



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS DE LLUVIA SOBRE NIEVE EN LOS
ANDES DE CHILE CENTRAL: VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL,
PATRONES SINÓPTICOS Y RELEVANCIA EN LA GENERACIÓN DE
CRECIDAS NIVO-PLUVIALES.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y
CLIMATOLOGÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUCAS HERNÁN GLASNER VIVANCO

PROFESOR GUÍA:
RENÉ GARREUD SALAZAR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAMES MCPHEE TORRES
?

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
PROYECTO FONDAP 15110009
PROYECTO FONDECYT 1211412

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA
POR: LUCAS HERNÁN GLASNER VIVANCO
AÑO: 2022
PROF. GUÍA: RENÉ GARREUD SALAZAR

**EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS DE LLUVIA SOBRE NIEVE EN
LOS ANDES DE CHILE CENTRAL: VARIABILIDAD
ESPACIO-TEMPORAL, PATRONES SINÓPTICOS Y RELEVANCIA EN LA
GENERACIÓN DE CRECIDAS NIVO-PLUVIALES.**

bla bla

bla

Agradecimientos

blabla

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Marco Teórico	5
1.2.1. Balances de energía y masa en ambientes nivales.	5
2. Hipótesis y objetivos	8
2.1. Hipótesis:	8
2.2. Objetivos	8
2.2.1. Objetivo General:	8
2.2.2. Objetivos Específicos:	8
3. Metodología	9
3.1. Zona de Estudio	9
3.2. Fuentes de datos y características.	10
3.3. Técnicas de Análisis	11
4. El Rio Maipo En El Manzano	12
4.1. Morfología y características del terreno.	12
4.2. Comparación de fuente de datos para el estudio de la lluvia sobre nieve.	13
4.2.1. Elevación de la isoterma 0°C, nivel de congelamiento y gradientes de temperatura.	13
4.2.2. Cobertura nival, distribución vertical de la nieve y proxies del límite inferior.	13
4.2.3. Precipitaciones	16
4.2.4. Síntesis del análisis comparativo	16
4.3. Eventos de lluvia sobre nieve en el Rio Maipo En El Manzano	17
4.4. Discusión y síntesis	18
5. Casos de estudio	19
5.1. Caso de estudio evento ROS del 11 de Agosto de 2013	19
5.1.1. Observaciones hidrometeorológicas	19
5.1.2. Condición sinóptica	21
5.1.3. Discusión del evento	23
5.2. Caso de estudio evento ROS del 4 de Junio de 2008	23
5.2.1. Observaciones hidrometeorológicas	23
5.2.2. Condición sinóptica	27
5.2.3. Discusion del evento	28

6. Climatología de eventos de lluvia sobre nieve en Chile Central y características típicas asociadas	29
6.1. Análisis utilizando reanálisis ERA5, CR2MET y el observatorio andino.	29
6.2. Análisis utilizando reanálisis ERA5, CR2MET y el reanálisis SWE de Cortés and Margulis (2017).	31
6.3. Análisis compuesto y elementos típicos de una tormenta ROS	32
6.4. Discusión	32
7. Conclusiones	33
Bibliografía	35
Anexo A.	38
Anexo B.	41

Índice de Tablas

3.1. Características generales de los productos grillados factibles para detectar eventos ROS en Chile Central.	11
---	----

Índice de Ilustraciones

1.1.	Modelo conceptual de un evento de ROS. (a) Esquema de las principales elevaciones que dan origen a un evento ROS en una cuenca. (b) Esquema de las mismas elevaciones en relación a un corte transversal del ambiente de montaña. La línea segmentada indica la línea de nieves (SL), la línea continua indica el nivel de congelamiento (FL), la línea punteada la altura de la isoterma 0°C (H_0) y el área achurada en rojo es el área de influencia por ROS.	2
1.2.	Tormenta del 4 de Junio de 2008 en Chile Central que dio lugar a un evento ROS. La figura muestra imágenes MODIS en el rango visible para un día antes (2-Jun), durante (4-Jun) y después (5-Jun, 6-Jun) del evento. La línea roja muestra el SL previo a la tormenta (aproximadamente 1990m) y la línea negra las cuencas del sector (Aconcagua, Mapocho y Maipo). Figuras inferiores ilustran la pérdida de cobertura nival después del evento de precipitación.	3
1.3.	Esquema conceptual de los mecanismos involucrados en el balance de energía superficial de un manto nieve o hielo glaciar. Esquema extraído de https://cryo-tools.org/tools/cosipy/	6
3.1.	Delimitación geográfica de los dominios de análisis y variables estadísticas. (a): Orografía andina y extensión espacial de los dominios de montaña, regional y sinóptico (d1, d2 y d3 respectivamente). (b): Elevaciones del terreno en el dominio regional y de montaña. (c) Uso de suelo y principales cuencas de montaña en el dominio regional.	9
3.2.	Características generales del clima del valle y montaña en Chile Central. Figuras (a), (b) y (c) muestran respectivamente los promedios anuales de precipitación (CR2MET), temperatura (CR2MET) y equivalente de agua en nieve (Cortés and Margulis (2017)). Panel (d) muestra el climograma calculado con los datos de la estación DGF (2004-presente) en Santiago y el panel (e) muestra la cobertura nival promedio de la cuenca del Río Maipo En El Manzano (en contorno morado en los mapas) observada por el satélite MODIS.	10
3.3.	Regímenes hidrológicos de algunas de las principales cuencas de montaña en Chile Central. La figura indica el promedio de cada día del año (suavizado) junto con su intervalo de confianza (95 %).	10
4.1.	Características morfológicas y parámetros estáticos de la cuenca. Al lado izquierdo se tiene la abundancia de píxeles asociado a sus orientaciones geográficas (borde rojo) y los principales usos de suelo (borde verde). Al lado derecho se indica la distribución del área de la cuenca a lo largo de distintas elevaciones (borde azul) y la distribución de pendientes con la altura (borde morado).	12

4.2.	Distribución espacial de la altura de la isotermia 0°C en Chile Central. Colores rojos indican la distribución para todos los días y colores morados sólo los días con precipitación. Puntos redondos indican los valores promedio del valor entregado por el radiosonda de Santo Domingo.	13
4.3.	Distribución vertical de la cobertura nival en la cuenca para el 2005-10-09. La figura superior indica la distribución de nieve mediante el sensor MODIS/TERRA y la figura inferior para el sensor MODIS/AQUA. Cada figura muestra la sensibilidad de las curvas al fijar un umbral de fSCA como límite entre píxel con o sin nieve.	14
4.4.	Distribución vertical de la cobertura nival en la cuenca para distintas condiciones de nieve. La curva morada muestra la distribución asociada a un día en donde la última nevada fue hace 30 días, la curva verde cuando la última nevada fue hace 16 días y la curva anaranjada cuando la última nevada fue hace 4 días. A la derecha se muestran las imágenes del sensor MODIS/TERRA que generan cada curva.	15
4.5.	Análisis de sesgos en la cobertura nival del Río Maipo En El Manzano para el reanálisis de Cortés and Margulis (2017). La figura muestra la distribución de los sesgos diarios de cobertura nival entre el reanálisis (umbral de $SWE > 100mm$) y la cobertura del observatorio andino IANIGLA-CR2. Los colores indican las estaciones del año (azul: invierno, verde: primavera, rojo: verano y anaranjado: otoño) y la zona gris destaca la cuenca del Río Maipo En El Manzano.	16
4.6.	Área pluvial y cobertura nival en la cuenca del Río Maipo En El Manzano para el reanálisis de Cortés and Margulis (2017). La figura muestra la distribución de los sesgos diarios de cobertura nival entre el reanálisis (umbral de $SWE > 100mm$) y la cobertura del observatorio andino IANIGLA-CR2. Los colores indican las estaciones del año (azul: invierno, verde: primavera, rojo: verano y anaranjado: otoño) y la zona gris destaca la cuenca del Río Maipo En El Manzano.	16
4.7.	Diagramas de taylor para las muestras de altura de la isotermia cero, el límite inferior de la nieve y la cobertura nival durante las estaciones del año. Las columnas indican la estación del año y el gráfico asociado a estos subconjuntos mientras que las filas indican la variable. La estrella es la muestra de referencia, el número indica la muestra a comparar y el color la intensidad del sesgo porcentual.	17
4.8.	Frecuencia de eventos ROS y principales diferencias hidrológicas con otras tormentas en la cuenca del Río Maipo En El Manzano. (a): Ciclo anual promedio de días ROS con su intervalo de confianza del 95% . (b): Distribución de caudales extremos ($T > 100\text{años}$) para días ROS donde se derritió nieve y cuando no hubo ROS (N=8, N=31). (c): Área pluvial y cobertura nival en días de precipitación con y sin ROS (expresado como porcentaje del área total de la cuenca). (d): Precipitación acumulada diaria en San José de Maipo para tormentas con y sin ROS.	18

5.1.	Variables meteorológicas e hidrológicas observadas durante el 6 de Agosto del 2013 y el 14 de Agosto de 2013. La figura indica: la altura de la isoterma 0°C (línea punteada y puntos rojos) y nivel de congelamiento (barra de error inferior), percentiles 80 %,20 % (barras de error) y 50 % (puntos y línea punteada) de la distribución del límite de la nieve en altura, la radiación solar en el Santiago (línea continua gris), la temperatura en Santiago (línea continua negra), la precipitación en Santiago (barras azules), la precipitación en la salida de la cuenca (barras plateadas), el viento y la presión atmosférica en Santiago (líneas continuas verde y morada) y el caudal observado junto al flujo base estimado en la salida de la cuenca (líneas continuas azul y anaranjada). Variable expresada como fracción del área total de la cuenca.	20
5.2.	Evolución de los campos de PR, FL y ΔSWE para el dominio de montaña entre los días 6 y 12 de Agosto de 2013. Figuras realizadas respectivamente con el producto CR2MET, reanálisis ERA5 y el reanálisis de Cortés and Margulis (2017). Puntos morados indican las posiciones donde hubo ROS.	21
5.3.	Evolución del IVT y PR a lo largo de Chile. Panel izquierdo: Magnitud del vector IVT a lo largo de un corte transversal paralelo a la costa de Chile (línea segmentada azul). Panel derecho: Intensidad de precipitación a lo largo de un corte transversal a través de Chile continental (línea segmentada roja). Datos horarios provenientes del reanálisis ERA5.	22
5.4.	Evolución en la dinámica de la atmósfera durante el 4 y 13 de Agosto de 2013 para sudamérica y el océano pacífico suroriental. La figura indica: presión a nivel del mar (contornos grises), altura geopotencial en 500hPa (contornos negros) y temperatura en 900hPa (colores)	22
5.5.	Evolución de los campos de agua precipitable y viento en 800hPa durante el 4 y 13 de Agosto de 2013 para sudamérica y el océano pacífico suroriental.	23
5.6.	Hidrogramas de caudales instantáneos para algunas cuencas de montaña durante el 26 de Mayo de 2008 hasta el 7 de Junio de 2008. Figura central indica la máxima área pluvial durante días de precipitación estimada a partir de CR2MET y ERA5.	24
5.7.	Variables meteorológicas e hidrológicas observadas durante el 26 de Mayo del 2008 y el 6 de Junio de 2008. La figura indica: la altura de la isoterma 0°C (línea punteada y puntos rojos) y nivel de congelamiento (barra de error inferior), percentiles 80 %,20 % (barras de error) y 50 % (puntos y línea punteada) de la distribución del límite de la nieve en altura, la radiación solar en el Santiago (línea continua gris), la temperatura en Santiago (línea continua negra), la precipitación en Santiago (barras azules), la precipitación en la salida de la cuenca (barras plateadas), el viento y la presión atmosférica en Santiago (líneas continuas verde y morada) y el caudal observado junto al flujo base estimado en la salida de la cuenca (líneas continuas azul y anaranjada). Variable expresada como fracción del área total de la cuenca.	25

5.8.	Evolución de los campos de PR, FL y ΔSWE para el dominio de montaña entre los días 25 de Mayo y 5 de Agosto de 2008 (obviando algunos días entre las lluvias). Figuras realizadas respectivamente con el producto CR2MET, reanálisis ERA5 y el reanálisis de Cortés and Margulis (2017). Puntos morados indican las posiciones donde hubo ROS sujeto al mismo criterio del caso de estudio anterior.	26
5.9.	Análisis detallado de las precipitaciones, temperatura, nieves y la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Maipo en términos de caudales instantáneos. La Figura indica: precipitación acumulada en San José de Maipo (barras transparentes), interpolación horaria de la cobertura nival IANIGLA-CR2MET (línea azul claro), escorrentía directa (línea azul oscuro), el área pluvial (línea roja) y el área ROS (línea verde). Cuadro superior indica estadísticas para la primera tormenta y el cuadro inferior para la segunda. . .	27
5.10.	Evolución en la dinámica de la atmósfera durante el 24 de Mayo y 7 de Agosto de 2008 para sudamérica y el océano pacífico suroriental. La figura indica: presión a nivel del mar (contornos grises), altura geopotencial en 500hPa (contornos negros) y temperatura en 900hPa (colores)	28
6.1.	Ciclo anual de eventos ROS a nivel mensual para las principales cuencas de montaña de Chile Central. Barras de error indican la variabilidad anual mediante el intervalo de confianza del 95 %. RE: Promedio anual del número de eventos de precipitación. E: Promedio anual del número de eventos de lluvia sobre nieve. ME: Promedio anual del número de eventos de lluvia sobre nieve donde se detectó derretimiento.	30
6.2.	Prevalencia, estadísticas generales y propiedades de los eventos ROS para las principales cuencas de montaña de Chile Central.	30
6.3.	Gráficos de dispersión entre el volumen de escorrentía directa y el volumen de agua líquida precipitada durante distintos eventos de precipitación. Puntos grises: eventos donde no ocurrió ROS. Puntos de color: eventos de ROS coloreados por la máxima área ROS detectada. Tamaño del punto: precipitación acumulada en los últimos 30 días como proxy de humedad en la cuenca. Línea punteada negra: evento de período de retorno igual a 100 años.	31
6.4.	Prevalencia de eventos ROS en Chile Central, variabilidad espacial a nivel de píxel $0.05^{\circ}\times0.05^{\circ}$.	31
6.5.	Estadísticas generales y propiedades de eventos ROS en Chile Central, variabilidad espacial a nivel de píxel $0.05^{\circ}\times0.05^{\circ}$.	32
A.1.	Analisis comparativo entre la cobertura nival (SCA) estimada por el observatorio andino IANIGLA-CR2 y lo entregado por el modelo de reanalisis ERA5-Land. Panel superior: Serie de tiempo completa. Panel intermedio: Distribución de cobertura nival según fuente de datos y estación del año. Panel inferior: Gráfico de dispersión (puntos rojos, cafés, celestes y verdes corresponden a puntos de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente) y ciclo medio anual.	38

A.2.	Analisis comparativo entre la cobertura nival (SCA) estimada por el observatorio andino IANIGLA-CR2 y lo entregado por el modelo de reanalisis de Cortés and Margulis (2017) Panel superior: Serie de tiempo completa. Panel intermedio: Distribución de cobertura nival según fuente de datos y estación del año. Panel inferior: Gráfico de dispersión (puntos rojos, cafés, celestes y verdes corresponden a puntos de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente) y ciclo medio anual. Umbral de corte para píxel con o sin nieve igual a 100mm de SWE.	39
A.3.	Dispersión entre el SL otorgado por el observatorio andino (IANIGLA-CR2) contra distintos métodos para determinar la misma variable en la cuenca del Rio Maipo En El Manzano. La fila superior muestra la relación respecto al SL determinado con la distribución de nieve en altura por el sensor Modis, las columnas muestran los percentiles 20 (azul), 50(verde) y 80(marrón) de dicha distribución (para cada día con imagen satelital). La segunda fila muestra la relación con el SL determinado por el DGF (gris) y el calculado con el área nival y la curva hipsométrica (celeste).	40
A.4.	Dispersión y variabilidad entre la elevación de la isoterma 0°C indicada por el radiosonda de Santo Domingo y otras fuentes de información para días con y sin precipitación (anaranjado y azul respectivamente) para la cuenca del Rio Maipo En El Manzano. Los cálculos de la isoterma 0°C con el producto CR2MET y ERA5-Land corresponden al valor que entregan relaciones lineales significativas de temperatura y altura ($R^2 > 0.9$) para los píxeles dentro de la cuenca. Para el reanalisis ERA5 se utiliza la serie del vecino más cercano.	40
B.1.	Evolución del vector IVT durante el 4 y 13 de Agosto del 2018. Magnitud en colores, magnitud, dirección y sentido en vectores. Datos del reanálisis ERA5	42
B.2.	Evolución del IVT y PR a lo largo de Chile. Panel izquierdo: Magnitud del vector IVT a lo largo de un corte transversal paralelo a la costa de Chile (línea segmentada azul). Panel derecho: Intensidad de precipitación a lo largo de un corte transversal a través de Chile continental (línea segmentada roja). Datos horarios provenientes del reanálisis ERA5.	42
B.3.	Evolución de los campos de agua precipitable y viento en 800hPa durante el 24 de Mayo y 7 de Agosto de 2008 para sudamérica y el oceáno pacífico suroriental.	43
B.4.	Evolución del vector IVT durante el 24 de Mayo y 7 de Junio del 2008. Magnitud en colores, magnitud, dirección y sentido en vectores. Datos del reanálisis ERA5	43
B.5.	Análisis detallado de las precipitaciones, temperatura, nieves y la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Teno en términos de caudales instantáneos. La Figura indica: la interpolación horaria de la cobertura nival IANIGLA-CR2MET (línea azul claro), escorrentía directa (línea azul oscuro), el área pluvial (línea roja) y el área ROS (línea verde). Cuadro superior indica estadísticas para la primera tormenta y el cuadro inferior para la segunda.	44

- B.6. Análisis detallado de las precipitaciones, temperatura, nieves y la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Ñuble en términos de caudales instantáneos. La Figura indica: la interpolación horaria de la cobertura nival IANIGLA-CR2MET (línea azul claro), escorrentía directa (línea azul oscuro), el área pluvial (línea roja) y el área ROS (línea verde). Cuadro superior indica estadísticas para la primera tormenta y el cuadro inferior para la segunda. . .

44

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Los eventos de lluvia sobre nieve (ROS¹) son situaciones en donde una tormenta precipita agua líquida sobre un manto de nieve preexistente. Los fenómenos de ROS son comunes en zonas polares y regiones montañosas, e influyen en distintas escalas temporales y espaciales, a diversos peligros naturales. Durante ellos, se ha observado que la percolación de agua líquida en la nieve y suelos tiende a desestabilizar la matriz porosa produciendo avalanchas y deslizamientos de tierra [Harr (1981), DeGraff et al. (1984), Stemberis and Rubin (2011)]. Por otra parte, el ambiente cálido de los eventos junto con el agua líquida favorecen el derretimiento de nieves que de otra manera hubiesen permanecido congeladas, contribuyendo a suelos secos en la temporada de verano e incrementando localmente el volumen de agua disponible para las crecidas de Ríos. Estas situaciones se han documentado como causas de la erosión de suelos, cambios en la geomorfología fluvial, pérdidas de infraestructura, inundaciones, entre otros conflictos socioambientales [Waananen et al. (1970), Swanston (1974), McCabe et al. (2007), Pomeroy et al. (2016), Musselman et al. (2018)].

Desde un punto de vista hidrológico las crecidas durante eventos de ROS tienen la peculiaridad de que el volumen de escorrentía directa (exceso asociado a la tormenta) es de origen mixto. Por un lado, parte de la escorrentía está asociada a las precipitaciones líquidas del evento, mientras que por otro lado existe una contribución adicional por el derretimiento de la nieve acumulada en tormentas previas. Esto conduce al fenómeno a ser un potencial riesgo de inundaciones por el efecto que tiene en la escorrentía, la cual se pueden intensificar en eventos cuyo pronóstico de precipitaciones indica intensidades regulares para la región.

En cuencas del hemisferio norte, el aporte de escorrentía por derretimiento se ha observado estar entre el 4 % y 75 % [Marks et al. (1998), Sui and Koehler (2001), Li et al. (2019)], estando controlado en parte por el uso de suelo, la hipsometría de la cuenca afectada y las características hidrometeorológicas del evento [Nicholas et al. (2015), Garvelmann et al. (2015)]. Por otro lado, Singh et al. (1997) documenta que el flujo de agua líquida por un manto de nieve saturado puede alcanzar velocidades mucho mayores que la percolación natural del agua sobre los suelos llevando a una rápida respuesta hidrológica, lo cuál pone en evidencia que estos eventos constituyen un riesgo de crecida incluso cuando el derretimiento no es significativo.

