

EVENTO

Inundaciones 21-26 junio 2023

Cuenca Río Maipo

Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres



INFORME POST DESASTRE

EVENTO:

Inundaciones 21-26 junio 2023
Cuenca Río Maipo

AUTORES:

Análisis y Datos Desembocadura Río Maipo

Carolina Martínez, Valentina Acuña, Nikole Guerrero, Simón Inzunza, Jorge Qüense, Malcom Bonet, Yvonne Merino, Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN.

Colaboradores externos: Moisés Villarroel, Universidad de Chile; Nicolás Pérez, Paola Peña, Universidad de Heidelberg; Javiera Zúñiga.

Análisis y Datos Cuenca Alta Río Maipo y Descripción de la Amenaza

Francisca Roldán (realización del informe y jefa de terreno); **Francisca Aguirre & Waldo Quiroz** (equipo de apoyo en terreno); **Ivania Arenas** (apoyo en edición de imágenes).
Universidad Católica del Norte & CIGIDEN.

Análisis del Daño a la Red Vial Cuenca Alta Río Maipo

Alondra Chamorro & Manuel Contreras, Pontificia Universidad Católica de Chile & CIGIDEN

EDICIÓN

Leila Juzam Pucheu (leila.juzam@cigiden.cl), CIGIDEN
Katherine Campos Knothe (kvcampos@uc.cl), CIGIDEN

DISEÑO

Sebastián Saldaña Aguilera (hola@sebastiansaldana.cl)

FOTOGRAFÍA PORTADA

Francisca Roldán, CIGIDEN

CIGIDEN, septiembre 2023

INFORME POST DESASTRE

EVENTO

Inundaciones 21-26 junio 2023
Cuenca Río Maipo

INFORME POST DESASTRE

EVENTO

Inundaciones 21-26 junio 2023
Cuenca Río Maipo

1. INTRODUCCIÓN

A raíz del evento hidrometeorológico ocurrido entre el 21 y el 26 de junio del 2023, el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) desplegó trabajo en terreno con equipos conformados por investigadoras e investigadores de diferentes disciplinas. En el caso de la cuenca del Río Maipo, se levantaron datos en dos zonas, la Desembocadura del Río Maipo y la Cuenca Alta del Río Maipo. El comportamiento del evento y el impacto fue analizado para cada una de estas zonas, pero desde diferentes aproximaciones metodológicas.

En el caso de la Desembocadura del Río Maipo, se trabajó específicamente en la ribera en San Antonio y Santo Domingo en la región de Valparaíso. El objetivo general fue identificar los principales cambios geomorfológicos provocados por el evento de junio de 2023, así como los impactos en la población y los principales requerimientos científicos por parte de autoridades locales y regionales frente a la amenaza de crecidas. Metodológicamente, se realizó un levantamiento de los cambios geomorfológicos de la desembocadura del río Maipo, utilizando imágenes satelitales y de drones (RPAS, sistema de aeronave pilotada a distancia). Se utilizó la técnica de posicionamiento de alta precisión RTK (Real time kinematic) enlazada a los puntos geodésicos levantados, la cual alcanza precisiones centimétricas que permiten interoperabilidad con datos topográficos y batimétricos disponibles que estén conectados a la misma red. A partir de esto se generaron ortomosaicos, perfiles transversales y modelos digitales de elevación de alta resolución con dimensiones x, y, y z lo cual permitió estimar cambios volumétricos. Para la prospección de exposición y vulnerabilidad se trabajó a partir de dos metodologías cualitativas, que se desarrollaron tanto en terreno como en gabinete. En primer lugar, el trabajo de gabinete se realizó con revisión de prensa y fuentes secundarias para identificar daños, efectos del evento y zonas críticas (matriz de vaciado de datos) mediante uso de Twitter y YouTube (prensa y posteos de vecinas/os). En segundo lugar, se aplicaron dieciocho entrevistas semiestructuradas a actores claves de la institucionalidad y sociedad civil, además de personas afectadas por las inundaciones. Los datos recolectados fueron vaciados en matrices y mapas de actores claves.

En el caso de la Cuenca Alta del Río Maipo Central, se realizó un trabajo de terreno de ocho días en la comuna de San José de Maipo de la Región Metropolitana de Chile. El objetivo de este trabajo de terreno fue detectar las remociones en masa tipo flujos (aluviones) desarrolladas, además de describir sus depósitos asociados a causa del desarrollo de la tormenta

que afectó a Chile Central, en la fecha ya mencionada. Se incluye la detección y ubicación de otras amenazas detectadas; deslizamientos, caídas de rocas e inundaciones (Figura 1). Para cada uno de los depósitos aluviales que fueron factibles de detectar se hizo un análisis y descripción geológica del depósito mediante una metodología manual-visual, además de registrar su ubicación y el levantamiento de imágenes aéreas, in situ georreferenciadas y levantamientos aerofotogramétrico.

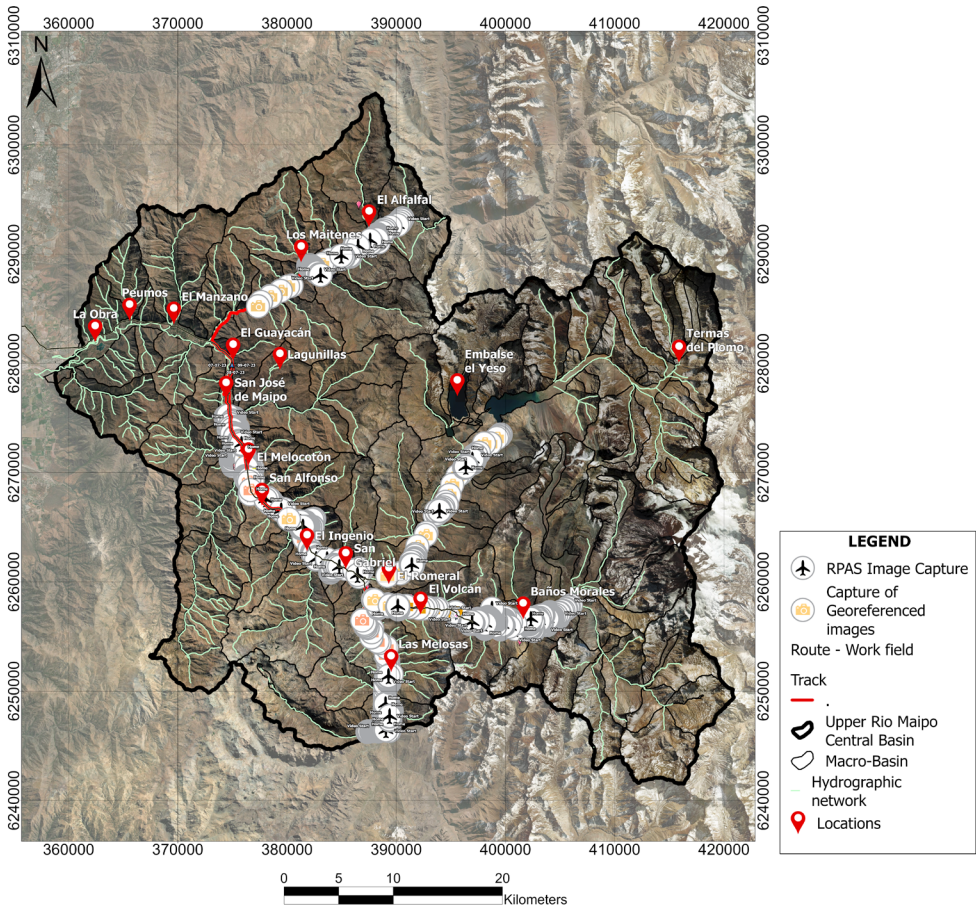


Figura 1. Delimitación de la cuenca Alta del Río Maipo Central con el recorrido realizado en la campaña de terreno realizada desde el 3 al 10 de julio de 2023. Se puede observar la información recopilada: puntos de interés, análisis en terreno e información digital levantada.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos recabados reflejan y abordan ciertas particularidades de cada una de las zonas analizadas, y de los enfoques metodológicos y expertise, de cada uno de los equipos de investigación. Por esta razón, el informe que presentamos a continuación está organizado del siguiente modo.

En primer lugar, en la Sección 2 describimos el contexto local para cada una de las zonas analizadas; luego en la Sección 3 identificamos las características del fenómeno hidrometeorológico para toda la cuenca. La Sección 4 de este informe presenta un análisis del evento específicamente para la zona de la Desembocadura del Río Maipo, mientras que la Sección 5 analiza el evento para la zona de la Cuenca Alta del Río Maipo. Finalmente, el informe presenta aprendizajes y recomendaciones con contribuciones específicas para cada una de las zonas analizadas.

Desde CIGIDEN, estamos comprometidos en aportar con evidencia científica a la política pública para reducir y gestionar el riesgo de desastres en Chile. En este sentido, creemos que rescatar aprendizajes de experiencias previas de desastres puede colaborar en “reconstruir mejor”, no sólo restableciendo las pérdidas, sino que, también creando las condiciones para evitar la ocurrencia de futuros desastres, abordando la mitigación desde obras de infraestructura y el mejoramiento de la calidad de vida de la población para reducir su vulnerabilidad social. Esperamos que los Informes post desastre que hemos publicado sobre las Inundaciones de junio 2023, contribuyan con este propósito.

2. CONTEXTO LOCAL

Las zonas de estudio presentadas en este informe corresponden a la cuenca del Río Maipo, pero el análisis se enfocó en la zona de la Desembocadura y en la Cuenca Alta.

En cuanto a la desembocadura del río Maipo, el análisis se enfocó en dos zonas principales, específicamente la ribera en San Antonio y Santo Domingo, Región de Valparaíso (Figura 2).

San Antonio (ribera norte) es una comuna y capital de la provincia de San Antonio. De acuerdo al CENSO 2017, posee 91.350 habitantes y su vocación económica principal es el puerto y el turismo. Sobre indicadores socioeconómicos, según datos del Ministerio de Desarrollo Social y Familia publicados en agosto de 2023, el 49,5% de los hogares inscritos en el Registro Social de Hogares se encuentran en el tramo del 40% de menores ingresos, el promedio de escolaridad en mayores de 18 años es de 11,4, mientras que 12,4% de la población carece de servicios básicos.

Respecto a Santo Domingo (ribera sur), posee 10.900 habitantes y de acuerdo al Ministerio de Desarrollo Social y Familia con datos de agosto de 2023, el 40,2% de los hogares se encuentra en el tramo del 40% de menores ingresos en el país, el promedio de escolaridad es de 11,9 años, en tanto, el 36% de la población carece de servicios básicos.

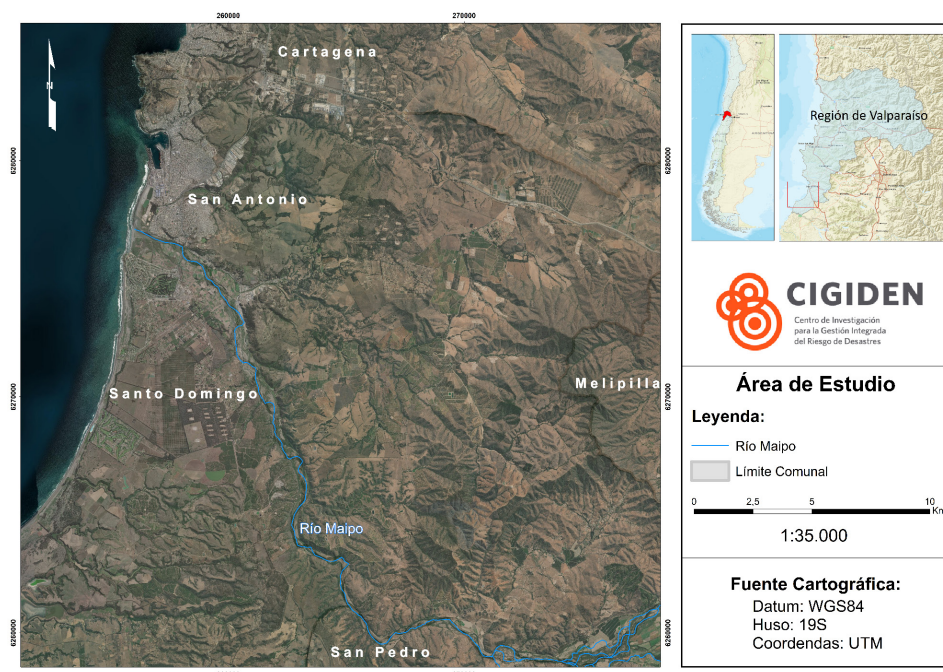


Figura 2. Área de estudio. Río Maipo

Fuente: Elaboración propia

La memoria histórica de los entrevistados entrega antecedentes respecto a eventos similares de inundaciones en el pasado. En primer lugar, desde fines del siglo XIX se recuerda un cauce mayor del río. Asimismo, emergen al menos cinco episodios previos que son rememorados como “grandes inundaciones” en los años 1952, 1960, 1982, 1986, y 2006. Todas estas inundaciones, habrían sido de una magnitud mayor a la experimentada en junio de 2023.

En relación a la cuenca alta del río Maipo Central, la cuenca se extiende desde el límite oriental Chile-Argentina hasta la localidad de La Obra en el sector occidental. Esta zona es parte de la comuna de San José de Maipo y abarca localidades y sectores como Los Maitenes, El Alfalfal, El Guayacán, San Alfonso, El Ingenio, San Gabriel, El Romeral, El Volcán, Baños Morales, Las Melosas, Embalse El Yeso, Puente el Cristo, Fundo Cruz de Piedra, entre otras. En cuanto a las características sociodemográficas de la comuna de San José de Maipo, esta localidad tiene una población de 18.189 personas, y de ellas, 11.208 vive en zona urbana y 6.981 personas en zona rural, según datos del CENSO 2017. En términos sociales, un 9,2% de la población de la comuna vive en situación de pobreza por ingresos, según datos de la CASEN 2020.

