exclusivamente con registros pluviométricos, considerando además variables derivadas de la precipitación, como lo son la máxima precipitación en seis horas o las horas de duración del evento ([Anexo C](#)).

Para aplicar el método de k-means, se normalizan los valores de las variables con el fin de igualar su peso estadístico. Además, este procedimiento requiere elegir un número óptimo de grupos o clústeres basándose en la técnica del codo, la cual entrega este resultado de forma gráfica, aunque se reconoce la subjetividad en esta decisión. A fin de verificar si las diferencias en las medias de variables entre los grupos encontrados son o no estadísticamente diferentes, se aplicaron dos test estadísticos (T-test y test de Cohen, con una significancia del 0.05).

Finalmente, se considera la base de datos de impactos para contabilizar cuántos de ellos ocurren en cada grupo.

2.4 Categorización de impactos

Antes de continuar con la determinación de umbrales de precipitación asociados a impactos en el análisis de clasificación, es necesario categorizar los impactos obtenidos en la base de datos de SENAPRED-SERNAGEOMIN, con el fin de asociarles una etiqueta (Aviso, Alerta o Alarma) de acuerdo a su nivel de gravedad. Esto se explica más detalladamente en la sección de resultados.

2.5 Análisis de clasificación

El siguiente proceso corresponde a un análisis de clasificación, cuyo objetivo es encontrar umbrales de precipitación acumulada para los eventos de precipitación categorizados en etiquetas que dan cuenta del nivel de impacto ([Sección 2.4](#)), los cuales están definidos como Aviso, Alerta y Alarma, incluyendo el nivel de "sin impactos". Si bien el objetivo es encontrar los umbrales de la precipitación acumulada, también se consideran otras variables meteorológicas que pueden explicar las diversas categorías de impacto.

³Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en inglés).

⁴Página web: <https://www.observatorioandino.com/>

Al contar con una gran cantidad de variables meteorológicas, se opta por reducir la dimensionalidad de la base de datos a través del método de “bosques aleatorios” (Breiman, 2001) mediante la librería “randomForest” en software R, identificando las variables más relevantes a través del índice de GINI y el juicio experto (meteorólogo), de tal manera que se obtienen los parámetros meteorológicos más efectivos para la separación de los datos en las etiquetas o categorías distintivas (para revisar las variables seleccionadas, ver en Anexo D). Luego, se utilizó el algoritmo “SimpleCART Tree” para modelar y encontrar umbrales. Este algoritmo, implementado en R a través de la librería “rpart”, crea árboles de decisión (Breiman et al., 2017) y se utiliza junto a “rpart.control” para controlar la profundidad y evitar un sobreajuste. Este enfoque facilita la interpretación de los umbrales y contribuye a la comprensión de las relaciones entre variables meteorológicas y los impactos. De esta manera, se crearon árboles de decisión para cada macrozona geográfica de las regiones, siendo la delimitación de cada una de ellas en base a DMC (2022)⁵.

3 Resultados y discusión

3.1 Análisis descriptivo

Con la base de datos de impactos validada (Sección 2.2.1) y la base de datos de los eventos de precipitación se procede a generar los diferentes análisis. La Figura 1 muestra la distribución espacial del número de eventos de precipitación que generaron impactos a nivel comunal durante el periodo de estudio. La mayor cantidad de eventos de precipitación que generan impacto ocurren en la macrozona geográfica del litoral de la Región del Biobío (más de 34). De hecho, si se considera el número de impactos a nivel comunal, las primeras siete comunas que presentan más impactos se ubican en la macrozona ya mencionada. Por otra parte, en las macrozonas geográficas de cordillera y precordillera de algunas regiones (Coquimbo, Metropolitana y Biobío) se presenta un número considerable de eventos que generan impactos (en general entre 26 y 32). Otra característica que se destaca es la distribución espacial prácticamente homogénea de los eventos que asociaron impactos en la Región de O'Higgins y del Maule.

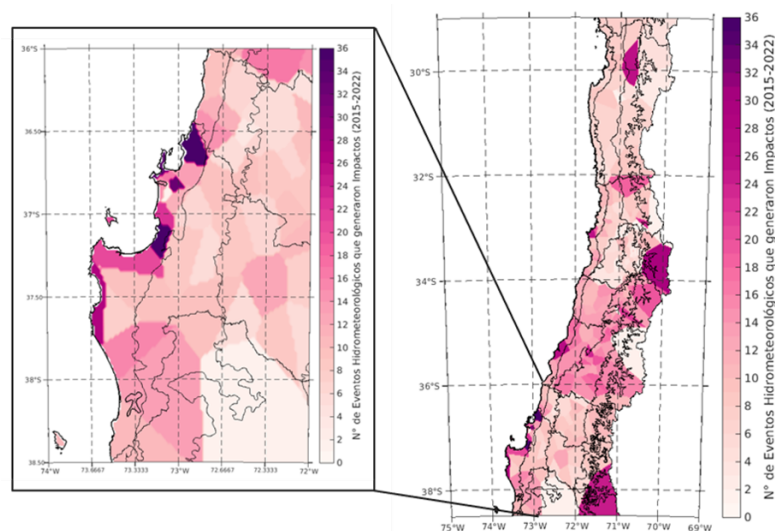


Figura 1. Distribución espacial del número de eventos de precipitación que generaron impactos a nivel comunal, entre los años 2015 y 2022. Los impactos son contabilizados con una resolución comunal. En el mapa se presentan las divisiones geopolíticas a nivel regional (líneas negras zigzagüeantes-horizontales) y las divisiones a nivel de macrozonas geográficas (líneas negras zigzagüeantes-verticales). El panel de la izquierda hace un acercamiento al litoral de la Región del Biobío, dado que presenta el mayor número de eventos con impactos.

⁵Las divisiones a nivel de macrozonas geográficas fueron facilitadas por la Sección Climatología de la DMC, las cuales están descritas en DMC (2022). Las macrozonas geográficas consideradas son: litoral, cordillera de la costa, depresión intermedia, precordillera y cordillera.

Al analizar el conteo de impactos a nivel estacional (Figura 2), se puede observar que la mayor cantidad de impactos han sido registrados en las temporadas de otoño e invierno. Esta distribución estacional de impactos era un aspecto esperable, al considerar que la temporada lluviosa en la zona central del país abarca estas estaciones. Sin embargo, existen impactos en las temporadas restantes, como por ejemplo, en la Región de Valparaíso (50 casos). Por otro lado, en el conteo global de impactos, nuevamente se destaca la Región del Biobío con el mayor número de estos.