¹ Rain On Snow

Bajo un enfoque meteorológico, para que ocurra un evento ROS se requiere una tormenta en donde la elevación del nivel de congelamiento (FL^2) sea superior a la línea de nieves preexistente (SL^3). Esta característica, junto a la hipsometría de la cuenca afectada definen un área de influencia en la cuál la tormenta tiene el potencial de derretir nieve (Fig 1.1). Dentro de esta región, las propiedades del suelo condicionan la capacidad para derretir. Por ejemplo, Nicholas et al. (2015) utilizaron el modelo DHSVM⁴ para concluir que la pérdida de vegetación produce una disminución en la capacidad para derretir, y por otro lado que una hipsometría uniforme favorece el derretimiento. Aún así, los autores concluyen que la magnitud de ambos procesos es dependiente del volumen total de agua líquida en forma de nieve (SWE⁵), el cuál en gran medida está controlado por la variabilidad atmosférica y sus consecuencias en el balance de masa y energía superficial [DeWalle and Rango (2008)].

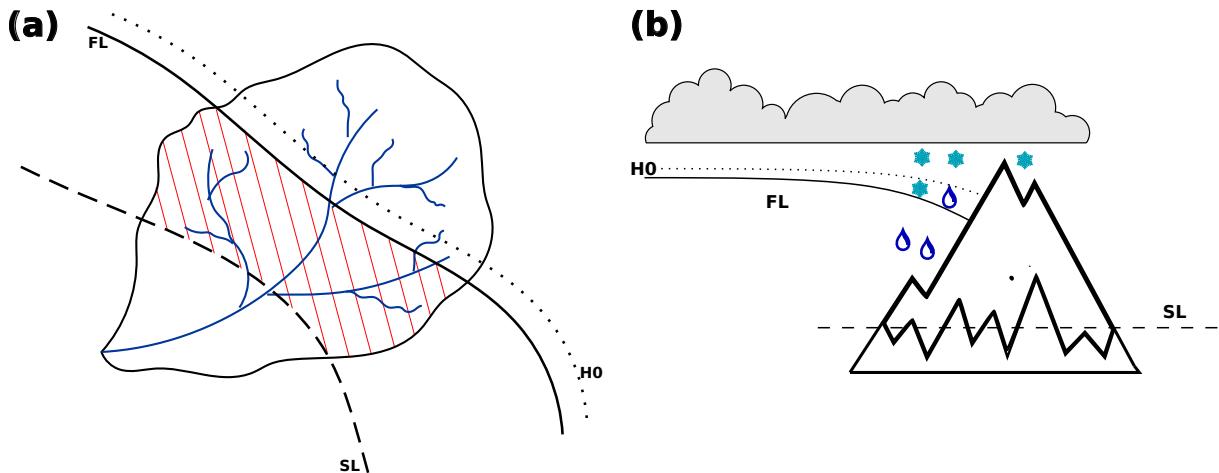


Figura 1.1: Modelo conceptual de un evento de ROS. (a) Esquema de las principales elevaciones que dan origen a un evento ROS en una cuenca. (b) Esquema de las mismas elevaciones en relación a un corte transversal del ambiente de montaña. La línea segmentada indica la línea de nieves (SL), la línea continua indica el nivel de congelamiento (FL), la línea punteada la altura de la isoterma 0°C (H_0) y el área achurada en rojo es el área de influencia por ROS.

Como las fuentes de variabilidad en los balances de energía y masa son múltiples, no es claro cuales son los mecanismos que producen derretimiento en los eventos de ROS. Éste es un tema de investigación abierto, encontrándose casos de estudio donde se evalúan los balances en eventos particulares [Marks et al. (1998), Corripio and López-Moreno (2017), Garvelmann et al. (2015)] y otros trabajos de mayor extensión temporal cuyo objetivo es un buscar un entendimiento climatológico [Mazurkiewicz et al. (2008), Li et al. (2019)]. Aún así, la mayoría de los trabajos son regionales por lo que los resultados no suelen coincidir al estar condicionados a la peculiaridades de la región y a las características de cada evento. Aún así, los estudios coinciden en que los flujos de calor más relevantes para derretir nieve en estos eventos son la radiación neta, dominada por la radiación de onda larga y el flujo de calor sensible. Contra-intuitivamente, Li et al. (2019) mediante el modelo VIC⁶ concluye que el efecto de la incorporación de calor por lluvia no es significativo, por lo cual se interpreta que

² Freezing Level

³ Snow Limit

⁴ Distributed Hydrology Soil Vegetation Model

⁵ Snow Water Equivalent

⁶ Variable Infiltration Capacity

los eventos ROS ocurren durante tormentas cálidas en donde el viento y nubosidad favorecen los flujos de calor anteriormente nombrados.

Chile Central (CC) es una región que consta de todos los elementos necesarios para que su hidrología esté afectada por eventos de ROS (ver ejemplo de ROS en la figura 1.2). La zona comprende el territorio limitado por el océano pacífico y la cordillera de los Andes aproximadamente entre los paralelos 30°S y 38°S. La climatología de la región describe una temporada invernal(estival) fría(cálida) y lluviosa(seca), en donde las precipitaciones se producen usualmente debido a nubes estratiformes asociadas al paso de sistemas baroclínicos como frentes fríos, Ríos atmosféricos zonales (frentes estacionarios) y bajas segregadas [Fernández and Gironás (2021)]. La cordillera de los Andes alcanza una elevación media entre los 3000m y 4000m en la región, y cuando el flujo de aire interactúa con la orografía ocurre un bloqueo de los vientos y un incremento de la precipitación en la laderas donde el flujo asciende [Barrett et al. (2009), Viale and Nuñez (2011), Viale and Garreaud (2015)], efecto que se ha observado ser particularmente intenso en tormentas que transportan humedad de manera perpendicular a la cordillera [Falvey and Garreaud (2007), Valenzuela and Garreaud (2019)].

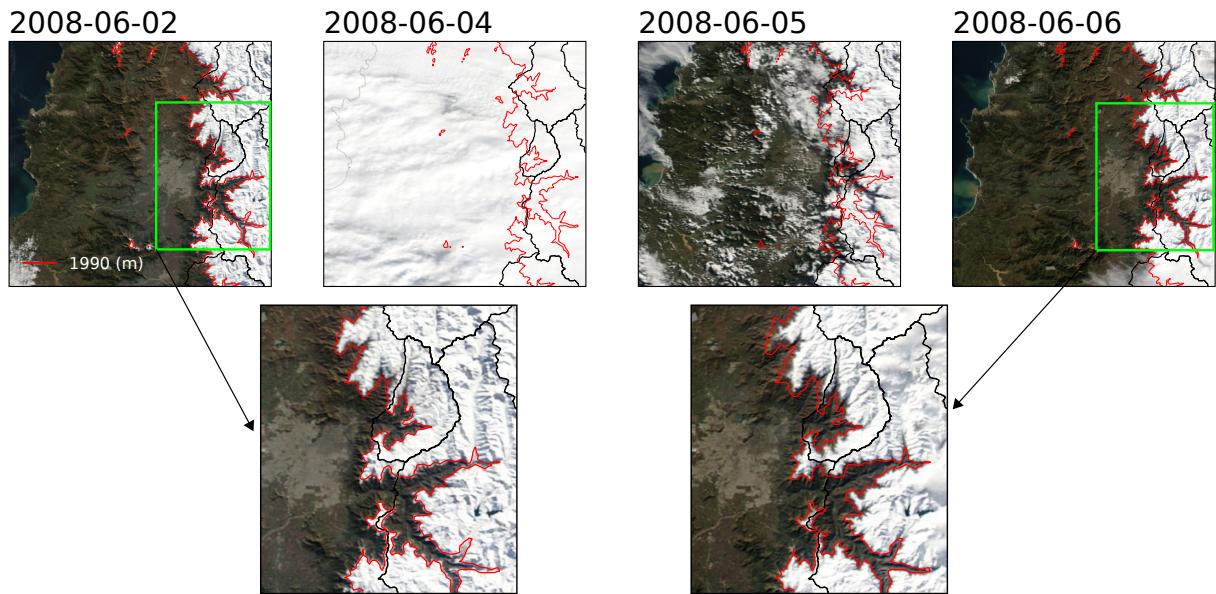


Figura 1.2: Tormenta del 4 de Junio de 2008 en Chile Central que dio lugar a un evento ROS. La figura muestra imágenes MODIS en el rango visible para un día antes (2-Jun), durante (4-Jun) y después (5-Jun, 6-Jun) del evento. La línea roja muestra el SL previo a la tormenta (aproximadamente 1990m) y la línea negra las cuencas del sector (Aconcagua, Mapocho y Maipo). Figuras inferiores ilustran la pérdida de cobertura nival después del evento de precipitación.

CC es una zona de transición en los regímenes hidrológicos de las cuencas Andinas. Aquellas que se ubican en el norte de la región se identifican con un régimen nival el cual va transitioningando a regímenes pluviales con el aumento de latitud [Alvarez-Garreton et al. (2021)]. Esto se explica por: (i) la variabilidad térmica de las tormentas, las cuales ocurren con una intersección semi-permanente del FL y la superficie y (ii) debido a la progresiva disminución de la altura de los Andes con la latitud [Garreaud (2013)].

En las tormentas de montaña el flujo de calor latente, producto del derretimiento de hidrometeoros congelados, enfriá el aire circundante, lo cual acoplado a la precipitación orográfica y al enfriamiento adiabático por el ascenso del aire lleva a que el FL se encuentre a menores elevaciones que en la tropósfera libre [Minder et al. (2011)]. Para CC se ha estimado que el FL en la montaña se encuentra entre 200m-300m por debajo de la altura de la isoterma 0°C (H_0) costera. Ésta última tiene un promedio de 2200m en días con precipitación, pero en su distribución se encuentran eventos muy fríos con $H_0 \leq 1500m$ y eventos muy cálidos con $H_0 \geq 3000m$ [Garreaud (1992)]. Una clasificación de la precipitación en tormentas frías y cálidas lleva a entender que las primeras se asocian generalmente a un frente frío con vientos del norte o nor-oeste asociados a un ciclón extratropical que conlleva un descenso de las temperaturas en superficie al momento de llover. En contraparte las tormentas cálidas se originan con una baja presión que se desplaza hacia el sur dejando un frente quasiestacionario en las latitudes medias, de orientación y vientos zonales, que frecuentemente es transportado hacia el norte por la advección de aire frío que produce un anticiclón migratorio [Garreaud (2013)]. Ambos tipos de tormentas se han documentado estar presentes en eventos extremos de precipitación [Valenzuela and Garreaud (2019)], siendo las cálidas menos frecuentes pero más relevantes para las cuencas de CC, debido a que éstas vienen con altos valores de H_0 lo cuál se traduce en una mayor área pluvial.

Sobre los eventos ROS en CC se destaca el reciente trabajo de Coumerme (2021), único en la región, en donde para la cuenca alta del Río Maipo se encontró que ocurren en promedio 2.5 eventos⁷ de ROS al año distribuidos en los meses de invierno y en la banda de elevaciones de 3000-5000m. En el trabajo se documenta que los modelos empíricos nacionales de precipitación-escorrentía [MOP (1995)]⁸ pueden subestimar hasta en 3 veces la magnitud de los caudales en eventos ROS. Mediante un experimento numérico, la autora describe un incremento de los eventos hasta 4 por año bajo un escenario de calentamiento global. Esto último es consistente con otros estudios que describen un aumento de eventos ROS y del agua disponible para crecidas en cuencas altas ($\geq 3000m$) debido al desplazamiento del área de influencia hacia elevaciones mayores [Surfleet and Tullos (2013), Beniston and Stoffel (2016), Musselman et al. (2018), Li et al. (2019)].

CC es una región sensible al cambio climático, los modelos de circulación general (GCM⁹) predicen una condición media de déficit hídrico [Boisier et al. (2016)], un aumento de la altura de la isoterma 0°C de hasta 400m en días con precipitación [Mardones and Garreaud (2020)] y, basado en la distribución futura de caudales máximos diarios en las macrocuencas, un incremento en la frecuencia y magnitud de crecidas [Bozkurt et al. (2017)]. Cuáles son los mecanismos, la factibilidad y certeza del pronóstico de caudales durante eventos crecida, y más aún asociado a ROS, todavía es un motivo de discusión.

Previo a cualquier análisis de tendencia por cambio global, es fundamental conocer el estado presente del fenómeno. Poco se sabe de la distribución espacial de frecuencias de eventos ROS, menos aún, su relevancia en eventos de crecida y en que se podrían diferenciar de eventos extremos producidos por otros mecanismos (e.g lluvias intensas, deshielo, etc). ¿Cuál cuenca de CC es la más afectada por el fenómeno?, ¿Una alta frecuencia de eventos ROS significa un alto riesgo de crecidas por este medio?, ¿Siempre los grandes caudales tiene

⁷ Calculado como el número de días ROS respecto a la longitud del año juliano.

⁸ Métodos estadísticos basados en la precipitación y área pluvial para determinar caudales.

⁹ General Circulation Models

una contribución de derretimiento de nieves?, ¿Es esta contribución significativa respecto a la precipitación y el área pluvial?, ¿Cuales patrones sinópticos podrían ser útiles para anticiparse a una crecida por ROS?. Estas son algunas de las preguntas que motivan y se aspiran a responder en esta tesis, en donde en última instancia se espera contribuir al desarrollo del conocimiento, y eventualmente de manera indirecta a la planificación territorial, el pronóstico y anticipación de peligros naturales.

1.2. Marco Teórico

1.2.1. Balances de energía y masa en ambientes nivales.

El marco conceptual que permite entender el proceso de derretimiento de nieve durante eventos de lluvia corresponde al planteamiento físico-matemático de las leyes de conservación de masa y energía. Este último, en este contexto, describe la interacción de los flujos de calor del manto de nieve con su entorno y sus consecuencias para producir variaciones en la energía interna (temperatura). A su vez cambios de temperatura pueden terminar en el congelamiento/fusión del agua/nieve lo que modifica el balance de masas, relacionando así la energía con la masa.

Con respecto a los flujos de calor estos dependen tanto de las características de la nieve y el suelo como de las variables atmosféricas. La figura 1.3 esquematiza los flujos de calor, los cuales categorizados por naturaleza son: (i) el flujo de calor sensible asociado a la transferencia turbulenta de calor entre la superficie y el fluido atmosférico, (ii) el flujo de calor latente asociado a los cambios de fase del agua, (iii) los flujos radiativos de onda corta y larga asociados respectivamente a la luz solar y la temperatura del suelo y el entorno, (iv) el calor por conducción entre el manto de nieve y el suelo en cuál se deposita y (v) el flujo de calor por incorporación de masa (por ejemplo lluvia a distinta temperatura).

Este balance de energía se puede describir matemáticamente según la siguiente ecuación de conservación [Cuffey and Paterson (2010)]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = SWR_{in}(1 - \alpha) + LWR_{in} + LWR_{out} + SH + LH + G + Q_r \quad (1.1)$$

donde el lado izquierdo presenta un único término, que cuantifica el almacenamiento de energía interna en una capa de espesor infinitesimal de hielo, mientras que en el lado derecho se encuentran los flujos de entrada y salida de energía. En el lado izquierdo ρ es la densidad de la nieve, neviza, hielo o cualquier fase intermedia, c_p el calor específico de la sustancia y T la temperatura. En el lado derecho SWR_{in} es la radiación de onda corta, la cual una fracción α es reflejada de vuelta a la atmósfera, proceso conocido como albedo. La radiación de onda larga se representa en dos flujos, uno de entrada LWR_{in} , asociado al efecto invernadero, la reflexión por nubes y la temperatura de la atmósfera, y otro de salida LWR_{out} asociado a que la superficie tiene una temperatura e irradia energía como un cuerpo negro [Salby (1996)]. Los flujos turbulentos de calor sensible y latente están cuantificados por SH y LH , donde su variabilidad se explica por la diferencia de temperatura y humedad entre el suelo y el aire circundante, la rugosidad de la superficie y la estructura de la velocidad del fluido en la capa límite atmosférica, la cual controla dispersión del fluido turbulento. Finalmente G representa el flujo de calor entre la nieve/hielo y medio terrestre y Q_r la incorporación o pérdida de

calor por lluvia o nieve extraída por viento.

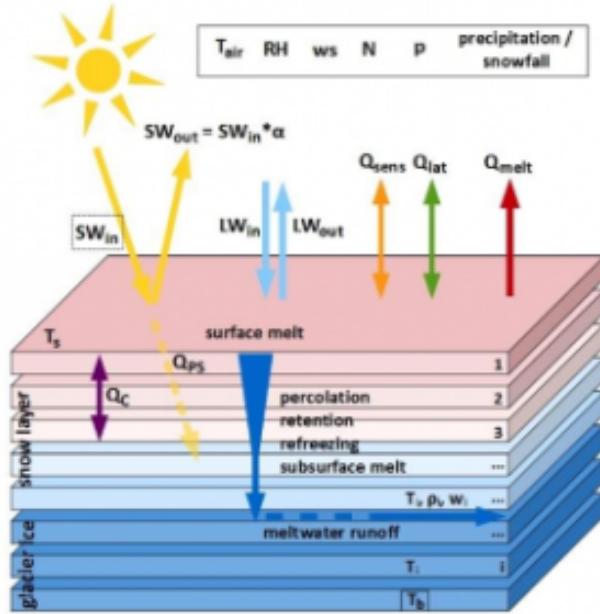


Figura 1.3: Esquema conceptual de los mecanismos involucrados en el balance de energía superficial de un manto nieve o hielo glaciar.
Esquema extraído de <https://cryo-tools.org/tools/cosipy/>

La temperatura de la nieve está controlada por los flujos anteriormente descritos, su relación con el balance de masas ocurre cuando los flujos permiten que la temperatura de la nieve alcance su punto de fusión (0°C), en esta situación es donde ocurre el derretimiento (o congelamiento), y cualquier incorporación (pérdida) adicional de calor contribuirá a una pérdida (ganancia) de masa. Este exceso de calor en el proceso de derretimiento se puede entender como un flujo de masa, el cuál se puede describir por la siguiente ecuación:

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}}{\rho_w L_f} \quad (1.2)$$

donde \dot{M} es el flujo de masa (derretimiento), \dot{Q} el exceso de calor proveniente del balance de energía (valor del lado derecho de (1.1) cuando $T = 0$), ρ_w la densidad del agua líquida y L_f el calor latente de fusión. Finalmente cabe destacar que el derretimiento de nieves y la precipitación líquida en estos ambientes genera un manto nival heterogéneo que coexiste con agua líquida, en este contexto los flujos de calor entre las fases son complejos, al igual que el movimiento (hidráulica) del agua líquida dentro la nieve. Los mecanismos de percolación, transporte, recongelamiento, etc, pueden también alterar el balance de masas, aunque en este trabajo se consideran como elementos secundarios para la generación de crecidas por ROS.

El balance de masas en el manto nival queda entonces representado por una ecuación de conservación similar a (1.1), sólo que la variable a conservar es el equivalente de agua en nieve (SWE). Éste último puede aumentar localmente por dos motivos, por un lado el principal factor es la incorporación de nieve por la precipitación en tormentas y secundariamente por la redistribución de nieve por viento (nieve que llegó de otro lugar debido a procesos de

advección). Las pérdidas de *SWE* ocurren principalmente por derretimiento y sublimación, aunque adicionalmente la redistribución por el viento contribuye notablemente en situaciones con vientos significativos [Winstral and Marks (2002)]. Matemáticamente el *SWE* y su balance de masas se describe con las siguientes ecuaciones:

$$SWE = \frac{1}{\rho_w} \int_h^0 \rho(z) dz \quad (1.3)$$

$$\rho_w \frac{\partial SWE}{\partial t} = PR \pm W - \dot{M} - S \quad (1.4)$$

Donde el *SWE* se define como el agua líquida contenida en una columna de nieve (estratificada en nieve fresca, neviza, hielo, etc), *W* es la distribución por viento (negativa o positiva), *PR* la precipitación (nevadas), \dot{M} el derretimiento y *S* la sublimación.

