



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LA OCURRENCIA DE
ALUVIONES INCORPORANDO PROYECCIONES DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS EL CARMEN Y EL
TRÁNSITO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CAMILA CONSUELO MOLINA TAPIA

PROFESOR GUÍA
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI
GERMÁN AGUILAR MARTORELL

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil
POR: Camila Consuelo Molina Tapia
FECHA: 30/07/2019
PROFESOR GUÍA: Miguel Lagos Zúñiga

EVALUACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LA OCURRENCIA DE ALUVIONES INCORPORANDO PROYECCIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS EL CARMEN Y EL TRÁNSITO, CHILE

Chile es un país con fuerte presencia de montañas en conjunto con eventos hidrometeorológicos intensos, lo que resulta en que sea un país altamente vulnerable a episodios extremos como la ocurrencia de aluviones. Las tendencias del cambio climático proyectan variaciones en las variables meteorológicas lo que podría tener como resultando una variación en la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos.

Este trabajo tiene como objetivo cuantificar la ocurrencia de crecidas que podrían ocasionar un aluvión, a partir del modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC) en la cuenca de los ríos Tránsito y Carmen, región de Atacama. La modelación hidrológica se realiza empleando la información histórica de la cuenca y caracterizando los episodios hidrometeorológicos que tuvieron como desenlace un aluvión y/o una crecida de origen pluvial en la cuenca de los ríos en estudio.

La cuantificación de la ocurrencia de crecidas en la cuenca se lleva a cabo analizando tres condiciones: intensidad de precipitaciones, condición térmica del evento y condición de humedad antecedente del suelo, para luego incorporar la influencia del cambio climático en los resultados.

Los resultados muestran el bajo impacto de la temperatura en la ocurrencia de tormentas ocurridos en época invernal. Mientras que la variación en la condición de humedad antecedente podría ser una variable de suma importancia en la magnitud del evento extremo.

La incorporación del cambio climático a las forzantes de entrada del modelo hidrológico tuvo como resultado un aumento en la temperatura promedio anual de +1.6 °C y una leve disminución de la precipitación anual, cercana al -5%, para el periodo 2030-2060. Sin embargo las precipitaciones intensas proyectadas, mayores a 10 mm, estarán acompañadas de temperaturas más altas en comparación a la línea base, lo que provocaría un aumento en el área pluvial aportante para las tormentas futuras. El caudal proyectado a futuro por el modelo hidrológico arroja una disminución promedio cercana al -30% del caudal anual en comparación al periodo histórico.

La actualización del mapa de suelo con material no consolidado, por medio de la incorporación de las proyecciones del cambio climático en el mapa, pretende ser una fuente de información que sirva como herramienta para la toma de decisiones para la planificación territorial futura de la zona.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, en particular a mi Madre y a Abuela las cuales me han apoyado en todos los momentos de mi vida. Agradecer también a mis hermanos, Valentina y Javier, los cuales siempre fueron una fuente de risas y distracción en los periodos difíciles, de igual forma agradecerle a mi sobrino por enseñarme día a día las cosas importantes de la vida.

Agradecer a mis amigos del colegio, los cuales me han acompañado a largo de distintas etapas de mi vida y han sido parte fundamental de mi formación integral.

De igual manera, quiero agradecer a mi profesor guía, Miguel Lagos por siempre brindarme apoyo y comprensión, también a mis profesores de comisión Germán y Santiago por los comentarios y sugerencias para llevar a cabo esta memoria. Agradezco también a mis compañeros del tercero y a la Jaqui, quienes hicieron que esta etapa estuviera llena de buenos momentos.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 – Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivos Generales	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Organización del informe	2
Capítulo 2 – Revisión Bibliográfica	4
2.1. Modelo Hidrológico VIC	4
2.3. Cambio Climático	8
2.3.1. Variabilidad climática y sus forzantes	9
2.3.2. Modelos de Circulación General	10
2.3.3 Escenarios de simulación	11
2.3.4. Escalamiento de variables climáticas	12
2.4. Eventos de crecida	14
2.5. Factores generadores de un aluvión	16
2.6. Estudios previos que relacionan el cambio climático y los eventos extremos	18
Capítulo 3 – Caracterización zona de estudio	20
3.1. Descripción general	20
3.2. Clima	21
3.3. Hidrología	21
3.4. Geología	23
3.5. Hidrogeología	25
3.5. Información disponible	25
3.5.1. Estaciones Meteorológicas	26
3.5.2. Estaciones Fluviométricas	27
Capítulo 4 – Metodología	29
4.1. Caracterización eventos extremos históricos en la cuenca	29
4.2. Modelación Hidrológica en VIC	37
4.2.1. Regionalización	39
4.3. Experimentos de combinación de variables entre eventos seleccionados	40
4.4. Incorporación del cambio climático en el modelo	41
4.5. Confección de la actualización del mapa suelo de material no consolidado	44

Capítulo 5 – Resultados	46
5.2. Simulación hidrológica a partir del Modelo VIC	46
5.2.1 Simulación periodo histórico	46
5.2.2. Experimentos de distintos escenarios.....	47
5.3. Escenario futuro Cambio Climático	57
5.4. Actualización mapa de suelo con material no consolidado	61
Capítulo 6 – Conclusiones y comentarios	64
6.1. Caracterización de eventos extremos.....	64
6.2. Modelación hidrológica VIC	64
6.3. Experimentos combinación variables meteorológicas entre eventos.....	64
6.4. Incorporación proyecciones cambio climático	65
6.5. Actualización mapa de suelo de material no consolidado	65
Bibliografía	67
Glosario	70
Anexo A – Análisis de frecuencia	71
Anexo B – Simulación en VIC y Regionalización	72
Anexo C – Escalamiento AR	76
Anexo D – Forzantes meteorológicas escaladas	84

Índice de Tablas

Tabla 3-1: Leyenda mapa geológico	24
Tabla 3-2: Coordenadas estaciones meteorológicas.....	26
Tabla 3-3: Coordenadas estaciones fluviométricas	27
Tabla 4-1: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno	30
Tabla 4-2: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno	31
Tabla 4-3: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno	33
Tabla 4-4: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno	34
Tabla 4-5: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno	36
Tabla 5-1: Componentes fórmula KGE.....	47
Tabla 5-2: Número de ocurrencia de eventos con precipitación mayores a 10 (mm) bajo el escenario RCP8.5. Método de escalamiento QDM.	59
Tabla 5-3: Número de ocurrencia de eventos con precipitación mayores a 10 (mm) bajo el escenario RCP8.5. Método de escalamiento AR.	59
Tabla 5-4: Resumen variaciones anuales. Método QDM bajo el escenario RCP8.5	61
Tabla 5-5: Resumen variaciones anuales. Método AR bajo el escenario RCP8.5	61
Tabla 5-6: Nivel proyectado para la isoterma 0° promedio para el periodo 2030-2060, bajo el escenario RCP8.5.	62

Índice de Imágenes

Figura 2-1: Esquema funcionamiento modelo VIC. Fuente: Gao et al, 2009	5
Figura 2-2: Tipo de suelo según textura. Fuente: FAO, 2006	6
Figura 2-3: Método Penman-Monteith. Fuente: Maurer, 2011	7
Figura 2-4: Partición lluvia-nieve. Fuente: Gao et al, 2009	7
Figura 2-5: esquema simulación nieve VIC.	8
Figura 2-6: Balance radiativo de la Tierra. Fuente: IPCC, 2013	8
Figura 2-7: Reconstrucción de la temperatura a partir de distintas forzantes al sistema. Fuente: Crowley (2000).....	9
Figura 2-8: Diferencias de temperatura respecto al periodo 1961- 1990. Fuente: Trenberth, 2007	10
Figura 2-9: Esquema general GCM.	11
Figura 2-10: Escenarios de desarrollo socioeconómicos RCPs. Fuente: AR5 del IPCC, 2013.	12
Figura 2-11: Esquema downscaling. Fuente: Assefa et al., 2014.....	13
Figura 2-12: Las respuestas anuales a variación precipitación (valores ϵ) y temperatura (valores S) cambian. Fuente: Vano y Lettenmaier (2014)	14
Figura 2-13: Respuestas mensuales para las elasticidades de precipitación (superior), ϵ y las sensibilidades de temperatura (inferior), S, en la cuenca del río Yakima calculadas utilizando diferentes incrementos de cambio (líneas de color). Fuente: Vano y Lettenmaier (2014).....	16
Figura 2-14: esquema de un flujo de detritos canalizado. Fuente:	17
Figura 2-15: Número de desastres naturales registrados en el EMDAT. Fuente EMDAT, 2006 ..	18
Figura 2-16: Distribución de eventos meteorológicos dependiendo de la temperatura y la precipitación. Estudio realizado para zona central de Chile. Fuente: CEPAL, 2012	19
Figura 3-1: Mapa ubicación zona de estudio.....	20
Figura 3-2: Climograma zona de estudio	21
Figura 3-3: Curva variación estacional. Estación fluviométrica río tránsito antes de la junta con el río Carmen	22
Figura 3-4: Curva de variación estaciones. Estación fluviométrica Ramadillas	23
Figura 3-5: Mapa geológico	24
Figura 3-6: Mapa hidrogeológico	25
Figura 3-7 Mapa estaciones meteorológicas	27
Figura 3-8: Mapa estaciones fluviométricas.....	28
Figura 4-1: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 1.	30
Figura 4-2: Distribución espacial de la temperatura media para evento 1.	31
Figura 4-3: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 2.	32
Figura 4-4: Distribución espacial de la temperatura media para evento 2.	32
Figura 4-5: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 3.	33
Figura 4-6: Distribución espacial de la temperatura media para evento 3.	34
Figura 4-7: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 4.	35
Figura 4-8: Distribución espacial de la temperatura media para evento 4.	35
Figura 4-9: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 5.	36
Figura 4-10: Distribución espacial de la temperatura media para evento 1.	37
Figura 4-11: Esquema funcionamiento modelo VIC.....	38
Figura 4-12: Regionalización de parámetros calibrados	39
Figura 4-13: Esquema de la transposición para el caso de la temperatura	41
Figura 4-14: Esquema proceso de obtención de las forzantes a nivel local	42

Figura 4-15: Esquema escalamiento espacial.....	43
Figura 4-16: Capa de material no consolidado. Fuente: Cabré, A., 2019.	44
Figura 5-1: Simulación caudal periodo 1979 al 2015.....	46
Figura 5-2: Combinación de temperaturas para el evento 1	47
Figura 5-3 Combinación de temperaturas para el evento 2	48
Figura 5-4: Combinación de temperaturas para el evento 3	49
Figura 5-5: Combinación de temperaturas para el evento 4	49
Figura 5-6: Combinación de temperaturas para el evento 5	50
Figura 5-7 Combinación de precipitación para el evento 1	51
Figura 5-8: Combinación de precipitación para el evento 2.....	51
Figura 5-9: Combinación de precipitación para el evento 3.....	52
Figura 5-10: Combinación de precipitación para el evento 4.....	53
Figura 5-11: Combinación de precipitación para el evento 5.....	53
Figura 5-12: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento 1	54
Figura 5-13: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento 2	55
Figura 5-14: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento 3	55
Figura 5-15: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto	56
Figura 5-16: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento5	57
Figura 5-17: Boxplot para precipitación mayor a 10 mm, para el periodo 2030 al 2060.....	58
Figura 5-18 Boxplot para temperatura asociada a la precipitación mayor a 10 mm, para el periodo 2030 al 2060	58
Figura 5-19: Caudal medio mensual para el periodo 2030 al 2060 pata el método de escalamiento QDM, bajo el escenario RCP8.5. Línea base 1979-2015.	60
Figura 5-20: Caudal mayor a 30 m ³ /s, bajo el escenario RCP8.5.....	60
Figura 5-21: Mapa de material no consolidado zona de estudio	62

Capítulo 1 – Introducción

1.1. Motivación

Chile emite bajas concentraciones de gases efecto invernadero en comparación a otros países, sin embargo es altamente vulnerable al cambio climático ya que cumple con las características geográficas y climáticas determinadas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Las tendencias climáticas determinadas por la IPCC (2013) proyectan un aumento en los eventos extremos que pueden resultar en catástrofes naturales como la ocurrencia de aluviones.

Actualmente se disponen de distintos escenarios que representan las emisiones de gases de efecto invernadero en el futuro, como por ejemplo el escenario pesimista RCP8.5, el cual representa altos niveles de emisiones de gases efecto invernadero sin políticas para su mitigación. Los diferentes escenarios RCP's están determinados por el Quinto informe del IPCC (2013), los que combinados con modelos de circulación general (GCM) permiten alimentar modelos hidrológicos que permitan diagnosticar variaciones en eventos de crecidas de origen pluvial que podrían desencadenar aluviones.

Los episodios aluvionales en la cuenca de los ríos Tránsito y Carmen son casi exclusivamente producto de eventos hidrometeorológicos extremos, por lo que resulta imprescindible realizar una caracterización de dichos eventos históricos en la cuenca y la influencia de las variables meteorológicas. Vano y Lettenmaier (2014) estudiaron la sensibilidad de las variables meteorológicas en la generación de escurrimiento en las estaciones cálida y fría, determinaron que la estación cálida proyecta mayor sensibilidad en el escurrimiento producto de la variación de temperatura.

Es del interés particular para el presente estudio analizar el componente hidrometeorológico en la génesis de aluviones asociados a proyecciones de clima futuro, como la variación de la precipitación y la temperatura. La zona de estudio a analizar es una cuenca que, a través de su historia ha sufrido de episodios de eventos extremos los que han repercutido en la pérdida de vidas humanas y daño en infraestructura ubicada en la zona de estudio.

Uno de los episodios extremos más perjudiciales para la cuenca fue el ocurrido el 25 marzo del 2015, el cual tuvo como consecuencia la destrucción de viviendas e instalaciones públicas además de pérdidas y desapariciones humanas. El episodio fue evaluado por Fredes, V (2016) donde determinó los factores generadores de flujo detrítico para el evento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

El objetivo general de esta memoria corresponde a cuantificar la ocurrencia de crecidas de origen pluvial que puedan desencadenar en un aluvión, a partir de modelación hidrológica y la combinación de distintas variables hidrometeorológicas, incorporando las proyecciones del cambio climático en la cuenca de los ríos el Tránsito y el Carmen.

1.2.2. Objetivos Específicos

Con el fin de cumplir el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Investigar sobre los factores de mayor relevancia en la ocurrencia de eventos de crecida que podrían desencadenar en aluviones, caracterizando las variables climáticas y condiciones de humedad antecedente en dichos eventos.
2. Mediante modelación hidrológica, testear la preponderancia de los factores: 1) Intensidad de precipitación, 2) Condiciones térmicas de las tormentas y 3) Humedad antecedente del suelo, en la ocurrencia de crecidas de régimen pluvial.
3. Evaluar el impacto del método de escalamiento de las forzantes meteorológicas de modelos de circulación general (GCM) a partir de dos metodologías de escalamiento distintas.
4. Generar una actualización del mapa de las zonas susceptibles que presentan material no consolidado producto de las proyecciones climáticas futuras, bajo el escenario climático RCP8.5 para el periodo 2030-2060.

1.3. Organización del informe

A continuación, se presenta la organización del presente trabajo:

En el Capítulo 2 se dan a conocer las herramientas y los antecedentes utilizados para la realización del trabajo de título. Se inicia como una descripción del modelo hidrológico a utilizar para después pasar a los antecedentes del cambio climático y sus proyecciones.

El Capítulo 3 presenta una descripción general de la zona de estudio abarcando la información necesaria para luego realizar la modelación hidrológica de la cuenca en estudio.

En el Capítulo 4 se presenta la información recopilada para la caracterización de cada evento seleccionado, para luego pasar a exponer la metodología realizada para llevar a cabo los experimentos de combinación de las variables entre los eventos seleccionados, también se presenta el procedimiento a realizar para incorporar el cambio climático en el modelo hidrológico y la posterior metodología para la confección de la actualización del mapa de material no consolidado presente en la cuenca.

En el Capítulo 5 se sub-divide en tres sub-capítulos, el primero corresponde a los resultados obtenidos de la combinación de las variables meteorológicas de los eventos seleccionados para después presentar los resultados de la incorporación del cambio climático en el modelo; por último la actualización del mapa de suelo con material no consolidado.

Finalmente, en el Capítulo 6 se dan a conocer las conclusiones y comentarios finales del estudio, analizando el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de este trabajo.

Capítulo 2 – Revisión Bibliográfica

En esta sección se dan a conocer los principales antecedentes recopilados y se detallan las herramientas utilizadas durante el desarrollo de este trabajo. Se inicia con la descripción del modelo hidrológico VIC y su funcionamiento, para después analizar estudios que sustentan los argumentos de que la variabilidad climática está siendo afectada por actividades antrópicas. Posteriormente, se describen los modelos de circulación general de la atmósfera, las metodologías de escalamiento de variables globales a escalas locales y por último, se revisan trabajos realizados que vinculen el cambio climático con la variación en la ocurrencia de eventos extremos.

2.1. Modelo Hidrológico VIC

Variable Infiltration Capacity VIC (Liang et al., 1994) es un modelo hidrológico de macro escala que resuelve balances hídricos y de energía, originalmente desarrollado por Xu Liang en la Universidad de Washington. VIC es un modelo de investigación cuyas principales aplicaciones son la gestión de recursos hídricos, interacciones tierra-atmósfera y cambio climático. Actualmente el departamento de recursos hídricos de la Universidad de Chile está trabajando con el modelo hidrológico VIC en la actualización del balance hídrico a nivel nacional (DGA, 2018).

En VIC la unidad de trabajo básica se denomina celda, y puede ser asimilada como el equivalente a la unidad de respuesta hidrológica, ya que VIC exige la independencia de flujos entre cada celda a ser ingresada, realizando un balance en cada celda independientemente.

La Figura 2-1 muestra la estructura de una celda del VIC. Cada celda simula procesos hídricos y energéticos, por lo que estas deben contar con todos los parámetros y forzantes necesarias para la correcta simulación de los procesos físicos de la cuenca.

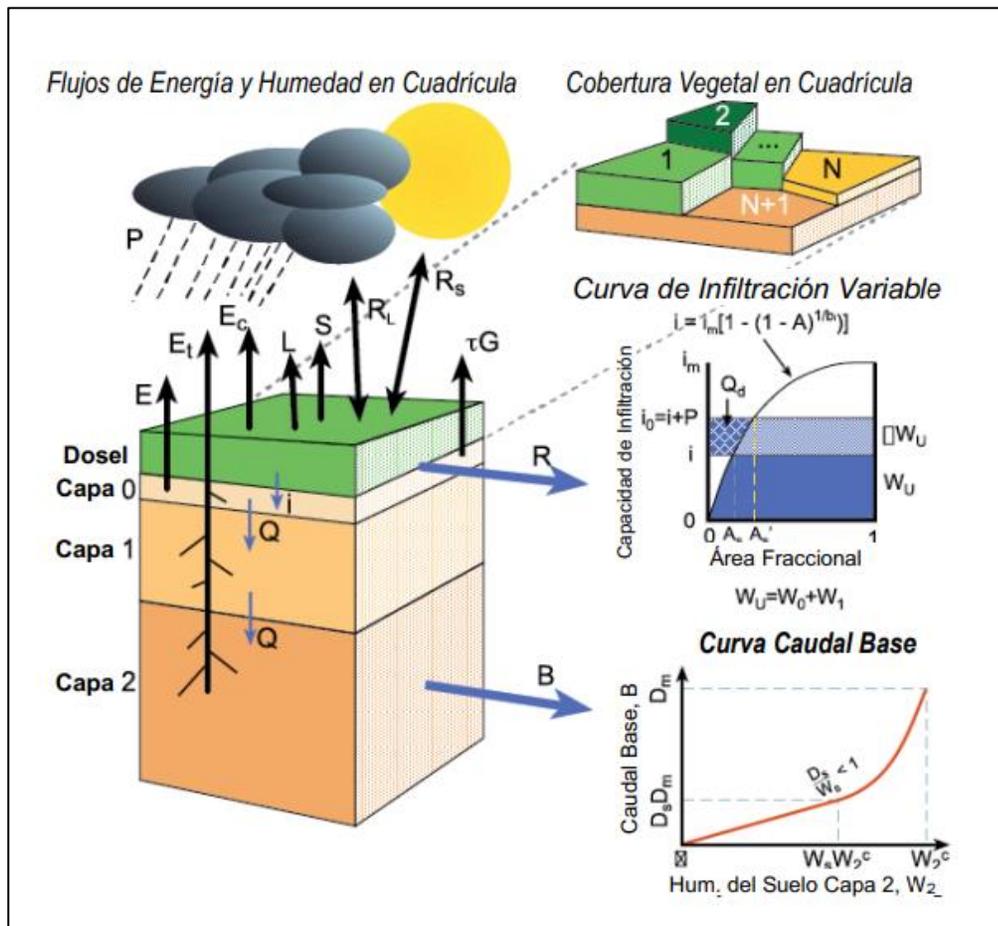


Figura 2-1: Esquema funcionamiento modelo VIC. Fuente: Gao et al, 2009

La Figura 2-1 muestra como cada celda del VIC tiene una distribución interna de tres capas, las cuales deben definirse con cierta profundidad y son las encargadas de modelar distintos procesos entre flujos. La primera capa de arriba hacia abajo corresponde a infiltración y escorrentía superficial, luego viene la capa de procesos de flujo medio, y finalmente está la de procesos de flujo base. También de la Figura se puede apreciar cómo se obtiene la infiltración y el flujo base por medio de la curva de infiltración variable y la curva de caudal base respectivamente.

Los parámetros por definir para cada celda son variables que dependen de la zona de estudio. Sin embargo, existen parámetros fijos que deben ingresarse tales como la vegetación y los parámetros de suelo. Además de esto, existen variables meteorológicas que deben incorporarse también, como la precipitación y las temperaturas mínimas y máximas en cada celda, para un paso de tiempo previamente definido. A lo anterior se le puede agregar variables como la velocidad del viento, humedad, albedo, radiación, entre otras.

La representación de la vegetación es mediante el uso de una librería de parámetros, el cual se basa en el índice de área de follaje (LAI), esto entrega los valores de follaje relevantes. Como se puede apreciar en la Figura 2-1 pueden existir varias clases de vegetación para cada celda, por lo que los balances energéticos e hidrológicos que calculan para cada tipo de clase de vegetación.

En cuanto a los suelos, su parametrización se basa en las texturas de suelo, información que se extrae desde La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

(FAO). La composición del suelo es utilizada para estimar porosidad, saturación, capacidad de campo, marchitamiento, capacidad residual y otros parámetros para casos no saturados. Los tipos de suelos existentes según su textura se muestran en la figura 2-2, dependiendo estos de su porcentaje de arcilla, limo y arena.

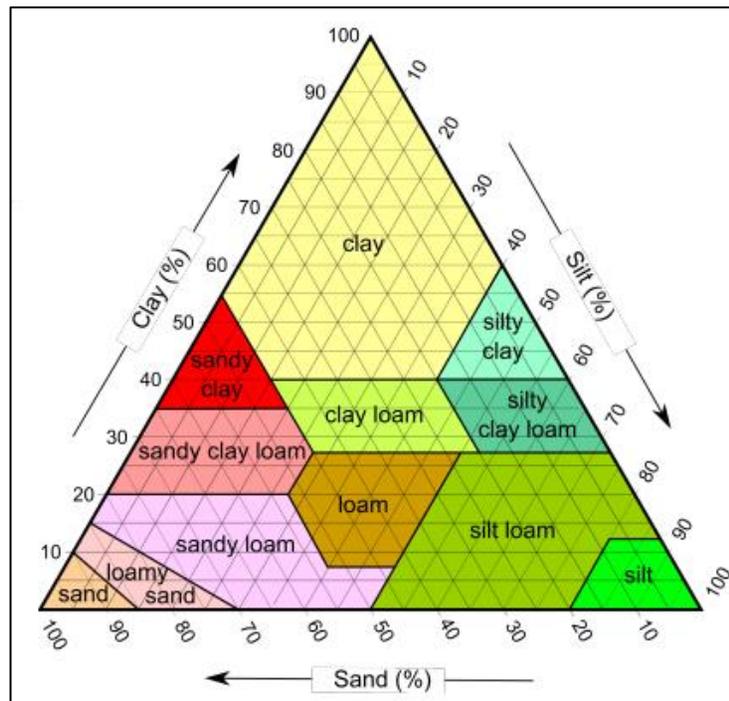


Figura 2-2: Tipo de suelo según textura. Fuente: FAO, 2006

El modelo VIC considera tres tipos de evaporación, como la evaporación desde la superficie de cada clase de vegetación, transpiración de cada clase de vegetación y evaporación del suelo descubierto. La evapotranspiración total sobre cada celda de la grilla se calcula como la suma de la componente superficial, de la vegetación y la de suelo descubierto, ponderada por la respectiva fracción de área cubierta utilizando el método de Penman-Monteith, la Figura 2-3 presenta la expresión para el cálculo de la evapotranspiración con dicho método .

Termino de radiación neta, función de la radiación solar entrante.

Termino de déficit de presión de vapor, función de la humedad y temperatura del aire, con resistencia aerodinámica.

$$E_p = \frac{s(R_n - G) + \rho c_p d_a / r_a}{s + \gamma(1 + r_s / r_a)}$$

Termino asociado con la resistencia del follaje y resistencia aerodinámica.

Figura 2-3: Método Penman-Monteith. Fuente: Maurer, 2011

Para la simulación de nieve en VIC se usan dos capas para el balance de energía en la superficie de nieve, una capa delgada en la superficie y otra capa en el manto de nieve, así modela la acumulación y derretimiento de nieve.

El modelo utiliza una partición simple de temperatura, como se muestra en la Figura 2.4, para diferenciar precipitación líquida de sólida asociando a la lluvia, todos los valores presentados sobre 2° C y a nieve los valores bajo 0° C, con una variación lineal entre estos valores.

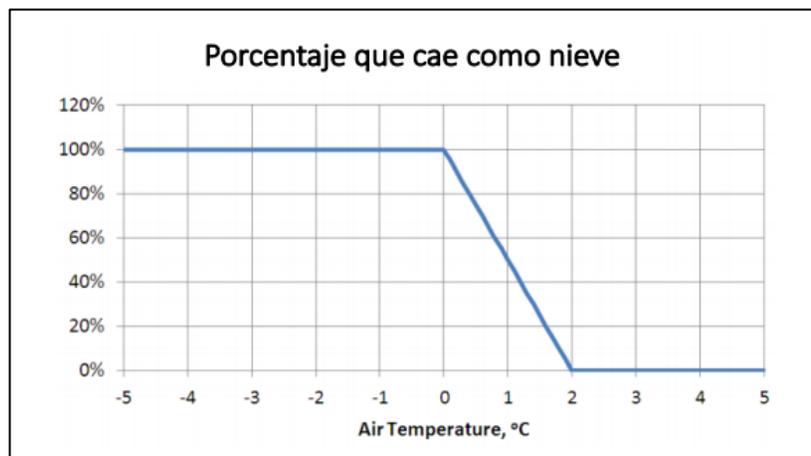


Figura 2-4: Partición lluvia-nieve. Fuente: Gao et al, 2009.

La simulación de nieve nueva supone una compresión de la ya existente, mediante la utilización de un algoritmo recursivo que consiste en ir generando capas de nieve comprimida a

medida que se tiene nieve nueva en el sistema, como se puede apreciar de la Figura 2.5, por lo que el modelo va disminuyendo el albedo a medida que aumenta la edad de la nieve.



Figura 2-5: esquema simulación nieve VIC. Fuente: Gao et al, 2009.

2.3. Cambio Climático

El cambio climático se define por IPCC como “*Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado*”. La actividad antrópica ha sido la responsable de acelerar los cambios en el sistema climático, siendo una de las principales causas la quema de combustible fósil, lo que genera variación de la composición de la atmósfera por el aumento significativo de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases que componen los GEI (Gases Efecto Invernadero), acumulando dichos gases en la atmósfera e impidiendo que las radiaciones que emite el planeta al calentarse salgan al espacio, lo que tiene como consecuencia un aumento en la temperatura de la Tierra como se puede apreciar en la figura 2-6.

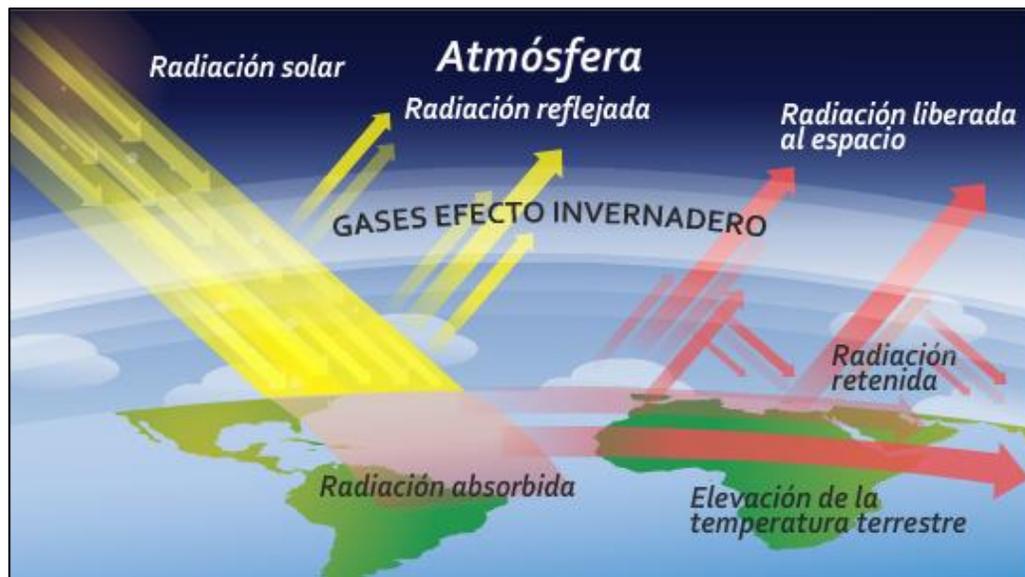


Figura 2-6: Balance radiativo de la Tierra. Fuente: IPCC, 2013

2.3.1. Variabilidad climática y sus forzantes

Las variaciones de temperatura pueden ser provocadas por distintas forzantes tanto internas como externas al sistema climático, como por ejemplo la actividad volcánica o solar. La actividad antrópica ha jugado un rol importante en los procesos naturales que han acelerado las variaciones climáticas debido al aumento en las concentraciones de la atmósfera de gases efecto invernadero.

Mediante registros paleo-climáticos y un modelo lineal de balance de energía, Crowley (2000) estudió la influencia de las distintas forzantes en la temperatura media global, como se puede apreciar en la Figura 2-7. Las conclusiones de este trabajo apuntan a la idea de que la actividad solar y volcánica fueron las responsables de las variaciones de temperatura durante los últimos siglos. Sin embargo, estas variables por sí solas no son capaces de explicar el alza registrada desde las últimas décadas del siglo XX.