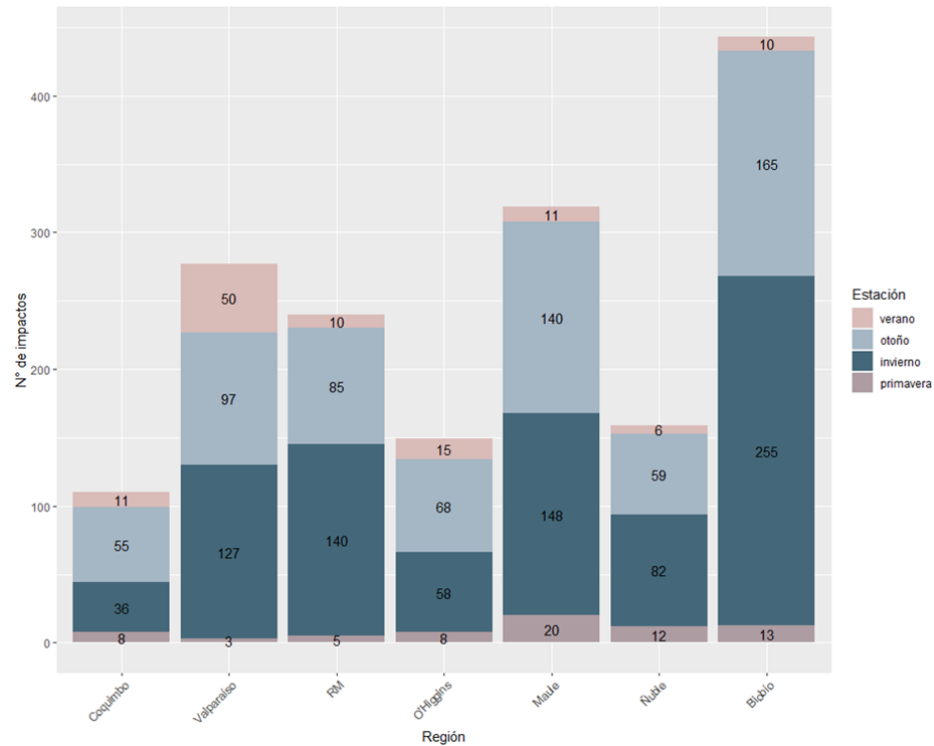


Figura 2. Distribución estacional del número de impactos, registrados por SENAPRED y SERNAGEOMIN, a nivel regional entre los años 2015 y 2022, dentro de la zona de estudio.

Otro aspecto importante a verificar es si los registros de impactos, asociados a los eventos de precipitación, presentan montos de agua caída mayores que sus contrapartes sin impactos. Utilizando los registros pluviométricos cada 6 horas, y seleccionado el valor más alto ocurrido en el evento de precipitación de cada impacto, se construye el diagrama de cajas superpuesto con un diagrama de violín mostrado en la Figura 3, el cual muestra que, en el caso de los registros de impactos, los eventos presentan valores en torno a la media que están entre 24 y 38 mm aproximadamente (percentil 25 y 75), los cuales son más altos que los eventos sin impactos, donde los valores se ubican entre los 2 mm y 12 mm aproximadamente. Al comparar las medias de ambas muestras, las diferencias son estadísticamente significativas (~30 mm, para los registros con impactos; y ~9 mm, para los eventos sin impactos).

Adicionalmente a lo anterior, se hace necesario comprobar si existen grupos de eventos de precipitación, de toda la zona de estudio (Región de Coquimbo a Biobío), que presenten características similares en cuanto a su distribución geoespacial, intensidad y persistencia, y chequear si el/los grupo/s de eventos más intensos son los que poseen la mayor cantidad de impactos. Como se mencionó anteriormente, los eventos de precipitación son construidos con los registros pluviométricos (Sección 2.2.2). Aplicando la técnica de k-means se encuentran cuatro grupos óptimos, los cuales fueron verificados con las distancias inter-clúster a través de dos test estadísticos (t-test y Cohen, no mostrados). La Figura 4 muestra una representación gráfica de los valores medios que caracterizan los eventos de precipitación de cada clúster o grupo obtenido, además de incluir el porcentaje de los eventos con impactos por cada grupo.

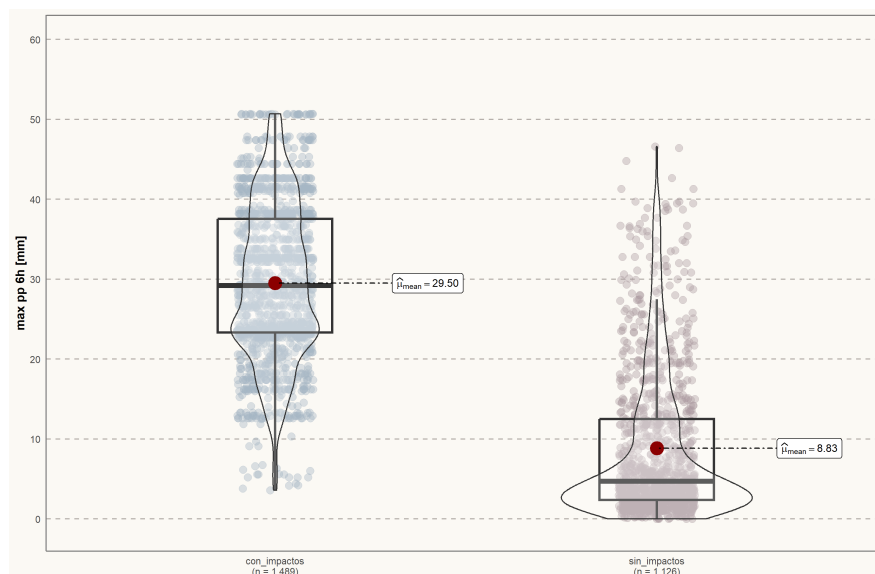


Figura 3. Diagrama de caja superpuesto con un diagrama de violín del valor máximo de precipitación acumulada en 6 horas para cada registro de impacto por un evento hidrometeorológico (izquierda), y el valor de los eventos sin impactos (derecha). En promedio, los registros con impactos presentan montos más altos ($m = 29.5$, d.e. = 9.6) que los eventos sin impactos ($m = 8.8$, d.e. = 9.3). Esta diferencia es estadísticamente significativa con $t(2466) = 55.6$, $p\text{-value} < 0.05$, y representa en efecto de tamaño grande en las diferencias para la prueba d de Cohen ($d = 2.2$).

Se destaca el promedio de la precipitación máxima de 6 horas en el grupo 3, superando a los demás grupos con al menos el doble de su intensidad, exhibiendo además una duración promedio de 111 horas en los eventos de precipitación en comparación a los demás grupos que registran duraciones menores a 27 horas. Estos resultados respaldan la hipótesis de que el grupo 3 presenta eventos de precipitación caracterizados por un avance pausado o incluso estacionario, lo cual puede representar una extensión geográfica relativamente menor al considerar la mayor cantidad de horas de duración de este grupo respecto a los otros grupos (1, 2 y 4). Al comparar los clúster 1 y 2, ambos grupos presentan características similares en términos de precipitación máxima de 6 horas y duración del evento, con valores que pueden considerarse como bajos, pero difieren en la distribución geoespacial de la precipitación. Respecto al clúster 4, los valores medios de precipitación máxima de 6 horas son mayores respecto al clúster 1 y 2, sin embargo, siguen estando muy por debajo de los valores del clúster 3.

Un aspecto interesante a destacar del grupo 3, es que el 48 % del total de eventos de precipitación presentó impactos registrados por SENAPRED y/o SERNAGEOMIN, a diferencia de los otros grupos que no superaron el 3 % (porcentajes calculados con datos mostrados en Anexo E). Además, el grupo 3 contiene el 95 % de los casos de impactos registrados en todo el periodo de estudio.

Un somero análisis de escala sinóptica, es realizado con los compuestos en 500 hPa, los cuales denotan que los cuatro grupos son afectados por la parte delantera de una vaguada, siendo el grupo 3 el que presenta una vaguada con una longitud de onda más grande, incluyendo además una menor curvatura y un eje de dorsal más lejano hacia el oeste (Anexo F). Esta configuración sinóptica se ajusta a la estructura de una tormenta cálida, descrita en Garreaud (2013), la cual asocia una intensa corriente en chorro zonal en la troposfera media y alta y se relaciona a eventos extremos de precipitación (Rojas, 2016), que en el caso del campo del grupo 3 se evidencia con el mayor gradiente meridional de altura geopotencial en 500 hPa. Sin embargo, esta apreciación no es del todo concluyente dado que los casos mostrados en Garreaud (2013) denotan una zonalidad más sostenida en 500 hPa respecto a lo observado en el clúster 3, de modo que el compuesto del clúster 3 podría contener algunos casos de tormentas frías que acentuaron ligeramente la curvatura de la vaguada. Además, el clúster 3 podría incluir casos con varios eventos sucesivos que aumentaron su persistencia (horas de duración).

