

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

OCURRENCIA Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ALUVIONES EN CHILE

SANTIAGO MONTSERRAT M.^{1*}
ALEX GARCÉS C.¹
MARCIA PAREDES A.¹
HECTOR JIMENEZ¹
MIGUEL LAGOS-ZUÑIGA.^{1,2}
SOFÍA REBOLLEDO³
MARISOL LARA³
CATALINA JEREZ-TOLEDO¹
DAVID SILVA⁴

RESUMEN

Los eventos aluvionales de las últimas décadas, en particular los ocurridos en las zonas áridas y semiáridas del país, han generado un aumento de la percepción del riesgo aluvional tanto en la población como en las autoridades. Esto se asocia en gran medida a las grandes pérdidas económicas y de vidas humanas tras cada evento. En este trabajo se presenta una mirada general e integral de la ocurrencia y características de los aluviones registrados en Chile, en base a una recopilación de información de eventos de remoción en masa, de libre acceso, realizado por SERNAGEOMIN (SNGM). El análisis se basa principalmente en las características de la precipitación, principal desencadenante de aluviones en el país, la geomorfología, el clima y las características morfológicas e hidrológicas de las cuencas asociadas a cada evento. Los eventos registrados quedan sesgados a una mayoría de ocurrencia reciente, concentrados en las zonas áridas y semiáridas del país, y principalmente en o cercanos a zonas habitadas. Esto se traduce en una posible subestimación de eventos en algunas zonas, en particular en la zona sur, y de eventos de alto periodo de retorno (los que pueden no estar representados en el catastro).

¹ Investigador/a Asociado/a, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile.

² Tesista Doctoral, Center for Climate and Resilience Research (CR)2, Universidad de Chile.

³ Académica, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

⁴ Ingeniero Civil, Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM), Universidad de Chile

*santiago.montserrat@amtc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El continuo aumento de la población ha obligado a residir en zonas cada vez más expuestas a peligros naturales, siendo un ejemplo las zonas montañosas susceptibles a la ocurrencia de aluviones; esto es particularmente relevante en Chile, donde los sistemas de montaña abarcan cerca del 63,8% del territorio nacional (FAO, 2012). En estas zonas, la población prefiere asentarse en conos aluviales debido a sus pendientes más suaves, lo cual facilita la construcción de viviendas y el desarrollo de actividades como la agricultura y la industria. Además, estos lugares suelen ofrecer cierta seguridad ante crecidas e inundaciones de baja a moderada intensidad (periodo de retorno; Garcés et al., 2022; Jakob, 2021). Sin embargo, los conos aluviales pueden verse significativamente alterados por eventos aluvionales, ya que tienen un rol activo en amortiguar o transferir la señal de sedimentos desde las quebradas a otros cauces de mayor envergadura (Garcés et al., 2022).

En la última década, ha existido un aumento en la percepción de la recurrencia aluvional en el país. Esto se atribuye, principalmente, a la ocurrencia de varios aluviones relacionados con un reducido número tormentas en zonas áridas y semiáridas (latitudes -17° al -33°). Además, se han registrado eventos aislados, pero de gran magnitud, en la zona sur, como los lahares de Chaitén en 2008 (Major & Lara, 2013) y el aluvión de Santa Lucía en 2017, en Palena (SNGM, 2018; Sepúlveda et al, 2021). Estos sucesos han resultado en mermas económicas significativas y en la pérdida de vidas humanas (SNGM, 2017; Wilcox et al., 2016). En particular, el evento de marzo de 2015, que abarcó desde el norte de la región de Coquimbo hasta la región de Antofagasta, generó un cambio sustancial en la percepción del riesgo aluvional por parte de las autoridades, lo cual promovió e impulsó la realización de una serie de estudios de riesgo y mitigación a través de licitaciones y alianzas público-privadas.

En general, la mayoría de los estudios aluvionales en Chile se realizan de manera reactiva a eventos de gran connotación, como los aluviones de Antofagasta en 1991 (CRH-UCH, 1993), quebrada de Macul en 1993 (Garrido y Sepúlveda, 2012), lahares de Chaitén en 2008, Atacama en 2015 y 2017 (Wilcox et al., 2016; Cabre et al., 2020; Aguilar et al., 2020; Zegers et al. 2020, Garcés et al., 2022; Roldán et al., 2022), y el aluvión de Villa Santa Lucía en 2017. Además, existe un número creciente de publicaciones científicas enfocadas en estudiar las características de las tormentas (Barrett et al., 2016; Rutllant et al., 2023), los desencadenantes (Morales et al., 2021) y las características de los flujos aluvionales y laháricos (Fustos-Toribio et al., 2021) en distintas zonas del país. Si bien estos estudios abarcan muchas de la distintas zonas geomorfológicas y climáticas de Chile, la información queda parcializada y asociada a cada zona y condiciones particulares del evento.

En este trabajo, realizado en conjunto con la Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas (DOH-MOP), y apoyado en el catastro de aluviones disponible en la página de Servicio Nacional de Geología y Minería (SNGM), se tiene por objetivo proporcionar una mirada integral de la problemática aluvional en Chile continental. Este análisis se basa principalmente en las características de la precipitación, el principal desencadenante de aluviones en el país, así como la geomorfología, clima y características morfológicas e hidrológicas de las cuencas asociadas. Si bien el estudio se basa en el análisis de variables simples, se espera que sirva de guía para orientar futuros estudios o proyectos relacionados con la problemática aluvional.