Para efectos de la investigación de eventos ROS es relevante destacar que los principales flujos en el balance de energía (flujos turbulentos y radiativos) son controlados por la variabilidad atmosférica. En el caso de la nieve en los Andes centrales de Chile, ésta varianza está en gran medida asociada a la variabilidad sinóptica, es decir al paso de sistemas frontales y las propiedades térmicas que éstos transportan (aire cálido y húmedo tropical o frío y seco polar). Por esto, es de interés conocer los elementos meteorológicos que dan origen a eventos ROS, y más aún lo que sucede en las crecidas donde se observa un derretimiento de nieves por la calidez de la tormenta.

Capítulo 2

Hipótesis y objetivos

2.1. Hipótesis:

Dentro de los eventos de crecida en las cuencas andinas de Chile Central se encuentran aquellos producidos por tormentas donde llueve sobre la nieve, de manera que el volumen de escorrentía superficial se puede descomponer en una contribución por precipitación líquida y derretimiento de nieves.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General:

Determinar la existencia e influencias que tienen los eventos de lluvia sobre la nieve en las cuencas de Chile Central y los principales elementos meteorológicos asociados a los eventos de caudales extremos que ocurren en esas situaciones.

2.2.2. Objetivos Específicos:

1. Diagnosticar la **frecuencia de eventos de lluvia sobre nieve** en las cuencas andinas de Chile Central, especificando tendencias y patrones espaciales.
2. Analizar la **contribución del derretimiento de nieves a la escorrentía en crecidas** donde llueve sobre la nieve..
3. Distinguir los principales patrones de escala sinóptica que dan origen a **tormentas donde llueve sobre la nieve**.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Zona de Estudio

descripción de la zona de estudio, bla bla chiel subtropical los andes, la orografía la vegetación y el mar los dominios que salen en el mono

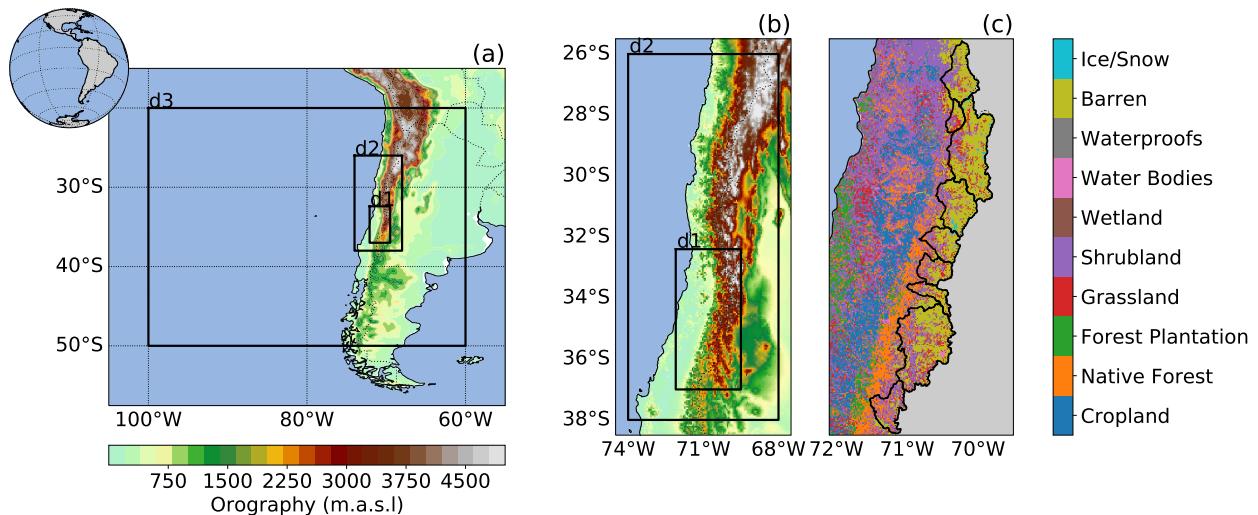


Figura 3.1: Delimitación geográfica de los dominios de análisis y variables estáticas. (a): Orogafía andina y extensión espacial de los dominios de montaña, regional y sinótico (d1, d2 y d3 respectivamente). (b): Elevaciones del terreno en el dominio regional y de montaña. (c) Uso de suelo y principales cuencas de montaña en el dominio regional.

descripción del ambiente de montaña bla bla las áreas pluviales y nivales y la transición hacia el sur las precipitaciones los nombres de las cuencas que salen en el mono

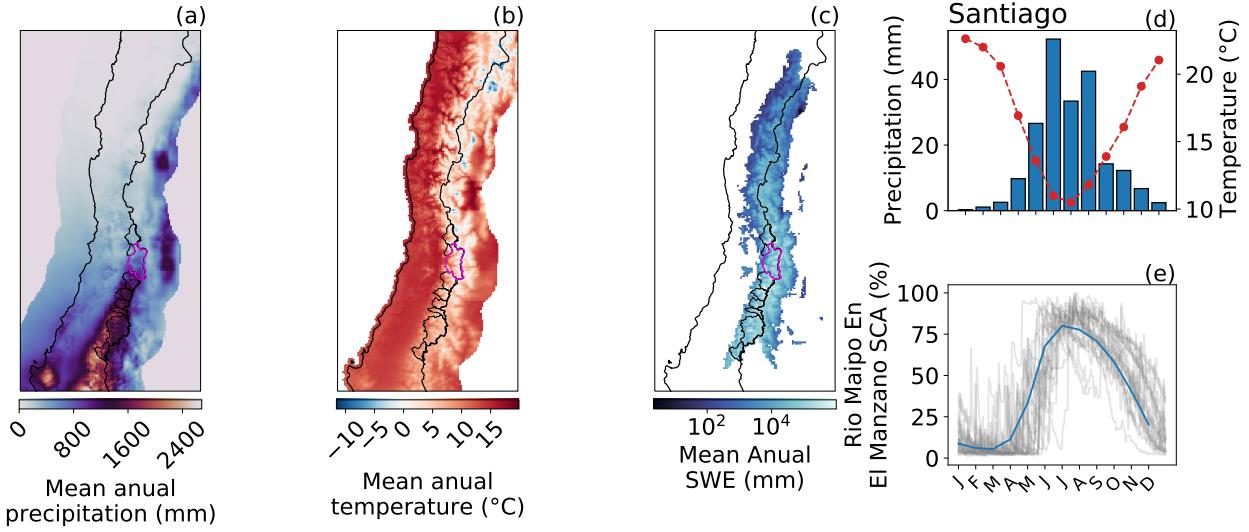


Figura 3.2: Características generales del clima del valle y montaña en Chile Central. Figuras (a), (b) y (c) muestran respectivamente los promedios anuales de precipitación (CR2MET), temperatura (CR2MET) y equivalente de agua en nieve (Cortés and Margulis (2017)). Panel (d) muestra el climograma calculado con los datos de la estación DGF (2004-presente) en Santiago y el panel (e) muestra la cobertura nival promedio de la cuenca del Rio Maipo En El Manzano (en contorno morado en los mapas) observada por el satélite MODIS.

hablar de los caudales en las cuencas y los regímenes hidrologicos

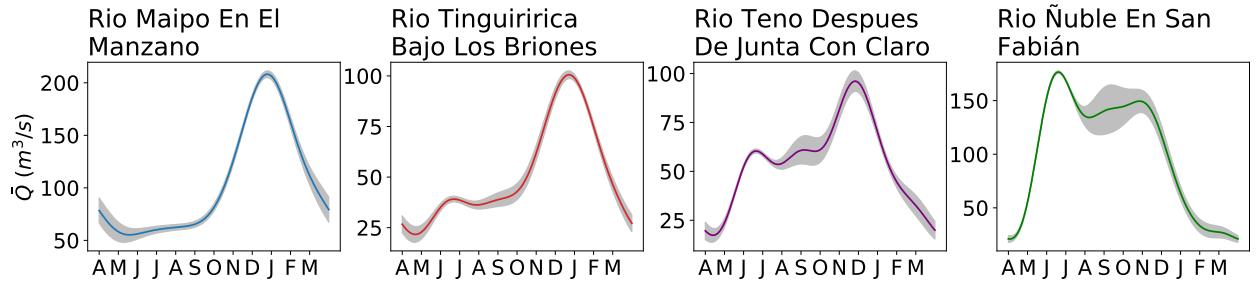


Figura 3.3: Regímenes hidrológicos de algunas de las principales cuencas de montaña en Chile Central. La figura indica el promedio de cada día del año (suavizado) junto con su intervalo de confianza (95 %).

3.2. Fuentes de datos y características.

descripción profunda del origen y supuestos de los datasets utilizados. justificación final de estos en pos de los objetivos de la tesis.

hablar sobre las observaciones, los pluviómetros, el radiosonda de santo domingo y los datos de nieve del observatorio andino y las imágenes modis. el camels

hablar sobre productos grillados y fuentes de datos de precipitación, temperatura/H0 y contar sobre era5 land el dataset de cortes para el swe o snow cover introducir la tabla que viene

Tabla 3.1: Características generales de los productos grillados factibles para detectar eventos ROS en Chile Central.

Nombre	Resolución Horizontal	Resolución Temporal	Extensión Temporal	Variable(s) Objetivo
CR2MET	0.05°x0.05°	Diaria	1979-2020	·Precipitación ·Temperatura
ERA5	0.25°x0.25°	Horaria	1979-2022	·Elevación de Isoterma 0°C
ERA5-Land	0.1°x0.1°	Horaria	1979-2022	·Precipitación Liquida ·Equivalente de agua en nieve ·Caudal
Cortes & Margulis SWE Reanalysis	0.01°x0.01°	Diaria	1984-2015	·Equivalente de agua en nieve

discutir sobre los pro o contra de uno u otro dataset y sus limitancias

terminar hablando sobre los productos grillados que no cambian como el land cover y de donde viene la topografia, los poligonos, etc

3.3. Técnicas de Análisis

describir metodología del FL, SL y PR para cada cuenca. umbrales de corte del SCA (binarizador), relacion entre el FL y el H0. explicar como scar el SL con la curva hipsometrica o el H50 y la distribucion de nieve en altura bla bla bla y como todo esto estará aplicado en la sección q viene usando la cuenca del maipo

describir metodología para productos grillados. el regrillado con interpolacion o conservativo umbrales por definir cuando se usa el SWE y diferencias con el metodo de las observaciones.

describir el análisis compuesto y las variables a utilizar en la sinoptica

Capítulo 4

El Rio Maipo En El Manzano

4.1. Morfología y características del terreno.

hablar sobre la cuenca condiciones generales y porque elegirla como cuenca piloto

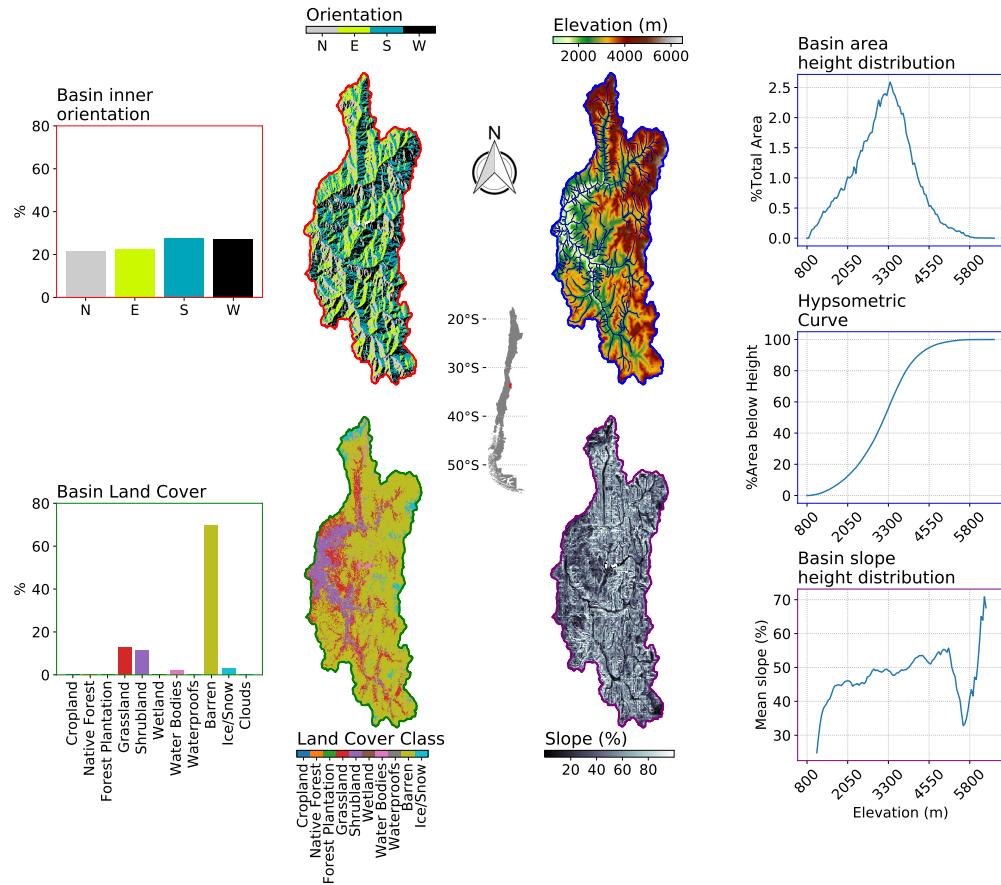


Figura 4.1: Características morfológicas y parámetros estáticos de la cuenca. Al lado izquierdo se tiene la abundancia de píxeles asociado a sus orientaciones geográficas (borde rojo) y los principales usos de suelo (borde verde). Al lado derecho se indica la distribución del área de la cuenca a lo largo de distintas elevaciones (borde azul) y la distribución de pendientes con la altura (borde morado).

4.2. Comparación de fuente de datos para el estudio de la lluvia sobre nieve.

4.2.1. Elevación de la isoterma 0°C, nivel de congelamiento y gradientes de temperatura.

hablar del freezing level, la figura anexa y la que viene, papers Garreaud (1992), Mardones and Garreaud (2020), Ibañez et al. (2021) y Minder et al. (2011)

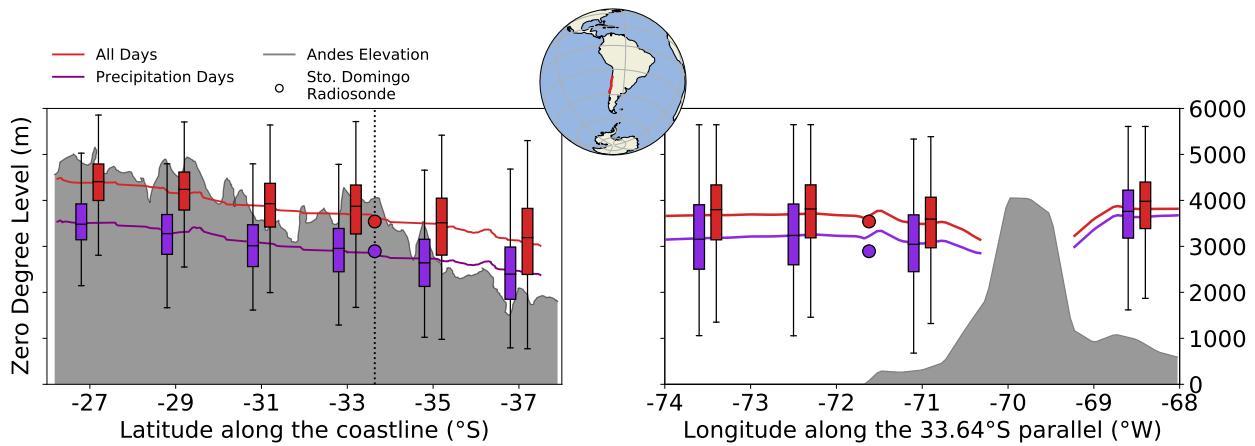


Figura 4.2: **Distribución espacial de la altura de la isoterma 0°C en Chile Central.** Colores rojos indican la distribución para todos los días y colores morados sólo los días con precipitación. Puntos redondos indican los valores promedio del valor entregado por el radiosonda de Santo Domingo.

4.2.2. Cobertura nival, distribución vertical de la nieve y proxies del límite inferior.

hablar sobre la dificultad de describir la cobertura nival de una cuenca con una altura. que tan correcto es hablar de una línea de nieves?

introducir la distribucion vertical de nieve en altura (metafora del paracaidista), hablar de su sensibilidad ante el limite del fSCA del modis y sus limitancias (como cuando se equivoca donde esta mojado)

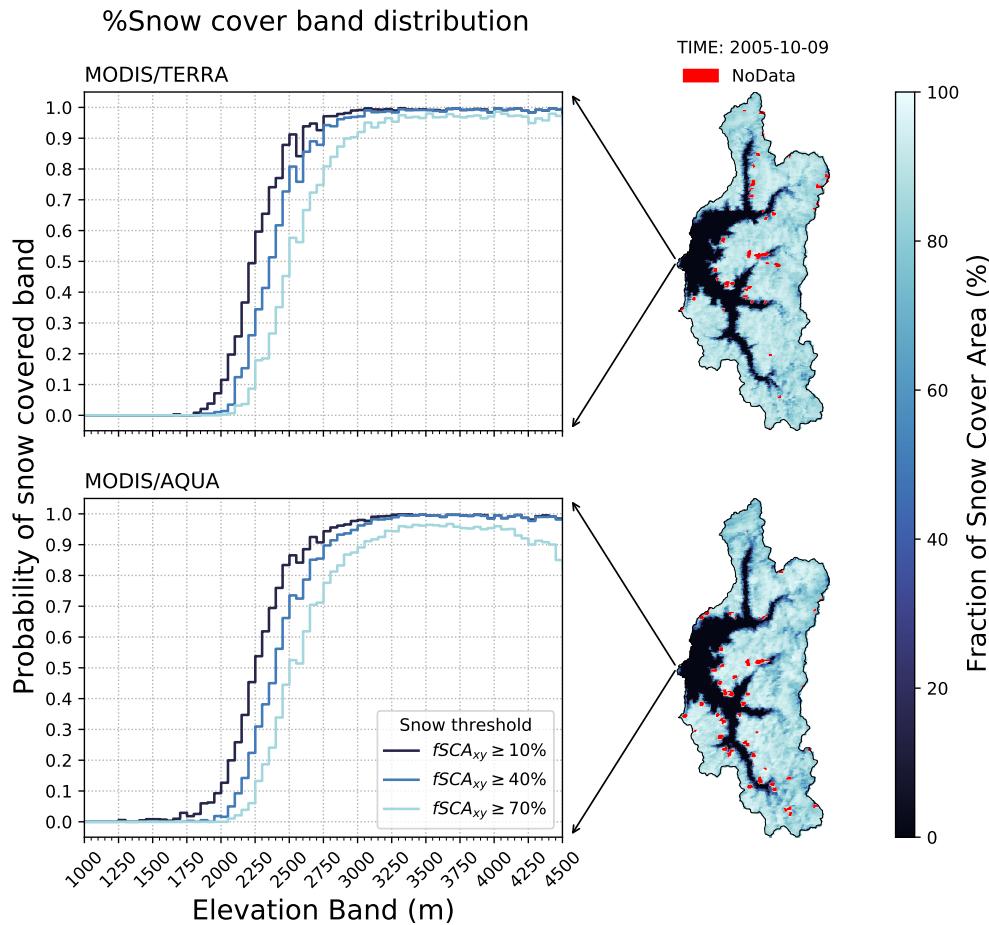


Figura 4.3: Distribución vertical de la cobertura nival en la cuenca para el 2005-10-09.
 La figura superior indica la distribución de nieve mediante el sensor MODIS/TERRA y la figura inferior para el sensor MODIS/AQUA. Cada figura muestra la sensibilidad de las curvas al fijar un umbral de fSCA como límite entre píxel con o sin nieve.

discutir sobre el límite inferior de la nieve que entrega el ianigla Cara Ramírez (2018), el producto del DGF en la página del profe, el metodo de la curva hipsometrica y sus relaciones con los valores de la distribucion vertical, concluir sobre la mejor métrica para detectar eventos ROS. echarle la culpa a las fuentes de variabilidad de la nieve (orientacion de ladera, vegetacion, bla bla) quizas anexar una figura del spread?