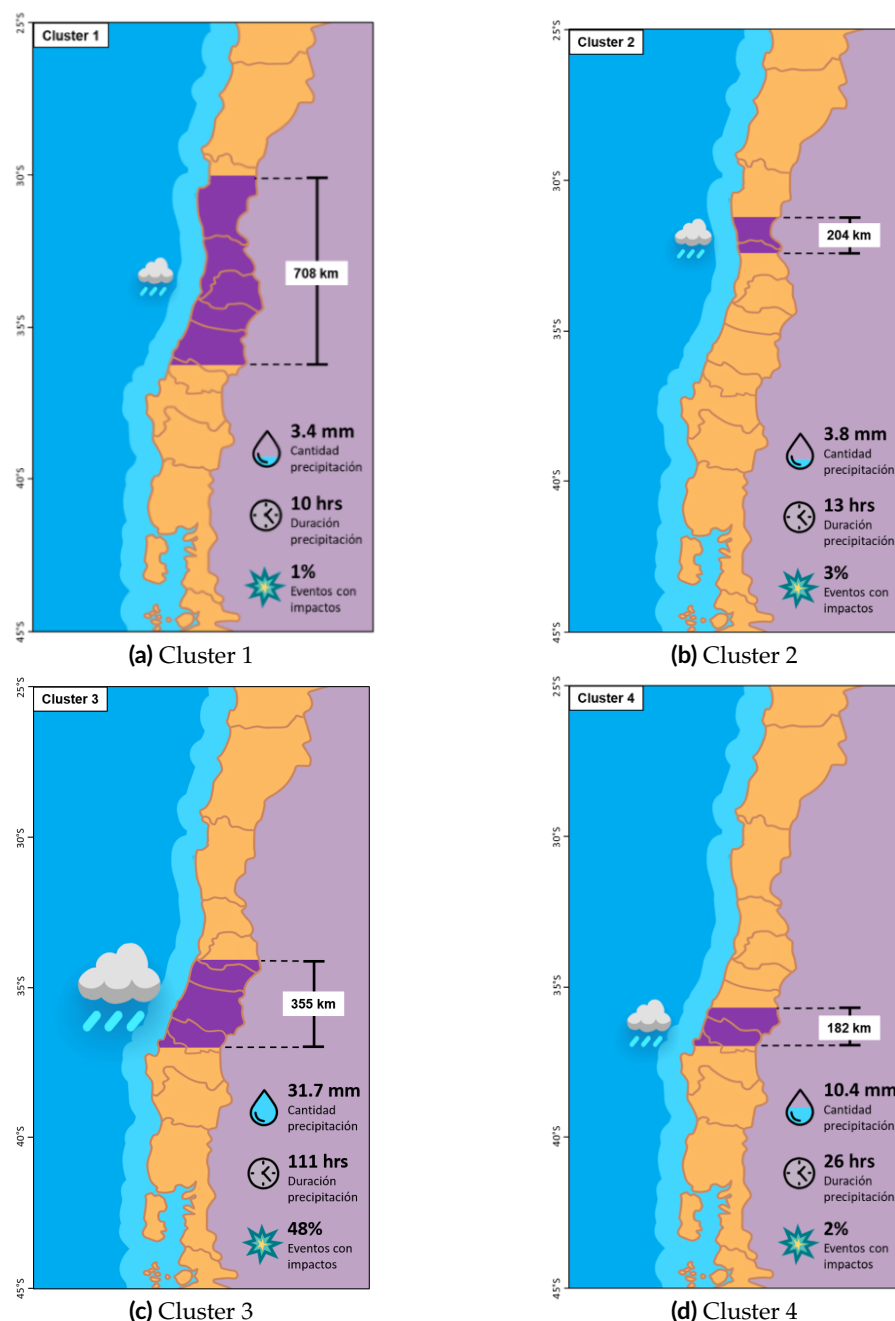


Figura 4. Representación gráfica de los valores medios para los cuatro grupos de eventos de precipitación, obtenidos con la técnica de k-means, y ocurridos entre las regiones de Coquimbo y el Biobío durante el período 2015-2022. Los valores promedios representativos de los cuatro grupos de eventos (a, b, c y d) son: la distancia o distribución geoespacial del evento (km), la precipitación máxima acumulada de 6 horas (mm), las horas de duración o persistencia (hrs), y el porcentaje de la cantidad de eventos que generaron impactos dentro de cada grupo.

3.2 Tabla de categorización de impactos

Tal como se mencionó en la Sección 2.4, es necesario categorizar los impactos obtenidos de las bases de datos de SENAPRED y SERNAGEOMIN, con el fin de asociarles una etiqueta coincidente con los niveles de advertencia del Sistema de Alerta Temprana (SAT) de la DMC, a saber Aviso, Alerta y Alarma. La generación de esta categorización se basó en una estructura creada por McCarthy (2007), la cual clasifica impactos de acuerdo al nivel de afectación de un fenómeno

meteorológico específico. Luego de múltiples conversaciones y sugerencias de profesionales de SENAPRED y SERNAGEOMIN, se obtuvieron las etiquetas de los diferentes impactos, los cuales son expuestos en el Anexo G.

Es necesario acotar que un registro en la base de datos de SENAPRED-SERNAGEOMIN puede presentar más de un tipo de impacto, por lo que en estos casos se considera aquel de mayor gravedad para asignarle la etiqueta correspondiente (Alarma, Alerta o Aviso). De esta manera, un impacto que se considera como Alarma, podría contener otros tipos de impactos que están en la categoría de Alerta y/o Aviso.

En esta tabla se consideran 15 tipos de impactos, de los cuales 2 se asocian a Alarma (fallecidos y desaparecidos) debido a que afectan directamente a la vida humana. Por el contrario, los 4 impactos asociados a Aviso fueron considerados de menor gravedad en comparación a los asociados a Alertas y/o Alarmas. De los registros de impactos etiquetados, el 66 % corresponden a la categoría de Aviso, 33 % a la categoría de Alerta, y 1 % a la categoría de Alarma. Esta distribución porcentual es razonable desde el punto de vista de un SAT, donde las categorías más altas presentan una menor frecuencia de ocurrencia.

3.3 Análisis de clasificación: determinación de umbrales de precipitación

Teniendo los antecedentes anteriores (Sección 3.2), se inicia la búsqueda de umbrales de precipitación, y de otras variables meteorológicas, para cada etiqueta del SAT, incluyendo el nivel de "sin impactos". En este punto es necesario acotar que los eventos de precipitación se construyen a nivel de macrozona regional (a diferencia de los eventos de precipitación para la Sección 3.1 que se construyen con toda la delimitación espacial del estudio). Esta decisión se basa en estudios anteriores que evidencian el efecto que tiene la orografía local en las precipitaciones en diferentes macrozonas de una misma región (Falvey and Garreaud, 2007; Viale and Garreaud, 2015). De esta manera, la Región de O'Higgins, por ejemplo, tendrá umbrales distintos para cada una de las cinco macrozonas geográficas que posee. Por otra parte, existieron casos en que un evento de precipitación de una macrozona y región específica, presentó dos categorías (etiquetas) del SAT, dado que podían presentarse impactos en dos comunas que estaban dentro de la macrozona. En estos casos se dejó la categoría del SAT más alta alcanzada por el evento de precipitación.