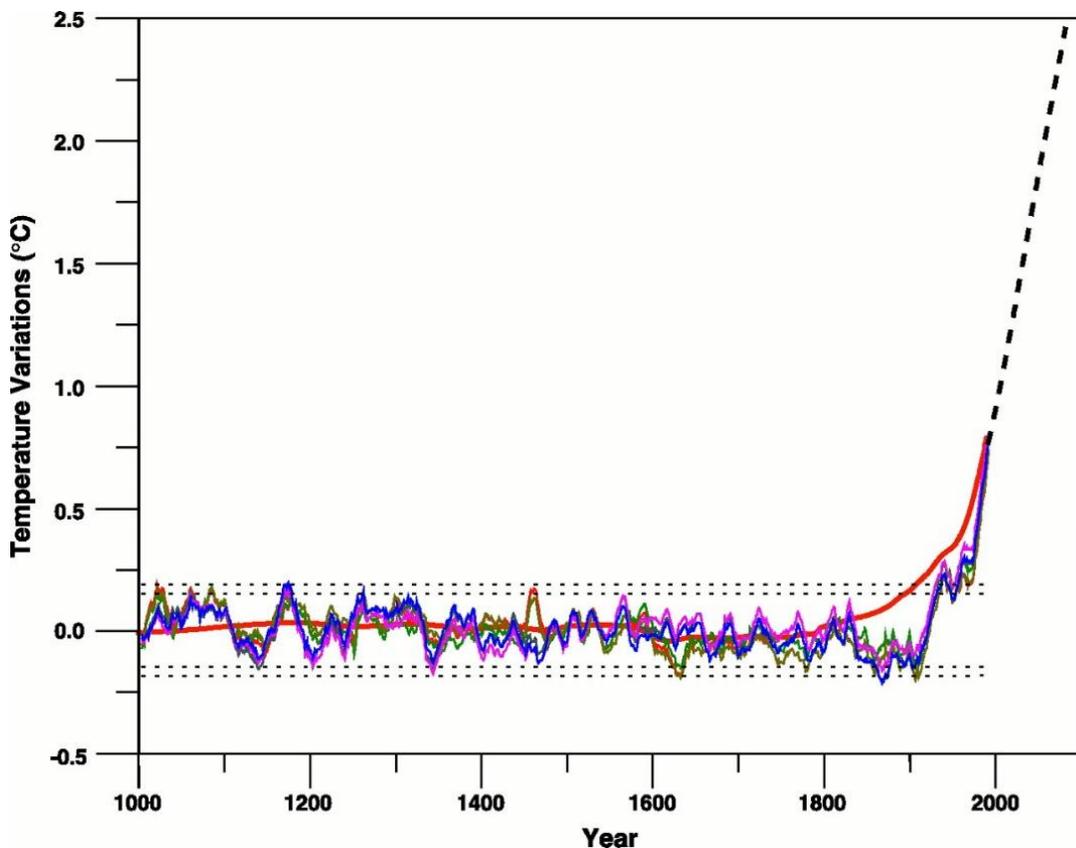


Figura 2-7: Reconstrucción de la temperatura a partir de distintas forzantes al sistema, el eje de las ordenadas muestra la variación de temperatura respecto a la media del periodo 1000-1850. Las líneas delgadas oscilantes representan los residuos de temperatura resultantes de la remoción de todas las forzantes excepto los GEI. La línea gruesa muestra la respuesta del modelo lineal de estimación de temperaturas a la forzante de GEI. La línea punteada gruesa representa las estimaciones de temperatura en un escenario de emisiones iguales a las actuales. Fuente: Crowley (2000)

Por otra parte, la Figura 2-8 presenta el estudio realizado por Trenberth (2007) en donde estimó el promedio espacial de la temperatura global en tierra para el periodo 1850-2005, referida a la media del periodo 1961-1990.

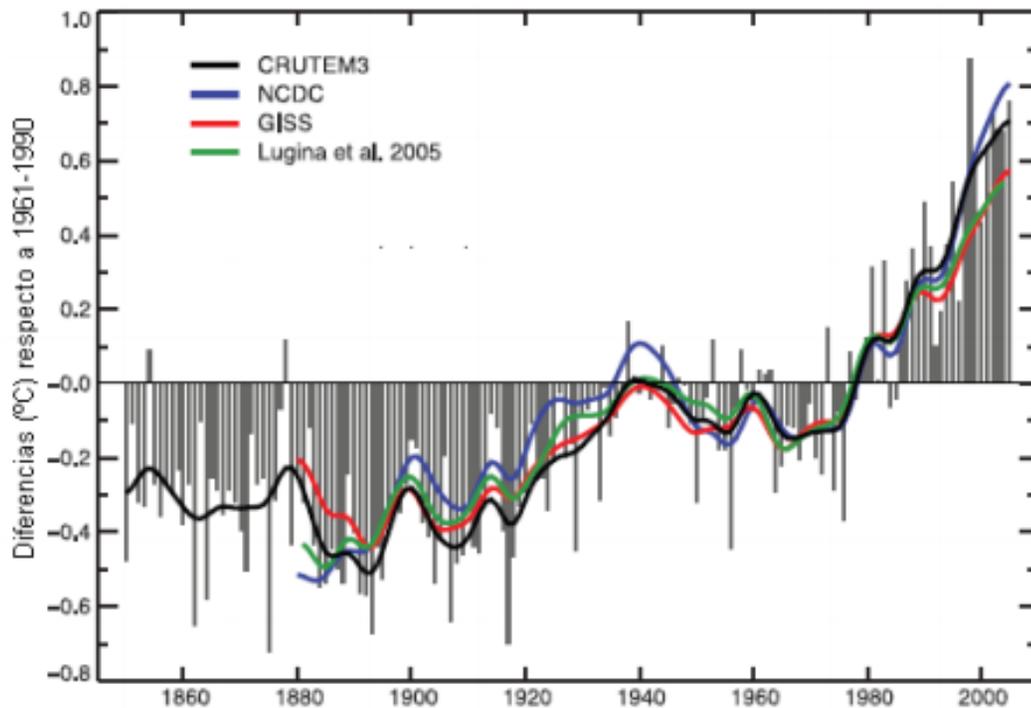


Figura 2-8: Diferencias de temperatura respecto al periodo 1961- 1990. Fuente: Trenberth, 2007

De la figura 2-8 se puede apreciar como luego de 1980 la temperatura ha tenido un constante incremento respecto al periodo base (1961-1961).

2.3.2. Modelos de Circulación General

Los modelos de circulación general o GCM corresponden a una idealización del sistema climático de la Tierra, mediante la parametrización de los procesos físicos que intervienen en el clima, como se puede observar en la Figura 2-9. Estos modelos realizan simulaciones numéricas computacionales de largos periodos de tiempo, típicamente varias décadas y los resultados obtenidos de los GCMs son series de tiempo de variables meteorológicas tales como precipitación, temperatura y humedad, entre otras.

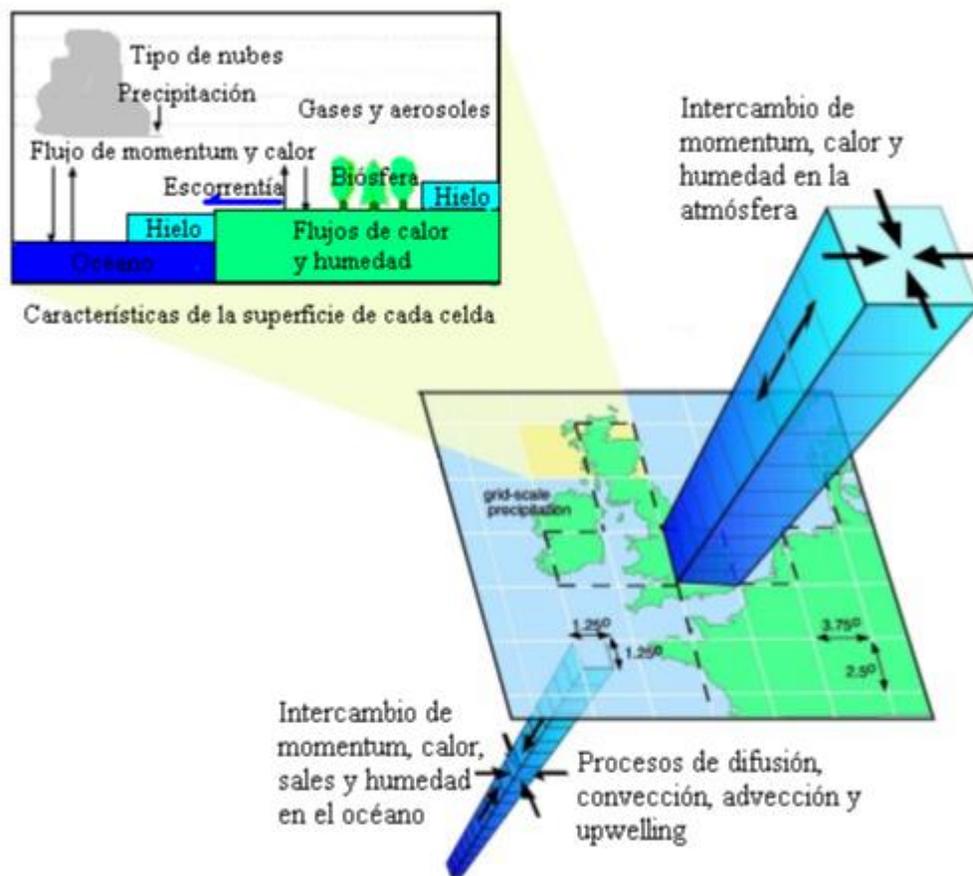


Figura 2-9: Esquema general GCM. Fuente:IPCC,2013

Uno de los mayores obstáculos en el desarrollo de los GCMs es el fuerte requerimiento de recursos computacionales para cada simulación. Esto, sumado a la gran extensión del dominio del problema, hace necesario que la grilla de resolución sea bastante gruesa, lo que provoca que numerosos procesos físicos no puedan ser resueltos adecuadamente. Para solucionar este problema, estos procesos deben ser simplificados y parametrizados.

Para el presente trabajo se utilizan los cuatro GCMs seleccionados por el proyecto actualización del balance hídrico a nivel nacional (DGA, 2018) correspondientes a los modelos CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC, los cuales fueron elegidos ya que cumplían con la mejor representación de las condiciones climáticas de Chile. Para la selección de modelos se utilizaron tres criterios: 1) Correlación de las simulaciones históricas con las oscilaciones ENSO y SAM, 2) Análisis de sensibilidad climática, 3) Análisis de deltas de temperatura y precipitación a escala regional (DGA, 2018).

2.3.3 Escenarios de simulación

Existen diversos escenarios para evaluar las futuras concentraciones de gases en la atmósfera. En el último informe del IPCC se definen cuatro escenarios RCP, los cuales serán utilizados para el análisis de las proyecciones del cambio climático.

Las 4 trayectorias RCPs comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5) el cual representa el escenario más pesimista. La figura 2-10 muestra las trayectorias y proyecciones de las concentraciones de dióxido de carbono equivalente hasta el año 2100 según los escenarios descritos.

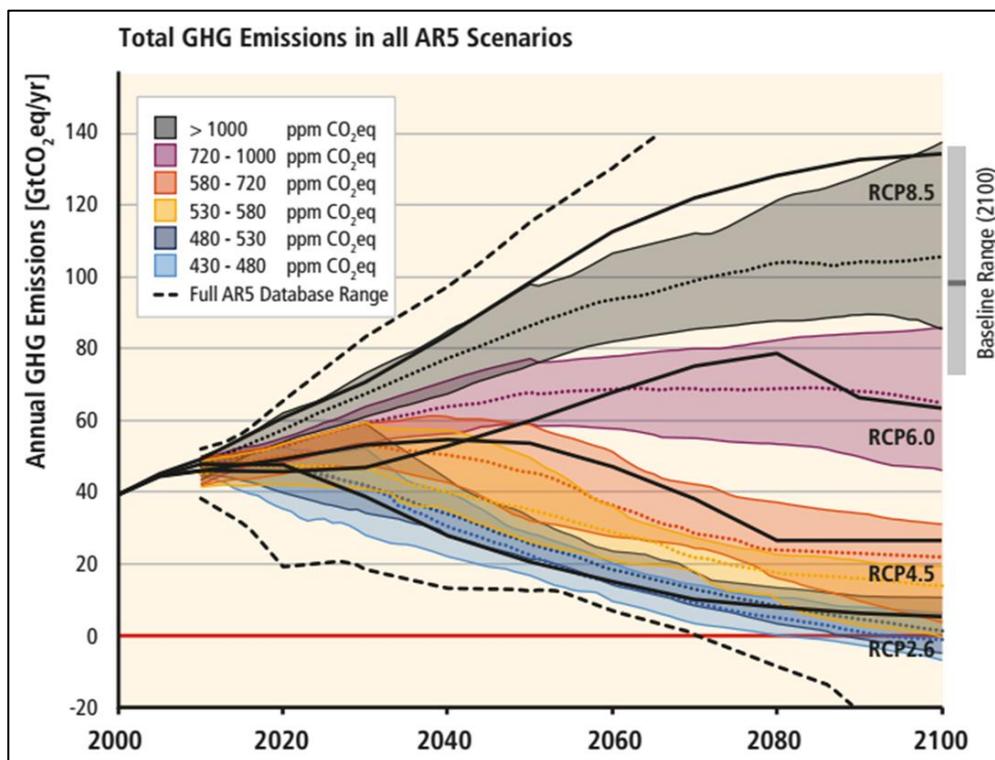


Figura 2-10: Escenarios de desarrollo socioeconómicos RCPs. Fuente: AR5 del IPCC, 2013.

2.3.4. Escalamiento de variables climáticas

Los resultados obtenidos de los GCMs no pueden ser utilizados directamente en el modelo hidrológico, ya que la grilla es muy gruesa en comparación a las dimensiones de la cuenca, por lo que en los GCMs se pierden características topográficas y de cobertura vegetal propias de la cuenca debido a su escala global como se puede apreciar en la Figura 2-11. Ante esto se hace necesario introducir un paso adicional que consiste en un escalamiento o downscaling de las variables meteorológicas involucradas. Según Maurer (2007), el objetivo de corregir los datos brutos de los GCMs es “retener la señal de gran escala en la evolución del clima simulado por el GCM mientras se reproducen los patrones históricos a escalas locales”.

Típicamente se distingue entre dos tipos de escalamiento: En el primero, se plantean distintos tipos de relaciones estadísticas entre las variables a pequeña y gran escala (escalamiento estadístico), mientras que en el segundo se resuelve el mismo problema computacional en un grilla más pequeña asociada a un sector específico del planeta, forzada en sus bordes por los resultados de un modelo global (escalamiento dinámico).

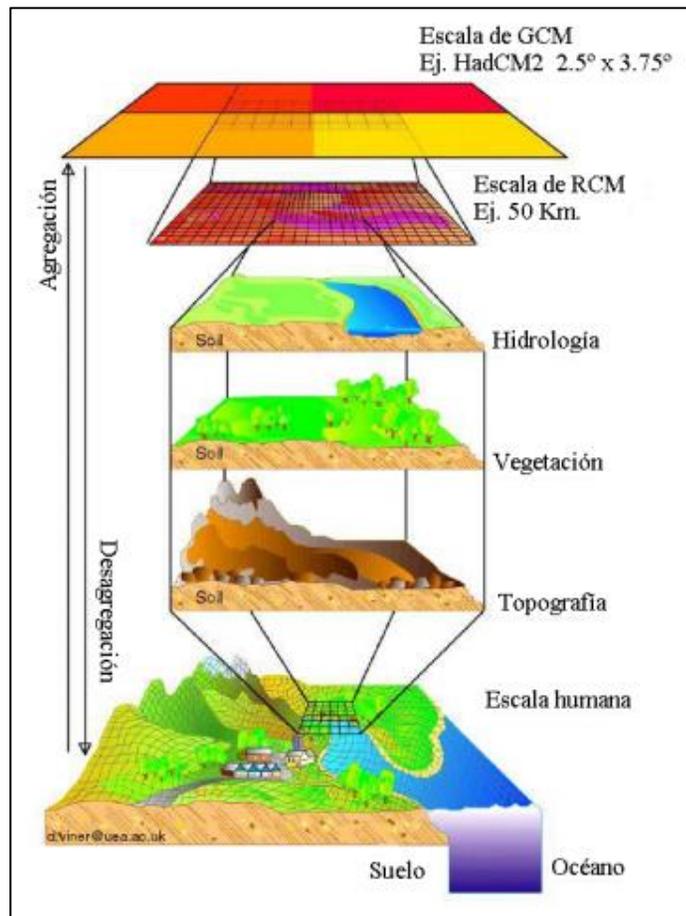


Figura 2-11: Esquema downscaling. Fuente: Assefa et al., 2014.

Al ser el escalamiento dinámico de alto costo computacional, en el presente trabajo se utilizará el escalamiento estadístico para las obtenciones de las forzantes del cambio climático. Los métodos de escalamiento estadístico se basan en el planteamiento de relaciones empíricas entre variables locales observadas y variables de escala global en un periodo base. Así, se definen predictores de gran escala y predictandos de pequeña escala. Posteriormente las relaciones planteadas para el periodo base son asumidas como válidas para el periodo futuro. Los métodos más comunes son:

- **Weather-typing:** Consiste en agrupar anomalías de variables locales observadas por medio de sus propiedades estadísticas, y relacionar cada grupo con alguna característica a gran escala de la circulación general entregada por el modelo. Dentro de estas características pueden encontrarse variables como la humedad y la presión a nivel del mar.
- **Perturbación de la serie observada:** En este método se perturba la serie observada en la misma razón o cantidad en la que la serie entregada por el GCM se ve afectada a futuro. Es decir, se asume que la serie futura es estadísticamente igual a la observada, a excepción de su media, la cual se ve trasladada en la cantidad proyectada por el GCM.
- **Regresión:** Consiste en relacionar directamente, por medio de una curva planteada en el periodo observado, las variables a gran escala y las observadas localmente.

Cada metodología tiene en común su sencilla implementación además de bajo costo computacionales, sin embargo, también tiene dificultades como trabajar bajo el supuesto que las relaciones estadísticas planteadas para el periodo base seguirán siendo válidas para el futuro.

2.4. Eventos de crecida

La ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, como las crecidas, depende de distintos factores climáticos como la precipitación, temperatura, condición de humedad antecedente del suelo, etc. Algunas de estas variables meteorológicas a su vez están influenciadas por forzantes propias del clima de Chile, como son la Oscilación del SUR- El Niño (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el Modo Anular del Sur (SAM).

Vano y Lettenmaeir (2014) analizaron las variaciones espaciales en las respuestas hidrológicas de la preponderancia de la temperatura y la precipitación en la generación de escorrentía para las estaciones cálida y fría, como se puede apreciar en la Figura 2-12, para lo cual determinaron el grado en que los cambios en las estaciones cálidas y frías contribuyen a la sensibilidad en toda la cuenca, aplicando un aumento de 1% en la precipitación y 1°C en la temperatura durante todo el año.

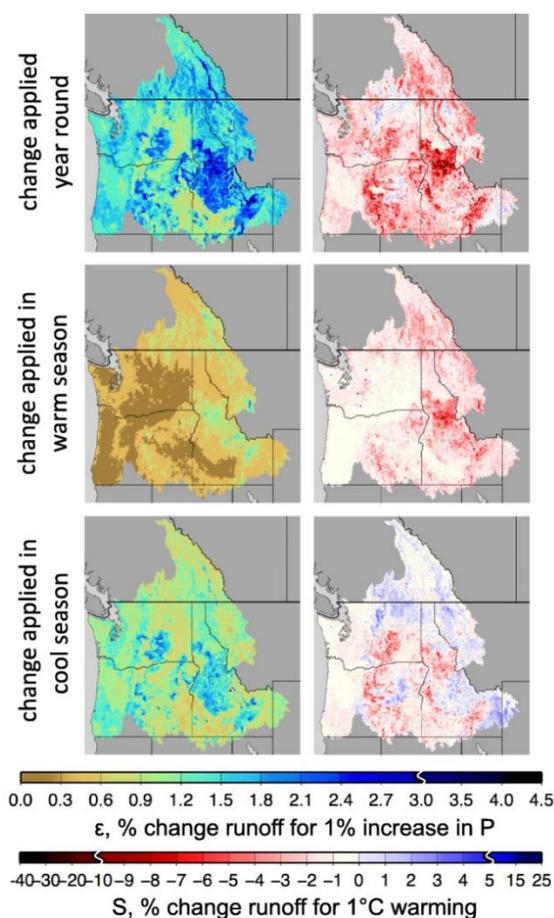


Figura 2-12: Las respuestas anuales a variación precipitación (valores ϵ) y temperatura (valores S) cambian. Fuente: Vano y Lettenmaeir, 2014.

De la Figura 2-12 se puede apreciar como las elasticidades de precipitación (ϵ) exhiben respuestas estacionales que varían según la ubicación debido a la temperatura (principalmente relacionadas con los procesos de derretimiento nieve), es decir, cuando el cambio de precipitación se aplica en la estación cálida, esencialmente todo cambio de escorrentía ocurre en la estación cálida, mientras que cuando se aplica el cambio de precipitación en la estación fría, los cambios de escorrentía ocurren en la estación fría en elevaciones bajas y en la estación cálida en elevaciones altas debido a la acumulación de nieve. Sin embargo, en general, los incrementos relativos de precipitación en la estación fría generan más escorrentía, ya que la estación fría la precipitación es más abundante y más eficiente en la producción de escorrentía.

Con respecto a los resultados del aumento de la temperatura, columna derecha de la figura 2-12, se puede observar que, si el calentamiento ocurre solo en la estación fría, la mayor parte de las celdas muestran disminuciones en la escorrentía anual pero se pueden identificar zonas donde la escorrentía aumenta (color azul), mientras que si el calentamiento ocurre a lo largo del año, el 93% de las celdas de la cuadrícula muestran disminuciones en la escorrentía anual, por lo que la estación cálida es la que más proyecta de una disminución de la escorrentía debido al calentamiento aplicado en la estación y la estación fría presenta unos leves aumentos en ciertas zonas las cuales aportarían a al aumento de escurrimiento en periodo anual.

También, Vano y Lettenmaier (2014) probaron la linealidad de las respuestas mensuales variando el incremento del cambio aplicado anualmente para calcular los valores de ϵ y S en Yakima, Figura 2-13. Si la respuesta fuera lineal, los valores de ϵ y S serían los mismos (teniendo en cuenta que ϵ y S se normalizan para representar el cambio en el flujo de flujo para + 1% precipitación o + 1 ° C temperatura, respectivamente).

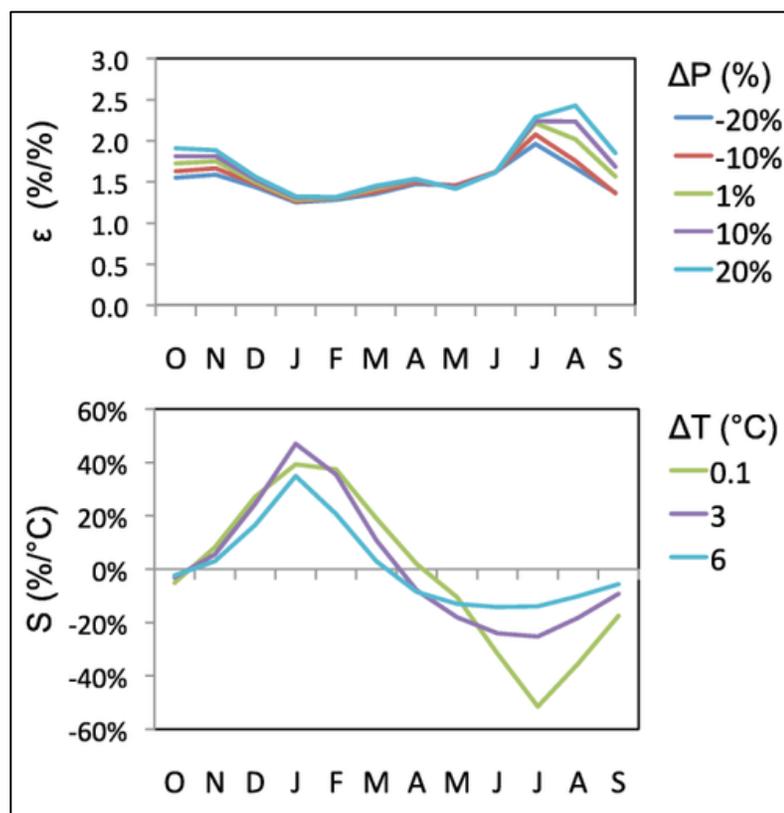


Figura 2-13: Respuestas mensuales para las elasticidades de precipitación (superior), ϵ y las sensibilidades de temperatura (inferior), S , en la cuenca del río Yakima calculadas utilizando diferentes incrementos de cambio (líneas de color). Fuente: Vano y Lettenmaier (2014)

La figura 2-13 muestra como para los valores de ϵ , se aplican incrementos de -20% , -10% , $+0.1\%$, $+10\%$ y $+20\%$, para este rango de incrementos, las respuestas de invierno y primavera son aproximadamente lineales, mientras que las respuestas de verano y otoño no lo son, el rango más grande en valores ϵ estacionales es en agosto, que coincide con flujos bajos.

Para los valores de S , se aplican incrementos de $+0.1$, $+3$ y $+6$ °C. Nuevamente se puede apreciar como el flujo responde de manera similar durante ciertos meses independientemente del incremento, pero existen diferencias considerables, especialmente en el verano, las grandes diferencias se observan en el que verano corresponden a la época del año en que el flujo es históricamente bajo, y los cambios relativamente pequeños en la magnitud pueden tener un gran efecto en ϵ y S .

2.5. Factores generadores de un aluvión

Un aluvión es material suelto (detrítico) transportado y depositado por una corriente de agua en una ladera, quebrada o cauce. Puede viajar muchos kilómetros desde su origen, aumentando de tamaño a medida que avanza pendiente abajo transportando rocas, hojas, ramas, árboles y otros elementos, alcanzando gran velocidad. La Figura 2-14 presenta un esquema de un flujo detrítico.

Los flujos de material detrítico se generan a partir de la incorporación de agua al suelo. el aumento de la cantidad debe ser tal que se sobrepase la capacidad de infiltración del suelo, para alcanzar un grado de saturación cercano al 100%, lo que produce un aumento en la presión de poros

que se refleja en la disminución de la resistencia al corte en la masa de suelo. Las velocidades de este flujo van de extremadamente rápido (5 m/s) a rápido (3 m/min) (Cruden & Varner, 1996).

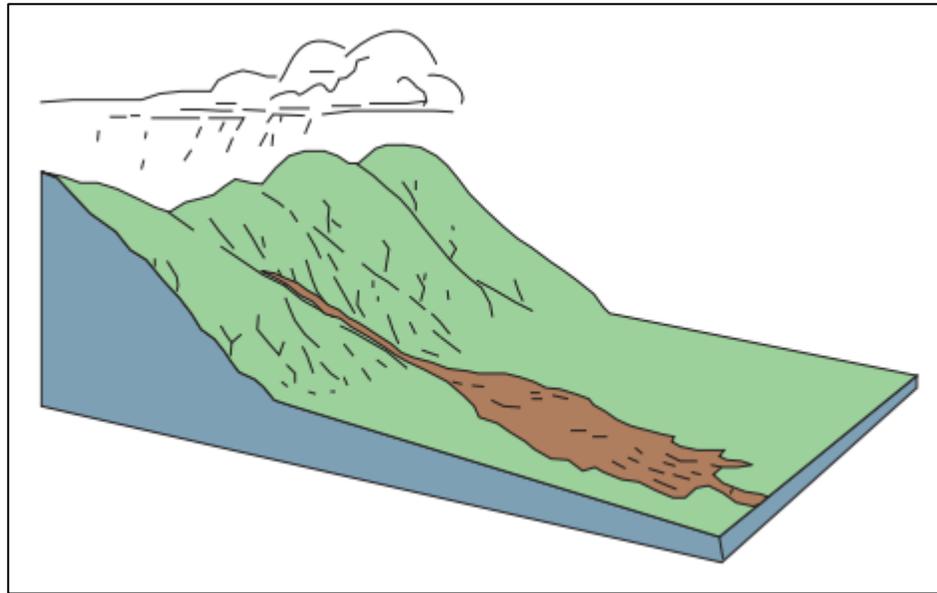


Figura 2-14: esquema de un flujo de detritos canalizado. Fuente: *Landslide Handbook USGS, 2008.*

Para generar un proceso de flujos de detritos deben estar presentes ciertos factores, que configuren una condición potencialmente inestable tal que al producirse una rápida incorporación de agua (Sepúlveda, 1998). Estos son:

- **Relieve:** Pendientes más elevadas provocarán mayor inestabilidad gravitacional en las laderas aportantes al flujo. Pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas son favorables para el desarrollo de aluviones (Hauser, 2000). También influye la pendiente de los cauces y laderas por lo que se desplazaría el flujo, ya que otorgan una alta capacidad de transporte y energía a los flujos. (Sepúlveda, 1998)
- **Geología:** Es muy importante que exista material disponible para ser removido, lo cual es controlado por la meteorización in situ de las rocas existentes en la cuenca. Aparte del suelo presente en las laderas, también hay que considerar el material que ocupa el lecho de los cauces.
- **Clima y vegetación:** Un clima árido a semiárido favorece la ocurrencia de flujos de detritos, pues las lluvias, aunque escasas, suelen ser intensas y de corta duración. A su vez, la escorrentía y erosión son mayores debido a la poca vegetación, que expone el suelo y la roca a los efectos meteóricos. Más vegetación ayuda a aumentar la capacidad de infiltración, y a su vez, protege al suelo de la erosión ambiental, lo cual dificulta la ocurrencia de flujos detriticos.
- **Morfología:** La superficie de la cuenca receptora, así como su forma, es importante para determinar el tiempo de concentración del agua, siendo mayor en cuencas alargadas que circulares.
- **Hidrología:** En el caso de los flujos, éstos en su gran mayoría se generan por saturación del material, lo cual al provocar un aumento en la presión de poros disminuye su resistencia efectiva. La red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de

escorrentía y coeficientes de infiltración, son factores hidrológicos que condicionan la generación de flujos ya que están directamente relacionados a la incorporación de agua en los suelos.

•**Factor Antrópico:** La urbanización tiene grandes efectos sobre el potencial de inundación de las cuencas, debido a que incrementan las zonas impermeables, reduciendo la capacidad de infiltración. También los obstáculos en las redes de drenaje, o material de desecho que pueda incorporarse al flujo, provenientes de los centros urbanos, y obras de minería o ingeniería.

2.6. Estudios previos que relacionan el cambio climático y los eventos extremos

El Centro de Base de Datos de Desastres Naturales (EMDAT, 2006) realizó un catastro de la cantidad de muertes, monto de pérdidas monetarias y cantidad de desastres naturales cada año desde donde se extrae la Figura 2-15, que muestra la cantidad anual de desastres entre los años 1900 y 2015 en el mundo, donde se aprecia un incremento notable en la cantidad de eventos para los años posteriores a la revolución industrial, sobre todo los desastres naturales de origen hidrometeorológico, hecho que marca el inicio del incremento en las emisiones de CO2 entre otros gases de efecto invernadero, y, por consiguiente, el efecto en el cambio climático. Sin embargo el incremento observado también podría estar asociado a la mayor red de monitoreo e información de los desastres naturales a nivel mundial.