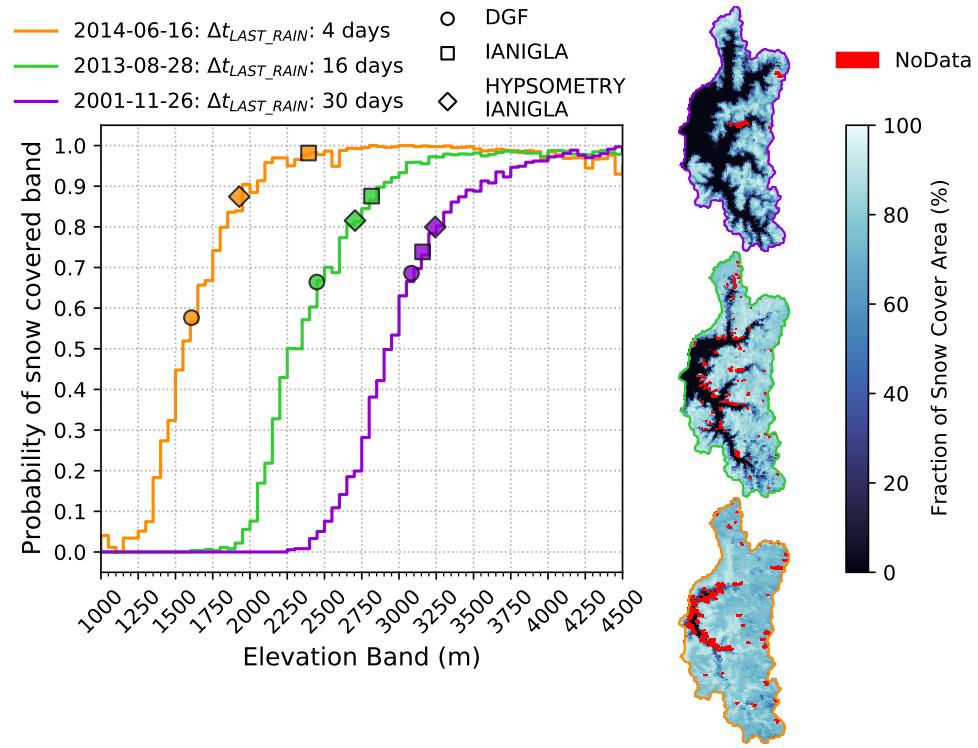


Figura 4.4: **Distribución vertical de la cobertura nival en la cuenca para distintas condiciones de nieve.** La curva morada muestra la distribución asociada a un día en donde la última nevada fue hace 30 días, la curva verde cuando la última nevada fue hace 16 días y la curva anaranjada cuando la última nevada fue hace 4 días. A la derecha se muestran las imágenes del sensor MODIS/TERRA que generan cada curva.

hablar sobre la cobertura nival en los productos de reanalisis y los reanalisis de nieve en general, el fracaso de era5 land y la seleccion del reanalisis de cortes, introducir la figura de abajo, hablar de los sesgos y las limitancias de ese producto que pareciera ser el mejor pero ni cerca de lo fino para jugar con estos eventos

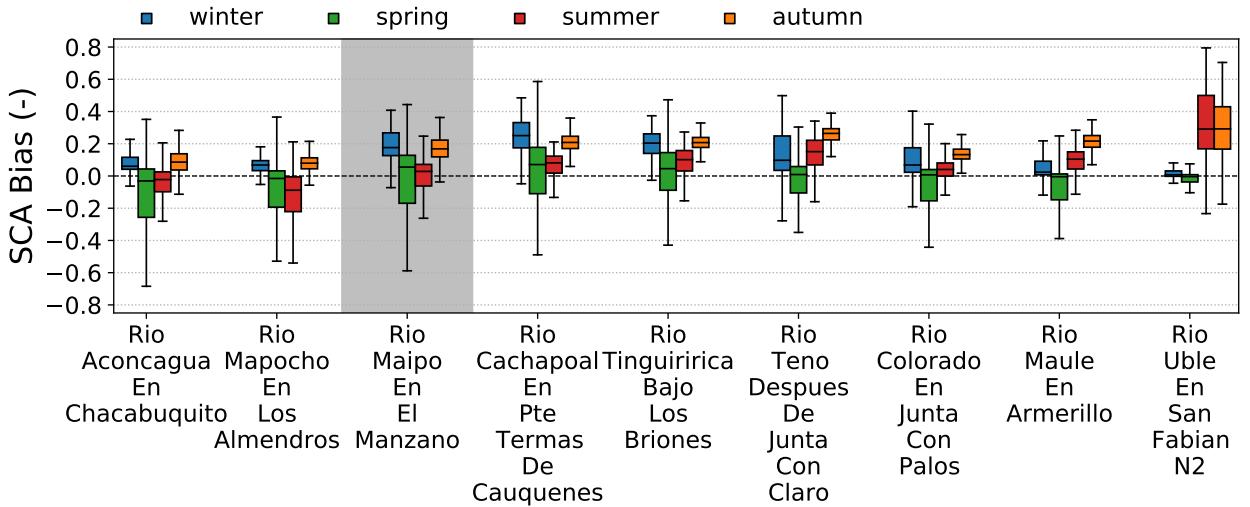


Figura 4.5: Análisis de sesgos en la cobertura nival del Río Maipo En El Manzano para el reanálisis de Cortés and Margulis (2017). La figura muestra la distribución de los sesgos diarios de cobertura nival entre el reanálisis (umbral de $SWE > 100mm$) y la cobertura del observatorio andino IANIGLA-CR2. Los colores indican las estaciones del año (azul: invierno, verde: primavera, rojo: verano y anaranjado: otoño) y la zona gris destaca la cuenca del Río Maipo En El Manzano.

4.2.3. Precipitaciones

describir la precipitación en el valle y en la montaña, el gradiente vertical bla bla y como el producto cr2met lo hace bien asi que la trampa en los ROS esta en el FL o en el SL

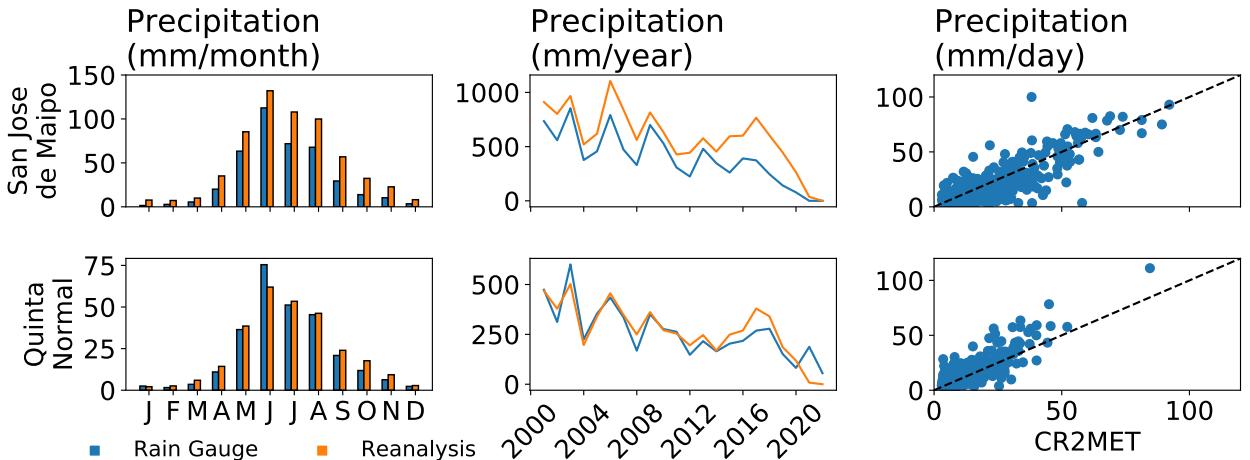


Figura 4.6: Análisis de precipitaciones mensuales, anuales y diarias del producto CR2MET respecto a estaciones pluviométricas de terreno. Fila superior corresponde al análisis para una estación de montaña (San José de Maipo: 943m, 70.35°W , 33.64°S) y la fila inferior para una estación en el valle (Quinta Normal: 527m, 70.68°W , 33.44°S)

4.2.4. Síntesis del análisis comparativo

introducir la figura de abajo y la ensalada de comparaciones, discutir porque el cr2met en superficie anda mal en temepratura, al igual que el era5land de superficie, aniquilando la

posibilidad de usar la condicion logica $T > 0$ para los pixeles ROS y la nececidad de recurrir a la isoterma0 del perfil costero.

comentar sobre los sesgos brutales del era5 land y los del cortes en terminos de nieve y snow limit, concluir sobre los posibles umbrales binarizadores (no hay/hay nieve) a partir del SWE del cortes.

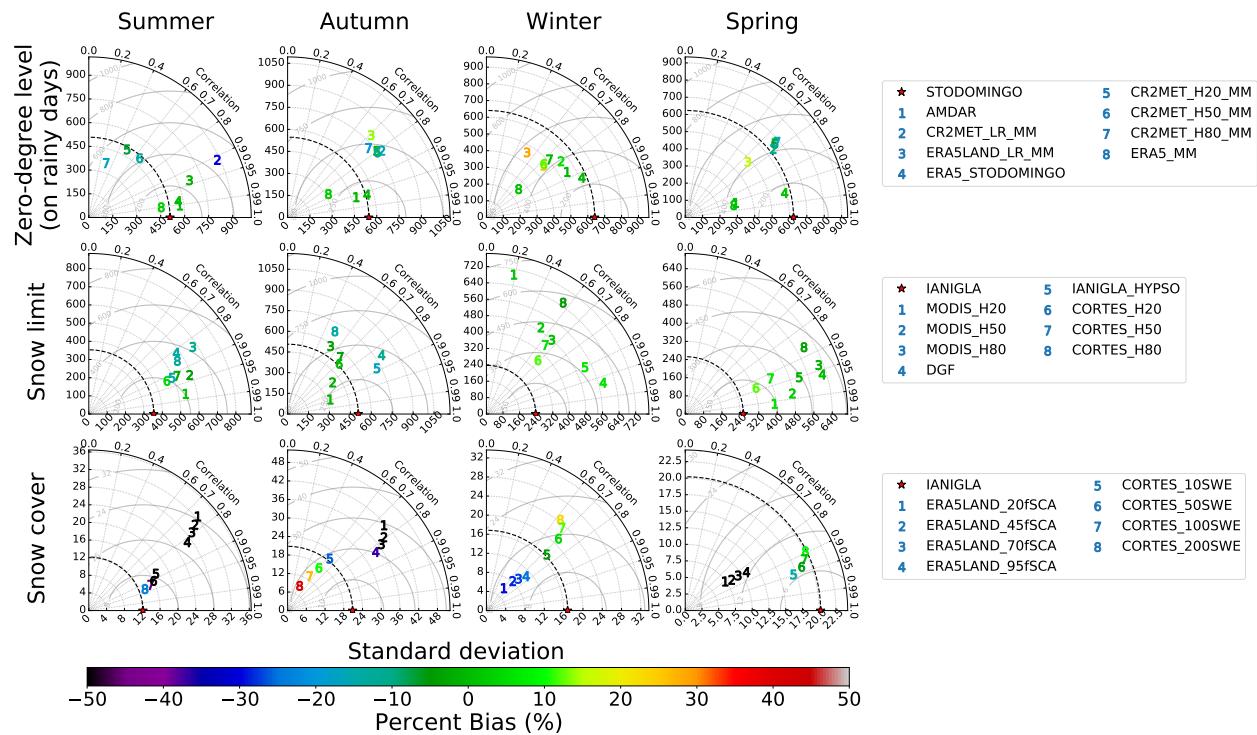


Figura 4.7: Diagramas de taylor para las muestras de altura de la isoterma cero, el límite inferior de la nieve y la cobertura nival durante las estaciones del año. Las columnas indican la estación del año y el gráfico asociado a estos subconjuntos mientras que las filas indican la variable. La estrella es la muestra de referencia, el número indica la muestra a comparar y el color la intensidad del sesgo porcentual.

4.3. Eventos de lluvia sobre nieve en el Rio Maipo En El Manzano

comentar sobre la estrategia final para seleccionar los eventos ROS en el maipo a partir de las observaciones, introducir y describir la figura de abajo, la estacionalidad, y lo que se observa respecto a las crecidas, areas, pluviales, nieve y lluvias

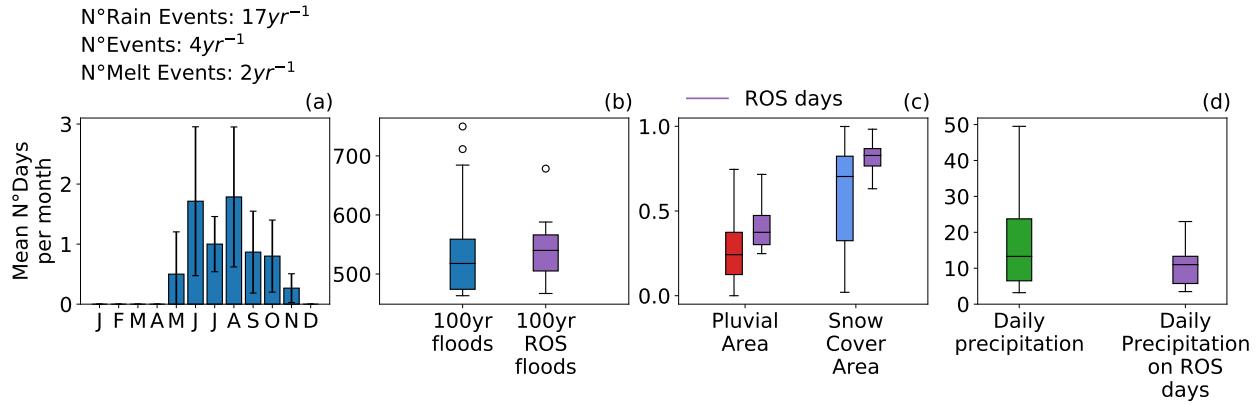


Figura 4.8: **Frecuencia de eventos ROS y principales diferencias hidrológicas con otras tormentas en la cuenca del Río Maipo En El Manzano.** (a): Ciclo anual promedio de días ROS con su intervalo de confianza del 95 %. (b): Distribución de caudales extremos ($T > 100\text{años}$) para días ROS donde se derritió nieve y cuando no hubo ROS (N=8, N=31). (c): Área pluvial y cobertura nival en días de precipitación con y sin ROS (expresado como porcentaje del área total de la cuenca). (d): Precipitación acumulada diaria en San José de Maipo para tormentas con y sin ROS.

4.4. Discusión y síntesis

discutir sobre los sesgos en las observaciones, la idea de linea de nieves, la isoterma 0 en santiago y en la montaña de por ahí, la justificación del perfil costero y lo representativo de la pr del cr2met

en los reanalisis, los sesgos y las limitaciones que tendrán los análisis grillados por venir.

discutir sobre la utilidad de la cuenca piloto para definir umbrales para los reanalisis

discutir sobre las consecuencias de los ROS en los caudales, sus características (precipitación, área pluvial y nieves) esperables, la variabilidad interanual, el midwinter suppression? jaja, la importancia del invierno y el deshielo, la necesidad de un análisis espacial más grande para no quedarse con una pura cuenca como muestra del fenómeno y la necesidad de unos casos de estudio para ver bien los efectos y las diferencias espaciales. introducir el sgte capítulo

Capítulo 5

Casos de estudio

bla bla a continuacion se presentan dos casos de estudio, uno bien interesante por la configuracion sinoptica tormenta/fria vs tormenta calida, y la calibración correcta"de lreanalisis pero con caudales mediocres y otro con caudales bien extremos, fracasando el reanalisis de cortes y con la meteorologia mostrando que las tormentas calidas"tambien pueden dejar nevadas que pueden dar lugar a un ros despues. decir todo esto como "desde afueraz aferrandose a la data sin interpretaciones

5.1. Caso de estudio evento ROS del 11 de Agosto de 2013

5.1.1. Observaciones hidrometeorológicas

primer caso de estudio, presentar la figura que viene, la seguridad de que hubo lluvia sobre nieve y derretimiento observado mediante santo domingo y el modis (ianigla). lo que marco la estacion del dgf mostrando las caracteristicas de una tormenta fria primero y una calida despues. los caudales debiles.

comentar sobre lo que indican los reanalisis y que dicen sobre la lluvia sobre nieve, condicion termica y ganancia o perdida de SWE en montaña segun el reanalisis. describir la figura sin interpretaciones contando lo que se decidio para definir los puntos morados de ROS

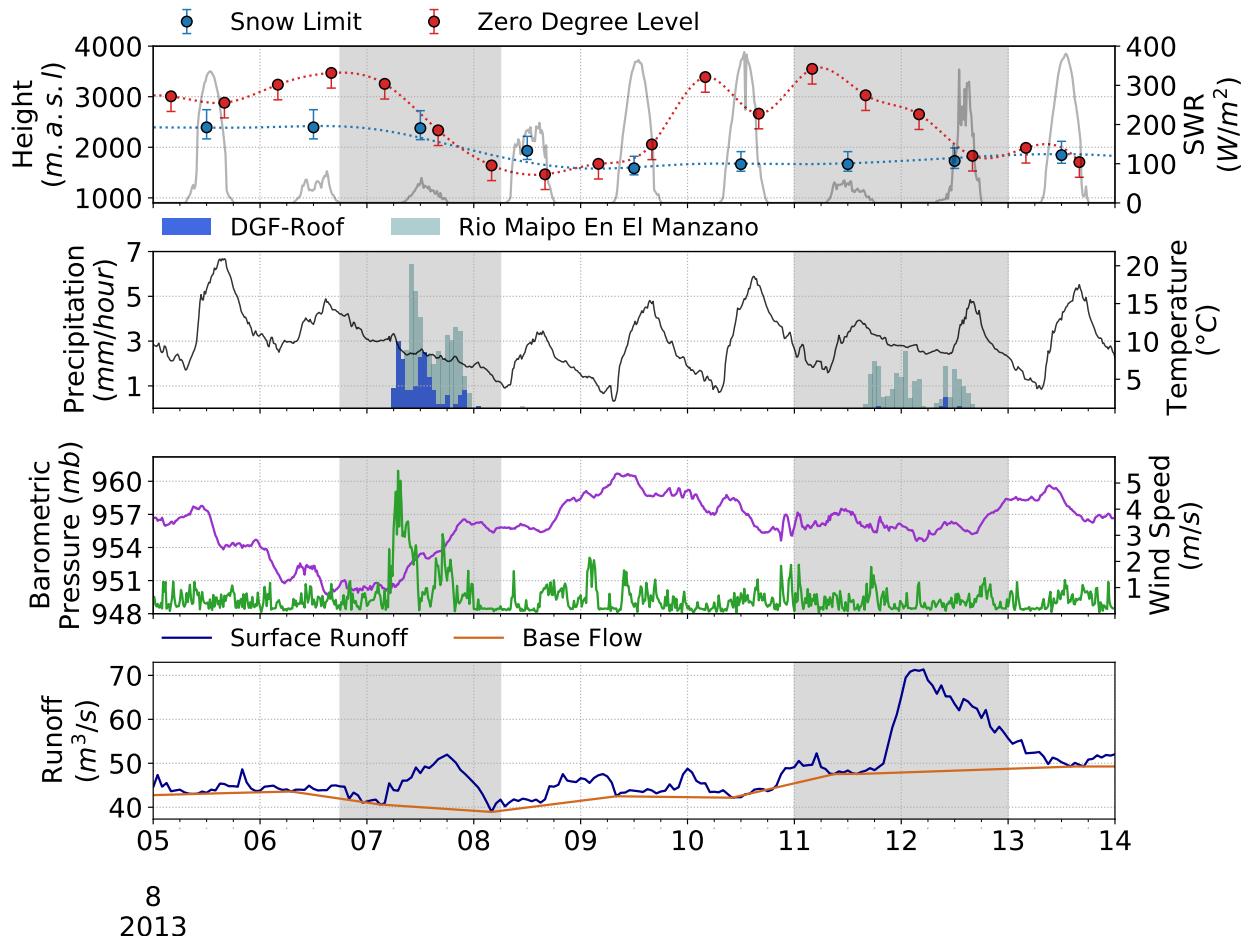


Figura 5.1: **Variables meteorológicas e hidrológicas observadas durante el 6 de Agosto del 2013 y el 14 de Agosto de 2013.** La figura indica: la altura de la isoterma 0°C (línea punteada y puntos rojos) y nivel de congelamiento (barra de error inferior), percentiles 80 %, 20 % (barras de error) y 50 % (puntos y línea punteada) de la distribución del límite de la nieve en altura, la radiación solar en el Santiago (línea continua gris), la temperatura en Santiago (línea continua negra), la precipitación en Santiago (barras azules), la precipitación en la salida de la cuenca (barras plateadas), el viento y la presión atmosférica en Santiago (líneas continuas verde y morada) y el caudal observado junto al flujo base estimado en la salida de la cuenca (líneas continuas azul y anaranjada). Variable expresada como fracción del área total de la cuenca.