A partir de la clasificación mencionada anteriormente, se generaron árboles de decisión, obteniéndose 32 de estos, de los cuales, como ejemplo, en la Figura 5 se muestra el árbol de decisión perteneciente a la depresión intermedia de la Región del Maule, en donde se pueden extraer los umbrales de las variables para los eventos de precipitación categorizados en los niveles del SAT (Aviso, Alerta y Alarma), o simplemente "sin impacto" (s/i). Para saber cuáles son estos umbrales, se debe observar el primer rectángulo o nodo (nodo raíz, ubicado arriba en Figura 5) y considerar las condiciones de los valores de determinada variable que aparece justo debajo de cada nodo, de manera de ir avanzando con los siguientes hasta llegar a los nodos hojas (ubicados en el extremo inferior en Figura 5), los cuales son las etiquetas del SAT. Si el valor de un evento determinado cumple con esa condición se debe seguir a la izquierda (en caso contrario, a la derecha). De esta forma, para obtener una Alarma de un evento de precipitación en el periodo de estudio, se considera el umbral de un monto de precipitación máxima en 6 horas (max_6h) mayor/igual a 28 mm y una isoterma 0°C mínima ($iso0_min$) mayor/igual a 2272 m.s.n.m.; en el caso de Alerta, se mantiene la misma condición de la precipitación, pero con una isoterma 0°C mínima menor a 2272 m.s.n.m. En el caso de los Avisos, se debería considerar un monto de precipitación máxima en 6 horas mayor/igual a 15 mm, agua precipitable media (pw_mean) mayor/igual 15 mm y una anomalía de altura geopotencial en 500 hPa ($g500_min$) menor a -220 mgp. La anomalía de geopotencial de cada evento de precipitación se calcula con el valor representativo del evento y el valor promedio climatológico por estación del año (otoño, invierno, etc.), de modo que también se puede calcular el valor de geopotencial asociado considerando el valor de la anomalía y la estación del año en que ocurrió la mayor cantidad de eventos de precipitación en el nodo hoja. En el caso del nodo hoja en la categoría de Aviso del ejemplo anterior, la mayor cantidad de eventos se concentran en invierno, por lo que el valor de geopotencial calculado corresponde a 5447 mgp.

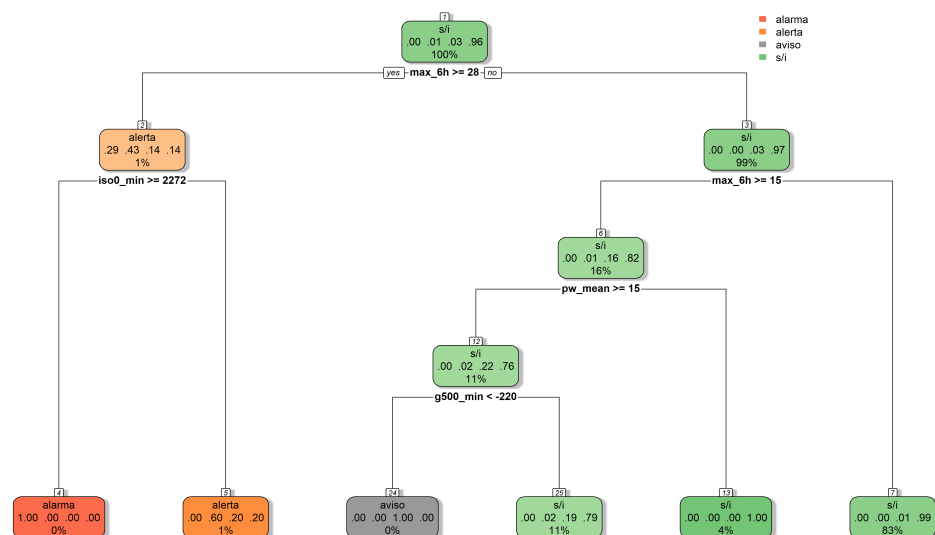


Figura 5. Árbol de decisión obtenido para la macrozona de la depresión intermedia de la Región del Maule. El nodo ubicado arriba se denomina nodo raíz; y los nodos ubicados en la parte inferior, nodos hojas. Las hojas corresponden a las etiquetas o categorías del SAT de la DMC.

Los impactos (o riesgo de impacto) no solo se explican desde el punto de vista de la amenaza meteorológica (o peligro meteorológico), sino que también por la exposición y la vulnerabilidad (OMM, 2015). A pesar de esto, es importante determinar si los umbrales obtenidos son extremos y/o presentan alguna consistencia física. Al considerar los niveles de Alarma y Alerta para el ejemplo anterior, el umbral de 28 mm (en 6 horas) obtenido corresponde a un valor extremo (percentil 98), al menos para los eventos de precipitación dentro de la delimitación temporal de este estudio. Los eventos en la categoría de Alarma presentan isothermas 0°C por encima del umbral de 2272 m.s.n.m., y los eventos en la categoría de Alerta están bajo este umbral. Esto tiene consistencia con estudios anteriores, ya que los casos con isothermas 0°C más altas se relacionan con las tormentas cálidas (Valenzuela and Garreaud, 2019), las que a su vez se asocian a montos de precipitación extremos (Rojas, 2016). Sin embargo, es importante mencionar que el umbral de 2272 m.s.n.m. no es un valor alto para todo el grupo de eventos ocurridos en la Región del Maule, dado que solo corresponde al percentil 42, siendo esto consistente con un estudio anterior (DMC, 2020) del cual se infiere que no necesariamente los días extremos de lluvia presentan isoterma 0°C altas, por lo que en los casos extremos de precipitación la isoterma 0°C puede oscilar en torno a valores cercanos al percentil 50 para la zona central de Chile.

Es necesario acotar que en esta etapa de clasificación basada en técnicas de machine learning, se realizan varias pruebas para la obtención final de un árbol de decisión, al igual que en otros estudios (por ejemplo, Bartoková et al., 2015). En particular, en este trabajo se verifican dos aspectos fundamentales respecto a los umbrales obtenidos por cada árbol de decisión: que sean consistentes físicamente y que logren separar los datos para obtener casos en la categoría indicada en el nodo hoja (etiquetas del SAT).

En el Anexo H se presentan las tablas que resumen los valores de umbrales obtenidos por los árboles de decisión para las macrozonas de cada región. Es pertinente indicar que en algunas macrozonas puntuales no se registraron impactos en las bases de datos de SENAPRED-SERNAGEOMIN, sobre todo en la macrozona de cordillera, por lo que se crearon etiquetas ("sin impactos", Aviso, Alerta y Alarma) en base a los percentiles 85, 95 y 99 de la precipitación máxima de 6 horas del evento, de manera tal de obtener umbrales para todos los sectores de la delimitación espacial del estudio. En todo caso, es importante mencionar que las macrozonas que experimentaron impactos exhibieron valores extremos en relación a los umbrales de precipitación máxima de 6 horas para las categorías del SAT. Al analizar las tablas obtenidas para cada región (Anexo H), se observa lo relevante que es, a la hora de determinar una categoría del SAT, considerar, además de

la precipitación, otras variables meteorológicas en el desarrollo de eventos de lluvia. Y esto es porque, de los 96 resultados de la tabla (umbral de Aviso, Alerta y Alarma obtenidos por 32 árboles de decisión), el 70 % de ellos consideran como importante tener presente no solo precipitación, sino que, además, los valores de agua precipitable, nivel de isoterma 0°C, altura geopotencial en 500 hPa, espesor de 1000 a 500 hPa o la presencia de ríos atmosféricos, con el valor de IVT asociado. Este hallazgo permitirá al pronosticador saber en qué zonas geográficas los impactos categorizados en el SAT se generarán por una combinación de variables. Por otra parte, en general se aprecia que en la mayoría de las tablas los umbrales de Alerta fueron mayores o iguales que el de Aviso y el de Alarma mayor o igual al de Alerta, es decir, la gravedad del impacto se va dando a medida que aumenta el umbral de precipitación, sin embargo, existen algunas macrozonas en donde no se cumple esta regla (7), de modo que los árboles de decisión demuestran que es imprescindible, sobre todo en aquellas excepciones, analizar las demás variables meteorológicas preponderantes al momento de determinar el nivel del SAT en un evento a pronosticar.