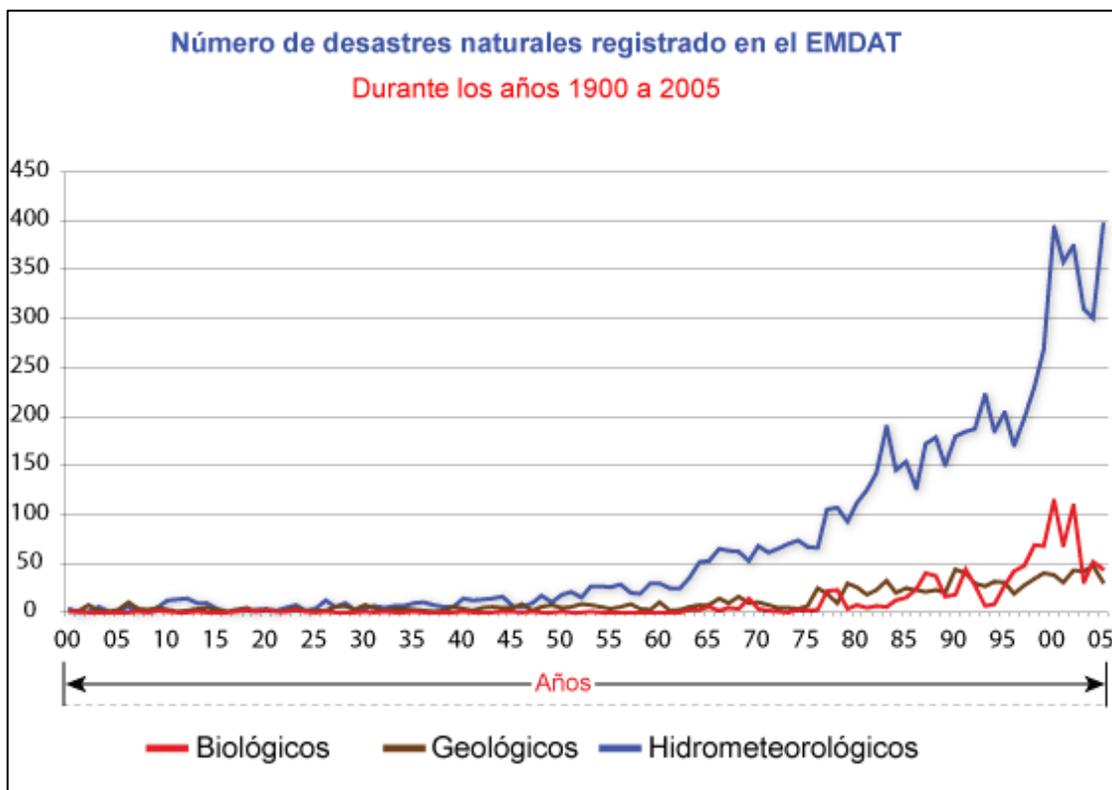


Figura 2-15: Número de desastres naturales registrados en el EMDAT. Fuente EMDAT, 2006

Un estudio realizado por la CEPAL (2012) analizó la proyección de las tormentas, teniendo en consideración la intensidad de la precipitación y la condición térmica de tormenta para una cuenca de la zona central de Chile. A continuación, se presentan los resultados en la Figura 2-11:

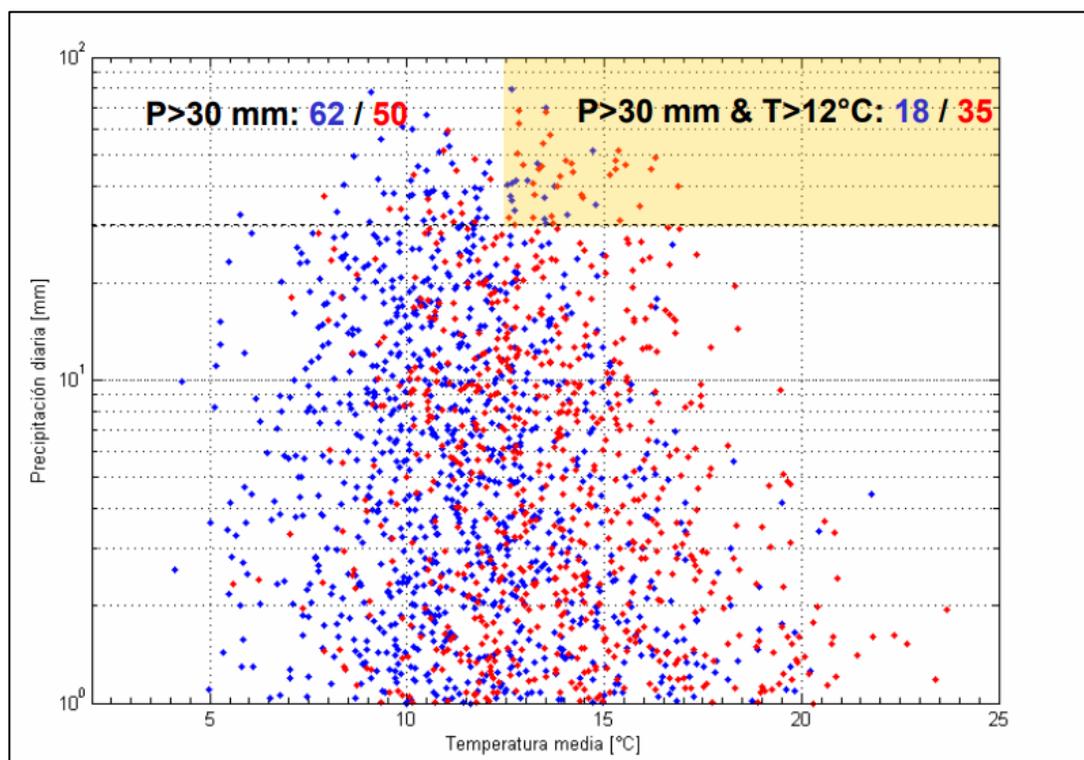


Figura 2-16: Distribución de eventos meteorológicos dependiendo de la temperatura y la precipitación. Estudio realizado para zona central de Chile. Fuente: CEPAL, 2012

De la Figura 2-15 se desprende que en un periodo de 20 años existieron 62 eventos en donde la precipitación fuera mayor a 30 (mm/d) mientras que se proyecta que en el futuro existan 50 eventos de precipitación intensa, por tanto, decrece en un 20% la ocurrencia de precipitación extrema (Precipitación >30mm/d).

También se determinó la ocurrencia del evento asociado a precipitación intensa (Precipitación >30mm/d) combinado con altas temperatura (Temperatura >12 °C). En el periodo histórico existieron 18 eventos de lluvias intensas y altas precipitación mientras que se proyecta que la ocurrencia del evento sea de 35, por tanto, aumenta en un 51% la ocurrencia del evento altas temperaturas asociadas con lluvias intensas.

Capítulo 3 – Caracterización zona de estudio

Para realizar la modelación hidrológica de la cuenca a estudiar, se requiere caracterizarlas en función de sus propiedades físicas y naturales, así como también de la información hidrometeorológica disponible. Para ello, en el presente capítulo se entregan una sucesión de características de la zona de estudio.

3.1. Descripción general

El área de estudio se encuentra inmersa en la macro cuenca del río Huasco en su parte superior. La cuenca se ubica en la tercera región de Atacama y se forma a partir de la confluencia del río Tránsito y el río Carmen.

La cuenca del río Carmen abarca principalmente la comuna del Alto del Valle, y cuenta con un área de 3.038 (km²). Dos ríos principales y de escurrimiento permanente contribuyen a la formación del río del Carmen, desde la cordillera baja el río Potrerillo que confluye con el río Matancilla en la localidad de Potrerillo, para formar el río del Carmen propiamente tal.

La hoya del río del Tránsito se desarrolla al noreste de la región y comprende una superficie de 4.135 (km²). La longitud de este río, medida desde el nacimiento de su tributario principal, es de 108 (km) hasta la Junta del Carmen. Se forma de la confluencia de los ríos Conay y Chollay.

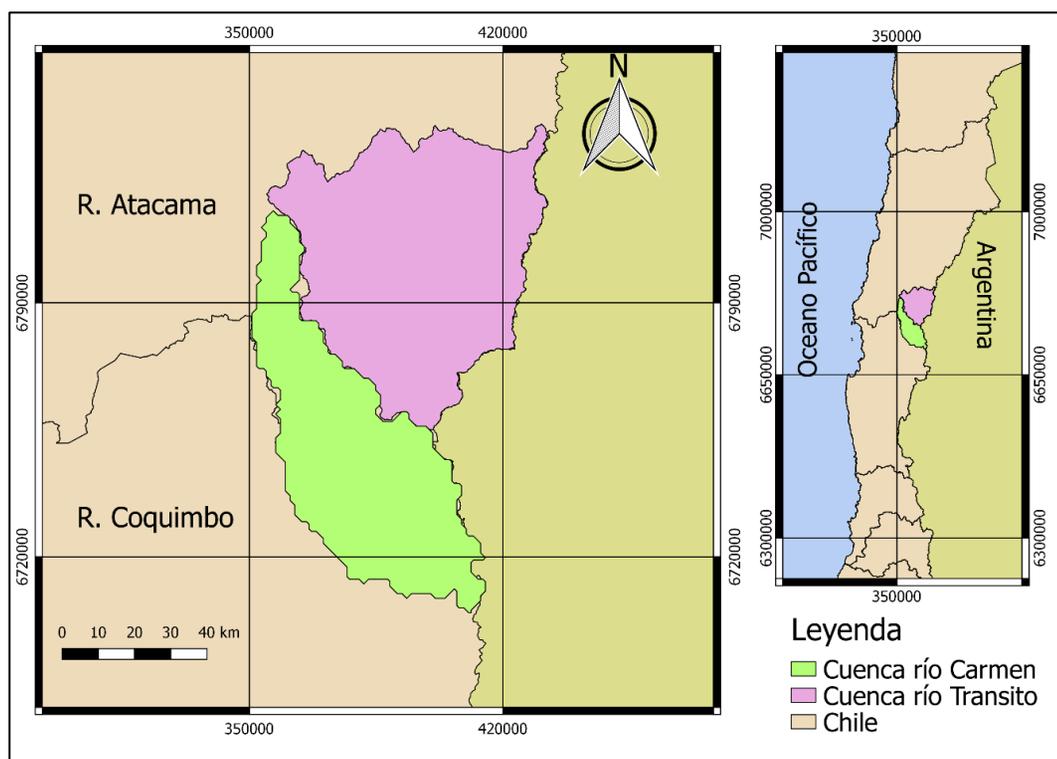


Figura 3-1: Mapa ubicación zona de estudio

3.2. Clima

Las características climáticas de la región de Atacama están determinadas principalmente por la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y la corriente fría de Humboldt. Estos factores, más la compleja topografía de la región, determinan bajas tasas de precipitación concentradas en unos pocos días en los meses de invierno, lo que tiene como resultado que la región sea árida, con extensas superficies desprovistas de vegetación.

Por sobre los 1200 y 1500 msnm y hasta aproximadamente los 4000 m.s.n.m. (Koppen 1948) se identifica un clima desértico frío de montaña, donde la variación de las temperaturas es regulada por la altitud.

La Figura 3-2 presenta el climograma de la zona de estudio, se puede apreciar como el mes de Julio presenta la mayor acumulación de precipitación y las temperaturas más bajas obtenidas a lo largo del año.

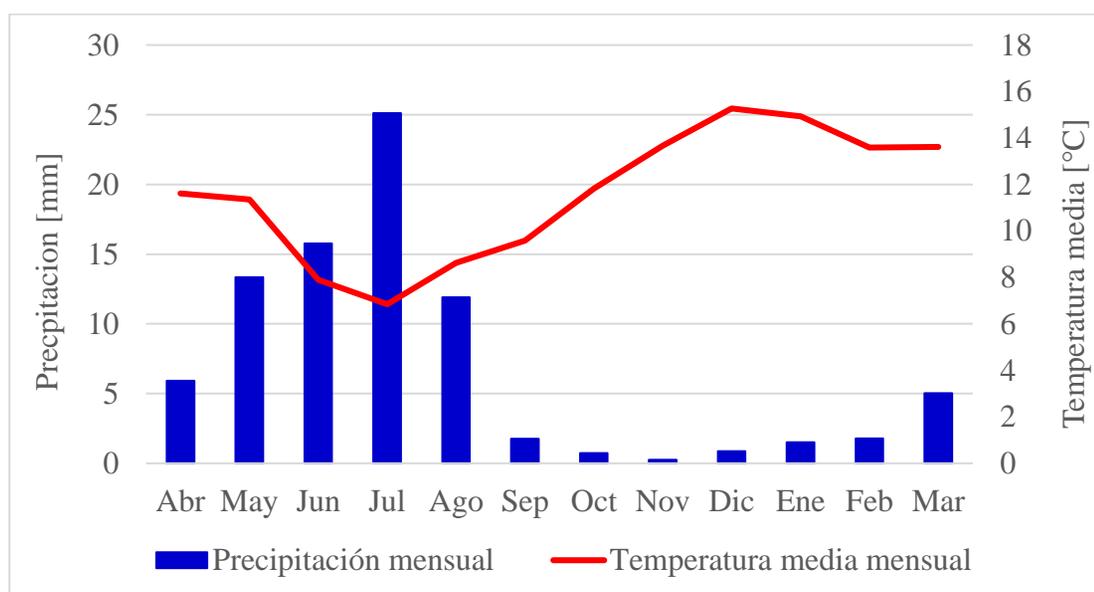


Figura 3-2: Climograma zona de estudio

3.3. Hidrología

La Figura 3-3 presenta la curva de variación estacional para la cuenca del río El Tránsito con distintas probabilidades de excedencia de caudales, la información para realizar dicha curva fue obtenida de la estación fluviométrica río tránsito antes de la junta con el río Carmen

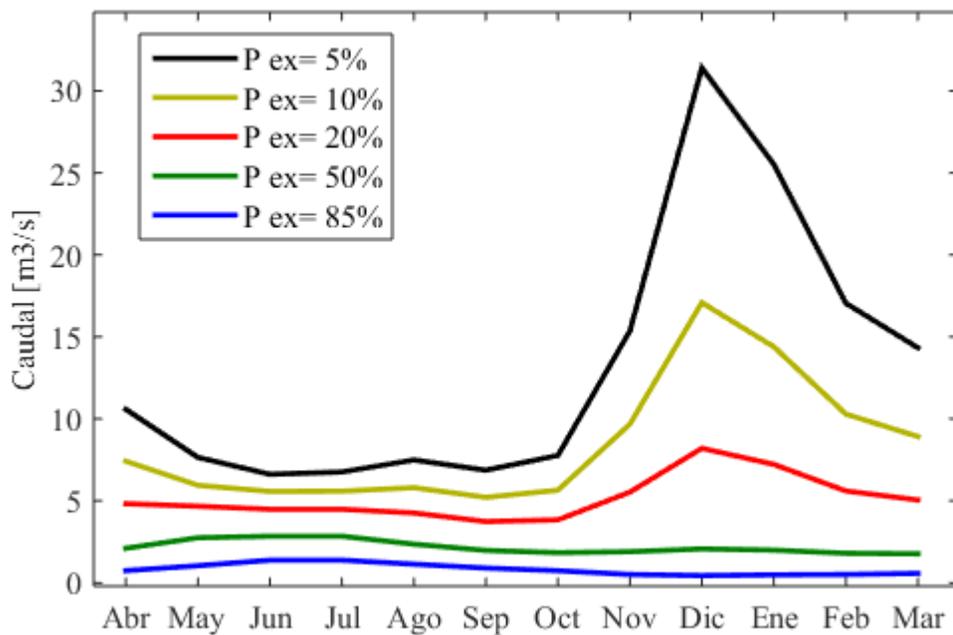


Figura 3-3: Curva variación estacional. Estación fluviométrica río tránsito antes de la junta con el río Carmen

La Figura 3-4 presenta la curva de variación estacional para la cuenca del río El Carmen con distintas probabilidades de excedencia de caudales, la información para realizar dicha curva fue obtenida de la estación fluviométrica Ramadillas.

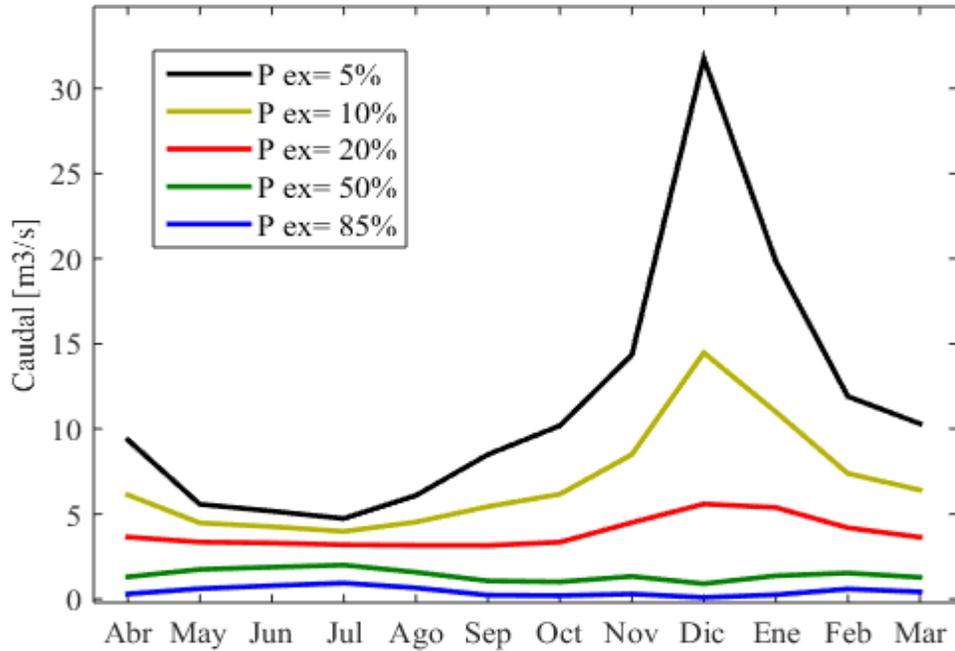


Figura 3-4: Curva de variación estaciones. Estación fluviométrica Ramadillas

Ambos ríos presentan un régimen nival, como se aprecia en las Figuras 3-3 y 3-4, con sus mayores caudales en diciembre en años húmedos, producto de los deshielos, mientras que en años secos se observan caudales muy bajos a lo largo de todo el año.

3.4. Geología

Los cauces mayores se encuentran sobre formaciones geológicas constituida por depósitos no consolidados y rellenos de depósitos fluviales; gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. Los alrededores de los cauces presentan una amplia variedad de formaciones geológicas. En la Figura 3-5 se presenta el mapa geológico de la zona en estudio.

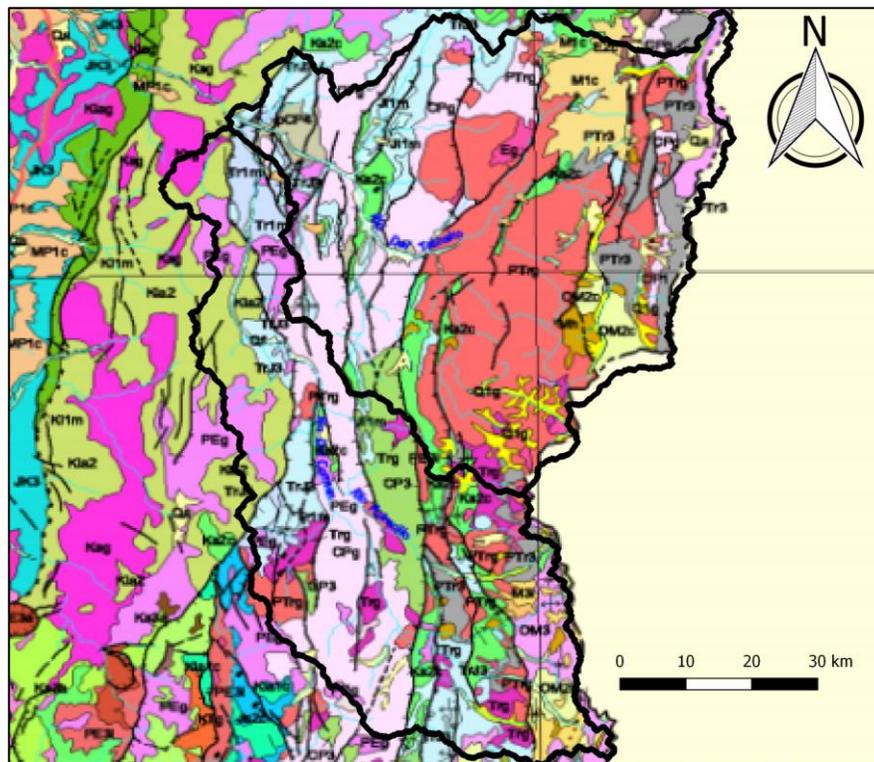


Figura 3-5: Mapa geológico. Fuente: SERNAGEOMIN, 2003

Como se puede observar en la carta geológica existen diversas formaciones geológicas en la cuenca, sólo se mencionan las formaciones que abarcan una mayor área en la cuenca. Dicha información se presenta en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Leyenda mapa geológico

Nombre	Periodo	Descripción
CPg	Paleozoico	Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.
Trg	Meozoico-Triásico	Granitos leucocráticos, monzo y sienogranitos de biotita y muscovita, granodioritas y dioritas de biotita y hornblenda, pórfidos hipabisales
PTrg	Paleozoico	Granitos hololeucocráticos, pórfidos graníticos y granodioritas de biotita
CP3	Paleozoico	Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Incluye cuerpos hipabisales riolíticos.
Peg	Cenozoico-Paleógeno	Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos riolíticos y dacíticos, asociados a mineralización de Cu-Au

3.5. Hidrogeología

Con respecto a la hidrogeología, en la parte superior de la cuenca destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas plutónicas e hipabisales del paleozoico formado por intrusivos graníticos y basamentos impermeables junto con rocas volcánicas, coladas y depósitos piroclásticos reolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos del período jurásico de muy baja permeabilidad.

El escurrimiento es en sentido NNW, para luego virar en las cercanías de Alto del Carmen en sentido NWW, y desde esta ciudad en adelante la permeabilidad cambia de media a alta al pasar de rocas sedimentarias – volcánicas a depósitos no consolidados o rellenos, encajonadas por intercalaciones de rocas sedimentarias, plutónicas e hipabisales (DGA, 2004). La Figura 3-6 presenta el mapa hidrogeológico de la cuenca en estudio.

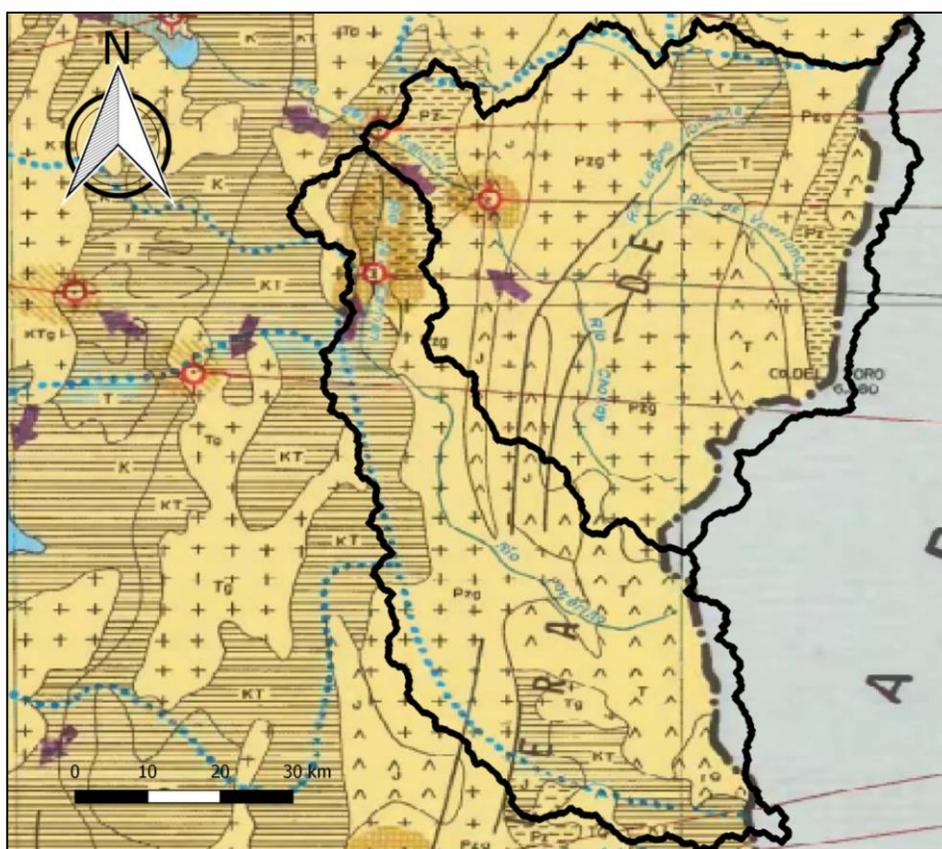


Figura 3-6: Mapa hidrogeológico. Fuente: DGA, 2004

3.5. Información disponible

A continuación, se presenta la información disponible en las estaciones meteorológicas y fluviométricas necesaria a utilizar para realizar el presente estudio.

3.5.1. Estaciones Meteorológicas

De las estaciones meteorológicas se utilizará la información de precipitación máxima en 24 horas y la temperatura media diaria.

La Tabla 3-2 presenta el nombre de las estaciones meteorológicas, su ubicación en coordenadas UTM, su respectiva cota y por último el periodo de información.

Tabla 3-2: Coordenadas estaciones meteorológicas

Nombre	Este [m]	Norte [m]	Cota [m.s.n.m.]	Periodo
Santa Juana	338376	6827375	560	1961-Actual
Rio Huasco en Algodones	352888	6820881	750	2003-2016
Junta del Carmen	354993	6818252	770	1948-2016
Domeiko	315393	6795593	780	1941-2016
El Tránsito	374982	6805335	1100	1993-Actual
San Félix	357312	6798782	1150	1969-2016
El Parral	383316	6793760	1400	1993-Actual
Conay	387596	6794272	1450	1965-2016
Rio Conay en las Lozas	392715	6797210	1560	2015-Actual
Conay en albaricoque	391179	6796708	1600	1999-2016
El Corral	362606	6778607	1820	1995-2016
Rio Carmen en el Corral	362207	6778654	2000	2015-Actual

La Figura 3-7 presenta las ubicaciones y distribución de las estaciones meteorológicas respectivamente en la zona de estudio.

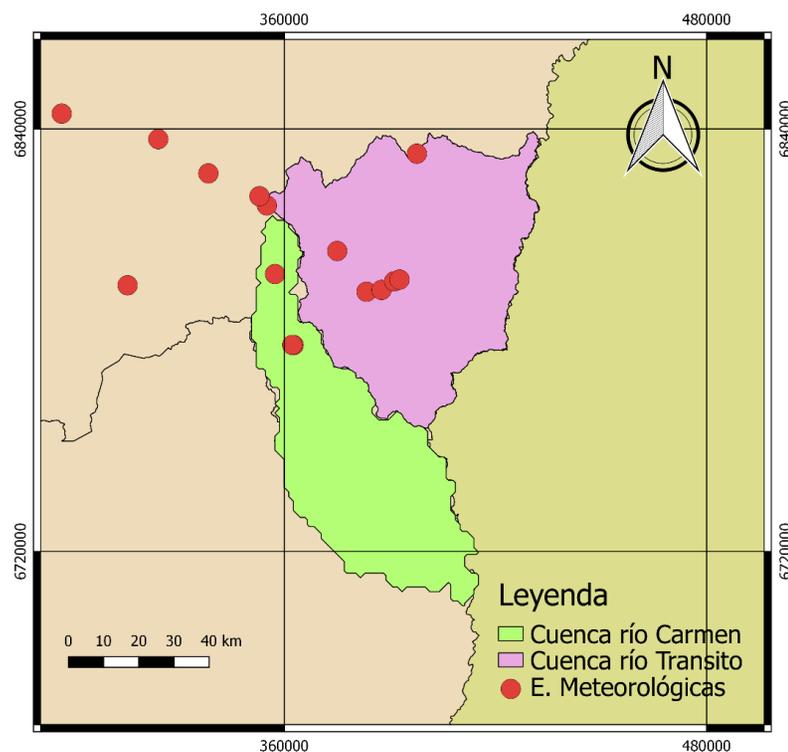


Figura 3-7 Mapa estaciones meteorológicas

3.5.2. Estaciones Fluviométricas

De las estaciones fluviométricas se va a emplear la información de caudal instantáneo. La Tabla 3-3 presenta el nombre de las estaciones fluviométricas, su ubicación en coordenadas UTM, su respectiva cota y por último el periodo de información.

Tabla 3-3: Coordenadas estaciones fluviométricas

Nombre estación	Este [m]	Norte [m]	Cota [m.s.n.m.]	Periodo
Río Huasco en Chépica	348473	6823914	600	2001-Actual
Río Huasco en Algodones	352888	6820881	750	1975-2016
Río Tránsito antes junta río Carmen	355078	6818563	812	1940-2014
Río Carmen en Ramadillas	354653	6818385	850	1954-2000
Río Carmen en Pte. la Majada	358666	6800764	1075	1989-2017
Río Carmen en el Corral	362207	6778654	2000	1964-1988

La Figura 3-8 presenta las ubicaciones y distribución de las estaciones fluviométricas respectivamente en la zona de estudio.

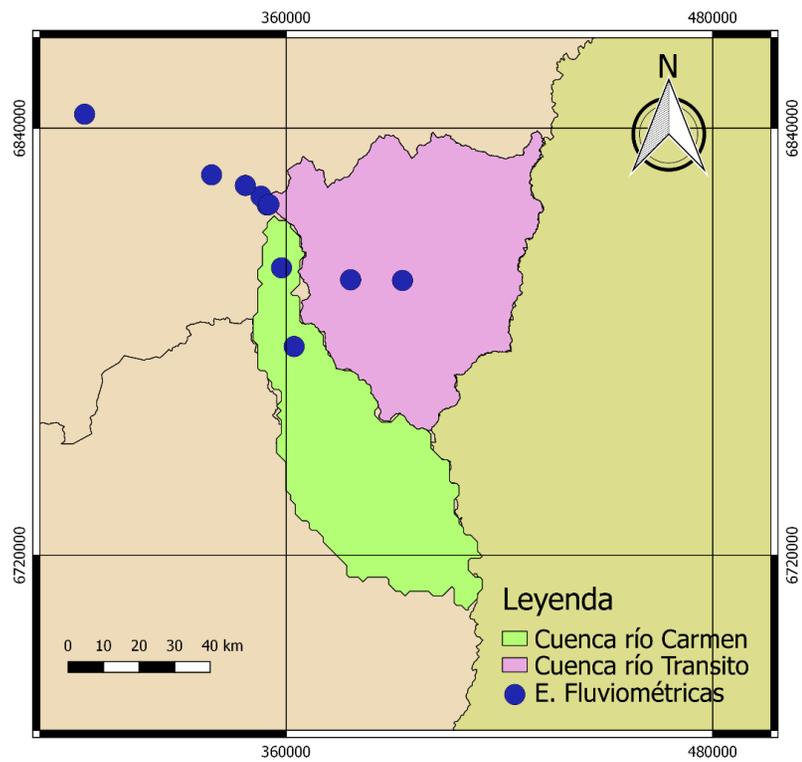


Figura 3-8: Mapa estaciones fluviométricas.

Capítulo 4 – Metodología

El presente Capítulo corresponde a la descripción de los distintos procedimientos realizados para la ejecución del modelo hidrológico, la combinación de los distintos escenarios entre los eventos seleccionados y la metodología que se llevó a cabo para incorporar al modelo las proyecciones del cambio climático.

4.1. Caracterización eventos extremos históricos en la cuenca

Para la caracterización de eventos extremos se procedió a realizar un análisis de frecuencia de la precipitación, adquiriendo los datos de las estaciones meteorológicas, con lo que se busca obtener el periodo de retorno de precipitaciones para cada evento extremo seleccionado.

Se aplicaron distintos modelos estadísticos a la precipitación máxima en 24 horas, para lo cual se emplearon cinco distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas en estudios hidrológicos como Gumbel, Normal, Log-Normal, Pearson y Log-Pearson. Para cada una de las estaciones meteorológicas se realizó una selección del mejor ajuste asociado al test χ^2 para la elección de la distribución de probabilidad asociada a cada estación.