2. ALUVIONES OCURRIDOS EN CHILE

El principal y más completo catastro de aluviones ocurridos en Chile es el elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SNGM), el cual registra 959 aluviones a nivel nacional detectados desde 1930 a la fecha. Para cada evento se presenta el tipo de proceso, su ubicación (coordenadas y/o referencias cercanas) y la fuente de información (cita o enlace para consulta en línea); el año y temporada de ocurrencia (verano, otoño, primavera, invierno). El detonante del evento se presenta solo en los casos con más información. Del total de registros, el 84% de los flujos son desencadenados por lluvias, 12% no presenta información y los restantes corresponden a otros tipos de desencadenantes (erupción volcánica, deshielo, sismo, inundación por desbordes de lagos glaciares). De los flujos desencadenados por lluvias, la mayoría tienden a ocurrir durante las temporadas de verano y otoño.

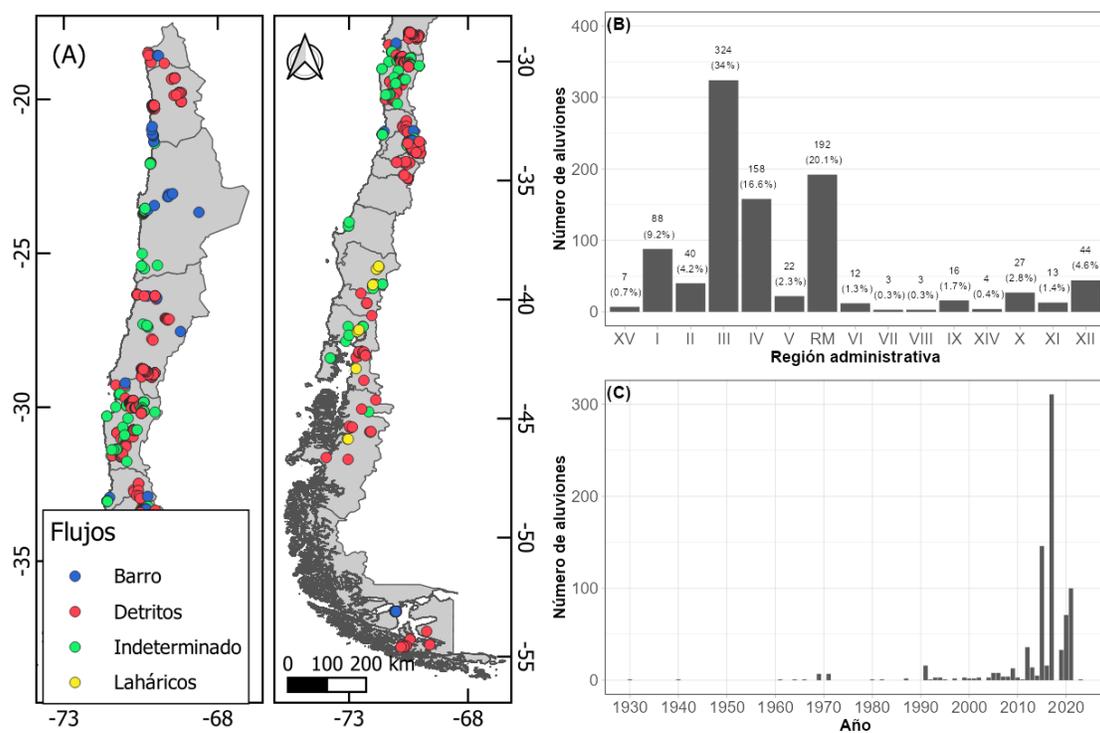


Figura 1: Aluviones catastrados en Chile por SNGM. (A) Distribución espacial de aluviones catastrados, (B) número de eventos aluvionales catastrados por región administrativa, y (C) número de eventos catastrados por año

Como se observa en la Figura 1.C, la cantidad de eventos catastrados aumenta considerablemente a partir de la década de 2010, particularmente después de la tormenta de marzo de 2015 la cual desencadenó numerosos aluviones desde la región de Antofagasta (II) hasta el límite norte de la región de Coquimbo (IV). A estos le suceden los eventos de 2017 en el centro norte (Metropolitana a Coquimbo), así como los eventos de 2019 en la región de Antofagasta y los eventos del verano de 2021 que afectaron principalmente a la región Metropolitana y sus alrededores. Si bien existe una percepción de aumento en la recurrencia aluvional en las últimas décadas, que a menudo se atribuye al cambio climático, el aumento de puntos catastrados podría estar más relacionado con la densidad poblacional, ya que los

registros se concentran en zonas habitadas, y con la capacidad de monitoreo de los distintos servicios públicos.

Respecto a la distribución espacial de los eventos (Figura 1.B), la región de Atacama concentra casi un tercio de los eventos (III, 34.0%), seguido por la región Metropolitana (RM, 20.1%), Coquimbo (IV, 16.6%), Tarapacá (I, 9.2%) y Antofagasta (II, 4.2%). Es decir, todas regiones áridas y semiáridas ubicadas en la mitad norte del país, con eventos aluvionales asociados principalmente a las pocas tormentas identificadas en el párrafo anterior. En el sur destaca la región de Magallanes (XII, 4.6%) en su mayor parte debido a los aluviones catastrados en el río Las Minas, a la entrada de la ciudad de Punta Arenas, asociados en gran parte a recurrentes deslizamientos originados en laderas de la cuenca.