4 Conclusiones

Este estudio es probablemente el primero en determinar umbrales de precipitación utilizando bases de datos de impactos de dos instituciones del estado de Chile (SENAPRED y SERNAGEOMIN). Si bien estos datos no consideran los factores de exposición y vulnerabilidad, que son importantes para explicar un impacto (OMM, 2015), de todas maneras es posible observar una relación directa entre la intensidad del evento hidrometeorológico (amenaza o peligro) y el nivel de gravedad del impacto (etiquetas del SAT). Esto fue evidenciado en el análisis descriptivo y en el análisis de clasificación. En el análisis descriptivo principal, que agrupa eventos hidrometeorológicos con características similares, se destaca el grupo (clúster) 3, el cual exhibe una precipitación máxima de 6 horas promedio de al menos el doble de la intensidad de los otros grupos, y una duración promedio de al menos el triple de las horas de duración de los demás grupos. Un somero análisis sinóptico, infiere que este grupo presenta características similares a las tormentas cálidas descritas en Garreaud (2013), las cuales se relacionan a los eventos extremos de precipitación (Rojas, 2016), aunque también existe la posibilidad de que el grupo 3 incluya una cantidad de tormentas frías. En cualquier caso, todo indica que los eventos hidrometeorológicos del grupo 3 son intensos o extremos. Además, resulta notable observar que casi la mitad de ellos generan impactos (48 %), a diferencia de los otros grupos (1, 2 y 4) que no superan el 3 %. A esto se suma que aproximadamente el 95 % de todos los impactos registrados durante el periodo de estudio están contenidos dentro del grupo 3.

En el análisis de clasificación, los umbrales obtenidos dan cuenta de que las categorías del SAT asocian valores extremos en cuanto a la precipitación máxima de 6 horas. Por otra parte, el 70 % de las macrozonas mostraron que es importante tener presente no solo la precipitación para determinar una categoría del SAT, sino que, además, los valores de variables meteorológicas como el agua precipitable, nivel de isoterma 0°C, altura geopotencial en 500 hPa, espesor de 1000 a 500 hPa o la presencia de ríos atmosféricos, con el valor de IVT asociado. En el proceso de encontrar umbrales mediante la técnica de “machine learning” conocida como árbol de decisión se verificó y comprobó que los umbrales obtenidos presentaron una consistencia física. De esta manera, la metodología utilizada permitió encontrar umbrales de precipitación acumulada en 6 horas para los distintos niveles del SAT (Aviso, Alerta y Alarma), entre otras variables predominantes, desde la Región de Coquimbo hasta la Región del Biobío. Sin embargo, este estudio representa el primer paso en la aplicación de esta nueva metodología, por lo que será sometido a pruebas por parte del equipo de meteorólogos pronosticadores del CNA de la DMC.

Es importante señalar que este estudio, centrado en los impactos hidrometeorológicos entre 2015 y 2022, presenta limitaciones al no abordar eventos de precipitación excepcionalmente intensos que podrían haber ocurrido en años anteriores. Además, es crucial indicar que este análisis no adopta un enfoque holístico, ya que no considera la exposición y la vulnerabilidad, limitándose a la evaluación de los impactos basada en datos específicos de precipitación durante el periodo utilizado. Por lo tanto, es importante proseguir la investigación y desarrollo vinculada a la optimización continua del SAT de la DMC, mediante un enfoque multidisciplinario.

5 Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a los meteorólogos pronosticadores del CNA de la DMC por su interés y aporte de ideas en el desarrollo de este trabajo, así como a la Sección Climatología de la DMC por facilitar información y sugerir mejoras en el tratamiento de la validación de datos meteorológicos.

También agradecen a los profesionales del Departamento de Gestión Territorial, del Departamento del Sistema de Alerta Temprana y del Departamento de Análisis y Comprensión del Riesgo de SENAPRED por su interés, valiosos comentarios y por los datos de impactos facilitados para este trabajo.

Se agradece también a los profesionales del Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos de SERNAGEOMIN por su interés, observaciones metodológicas y por los datos de impactos facilitados para este trabajo.

Se agradece al área de Datos y Cómputos del Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia (CR)² por facilitar algunos datos, y al Dr. Juan Pablo Boisier por su aporte de conocimiento en la validación de registros pluviométricos.

Finalmente, un especial agradecimiento al Dr. Maximiliano Viale de IANIGLA-CONICET (Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales) por su motivación, aporte de ideas en el desarrollo del estudio y la facilitación de datos de ríos atmosféricos.

6 Referencias

- AENOR (2004), 'UNE 500540:2004, Redes de estaciones meteorológicas automáticas: Directrices para la validación de registros meteorológicos procedentes de redes de estaciones automáticas. Validación en tiempo real.'
URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0031912>
- Bartoková, I., Bott, A., Bartok, J. and Gera, M. (2015), 'Fog Prediction for Road Traffic Safety in a Coastal Desert Region: Improvement of Nowcasting Skills by the Machine-Learning Approach', *Boundary-Layer Meteorology* **157**(3), 501–516.
URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10546-015-0069-x>
- Breiman, L. (2001), 'Random forests', *Machine Learning* **45**(1), 5–32.
URL: <http://link.springer.com/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. and Stone, C. J. (2017), *Classification And Regression Trees*, 1 edn, Routledge.
URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351460491>
- Changnon, S. D. (2003), 'Measures of Economic Impacts of Weather Extremes', *Bulletin of the American Meteorological Society* **84**(9), 1231–1236.
URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-84-9-1231>
- DMC (2020), Climatología y tendencia de la altura de la isoterma cero, Technical report, Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Santiago.
URL: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/isotermaCero>
- DMC (2022), Macrozonificación Geográfica de Chile. Para el Sistema de Alerta Temprana de la Dirección Meteorológica de Chile., Technical report, Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Santiago. Manuscrito en revisión.
- Falvey, M. and Garreaud, R. (2007), 'Wintertime Precipitation Episodes in Central Chile: Associated Meteorological Conditions and Orographic Influences', *Journal of Hydrometeorology* **8**(2), 171–193.
URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JHM562.1>
- Garreaud, R. (2013), 'Warm Winter Storms in Central Chile', *Journal of Hydrometeorology* **14**(5), 1515–1534.
URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JHM-D-12-0135.1>
- Gentilucci, M., Barbieri, M., Burt, P. and D'Aprile, F. (2018), 'Preliminary Data Validation and Reconstruction of Temperature and Precipitation in Central Italy', *Geosciences* **8**(6), 202.
URL: <https://www.mdpi.com/2076-3263/8/6/202>
- Jin, H., Chen, X., Wu, P., Song, C. and Xia, W. (2021), 'Evaluation of spatial-temporal distribution of precipitation in mainland China by statistic and clustering methods', *Atmospheric Research* **262**, 105772.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809521003288>
- Kaltenberger, R., Schaffhauser, A. and Staudinger, M. (2020), "What the weather will do" – results of a survey on impact-oriented and impact-based warnings in European NMHSs', *Advances in Science and Research* **17**, 29–38.
URL: <https://asr.copernicus.org/articles/17/29/2020/>
- Ling, R. F. (1981), 'Cluster Analysis Algorithms for Data Reduction and Classification of Objects', *Technometrics* **23**(4), 417–418.
URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1981.10487693>
- McCarthy, P. (2007), Defining the impact of weather, Park City, Utah.
URL: https://ams.confex.com/ams/22WAF18NWP/techprogram/paper_123441.htm