También se utiliza la expresión de Weibull en base al siguiente procedimiento, se deben ordenar los valores de la variable analizada de mayor a menor, designando con "m" el número de orden asignado a cada valor y con "n" el total de datos de la estadística, la probabilidad de excedencia (P) que la variable sea igualada o superada queda definido en porcentaje, por la expresión de Weibull, como se observa en la expresión 4-1

$$P = \frac{m}{n + 1} * 100 \quad (4-1)$$

El período de retorno (T) se define como el valor inverso de la probabilidad de excedencia, según se presenta en la expresión 4-2

$$T = \frac{1}{P} \quad (4-2)$$

Una vez seleccionada la distribución de probabilidades se obtienen los parámetros que permiten estimar la variable estudiada para los distintos períodos de retorno.

Para la caracterización gráfica de los eventos extremos históricos de la cuenca se utilizaron los productos grillados del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia de la Universidad de Chile. El conjunto de datos CR2MET contiene información meteorológica (precipitación, temperaturas medias y extremas) en una grilla rectangular de 0.05° latitud-longitud (aproximadamente 5km) para el territorio de Chile continental y el periodo es del 1979-2015.

Para obtener los mapas de gradientes de precipitación y temperatura se trabajó con los productos grillados con la fecha correspondiente al evento extremo a caracterizar, junto con acortar el conjunto de datos al área de cuenca de estudio.

A continuación se describen los principales eventos extremos históricos, indicando para cada evento las precipitaciones acumuladas y periodos de retorno registrados en las subestaciones meteorológicas. Las Tablas 4-1 a la 4-5 presentan dicha información, mientras que las Figuras 4-1 a la 4-10 muestran las distribuciones de precipitación acumulada y temperatura para cada evento.

- **Evento 1 (8, 9 y 10 de abril de 1980):** Persistente e intensa lluvia en la precordillera produce aluvión en Copiapó, anegamientos e inundaciones en la región de Atacama. Crecida súbita del río Salado produce inundaciones y emergencia en Diego de Almagro y El Salado.

Tabla 4-1: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno

Estación	Pp. Acumulada [mm]	Periodo de retorno [años]
Santa Juana	33	4
Junta del Carmen	30.9	3
San Félix	105.7	21
Conay	138.7	40

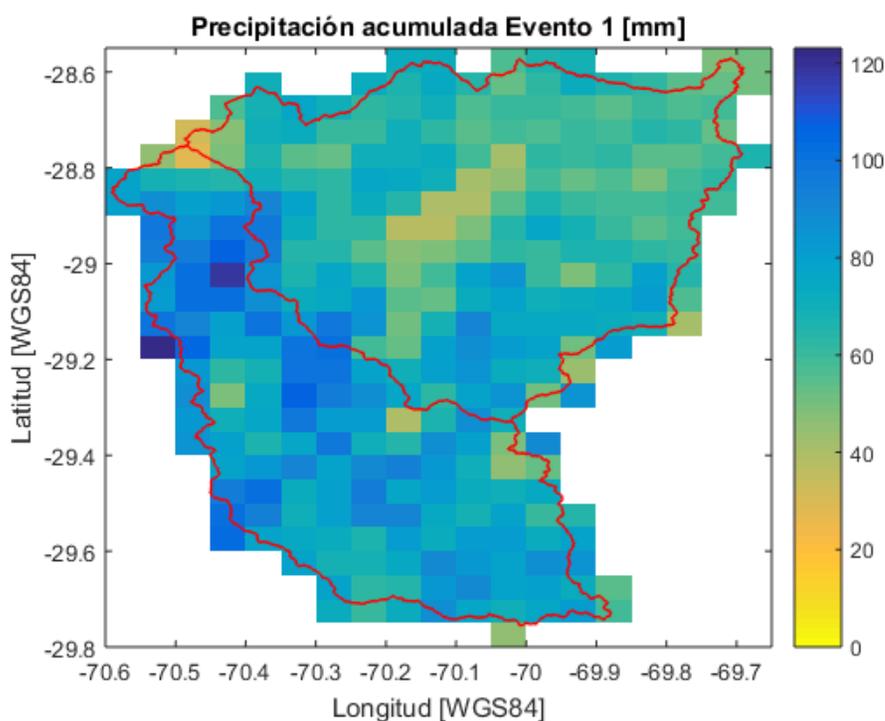


Figura 4-1: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 1.

De la Figura 4-1 se puede observar como la precipitación máxima (mayor a 100 mm) se distribuye principalmente en la cuenca del río Carmen y en la parte baja de la cuenca del río Tránsito.

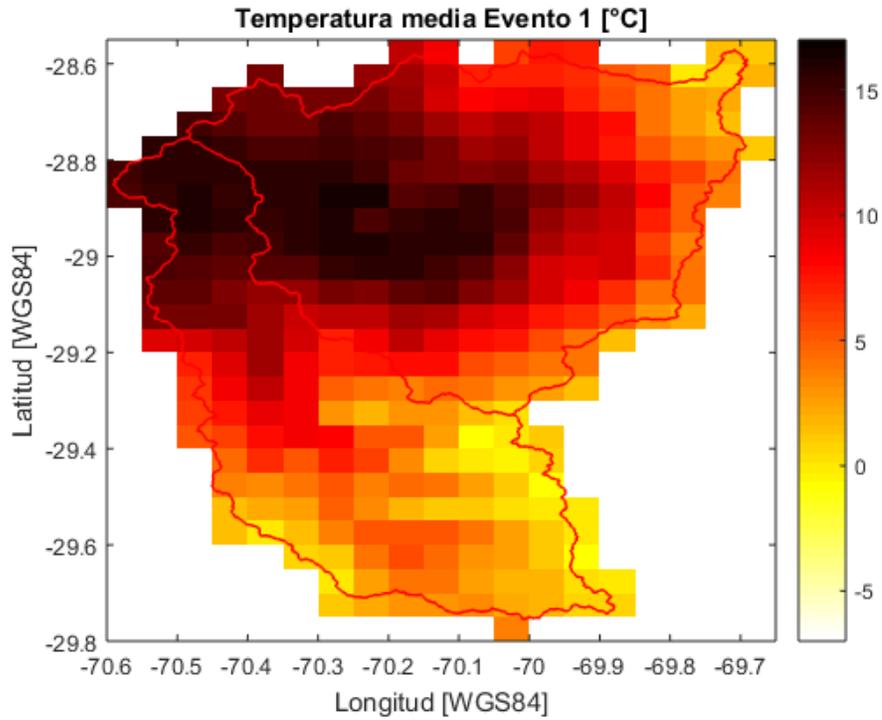


Figura 4-2: Distribución espacial de la temperatura media para evento 1.

De la Figura 4-2 se puede apreciar como la temperatura media de la tormenta es mayor en los valles del río Tránsito y Carmen. El evento presenta elevadas temperaturas medias lo que se refleja en la altura de la isoterma cero.

- **Evento 2 (6 y 7 de mayo de 1987):** Intensas lluvias en Atacama. Aluviones en quebradas de Vallenar.

Tabla 4-2: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno

Estación	Pp. Acumulada [mm]	Periodo de retorno [años]
Santa Juana	82	18
San Félix	129	31
Conay	84.9	8

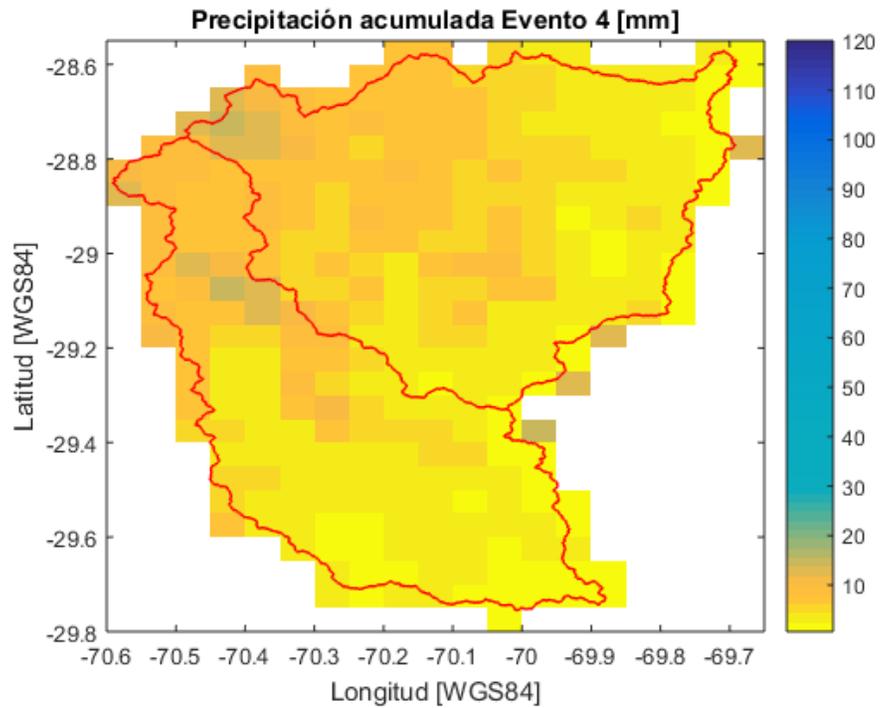


Figura 4-3: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 2.

A partir de la Figura 4-3 se puede observar que las precipitaciones acumuladas más altas se ubican cercana al punto de salida de ambas cuencas. Sin embargo, los valores muestran que el evento no fue de gran magnitud de precipitación.

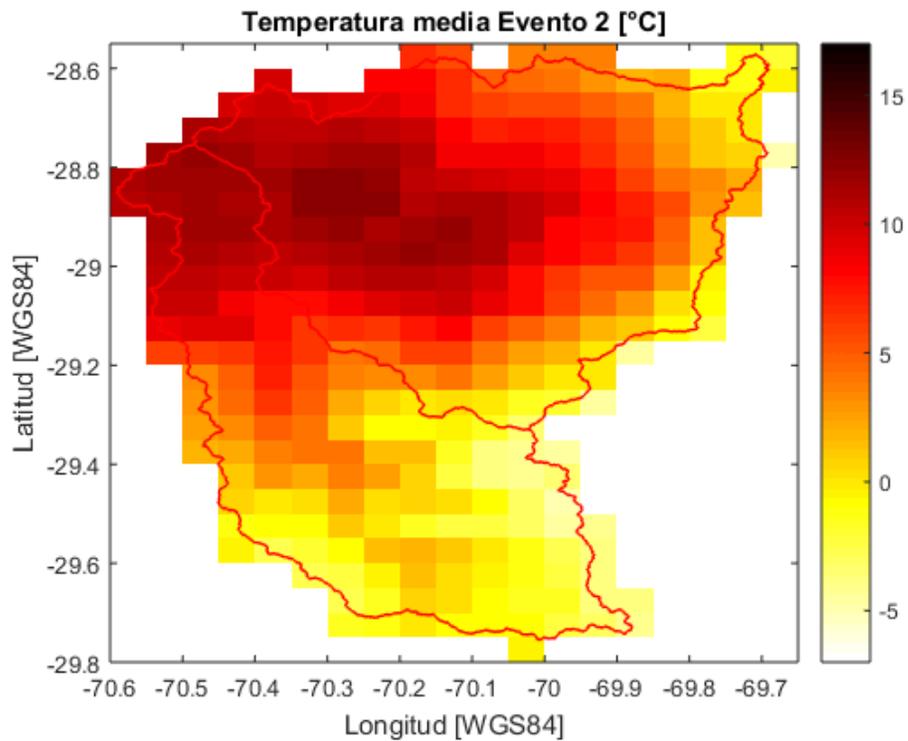


Figura 4-4: Distribución espacial de la temperatura media para evento 2.

De la Figura 4-4 se puede observar que la distribución de la temperatura del evento es similar al evento 1, pero en este caso la magnitud de la temperatura es menor aproximadamente 3 °C.

- **Evento 3 (17 y 18 julio 1991):** Intensas lluvias causan grave aluvión en Antofagasta, nevazones, inundaciones y aluviones en quebradas de Atacama (18 de junio). Chañaral afectada por inundaciones y aluviones en quebradas costeras, además de crecida e inundaciones por el río Salado.

Tabla 4-3: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno

Estación	Pp. Acumulada [mm]	Periodo de retorno [años]
Santa Juana	143.3	120
San Félix	130.3	45
Conay	86.6	12

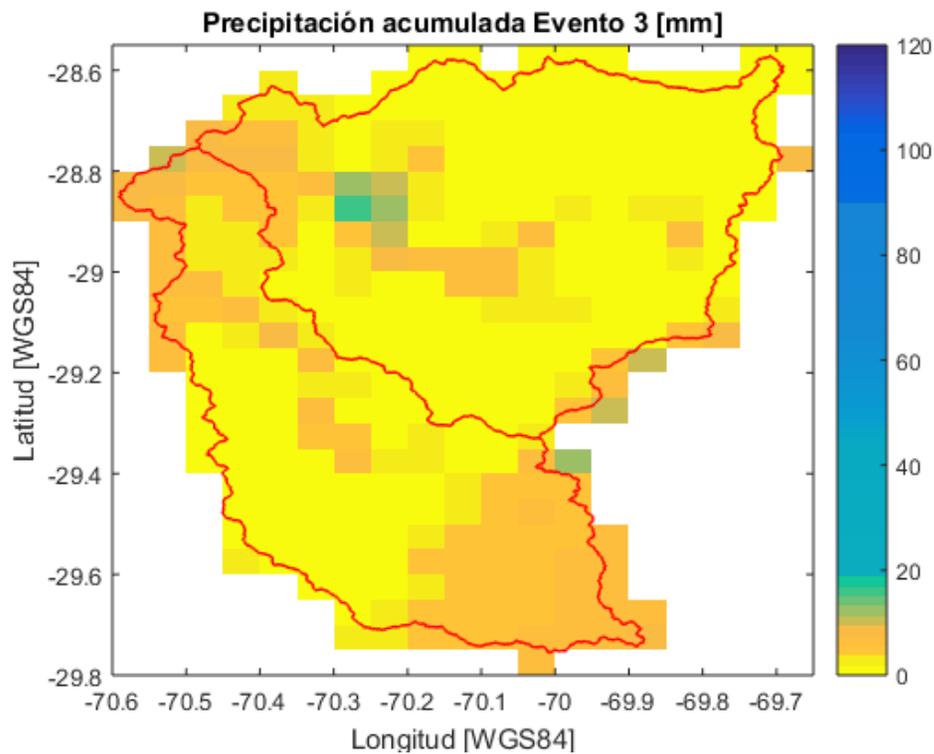


Figura 4-5: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 3.

De la distribución espacial de precipitación del evento 3, Figura 4-5, se puede apreciar como existe una extensa área de ambas cuencas en donde la precipitación acumulada para el evento es cero.

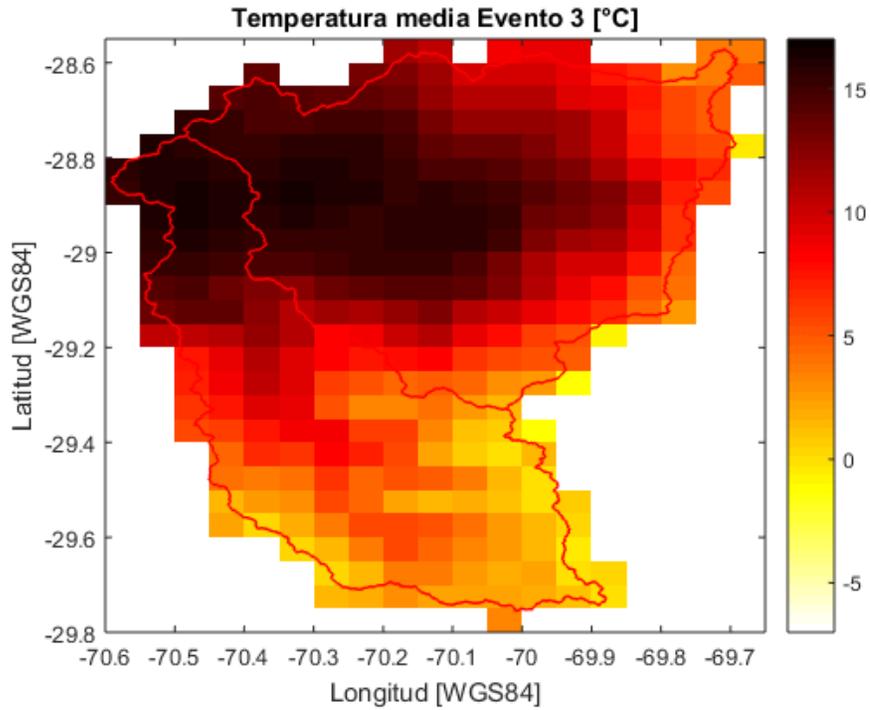


Figura 4-6: Distribución espacial de la temperatura media para evento 3.

Para el evento 3, se puede apreciar como a pesar de tener bajas magnitudes de precipitación, la temperatura media en ambas cuencas es alta en comparación a los otros eventos.

- **Evento 4 (12 de junio de 1997):** Intensas lluvias torrenciales en Atacama. Crecidas e inundaciones severas en el río Copiapó y quebradas afluentes. Inundación por el río Salado afecta a Chañaral.

Tabla 4-4: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno

Estación	Pp. Acumulada [mm]	Periodo de retorno [años]
Santa Juana	82.5	23
Junta del Carmen	59	10
El Tránsito	117	80
San Félix	77	75
El Parral	89.5	19
Conay	100	18
El Corral	70	18

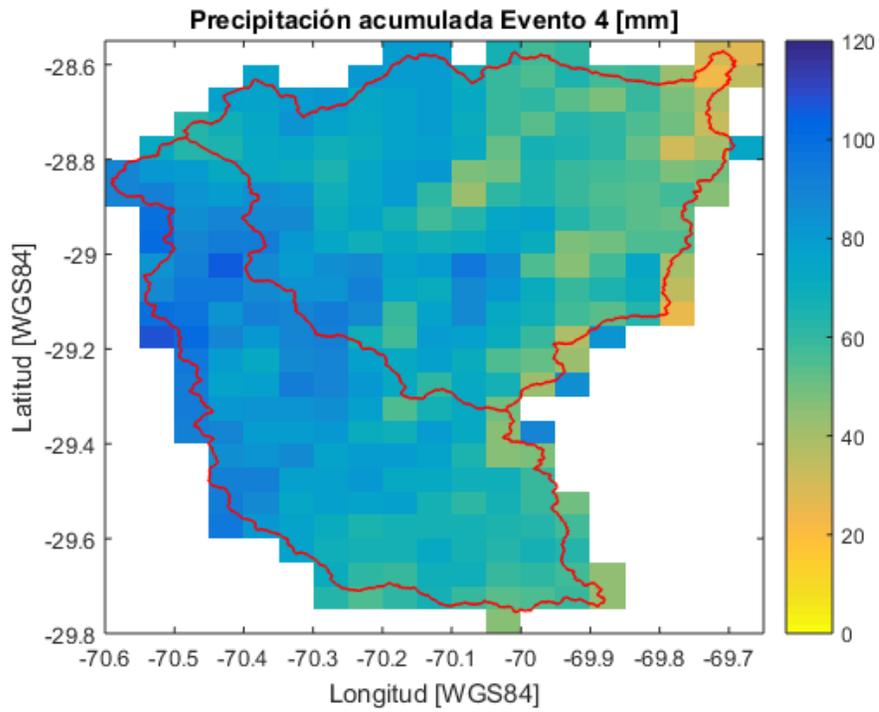


Figura 4-7: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 4.

De la Figura 4-7 se puede apreciar las grandes magnitudes de precipitación acumulada en ambas cuencas, superando los 100 mm en la parte baja de las cuencas.

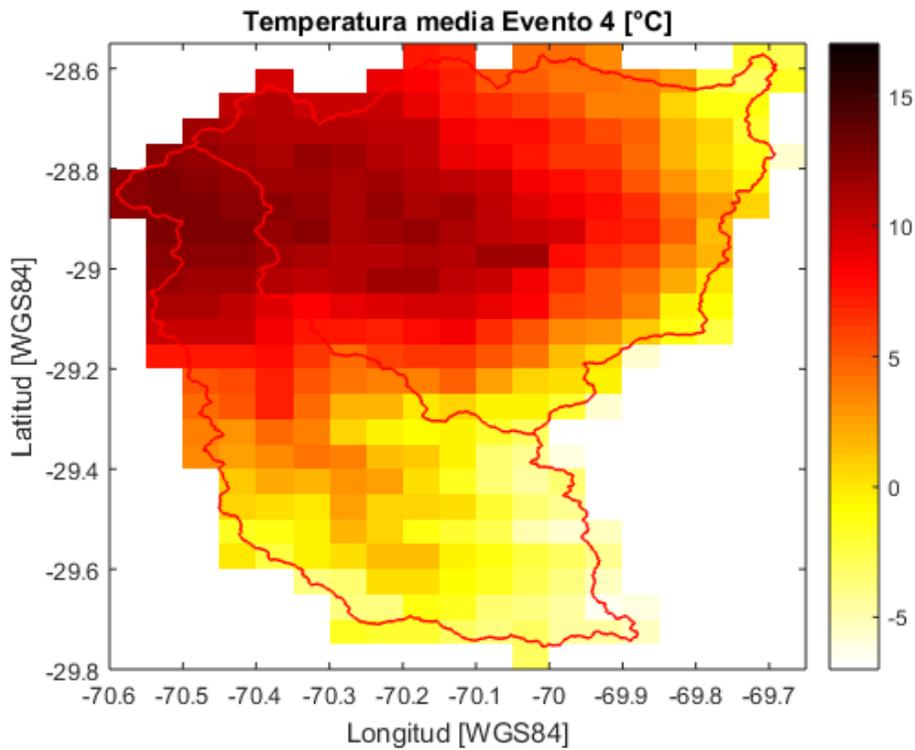


Figura 4-8: Distribución espacial de la temperatura media para evento 4.

De la Figura 4-8 se puede desprender como al igual que el evento 2 las temperaturas máximas son cercanas a los 12 °C, lo que en comparación a los eventos restantes son temperaturas más bajas.

- **Evento 5 (23, 24 y 25 de marzo de 2015):** Lluvia moderada el 24 que se transforma a torrencial el 25 de marzo y finaliza el 26 de marzo. Severos aluviones e inundaciones en toda la región de Atacama el 25 de marzo. Crecida, desborde y fuertes aluviones por los ríos Salado y Copiapó. Fuerte impacto en Chañaral.

Tabla 4-5: Precipitación acumulada de la tormenta y su periodo de retorno

Estación	Pp. Acumulada [mm]	Periodo de retorno [años]
Santa Juana	67.5	12
Junta del Carmen	51	8
El Tránsito	57.6	17
San Félix	68	9
El Parral	51.5	7
Conay	43	4
El Corral	62	6

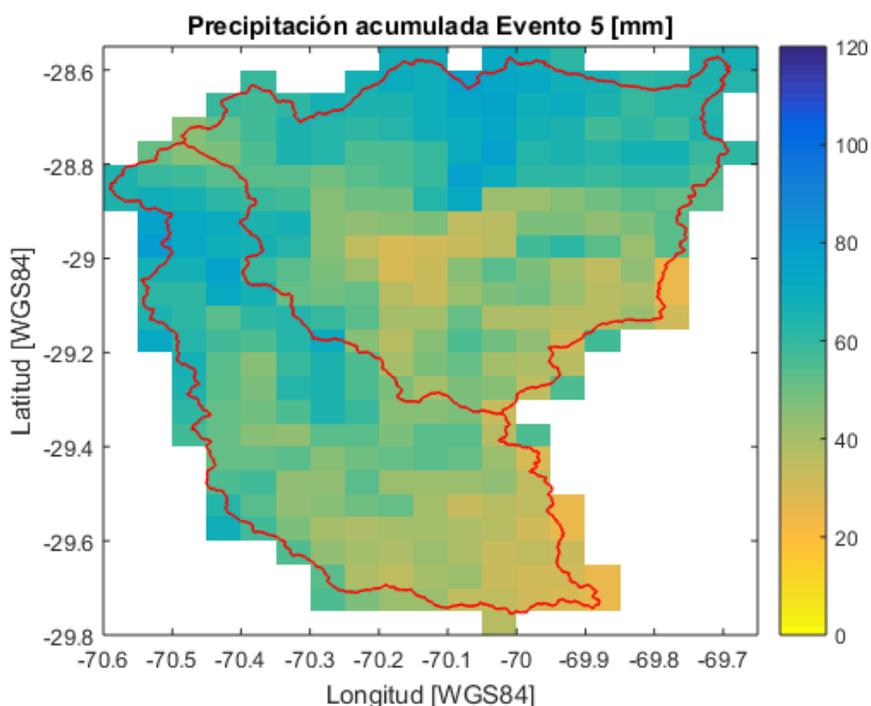


Figura 4-9: Distribución espacial de la precipitación acumulada del evento 5.

De la Figura 4-9 se puede apreciar como la precipitación acumulada es mayor en la parte superior de la cuenca del río Tránsito y la parte baja de la cuenca del río Carmen.

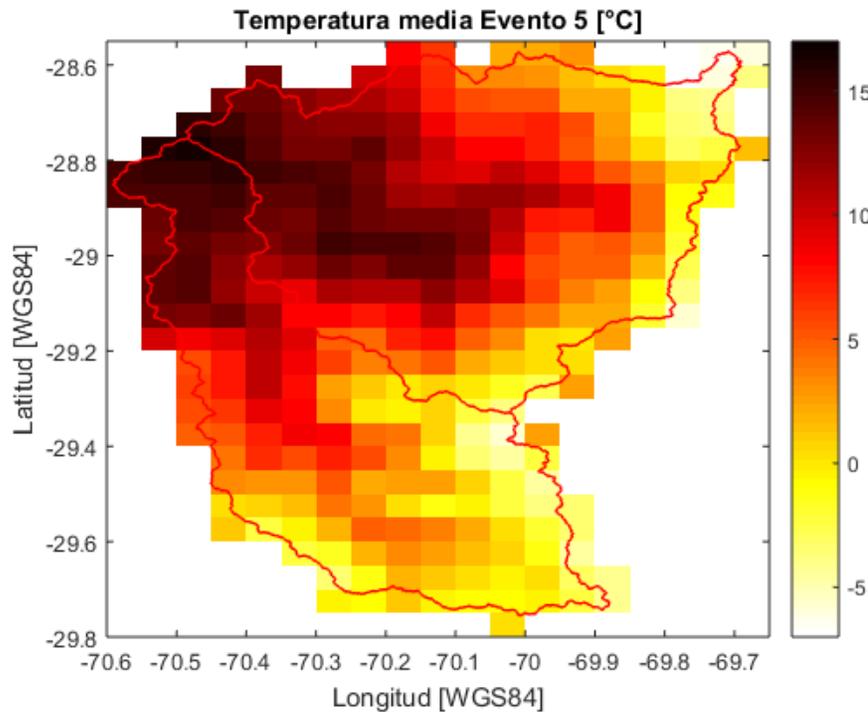


Figura 4-10: Distribución espacial de la temperatura media para evento 1.

De la Figura 4-10 se puede observar como la temperatura media del evento es alta, similar a la obtenida para los eventos 1 y 3, también se puede apreciar como la isoterma cero se encuentra a una altura muy elevada para ambas cuencas.

Caracterizar los eventos seleccionados nos brinda la información necesaria para la evaluación de la preponderancia de las variables meteorológicas a partir de los experimentos de combinación de la precipitación y temperatura, para la posterior estimación y evaluación del impacto de las proyecciones de dichas variables para el periodo futuro.

4.2. Modelación Hidrológica en VIC

Para la modelación hidrológica se utilizará la configuración realizada por el proyecto de la actualización del balance hídrico a nivel nacional (DGA, 2018). En la figura 4-11 se puede apreciar de forma esquemática las variables y parámetros utilizados para la modelación hidrológica del balance hídrico.

En efecto, la modelación hidrológica para estimar el balance hídrico por cuenca considera una resolución espacial de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ ($5,6 \times 5,6$ km aproximadamente), la cual corresponde al escalamiento obtenido de las forzantes meteorológicas. Estas forzantes corresponden a la precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación de onda larga y corta.

Por otra parte, se considera en el modelo un paso de tiempo de 3 horas, obteniéndose posteriormente mediante agregación los caudales diarios modelados. Para el ajuste de estos parámetros se considera maximizar en forma conjunta los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y Kling-Gupta (KGE).

La Figura 4-11 muestra los parámetros, las forzantes de entrada, variables de estado y los flujos de salida del modelo hidrológico VIC.

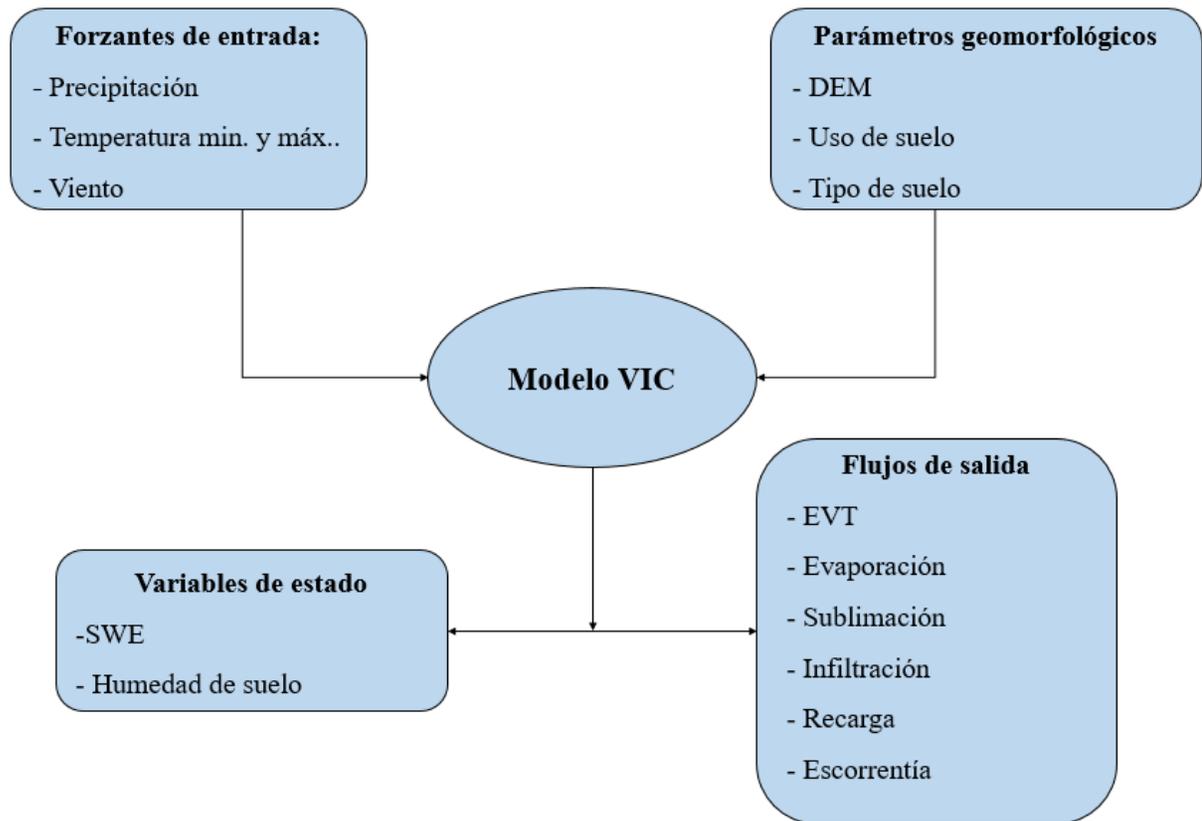


Figura 4-11: Esquema funcionamiento modelo VIC

El desempeño del modelo se evalúa mediante criterio Kling-Gupta (Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012) dado por la expresión (4-3), donde $KGE=1$ representa un ajuste perfecto, mientras que valores negativos implican que el promedio es un mejor estimador que el modelo analizado.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2} \quad (4-3)$$

- Donde:
- KGE = Criterio de eficiencia Kling-Gupta.
 - r = Coeficiente de correlación entre la simulación y la observación.
 - β = Razón entre el promedio simulado y observado
 - α = coeficiente de variación entre la desviación estándar simulada y observada.