En relación al acceso a servicios, los antecedentes del Registro Social de Hogares (Ministerio de Desarrollo Social, 2022) indican que un 35,4 % de la población de San José de Maipo no tiene acceso a servicios básicos, y un 8,5 % de los hogares vive en condiciones de hacinamiento.

En concreto, la cuenca alta del Río Maipo Central abarca 2394 km² de área del total de la cuenca, cuya ubicación se aprecia en la Figura 3. La importancia de abarcar esta área en particular radica en que es un área de relevancia estratégica para la capital de nuestro país. Específicamente la cuenca Alta del Río Maipo, contiene zonas mineras de relevancia y resguarda los recursos hídricos que sustentan al 80% del Gran Santiago. Históricamente esta área se ha visto afectada por distintos eventos de precipitaciones generando distintos tipos de remociones en masa e inundaciones, que han puesto en riesgo este recurso fundamental debido al aumento de turbidez de los caudales fluviales. De hecho, los antecedentes indican que en los últimos 50 años se han desarrollado 43 de estos eventos de remociones en masa desencadenados por precipitaciones. Esto se debe a que su distribución espacial abarca áreas con diferentes características geológicas y geomorfológicas, lo que hace suponer una importante variabilidad de los factores condicionantes para la generación de estas amenazas. Estos resultan fundamentales de analizar para anteponerse a estas emergencias y hacer más efectivas las herramientas para la toma de decisiones.

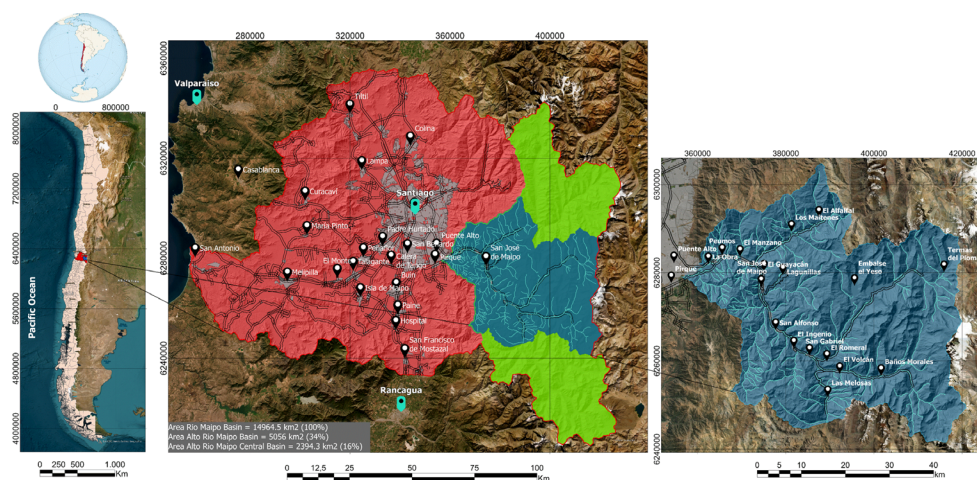


Figura 3. Ubicación de la cuenca Alta del Río Maipo Central de la Comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana de Chile.

Fuente: Elaboración propia.

3. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO
HIDROMETEOROLÓGICO

Un evento meteorológico afectó la zona central de Chile desde la Región de Valparaíso hasta la Región de la Araucanía entre el 21 al 26 de junio de 2023 ocasionando distintos tipos de amenazas de caída de rocas, deslizamientos, flujos e inundaciones que afectaron al sector agrícola y urbano. Según el informe entregado por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) este evento dejó (a fecha del 18 de julio 2023) 27.588 damnificados destacándose la Región del Maule con 19.170 damnificados. Además, de 140 albergados, 1724 personas aisladas, 1.853 casas destruidas (1424 en la Región del Maule), 2553 viviendas con daño mayor, 5881 con daño menor, 1 persona desaparecida y 3 personas fallecidas (Región Metropolitana, Región del Maule y Región del Biobío). Sumado a lo anterior, se registró un alto número de cortes de rutas, daños en la red vial y urbana, inhabilitación de puentes, anegamientos y cortes en el suministro eléctrico e hídrico, impactando desde distintos ámbitos a la comunidad (Tabla 1). A consecuencia, las autoridades decretaron estado de catástrofe en dichas regiones.

Región	Afectación a personas					Daño a viviendas			
	Damnificados	Albergados	Aisladas	Desaparecidos	Fallecidos	Daño menor	Daño mayor	Destruídas	En evaluación
Valparaíso	3	-	-	-	-	-	-	2	-
Metropolitana	1.048	-	2	-	-	1	130	259	13
O'Higgins	3.677	103	126	-	-	2.784	1.112	303	-
Maule	19.17	21	1.055	1	1	621	390	1.424	3.497
Ñuble	1.475	14	322	-	-	818	394	82	-
Biobío	2.213	2	211	-	1	1.523	397	29	770
La Araucanía	2	-	8	-	-	5	1	-	-
Total	27.588	140	1.724	1	3	5.881	2.553	1.853	4.267

Tabla 1. Resumen de datos por afectación a personas y daños a viviendas por evento meteorológico del 21 al 26 de junio de 2023 desde la Región de Valparaíso a Región de la Araucanía.

Fuente: Sitio Web – Alertas SENAPRED.

El evento hidrometeorológico de junio se vio favorecido por el fenómeno de El Niño, que desencadenó un **Río Atmosférico Zonal** (Garreaud, 2023), el cual se define como corredores o flujos estrechos de vapor de agua atmosférica (con <1000 km de ancho en relación con su escala de longitud de >~2000 km) (Neiman et al., 2008). En cuanto al fenómeno de El Niño (calentamiento superficial del Pacífico Tropical), según Garreaud (2023), a pesar de que el acoplamiento con la atmósfera aún es débil, actualmente ya está establecido, aportando bastante humedad. Esto es relevante, considerando que el territorio chileno se ha visto históricamente afectado

por Ríos Atmosféricos (Viale et al., 2018) y en el caso de Chile Central (30°-36°S), en más del 80 % de los eventos meteorológicos cálidos, está presente uno de estos fenómenos. Esto, a pesar de que las precipitaciones más usuales son las que se concentran en el invierno austral, en su mayoría asociadas al paso de frentes fríos con una isoterma 0° típica entre 1500 y 2500 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.), cuando hay precipitaciones. Sin embargo, en aproximadamente un tercio de los casos, la precipitación ocurre acompañada de temperaturas cálidas y niveles de congelación por encima de los 3000 m s.n.m., aumentando el área pluvial de las cuencas andinas y aumentando a su vez, la susceptibilidad al desarrollo de amenazas hidrometeorológicas (Garreaud, 2013), siendo similar a este caso en particular. Según Neiman et al., (2008), en regiones donde los Ríos Atmosféricos llegan a la superficie (los factores propicios para la ocurrencia de fuertes precipitaciones orográficas¹ es una combinación de la neutralidad húmeda de la tropósfera baja, los fuertes vientos horizontales dirigidos hacia el terreno elevado y el gran contenido de vapor de agua (e.g. Rhea, 1978; Smith, 1979; Pandey et al., 1999 ; Rotunno & Ferretti, 2001 ; Neiman et al., 2002), como en el caso del territorio chileno. En cuanto al efecto orográfico, hay dos aspectos fundamentales; por un lado, están los fuertes vientos que chocan con la cordillera y por otro lado influyen las condiciones húmedas y cálidas que prevalecen en estos eventos reduciendo significativamente el bloqueo mecánico de Los Andes que conduce a una amplia capa de movimiento ascendente aguas arriba de las montañas capaz de atraer aire húmedo a niveles bajos (Garreaud, 2013) (Figura 4).

Según Garreaud (2023) en este evento en particular, el río atmosférico zonal estuvo caracterizado por ser persistente (hasta 72 horas), de temperaturas cálidas, aumentando la cota de la Isoterma 0°, y con un transporte integrado intenso de vapor de agua (Figura 5) (IVT, por sus siglas en inglés) de categoría 4-5 (en base a la clasificación de Ralph et al., 2019), siendo mayormente destructivo. En cuanto a su avance, desde el interior del Pacífico central hacia el interior del territorio, se aprecia siguiendo una latitud fija (de ahí la denominación de “Zonal”) influenciado por los fuertes vientos del oeste en la tropósfera baja y media con un máximo en torno a los 35°S. En la Figura 6 se puede apreciar este desplazamiento estando mayormente concentrado en la zona central de nuestro país para el 23 y 24 de junio, posicionándose posteriormente en la zona centro sur, con atenuación del fenómeno para el 27 de junio.

^[1] Son producidas por el ascenso del aire húmedo al encontrarse con un obstáculo orográfico, como una montaña. Cuando las montañas de las tierras altas actúan como barreras al flujo de aire, obliga al aire a ascender, produciendo que el aire húmedo que se mueve cuesta arriba, se enfríe adiabáticamente, produciendo nubes y precipitaciones.

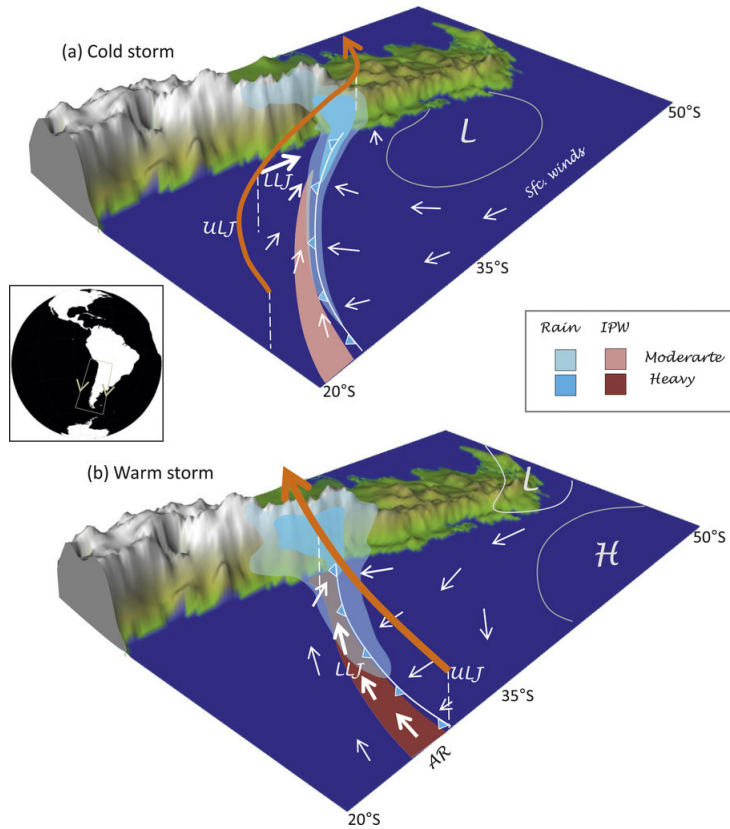


Figura 4. Modelo conceptual de tormentas de lluvia frías y cálidas en el centro de Chile superpuesto a una vista 3D desde el noroeste (ver recuadro). En cada caso, la ilustración muestra la posición del frente frío (símbolo convencional), la corriente en chorro en el nivel superior (flecha naranja), el chorro en el nivel bajo (flechas blancas gruesas), los vientos superficiales (flechas blancas delgadas), las áreas de moderado– fuertes precipitaciones (tonos azules), ríos atmosféricos (IPW moderado a intenso, tonos magenta) y centros de presión en latitudes medias (contornos blancos).

Fuente: Garreaud (2013 y 2023).

Todo esto se refleja en los distintos factores meteorológicos que caracterizan este fenómeno. En cuanto a las precipitaciones acumuladas registradas, se observan los mayores valores en las comunas de Parral y San Clemente con 850 mm y 733 mm respectivamente, siendo ambas de la Región del Maule la cual presentó los mayores impactos (Figura 7 y Tabla 1). Además, se observa que las precipitaciones mayores se concentraron en la alta cordillera andina, ocasionando un aumento importante del caudal en los ápices y zonas medias de las macro cuencas, afectando la zona de desembocadura con inundaciones principalmente las terrazas fluviales de inundación y en la parte media y baja de los cauces fluviales.

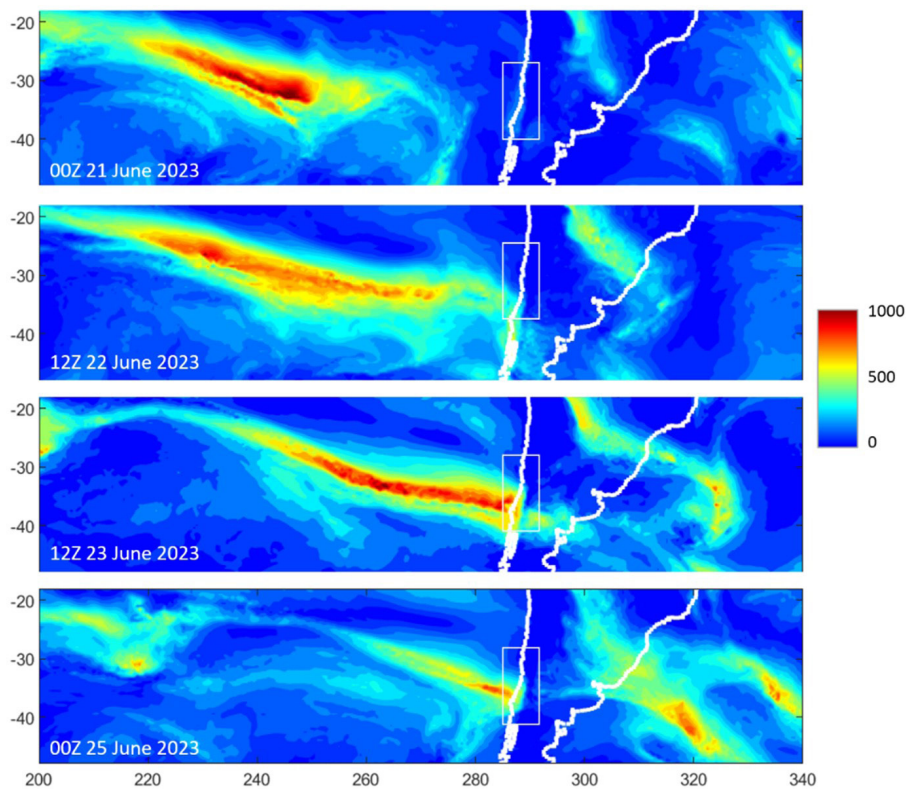


Figura 5. Mapas del transporte integrado de vapor de agua (magnitud en kg/m/s) en instantes seleccionados durante la tormenta.