- OMM (2015), Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y aviso multirriesgos que tienen en cuenta los impactos, Technical Report 1150, OMM, Ginebra.
URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/60078>
- OMM (2021), Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre los servicios de predicción y aviso de peligros múltiples que tienen en cuenta los impactos. Parte II: Aplicación práctica de los servicios de predicción y aviso de peligros múltiples que tienen en cuenta los impactos., Technical Report 1150, OMM, Ginebra.
URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/28286>
- Pascal, M., Laaidi, K., Ledrans, M., Baffert, E., Caserio-Schönemann, C., Le Tertre, A., Manach, J., Medina, S., Rudant, J. and Empereur-Bissonnet, P. (2006), 'France's heat health watch warning system', *International Journal of Biometeorology* **50**(3), 144–153.
URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00484-005-0003-x>
- Paton, D., Johnston, D. and Houghton, B. F. (1998), 'Organisational response to a volcanic eruption', *Disaster Prevention and Management: An International Journal* **7**(1), 5–13.
URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/09653569810206226/full/html>
- Potter, S., Harrison, S. and Kreft, P. (2021), 'The Benefits and Challenges of Implementing Impact-Based Severe Weather Warning Systems: Perspectives of Weather, Flood, and Emergency Management Personnel', *Weather, Climate, and Society* **13**(2), 303–314.
URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/13/2/WCAS-D-20-0110.1.xml>
- Rojas, Y. (2016), Eventos Extremos de Precipitación Diaria en Chile Central, Tesis (Geofísica), Universidad de Concepción, Concepción.
URL: https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2012/09/HP_YazminaRojas.pdf
- Uccellini, L. W. and Ten Hoeve, J. E. (2019), 'Evolving the National Weather Service to Build a Weather-Ready Nation: Connecting Observations, Forecasts, and Warnings to Decision-Makers through Impact-Based Decision Support Services', *Bulletin of the American Meteorological Society* **100**(10), 1923–1942.
URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/100/10/bams-d-18-0159.1.xml>
- Valenzuela, R. A. and Garreaud, R. D. (2019), 'Extreme Daily Rainfall in Central-Southern Chile and Its Relationship with Low-Level Horizontal Water Vapor Fluxes', *Journal of Hydrometeorology* **20**(9), 1829–1850.
URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JHM-D-19-0036.1>
- Viale, M. and Garreaud, R. (2015), 'Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **120**(10), 4962–4974.
URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JD023014>
- 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.
URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JHM-D-18-0006.1>

7 Anexos

A Delimitación espacial

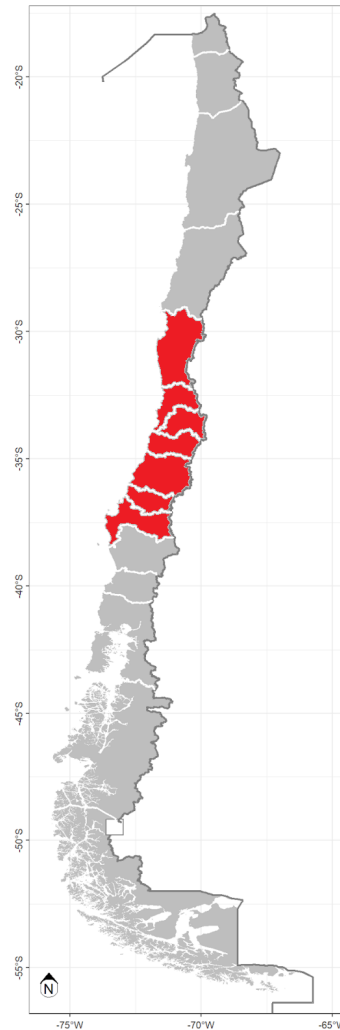


Figura A. Delimitación espacial de la zona de estudio, la cual considera las regiones marcadas en rojo, correspondientes a (de norte a sur): Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío.

B Mapa de estaciones utilizadas

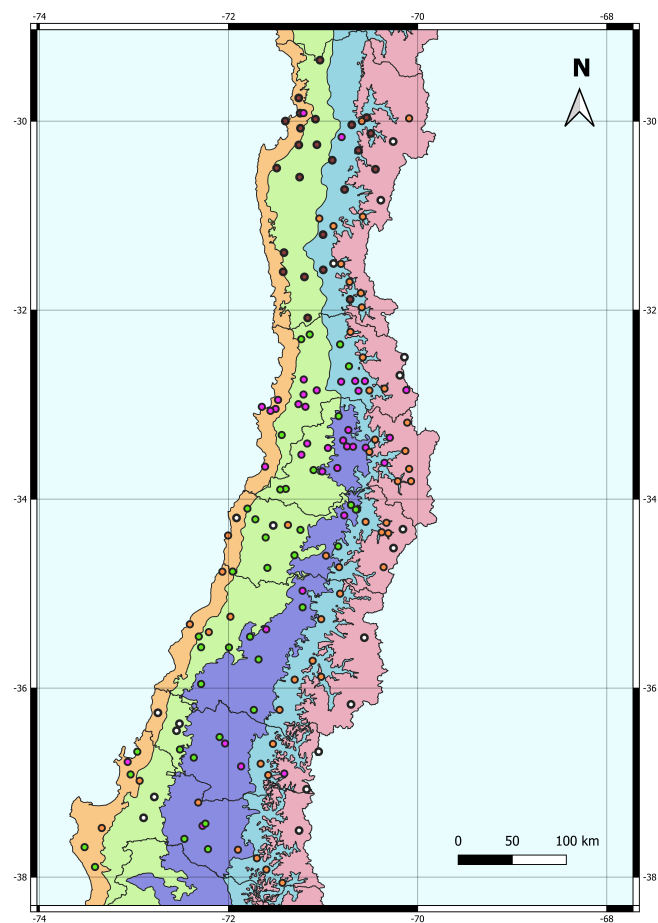


Figura B. Estaciones con registros pluviométricos utilizadas en el estudio. Los puntos de color café corresponden a estaciones que son administradas por CEAZA; los fucsias, a DMC; los naranjos, a DGA; los verdes, a AGROMET; y los blancos, a datos sintéticos obtenidos del ERA5. En el mapa se presentan las divisiones geopolíticas a nivel regional (líneas negras zigzagueantes-horizontales). Las divisiones a nivel de macrozonas geográficas se marcan con colores en donde la cordillera corresponde al color magenta; precordillera, al celeste; depresión intermedia, al morado; cordillera de la costa, al verde; y litoral, al naranja. Las macrozonas geográficas están en base a [DMC \(2022\)](#).

C Variables seleccionadas para análisis de clúster

Tabla C. Variables asociadas a eventos que se consideraron en la generación de grupos.

Parámetro	Unidad
Duración	horas
Latitud de estación con máxima pp ¹	°(grados)
Latitud inicial del evento (primer monto de pp)	°(grados)
Latitud final del evento (último monto de pp)	°(grados)
Máximo de precipitación en 6 horas	mm
Distancia recorrida de sur a norte	km

¹ precipitación

D Variables seleccionadas para clasificación

Tabla D. Variables seleccionadas a través del índice de GINI (en el método de “randomForest”) y por el juicio experto (meteorólogo) para el proceso de clasificación. Las variables son representativas de eventos precipitación de cada macrozona de las regiones, encontrados en el periodo 2015-2022.