Los datos anteriores pueden parecer paradójicos o contraintuitivos en relación con el régimen de precipitaciones en Chile, el cual aumenta considerablemente hacia el sur del país. Sin embargo, los eventos de tormenta en las zonas áridas y semiáridas parecieran estar más correlacionados con la ocurrencia de aluviones que en la zona sur. Lo anterior podría estar relacionado con las características particulares de las tormentas, con las características geológicas y geomorfológicas, con el espesor y tipo de coberturas de suelo, o con la disponibilidad de sedimentos a ser movilizados.

Por ejemplo, en la mitad norte del país, donde predominan laderas con escasa vegetación, los flujos aluvionales se asocian principalmente a procesos de erosión, deslizamientos superficiales y escorrentía en laderas con gran disponibilidad de sedimentos, siendo los flujos limitados por transporte (no por disponibilidad). Hacia el sur (con excepción de algunos flujos laháricos), los flujos en general se asocian a otros procesos de remoción en masa iniciales, como deslizamientos superficiales, que en estos casos incluyen tanto la capa vegetal, como parte del suelo residual, además de la vegetación existente, y otros deslizamientos más profundos que incorporan incluso volumen importante de roca usualmente meteorizada, lo que genera volúmenes movilizados importantes (ej. aluvión de Santa Lucía). En estos casos, los flujos estarían limitados por disponibilidad de sedimentos, y no por capacidad de transporte.

3. LLUVIAS EXTREMAS

Dado que las lluvias extremas constituyen el principal factor desencadenante de aluviones en Chile, se torna esencial investigar sus magnitudes y distribución. Si bien la ocurrencia de aluviones puede estar asociada a lluvias intensas y de corta duración, en función de los datos disponibles y escala espacial del análisis (todo el país), se utiliza como variable característica la precipitación líquida máxima diaria anual (P_{max}). Para esto, se utilizó como fuente de información sobre precipitaciones y temperaturas diarias el producto grillado meteorológico CR2MET v2.0 (resolución espacial 0.05°) que abarca la totalidad del territorio chileno continental (Boisier et al., 2018). Verificaciones de CR2MET con respecto a datos de estaciones realizadas por este grupo muestran sesgos significativos en algunas zonas con poca o nula densidad de estaciones meteorológicas utilizadas para la construcción del producto, como por ejemplo en cordillera. Sin embargo, se estima que el producto es suficiente dada la escala espacial de este análisis.

Para cada celda de la grilla de CR2MET se estimó la precipitación líquida diaria, la que, considerando la escala espacial del análisis y de manera referencial, fue definida como aquella precipitación ocurrida con una temperatura media diaria mayor que 0°C (es decir, bajo la isoterma cero), obteniendo una serie de precipitaciones líquidas diarias y máximas anuales en cada celda de la grilla en el periodo 1985-2020. A través de un análisis de frecuencia estacionario de las series de precipitaciones máximas, se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 2: A) P_{max}^{50} , precipitación máxima diaria anual para 50 años de periodo de retorno, representativa de la magnitud de una lluvia extrema; B) fP_{yy} , correspondiente a la razón promedio entre la lluvia máxima anual y lluvia anual; y C) el coeficiente de partición estacional de las precipitaciones, el cual indica en que semestre del año ocurren los eventos de precipitación de mayor magnitud. Se calcula a través de la diferencia normalizada entre la partición de la precipitación máxima de verano/primavera en la lluvia total de verano/primavera y la razón de la precipitación máxima de invierno/otoño en la lluvia total de invierno/otoño.

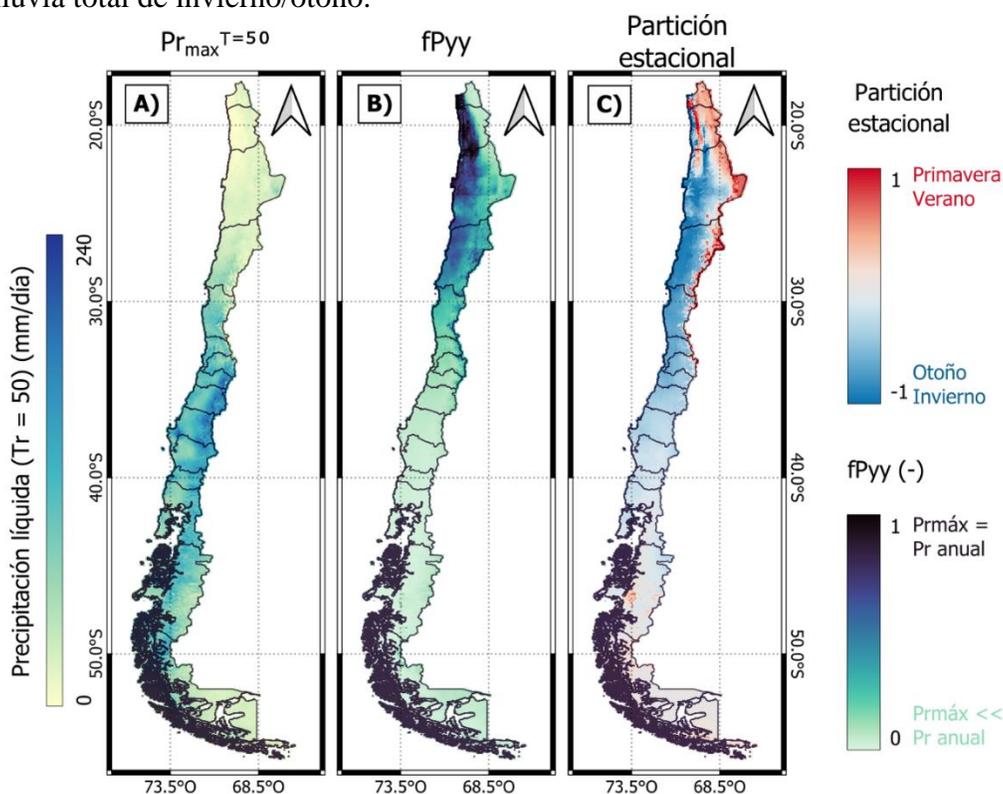


Figura 2: Características de las precipitaciones máximas diarias líquidas en Chile durante 1985-2020. A) precipitación máxima para 50 años de periodo de retorno (P_{max}^{50}), B) porcentaje de la precipitación líquida máxima promedio respecto a la precipitación líquida anual (fP_{yy}), C) índice representativo de la estacionalidad de las precipitaciones líquidas máximas.