Fuente de datos: Modelo GFS inicializado el 20 de junio de 2023. Extraído de Garreaud (2023).

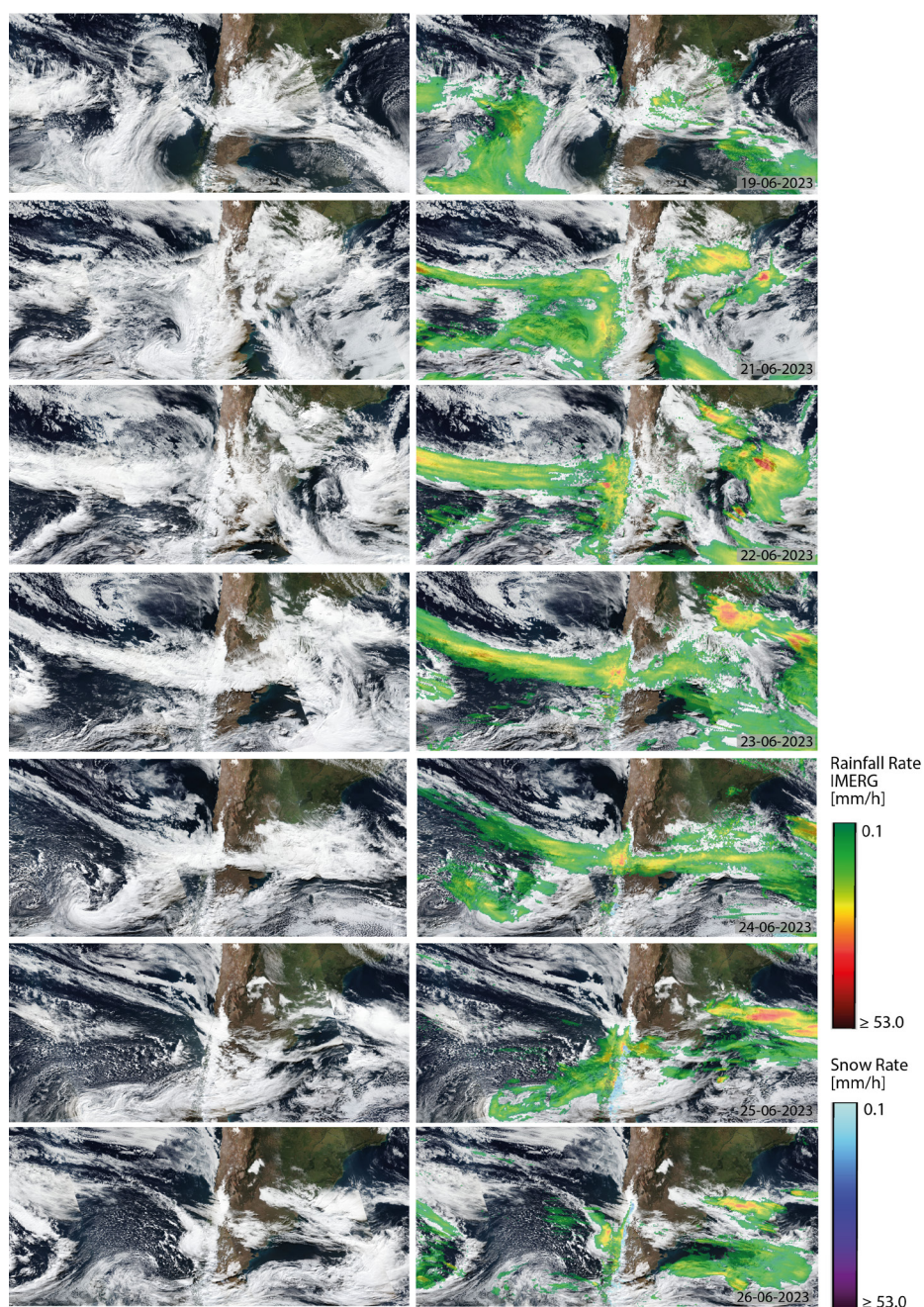


Figura 6. Evolución y desplazamiento del “Río Atmosférico Zonal” entre el 19 y 26 de junio de 2023 mediante Landsat-8 True Color. Las imágenes de la columna de la derecha contienen la capa IMERG Precipitation Rate and Snow Rate, correspondiente a la tasa de lluvia y la tasa de nieve en milímetros por hora (mm/hr) estimada mediante el algoritmo Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (GPM) (IMERG).

Fuente: World View from National Aeronautics and Space Administration (NASA) of Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Corrected Reflectance and IMERG Precipitation Rate layer.

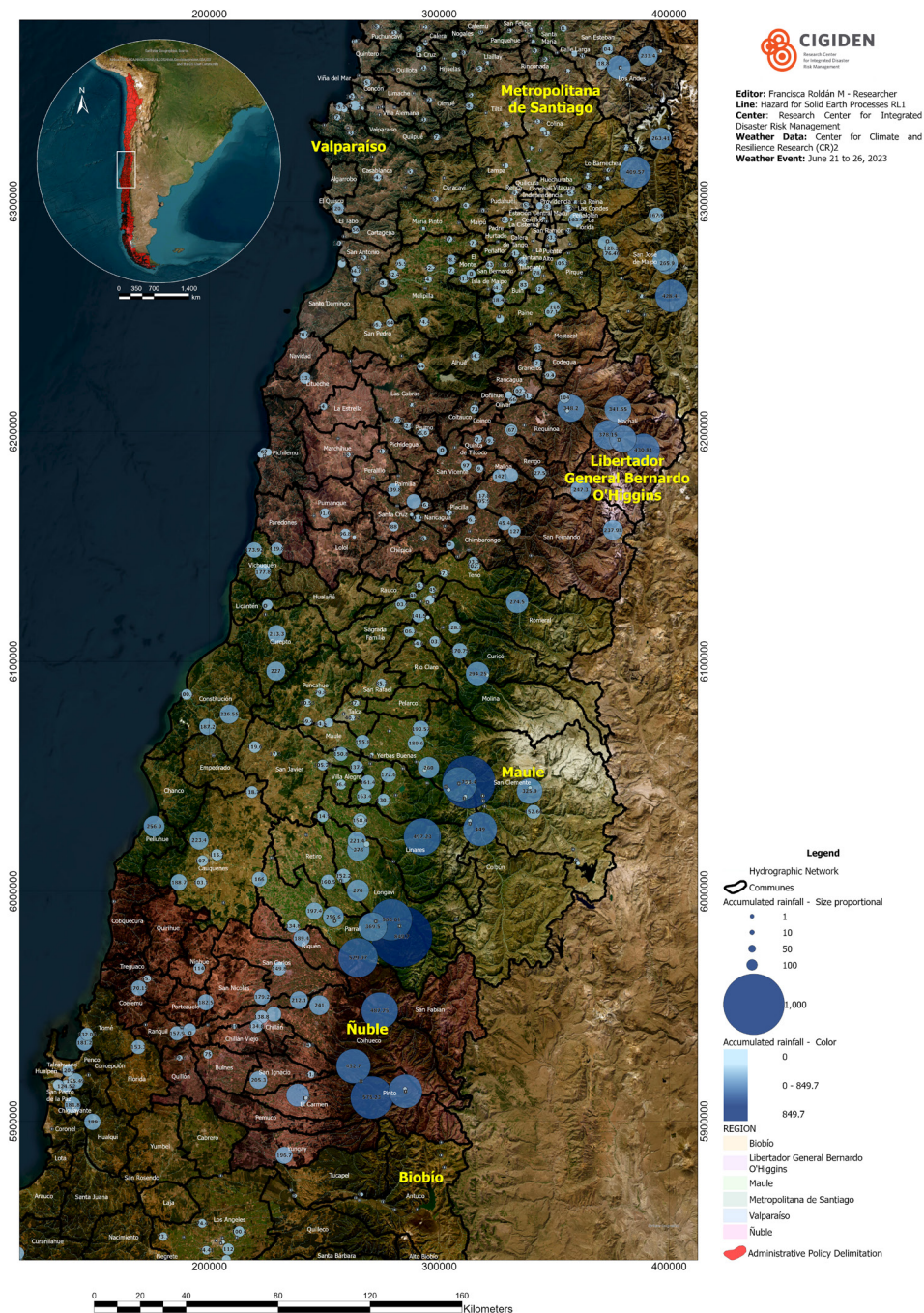


Figura 7. Mapa de precipitaciones acumuladas en las comunas de Chile central afectadas por el Río Atmosférico Local desde el 21 al 26 de junio de 2023.

Fuente: Datos de precipitación acumulada extraídos y editados desde la plataforma de Vismet del Centro del Clima y Resiliencia (CR)2.

DATA FROM JUNE 19 TO 27, 2023		QUEBRADA DE MACUL WEATHER STATION (DGA)	SAN JOSÉ DE MAIPO RETÉN WEATHER STATION (DGA)	VALLE OLIVARES WEATHER STATION (DGA)	EL YESO EMBALSE WEATHER STATION (DGA)	GLACIAR SAN FRANCISCO EN AGUAS PANAMÁ VIDA WEATHER STATION (DGA)	TERMAS DEL PLOMO WEATHER STATION (DGA)
ALTITUDE [m a.s.l.]		950	963	2787	2475	2220	3000
EVENT ACCUMULATED RAINFALL [mm]		163.4	170.7	263.4	265.9	416.0	76.9
AVERAGE [mm]		0.9	0.9	1.3	1.3	2.5	0.4
MEAN [mm]		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MAXIMUM ACCUMULATED RAINFALL [mm]		12.2	8.5	9.7	11.3	28.9	2.9
DATE MAXIMUM ACCUMULATED RAINFALL		23-06-2023 1:00	23-06-2023 1:00	22-06-2023 16:00	22-06-2023 15:00	22-06-2023 17:00	23-06-2023 15:00
MINIMUM ACCUMULATED RAINFALL [mm]		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DATE MINIMUM ACCUMULATED RAINFALL [mm]		Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates
MAXIMUM RAINFALL INTENSITY [mm/h]		12.2 mm/h	8.5 mm/h	9.7 mm/h	11.3 mm/h	28.9 mm/h	2.9 mm/hr
STANDARD DEVIATION		2.2	1.9	2.6	2.5	4.7	0.7
MODE		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DATE ACCUMULATED RAINFALL [MM/24H]		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19-06-2023		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20-06-2023		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21-06-2023		0.0	1.6	0.0	0.3	3.9	3.4
22-06-2023		84.2	73.4	50.9	94.7	84.7	14.4
23-06-2023		68.0	78.2	144.6	114.9	229.1	31.9
24-06-2023		10.4	17.4	67.9	56.0	97.4	6.9
25-06-2023		0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	20.2
26-06-2023		0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
27-06-2023		0.2	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
TOTAL		163.4	170.7	263.4	265.9	416.0	76.9

Tabla 2. Datos y análisis estadístico de las precipitaciones registradas desde el 19 al 27 de junio de 2023 para 6 estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Los datos están representados en función de su ubicación W-E.

Fuente: Datos extraídos y editados desde el Visualizador Meteorológico VisMet del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia.

Como indicamos anteriormente las zonas de estudio se enfocaron en la desembocadura y en la cuenca Alta del Río Maipo Central. Respecto a las precipitaciones registradas en esta última área, se observan tendencias significativas respecto a su distribución, influenciadas principalmente por el desplazamiento del Río Atmosférico Zonal, el efecto orográfico y el aumento en la altitud de la isoterma 0°. Específicamente, estos datos fueron extraídos desde 5 estaciones meteorológicas disponibles (Figura 8) desde los datos en línea de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas mediante el Visualizador Meteorológico VisMet del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (Center for Climate and Resilience Research (CR)2). La selección de las estaciones fue en base a su ubicación, altitud y respecto a la calidad de sus datos; se descartaron en este caso las estaciones que presentan rangos de tiempo considerable sin datos y/o una alta cantidad de datos con bajo porcentaje de confiabilidad (<50%). Los datos resultantes, no consideraron registros con porcentaje de confiabilidad menor al 50%.