4.2.1. Regionalización

La cuenca de los ríos Carmen y Tránsito no cuenta con régimen natural en sus caudales, se encuentran intervenidas, por lo que es necesario restituir los caudales para calibrar y validar el modelo hidrológico, sin embargo, la cuenca tampoco cuenta con la información fluviométricas necesaria para reconstruir los caudales.

Por ello, para obtener resultados representativos de los procesos físicos de la cuenca fue necesario realizar una regionalización de sus parámetros, la cual consiste en que, a partir de las cuencas ya calibradas en régimen natural, se transfieren los parámetros obtenidos de la calibración a cuencas sin información que cumplen con similitudes en atributos físicos/meteorológicos con la cuenca donadora.

Como VIC trabaja con celdas independientes entre sí el resultado del proceso de regionalización es independiente para cada celda o píxel de la cuenca. A partir de lo anterior, se plantea una metodología de transferencia de parámetros para los pixeles que se encuentran al interior de cuencas con alto grado de intervención, basada en la regionalización de ellos producto de la clasificación de pixeles basada en los atributos físicos/meteorológicos. La Figura 4-12 esquematiza dicha metodología. Más información de la regionalización se encuentra en el Anexo B.

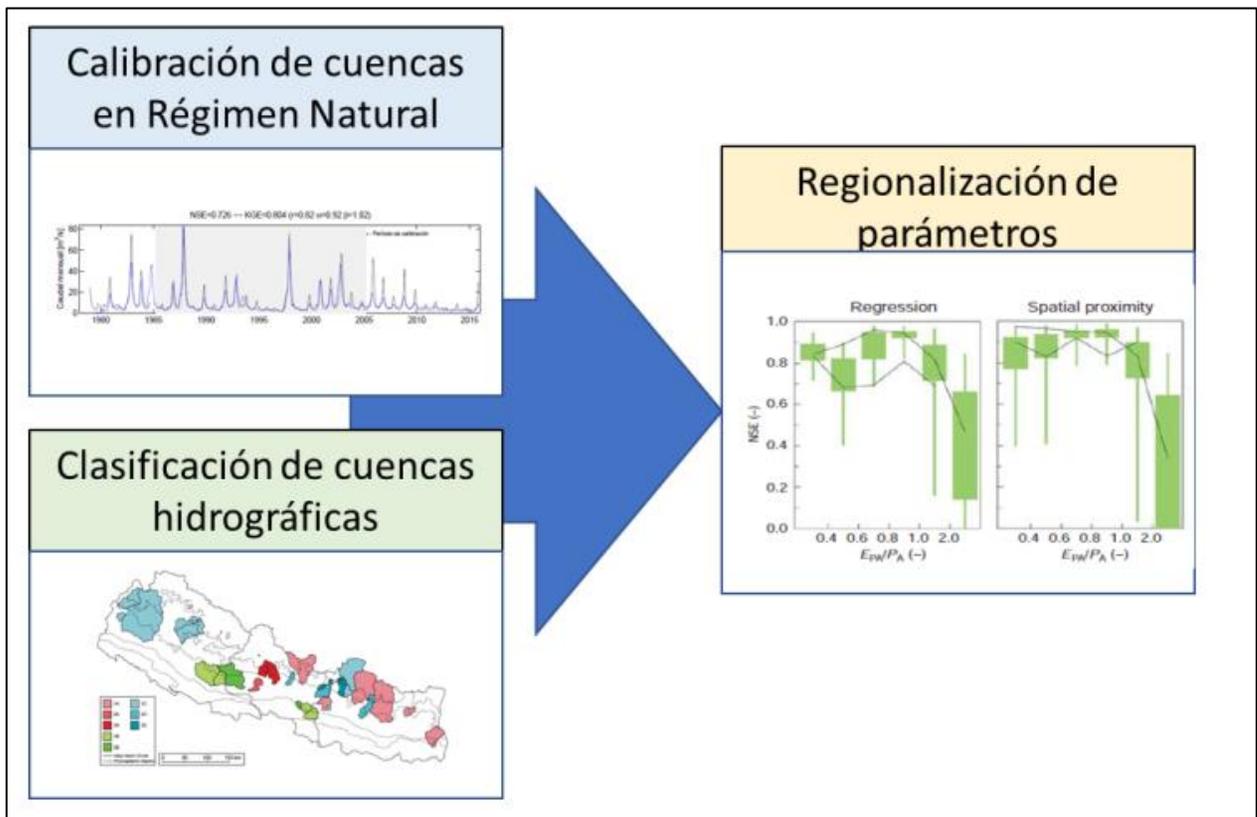


Figura 4-12: Regionalización de parámetros calibrados

4.3. Experimentos de combinación de variables entre eventos seleccionados

Para cada evento se realizó una combinación de temperatura y precipitación con los otros eventos seleccionados, junto con una modificación de la condición de humedad antecedente para cada evento. La Figura 4-13 muestra la cantidad de experimentos realizados para la combinación de la temperatura y la precipitación, entre los 5 eventos.

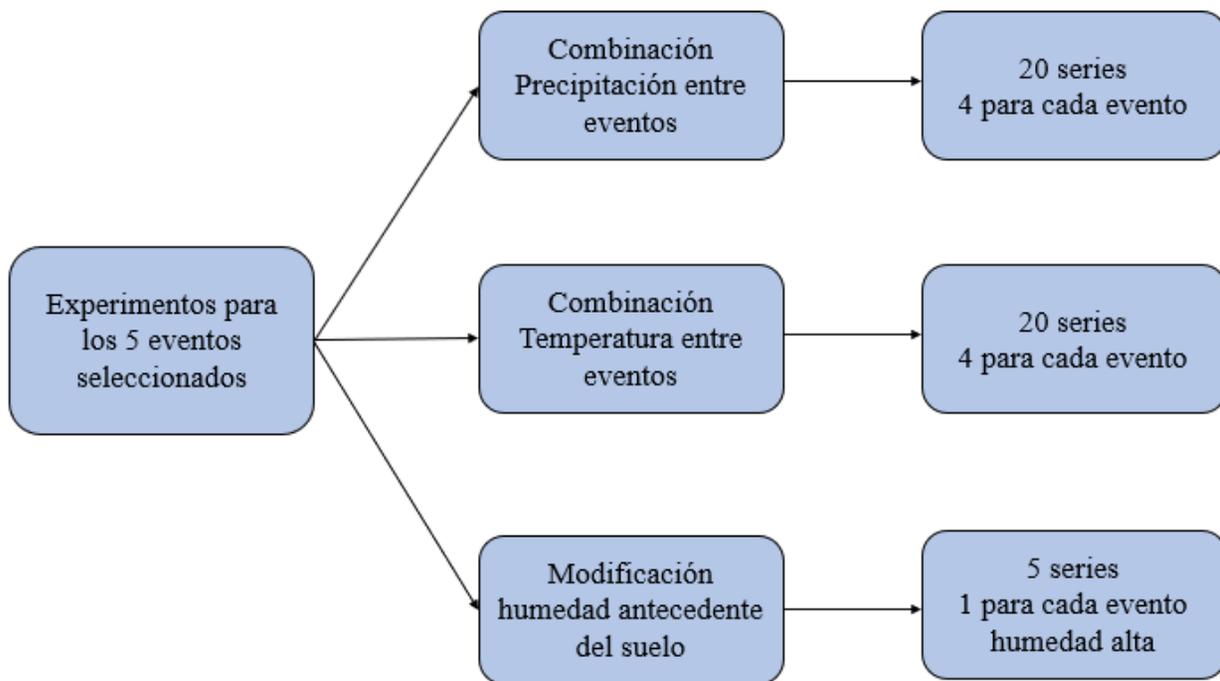


Figura 4-13: Esquema cantidad experimentos realizados para la combinación de las variables meteorológicas de los cinco eventos seleccionados.

La Figura 4-14 se presenta el procedimiento a realizar para la transposición de la temperatura del evento “n” al evento 1. El mismo procedimiento se realiza para la combinación de la temperatura entre eventos.

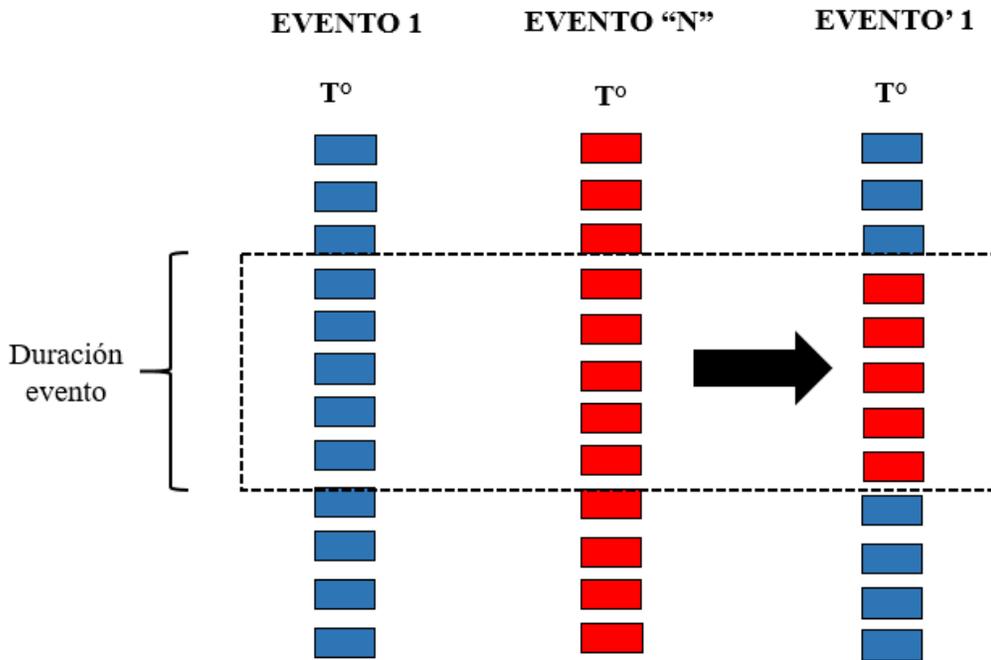


Figura 4-14: Esquema de la transposición para el caso de la temperatura

Para la modificación de la condición de humedad antecedente para cada evento seleccionado se le procedió a agregar una precipitación ficticia a los días previos al evento seleccionado, con el fin de modificar la humedad antecedente de los eventos.

4.4. Incorporación del cambio climático en el modelo

Para la incorporación de las proyecciones del cambio climático en el modelo hidrológico VIC fue necesario utilizar los mismos GCM utilizados en el proyecto del balance hídrico, los cuales corresponden a CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC.

Para llevar la escala de los GCM a una escala local como es la cuenca de los ríos Carmen y Tránsito, se utilizarán dos metodologías de escalamiento de las variables meteorológicas. La incorporación del cambio climático se esquematiza en la Figura 4-15.

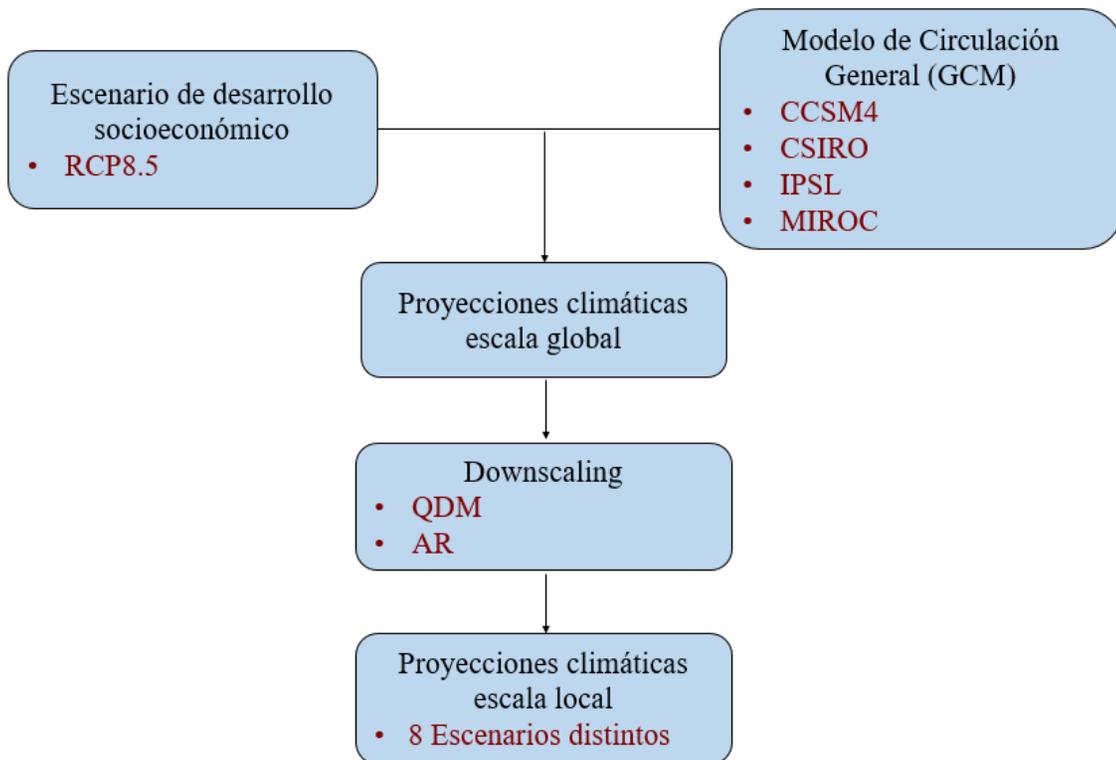


Figura 4-15: Esquema proceso de obtención de las forzantes a nivel local

Para incorporar las proyecciones del cambio climático, los GCM y el escenario de desarrollo socioeconómico RCP8.5 a la modelación hidrológica, es necesario llevar las forzantes de escala global a una escala local correspondiente a la cuenca de estudio, para lo cual se utilizarán dos métodos distintos de escalamiento de las variables.

En efecto, la metodología AR puede dividirse en dos etapas: La primera consiste en la desagregación espacial de las variables meteorológicas, precipitación y temperatura, para lo cual se procede a relacionar los puntos de observación, dados por los puntos grillados del CR2MET, con la información dada por el GCM a partir del método de ponderación del inverso de la distancia como se puede apreciar en la Figura 4-16.

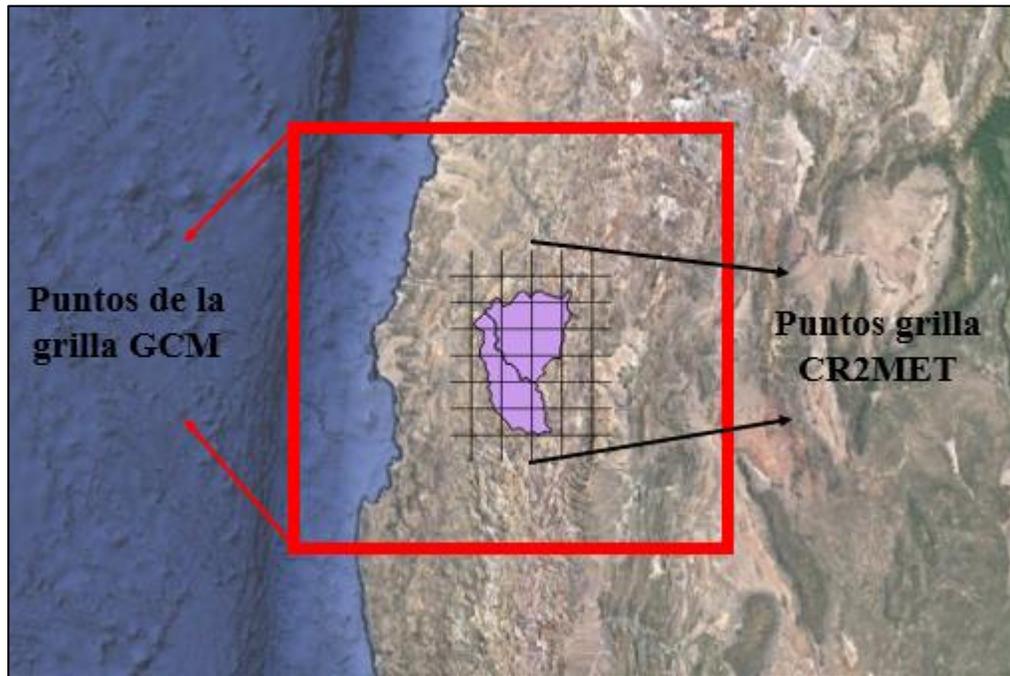


Figura 4-16: Esquema escalamiento espacial

De esta manera, el escalamiento espacial de la precipitación y temperatura se realiza de acuerdo al método de ponderación por el inverso de la distancia al cuadrado, tal como indican las expresiones (4-4) y (4-5).

$$P_{p_{pto. de interes}} = \frac{\sum_1^N \frac{Pp_i}{dist_nodo_i_pto_interes^2}}{\sum_1^N \frac{1}{dist_nodo_i_pto_interes^2}} \quad (4-4)$$

$$T_{pto. de interes} = \frac{\sum_1^N \frac{T_i}{dist_nodo_i_pto_interes^2}}{\sum_1^N \frac{1}{dist_nodo_i_pto_interes^2}} \quad (4-5)$$

- Donde:
- Pp_i y T_i corresponde al valor de la precipitación y temperatura del nodo i respectivamente.
 - $dist_nodo_i_pto_interes$ es la distancia desde el nodo i al punto de interés.
 - $P_{punto de interes}$ y $T_{punto de interes}$ corresponden a la precipitación y temperatura en el punto de interés.

La segunda etapa de la metodología consiste en la corrección del sesgo o escalamiento temporal de las variables, la cual consiste en la corrección de la distribución temporal de las variables de cada celda de los GCMs mediante la comparación de las curvas de duración mensuales con las observadas. Para ello hubo que seleccionar un periodo base donde los datos observados y los productos de los GCMs en el periodo histórico para luego aplicar una función de transferencia que ajuste las curvas de duración a la observada.

La otra metodología utilizada para la corrección del sesgo de los datos es la realizada por el proyecto del balance hídrico nacional, el método QDM (Quantile Delta Mapping) propuesto por Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015), el cual considera la variación de las funciones de densidad de probabilidad de los GCMs para el periodo histórico y futuro.

4.5. Confección de la actualización del mapa suelo de material no consolidado

Para la confección de la actualización del mapa de suelo con material no consolidado incorporando las proyecciones del cambio climático, se procedió a determinar la variación de la cota de la isoterma 0°C para el periodo base y el futuro, considerando el promedio de la cota de la isoterma 0°C para eventos con precipitación diaria mayor a 0 (mm). Luego dicha información será intersectada con el mapa de zonas de suelo no consolidado.

La Figura 4-16 muestra el material no consolidado de una porción de la zona de estudio a partir de una aproximación en base a una cartografía manual sobre imágenes satelitales (Cabré, A. (2019)).

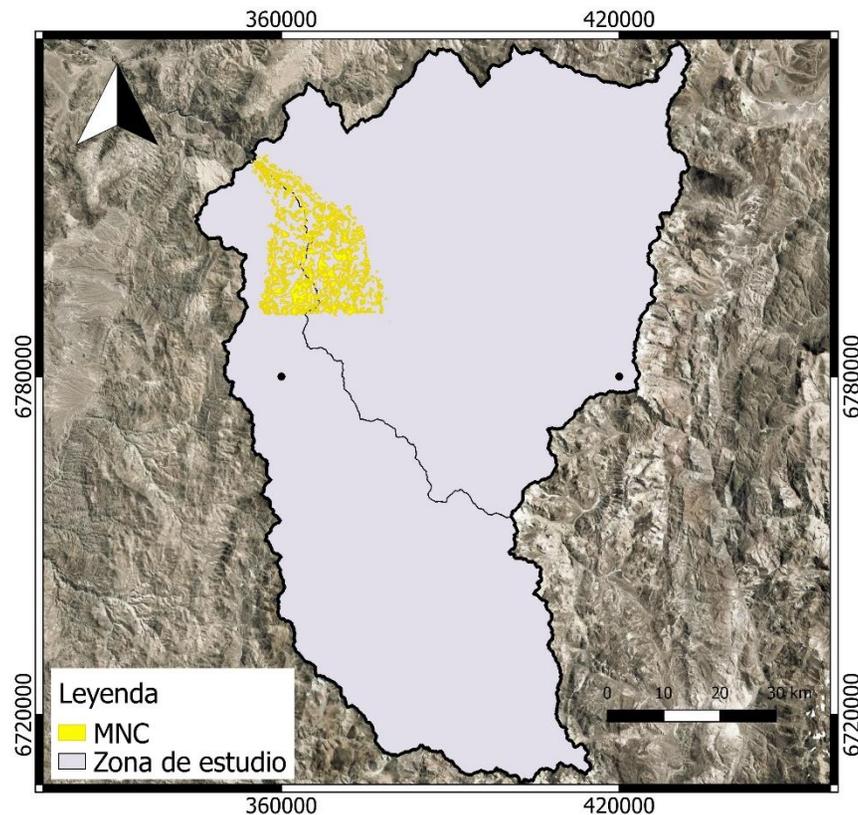


Figura 4-17: Capa de material no consolidado. Fuente: Cabré, A., 2019.

Para la confección de la capa representativa del material no consolidado en toda la zona de estudio, se realizará una clasificación supervisada con la capa presentada en la figura 4-16, por medio de imágenes Landsat 8. El periodo tiempo utilizado para la descarga de las imágenes Landsat fue del 25/03/2018 al 04/04/2018 y se utilizó la combinación de bandas 4,3,2 lo cual representa color natural.

Capítulo 5 – Resultados

En el presente Capítulo se resumen los resultados más importantes obtenidos de la modelación hidrológica, los experimentos de la combinación entre variables hidrometeorológicas, la incorporación de las proyecciones del cambio climático y por último la actualización del mapa de material no consolidado.

5.2. Simulación hidrológica a partir del Modelo VIC

5.2.1 Simulación periodo histórico

Para cada evento histórico de la cuenca se combinó con variables (precipitación, temperatura y humedad antecedente) caracterizadas de los otros eventos extremos seleccionados que tuvo como resultado un aluvión o una crecida de tipo pluvial, con lo que se busca obtener la preponderancia de las distintas variables meteorológicas en la ocurrencia de crecida.

La figura 5-1 presenta el caudal simulado obtenido por la modelación hidrológica para el periodo base y el caudal observado (producto CR2MET).

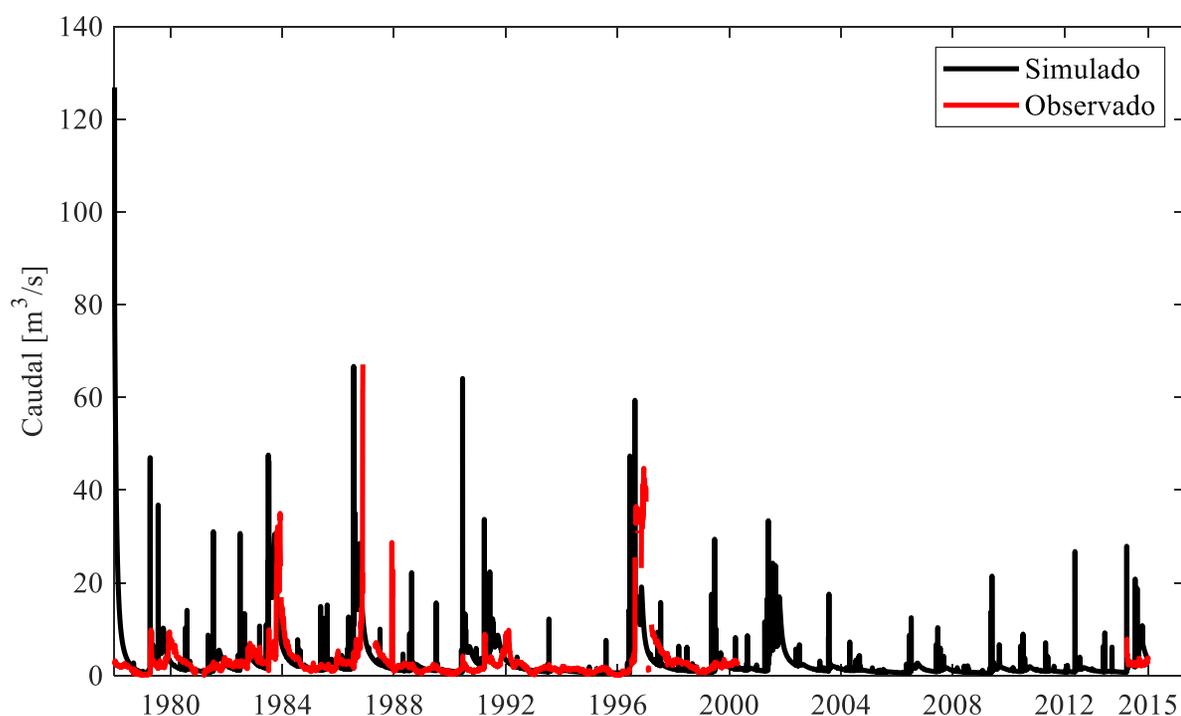


Figura 5-1: Simulación caudal periodo 1979 al 2015

A pesar de tener escasa información de los caudales observados en la estación fluviométrica río Huasco en algodones, sobre todo en la ocurrencia de eventos extremos, se determinó la eficiencia de los resultados del modelo con los datos observados por medio del indicador KGE, el valor obtenido corresponde a 0,37 y la Tabla 5-1 presenta el valor de las componentes de la fórmula del KGE, tomando en cuenta que la cuenca no fue calibrada y se obtuvieron sus parámetros por medio de la regionalización.

Tabla 5-1: Componentes fórmula KGE

α	1.06
β	1.05
r	0.38

5.2.2. Experimentos de distintos escenarios

Los resultados obtenidos para para cada combinación de las variables meteorológicas se presentan en un tiempo de 3 horas, tomando en cuenta que además se consideró que cada evento seleccionado tiene un periodo de duración de tres días para mayor simplicidad en la transposición de las variables meteorológicas.

Combinación de la temperatura entre los eventos seleccionados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la combinación de la temperatura entre los distintos eventos seleccionados

La Figura 5-2 presenta la combinación de temperaturas con los otros eventos seleccionados para el evento 1.

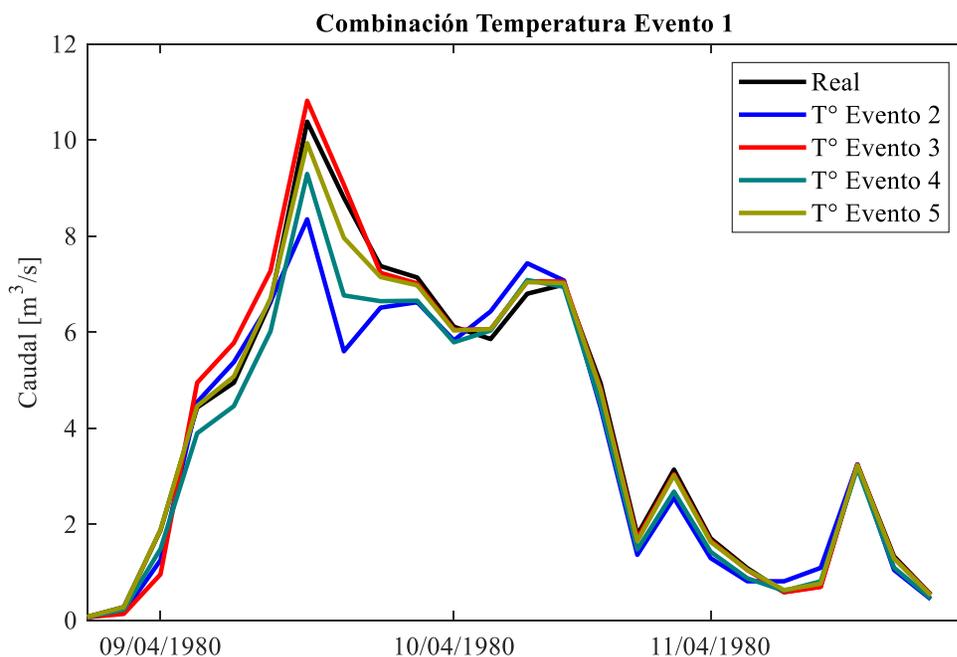


Figura 5-2: Combinación de temperaturas para el evento 1

De la Figura 5-2 se puede observar como la temperatura del evento 3 maximiza el caudal simulado debido a que la condición térmica del evento 3 es mayor en comparación a las temperaturas de los otros eventos, y también se aprecia que la serie con la temperatura del evento 2 tiene como resultado una magnitud menor para el caudal.

La Figura 5-3 presenta la combinación de temperaturas con los otros eventos seleccionados para el evento 2.

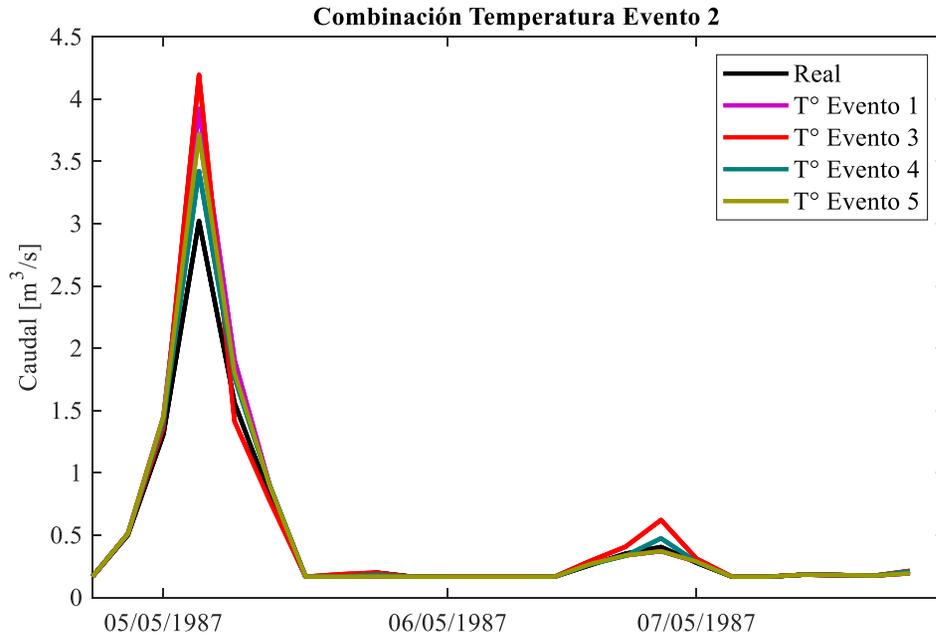


Figura 5-3 Combinación de temperaturas para el evento 2

Para el evento 2 la combinación de temperaturas con los otros eventos seleccionados no produce una diferencia significativa en los caudales, pero se sigue obteniendo una mayor magnitud de caudal para evento 2 en combinación con la temperatura del evento 3.

La Figura 5-4 presenta la combinación de temperaturas con los otros eventos seleccionados para el evento 3.