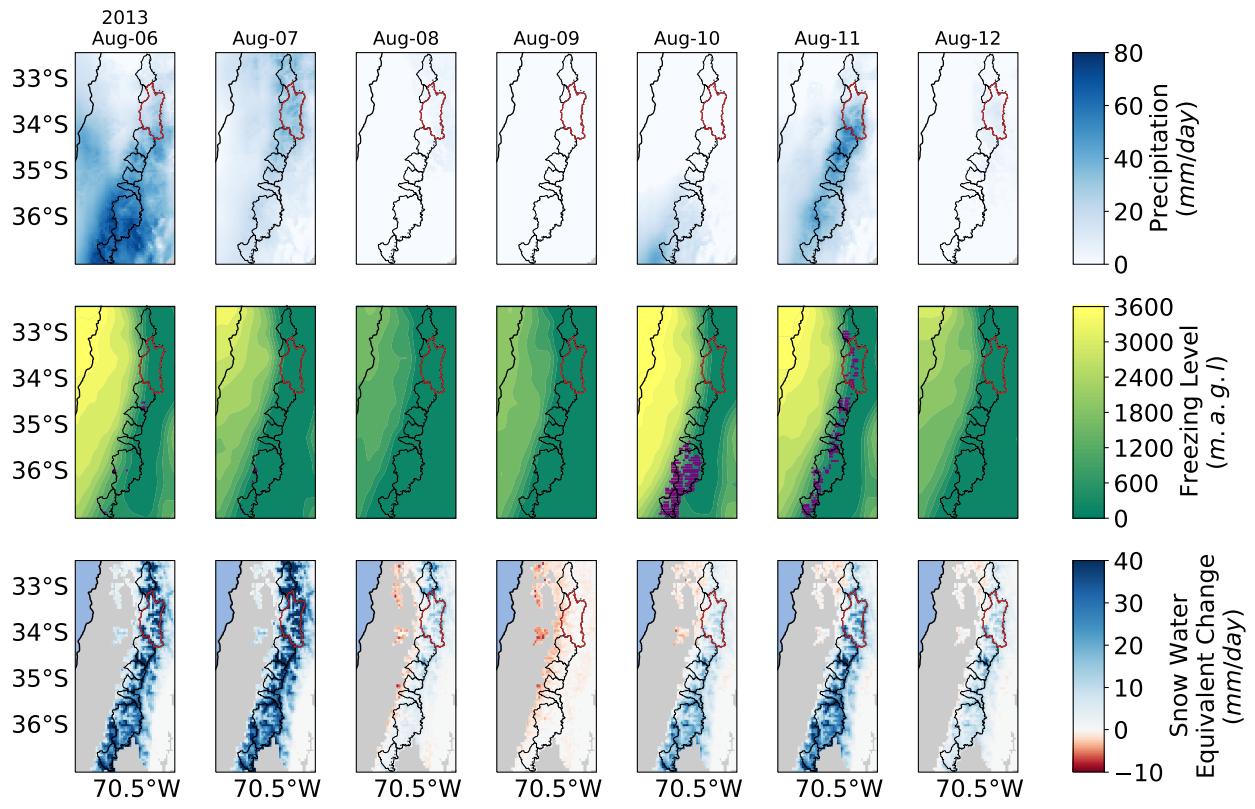


Figura 5.2: Evolución de los campos de PR, FL y Δ SWE para el dominio de montaña entre los días 6 y 12 de Agosto de 2013. Figuras realizadas respectivamente con el producto CR2MET, reanálisis ERA5 y el reanálisis de Cortés and Margulis (2017). Puntos morados indican las posiciones donde hubo ROS.

5.1.2. Condición sinóptica

hablar sobre al evolucion del ivt, y su correlacion con la precipitacion, las horas y fechas en que llegaron los frentes y si prevalecio precipitacion en montaña antes, durante y despues del frente

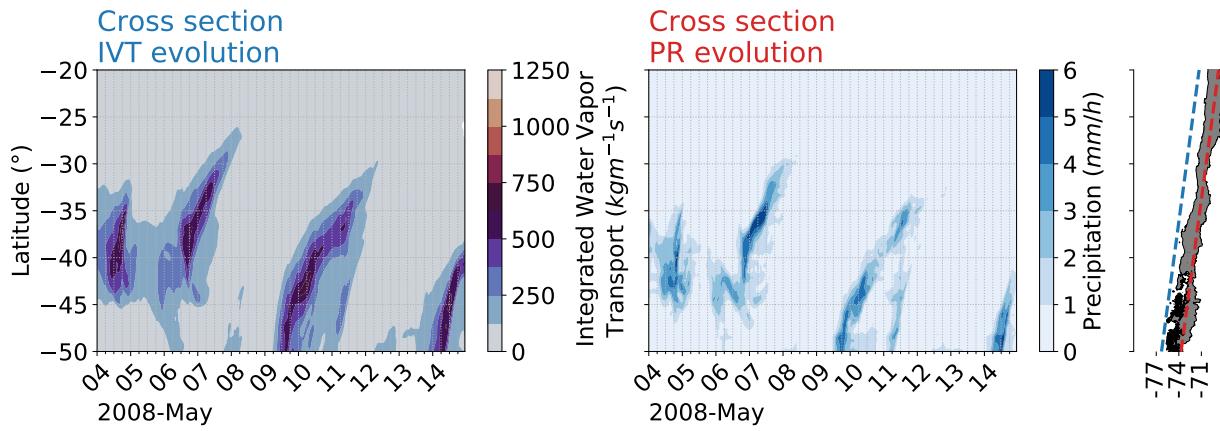


Figura 5.3: Evolución del IVT y PR a lo largo de Chile. **Panel izquierdo:** Magnitud del vector IVT a lo largo de un corte transversal paralelo a la costa de Chile (línea segmentada azul). **Panel derecho:** Intensidad de precipitación a lo largo de un corte transversal a través de Chile continental (línea segmentada roja). Datos horarios provenientes del reanálisis ERA5.

describir lo que se observa en la figura dinamica, contar sobre el frente frio la vanguardia, la condicion de aire frio que se mantuvo mientras se cocinaba la segunda tormenta

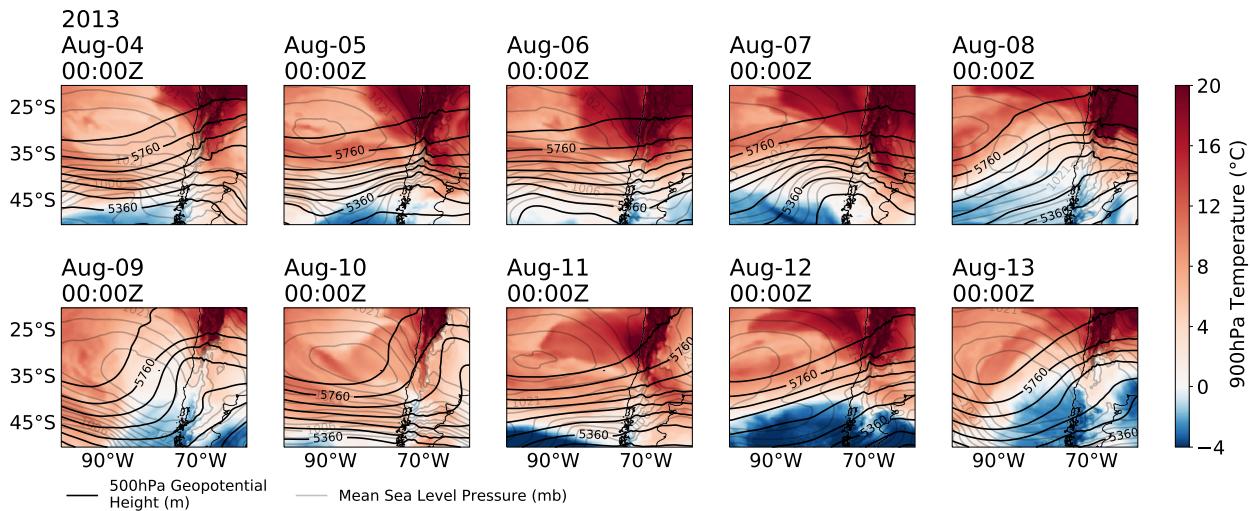


Figura 5.4: Evolución en la dinámica de la atmósfera durante el 4 y 13 de Agosto de 2013 para sudamérica y el océano pacífico suroriental. La figura indica: presión a nivel del mar (contornos grises), altura geopotencial en 500hPa (contornos negros) y temperatura en 900hPa (colores)

complementar la figura anterior con la evolucion de los campos de agua precipitable y hablar del sistema frontal y los rios atmosfericos

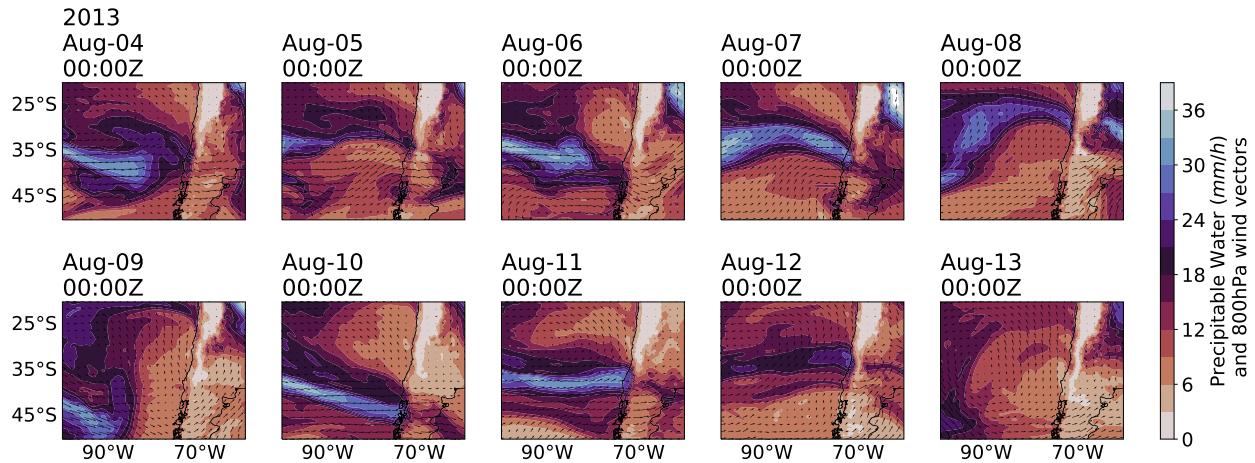


Figura 5.5: Evolución de los campos de agua precipitable y viento en 800hPa durante el 4 y 13 de Agosto de 2013 para sudamérica y el oceáno pacífico suroriental.

5.1.3. Discusión del evento

comentar sobre la necesidad de ver otro caso de estudio donde los caudales sean mas potentes Sturm et al. (2010) umbrales, criterios, justificaciones y las interpretaciones

5.2. Caso de estudio evento ROS del 4 de Junio de 2008

5.2.1. Observaciones hidrometeorológicas

describir la figura de abajo y hablar sobre la respuesta hidrologica de las cuencas de montaña, nivales y las mixtas/pluviales

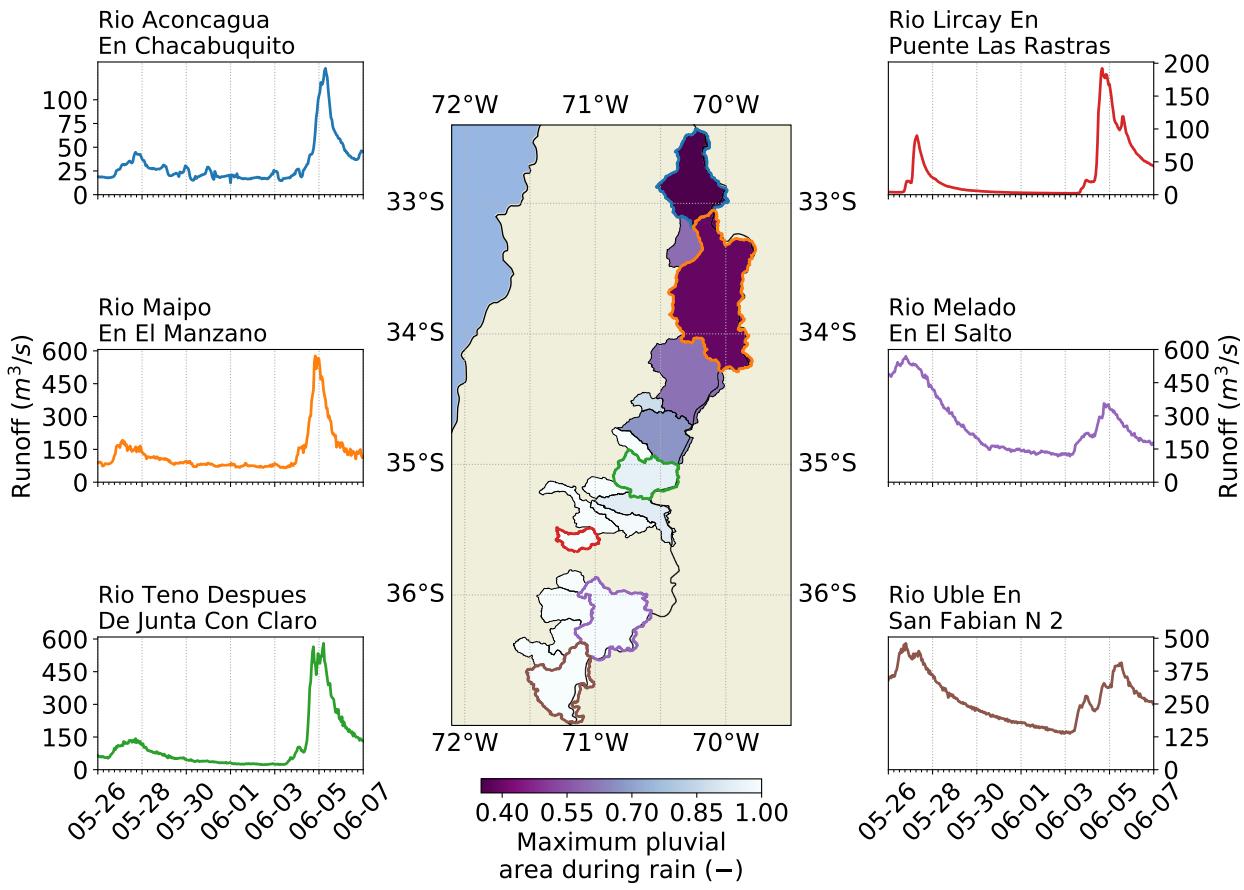


Figura 5.6: **Hidrogramas de caudales instantáneos para algunas cuencas de montaña durante el 26 de Mayo de 2008 hasta el 7 de Junio de 2008.** Figura central indica la máxima área pluvial durante días de precipitación estimada a partir de CR2MET y ERA5.

comentar sobre el detalle de las observaciones hidrometeorológicas en el maipo en el manzano (la figura de abajo) describir como fueron las dos tormentas y que paso con la isoterma 0 y snow limit, el periodo de retorno del caudal maximo

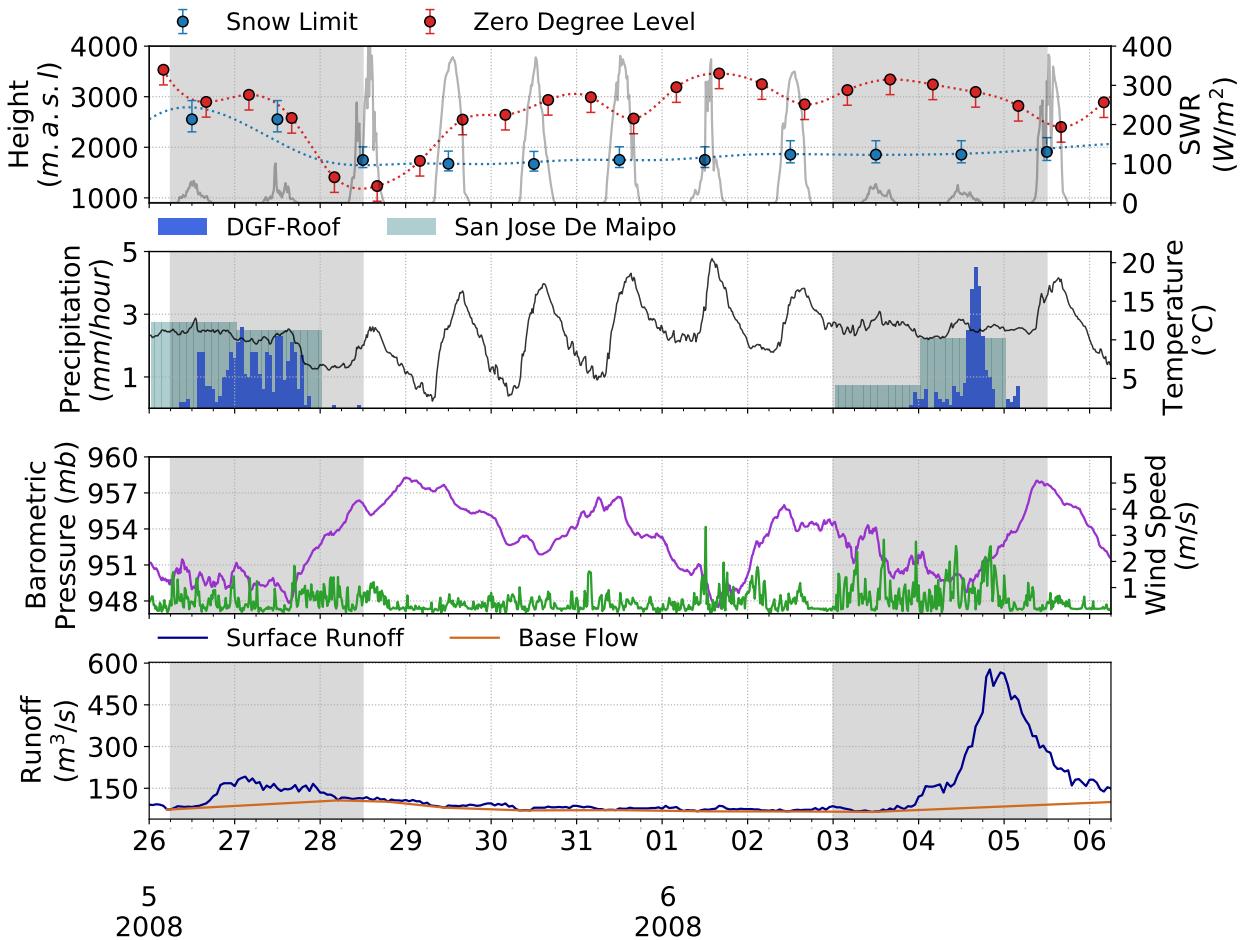


Figura 5.7: **Variables meteorológicas e hidrológicas observadas durante el 26 de Mayo del 2008 y el 6 de Junio de 2008.** La figura indica: la altura de la isoterma 0°C (línea punteada y puntos rojos) y nivel de congelamiento (barra de error inferior), percentiles 80 %, 20 % (barras de error) y 50 % (puntos y línea punteada) de la distribución del límite de la nieve en altura, la radiación solar en el Santiago (línea continua gris), la temperatura en Santiago (línea continua negra), la precipitación en Santiago (barras azules), la precipitación en la salida de la cuenca (barras plateadas), el viento y la presión atmosférica en Santiago (líneas continuas verde y morada) y el caudal observado junto al flujo base estimado en la salida de la cuenca (líneas continuas azul y anaranjada). Variable expresada como fracción del área total de la cuenca.

comentar sobre lo que indican los reanalisis cr2met, era5 y el cortes el criterio anterior detecta la primera tormenta cmoo ros y la segunda no, las precipitaciones máximas y la temperaturar