Como es de esperar, las precipitaciones máximas anuales (P_{max}^{50}) tienden a ser más bajas en la zona norte del país, alcanzando apenas unos 5 (mm) en la costa y valle (Figura 2.A); la P_{max}^{50} tiende a ser mayor en la cordillera, en particular en la cordillera de Antofagasta, alcanzando lluvias diarias máximas de ~20 (mm). Avanzando hacia el sur de la región de Atacama, las lluvias máximas comienzan a aumentar, siendo máximas en la cordillera de la

zona central y centro sur (Metropolitana a Araucanía), con valores por sobre los 100-150 (mm). En el sur y zona austral, las lluvias tienden a concentrarse en la costa, siendo considerablemente más bajas en la zona de la cordillera y el límite con Argentina (Tierra del Fuego).

A pesar de la baja magnitud, la lluvia máxima anual en las zonas norte y centro norte puede llegar a representar una parte significativa del total de la lluvia caída en el año (Figura 2.B). En la zona costera del extremo norte (latitudes -17° a -27°), la lluvia máxima anual puede representar más del 70%, y hasta cerca del 100%, de la precipitación caída en el año. En la zona de la cordillera, y hasta la región de O'Higgins, las lluvias máximas anuales siguen siendo relevantes, alcanzando valores entre 10% y 30%. En la macrozona sur, las lluvias máximas anuales son casi indistinguibles respecto de la lluvia anual (<1% a 10%). De esta manera, y a pesar de su menor magnitud, las tormentas en el norte tienden a ser "más extremas" que en el sur cuando se comparan con el total de precipitaciones.

Por último, la Figura 2.C muestra la estacionalidad de las lluvias respecto a sus magnitudes en los meses de verano/primavera e invierno/otoño. Como es de esperar, gran parte de la cordillera entre la macrozona norte y las mayores elevaciones en la región Metropolitana concentran la ocurrencia de lluvias máximas en los meses de verano y primavera (valores positivos). Esto se debe a que las precipitaciones líquidas ocurren cuando la línea de nieves es alta en comparación con las elevaciones que presenta la cordillera en estas regiones del país. En la zona costera de las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá (y parte de Antofagasta), las lluvias máximas también se concentran predominantemente hacia el verano. En el resto de la zona norte y hasta la parte norte de la región del Ñuble, las lluvias máximas se concentran en invierno, mientras que hacia el sur no existe un comportamiento definido.

4. ZONIFICACIÓN GEO-HIDROCLIMÁTICA

Como se desprende de los análisis en las secciones 1 y 2, la gran diversidad de climas y características geomorfológicas a lo largo de Chile son un desafío para la aplicación de metodologías para caracterizar el comportamiento y generación de eventos aluvionales. Por ello, se realizó un análisis por divisiones del territorio denominadas como zonas geo-hidroclimáticas, las cuales fueron determinadas a través de una clasificación según atributos geomorfológicos y climáticos a través del algoritmo de clusterización *k-means* (Lloyd, 1982; MacQueen, 1967). Este proceso de clustering utilizó información procedente de unidades geomorfológicas (Figura 3.A), climas de Köppen en Chile (Figura 3.B; Köppen y Geiger, 1936), P_{max}^{50} (Figura 2.A), rango de elevación (según celdas de CR2MET), elevación media en la celda, temperatura media en eventos extremos y el coeficiente de partición estacional (Figura 2.C).

Utilizando el algoritmo *k-means* y criterio experto, se determinó un total de nueve zonas geo-hidroclimáticas (ZGC, Figura 4). La distribución de las ZGC es coherente con la delimitación de climas y geomorfología del país, así como también con las características de las lluvias extremas antes analizadas. La descripción de cada macrozona se presenta en la tabla de la Figura 4.