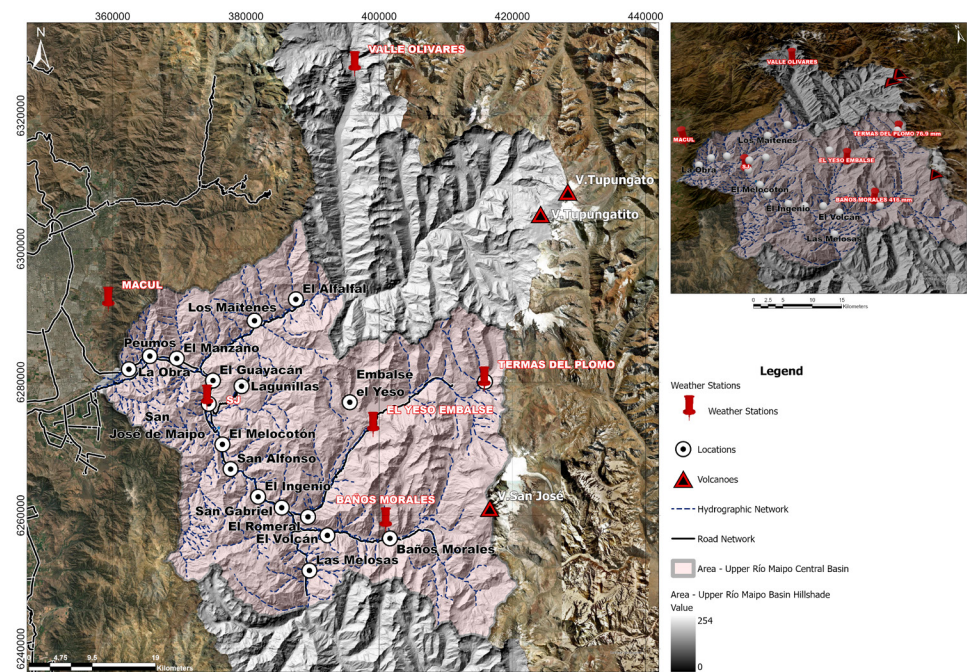


Figura 8. Ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Incluye la delimitación de la Cuenca Alta del Río Maipo Central (zona en rosado). El mapa de la izquierda muestra la ubicación geográfica en 2 dimensiones. El mapa de la esquina superior derecha muestra la ubicación geográfica en 3 dimensiones.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados presentados en la Tabla 2, ya mencionada, y en los Gráficos 1 y 2, indican los registros de precipitaciones acumuladas diarias y totales desde el 19 al 27 de junio de 2023, cuyas precipitaciones están concentradas principalmente durante el 22, 23 y 24 de junio. Respecto a las precipitaciones acumuladas registradas, se registra un valor mínimo de 76.9 mm acumulado en la estación pluviométrica de Termas del Plomo y una máxima acumulada de 416 mm en la estación de Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida. En cuanto a eso, se observa una clara tendencia en la variabilidad de las precipitaciones en sentido oeste-este (W-E), y a partir de su altitud donde se encuentra la estación pluviométrica, exceptuando la estación de las Termas del Plomo, la cual registró una caída de un 540% respecto a la estación de Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida. La estación de las Termas del Plomo se encuentra ubicada al extremo oriental de la cuenca y presenta la mayor altitud (3000 m s.n.m.) respecto a las otras estaciones utilizadas, por lo tanto, la disminución en los registros de precipitación acumulada puede deberse posiblemente a su ubicación en una cota superior o cercana a la cota de Isoterma 0°C (Gráfico 2).

Por otro lado, se observa que un 83.3% de los datos presenta un máximo acumulado para el 23 de junio, cuya excepción en su tendencia la presenta la estación pluviométrica de Macul. Esto refleja la evolución del avance del flujo del río atmosférico zonal en dirección oeste-este (W-E), acumulando una mayor cantidad de precipitación en el piedemonte cordillerano para el día 22 de junio y en las zonas al interior cordillerano para el día 23 de junio. Respecto a las intensidades máximas registradas, se concentran durante los días 22 y 23 de junio, cuyo valor máximo lo registró la estación Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida con una intensidad de 28.9 mm/hr el día 22 de junio a las 17:00 horas, seguido de una intensidad de 12.2 mm/hr registrada en la estación de Macul para el día 23 de junio a las 1:00 horas. Se observa una drástica disminución de las precipitaciones a partir del 25 de junio para todas las estaciones en cuestión.

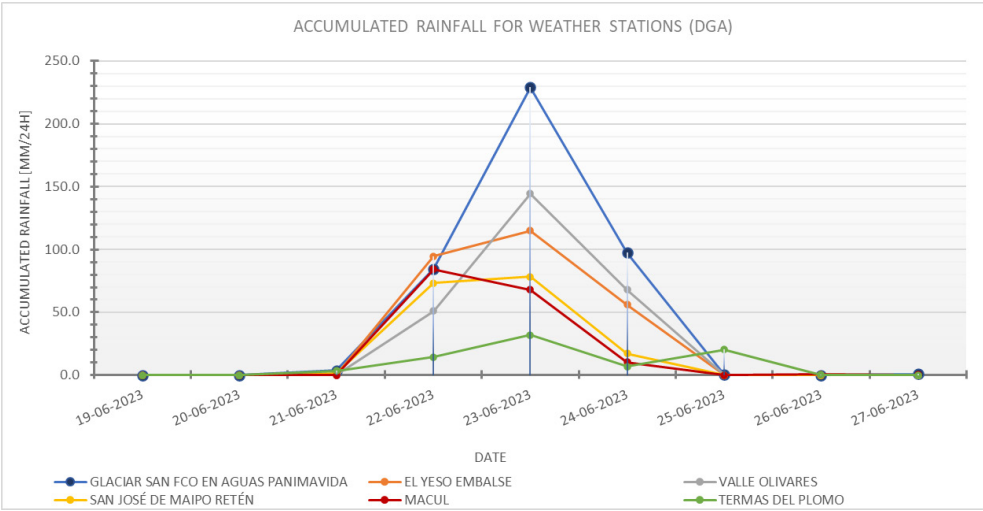


Gráfico 1. Gráfico de las precipitaciones acumuladas diarias registradas para el evento meteorológico del 19 al 27 de junio de 2023 para cada una de las 6 estaciones pluviométricas seleccionadas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Fuente: Datos extraídos y editados desde el Visualizador Meteorológico VisMet del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2.

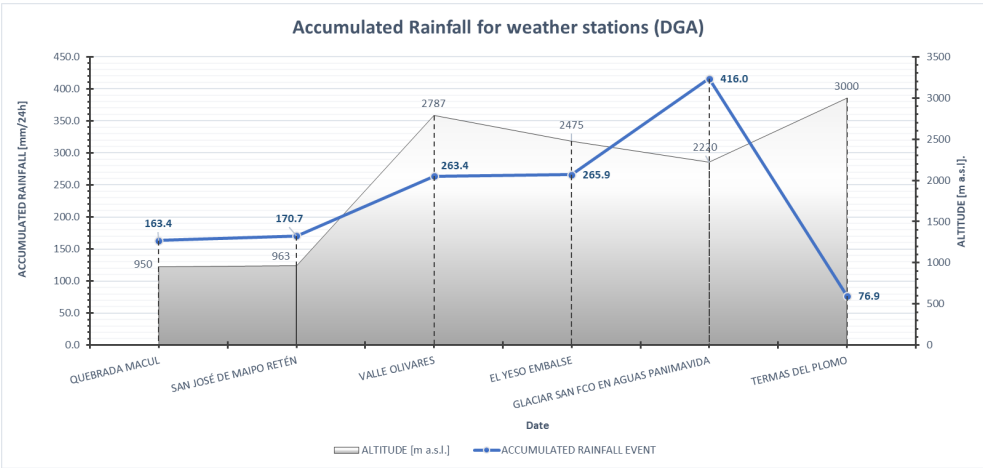


Gráfico 2. Gráfico de las precipitaciones acumuladas registradas para el evento meteorológico del 19 al 27 de junio de 2023 y la altitud para cada una de las 6 estaciones pluviométricas seleccionadas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Fuente: Datos extraídos y editados desde el Visualizador Meteorológico VisMet del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2.

Respecto a la altitud de la cota de la isoterma 0° (Tabla 3 y Gráfico 3), se calculó mediante los datos de la estación de radiosonda de Santo Domingo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) extraídos desde el sitio web de Wyoming University of United States mediante el cálculo y relación entre la temperatura y la altura registrada cada 12 horas diarias (00Z y 12Z), desde el 20 al 28 de junio de 2023. En cuanto a los resultados, también presentes en la Tabla 3 y Gráfico 3, si se consideran los datos registrados desde el 20 al 28 de junio, se tiene un promedio de isoterma 0° de 3183 m s.n.m., con un máximo de 3800 m s.n.m. para el 25 y 28 de junio y un mínimo de 2100 m s.n.m. para el 27 de junio. Por otro lado, si se consideran los datos entre el 22 y 26 de junio (fechas donde hubo una mayor precipitación registrada) se tiene un promedio de 3215 m s.n.m., un máximo de 3800 m s.n.m. para el 25 de junio y un mínimo de 2900 m s.n.m. para el día 22 de junio. En cuanto a las tendencias, se observa un claro aumento de la altitud de la isoterma 0° desde el 23 al 25 de junio, aumentando específicamente desde los 2900 a los 3300 m s.n.m. entre el 22 al 23 de junio y una disminución de 3459 a 3050 m.s.n.m. entre el 25 y 26 de junio. Se destaca que la cota máxima de la isoterma 0° alcanzó los 3459 m.s.n.m., estando dentro de los valores normales de isoterma para Chile central, pero siendo anómalo para las tormentas de invierno en dicha área. En este sentido según Garreaud (2013), la isoterma 0° en Chile central varía entre 1500 a 3500 m s.n.m., durante el invierno, con un valor promedio de 2200 m s.n.m.

Date	Month	Day	Year	Hour	Isotherm 0°	Average Isotherm 0°
					m a.s.l.	m a.s.l.
20-06-2023	June	20	2023	00Z	3300	3375
				12Z	3450	
21-06-2023	June	21	2023	00Z	3100	3050
				12Z	3000	
22-06-2023	June	22	2023	00Z	2900	2900
				12Z*	2900	
23-06-2023	June	23	2023	00Z	3200	3300
				12Z	3400	
24-06-2023	June	24	2023	00Z	3130	3365
				12Z	3600	
25-06-2023	June	25	2023	00Z	3800	3459
				12Z	3118	
26-06-2023	June	26	2023	00Z	3100	3050
				12Z	3000	
27-06-2023	June	27	2023	00Z	3200	2650
				12Z	2100	
28-06-2023	June	28	2023	00Z	3200	3500
				12Z	3800	
*No data (00Z data is repeated)						
From june 20 to 28, 2023	AVERAGE	3183		From june 22 to 26, 2023	AVERAGE	3215
	MEAN	3165			MEAN	3124
	MAX	3800			MAX	3800
	MIN	2100			MIN	2900
	DESV.STAN	383			DESV.STAN	298

Tabla 3. Registro y análisis estadístico de registros de la isoterma 0°C diaria desde el 20 al 28 de junio de 2023 para la estación de radiosonda de Santo Domingo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Fuente: Datos extraídos y editados desde el sitio web de Wyoming University of United States.

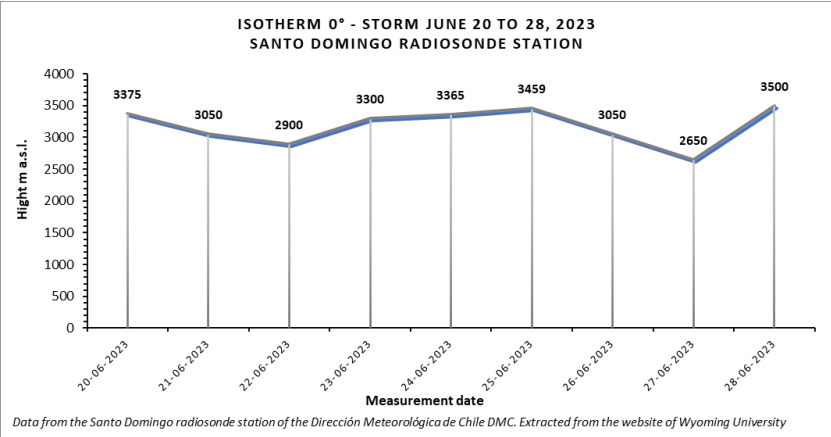


Gráfico 3. Registro de las altitudes de isoterma 0°C diaria desde el 20 al 28 de junio de 2023 para la estación de radiosonda de Santo Domingo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Fuente: Datos extraídos y editados desde el sitio web de Wyoming University of United States.

En cuanto a la relación de la altitud de la cota de isoterma 0° y la tendencia de precipitaciones acumuladas durante la tormenta, ésta se ve claramente expresada en la Figura 9 donde se observa una influencia entre los altos registros de precipitaciones acumuladas de las estaciones que se encuentran por debajo de esta cota de isoterma 0° y una drástica disminución para la estación que se encuentra cercana o sobre la isoterma 0° (estación pluviométrica de Termas del Plomo). Dar cuenta de la relación entre estos fenómenos es relevante, puesto que influye en la variabilidad y el desarrollo de remociones en masa tipo flujo para estas áreas en particular. Los resultados revelan que el aumento en la altitud de la isoterma 0°C desencadena indudablemente un aumento en la captación de agua líquida por área de las hoyas hidrográficas y en las laderas que constituyen estas zonas montañosas, la cual repercute en una mayor saturación del suelo, disminución de la fuerza de roce y que el material sedimentario se da ante el efecto gravitatorio provocando movimientos de remociones en masa hacia cotas bajas.