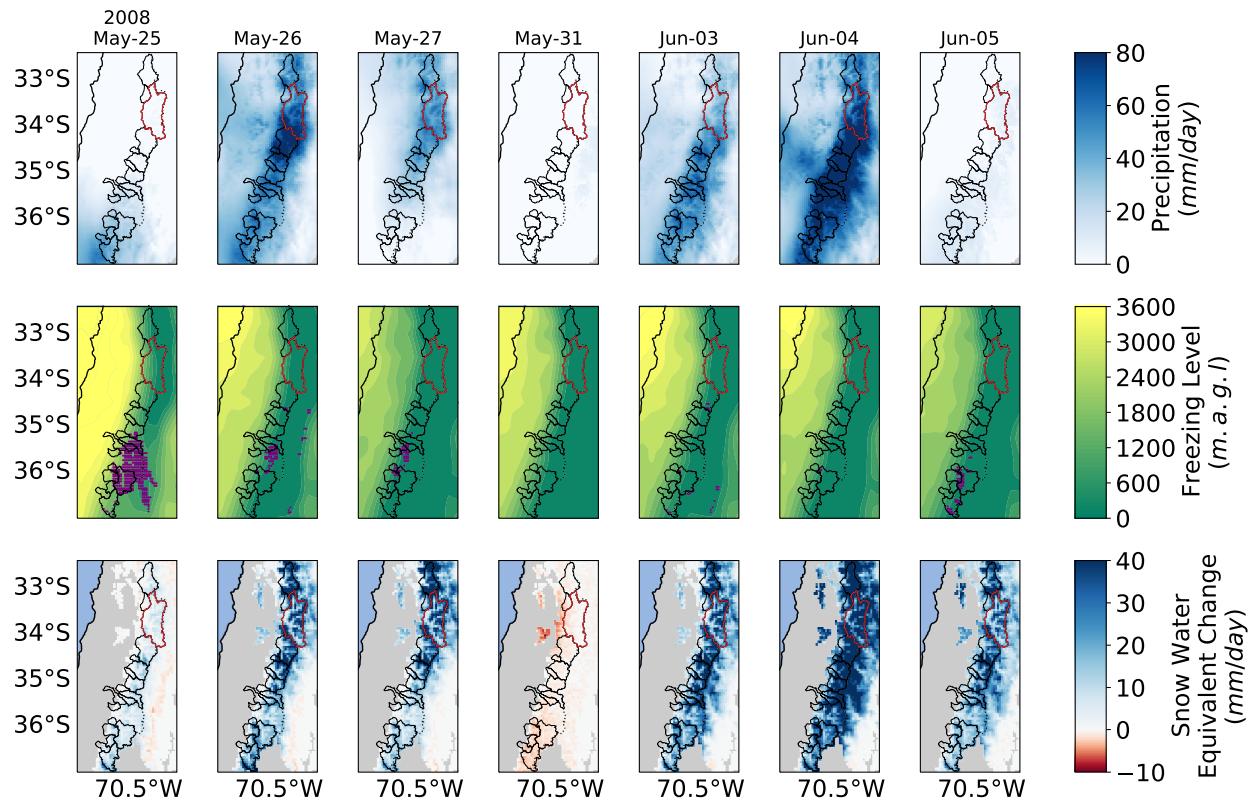


Figura 5.8: Evolución de los campos de PR, FL y Δ SWE para el dominio de montaña entre los días 25 de Mayo y 5 de Agosto de 2008 (obviando algunos días entre las lluvias). Figuras realizadas respectivamente con el producto CR2MET, reanálisis ERA5 y el reanálisis de Cortés and Margulis (2017). Puntos morados indican las posiciones donde hubo ROS sujeto al mismo criterio del caso de estudio anterior.

describir la crecida del maipo en detalle, el tiempo al caudal peak, la escorrentia directa, el area pluvial, cuando empezo y termino la lluvia cuanta nieve se gano perdio, etc altura instrumental bla bla

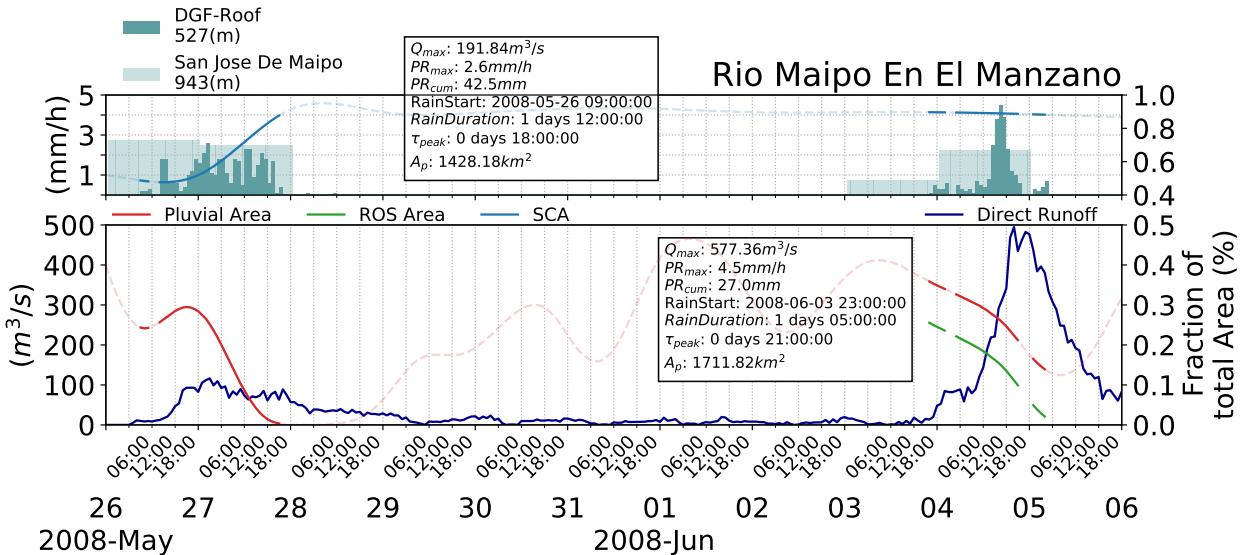


Figura 5.9: Análisis detallado de las precipitaciones, temperatura, nieves y la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Maipo en términos de caudales instantáneos. La Figura indica: precipitación acumulada en San José de Maipo (barras transparentes), interpolación horaria de la cobertura nival IANIGLA-CR2MET (línea azul claro), escorrentía directa (línea azul oscuro), el área pluvial (línea roja) y el área ROS (línea verde). Cuadro superior indica estadísticas para la primera tormenta y el cuadro inferior para la segunda.

5.2.2. Condición sinóptica

contar la historia sinóptica, las dos tormentas oznales, la dorsal gigante y el aire frio atrapado en chile, la vaguada barotropica el frente abandonado y la segunda tormenta zonal cálida, comentar sobre las figuras del anexo

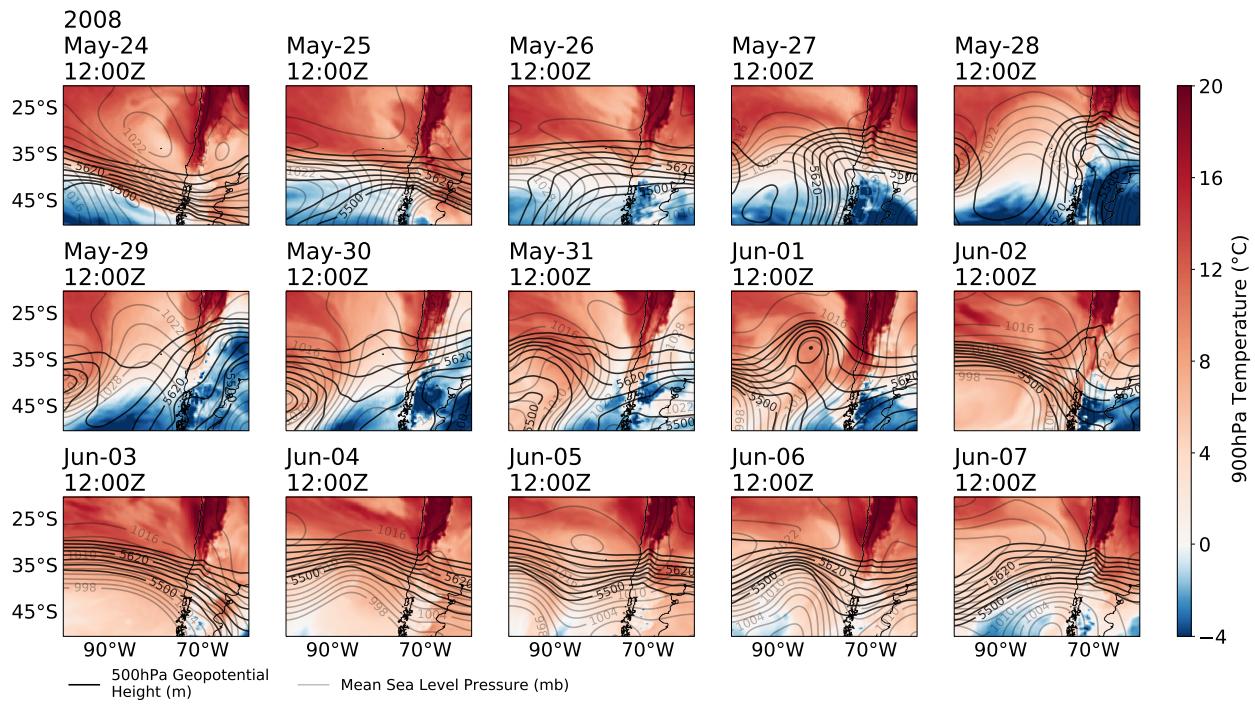


Figura 5.10: **Evolución en la dinámica de la atmósfera durante el 24 de Mayo y 7 de Agosto de 2008 para sudamérica y el océano pacífico suroriental.** La figura indica: presión a nivel del mar (contornos grises), altura geopotencial en 500hPa (contornos negros) y temperatura en 900hPa (colores)

5.2.3. Discusion del evento

discutir que este evento genero grandes caudales la intensidad de precipitacion al corta duracion y la magnitud, dificil definir cual es el aporte del derretimiento de nieve sin tener SWE, conversar sobre la perdida de area nival despues de la tormenta y sobre la respuesta hidrologica de las otras cuencas el periodo de retorno de cada una, sobre como las tormentas calidas tambien pueden dejar nevadas (la tormenta 1 puede ser de cualquier tipo), el fracaso del reanalisis del cortes y su problema por tener tanta nieve

terminar discutiendo sobre la dificultad de climatologizar "los eventos ros con resoluciones diarias pero q se hara igual y se mostrara todo en la seccion siguiente

Capítulo 6

Climatología de eventos de lluvia sobre nieve en Chile Central y características típicas asociadas

bla bla a continuacion se presenta la climatologia de ros con dos metodos, uno con el reanalisis a nivel de pixel y sus bemoles y el otro sacrificando resolucion espacial pero con mas confianza a nivel de cuenca y con el ianigla

6.1. Análisis utilizando reanálisis ERA5, CR2MET y el observatorio andino.

introducir la figura de los ciclos anuales ROS, la diferencia entre las cuencas, la variabilidad anual, las tendencias que no dieron significativas pero decirlas igual, la relacion entre dias ros y dias ros con derretimiento y respecto a los dias de precipitacion

Mean annual cycle of ROS days

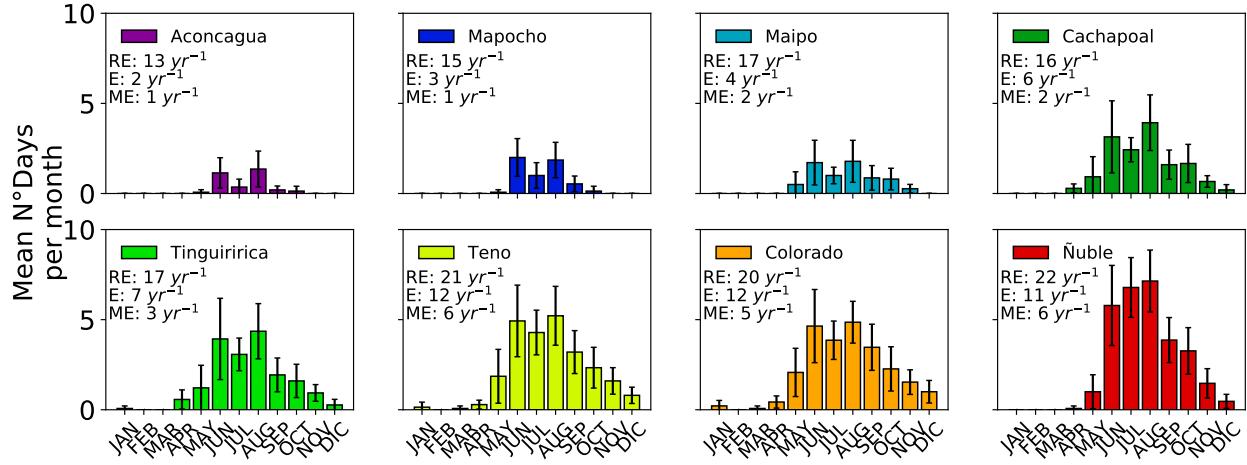


Figura 6.1: Ciclo anual de eventos ROS a nivel mensual para las principales cuencas de montaña de Chile Central. Barras de error indican la variabilidad anual mediante el intervalo de confianza del 95 %. RE: Promedio anual del número de eventos de precipitación. E: Promedio anual del número de eventos de lluvia sobre nieve. ME: Promedio anual del número de eventos de lluvia sobre nieve donde se detectó derretimiento.

empezar a hablar un poco de las consecuencias de los ros, q se observan en las estadísticas, q relación tienen con los caudales extremos, cuanto SCA se observa q se pierde en promedio durante un evento d ros, q se ve respecto a las precipitaciones extremas?,

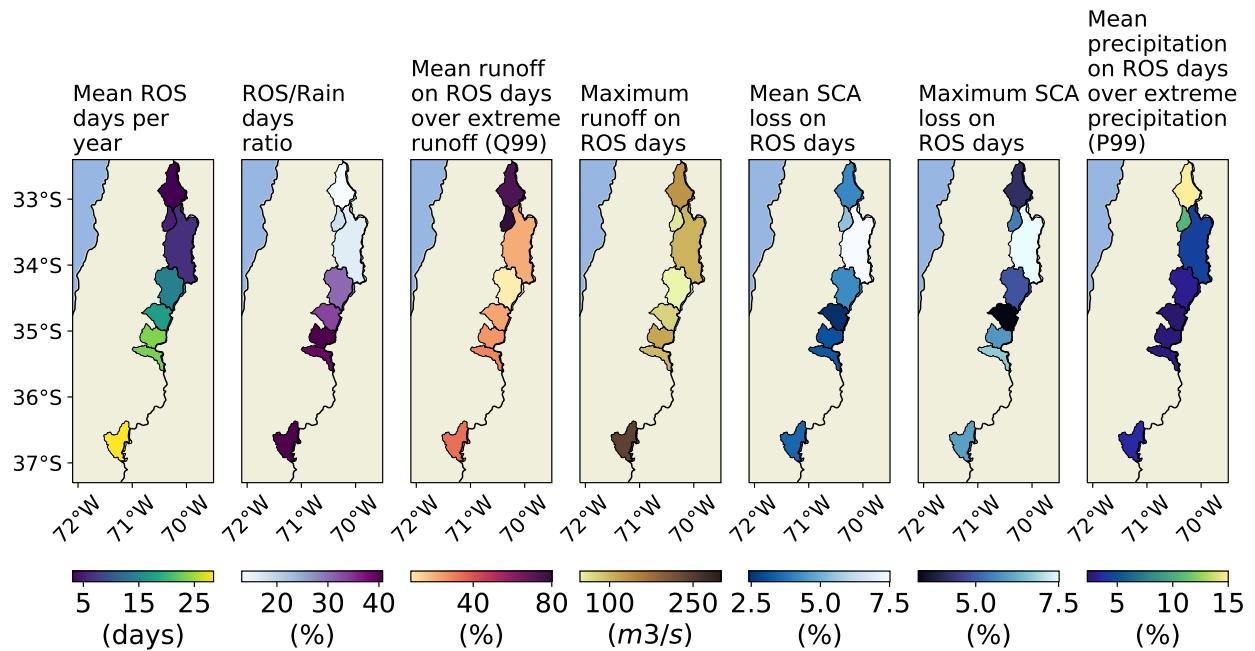


Figura 6.2: Prevalencia, estadísticas generales y propiedades de los eventos ROS para las principales cuencas de montaña de Chile Central.

sobre la variabilidad entre los eventos de crecida que existen en estas cuencas, como se explica la variabilidad que esta fuera del área pluvial, la precipitación y la duración?, era

razonable echarle la culpa a los ROS o la hunemdad de la cuenca pero la figura de abajo debo contar lo q muestra sin interpretar y en la discusion dejar el tejo pasado con alguna idea

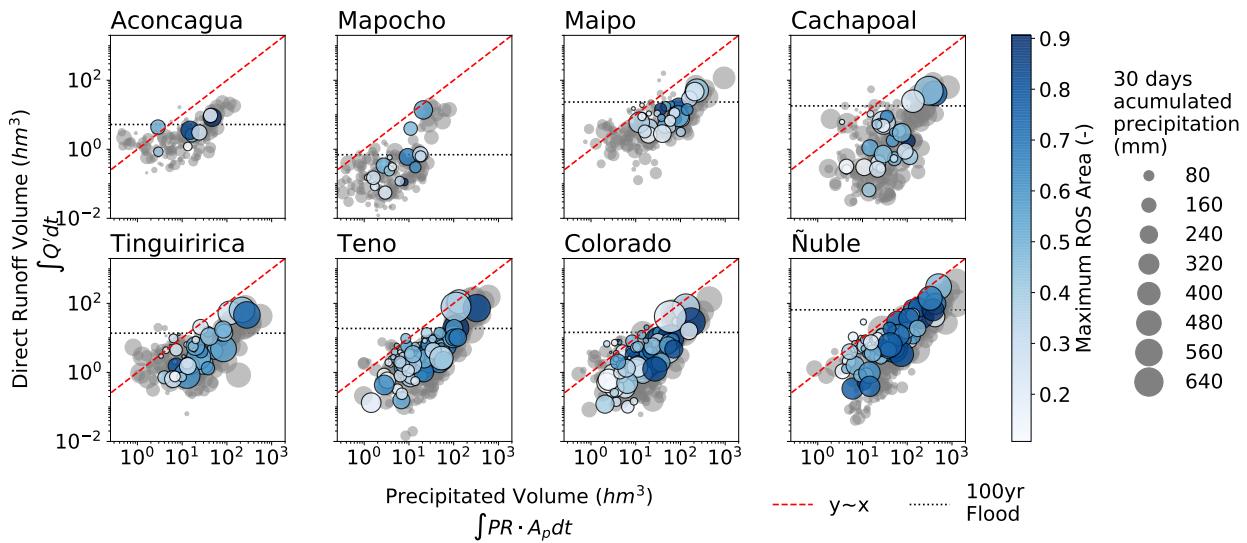


Figura 6.3: Gráficos de dispersión entre el volumen de escorrentía directa y el volumen de agua líquida precipitada durante distintos eventos de precipitación. Puntos grises: eventos donde no ocurrió ROS. Puntos de color: eventos de ROS coloreados por la máxima área ROS detectada. Tamaño del punto: precipitación acumulada en los últimos 30 días como proxy de humedad en la cuenca. Línea punteada negra: evento de período de retorno igual a 100 años.