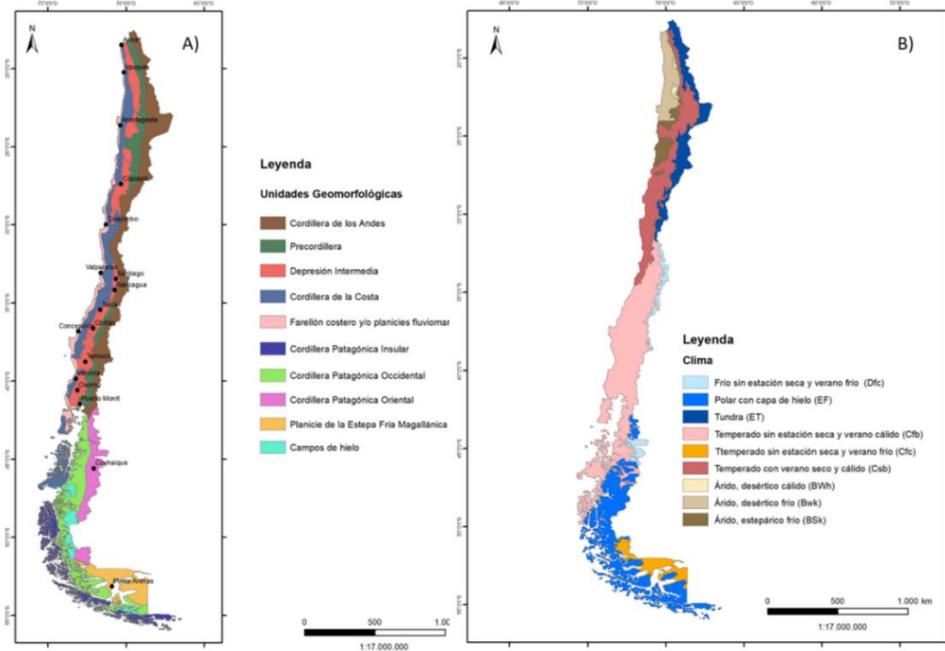


Figura 3: A) Unidades geomorfológicas de Chile continental, modificado del mapa de geomorfología de Chile, IGM (2007). B) Clasificación de climas en Chile elaborado según criterio de Köppen. Se distinguen tres climas principales: grupo B (climas áridos), grupo C (climas templados), y grupo E (climas polares).

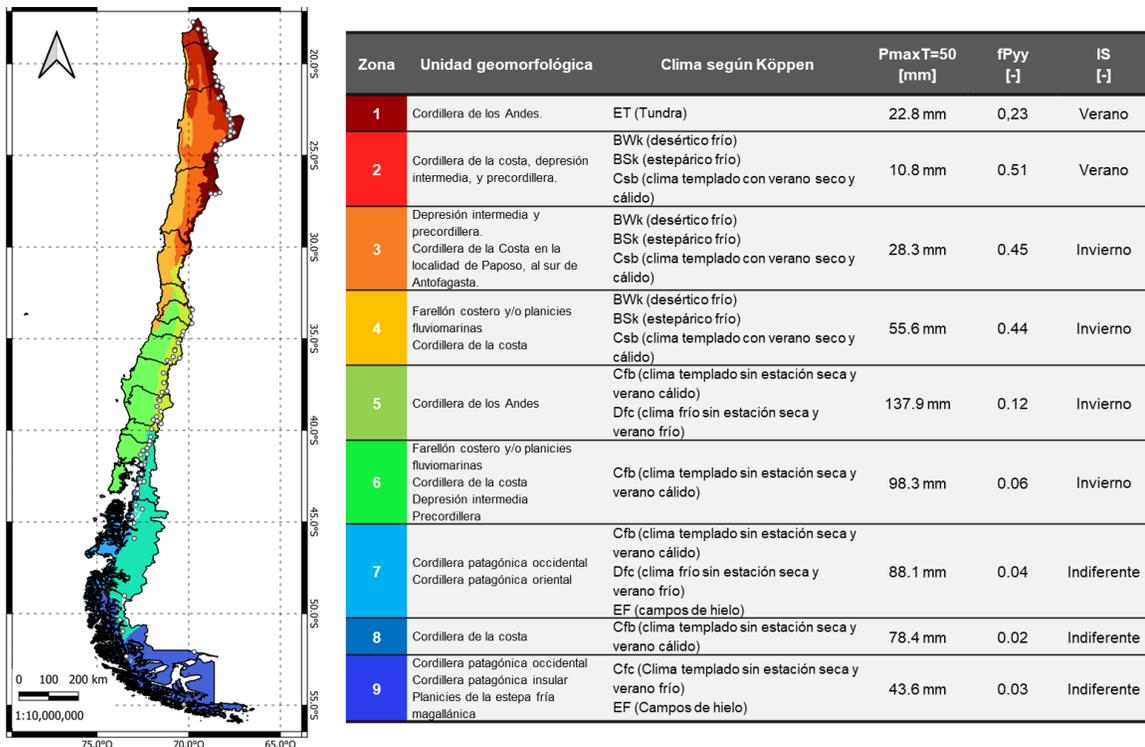


Figura 4: Resultado y descripción de zonas geo-hidroclimática (ZGH) para orientar estudios aluvionales en Chile continental. Los círculos indican la ubicación de los volcanes activos a lo largo del país.

5. CARACTERÍSTICAS HIDROMORFOLÓGICAS DE QUEBRADAS ALUVIONADAS SEGÚN ZGC.

Con base a un DEM SRTM de $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ de resolución (<https://www.earthdata.nasa.gov/>), se estudiaron las características morfológicas e hidrológicas de quebradas aluvionadas en cada una de las ZGC. Para cada aluvión dentro del catastro, se delimitó la cuenca aportante mediante el desarrollo de un algoritmo GIS, en el cual se acerca la coordenada asignada al aluvión al cauce más cercano de una red hidrológica, definiéndose como la salida de la cuenca. Dado que la ubicación de los aluviones en el catastro no es siempre exacta, sólo fue posible delimitar 291 cuencas, equivalente al 30% de eventos del catastro. Estas cuencas se encuentran concentradas en las zonas 3, 4 y 5 (asociados a las últimas tormentas en zonas áridas y semiáridas desde 2015); el resto de las ZGC presenta menos de cinco cuencas reconocidas, a excepción de la zona 9 con 11 cuencas (Figura 5). Para la caracterización de las quebradas y sus cuencas aportantes se calcularon los siguientes atributos:

- **Área (km^2):** área de la cuenca aportante de la quebrada donde ocurrió el aluvión en estudio.
- **Pendiente de la cuenca (m/m):** representa la pendiente media de la cuenca, obtenida como el promedio de las pendientes de todos los elementos del DEM que conforman la hoya hidrográfica aportante a la quebrada.
- **Densidad de drenaje (km^{-1}):** corresponde al cociente entre la suma de todos los tramos que conforman la red de drenaje y el área de la quebrada. Un valor alto de la densidad de drenaje indica que la cuenca posee una amplia red de cauces, por lo que su respuesta ante pulsos de precipitación debería ser rápida (ej.: 3.5 km^{-1}); por otro lado, un valor bajo corresponde a cuencas con una respuesta más lenta (ej.: 0.5 km^{-1}).
- **Índice de Melton (-):** corresponde a la razón entre el relieve de la cuenca (cota máxima menos cota mínima) y la raíz de su área. El índice se utiliza para diferenciar cuencas propensas a inundaciones (bajo índice de Melton) de aquellas donde dominan los eventos aluvionales (alto índice de Melton). Para distintas zonas alrededor del mundo, se han encontrado valores umbrales entorno a 0.3-0.6.
- **Elevación media (m.s.n.m.):** elevación promedio de la cuenca.
- **Largo del río principal (km):** suma de los tramos de cauce que componen la ruta cuya longitud entre los puntos de inicio y desembocadura dentro de la red de drenaje es máxima.
- **Pendiente del río principal (m/m):** pendiente media del río principal. Se calcula considerando sólo aquellas celdas del DEM que componen la ruta del río principal.
- **Tiempo de concentración (min):** tiempo requerido por una parcela de agua en recorrer toda una cuenca hidrográfica, desde el punto hidráulico más lejano hasta el punto de salida aguas abajo.

- **Orden de Strahler (-):** número más alto de bifurcaciones en una sección de un sistema de drenaje de cauces, definiendo así la jerarquización y orden de un cauce, siendo el orden 1 un cauce de cabecera. Un cauce de alto orden está compuesto de varios tributarios.

Los resultados de la caracterización se observan en la Figura 5. Las quebradas aluvionadas tienden a ser pequeñas, con áreas normalmente por debajo de los 2 a 3 km². Las máximas áreas se registran en las ZGC 1 y 2, alcanzando apenas los 20 - 30 km². Estos límites coinciden con aquellos reportados en cuencas Alpinas en Europa (Rickenmman, 2016). En las ZGC 1 y 2 se observan algunas pocas cuencas que podrían llegar hasta cerca de los 100 km², pero que escapan a la tendencia. En cuanto a la elevación media, esta responde directamente a la zona geográfica descrita por cada ZGC. Destaca la ZGC 1, con elevaciones por sobre los 3000 m.s.n.m., donde normalmente se espera la ocurrencia de nieve, lo que explicaría el bajo número de aluviones asociado a la zona.

En cuanto a las pendientes, tanto de la cuenca como del río principal, estas tienden a ser altas (> 10% - 20%), alcanzando máximos por sobre el 50%, probablemente asociado a cuencas pequeñas. Los largos de ríos tienden a ser pequeños, por debajo de los 2-5 km, con valores máximos entorno a los 10-15 km en las ZGC 2 y 9. Esto guarda relación con los tiempos de concentración, los que en general se mantienen bajo 30 minutos, con máximos cercanos a los 100 minutos en las ZGC 2 y 9. En cuanto al orden de Strahler, estos son mayoritariamente de orden 1, indicando que la gran mayoría son cuencas de cabecera. Las cuencas más grandes, asociado a las ZGC 1, 3 y 9, podrían alcanzar ordenes de hasta 3. La densidad de drenaje se mantiene por sobre los 3.5 - 4.0 km⁻¹, indicativo de que los caudales de crecidas en las cuencas responden rápido ante eventos de precipitación. Por último, los índices de Melton se encuentran por sobre el valor 0.3, límite normalmente propuesto en la literatura para diferenciar cuencas dominadas por inundaciones (< 0.3) de aquellas dominadas por aluviones (> 0.3). La excepción corresponde a las quebradas de la ZGC 9, asociadas a los aluviones del río Las Minas en Punta Arenas. Esto se debe a que los puntos del catastro de aluviones se encuentran en zonas de baja pendiente a la entrada de la ciudad, mientras que los aluviones en si están más relacionados con las cuencas de cabecera, donde se produce el aporte de material. De esta manera los flujos a la entrada de la ciudad estarían relacionados con crecidas líquidas con alto aporte de sedimentos o crecidas detríticas (*debris flood*), asociadas a menores índices de Melton.

En resumen, se puede concluir que las quebradas aluvionadas en Chile son principalmente cuencas pequeñas (<25 km²), orden de Strahler 1, de alta pendiente (>15%) y de rápida respuesta hidrológica ante eventos de lluvia (tiempos de concentración < 30 min y densidad de drenaje > 3.5 km⁻¹), lo que reduce la capacidad de amortiguar los máximos de crecida. Además, son dominadas por procesos aluvionales según el índice de Melton (> 0.3), el que tiende a representar de buena forma el límite entre dominio aluvional y fluvial. Sin embargo, estos resultados podrían estar sesgados por la mayoría de los eventos recientes registrados en el catastro de aluviones, el que daría cuenta mayoritariamente de eventos de alta recurrencia (bajos periodos de retorno). Por ello no se desacarta que en cuencas de mayor área y menor número de Melton (entre otros) también puedan ocurrir eventos de menor probabilidad de ocurrencia.