Parámetro	Valor	Unidad
Precipitación en 6 horas	máximo	mm
Agua precipitable	promedio	mm
Altura de la isoterma 0°C	mínimo y máximo	m
Anomalía de geopotencial en 500 hPa	mínimo	mgp
Anomalía de espesor en 1000 y 500 hPa	mínimo	mgp
Presencia o ausencia de ríos atmosféricos ¹	“Sí” o “No”	valor categórico
Valor de IVT en el punto donde toca tierra ¹	máximo	kg/ms

¹ Según método de Viale et al. (2018).

E Impactos por cada clúster

Tabla E. Resumen de los diferentes grupos de eventos de precipitación en cuanto a su cantidad total, la cantidad específica que generó impacto, los impactos totales registrados, y el número de Alarmas, de Alertas y de Avisos. Se destacan en negrita los valores del clúster 3.

Clúster	Eventos de precip.	Eventos que generaron impactos	Impactos	Alarmas	Alertas	Avisos
1	306	3	3	1	1	1
2	375	10	32	2	17	13
3	147	70	1400	13	457	930
4	405	7	34	0	2	32

F Patrones sinópticos

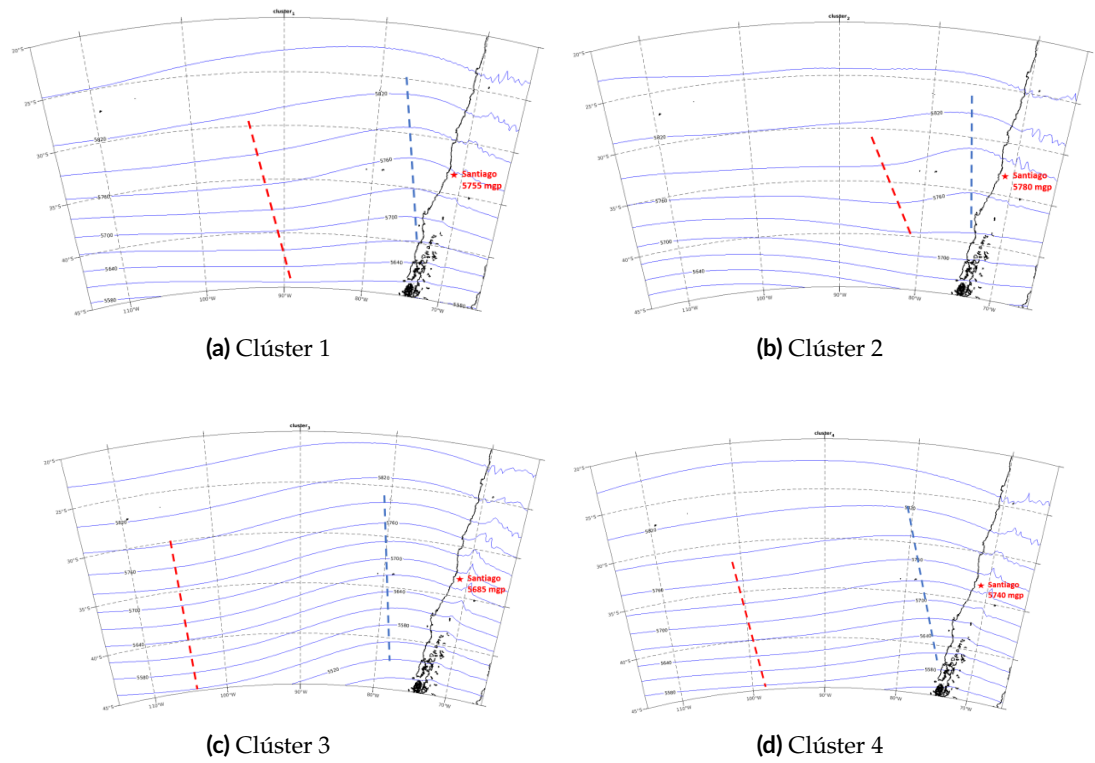


Figura F. Compuestos de altura geopotencial al nivel de 500 hPa para los 4 grupos presentes en la Figura 4. En cada panel (a, b, c y d), la línea segmentada azul corresponde al eje de vaguada; la roja, de dorsal; y la estrella roja, a la ubicación de Santiago junto con el valor promedio de altura geopotencial.

G Tabla de categorización de impactos en SAT de la DMC

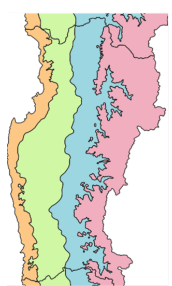
Tabla G. Categorización final de los impactos (de bases de datos de SENAPRED y SERNAGEOMIN) en los niveles del SAT de la DMC. Los impactos con doble asterisco (**), indican que no incluye impactos en la categoría de Alarma; y los impactos con un asterisco (*), no incluyen impactos en las categorías de Alerta y Alarma.

Tipo de impacto	Tipo de impacto		
	Aviso	Alerta	Alarma
Aislados**			
Fallecidos			
Damnificados**			
Evacuados**			
Albergados**			
Desaparecidos			
Anegamiento**			
Inundación**			
Interrupción de suministro*			
Alteración o interrupción de conectividad*			
Alteración a la infraestructura*			
Daños a la biodiversidad*			
Desborde**			
Aumento de caudal**			
Remoción en masa**			

H Tablas con umbrales de las variables preponderantes para cada región y macrozona

Tablas con los umbrales de las distintas variables entregadas por los árboles de decisión, considerando cada región y sus respectivas macrozonas.

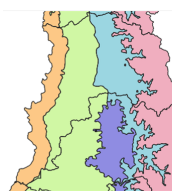
Región de Coquimbo



	SAT	máx_6h	pw_mean	Iso_0_máx	lf_ivt_máx
Cordillera	Aviso	> 3			≥ 844
	Alerta	> 11		≥ 3031	
	Alarma	> 16			
Pre cordillera	Aviso	> 8	≥ 21		
	Alerta	> 28		> 2734	
	Alarma	> 31			> 885
Cordillera de la Costa	Aviso	> 15			
	Alerta	≥ 17	> 14		
	Alarma	≥ 17			
Litoral	Aviso	≥ 15		≥ 1931	
	Alerta	≥ 14	≥ 26		
	Alarma	≥ 17			

(a) Región de Coquimbo

Región de Valparaíso

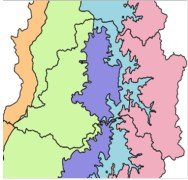


	SAT	máx_6h	pw_mean	Iso_0_mín	Iso_0_máx	g500_mín	lf_ivt_máx
Cordillera	Aviso	≥ 5	≥ 25				
	Alerta	≥ 15					
	Alarma	≥ 18				< 5556	
Pre cordillera	Aviso	≥ 7					≥ 556
	Alerta	≥ 21			< 2844	> 5537	
	Alarma	≥ 30					
Cordillera de la Costa	Aviso	> 10	≥ 19	< 1554			
	Alerta	≥ 23		≥ 1588			
	Alarma	≥ 31					
Litoral	Aviso	≥ 12		≥ 1553			
	Alerta	≥ 24	≥ 34				
	Alarma	≥ 36					

(b) Región de Valparaíso

Figura H.1. Valores de umbrales de todas las variables consideradas por los árboles de decisión para la obtención de Avisos, Alertas y Alarmas para: Región de Coquimbo (a), y Región de Valparaíso (b), junto al mapa con las macrozonas por cada región. En color rosado se aprecia la cordillera; en celeste, la precordillera; en verde, la cordillera de la costa; y en naranja, el litoral. En las tablas, “máx_6h” corresponde al valor máximo de precipitación en 6 horas; “pw_mean”, al agua precipitable promedio; “Iso_0_mín”, a la altura mínima de la isoterma 0°C; “Iso_0_máx”, a la altura máxima de la isoterma 0°C; “g500_mín”, a la altura mínima de geopotencial en 500 hPa; y “lf_ivt_máx”, al valor máximo de IVT en el punto donde toca tierra el río atmosférico.