6.2. Análisis utilizando reanálisis ERA5, CR2MET y el reanálisis SWE de Cortés and Margulis (2017).

introducir la figura de abajo, los meses en lso que ocurren los maximos ros, la frecuencia observada respecto ad ias con precipacion

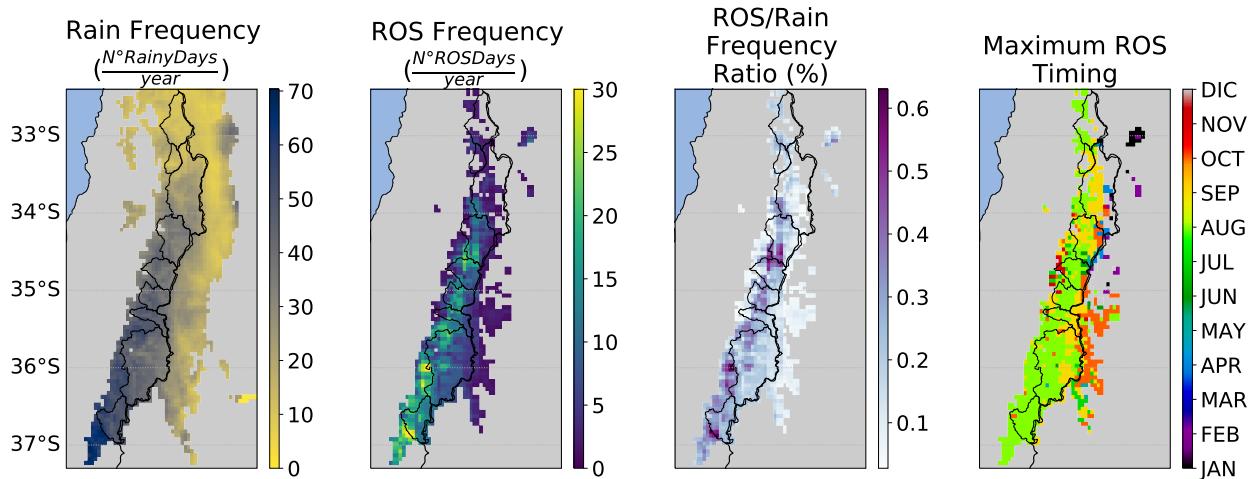


Figura 6.4: Prevalencia de eventos ROS en Chile Central, variabilidad espacial a nivel de píxel $0.05^\circ \times 0.05^\circ$.

hablar un poco de las estadísticas q salen al utilizar el reanalisis ponerle harto WARNING sobre q hay mucha nieve y no es uy confiable pero es lo q muestra

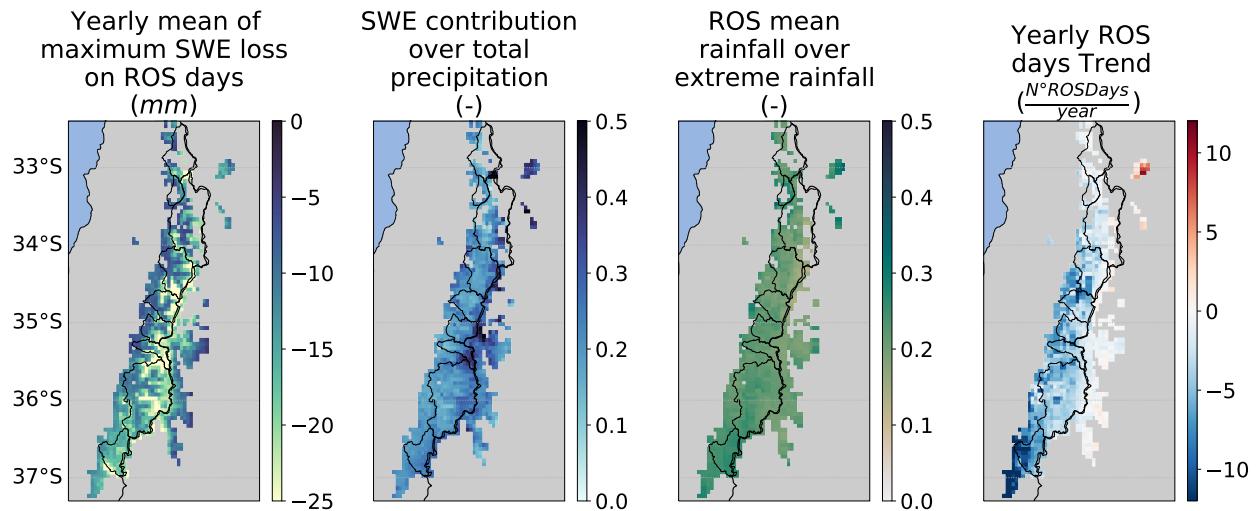


Figura 6.5: Estadísticas generales y propiedades de eventos ROS en Chile Central, variabilidad espacial a nivel de píxel $0.05^{\circ}\times0.05^{\circ}$.

6.3. Análisis compuesto y elementos típicos de una tormenta ROS

bla bla aqui falta el mono así se ve la tormenta tipica de ROS en la sinoptica y asi se ve el hidrograma/hietograma tipico de una crecida ros sube baja llega pega golpea fuerte debil

6.4. Discusión

bla bla los ros existen, ocurren en el invierno tirado para la primavera pero tambien puede ocurrir en otoño, generalmente los caudales extremos tiene un poco de ros metido, no necesariamente los caudales extemos ocurren de la mano de precipitaciones extremas, el derretimiento puede estar en el orden de tanto tanto, la estadistica con el cortes le achunta mas o menos a la climatologia pero falla a nivel de evento por lo q hay eventos q si fueron ros y no los pilla y toma como ros eventos que no lo eran pero el sumando general da una climatologia parecida. lasa estadisticas no les creo na a esos 25 mm de derretimiento, suena a mucho voy a revisar la literatura, las tendencias tampoco estan muy bien parece q estsa dominando por las tendencias negativas de la precipitacion, en el caso del ianigla no son significativas pero no se ven taaaaan negativas. hablar sobre las crecias y la variabildiad q queda por fuera de las variables tipicas, los ros y el proxy de la humedad del suelo de la cuenca no sirvieron para explicar esa varianza y ese sigue como problema sin solucion de la hidrologia chilena, faltan datos de eventos extremos son muy pocos, quizas seria bueno tirar un modelo por harto rato para tener hartas crecidas potentes

Capítulo 7

Conclusiones

El autor no responde de las molestias que puedan ocasionar sus escritos: Aunque le pese. El lector tendrá que darse siempre por satisfecho. Sabelius, que además de teólogo fue un humorista consumado, Después de haber reducido a polvo el dogma de la Santísima Trinidad ¿Respondió acaso de su herejía? Y si llegó a responder, ¡cómo lo hizo! ¡En qué forma descabellada! ¡Basándose en qué cúmulo de contradicciones! N.P

bla bla bla

Bibliografía

- Alvarez-Garreton, C., Pablo Boisier, J., Garreaud, R., Seibert, J., and Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1):429–446.
- Barrett, B. S., Garreaud, R. D., and Falvey, M. (2009). Effect of the Andes Cordillera on precipitation from a midlatitude cold front. *Monthly Weather Review*, 137(9):3092–3109.
- Beniston, M. and Stoffel, M. (2016). Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4 °C and decrease thereafter. *Science of the Total Environment*, 571(May 1999):228–236.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., and Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1):413–421.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., and Valdivieso, J. (2017). Climate change impacts on hydroclimatic regimes and extremes over Andean basins in central Chile. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (January):1–29.
- Cara Ramírez, L. J. (2018). Desarrollo de una plataforma web para el procesamiento digital de imágenes satelitales enfocada al estudio del hidroclima. *Universidad Nacional de Córdoba*, (Tesis para obtener el grado de Magíster en aplicaciones de información espacial).
- Corripio, J. G. and López-Moreno, J. I. (2017). Analysis and predictability of the hydrological response of mountain catchments to heavy rain on snow events: A case study in the Spanish Pyrenees. *Hydrology*, 4(2).
- Cortés, G. and Margulis, S. (2017). Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31 year reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 44(13):6859–6867.
- Coumerme, D. (2021). Caracterización De Eventos Meteorológicos Extremos En La Parte Alta Del Río Maipo, Chile: Efecto De Eventos De Lluvia Sobre Nieve Y Proyecciones Por Cambio Climático.
- Cuffey, K. and Paterson, W. (2010). *The physics of glaciers. Fourth edition.*
- DeGraff, J. V., McKEAN, J., Watanabe, P. E., and McCaffery, W. (1984). Landslide activity and groundwater conditions: insights from a road in the central sierra nevada, california. *Transportation Research Record*, 965:32–37.
- DeWalle, D. R. and Rango, A. (2008). *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press.
- Falvey, M. and Garreaud, R. (2007). Wintertime precipitation episodes in Central Chile: As-

- sociated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2):171–193.
- Fernández, B. and Gironás, J. (2021). *Water Resources of Chile*, volume 8.
- Garreaud, R. (1992). Impacto de la variabilidad de la linea de nieve en crecidas invernales en cuencas Pluvio-Nivales de Chile Central.
- Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in central chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5):1515–1534.
- Garvelmann, J., Pohl, S., and Weiler, M. (2015). Spatio-temporal controls of snowmelt and runoff generation during rain-on-snow events in a mid-latitude mountain catchment. *Hydrological Processes*, 29(17):3649–3664.
- Harr, R. D. (1981). Some characteristics and consequences of snowmelt during rainfall in western Oregon. *Journal of Hydrology*, 53(3-4):277–304.
- Ibañez, M., Gironás, J., Oberli, C., Chadwick, C., and Garreaud, R. D. (2021). Daily and seasonal variation of the surface temperature lapse rate and 0°C isotherm height in the western subtropical Andes. *International Journal of Climatology*, 41(S1):E980–E999.
- Li, D., Lettenmaier, D. P., Margulis, S. A., and Andreadis, K. (2019). The Role of Rain-on-Snow in Flooding Over the Conterminous United States. *Water Resources Research*, 55(11):8492–8513.
- Mardones, P. and Garreaud, R. D. (2020). Future changes in the free tropospheric freezing level and rain–snow limit: The case of central Chile. *Atmosphere*, 11(11):1–16.
- Marks, D., Kimball, J., Tingey, D., and Link, T. (1998). The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: a case study of the 1996 Pacific Northwest flood. *Hydrological Processes*, 12(10-11):1569–1587.
- Mazurkiewicz, A. B., Callery, D. G., and McDonnell, J. J. (2008). Assessing the controls of the snow energy balance and water available for runoff in a rain-on-snow environment. *Journal of Hydrology*, 354(1-4):1–14.
- McCabe, G. J., Clark, M. P., and Hay, L. E. (2007). Rain-on-snow events in the western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(3):319–328.
- Minder, J. R., Durran, D. R., and Roe, G. H. (2011). Mesoscale controls on the mountainside snow line. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(9):2107–2127.
- MOP (1995). *Ministerio de obras públicas: Manual de calculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica*. DGA: Santiago, Chile.
- Musselman, K. N., Lehner, F., Ikeda, K., Clark, M. P., Prein, A. F., Liu, C., Barlage, M., and Rasmussen, R. (2018). Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America. *Nature Climate Change*, 8(9):808–812.
- Nicholas, W., Jessica, L., and Clark, M. (2015). Modeling the influence of hypsometry, vegetation, and storm energy on snowmelt contributions to basins during rain-on-snow floods. *Water Resources Research*.
- Pomeroy, J. W., Stewart, R. E., and Whitfield, P. H. (2016). The 2013 flood event in the south saskatchewan and elk river basins: Causes, assessment and damages. *Canadian Water Resources Journal*, 41(1):1–14.

- Resources Journal/Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 41(1-2):105–117.
- Salby, M. L. (1996). *Fundamentals of atmospheric physics*. Elsevier.
- Singh, P., Spitzbart, G., Hübl, H., and Weinmeister, H. W. (1997). Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: A field study. *Journal of Hydrology*, 202(1-4):1–20.
- Stimberis, J. and Rubin, C. M. (2011). Glide avalanche response to an extreme rain-on-snow event, snoqualmie pass, washington, usa. *Journal of Glaciology*, 57(203):468–474.
- Sturm, M., Taras, B., Liston, G. E., Derksen, C., Jonas, T., and Lea, J. (2010). Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes. *Journal of Hydrometeorology*, 11(6):1380–1394.
- Sui, J. and Koehler, G. (2001). Rain-on-snow induced flood events in southern Germany. *Journal of Hydrology*, 252(1-4):205–220.
- Surfleet, C. G. and Tullos, D. (2013). Variability in effect of climate change on rain-on-snow peak flow events in a temperate climate. *Journal of Hydrology*, 479:24–34.
- Swanson, D. N. (1974). *Slope stability problems associated with timber harvesting in mountainous regions of the western United States*, volume 21. Pacific Northwest Research Station, US Department of Agriculture, Forest Service.
- Valenzuela, R. A. and Garreaud, R. D. (2019). Extreme daily rainfall in central-southern Chile and its relationship with low-level horizontal water vapor fluxes. *Journal of Hydrometeorology*, 20(9):1829–1850.
- Viale, M. and Garreaud, R. (2015). Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitation. *Nature*, 175(4449):238.
- Viale, M. and Nuñez, M. N. (2011). Climatology of winter orographic precipitation over the subtropical central Andes and associated synoptic and regional characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4):481–507.
- Waananen, A. O., Harris, D. D., and Williams, R. C. (1970). *Floods of December 1964 and January 1965 in the Far Western States*. US Government Printing Office.
- Winstral, A. and Marks, D. (2002). Simulating wind fields and snow redistribution using terrain-based parameters to model snow accumulation and melt over a semi-arid mountain catchment. *Hydrological Processes*, 16(18):3585–3603.

Anexo A

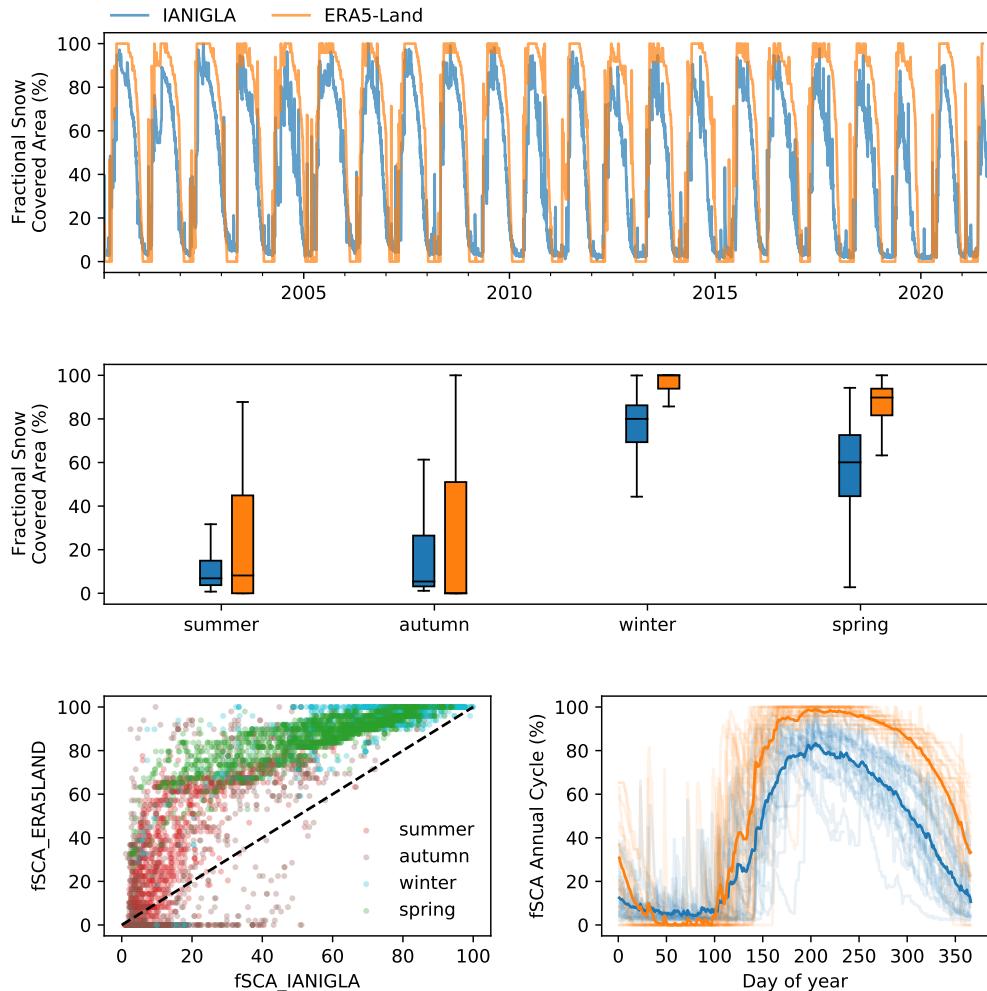


Figura A.1: **Analisis comparativo entre la cobertura nival (SCA) estimada por el observatorio andino IANIGLA-CR2 y lo entregado por el modelo de reanálisis ERA5-Land.** Panel superior: Serie de tiempo completa. Panel intermedio: Distribución de cobertura nival según fuente de datos y estación del año. Panel inferior: Gráfico de dispersión (puntos rojos, cafés, celestes y verdes corresponden a puntos de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente) y ciclo medio anual.

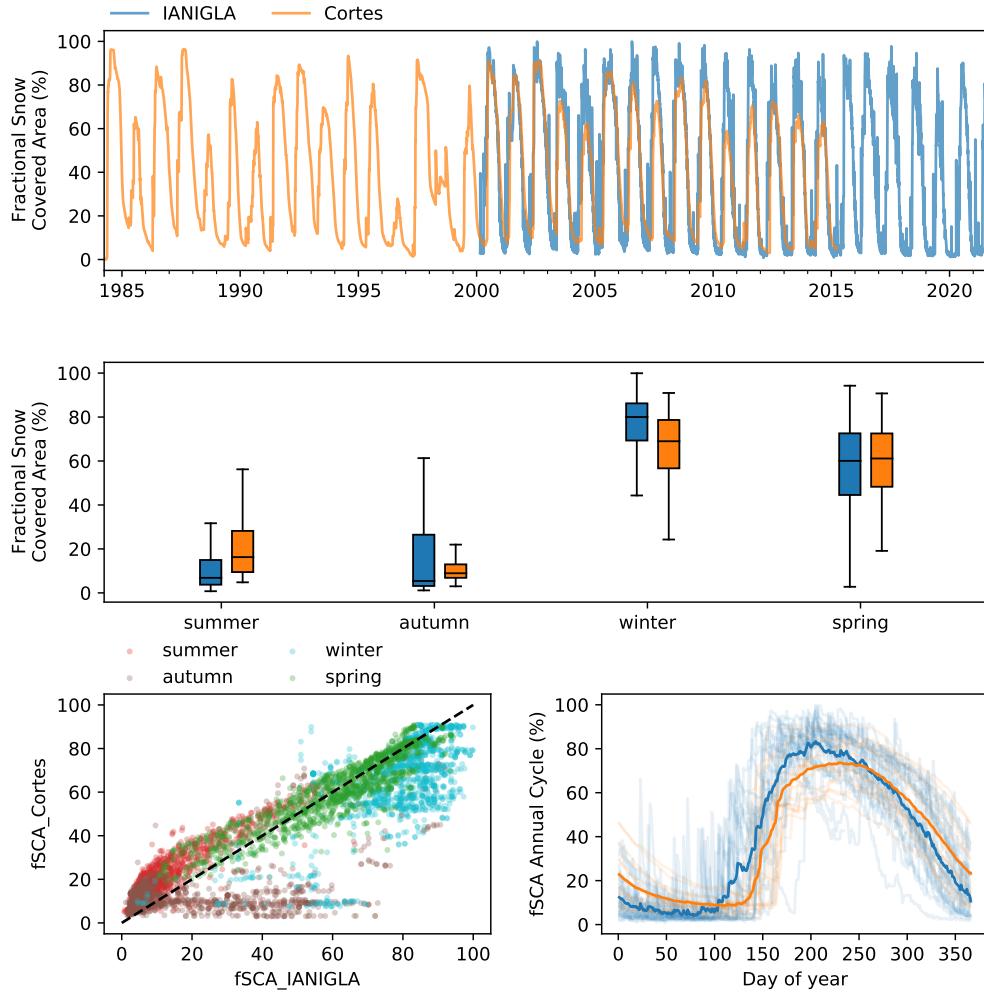


Figura A.2: Análisis comparativo entre la cobertura nival (SCA) estimada por el observatorio andino IANIGLA-CR2 y lo entregado por el modelo de reanálisis de Cortés and Margulis (2017) Panel superior: Serie de tiempo completa. Panel intermedio: Distribución de cobertura nival según fuente de datos y estación del año. Panel inferior: Gráfico de dispersión (puntos rojos, cafés, celestes y verdes corresponden a puntos de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente) y ciclo medio anual. Umbral de corte para píxel con o sin nieve igual a 100mm de SWE.