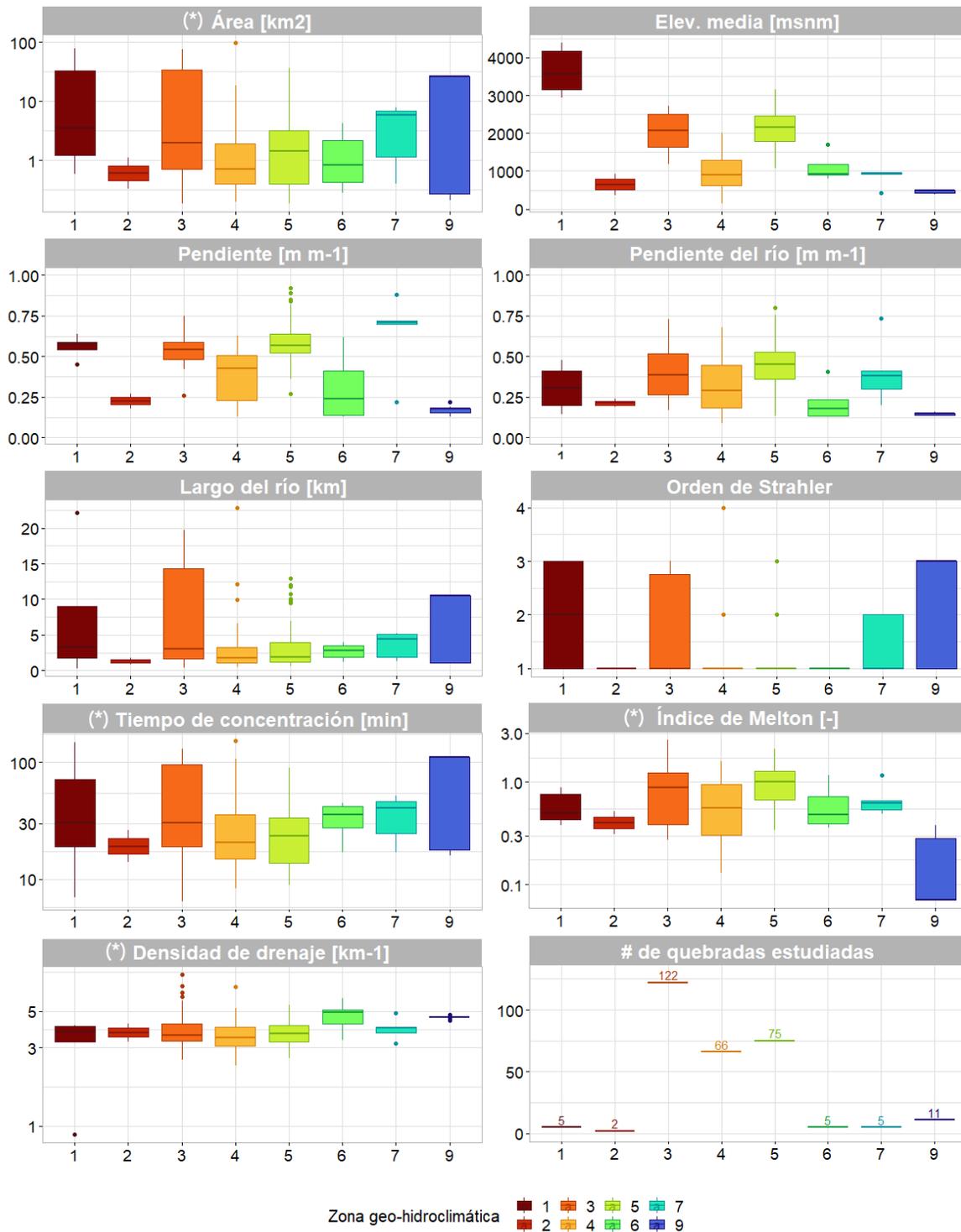


Figura 5: Caracterización morfológica e hidrológica de quebradas aluvionadas y cuencas aportantes según catastro y ZGC. Los asteriscos que acompañan el panel indican que la variable se encuentra graficada en escala logarítmica.

6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El catastro de aluviones desarrollado por SNGM entrega gran información sobre la ubicación y detonantes de eventos aluvionales observados. Sin embargo, la mayoría de estos eventos catastrados se concentran en la última década (2010-2020), asociado probablemente al aumento de la población y mayor ocupación de zonas montañosas susceptibles a la ocurrencia de aluviones, además de los mayores esfuerzos por recopilar datos luego de la ocurrencia de eventos de gran magnitud por parte de SNGM. Sin embargo, a juzgar por los registros de la última década, se puede concluir que la recurrencia aluvional a nivel país es alta. Según el mismo catastro, el detonante principal de aluviones es la ocurrencia de lluvias intensas (~84% del total catastrado).

Los aluviones recientes se concentran principalmente en zonas áridas y semiáridas, especialmente desde la Región Metropolitana hacia el norte. Estos eventos suelen relacionarse con tormentas intensas y relativamente cálidas, caracterizadas por cotas altas de la línea de nieves. Dada la gran disponibilidad de sedimentos (limitados por transporte), una única tormenta es capaz de generar múltiples aluviones. En contraste, en el sur, los aluviones, son más esporádicos y aislados, siendo poco común que una tormenta gatille múltiples eventos.