Región Metropolitana



	SAT	máx_6h	pw_mean	Iso_0_mín	g500_mín	thick_min	lf_ivt_máx
Cordillera	Aviso	> 7	≥ 31				
	Alerta	> 20	≥ 32				
	Alarma	> 28	≥ 32				≥ 532
Pre cordillera	Aviso	≥ 13					
	Alerta	≥ 21		< 1007			
	Alarma	≥ 29				≥ 5461	
Depresión Inter media	Aviso	> 10					
	Alerta	≥ 18	≥ 28				
	Alarma	≥ 15		< 891			
Cordillera de la Costa	Aviso	≥ 15			< 5497		
	Alerta	≥ 17	≥ 34			≥ 5514	
	Alarma	≥ 28					

(a) Región Metropolitana

Región Gral. Libertador Bernardo O'Higgins



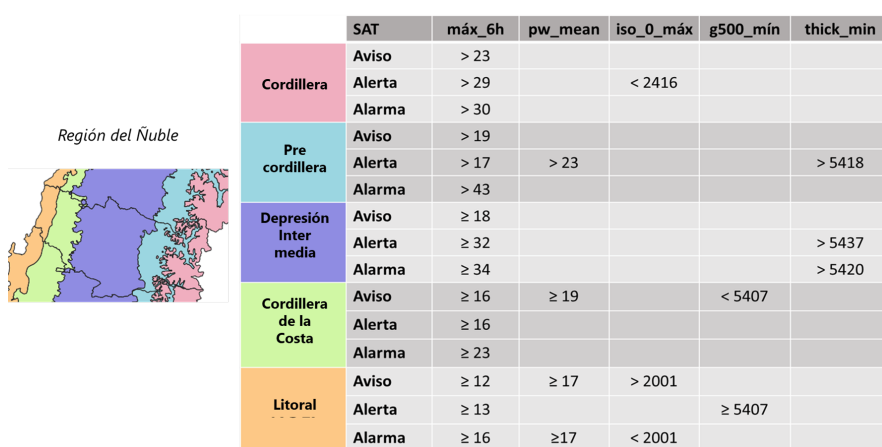
	SAT	máx_6h	pw_mean	Iso_0_mín	Iso_0_máx	g500_mín	thick_min	lf_ivt_máx
Cordillera	Aviso	≥ 15		< 2073		≥ 5556		
	Alerta	≥ 32	≥ 20					
	Alarma	≥ 37						
Pre cordillera	Aviso	≥ 9	≥ 27					
	Alerta	≥ 37						
	Alarma	≥ 33		< 1724				
Depresión Inter media	Aviso	≥ 15	≥ 14					
	Alerta	≥ 15					≥ 5460	
	Alarma	≥ 21	≥ 32					
Cordillera de la Costa	Aviso	≥ 12					≥ 5451	
	Alerta	≥ 23	≥ 27				≥ 5451	
	Alarma	≥ 25						
Litoral	Aviso	> 16			> 3058	> 5594		
	Alerta	> 18			> 3058	< 5594		
	Alarma	> 26						> 728

(b) Región del Libertador Bernardo O'Higgins

Figura H.2. Valores de umbrales de todas las variables consideradas por los árboles de decisión para la obtención de Avisos, Alertas y Alarmas para: Región Metropolitana (a) y Región de O'Higgins (b), junto al mapa con las macrozonas por cada región. En color rosado se aprecia la cordillera; en celeste, la precordillera; en morado, la depresión intermedia; en verde, la cordillera de la costa; y en naranja, el litoral. En las tablas, "máx_6h" corresponde al valor máximo de precipitación en 6 horas; "pw_mean", al agua precipitable promedio; "Iso_0_mín", a la altura mínima de la isoterma 0°C; "Iso_0_máx", a la altura máxima de la isoterma 0°C; "g500_mín", a la altura mínima de geopotencial en 500 hPa; "thick_mín", al espesor mínimo entre 1000 y 500 hPa; y "lf_ivt_máx", al valor máximo de IVT en el punto donde toca tierra el río atmosférico.



(a) Región del Maule



(b) Región del Ñuble

Figura H.3. Valores de umbrales de todas las variables consideradas por los árboles de decisión para la obtención de Avisos, Alertas y Alarmas para: Región del Maule (a) y Región del Ñuble (b), junto al mapa con las macrozonas por cada región. En color rosado se aprecia la cordillera; en celeste, la precordillera; en morado, la depresión intermedia; en verde, la cordillera de la costa; y en naranja, el litoral. En las tablas, “máx_6h” corresponde al valor máximo de precipitación en 6 horas; “pw_mean”, al agua precipitable promedio; “Iso_0_mín”, a la altura mínima de la isoterma 0°C; “Iso_0_máx”, a la altura máxima de la isoterma 0°C; “g500_mín”, a la altura mínima de geopotencial en 500 hPa; “lf_ivt_máx”, al valor máximo de IVT en el punto donde toca tierra el río atmosférico; y “thick_mín”, al espesor mínimo entre 1000 y 500 hPa.

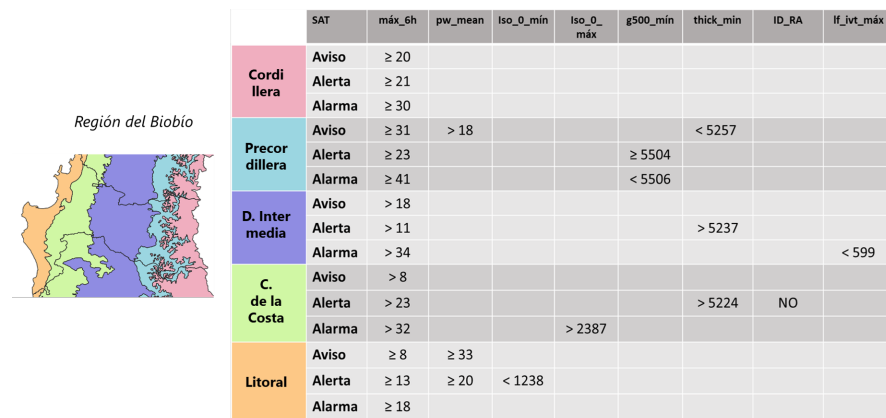


Figura H.4. Valores de umbrales de todas las variables consideradas por los árboles de decisión para la obtención de Avisos, Alertas y Alarmas para la Región del Biobío, junto al mapa con las macrozonas por cada región. En color rosado se aprecia la cordillera; en celeste, la precordillera; en morado, la depresión intermedia; en verde, la cordillera de la costa; y en naranja, el litoral. En la tabla, “máx_6h” corresponde al valor máximo de precipitación en 6 horas; “pw_mean”, al agua precipitable promedio; “Iso_0_min”, a la altura mínima de la isoterma 0°C; “Iso_0_máx”, a la altura máxima de la isoterma 0°C; “g500_min”, a la altura mínima de geopotencial en 500 hPa; “thick_min”, al espesor mínimo entre 1000 y 500 hPa; “ID_RA”, indicador de la presencia o ausencia de un río atmosférico; y “If_ivt_máx”, al valor máximo de IVT en el punto donde toca tierra el río atmosférico.