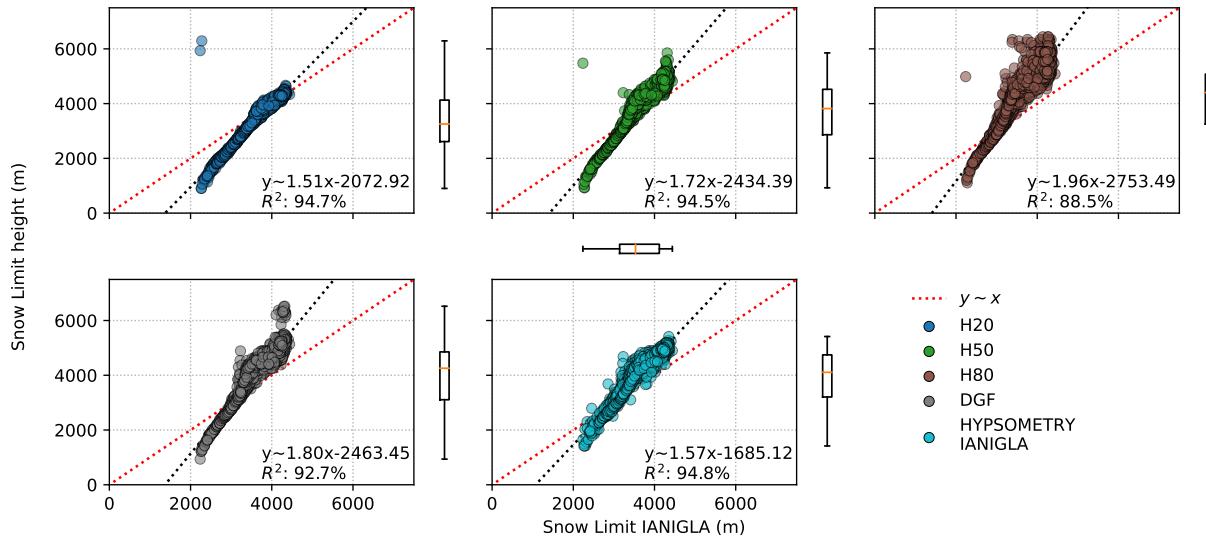


Figura A.3: Dispersión entre el SL otorgado por el observatorio andino (IANIGLA-CR2) contra distintos métodos para determinar la misma variable en la cuenca del Rio Maipo En El Manzano. La fila superior muestra la relación respecto al SL determinado con la distribución de nieve en altura por el sensor Modis, las columnas muestran los percentiles 20 (azul), 50(verde) y 80(marrón) de dicha distribución (para cada día con imagen satelital). La segunda fila muestra la relación con el SL determinado por el DGF (gris) y el calculado con el área nival y la curva hipsométrica (celeste).

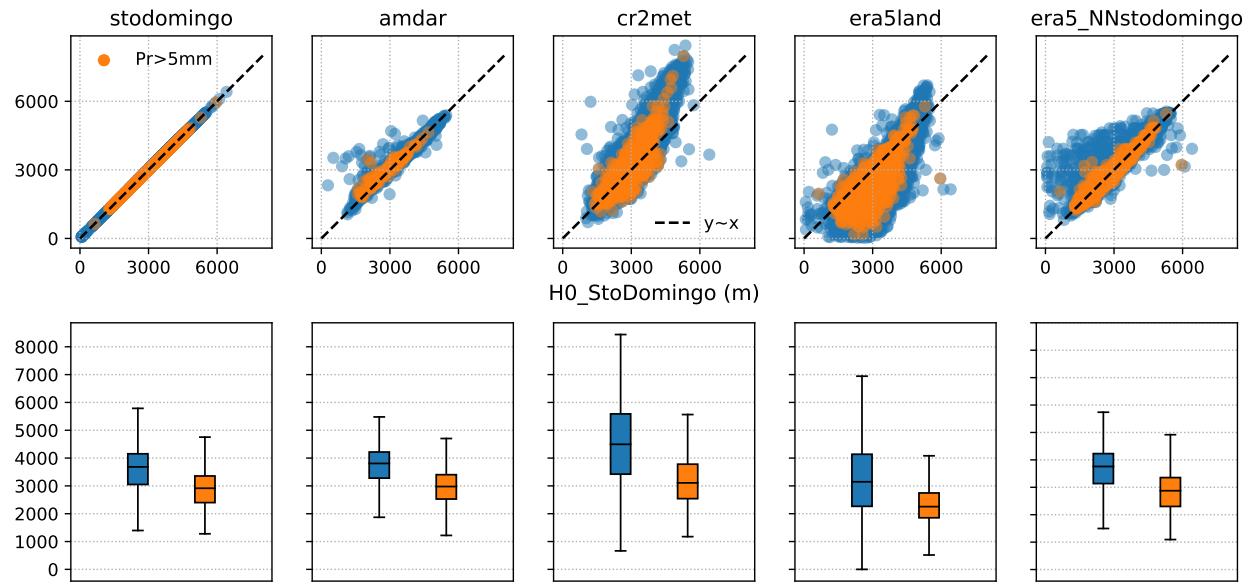


Figura A.4: Dispersión y variabilidad entre la elevación de la isoterma 0°C indicada por el radiosonda de Santo Domingo y otras fuentes de información para días con y sin precipitación (anaranjado y azul respectivamente) para la cuenca del Rio Maipo En El Manzano. Los cálculos de la isoterma 0°C con el producto CR2MET y ERA5-Land corresponden al valor que entregan relaciones lineales significativas de temperatura y altura ($R^2 > 0.9$) para los píxeles dentro de la cuenca. Para el reanalisis ERA5 se utiliza la serie del vecino más cercano.

Anexo B

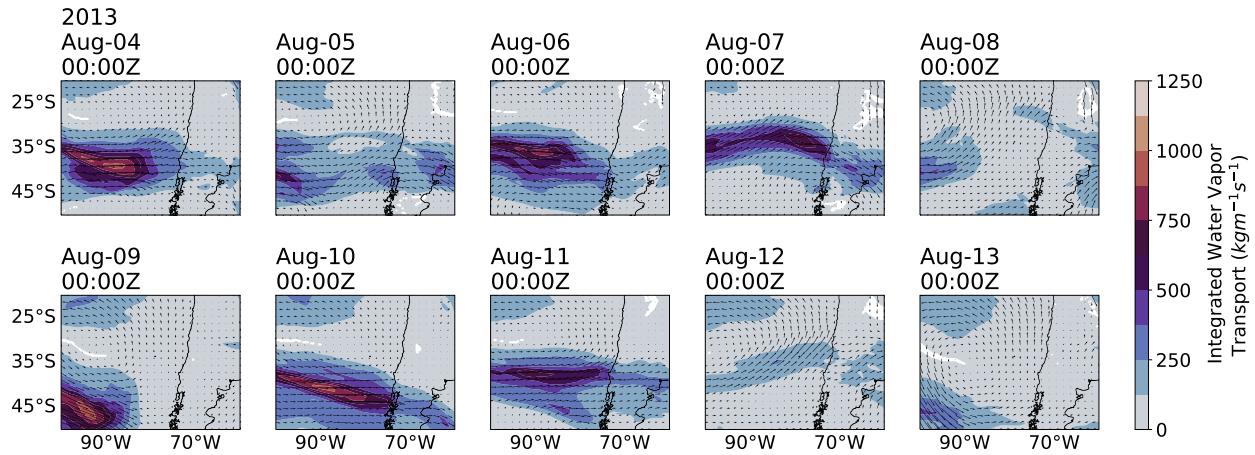


Figura B.1: **Evolución del vector IVT durante el 4 y 13 de Agosto del 2018.** Magnitud en colores, magnitud, dirección y sentido en vectores. Datos del reanálisis ERA5

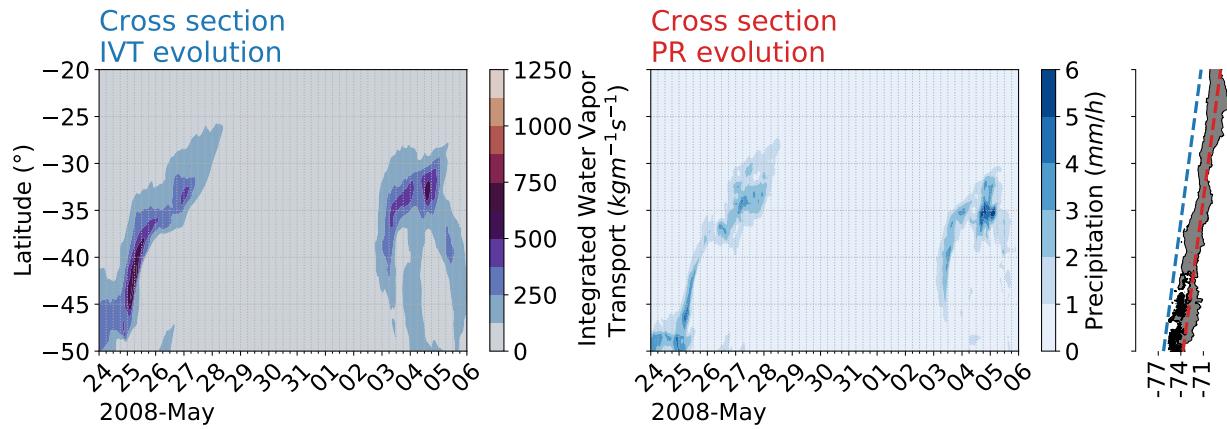


Figura B.2: **Evolución del IVT y PR a lo largo de Chile.** **Panel izquierdo:** Magnitud del vector IVT a lo largo de un corte transversal paralelo a la costa de Chile (línea segmentada azul). **Panel derecho:** Intensidad de precipitación a lo largo de un corte transversal a través de Chile continental (línea segmentada roja). Datos horarios provenientes del reanálisis ERA5.

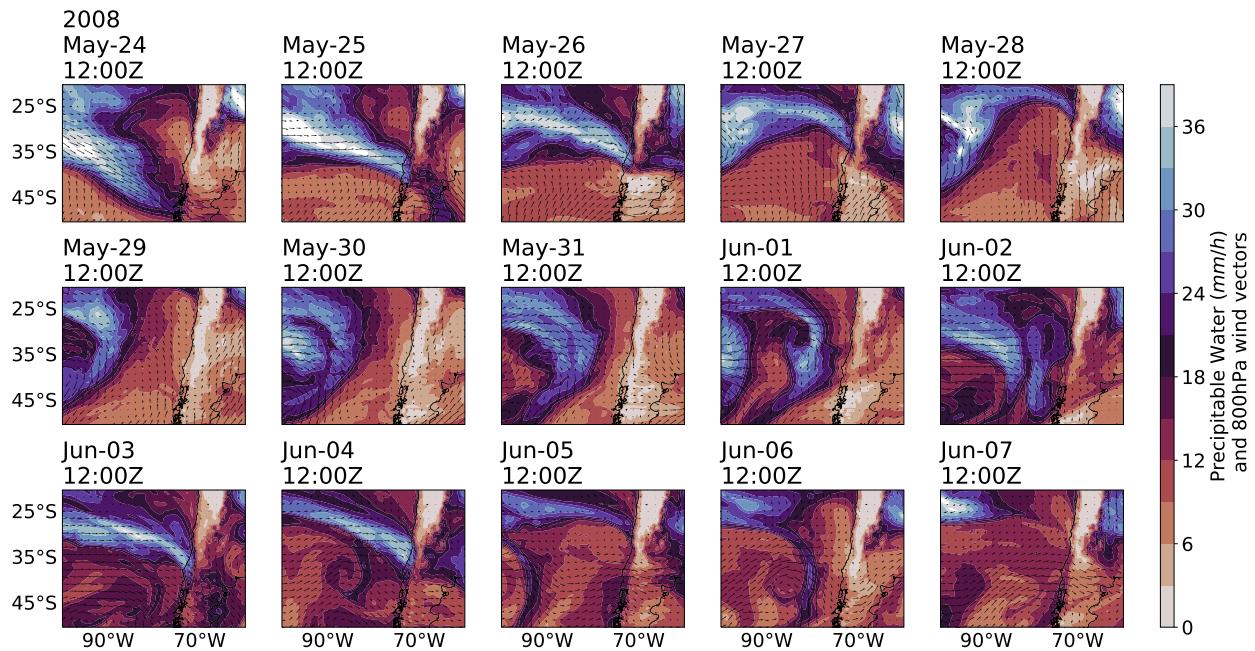


Figura B.3: Evolución de los campos de agua precipitable y viento en 800hPa durante el 24 de Mayo y 7 de Agosto de 2008 para sudamérica y el oceáno pacífico suroriental.

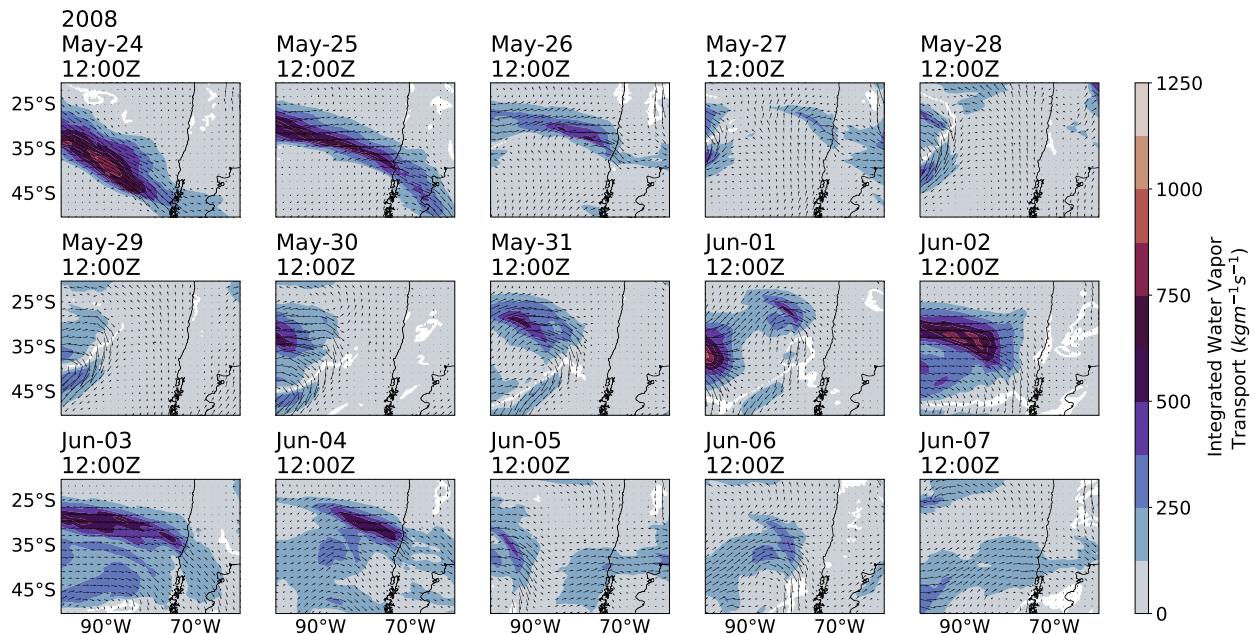


Figura B.4: Evolución del vector IVT durante el 24 de Mayo y 7 de Junio del 2008. Magnitud en colores, magnitud, dirección y sentido en vectores. Datos del reanálisis ERA5

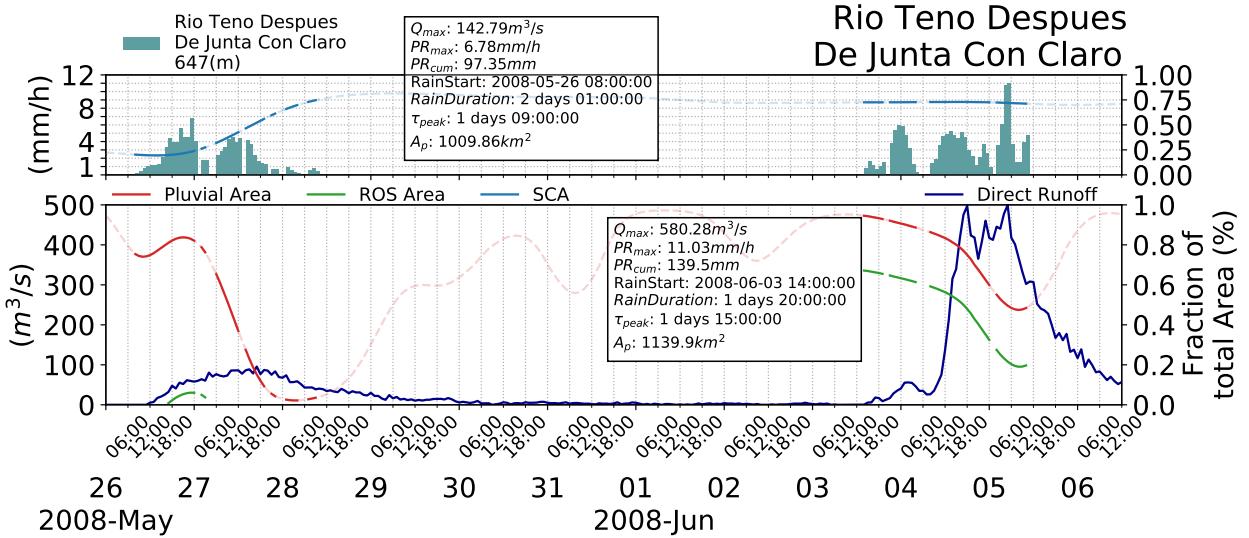


Figura B.5: Análisis detallado de las precipitaciones, temperatura, nieves y la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Teno en términos de caudales instantáneos. La Figura indica: la interpolación horaria de la cobertura nival IANIGLA-CR2MET (línea azul claro), escorrentía directa (línea azul oscuro), el área pluvial (línea roja) y el área ROS (línea verde). Cuadro superior indica estadísticas para la primera tormenta y el cuadro inferior para la segunda.

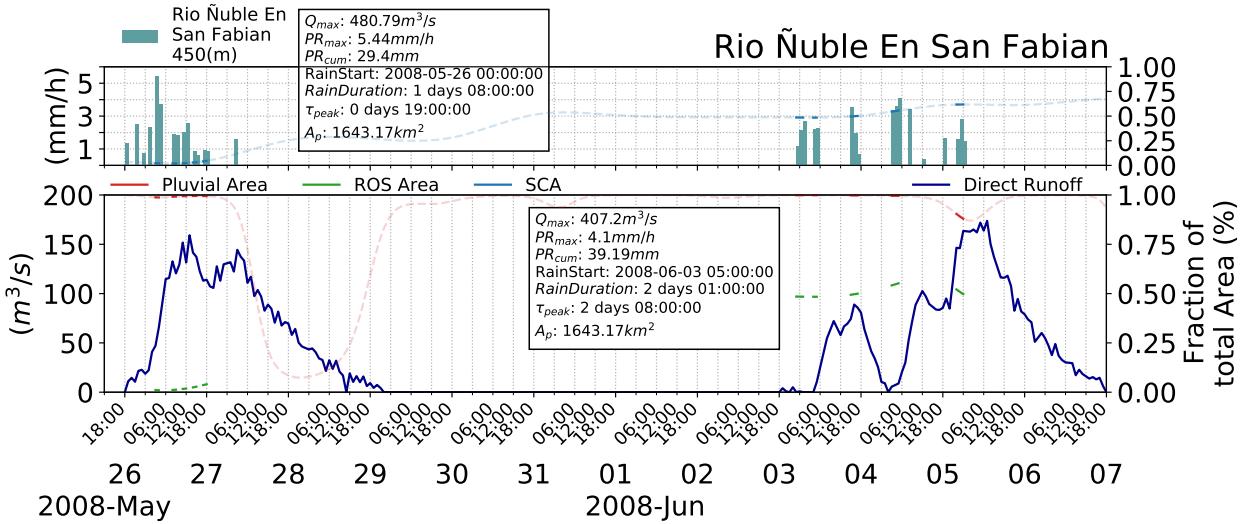


Figura B.6: Análisis detallado de las precipitaciones, temperatura, nieves y la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Ñuble en términos de caudales instantáneos. La Figura indica: la interpolación horaria de la cobertura nival IANIGLA-CR2MET (línea azul claro), escorrentía directa (línea azul oscuro), el área pluvial (línea roja) y el área ROS (línea verde). Cuadro superior indica estadísticas para la primera tormenta y el cuadro inferior para la segunda.