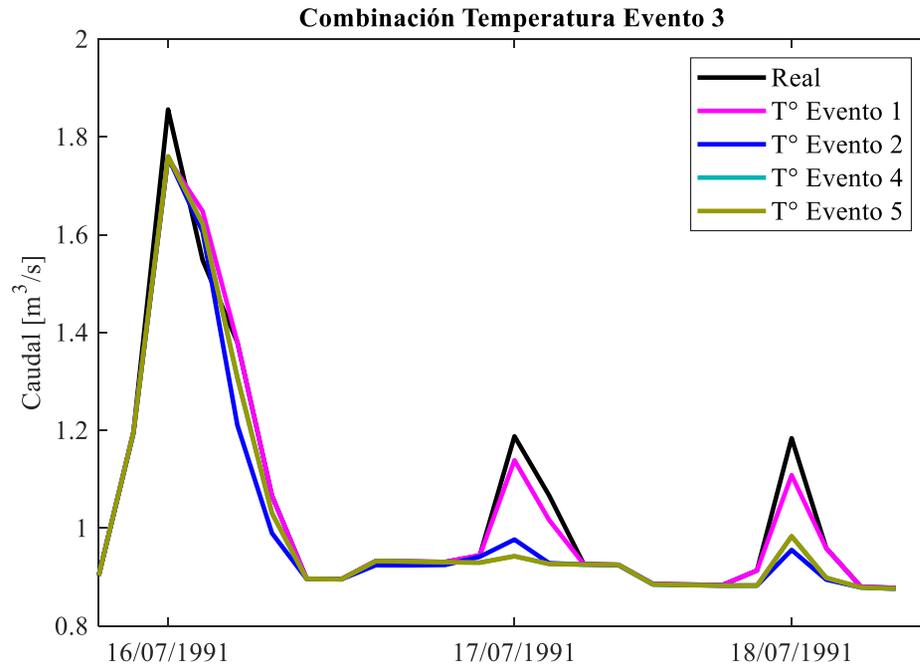


Figura 5-4: Combinación de temperaturas para el evento 3

El evento 3 al contar con la temperatura más alta en comparación a los otros eventos su simulación para el caudal resulta ser la de mayor magnitud, pero las diferencias con las otras combinaciones no son significativas.

La Figura 5-5 presenta la combinación de temperaturas con los otros eventos seleccionados para el evento 4.

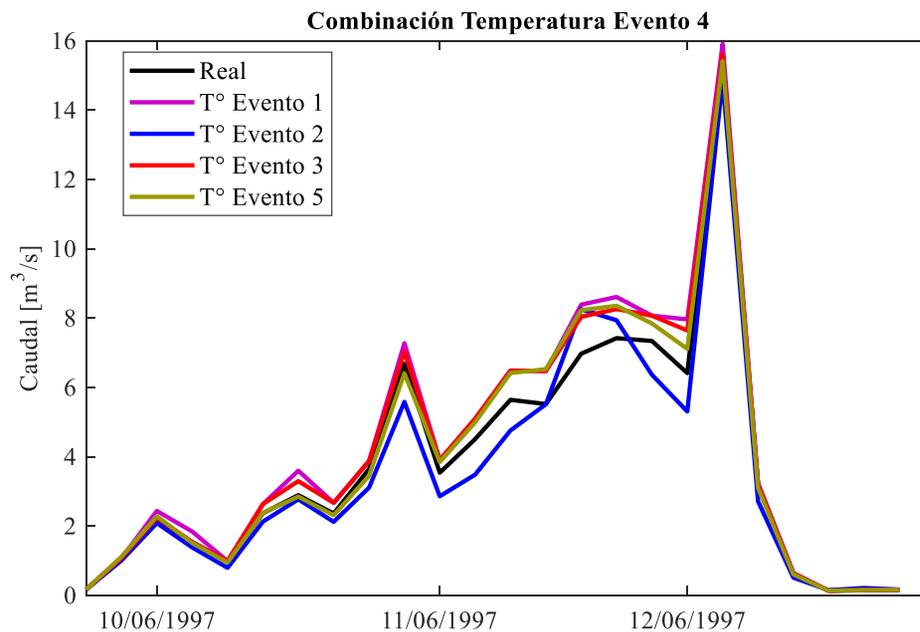


Figura 5-5: Combinación de temperaturas para el evento 4

Al igual que en los otros eventos se puede apreciar del gráfico que la temperatura no es una variable determinante en la generación de caudal y la variación de los resultados simulados varían poco.

La Figura 5-6 presenta la combinación de temperaturas con los otros eventos seleccionados para el evento 5.

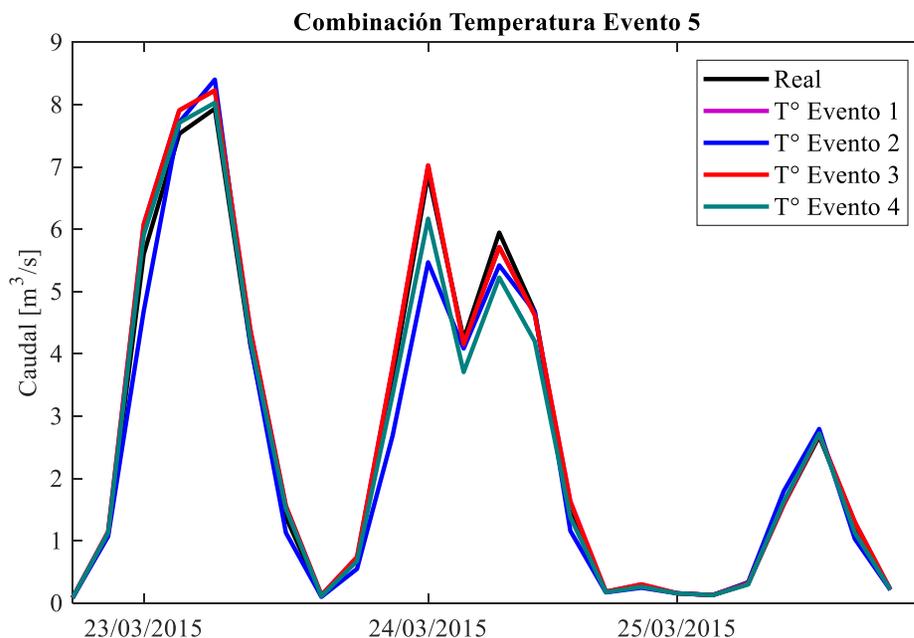


Figura 5-6: Combinación de temperaturas para el evento 5

Para la combinación de temperatura del evento 5 se puede observar la baja influencia de la temperatura en la simulación de caudal. También se puede apreciar como la temperatura del evento 2 y 4 producen los caudales más bajos simulados.

Combinación de la Precipitación entre los eventos seleccionados

A continuación se presentan los resultados obtenidos producto de la combinación de precipitaciones entre los eventos en estudio.

La Figura 5-7 presenta la combinación de precipitación con los otros eventos seleccionados para el evento 1.

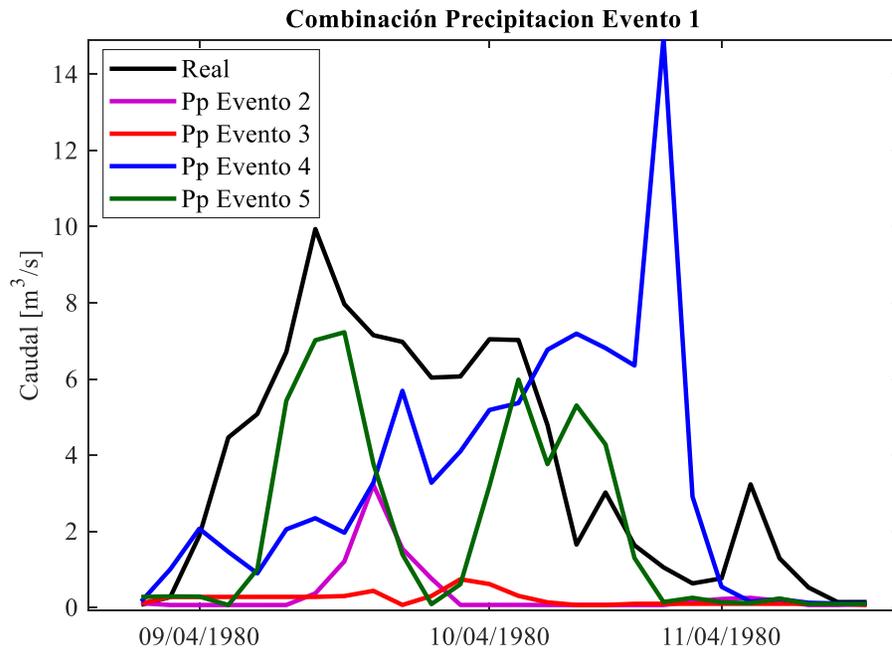


Figura 5-7 Combinación de precipitación para el evento 1

Para la combinación de las precipitaciones para el evento 1 se puede observar como la forma del hidrograma cambia completamente y adopta la forma del hidrograma del evento seleccionado. Las magnitudes del caudal simulado son similares a los obtenidos para cada evento de interés.

La Figura 5-8 presenta la combinación de precipitación con los otros eventos seleccionados para el evento 2.

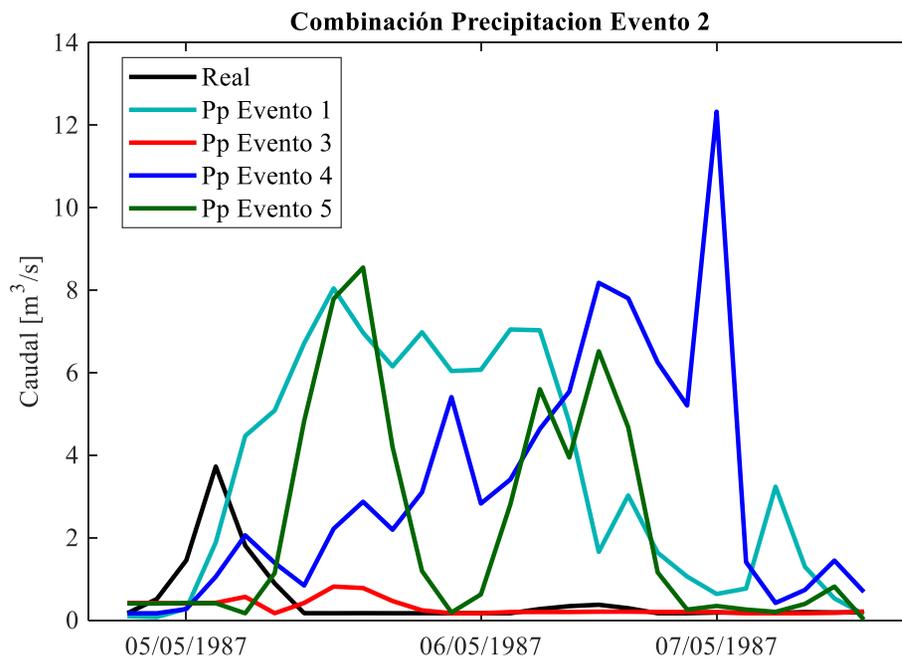


Figura 5-8: Combinación de precipitación para el evento 2

Para el evento 2 los caudales obtenidos para cada serie de forzantes modificadas disminuyen en 2 a 3 m³/s, por lo que la suma de las variables climáticas del evento 2 hace que la magnitud del caudal sea menor en comparación a los eventos seleccionados.

La Figura 5-9 presenta la combinación de precipitación con los otros eventos seleccionados para el evento 3.

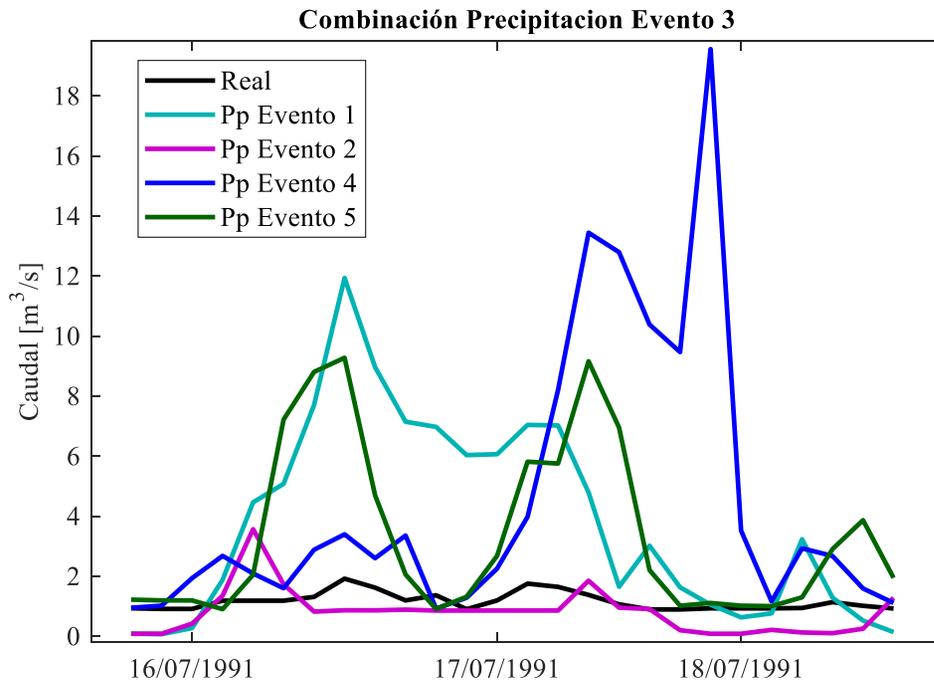


Figura 5-9: Combinación de precipitación para el evento 3

Para la combinación de precipitación del evento 3 se puede observar de la Figura 5-9 como la condición climática del evento 3 hace que la magnitud de los caudales simulados sean significativamente mayor, sobretodo el caso combinado con la precipitación del evento 4 en donde el caudal llega a los 20 (m³/s).

La Figura 5-10 presenta la combinación de precipitación con los otros eventos seleccionados para el evento 4.

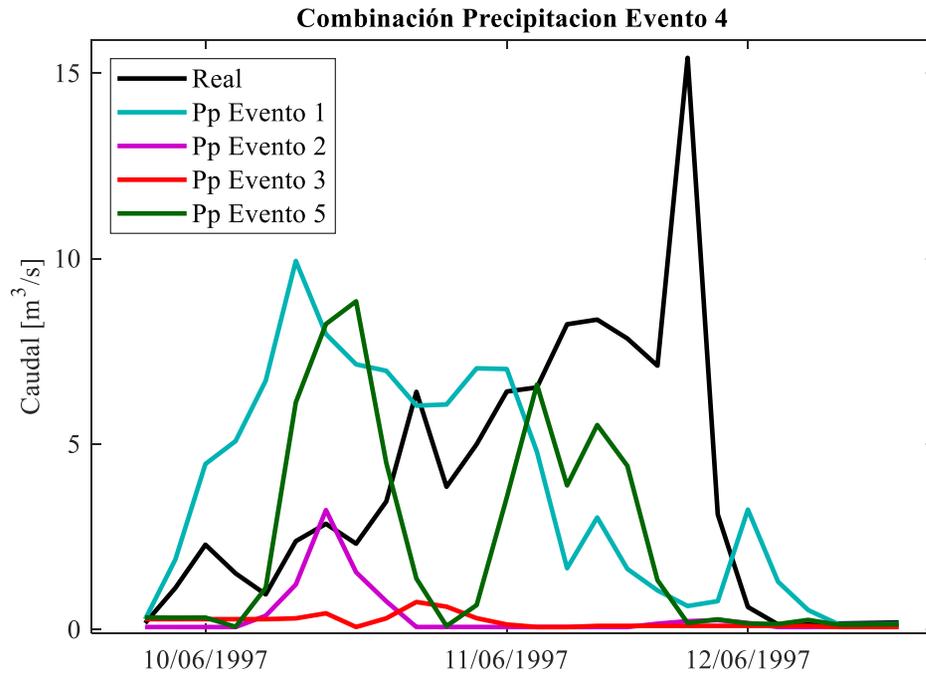


Figura 5-10: Combinación de precipitación para el evento 4

Para el caso de combinación de las precipitaciones para el evento 4 las magnitudes de los caudales simulados son similares a los obtenidos para cada evento seleccionado.

La Figura 5-11 presenta la combinación de precipitación con los otros eventos seleccionados para el evento 5.

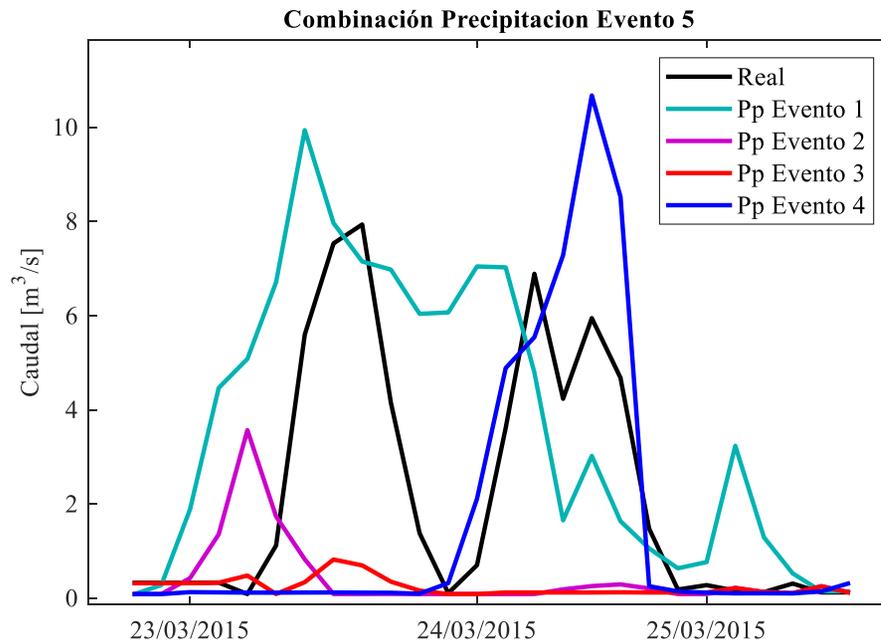


Figura 5-11: Combinación de precipitación para el evento 5

Para el caso de la combinación de la precipitación de los eventos seleccionados con el evento 5 se puede observar que las magnitudes de los caudales simulados son similares a los obtenidos para cada evento seleccionado sin embargo el evento 5 con la precipitación del evento 3 disminuye en magnitud respecto al evento 3 original.

Modificación de la condición de humedad antecedente de los eventos seleccionados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos producto de la modificación de la condición de humedad antecedente para cada evento seleccionado. Cabe destacar que la condición de humedad antecedente para cada evento es nula a excepción del evento 3 el cual contaba con una condición de humedad antecedente media-baja, la cual se determinó partir de los datos observados de precipitación de los días previos al evento .

La Figura 5-12 presenta la modificación de la condición de humedad, a nivel alto, para el evento 1.

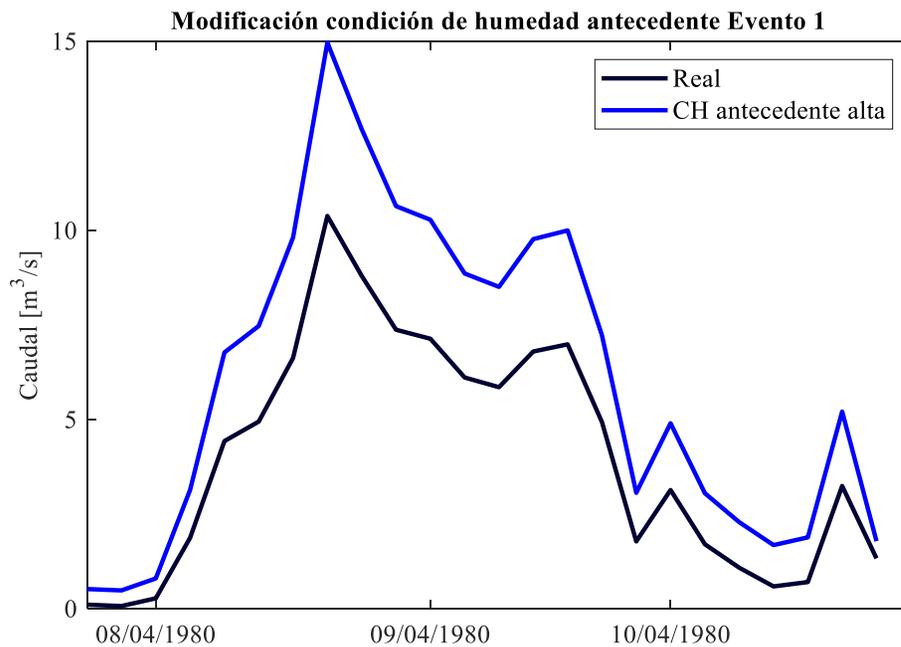


Figura 5-12: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento 1

Los resultados obtenidos para la modificación de condición de humedad antecedente del evento 1 se puede observar como al aplicar una precipitación ficticia en los días previos a la tormenta caracterizada se provoca un aumento del caudal debido a la saturación del suelo por la precipitación ficticia.

La Figura 5-13 presenta la modificación de la condición de humedad, a nivel alto, para el evento 2.

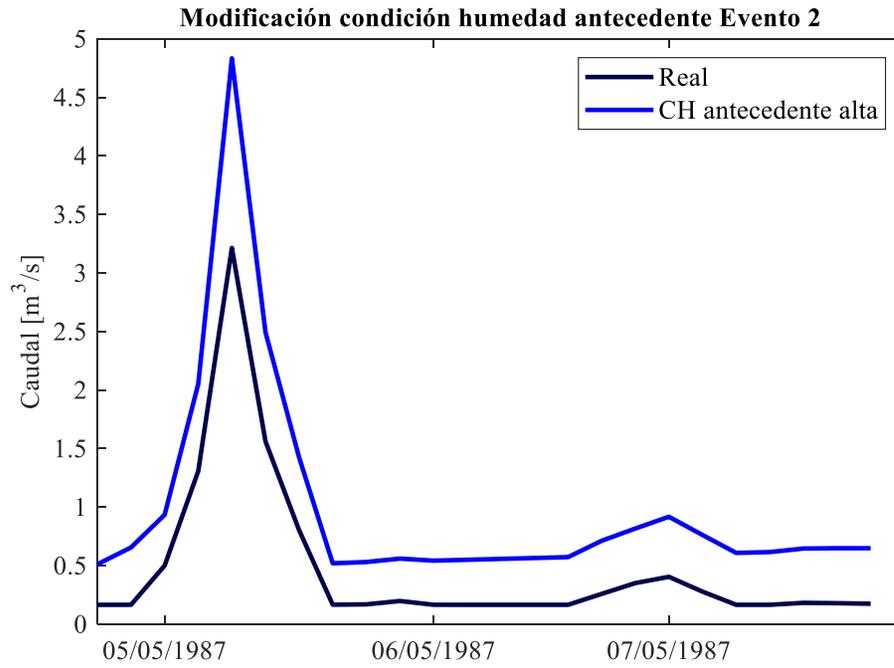


Figura 5-13: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento 2

Al igual que para el evento 1 la precipitación ficticia provoca un aumento en el caudal obtenido, siendo más significativo en el peak del hidrograma del caso con humedad antecedente alta para el evento 2.

La Figura 5-14 presenta la modificación de la condición de humedad, a nivel alto, para el evento 3.

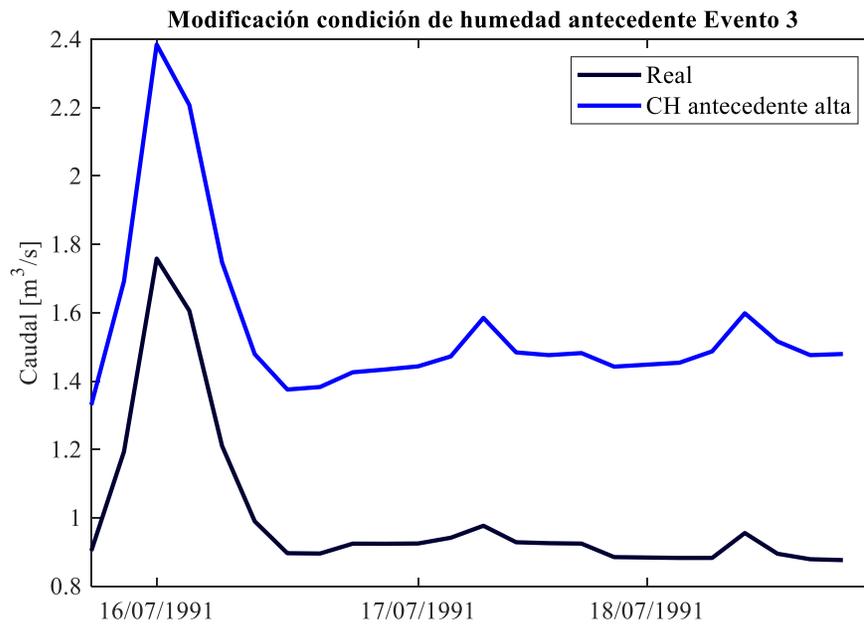


Figura 5-14: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento 3

Para el caso de la modificación de la condición de humedad antecedente del evento 3, al ser un caudal bajo la modificación de la condición de humedad antecedente del suelo provocó un aumento relevante en el caudal simulado para el evento 3.

La Figura 5-15 presenta la modificación de la condición de humedad, a nivel alto, para el evento 4.

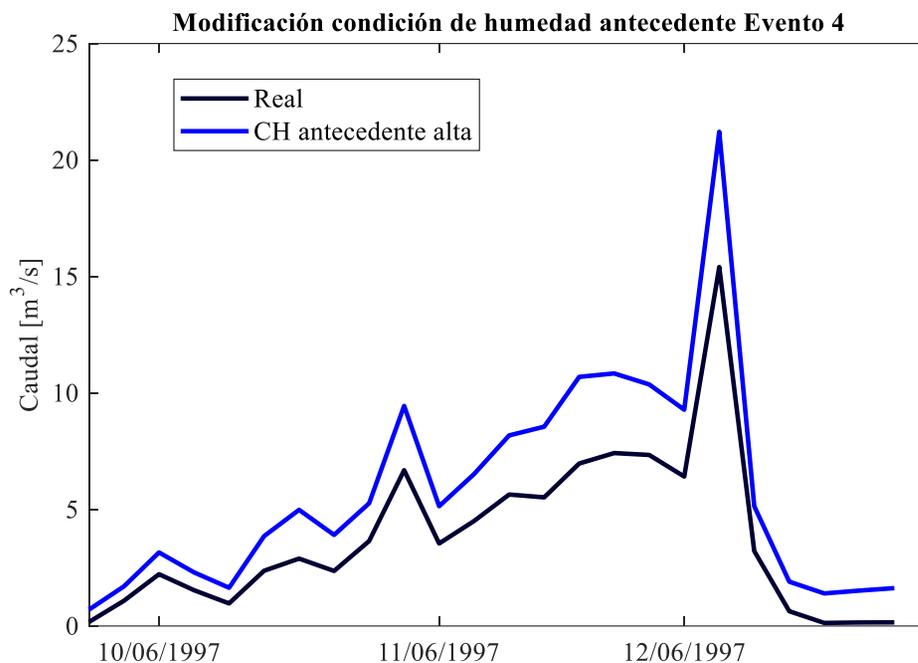


Figura 5-15: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto evento 4

Para la modificación de la condición de humedad antecedente del evento 4 se obtuvo que si varía el caudal, aumentando su magnitud, sin embargo esta variación no es tan significativa como para otros eventos.

La Figura 5-16 presenta la modificación de la condición de humedad, a nivel alto, para el evento 5.

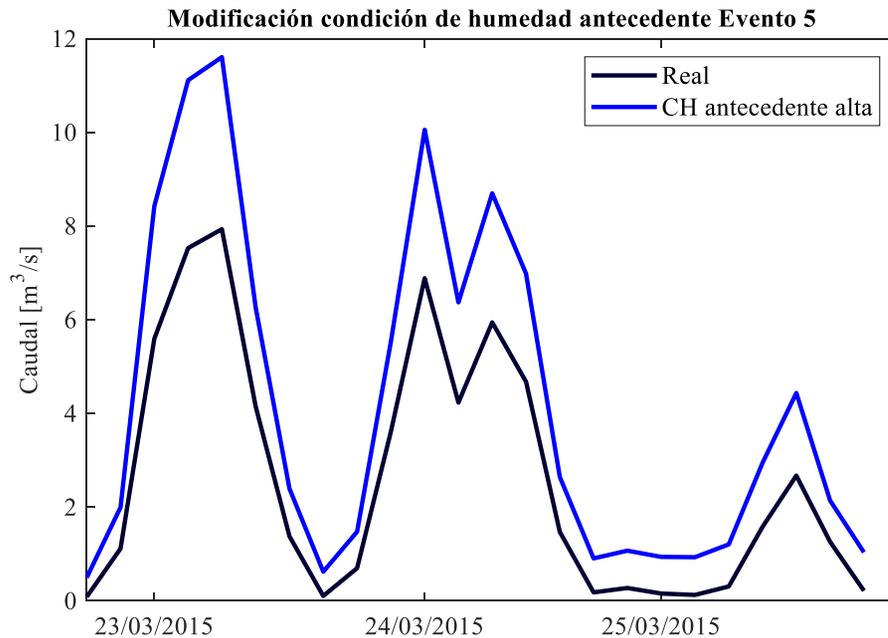


Figura 5-16: Modificación de la humedad antecedente a nivel alto para el evento 5

Para el evento 5 la precipitación ficticia provoca un aumento en el caudal obtenido, donde se hace más notorio es en los peaks del hidrograma del caso con humedad antecedente alta para el evento 5.

Los experimentos realizados para la evaluación de la preponderancia de la temperatura, precipitación y condición de humedad antecedente en la ocurrencia de una crecida son de suma importancia para analizar como estas variables antes mencionadas se verán afectadas por las proyecciones del cambio climático lo cual que analizará en el siguiente subcapítulo.

5.3. Escenario futuro Cambio Climático

Para el análisis del escenario futuro con las proyecciones de cambio climático, se utilizaron dos métodos distintos de escalamiento. El método QDM empleado por el proyecto del balance hídrico (DGA, 2018) y el realizado en la presente memoria método AR. El resultado del escalamiento de las forzantes utilizando el método AR se presenta en el Anexo C.

A continuación se presentan los gráficos de la precipitación mayor a 10 mm y la temperatura asociada a dicha precipitación para el periodo de estudio 2030 al 2060. La distribución de las proyecciones climáticas se analizan a partir de un boxplot (Figura 5-17), por tanto la visualización de la distribución de cada variable está dada por los cuartiles, en donde el cuadro central muestra el 50 % de la probabilidad de ocurrencia y los extremos del cuadro representan el 25 y el 75% de ocurrencia, los extremos (mínimo y máximo) están representados por el fin inferior y superior de los bigotes y por último los valores atípicos que están simbolizados por círculos.

Los resultados en rojo corresponden a lo obtenido por medio del método de escalamiento QDM para los cuatro GCM utilizados, el color azul corresponde al método de escalamiento AR y por último, el negro corresponde a los valores obtenidos para línea base (1979-2015).