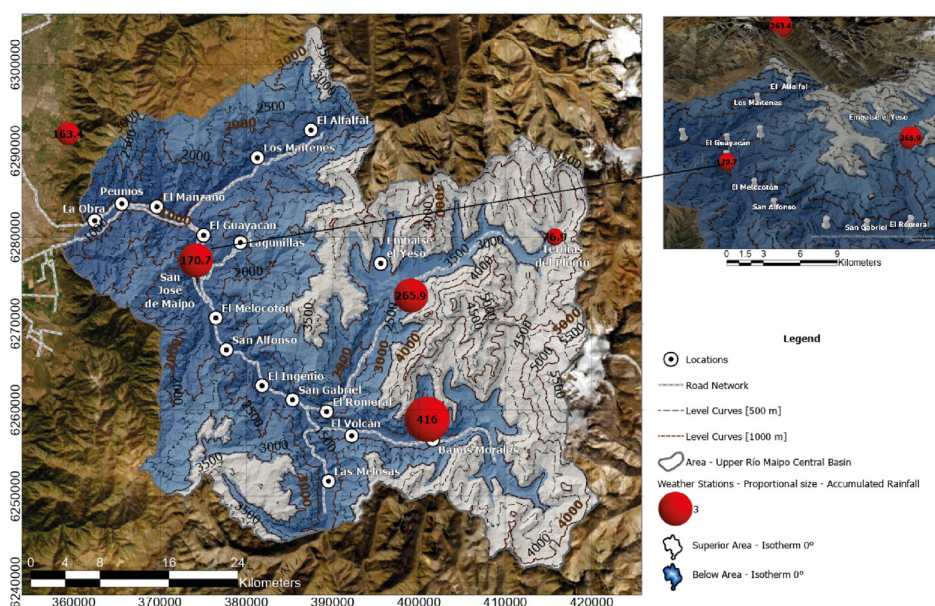


Figura 9. Mapa en dos y tres dimensiones de la cuenca Alta del Río Maipo Central donde está representada las curvas de nivel cada 500 y 100 m y la altitud de la isoterma 0°C de 3215 m s.n.m. promedio desde el 22 al 26 de junio de 2023 para la estación de radiosonda (DMC) en relación con la ubicación de las estaciones pluviométricas (DGA) y sus precipitaciones acumuladas durante el evento meteorológico. Las cotas equivalentes y superiores al promedio de la Isoterma 0°C están representadas en tonalidades blanquecinas. Las cotas inferiores al promedio de la isoterma 0°C están representadas en áreas de color azul. El tamaño de los círculos en rojo está en relación con la cantidad de precipitación acumulada registrada.

Fuente: Elaboración propia en base al registro de la Isoterma 0°C : Estación de radiosonda de Santo Domingo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) extraídos del sitio web de Wyoming University of United States. Y a la información de estaciones pluviométricas: Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile..

Respecto a la temperatura del aire (Tabla 4 y Gráfico 4), se ven igualmente tendencias de oeste a este (W-E) (San José de Maipo Retén, El Yeso Embalse y Termas del Plomo) registrándose temperaturas máximas de 12.3°C el 23 de junio para la estación de San José de Maipo y una temperatura mínima de -1.2 registrada en la estación Termas del Plomo para el 21 de junio de 2023. En cuanto a tendencias de aumento y disminución de la temperatura del aire, se observaron cambios significativos entre el 22 al 26 de junio. Específicamente se observa un aumento máximo de 3.1° en 24 horas en la Estación San José de Maipo Retén entre el 22 y 23 de junio y una disminución máxima de 2.4° entre el 25 y 26 de junio en la estación El Yeso Embalse. En cuanto a las variaciones de las temperaturas de las estaciones de El Yeso Embalse y en especial de la estación de Termas de Plomo, es relevante ya que puede desencadenar deshielo súbito en áreas cercanas a la isoterma 0°, además de la variación de la isoterma 0°C que pudiese desencadenar distintos tipos de remociones en masa y aportando caudal líquido a las cuencas de las zonas cordilleranas orientales.

DATA		San José de Maipo Retén Station	El Yeso Embalse Station	Termas del Plomo Station
AVERAGE		10.2	4.6	1.3
MEAN		10.3	4.5	1.6
MAXIMUM		19.9	10.6	5.8
DATE MAXIMUM		20/06/2023 13:09	20/06/2023 14:27	24-06-2023 18:41
MINIMUM		4.9	-0.9	-3.1
DATE MINIMUM		27/06/2023 08:09	22/06/2023 06:57	21-06-2023 5:41
DESV.STAN		2.7	2.7	2.3
MODE		12.6	4.7	0.3
Average Air from june 19 to 27, 2023	Date	T°C	T°C	T°C
	19-06-2023	10.0	4.5	1.7
	20-06-2023	10.0	5.9	1.8
	21-06-2023	11.1	2.5	-1.2
	22-06-2023	9.2	2.1	0.5
	23-06-2023	12.3	4.8	1.7
	24-06-2023	11.1	6.5	2.0
	25-06-2023	10.7	7.8	3.9
	26-06-2023	9.8	5.4	2.6
	27-06-2023	7.7	1.7	-0.8

Tabla 4. Datos y análisis estadístico de la temperatura del aire (T°C) registradas desde el 19 al 27 de junio de 2023 para 3 estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Los datos están representados en función de su ubicación W-E.

Fuente: Datos extraídos y editados desde el Visualizador Meteorológico VisMet del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2.

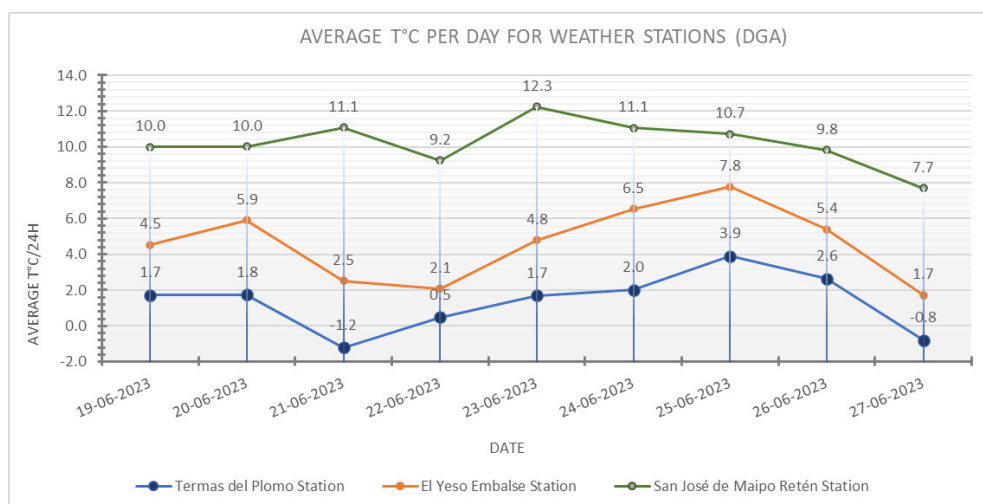


Gráfico 4. Registro de la temperatura del aire (T°C) registradas desde el 19 al 27 de junio de 2023 para 3 estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Los datos están representados en función de su ubicación W-E (San José de Maipo Retén, El Yeso Embalse y Termas del Plomo).

Fuente: Datos extraídos y editados desde el Visualizador Meteorológico VisMet del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)2.

Finalmente, se analizaron los caudales fluviales en 6 estaciones fluviométricas distribuidas en la cuenca Alta del Río Maipo. En los datos obtenidos, se observa una clara tendencia en el aumento de los valores para el 22 y 23 de junio de 2023, principalmente para las estaciones de El Río Volcán en Queltehués y para la estación Río Colorado antes Junta Río Maipo, cuyo aumento máximo fue desde 106 a 514.9 m³/24h para esta última estación (Tabla 5 y Gráficos 5 - 6). Sumado a esto, se ha analizado y registrado la turbiedad en dos de las estaciones fluviométricas, siendo las únicas que cuentan con este tipo de información. Estos resultados coinciden con las tendencias de los datos de desplazamiento del Río Atmosférico Zonal, precipitación acumulada, aumento en la altitud de la isoterma 0°C y temperatura del aire los cuales mostraron variaciones concentradas alrededor del 23 de junio de 2023.

DATE FROM JUNE 19 TO 27, 2023	RIO MAIPO EN QUELTHUELAS	RIO VOLCAN EN QUELTHUELAS	CANAL QUELTHUELAS	RIO COLORADO ANTES JUNI/ARIO MAIPO	RIO YESO		RIO COLORADO	
	Cod 05/701009-6 386,768 mte 6,257,461 mN Caudal (m3/seg)	Cod 05/702001-6 387,971 mte 6,258,289 mN Caudal (m3/seg)	Cod 05/705002-0 389,232 mte 6,250,732 mN Caudal (m3/seg)	Cod 05/707002-1 372,847 mte 6,282,122 mN Caudal (m3/seg)	Cod 05/708015-1 397,096 mte 6,271,477 mN Caudal (m3/seg)	Turbiedad (NTU)	Cod 05/707005-6 380,060 mte 6,287,174 mN Caudal (m3/seg)	Turbiedad (NTU)
EVENT ACCUMULATED FLOOD [m³/seg]	2308.7	6177.2	2914.5	5770.2	1822.5	-	16652.0	-
AVERAGE [m³/seg or NTU]	5.3	14.3	6.8	26.7	4.2	89.8	38.5	154.0
MEAN [m³/seg or NTU]	0.2	9.0	6.7	13.3	2.5	57.1	49.1	137.0
MAXIMUM VALUE REGISTERED [m³/seg or NTU]	35.2	64.2	7.4	147.4	28.3	5127.2	72.2	3214.3
DATE MAXIMUM VALUE REGISTERED	22-06-2023 0:00	23-06-2023 afternoon	20/06/2023 Afternoon	23/06/2023 20:56	22/06/2023 18:00	22/06/2023 17:00	6/2023 Early Morning	23/06/2023 07:42
MINIMUM VALUE REGISTERED [m³/seg or NTU]	0.2	2.9	6.7	4.0	1.7	0.7	45.3	114.8
DATE MINIMUM VALUE REGISTERED	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates
MAXIMUM FLOOD INTENSITY [mm/h]	35.2 m³/0.5h	64.2 m³/0.5h	7.4 m³/0.5h	147.4 m³/h	28.3 m³/0.5h	-	72.2 m³/0.5h	-
STANDARD DEVIATION	8.3	15.5	0.1	34.3	1.8	28.8	9.9	49.9
MODE	0.2	3.0	6.7	4.4	1.7	2.4	72.2	120.7
DATE ACCUMULATED RAINFALL AND AVERAGE FLOOD [m³/24H OR NTU/24H]	19-06-2023	319.5	145.8	316.0	110.4	112.2	145.5	145.5
	20-06-2023	145.8	145.0	334.7	105.1	357.8	100.2	360.6
	21-06-2023	325.6	146.1	329.0	106.0	183.6	132.7	361.4
	22-06-2023	813.3	511.4	322.5	514.9	214.3	333.4	1198.7
	23-06-2023	497.9	2472.0	322.5	2594.9	406.4	78.1	3427.7
	24-06-2023	7.4	1316.2	322.5	1459.3	138.3	56.0	3448.3
25-06-2023	7.4	611.8	322.5	435.6	134.7	33.5	2592.0	120.0
26-06-2023	7.4	466.6	322.5	322.5	101.6	12.6	2358.4	122.6
27-06-2023	7.4	413.3	322.5	307.7	85.0	4.1	237.5	131.8
TOTAL	2308.7	6177.2	2914.5	5770.2	1822.5	808.1	16652.0	1386.2

Tabla 5. Datos y análisis estadístico de los registros de estaciones fluviométricas para caudales fluviales y turbiedad registrados desde el 19 al 27 de junio de 2023 para 6 estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Fuente: Datos extraídos y editados desde el sitio web de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile.

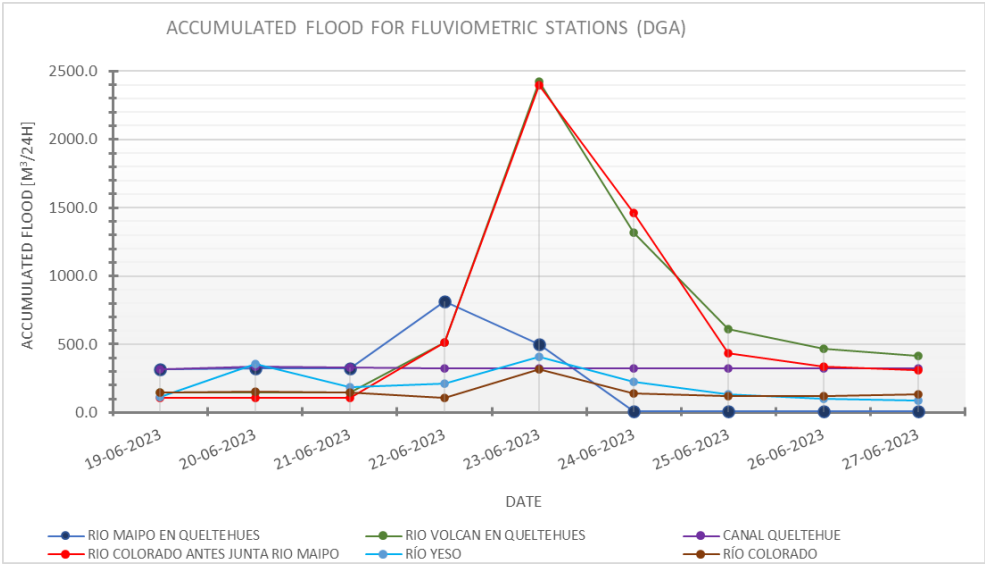


Gráfico 5. Registro de los caudales acumulados (m³/24h) registradas desde el 19 al 27 de junio de 2023 para 6 estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) representadas en distintos colores según su ubicación.

Fuente: Datos extraídos y editados desde el sitio web de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile.

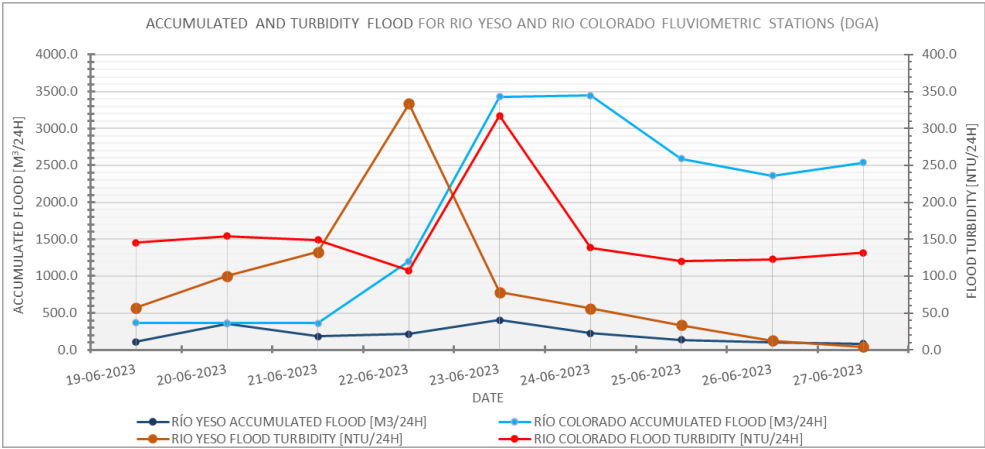


Gráfico 6. Registro de los caudales acumulados (m³/24h) y turbiedad fluvial (NTU/24h) registradas desde el 19 al 27 de junio de 2023 para 2 estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) representadas en distintos colores según su ubicación y tipo de dato.