Esta aparente discrepancia podría explicarse, en parte, por la distribución de precipitaciones extremas en el país. Si bien estas tienden a ser significativamente mayores hacia el sur, los eventos de lluvias máximas son más recurrentes, a diferencia de la zona norte donde la lluvia máxima anual da cuenta de la mayoría de la precipitación de un año. Por ello, la ocurrencia de aluviones en el sur podría ser más dependiente de condiciones particulares de la lluvia (por ejemplo, intensidad/duración), así como de aspectos geológicos y geomorfológicos, como por ejemplo laderas empinadas asociadas a actividad glaciaria, ocurrencia de suelos volcánicos sueltos producto de erupciones recientes, depósitos de suelos volcánicos alterados, depósitos de remoción en masa, u otros (por ejemplo, incendios) que dejan disponible sedimentos a ser removidos.

Las características geomorfológicas y climáticas, así como la distribución, magnitud y temporalidad de las precipitaciones en el país, permiten dividir el territorio en macrozonas geo-hidroclimáticas con características comunes para la ocurrencia de aluviones. Estas ZGC podrían ser un buen insumo para guiar estudios aluvionales en el futuro. Respecto a las características morfológicas de las quebradas aluvionadas en las distintas ZGC, destaca la poca ocurrencia de aluviones en la ZGC 1, asociada a la alta cordillera de la zona norte y centro norte, donde se espera principalmente la ocurrencia de nevadas. Lo anterior podría cambiar significativamente producto del calentamiento global, aumentando la amenaza aluvional en esta zona.

En general, las quebradas aluvionadas y cuencas asociadas pueden ser catalogadas como cuencas de cabecera relativamente pequeñas (<20-30 km²), donde los caudales de crecida responden rápidamente a eventos de precipitación y dominadas por procesos aluvionales (alto número de Melton) por sobre procesos fluviales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, al Servicio Nacional de Geología y Minería y a la Universidad de Chile a través del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) y al Centro Avanzado de Tecnologías para la Minería (AMTC). También se agradece a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo por su financiamiento al proyecto AFB220002 y FONDEF ID22I10122.

REFERENCIAS

Aguilar, G., Cabré, A., Fredes, V. and Villela, B., 2020. Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: an assessment of the magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flow generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), pp.1247-1265.

Barrett, B.S., Campos, D.A., Veloso, J.V. and Rondanelli, R., 2016. Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(9), pp.4563-4580.

Cabré, A., Remy, D., Aguilar, G., Carretier, S. and Riquelme, R., 2020. Mapping rainstorm erosion associated with an individual storm from InSAR coherence loss validated by field evidence for the Atacama Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(9), pp.2091-2106.

Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile (CRH). 1993. Crecidas Súbitas y Corrientes de Detritos Ocurridos el 18 de junio de 1991 en Antofagasta, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

FAO. 2012. Diagnóstico de las montañas de Chile. https://www.fao.org/fileadmin/templates/mountain_partnership/doc/TCP_Andes/Diagnostico_Nacional_de_Montana_Version_editadapdf.pdf

Fustos-Toribio, I.J., Morales-Vargas, B., Somos-Valenzuela, M., Moreno-Yaeger, P., Muñoz-Ramírez, R., Rodríguez Araneda, I. and Chen, N., 2021. Debris flow event on Osorno volcano, Chile, during summer 2017: new interpretations for chain processes in the southern Andes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(10), pp.3015-3029.

Garcés, A., Zegers, G., Cabré, A., Aguilar, G., Tamburrino, A. and Montserrat, S., 2022. A modeling methodology to study the tributary-junction alluvial fan connectivity during a debris flow event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(2), pp.377-393.

Garrido, N. and Sepúlveda, S.A., 2012. Peligro de flujos de detritos en Quebrada de Macul, Región Metropolitana y propuestas de medidas de mitigación. In *Actas XIII Congreso Geológico Chileno* (pp. 1012-1014).

Köppen, W., & Geiger, G. 1936. Das geographische System der Klimate. Handbuch Der Klimatologie, 44. <https://doi.org/10.2307/200498>

MacQueen, J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability (Vol. 1, pp. 281–297). <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2173-6>

Major, J., Lara, L. E. 2013. Overview of Chaitén Volcano, Chile, and its 2008-2009 eruption. *Andean Geology*, 40(2): p. 196-215.

Morales, B., Lizama, E., Somos-Valenzuela, M.A., Lillo-Saavedra, M., Chen, N. and Fustos, I., 2021. A comparative machine learning approach to identify landslide triggering factors in northern Chilean Patagonia. *Landslides*, 18(8), pp.2767-2784.

Lloyd, S. 1982. Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(2), 129–137. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>

Rickenmann, D., 2016. Methods for the quantitative assessment of channel processes in torrents (steep streams). CRC Press.

Roldán, F., Salazar, I., González, G., Roldán, W., & Toro, N. 2022. Flow-Type Landslides Analysis in Arid Zones: Application in La Chimba Basin in Antofagasta, Atacama Desert (Chile). *Water*, 14(14), 2225.

Rutllant, J.A., Matus, F., Rudloff, V. and Rondanelli, R., 2023. The role of atmospheric rivers in rainfall-induced landslides: A study from the Elqui valley. *Journal of Arid Environments*, 216, p.105016.

Sernageomin. 2017. Principales desastres ocurridos desde 1980, Ministerio de Chile, p. 45. <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>.

Sernageomin. 2018. Origen y efectos de remoción en masa del 16.12.2017 que afectó la localidad de Villa Santa Lucía, comuna de Chaitén, Región de Los Lagos. Informe Técnico.

Wilcox, A. C., Escarriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otárola, S., Castro, L., Gironás, J., Cienfuegos, R., and Mao, L. 2016 An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8035–8043, <https://doi.org/10.1002/2016GL069751>, 2016.

Zegers, G., Mendoza, P.A., Garces, A. and Montserrat, S., 2020. Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), pp.1919-1930.