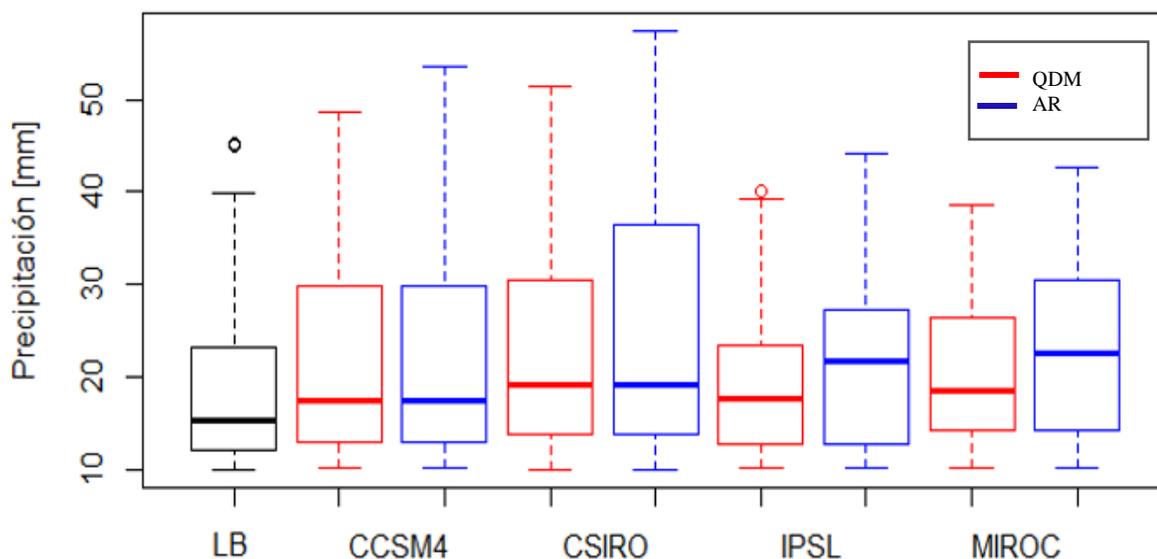


Figura 5-17: Boxplot para precipitación mayor a 10 mm para el periodo 2030 al 2060, escenario RCP8.5.

De la Figura 5-17 se puede observar como la ocurrencia media de los eventos de precipitación mayor a (10 mm) aumentan para los cuatro GMCs, en menor proporción para el modelo IPSL, también se puede apreciar como los modelos proyectan precipitaciones máximas significativamente más altas que en periodo base. Con respecto a la diferencia de los resultados obtenidos respecto a los métodos de escalamiento utilizados, la media de entre ambos escalamientos se mantiene sin embargo aumenta la dispersión de los valores, aumentando la magnitud de las precipitaciones máximas.

La Figura 5-18 presenta la temperatura asociada a los eventos de precipitación mayores a 10 (mm) para el periodo futuro (2030-2060) bajo el escenario RCP8.5.

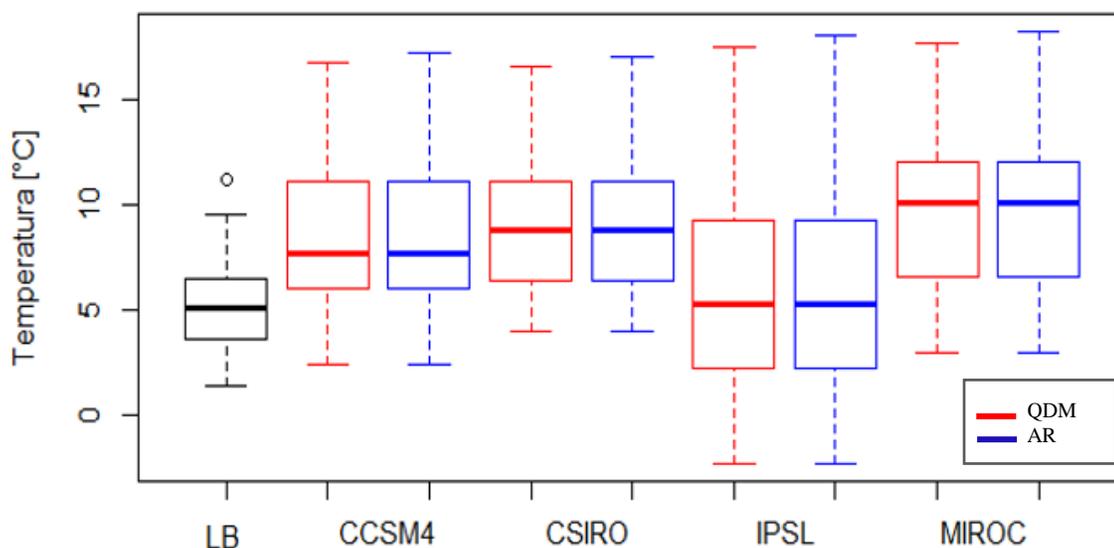


Figura 5-18 Boxplot para temperatura asociada a la precipitación mayor a 10 mm, para el periodo 2030 al 2060, escenario RCP8.5

Para la temperatura asociada a la ocurrencia de eventos con precipitación mayor a 10 mm se observa que la temperatura media aumenta con respecto a la línea base para los cuatro GCMs, sin embargo, el modelo IPSL prácticamente mantiene la media de los valores de temperatura, pero la dispersión de los valores extremos aumenta. Con respecto a los resultados obtenidos con los dos distintos métodos de escalamiento la variación es mínima para la temperatura.

Las Tablas 5-2 y 5-3 presentan el número de ocurrencia, para el periodo 2030-2060, de eventos con precipitación mayor a 10 (mm) y eventos con precipitación mayor a 10 (mm) con temperaturas mayores a 10 (°C).

Tabla 5-2: Número de ocurrencia de eventos con precipitación mayores a 10 (mm) bajo el escenario RCP8.5. Método de escalamiento QDM.

N° Ocurrencia	Método QDM				
	Línea Base	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Pp. > 10 mm	66	59	51	54	44
Pp. > 10 mm y T >10 °C	2	23	24	15	26

Tabla 5-3: Número de ocurrencia de eventos con precipitación mayores a 10 (mm) bajo el escenario RCP8.5. Método de escalamiento AR.

N° Ocurrencia	Método AR				
	Línea Base	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Pp. > 10 mm	71	60	51	54	48
Pp. > 10 mm y T >10 °C	4	24	23	17	28

De las Tablas 5-2 y 5-3 se puede observar que no aumenta la ocurrencia de los eventos con altas precipitaciones (10 mm), sino que para altas precipitación se proyecta que estén acompañada de altas temperaturas (10°C).

Con las forzantes ya escaladas se procede a simular el modelo hidrológico para el escenario futuro. A continuación, en la Figura 5-19 se presentan los resultados obtenidos para las simulaciones de caudal comparando el periodo histórico (1979-2015) y el futuro (203-2060) para cuatro modelos de circulación general (GCM).

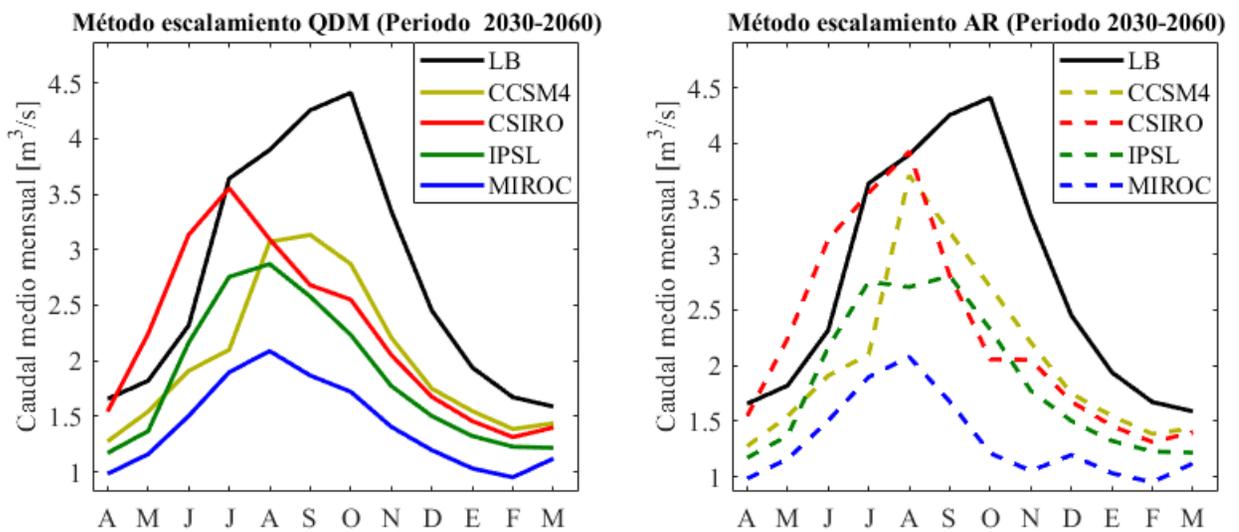


Figura 5-19: Caudal medio mensual para el periodo 2030 al 2060 para el método de escalamiento QDM, bajo el escenario RCP8.5. Línea base 1979-2015.

A partir del gráfico de caudales medios mensuales se puede observar como el caudal medio mensual disminuye para los cuatro GCMs, siendo el peor escenario el proyectado por el modelo MIROC, el cual presenta los más bajos caudales medios a lo largo de todo el año. También se puede apreciar como el máximo de las curvas para cada GCMs, con respecto a la línea base, se desplazan hacia los meses de invierno.

Con respecto a la diferencia de los resultados entre los obtenidos a partir de los dos métodos de escalamiento utilizados se aprecia una leve diferencia en los resultados obtenidos, donde se observa un leve aumento para el modelo CSIRO estas diferencias no son tan notorios ya que se está trabajando con valores medios mensuales.

La Figura 5-20 muestra la distribución de los caudales mayores a 30 m³/s para el periodo de análisis del 2030 al 2060 bajo el escenario RCP8.5.

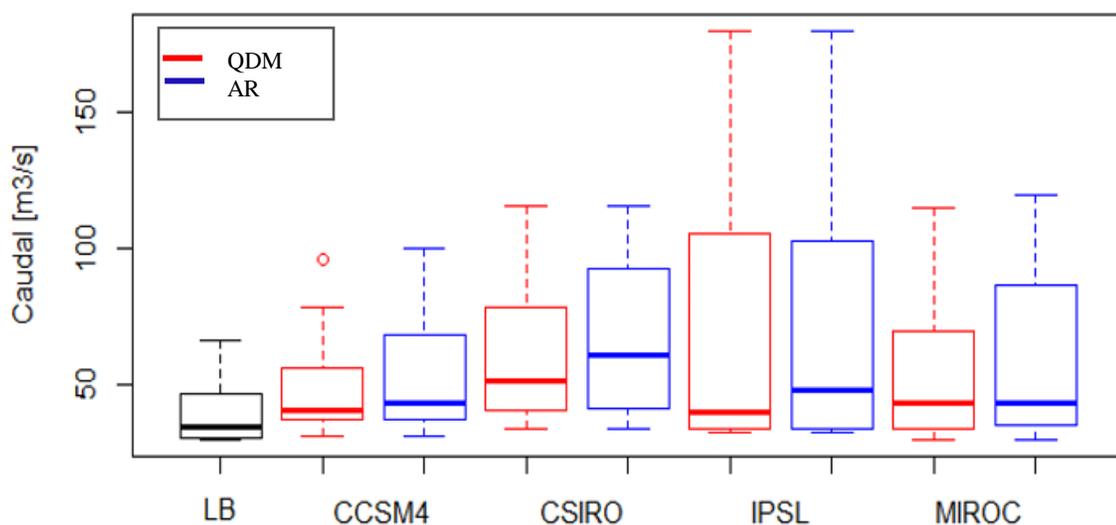


Figura 5-20: Caudal mayor a 30 m³/s para el periodo 2030 al 2060 bajo el escenario RCP8.5.

Respecto a la ocurrencia obtenida para los caudales mayores a 30 (m3/s) por los GCMs se puede observar que la media de los valores crece y el GCM que proyecta un mayor aumento en la media de los resultados es el CSIRO, sin embargo el modelo IPSL proyecta que aumenta considerablemente la ocurrencia de caudales mayores al 75%.

Para los cuatro GCMs el método de escalamiento AR arroja como resultado un aumento pequeño en la media y un aumento más significativo en los caudales mayores al 75% de cada muestra en comparación al método de escalamiento QDM.

Las proyecciones del cambio climático, como se pudo observar de las Figuras 5-17, 5-18 y 5-20, dan como resultados un alza en las magnitudes máximas de precipitación y altas temperaturas en combinación con temperaturas más elevadas a las obtenidas para la línea base, lo que a su vez aumenta la cantidad de caudales mayores a 30 (m3/s).

Las Tablas 5-4 y 5-5 resumen las variaciones anuales para el periodo en estudio 2030-2060, se puede apreciar como ambos métodos de escalamiento y los cuatro GCMs proyectan un aumento anual cercano a 1.5°C, mientras que para la precipitación existe una mayor incertidumbre ya que dos modelos proyectan una leve disminución de la precipitación y los otros un leve aumento. Para la proyección futura del caudal se espera una disminución anual significativa cercana al 30%.

Tabla 5-4: Resumen variaciones anuales. Método QDM bajo el escenario RCP8.5

Δ Anual	Método QDM			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
T. (°C)	+1.49	+1.59	+1.49	+1.57
Pp. (%)	+4.68	-4.93	-4.04	+1.73
Q. (%)	-26.58	-19.1	-32.79	-48.72

Tabla 5-5: Resumen variaciones anuales. Método AR bajo el escenario RCP8.5

Δ Anual	Método AR			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
T. (°C)	+1.5	+1.6	+1.5	+1.54
Pp. (%)	+7.83	-5.15	-2.73	+1.26
Q. (%)	-24.92	-17.68	-32.31	-46.83

5.4. Actualización mapa de suelo con material no consolidado

A partir de las proyecciones climáticas de las variables meteorológicas se realizó una actualización del mapa de material no consolidado de la zona de estudio, considerando la altura de la línea de nieves igual a la altura de la isoterma cero por términos prácticos. También se identificaron las zonas con material no consolidado que podrían provocar flujo detrítico, lo cual fue intersectado con la variación de la isoterma cero entre el valor promedio para el período histórico y de las proyecciones del cambio climático.

La Tabla 5-6 muestra el promedio de la cota de la isoterma 0°C para precipitaciones diarias mayores a 0 (mm) para el periodo 2030 al 2060 para cada uno de las cuatro GCMs y la cota promedio entre los GCMs. El nivel de la isoterma 0°C para el periodo histórico es de 2660 m.s.n.m., también considerando el promedio del nivel de la isoterma 0°C para precipitaciones mayores a 0 (mm) entre los años 1979 al 2015.

Tabla 5-6: Nivel proyectado para la isoterma 0° promedio para el periodo 2030-2060, bajo el escenario RCP8.5.

	Isoterma 0° [m.s.n.m.]
CCSM4	2989.5
CSIRO	3014.9
IPSL	2999.5
MIROC	3000.2
Promedio	3001

Al existir poca diferencia en los niveles de las isotermas 0°C para los cuatro modelos se utilizará el valor promedio para ser presentado en el mapa de suelo.

La Figura 5-21 presenta el mapa de suelo con material no consolidado. Se puede apreciar como el material no consolidado de la cuenca, representado por color amarillo, se encuentra mayormente en las zonas bajas de la cuenca.

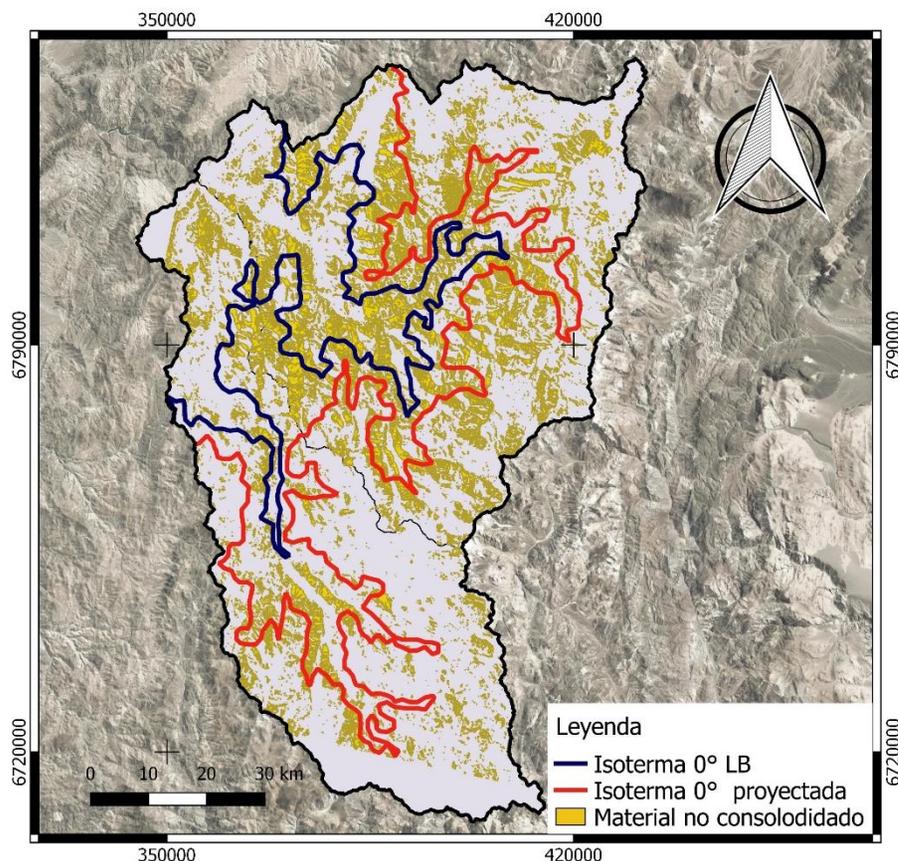


Figura 5-21: Mapa de material no consolidado zona de estudio

Del mapa de suelo con material no consolidado se aprecia como varía el nivel de la isoterma 0°C para la línea base y el periodo futuro, existe una variación cercana a los 400 m.s.n.m., lo que a su vez genera un aumento del área de material no consolidado presente en la cuenca de 98 (km²).

Capítulo 6 – Conclusiones y comentarios

6.1. Caracterización de eventos extremos

Para la caracterización de los eventos extremos históricos en la cuenca fue necesario recopilar la información disponible de las estaciones meteorológicas y pluviométricas, sin embargo, existe escasa información y poco consistente para todos los eventos caracterizados. También fue recurrente encontrarse con el colapso o caída de las estaciones en eventos extremos muy significativos, por lo que no se pudo contar la información real del evento extremo seleccionado.

Al no tener información concisa distribuida en la cuenca fue necesario utilizar los productos grillados del CR2MET los cuales nos entregaron más información de la distribución espacial de las variables climáticas como la precipitación y la temperatura de los eventos extremos históricos ocurridos en la zona de estudio.

Para los gráficos de la distribución de la temperatura se puede notar la poca diferencia de magnitudes entre los cinco eventos, los eventos 1, 3 y 5 presentan temperaturas mayores que a los eventos 2 y 4 cercanos a los 3°C. Mientras que para las figuras de la distribución de la precipitación se pueden observar más claramente las diferencias espaciales y en la magnitud de cada evento.

6.2. Modelación hidrológica VIC

Como se mencionó en la metodología, para la simulación hidrológica de la cuenca de los ríos Carmen y Tránsito fue necesario emplear una regionalización de los parámetros de la cuenca, ya que la zona de estudio se encuentra intervenida y no cuenta con la información necesaria para restituir caudales y naturalizar sus flujos. A pesar de esto, se realizó un análisis de los resultados obtenidos con los datos observados en la estación pluviométrica y se obtuvo KGE de 0,37.

A partir de los resultados obtenidos para la simulación del periodo 1979-2015 se puede observar como existe una sobreestimación de los caudales obtenidos por la modelación hidrológica en VIC, una de las posibles causas es que los caudales observados, al ser una cuenca intervenida, son menores a los caudales naturales propios de la cuenca debido a la extracción de agua para distintas actividades.

6.3. Experimentos combinación variables meteorológicas entre eventos

Los experimentos realizados a partir de combinación de las variables meteorológicas de cada evento, dio como resultado la baja influencia de la condición térmica del evento, sin embargo, se puede apreciar de las figuras de distribución espacial de la temperatura del evento, que la variación de temperatura entre los eventos es pequeña por lo que no se pudo cuantificar el real impacto de la temperatura en la generación de escorrentía. Como trabajo futuro queda realizar un análisis de sensibilidad para distintas variaciones de temperatura para cuantificar de mejor forma el impacto de la temperatura en el escurrimiento.

De los resultados obtenidos de la combinación de la precipitación entre los distintos eventos, se pudo apreciar como la precipitación es una variable de gran preponderancia en la

intensidad de tormenta ya que, al transponer la precipitación sobre el evento seleccionado, el hidrograma toma casi la forma y la magnitud del evento original.

De la condición de humedad antecede se puede desprender de los resultados que es una variable de suma importancia y podría marcar la diferencia en la ocurrencia de una tormenta, también de los resultados se puede observar como la baja condición de humedad de los eventos ocurridos en la zona de estudio es común para los eventos seleccionados, esto se debe a que la precipitación en la región es escasa por lo que tiende a acumularse en pocos días del año.

6.4. Incorporación proyecciones cambio climático

Para obtener las variables meteorológicas futuras se utilizaron cuatro GCMs los cuales se diferenciaban significativamente uno de otro, por ejemplo, el modelo IPSL es el que presenta menor diferencia entre las variables meteorológicas y la línea base, mientras que el modelo CSIRO es el que proyecta un mayor impacto en la precipitación y caudal proyectado.

También para la incorporación de las proyecciones del cambio climático se utilizaron dos métodos distintos de escalamiento de las variables, en la Figura 5-19 de caudales mensuales, se puede observar la poca diferencia de los resultados para ambos métodos, sin embargo, en la Figura 5-20, de valores diarios de caudal, se puede observar como aumenta la dispersión de los datos dependiendo del método de escalamiento.

Para el escalamiento de la precipitación se puede observar que los valores se mantienen relativamente constantes para ambos escalamientos, sin embargo, el método AR proyecta que los GCMs simulan valores de mayor magnitud pero conservando el promedio de la muestra de precipitación. La Figura 5-18, que proyecta la distribución de valores para la temperatura asociada a la precipitación mayor a 10 (mm), muestra que los métodos de escalamiento de los GCMs presentan pocas diferencias, esto se debe a que los valores de la temperatura son más constantes y oscilan en cierto rango fijo.

De los resultados de las proyecciones del cambio climático se obtuvo que las precipitaciones intensas estarán acompañadas de altas temperaturas, lo que implica una cota más alta para la isoterma cero y una mayor área pluvial aportante para eventos con precipitación intensa.

6.5. Actualización mapa de suelo de material no consolidado

Con respecto a la actualización del mapa de MNC de la cuenca se puede observar que, al aumentar la temperatura para el periodo 2030 al 2060 aumenta la altura de la cota de la isoterma cero por lo que aumenta el área pluvial aportante, es decir, zonas susceptibles que antes estaban cubiertas por nieve ahora sí podría activarse el material no consolidado en una tormenta, lo que se ve reflejado en el mapa con el aumento de zonas de suelo no consolidado producto de la variación de la isoterma.

Esta información es de suma importancia para la planificación territorial futura, ya que, a pesar de la baja población en la zona, si existen varios sectores en donde se desarrolla la agricultura y esta podría llegar a ser afectada por la ocurrencia de eventos extremos, por lo que es suma importancia adaptarse a las nuevas condiciones climáticas y prever los futuros eventos extremos que pueden tener un alto costo social y económico para la región.

Para ser más estrictos en la actualización del mapa se recomienda para trabajos futuros utilizar la altura de la línea de nieves ya que no suele coincidir la isoterma cero, ya que la nieve suele empezar a caer más abajo que la altura de la isoterma.

Como comentario final, para la cuenca de los ríos Tránsito y Carmen, los cuatro modelos de circulación general analizados proyectan, con alta seguridad, un aumento en las temperaturas medias. Para el caso de la precipitación, se proyecta, con un nivel de seguridad inferior, una baja moderada de los montos anuales. Estas tendencias en las variables meteorológicas tienen consecuencias a nivel anual, como la disminución de los caudales medios, y a nivel estacional, con la disminución y el adelantamiento de los caudales de deshielo, producto del descenso en la reserva nival y el alza de las temperaturas, respectivamente.

Bibliografía

Cabré, A. (2019). The geomorphological and sedimentological signature of extreme storm events in the southernmost Atacama Desert. The example of the March 2015 event. Tesis doctoral, Universidad Católica del Norte.

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.

CEPAL. (2012). La Economía del Cambio Climático en Chile.

Chow, V. T. (1994). Hidrología Aplicada.

Crowley, T., (2000). Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289, 270, DOI: 10.1126/science.289.5477.270.

DGA. (2004). Cuenca del río Huasco. Reporte técnico por CADEPE-IDEPE Consultores en Ingeniería.

DGA (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.

DGF., (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente.

Fredes, V. (2016). Evaluación estadística de factores generadores de flujo de detritos durante el evento del 24 de marzo de 2015 en la cuenca del valle del Huasco, comuna de Vallenar, III región. Memoria para optar al título de geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Gao, H. ; Tang, Q; Shi, X; Zhu, C; Bohn, T; Su, F; Sheffield, J; Pan, M; Lettenmaier, D; Wood, F. (2009). Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model Algorithm Theoretical Basis Document.

Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. and Martínez, G.F., (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), pp.80-91.

Hauser, A. (2000), Remociones en masa en Chile. SERNAGEOMIN, 89 p. (Boletín : n° 59).

IPCC. (2013). Summary for Policy Makers. In: *Climate Change 2013: The Physical Basis. Contribution of WG I to the AR5 of IPCC*.

Kidson, J.W. and Thompson, C.S., (1998). A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations. *Journal of Climate*, 11(4), pp.735-753.

Kling, H., Fuchs, M. and Paulin, M., (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424, pp.264-277.

Köppen W. (1948) *Climatología, con un estudio de los climas de la Tierra*. Fondo de Cultura Económica.

Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. and Burges, S.J., (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 99(D7), pp.14415-14428.

Marino, G. (2017). Impacto en el proceso de escalamiento de forzantes meteorológicas de modelos de circulación general en las estimaciones de recursos hídrico sen la cuenca de Andelién en la región del Bio-Bio. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Maurer, E., Hidalgo, G. (2008). Utility of dayly vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 12, 551–563.

Maurer, E. (2011). VIC Hydrology Model Training Workshop. Taller Centro de Cambio Global Pontificia Universidad Católica de Chile.

Meza, F.J. (2013). Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate extremes*.

Mosjos, S. (2017) Estudio geoquímico ambiental y mapa de riesgos de la cuenca del río Huasco, II región de Atacama. Memoria para optar al título de geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part IA discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp.282-290.

Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

Randall, D., Wood, R., Bony, S., Colman, R. (2007). *Climate Models and Their Evaluation*. In: *Climate Change 2007: The physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Sepúlveda, S.A., (1998). Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

SERNAGEOMIN, (2003). Mapa Geológico de Chile: Versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital.

Vano, J.A. & Lettenmaier, D.P. (2014). A sensitivity-based approach to evaluating future changes in Colorado River discharge. *Climatic Change*, 122(4), pp.621–634.

Vargas, X., McPhee, J., Vicuña, S., Meza, F., Daniele, L., Rondanelli, R., & Lagos, M. (2017). Actualización balance hídrico en Chile. Metodología y desafíos de modelación. XXIII Congreso SOCHID.

Vicuña, S., Maurer, E., Joyce, B., Dracup, J., Purkey, D. (2007). The sensitivity of California water resources to climate change scenarios. *Journal of the American Resources Association (JAWRA)* 43(2), 482–498.

Wood, A., Leung, L., Sridhar, V., Lettenmaier, D. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change* 62.

Glosario

Los siguientes términos se ocupan en el desarrollo del informe de esta Memoria como abreviaciones de algunas expresiones utilizadas reiterativamente:

- RCP: Trayectorias de concentraciones representativas
- ENSO: Niño-Oscilación del Sur
- PDO: Oscilación Decadal del Pacífico
- SAM: Modo Anular del Sur
- LB: Línea base.
- GCM: Modelo de Circulación general
- AR: Asynchronous Regression
- QDM: Quantile Delta Mapping
- CH: Condición de Humedad Antecedente
- ε : Elasticidad
- S: Sensibilidad
- MNC: Material No Consolidado

Anexo A – Análisis de frecuencia

Tabla A-1: Estimación de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones considerando distintos períodos de retorno .

Estación	Tipo distribución	Test χ^2	Test R^2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100
Santa Juana	Log-Pearson	0.16	0.99	34	46	60	64	77	91
Junta del Carmen	Log-Normal	0.21	0.99	35	48	62	66	82	99
San Félix	Log-Pearson	0.84	0.98	38	58	80	87	110	133
El Tránsito	Log-Normal	0.78	0.9	27	39	53	58	76	96
El Corral	Gumbel	0.17	0.98	35	43	52	54	63	71
El Parral	Log-Normal	0.22	0.91	33	50	69	76	100	128
Conay	Log-Normal	0.85	0.97	43	65	92	102	136	176

Tabla A-2: Estimación de precipitación máxima en 48 horas para las estaciones considerando distintos períodos de retorno .

Estación	Tipo distribución	Test χ^2	Test R^2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100
Santa Juana	Log-Pearson	0.87	0.99	39.1	59.8	81.3	88.3	110.3	132.2
Junta del Carmen	Log-Pearson	0.36	0.97	41.2	59.6	78.2	84.2	102.7	121.0
San Félix	Log-Pearson	0.35	0.95	47.1	72.9	100.9	110.3	140.5	171.9
El Tránsito	Log-Pearson	0.24	0.82	29.5	44.6	63.1	69.8	93.6	122.0
El Corral	Log-Normal	0.36	0.96	38.9	55.7	75.1	81.9	104.9	131.2
El Parral	Log-Normal	0.33	0.93	41.5	64.1	91.7	101.7	137.2	179.4
Conay	Log-Pearson	0.35	0.98	58.4	83.8	110.0	118.5	145.5	172.7

Tabla A-3: Estimación de precipitación máxima en 72 horas para las estaciones considerando distintos períodos de retorno .

Estación	Tipo distribución	Test χ^2	Test R^2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100
Santa Juana	Log-Pearson	0.69	0.97	41.8	64.0	87.5	95.3	119.9	144.8

Junta del Carmen	Log-Pearson	0.24	0.97	42.2	62.0	82.6	89.4	110.6	132.0
San Félix	Log-Pearson	0.92	0.96	47.9	74.8	104.7	114.8	147.9	182.8
El Tránsito	Log-Pearson	0.34	0.82	30.6	47.7	69.4	77.6	107.2	144.1
El Corral	Log-Normal	0.18	0.97	40.1	58.1	78.8	86.1	111.0	139.5
El Parral	Log-Normal	0.35	0.93	43.5	67.8	97.8	108.8	147.7	194.5
Conay	Log-Normal	0.68	0.98	60.8	92.0	129.7	143.3	190.7	246.6

Anexo B – Simulación en VIC y Regionalización

Cuencas que aportan a la construcción del modelo hidrológico para la cuenca del río Carmen y el río Tránsito.

Tabla B-1: Cuencas donadoras para la regionalización

Código	Nombre de la cuenca
1211001	Río Lluta en Panamericana
1310002	Río San José en Ausipar
2101001	Río Loa antes represa Lequena
3414001	Río Pulido en Vertedero
3421001	Río Manflas en vertedero
4400001	Estero Culebran en el Sifón
4503001	Río Hurtado en Angostura de Pangué
4513001	Río Grande en Cuyano
4515002	Río Mostazal en Caren
4522002	Río Rapel en junta
4531002	Río Cogoti entrada embalse Cogoti
4703002	Río Choapa en Cuncumen
5101001	Río Pedernal en Tejada
5721001	Estero Yerba loca antes junta San Francisco

Cada cuenca aportante a los parámetros regionalizados a la zona de estudio fueron previamente calibrados, y los parámetros a calibrar para cada cuenca se muestran a continuación.