Fuente: Datos extraídos y editados desde el sitio web de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile.

4. ANÁLISIS DEL EVENTO: DESEMBOCADURA RÍO MAIPO

La desembocadura del río Maipo durante el periodo pre y post inundaciones (febrero a julio de 2023) presentó cambios morfológicos importantes debido a efectos de eventos extremos. Durante el verano de 2023 ocurrió un proceso de cierre de la desembocadura donde se debió realizar dos aperturas mecánicas debido al peligro de inundación a las viviendas localizadas a las riberas del río (febrero 2023), lo cual modificó el ancho de la desembocadura. En junio de 2023, las inundaciones provocaron un colapso de la espiga litoral norte, encauzando el río por la ribera norte (Figura 10). En febrero de 2023, el ancho de la desembocadura luego de la primera apertura mecánica era de 48 metros, luego a partir de la segunda apertura mecánica era de 62 metros mientras que el 5 de julio era de 555 metros.

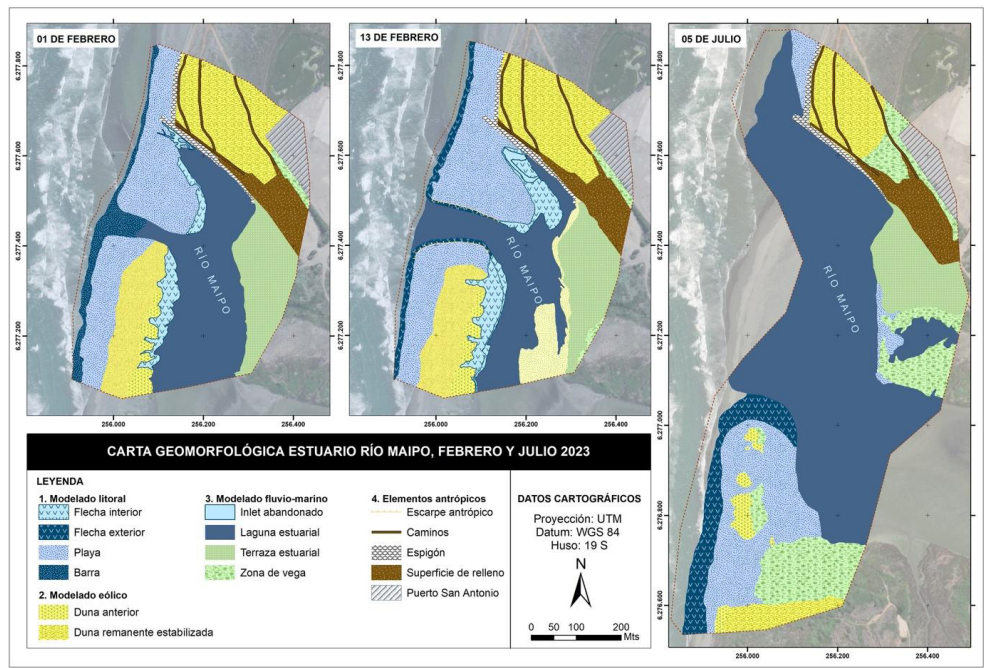


Figura 10. Cambios morfológicos en la desembocadura del río Maipo, pre y post inundaciones

Fuente: Elaboración propia a partir de vuelos DRON.

4.1 MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

Para la zona de la desembocadura del río Maipo, las medidas preventivas fueron lideradas por la Unidad de Gestión del Riesgo de la Municipalidad de San Antonio y la Delegación Presidencial Provincial en colaboración con SENAPRED que apoyó en asesoría, y la Dirección General de Aguas (DGA) que apoyó en monitoreo. Dentro del proceso de monitoreo, se efectuaron visitas preventivas días antes para alertar a los vecinos de la amenaza y para hacer recomendaciones para la movilización de sus animales. Considerando datos de las entrevistas a actores locales claves, se extrae que el momento crítico de la emergencia fue el día viernes 23 de junio a las 12.30 am, cuando la estación de monitoreo de la DGA se inundó. Desde ese momento la Delegación Presidencial debió activar un monitoreo manual con estacas en cinco puntos del río, a saber: Caleta de pescadores de la desembocadura, asentamientos informales de Estero el Sauce, Lo Gallardo, San Juan y Cuncumén (apoyado con personal de carabineros). Esta operación manual fue la que les permitió alertar a la población cercana a la ribera del río de la inundación.

Por parte de los vecinos que habitaban las zonas colindantes con el río Maipo en la desembocadura, los agricultores entrevistados indicaron que con base a sus propios conocimientos fueron monitoreando el río, puesto que a través de las noticias en televisión se informaron de las fuertes precipitaciones río arriba. Los agricultores monitorearon la posibilidad de desborde del río, estableciendo un cálculo auto proyectado de aproximadamente 24 horas de margen, entre el desborde río arriba y el que ocurriría río abajo, todo con base a su propia experiencia. Debido a estas estrategias de monitoreo vecinal junto al trabajo en terreno de actores locales como la Unidad de Gestión del Riesgo de la Municipalidad, la alcaldesa, la delegada presidencial, el INDAP, un concejal, y PRODESAL, la mayoría de los agricultores alcanzó a sacar sus animales y maquinaria agrícola, pero la pérdida de las cosechas y cercos fue inevitable.

4.2 EL DESASTRE

Los datos recabados en torno a la desembocadura del Río Maipo permitieron identificar 6 áreas críticas (Figura 11). En la comuna de San Antonio destacan las chacras de agricultores en Lo Gallardo, Punta Diamante y San Juan, mientras que en la comuna de Santo Domingo se señala el Santuario de la Naturaleza “Humedal Río Maipo” y las chacras de Santo Domingo y Los Gómez. Para la mayoría de los casos, el principal daño físico fue la pérdida de cosechas, en específico, la pérdida total de cosechas de hortalizas, incluyendo afectación de cercos, animales, fauna y maquinaria agrícola.

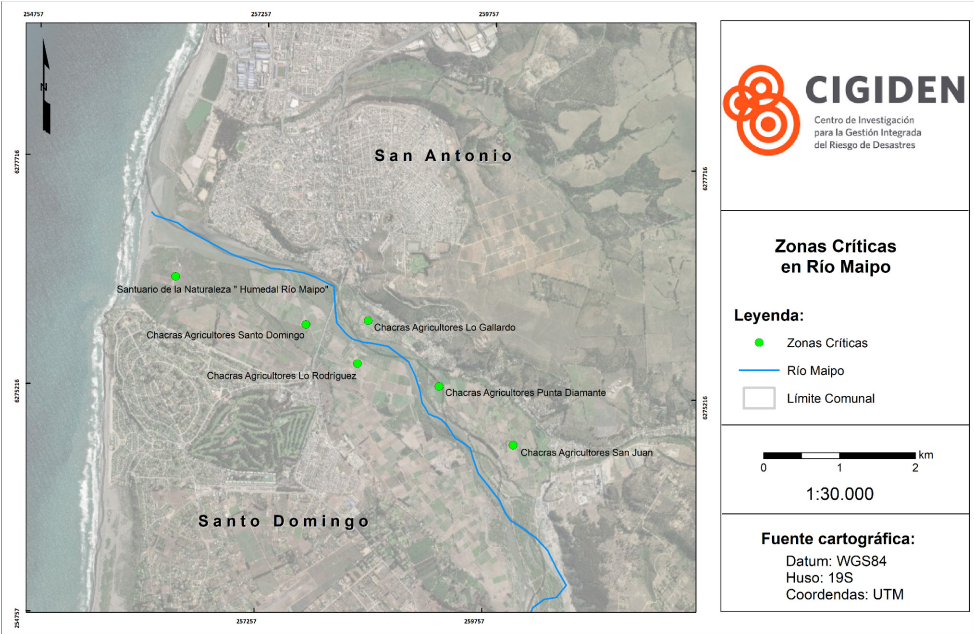


Figura 11. Zonas con afectación crítica río Maipo

Fuente: Elaboración propia

El grupo de población con mayor vulnerabilidad ante la inundación fueron los agricultores de los sectores de Lo Gallardo, San Juan y Santo Domingo, con énfasis en personas mayores. Respecto a la funcionalidad de servicios, el desborde afectó la disponibilidad de suministro de agua potable por alrededor de tres días, no obstante, se dispuso de camiones aljibes para asegurar el suministro. En torno a elementos de percepción del riesgo, se establece que los agricultores no pudieron anticiparse a la posibilidad de eventos de inundación en este período, debido a la escasez hídrica por precipitaciones experimentadas hace años. Sin embargo, antes de la sequía y el consiguiente cambio en el patrón de las lluvias, las inundaciones eran conocidas y experimentadas como un evento “normal” en este sector. Este cambio en el patrón de las lluvias explica que los agricultores plantaran en fechas en las que antiguamente se experimentaban desbordes.

4.3 RESPUESTA INSTITUCIONAL AL DESASTRE

En relación a la respuesta institucional al desastre, se evidenció que la Unidad de Gestión del Riesgo de la Municipalidad de San Antonio, llevó a cabo un catastro de daños individualizado por cada agricultor. Así también, los asistentes sociales de la misma institución aplicaron la Ficha Básica de Emergencia para disponibilizar recursos desde el Ministerio de Desarrollo Social y Familia, pero presentaron problemas en su aplicación, pues los indicadores no lograban capturar el daño agrícola experimentado por los habitantes de la zona. Al respecto, la delegación presidencial indica que se aplicó a posterior la ficha de emergencia agrícola dependiente del Ministerio de Agricultura. El trabajo en terreno realizado permitió identificar una descoordinación entre ministerios y municipios en la aplicación de fichas necesarias para la asignación de recursos y ayudas. Adicionalmente, tanto INDAP, PRODESAL, SECPLAN y FOSIS, instituciones con las cuales las asociaciones de agricultores mantienen convenios o colaboraciones, se encontraban elaborando una lista individualizada para la entrega de ayudas. Es relevante establecer que las ayudas se identifiquen y se entreguen de forma individualizada y diferenciada, puesto que los agricultores poseen distintas necesidades en lo que respecta al tipo de producción agrícola a la que se dedican y la infraestructura requerida.

4.4 EXPECTATIVAS DE RECUPERACIÓN Y REQUERIMIENTOS TÉCNICO CIENTÍFICOS

La comunidad de agricultores que fue la más afectada por el evento en la zona de la desembocadura, espera un aporte individualizado para la etapa de reconstrucción y recuperación. Destacan la existencia de necesidades diferenciadas, por ejemplo, apoyo con semillas de distintas hortalizas, debido a que cada agricultor se dedica a una producción diferente de hortalizas. Asimismo, la infraestructura agrícola, tales como cercos y maquinaria, no fue afectada de manera homogénea, de modo que se requiere una diferenciación entre daños y ayuda por agricultor.

En cuanto a los requerimientos técnico-científicos, los actores claves entrevistados, principalmente tomadores de decisión, destacan la necesidad de devolución del informe técnico que se elabore. Específicamente, la Unidad de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de San Antonio, indica la necesidad de que se realicen charlas de formación en gestión del riesgo de desastres. Asimismo, la delegada Provincial indica que se requiere más de un instrumento de medición para el caudal y nivel del río, ya que al existir sólo uno su funcionamiento es falible, y el monitoreo de estas variables es crucial para establecer una correcta evacuación.

5. ANÁLISIS DEL EVENTO: CUENCA ALTA RÍO MAIPO

5.1 COMPORTAMIENTO DEL EVENTO Y DESARROLLO DEL DESASTRE

Como se mencionó anteriormente, la Cuenca Alta del Río Maipo central presenta una alta variabilidad geológica, geomorfológica, vegetacional, climática e incluso antropogénica, cuyos factores condicionantes que la caracterizan, resultan ser idóneos para el desarrollo de amenazas hidrometeorológicas. Específicamente la cuenca Alta del Río Maipo central está conformada por 87 macro-cuencas las cuales en su mayoría han registrado en alguna oportunidad algún evento de remoción en masa, siendo más recurrentes los registros de remociones en masa tipo flujos (aluviones). En el caso del evento de junio, se registraron 256 puntos de activación de remociones en masa tipo flujos, 553 surcos de erosión superficial (incisiones), 19 deslizamientos (originados y/o reactivados), 16 puntos de caídas de rocas y 16 puntos medidos de inundación fluvial (Figura 12 - Tabla 6). Esto es relevante debido a que los registros anteriores (catastros de remociones en masa) no han alcanzado esta cantidad, superando ampliamente los datos estadísticos históricos disponibles. Lo anterior se debe a varios motivos:

- Características y distribución de las precipitaciones: sobresaturación del suelo debido a la alta duración e intensidad de las precipitaciones. Se estiman con un periodo de retorno que va entre los 50 a 100 años.
- Altas temperaturas: Esto desarrolla deshielo en las altas cumbres, aumentando súbitamente la saturación del suelo.
- Isotherma 0°C. La subida de altitud de la isoterma cero influye en una mayor captación de aguas lluvias por hoya hidrográfica, aumentando directamente la susceptibilidad a la generación de este tipo de amenazas.
- Falta de metodologías robustas de levantamiento de información en terreno (catastros de remociones en masa).

Entre otras causas:

- Influencia antropogénica: asentamientos con movilización del suelo o ubicados en laderas o cercanías de estas generan inestabilidad de talud que a su vez aumenta la susceptibilidad aportando material sedimentario a las zonas bajas.
- Densidad vegetacional: una baja a media densidad vegetal contribuye a una menor retención e infiltración del suelo.
- Hidromorfología de las cuencas.
- Unidades geológicas: En general las cuencas están conformadas por tener un alto porcentaje de roca expuesta y material sedimentario en sus partes bajas, contribuyendo con escorrentía directa e intensa erosión en sus partes bajas.
- Otros factores condicionantes.

Se destaca la variabilidad en las características observadas entre los flujos desarrollados en enero de 2023 en comparación los observados en junio de 2023 (este evento). En el caso del evento de junio, los flujos se caracterizaron (en su fase terminal) por ser flujos hiperconcentrados, en su mayoría. Esto es relevante ya que requiere de varios factores involucrados que usualmente no se ven presentes, entre ellos una lluvia con alta intensidad y/o duración, que desencadene un caudal semejante a los caudales de tipo torrencial, indicando una sobresaturación y erosión extrema del suelo y laderas, cuyas consecuencias pueden ser bastante graves si eventos como este se repiten debido a su velocidad, energía de impacto y extensión de las zonas de impacto. Por el contrario, los flujos observados en enero de 2023 tenían características cercanas a lo normal; con un depósito conservado (relieve positivo), velocidades medias y bajas, morfologías en lóbulo y abanico, y una viscosidad del flujo típica de debris/mud flow (flujos de detritos o lodo) de alta montaña (Figura 13, 14, 15).

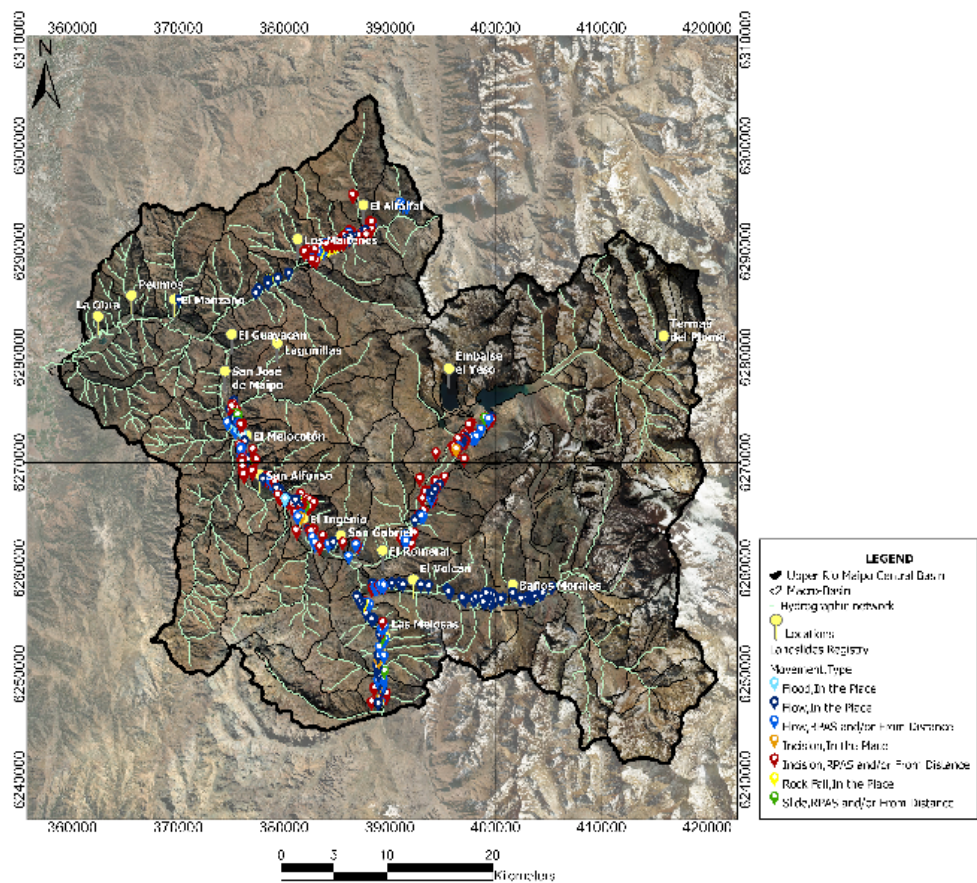


Figura 12. Mapa de remociones en masa e inundaciones detectadas para la campaña de terreno efectuada desde el 3 al 10 de julio de 2023 para las tormentas que afectaron a la cuenca Alta del Río Maipo desde el 21 al 26 de junio de 2023.

Fuente: Elaboración propia.

TYPE OF MOVEMENT - HAZARD	NUMBER - ACTIVATION POINT
FLOW (MUD/DEBRIS/HYPERCONCENTRATED)	256
EROSION GROOVES (INCISIONS)	553
SLIDE (ROCK AND GROUND)	19
ROCK FALL	16
FLOOD	16

Tabla 6. Resumen de los puntos de activación de remociones en masa e inundaciones detectados para el evento de precipitaciones desde el 21 al 26 de junio de 2023.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 13. Capturas de imágenes ópticas comparativas entre las remociones en masa tipo flujo desarrolladas para las tormentas del 7 al 9 de enero de 2023 (imagen de la izquierda) y las desarrolladas para las tormentas del 21 al 26 de junio de 2023 (imagen de la derecha) para la cuenca Los Maitenes. Se observan diferencias en las características del depósito, alturas, potencia de erosión, densidad y estado de la vegetación (se incluyen los desprendimientos de arbustos y árboles), cambios en la dirección del estero, entre otras.

Fuente: Fotografías de Francisca Roldán.



Figura 14. Capturas comparativas en plano cenital RPAS entre las remociones en masa tipo flujo desarrolladas para las tormentas del 7 al 9 de enero de 2023 (imagen superior) y las desarrolladas para las tormentas del 21 al 26 de junio de 2023 (imagen inferior) para la cuenca Los Maitenes. Se observan diferencias en las características del depósito, alturas, densidad y estado de la vegetación, cambios en la dirección del estero, entre otras.

Fuente: Fotografías de Francisca Roldán.



Figura 15. Capturas comparativas en plano frontal entre las remociones en masa tipo flujo desarrolladas para las tormentas del 7 al 9 de enero de 2023 (imagen de la izquierda) y las desarrolladas para las tormentas del 21 al 26 de junio de 2023 (imagen de la derecha) para la cuenca Chorro de La Vieja.

Fuente: Fotografías de Francisca Roldán.

Otro aspecto a destacar es la distribución de las remociones en masa analizadas, las cuales no siguieron un patrón evidente, viéndose un contenido de humedad y activación de quebradas en prácticamente la gran mayoría de la cuenca. Sin embargo, se destaca que las cuencas donde incluían un porcentaje importante (<30%) de área sobre la isoterma 0°C, presentaban remociones en masa tipo flujo con depósitos de relieve positivo (depósito conservado), mayor viscosidad y características cercanas a los debris o mud flow (flujos de detritos o lodo), presentando menores velocidades de flujo y menor energía de impacto. Esto comprueba que las variaciones en la isoterma 0°C, sumado a la distribución y características de las lluvias fueron cruciales para establecer las tasas de erosión y, por ende, las características resultantes de los flujos y sus activaciones asociadas.

Respecto a los resultados, se destaca que las cuencas que recurrentemente se activaron presentaron igualmente activaciones para este evento en particular (Los Maitenes, San José de Maipo, San Alfonso, quebrada roja del Camino Al Volcán, cuenca del Fundo Cruz de Piedra, cuenca Chorro de la Vieja, Ladera de la localidad de San Alfonso, El Manzano, Baños Morales, Las Cucas, entre otras), no presentando anomalías respecto a esto, salvo las características de flujos hiperconectados que presentaron. Por otro lado, se observó un número muy grande de incisiones con reactivación evidente,

microcuencas activadas y cuencas que no se habían activado en un rango importante de años como por ejemplo la cuenca Coyanco, debido a las propias características torrenciales de este evento.

5.2 DAÑOS ESPECÍFICOS A LAS RED VIAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAIPO.

En el marco de la evaluación de la infraestructura vial en la zona del Cajón del Maipo, se llevó a cabo un catastro de daños en la red vial, con énfasis en la Ruta G-25. La Ruta G-25, con una extensión de aproximadamente 75 kilómetros, sirve como una conexión vital entre el Área Metropolitana de Santiago y el Cajón del Maipo hasta la localidad de El Volcán. El catastro se llevó a cabo en colaboración con la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP), con la finalidad de identificar y evaluar los puntos afectados en la red vial. Los resultados se utilizarán para la validación y aplicación de modelos de riesgo en la Plataforma de gestión de riesgo de redes viales SIGER-RV. SIGER-RV es una herramienta computacional implementada en una plataforma SIG para la toma de decisiones y modelación del riesgo de redes viales expuestas a eventos naturales como sismos, erupciones volcánicas, y eventos hidro-meteorológicos (inundaciones, flujos de detritos, aluviones, socavación, anegamiento, deslizamiento de taludes, entre otros). La plataforma fue desarrollada por un equipo de investigadores de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de Concepción y CIGIDEN, contando como instituciones asociadas a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, la asociación gremial de asociaciones público-privadas COPSA y SENAPRED.

5.2.1 Detalle del Catastro de Daños

Área de Catastro:

- La evaluación se centró en la Ruta G-25 y otras rutas pertenecientes a la cuenca del Maipo alto, como la G-27, G-355, G-455 y la G-465.

Resultados del Catastro:

- Se identificaron un total de 11 puntos de emergencia vial, de los cuales 10 presentaron daños graves y solo uno fue moderado.
- En cuanto a la operatividad de la red, dos puntos sufrieron una interrupción total de la operación, cinco estaban parcialmente operativos y cuatro seguían operativos, pero con daños evidentes.

ID Emergencia	Infraestructura Afectada	Elemento	Operatividad	Nivel de Gravedad	Fecha	Servicio	Región	KM Inicio	KM Final	ROL
11159	Lagunillas - Centros de Ski	Carpeta de Rodadura	Operativo	Grave	23/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	1.7	17.05	G-355
11150	Av. La Florida - San José de Maipo - Lo Valdés	Otro Elemento	Operativo	Grave	23/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	39.3	39.6	G-25
11151	Av. La Florida - San José de Maipo - Lo Valdés	Puente	Operativo	Grave	25/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	39.77	39.79	G-25
11163	El Ingenio	Elementos de Seguridad	Operativo	Moderado	23/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	0.1	0.8	G-451
11156	Av. La Florida - San José de Maipo - Lo Valdés	Carpeta de Rodadura	Parcialmente Operativo	Muy Grave	23/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	49.467	49.587	G-25
10646	Av. La Florida - San José de Maipo - Lo Valdés	N/A	Parcialmente Operativo	Grave	22/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	64	75	G-25
10647	Av. La Florida - San José de Maipo - Lo Valdés	N/A	Parcialmente Operativo	Grave	22/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	49.6	49.7	G-25
10572	Romeral - Embalse El Yeso - Termas El Plomo	N/A	Parcialmente Operativo	Grave	24/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	9	14	G-455
10569	Las Melosas	N/A	No Operativo	Grave	24/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	2.9	2.9	G-465
10563	Av. La Florida - San José de Maipo - Lo Valdés	Puente	Parcialmente Operativo	Grave	23/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	47.2	47.2	G-25
10564	Baños Morales	Puente	No Operativo	Grave	23/06/2023	Dirección de Vialidad	Metropolitana de Santiago	0	0	S/R-G-453

Tabla 7. Puntos de emergencias reportados en SIEMOP por la Dirección de Vialidad en <https://ide.mop.gob.cl/Emergencias/>

Fuente: Elaboración propia con base a los datos reportados por el Sistema de información de Emergencias del Ministerio de Obras Públicas (SIEMOP-FEMN) en el Visor de Emergencias y Operatividad del Ministerio de Obras Públicas (MOP) <https://ide.mop.gob.cl/Emergencias/>

Principales Daños Observados:

- Aluviones o flujos de detritos transversales al camino se observaron entre los kilómetros 64 al 75, lo que provocó interrupción total o parcial de la ruta. Estos fueron solucionados mediante el retiro del material sobre la calzada.



Figura 16. Tramo afectado por flujo de detritos en sector el volcán.

Fuente: Fotografía CIGIDEN.

- Aluviones o flujos de detritos paralelos a la calzada, encauzados, causaron erosión lateral de los terraplenes. Destacamos un socavón en el Km 49.5 que afectó una de las pistas, dejando solo una operativa.



a. Terraplén socavado por flujo lateral b. Solo una calzada habilitada en km 49.5

Figura 17. Tramo afectado en km 49.5.

Fuente: Fotografía CIGIDEN

- Ambos terraplenes de acceso del Puente Mecano San Alfonso, ubicado en el kilómetro 47.2, sufrieron procesos erosivos, dejando el puente inoperativo y habilitando solo un paso para vehículos pesados.



a. Terraplenes de acceso puente Mecano San Alfonso



b. Zona bajo el paso habilitado para camiones pesados en puente Mecano San Alfonso

Figura 18. Puente Mecano en San Alfonso.

Fuente: Fotografía CIGIDEN

- Se observaron alcantarillas desplazadas por el flujo de material, con acumulación de agua en la calzada.



a. Alcantarilla afectada en km 68.7



b. Obra de arte afectada en km 71

Figura 19. Alcantarillas afectadas por flujos de detritos.

Fuente: Fotografía CIGIDEN

- Aunque no se identificaron deslizamientos de taludes, se registraron desprendimientos de rocas en el kilómetro 50.



Figura 20. Desprendimiento de rocas km 50.

Fuente: Fotografía CIGIDEN.

Uso de los Datos de Daños:

- Los datos de daños recolectados en el terreno serán fundamentales para validar y calibrar las curvas de fragilidad de terraplenes expuestos a flujos de detritos laterales y transversales desarrolladas por Nieto et al (2022) y Nieto et al (2021) respectivamente. Estos modelos se encuentran dentro de la *Plataforma Computacional SIGER-RV*².

La evaluación de los daños en la red vial de la cuenca alta del Río Maipo, otorga antecedentes que subrayan la crítica situación de la red vial del Cajón del Maipo, especialmente en la Ruta G-25, debido a su nivel de exposición condicionada por sus características geográficas y geológicas lo cual conlleva a interrupción de la operación de la red vial. Destaca además por su naturaleza montañosa la falta de redundancia de la red en algunos sectores lo cual hace más crítico el análisis de riesgo y mejora de la resiliencia de la ruta. La colaboración con la Dirección de Vialidad y la disponibilidad de datos en la Plataforma SIEMOP fueron esenciales para una evaluación precisa. Los datos recolectados en el terreno son esenciales para fortalecer la gestión del riesgo en redes viales mediante la calibración y validación de la herramienta computacional SIGER-RV.

[2] SIGER-RV: Herramienta para la Gestión del Riesgo en Redes Viales. Es una herramienta computacional desarrollada en un ambiente SIG que se creó en los Proyectos FONDEF ID14I10309 y ID14I20309. Sus características incluyen la evaluación del riesgo de la red vial bajo diferentes amenazas naturales (amenazas sísmicas, hidrometeorológicas y volcánicas), análisis origen-destino y análisis de redes, así como la consideración de fragilidad de las infraestructuras viales, vulnerabilidad social de la población y acceso a infraestructura crítica.

6. APRENDIZAJES Y RECOMENDACIONES

A continuación, presentamos recomendaciones y aprendizajes para cada una de las zonas analizadas, con el fin de abordar las particularidades que presentan la Desembocadura y la Cuenca Alta del Río Maipo.

DESEMBOCADURA RÍO MAIPO

- Durante las fases de mitigación y preparación, se recomienda realizar estudios de riesgo de inundación originados por desborde de cauces, para que sean incorporados en los protocolos de evacuación y en los Instrumentos de Planificación Territorial. Esta información técnica debe incluir información respecto a dinámicas del río, tales como pH, batimetría, manejo de la barra, entre otras. Para la zonificación de la inundación se debe considerar imágenes de radar, satelitales, drones u otras. Así también, es importante que, a nivel de planificación territorial, se articule coherentemente las zonas costeras con la zonificación del plan regulador..
- Se identifica la necesidad de robustecer el sistema de monitoreo de los niveles del río en las estaciones de la Dirección General de Aguas. La implementación de mecanismos alternativos de medición de caudal, o la incorporación de instrumentos adicionales, permitiría una continuidad en el monitoreo, evitando los vacíos de información producidos por la dependencia de una única estación.
- Así también, es clave implementar sistemas de monitoreo de la desembocadura, para prevenir efectos sinérgicos entre episodios de cierre de la barra e inundaciones, que se pueden combinar con otros escenarios de peligro tales como eventos extremos (marejadas extremas, tormentas costeras, tsunamis, u otros).
- Como aprendizaje del proceso de respuesta y recuperación, es necesario que exista una mejor coordinación en la aplicación de fichas de emergencias o catastros de daños entre entidades comunales, provinciales, regionales y nacionales. Considerando el caso de los agricultores de la zona de la desembocadura, la canalización de recursos por parte de las entidades públicas será más atingente a las necesidades de los diferentes grupos si se logra captar la diversidad de daños sufridos.

- En cuanto al cuidado del ecosistema de la desembocadura, es relevante regular o fiscalizar la extracción de áridos en cauces. Por otro lado, se debe avanzar en el desarrollo de planes de recuperación de ecosistemas degradados por causas antrópicas, como por ejemplo pérdida de masa dunar y de humedales costeros, la alteración de cauces y quebradas locales, contaminación, entre otros. Los ecosistemas degradados no pueden realizar funciones de mitigación ante eventos extremos o servir de áreas de provisión de agua, recursos u otros durante la etapa de emergencia y reconstrucción.

CUENCA ALTA RÍO MAIPO

- Se recomienda mejorar el acceso vehicular, las zonas donde se presentan reiteradas activaciones de las cuencas (como por ejemplo la cuenca de San Alfonso, Los Maitenes, Baños Morales y San José de Maipo), reestructurando a su vez los colectores de aguas lluvias, considerando el desarrollo y curso de caudales detríticos de alto volumen y velocidad, incluyendo el transporte de bloques de escala métrica, escombros de tipo vegetal, material de construcción, materiales de desechos domiciliarios, entre otros.
- Se recomienda aumentar la altura de los puentes y obras de infraestructura, dada las alturas registradas de los caudales detríticos y los recurrentes desbordes, que causan una obstaculización del trayecto natural del caudal aluvial, sobre todo considerando las características torrenciales registradas en el evento analizado en este informe.
- Se recomienda mejorar y mantener la estructura de los reforzamientos aluviales laterales. En este sentido, es importante mantenerlos y/o reestructurarlos (en el mejor de los casos) ya que el material desprendido está actuando como aportante de material sedimentario al cauce principal, aumentando el poder de impacto y volumen del caudal pendiente abajo.
- En línea con las falencias en el proceso de monitoreo identificadas también en el caso de la Desembocadura, se recomienda mejorar la distribución y aumentar el número de estaciones pluviométricas presentes en la cuenca del Río Maipo, con el fin de mejorar el registro de agua lluvia caída en cotas altas y bajas, incluyendo la medición de aguanieve. Esto permitirá una mejor esti-

mación de la captación de agua por hoya hidrográfica, predecir con mayor precisión los umbrales de activación aluvial y profundizar en el propio entendimiento de sus procesos para desarrollar a futuro modelos predictivos de mayor exactitud que puedan contribuir a la toma de decisiones.

- Debido a las características observadas en esta área en particular, la cual presenta factores condicionantes idóneos para el desarrollo de remociones en masa tipo flujo, se recomienda tomar medidas con el objetivo de proteger las zonas urbanas que se encuentran cercanas al cauce principal. Es importante que los Planes Reguladores Comunales tengan información actualizada sobre los riesgos existentes y las zonas más expuestas a los diferentes tipos de amenazas.
- Es crítico el mejoramiento del camino a El Volcán, junto al desarrollo de obras de protección lateral (como mallas dinámicas), debido a su cercanía con laderas de activación recurrente de aluviones, caídas de rocas y deslizamiento, los cuales tienen alta probabilidad de impacto a la población circundante.
- Se recomienda limitar y mejorar las medidas preventivas del Embalse El Yeso, ya que la ruta de trekking establecida presenta una alta susceptibilidad a impacto de remociones en masa tipo caída de rocas, deslizamientos y flujos. Se ha evidenciado en esta zona una alta afluencia de turistas, que incluyen niños, bebés y mascotas sin ninguna medida de control, instrucciones ni resguardo ante el impacto de este tipo de amenazas.
- Tomando en consideración las características del evento de junio 2023, se recomienda tomar medidas que regulen y limiten el tránsito vehicular en el sector de La Obra, puesto que la cuenca Alta del Río Maipo es una zona altamente susceptible a multiamenazas que pueden impactar de distintas formas y magnitudes a los turistas que quieran ingresar y recorrer el área. Por lo tanto, se debería mantener un registro de los visitantes, entregar un set de recomendaciones e instrucciones; mapas de zonas de seguridad; mapas de ubicación de refugios; así como limitar la edad de acceso en ciertos sectores turísticos, entre otras medidas que pudieran ser atingentes.

REFERENCIAS

- Chamorro, A., Echaveguren, T., Pattillo, C., Contreras-Jara, M., Contreras, M., Allen, E., Nieto, N., & De Solminihaç, H. (2023). SIGER-RV: a Web-Geographic Information System-Based system for risk management of road networks exposed to natural hazards. *Transportation Research Record*, 036119812311695. <https://doi.org/10.1177/03611981231169532>
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., Besteiro, S. (2012). Morphometric characterization of the upper watershed of the Sauce Grande River, Buenos Aires, Argentina. Congreso de Medio Ambiente AUGM. 22 al 24 de mayo de 2012. Universidad Nacional de la Plata. Argentina. 25p.
- Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515-1534. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0135.1>
- Garreaud, R. (2023). Vuelven los gigantes: un análisis preliminar de la tormenta ocurrida entre el 21 y 26 de junio de 2023 en Chile central. Reporte de Center for Climate and Resilience Research (CR)2. Consultado el 4 de julio 2023. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelven-los-gigantes-un-analisis-preliminar-de-la-tormenta-ocurrida-entre-el-21-y-26-de-junio-de-2023-en-chile-central/>
- González, G., Jensen, E., Aron, F., Roldán, F., Sáez, E., Díaz, F., Candia, G., Gironás, J., Escauriaza, C., Saldías, J., Aranguiz, R., Gilabert, H., De la Barra F., Zúñiga, A. (2022). Guía Metodológica para la Caracterización de la Multiamenaza de la Cuenca del Río Maipo. Proyecto FONDEF 19i10021.
- Neiman, P. J., Ralph, F. M., White, A. B., Kingsmill, D. E., & Persson, P. O. G. (2002). The statistical relationship between upslope flow and rainfall in California's coastal mountains: Observations during CALJET. *Monthly Weather Review*, 130(6), 1468-1492. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<1468:TSRBUF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1468:TSRBUF>2.0.CO;2)
- Neiman, P. J., Ralph, F. M., Wick, G. A., Lundquist, J. D., & Dettinger, M. D. (2008). Meteorological characteristics and overland precipitation impacts of atmospheric rivers affecting the west coast of North America based on eight years of SSM/I satellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 9(1), 22-47. <https://doi.org/10.1175/2007jhm855.1>
- Nieto, N., Chamorro, A., Echaveguren, T., & Escauriaza, C. (2023). Fragility curves for road embankments exposed to adjacent debris flow. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47(1), 105-122.
- Nieto, N., Chamorro, A., Echaveguren, T., Sáez, E., & González, A. (2021). Development of fragility curves for road embankments exposed to perpendicular debris flows. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1560-1583.

- Pandey, G. R., Cayan, D. R., & Georgakakos, K. P. (1999). Precipitation structure in the Sierra Nevada of California during winter. *Journal of Geophysical Research*, 104(D10), 12019-12030. <https://doi.org/10.1029/1999jd900103>
- Powers, M. C. (1953b). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 23. <https://doi.org/10.1306/d4269567-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Ralph, F. M., Rutz, J. J., Cordeira, J. M., Dettinger, M. D., Anderson, M. L., Reynolds, D. W., Schick, L. J., & Smallcomb, C. (2019). A scale to characterize the strength and impacts of atmospheric rivers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(2), 269-289. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0023.1>
- Rhea, J. O., (1978). Orographic precipitation model for hydrometeorological use. Ph.D. dissertation, Colorado State University, Dept. of Atmospheric Science Paper 287, 198 pp.
- Rotunno, R., & Ferretti, R. (2001). Mechanisms of intense Alpine rainfall. *Journal of the atmospheric sciences*, 58(13), 1732-1749. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1732:MOIAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1732:MOIAR>2.0.CO;2)
- Rutllant, J. A., & Fuenzalida, H. (2007). Synoptic aspects of the Central Chile rainfall variability associated with the southern oscillation. *International Journal of Climatology*, 11(1), 63-76. <https://doi.org/10.1002/joc.3370110105>
- Smith, R. B. (1979). The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics* (pp. 87-230). [https://doi.org/10.1016/s0065-2687\(08\)60262-9](https://doi.org/10.1016/s0065-2687(08)60262-9)
- Servicio Geológico Colombiano, S.G.C. (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 100.000. Bogotá DC, Colombia.
- 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>
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377-392.



Este documento fue elaborado por el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres, CIGIDEN (Proyecto 1522A0005 Fondap 2022).

SOBRE CIGIDEN

CIGIDEN es un centro de excelencia FONDAP-ANID creado en 2011 e integrado por cuatro universidades: Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad Andrés Bello y Universidad Católica del Norte, más la colaboración de investigadores e investigadoras de otras instituciones académicas y gubernamentales tanto nacionales como internacionales.

Investigadores de diferentes disciplinas –ciencias de la tierra, ingenierías, ciencias sociales, geografía, economía, diseño, arquitectura, urbanismo y comunicaciones–, trabajan en CIGIDEN para generar conocimiento que permita evitar que los eventos extremos de la naturaleza no devengan en desastres.

Esta mirada interdisciplinaria ha promovido una profunda transformación académica, avanzando desde el estudio de las amenazas naturales y la respuesta de emergencia, hacia una perspectiva integral centrada en la reducción del riesgo de desastres y la construcción de resiliencia.



CIGIDEN, es una institución de excelencia FONDAP-ANID creada en 2011 e integrada por cuatro universidades chilenas. El actual documento presenta un análisis y recomendaciones sobre la Gestión del Riesgo de Desastres del evento hidrometeorológico del 21 al 26 de junio de 2023 que afectó la zona centro-sur de Chile y que produjo inundaciones en diferentes ciudades del país.

CIGIDEN se enfocó en el levantamiento de información post desastre. Para esto, concurrieron grupos de investigadores e investigadoras de diferentes disciplinas con el fin de levantar información en terreno. El presente informe se enfoca en la cuenca del Río Maipo. La finalidad de CIGIDEN es aportar con evidencia científica a la política pública para reducir y gestionar los desastres en Chile. En este sentido, creemos que rescatar aprendizajes de experiencias previas puede colaborar en preparar, mitigar y “reconstruir mejor”.



www.cigiden.cl