Variable	Unidades	Rango	Descripción
b	N/A	]0,1]	Parámetro asociado a la curva de infiltración
Ds	fracción	]0,1]	Fracción del D _{smax} donde comienza el flujo base no lineal
D _{smax}	mm/día	]0,∞]	Velocidad máxima de flujo base
Ws	fracción	]0,1]	Fracción de humedad el suelo donde ocurre el flujo base no lineal
expt	N/A	]3, ∞]	Exponente en la ecuación de Cambell para conductividad hidráulica
h_1	m	]0,01, h_2]	Espesor de la primera capa de suelo
h_2	m	]0,∞*]	Espesor de la segunda capa de suelo
h_3	m	]0,∞*]	Espesor de la tercera capa de suelo
T_0	°C		Temperatura a la que la precipitación cae en forma sólida
snow_rough	m		Rugosidad de la superficie de la nieve
k_{sat}	Mm/día	]0, , ∞]	Conductividad hidráulica saturada

Figura B-1: Parámetros calibrados por el VIC

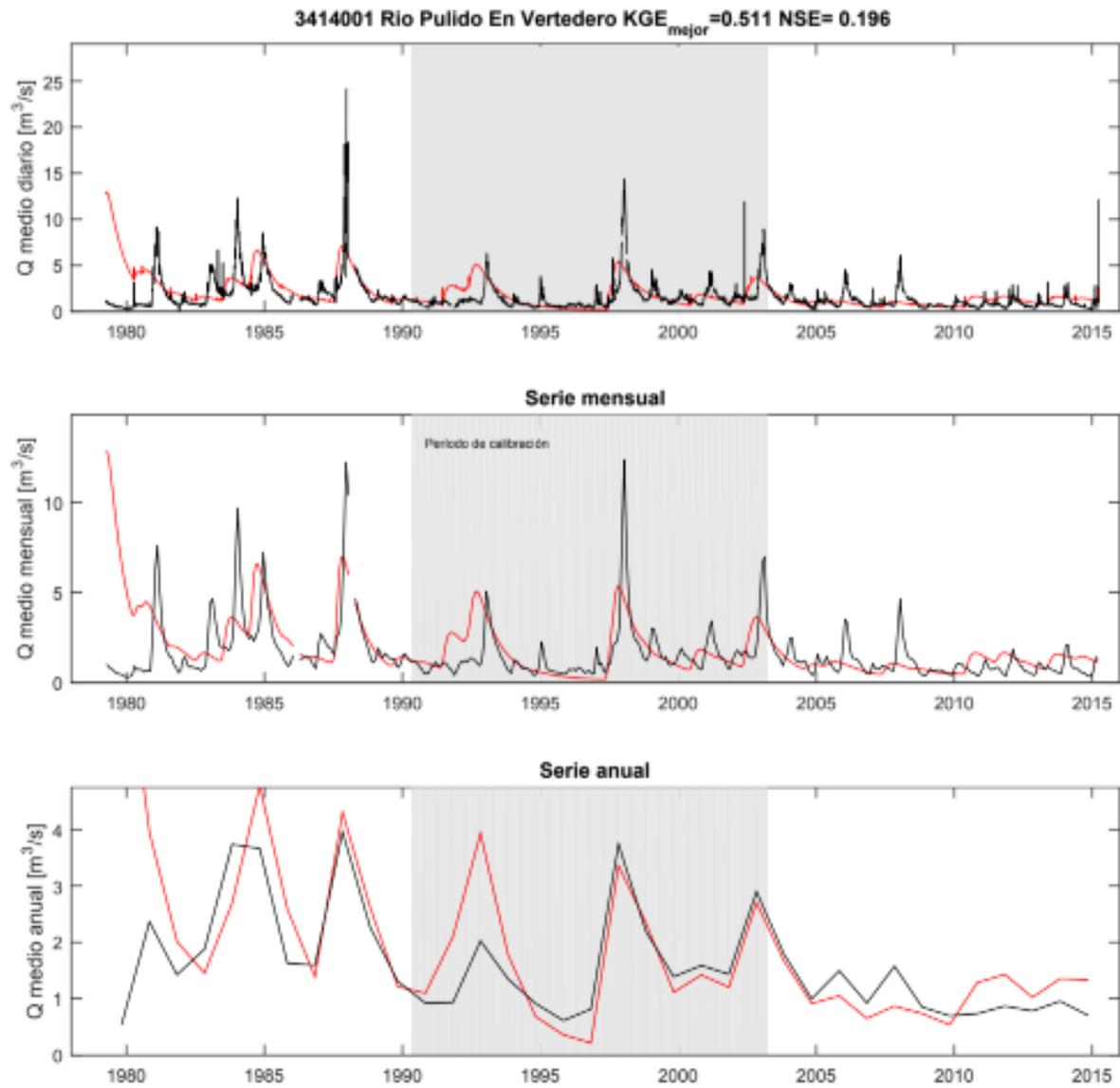


Figura B-2: Resultado calibración rio Pulido en Vertedero

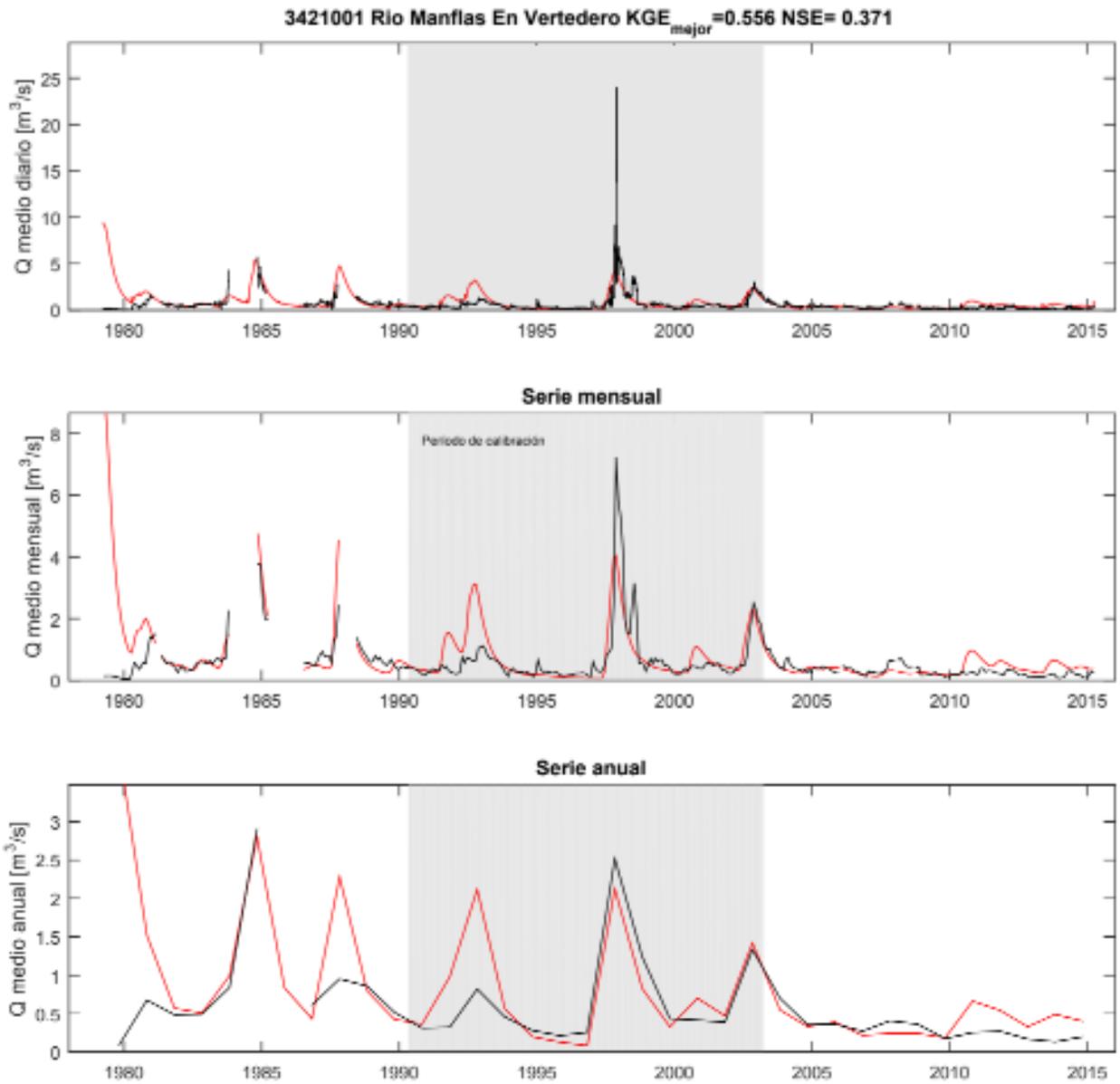


Figura B-3: Resultado calibración rio Manflas en Vertedero

Anexo C – Escalamiento AR

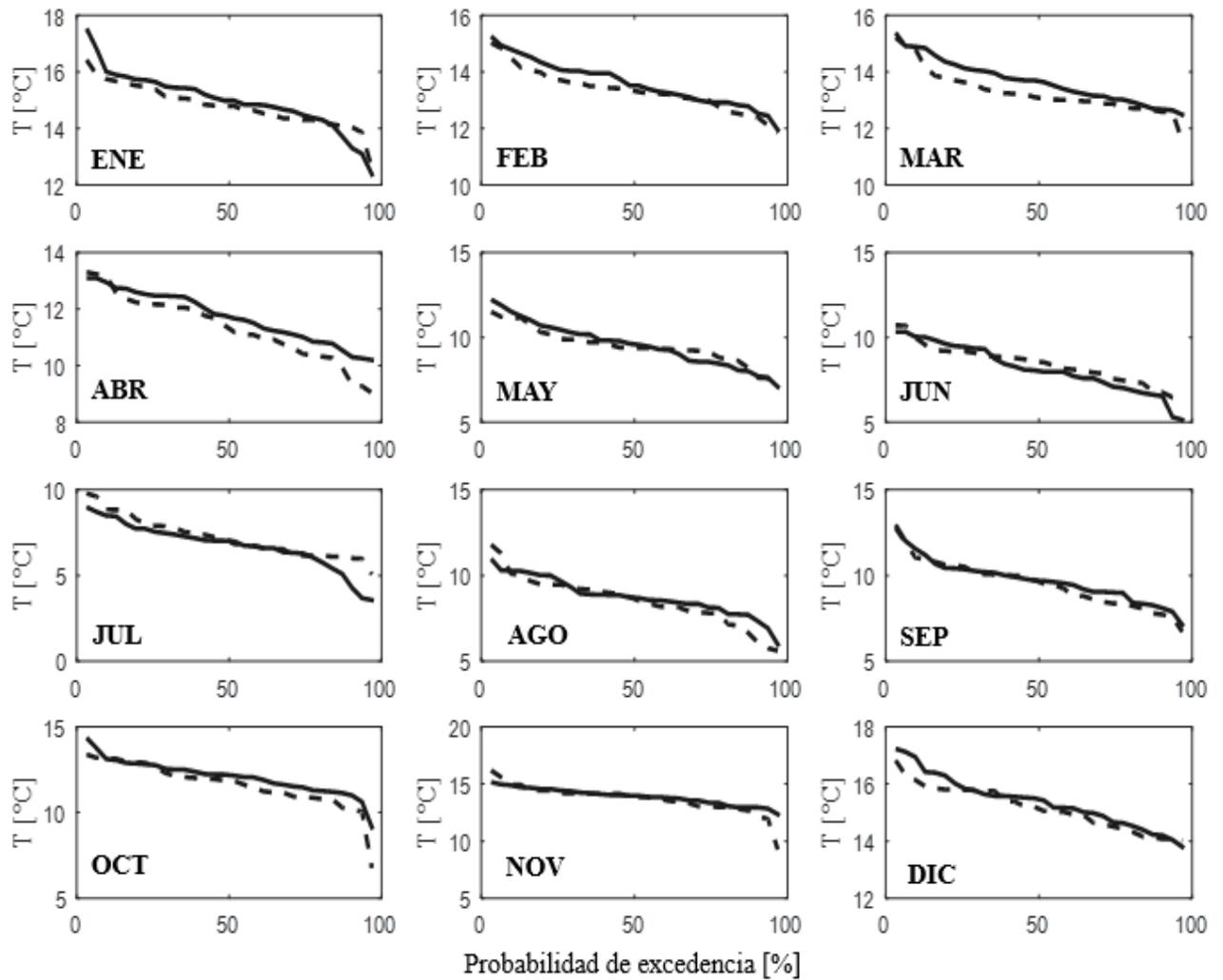


Figura C-1: Comparación de curvas de duración de temperatura . Corregida espacial y temporalmente. Modelo CCSM

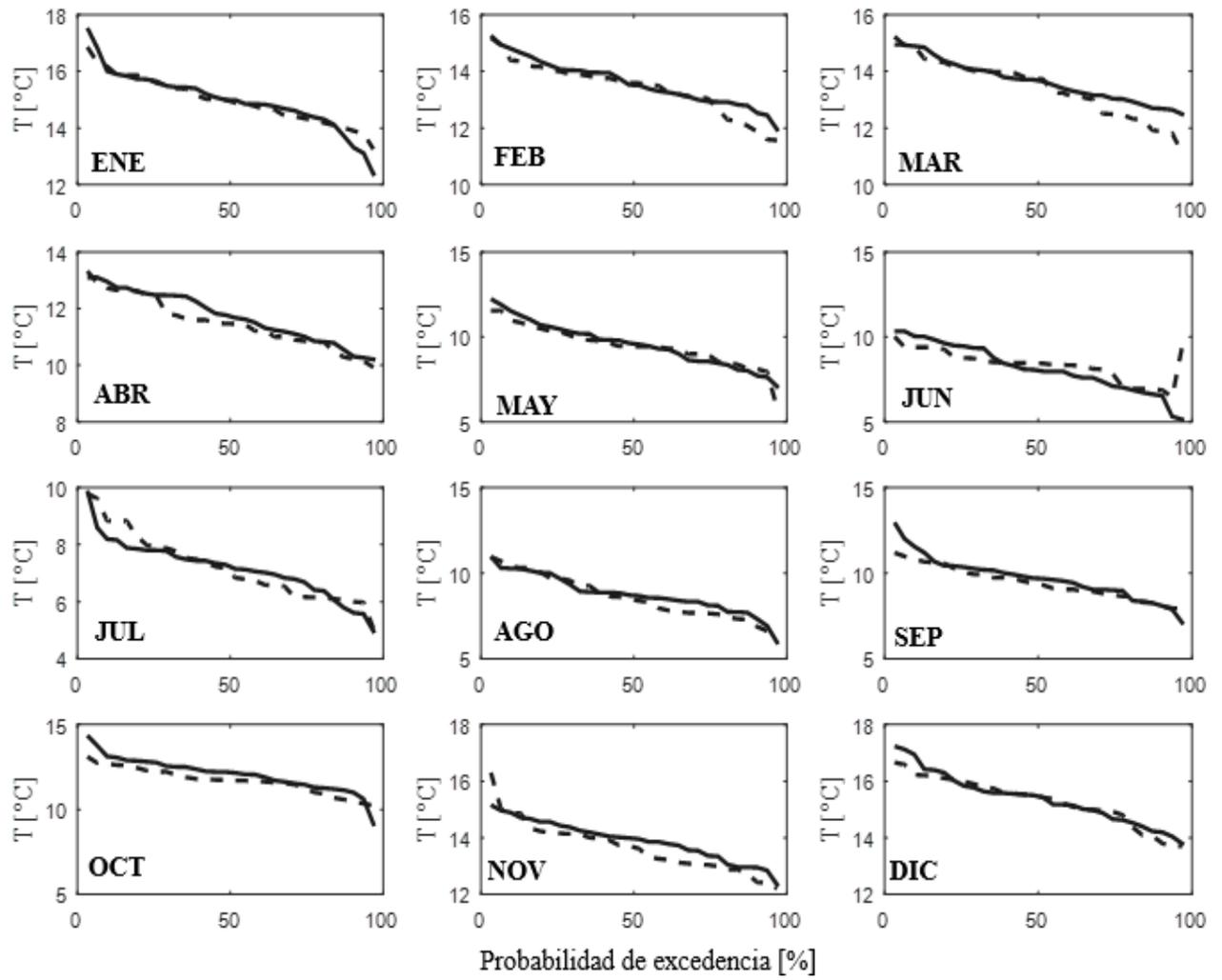


Figura C-2: Comparación de curvas de duración de temperatura. Corregida espacial y temporalmente. Modelo CSIRO

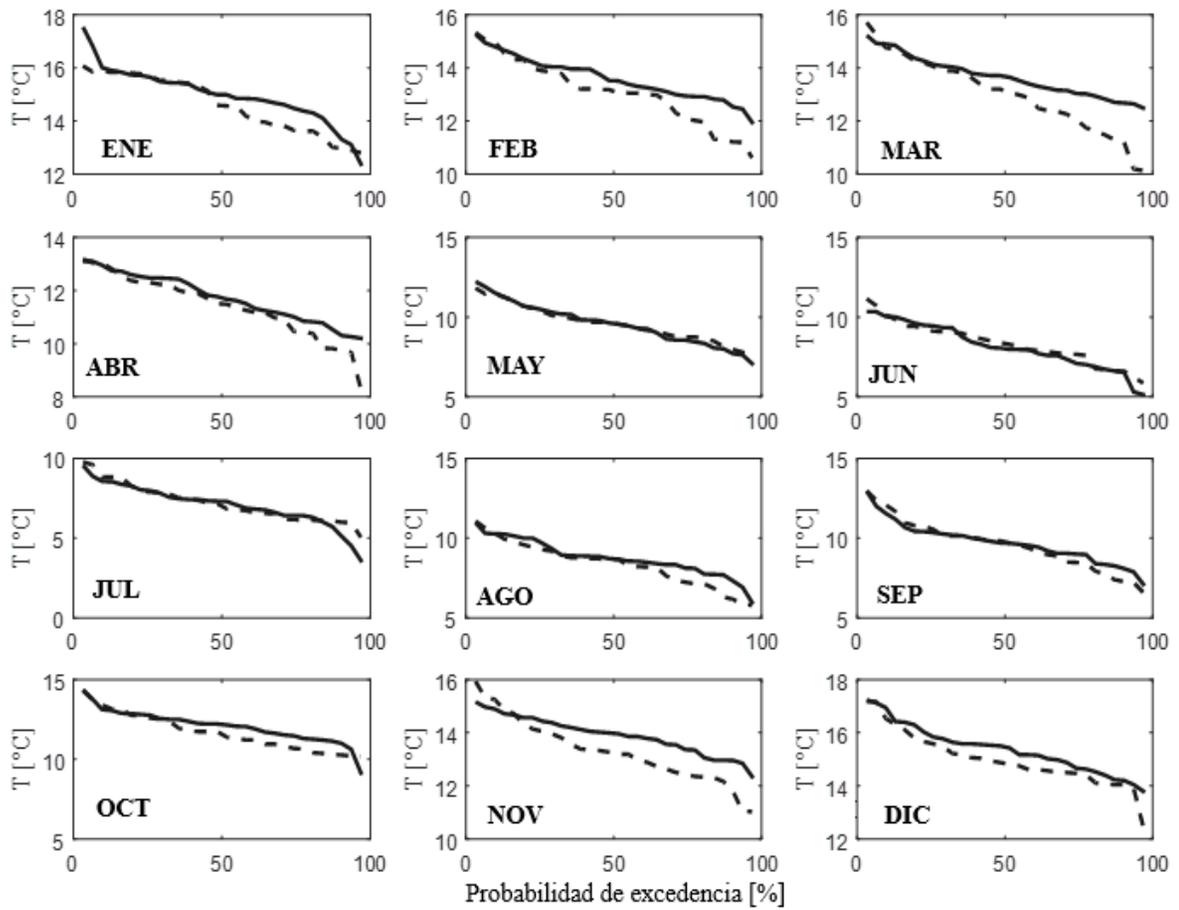


Figura C-3: Comparación de curvas de duración de temperatura. Corregida espacial y temporalmente. Modelo *IPSL*

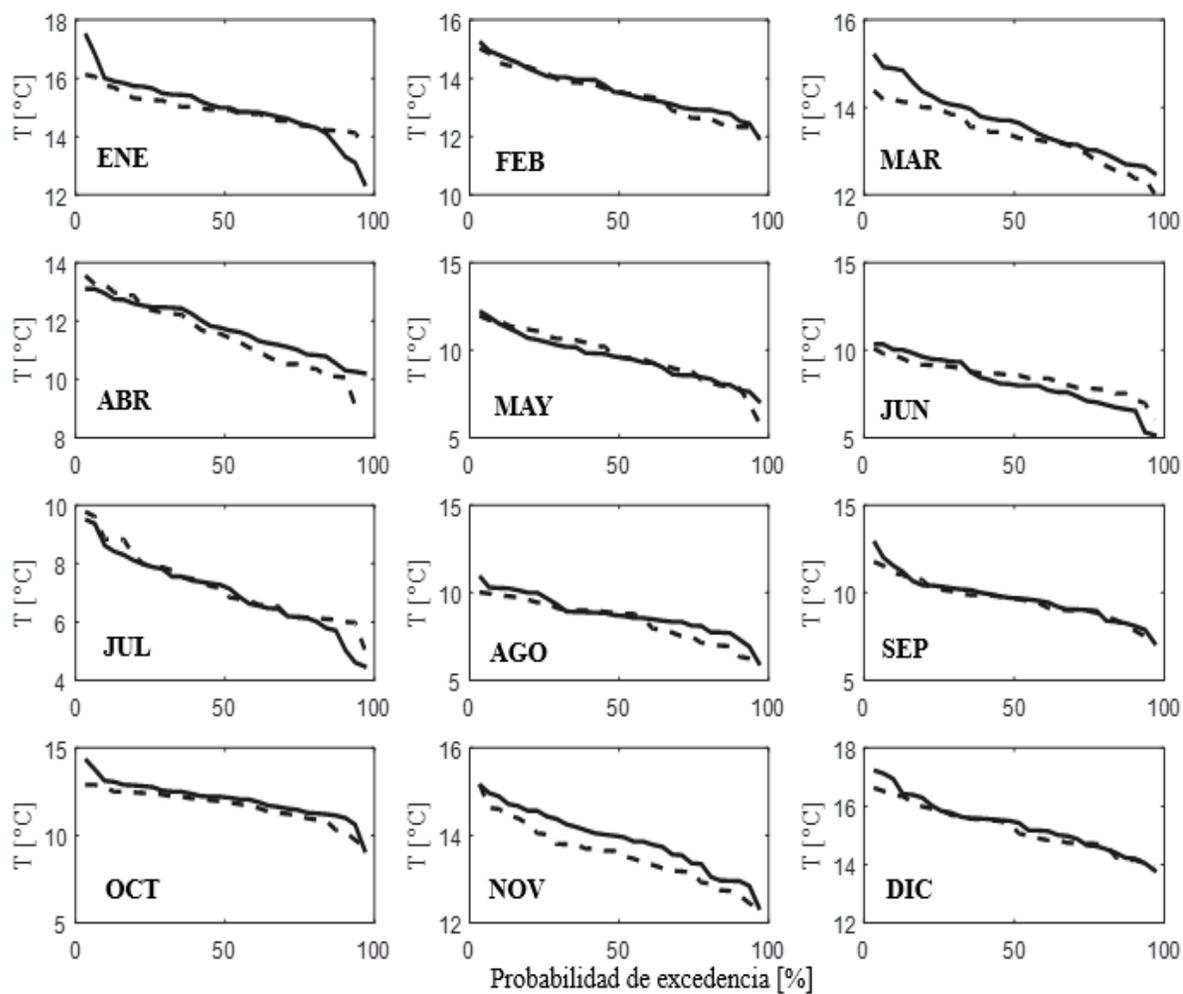


Figura C-4: Comparación de curvas de duración de temperatura. Corregida espacial y temporalmente. Modelo **MIROC**

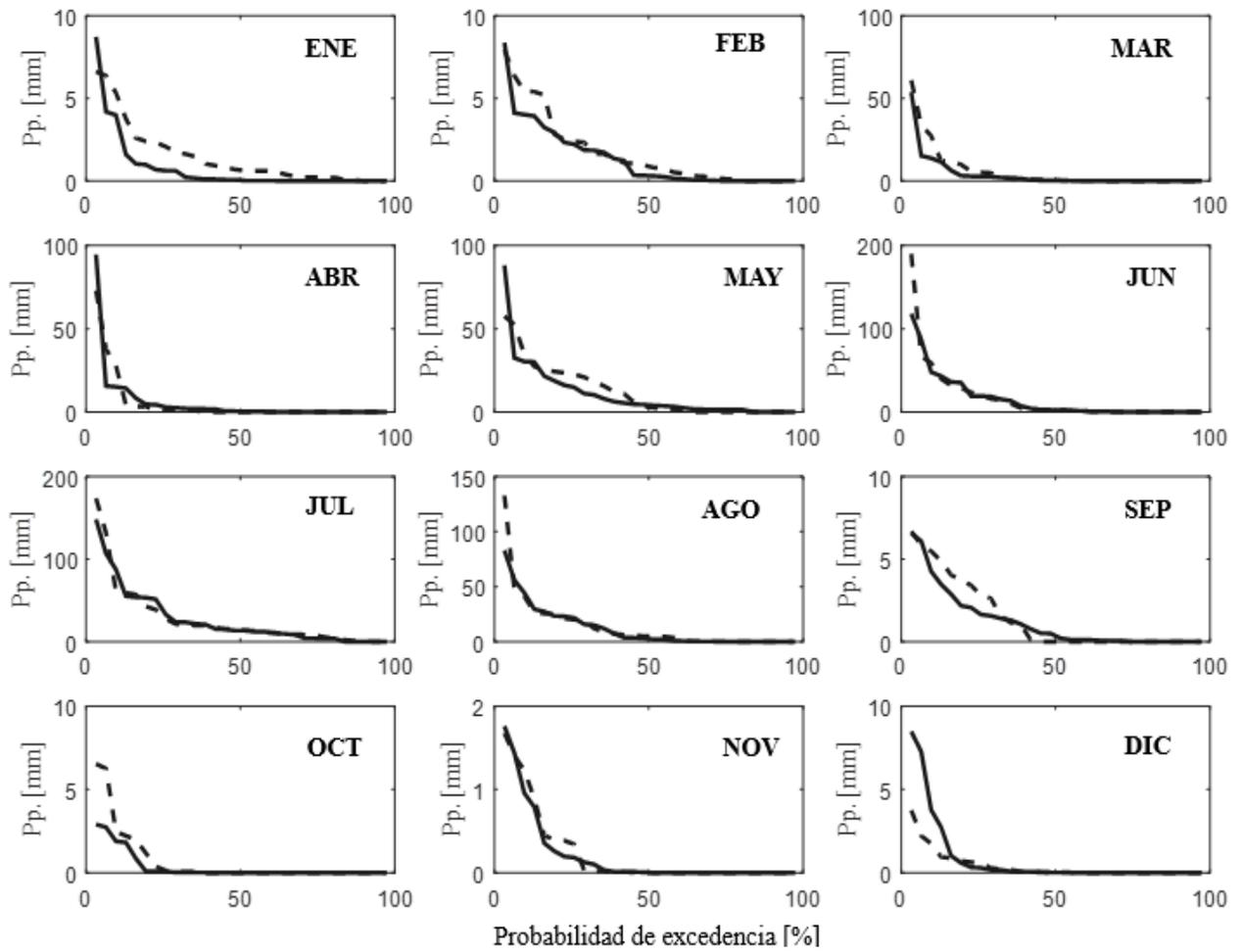


Figura C-5: Comparación de curvas de duración de precipitación. Corregida espacial y temporalmente. Modelo CCSM4

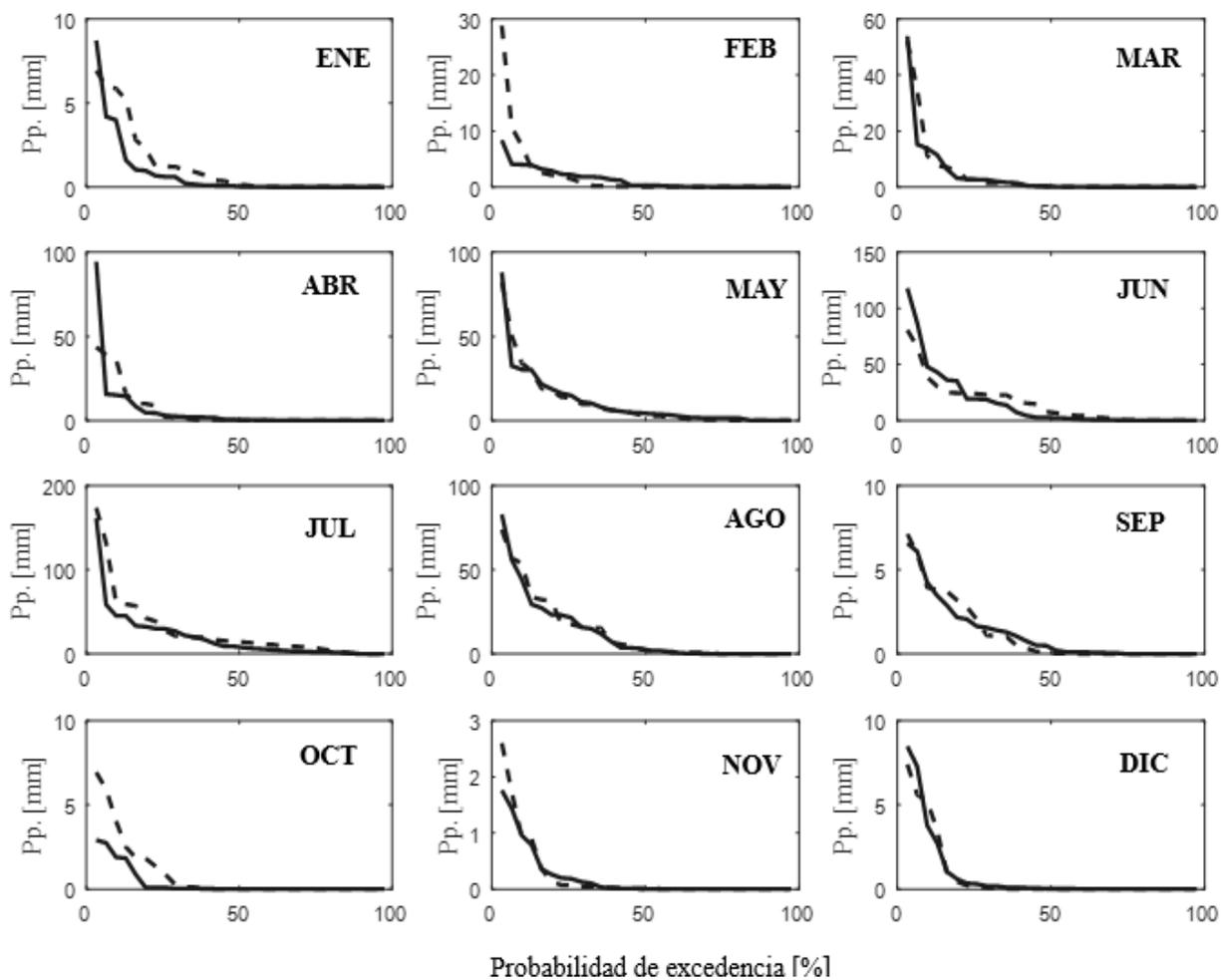


Figura C-6: Comparación de curvas de duración de precipitación. Corregida espacial y temporalmente. Modelo CSIRO

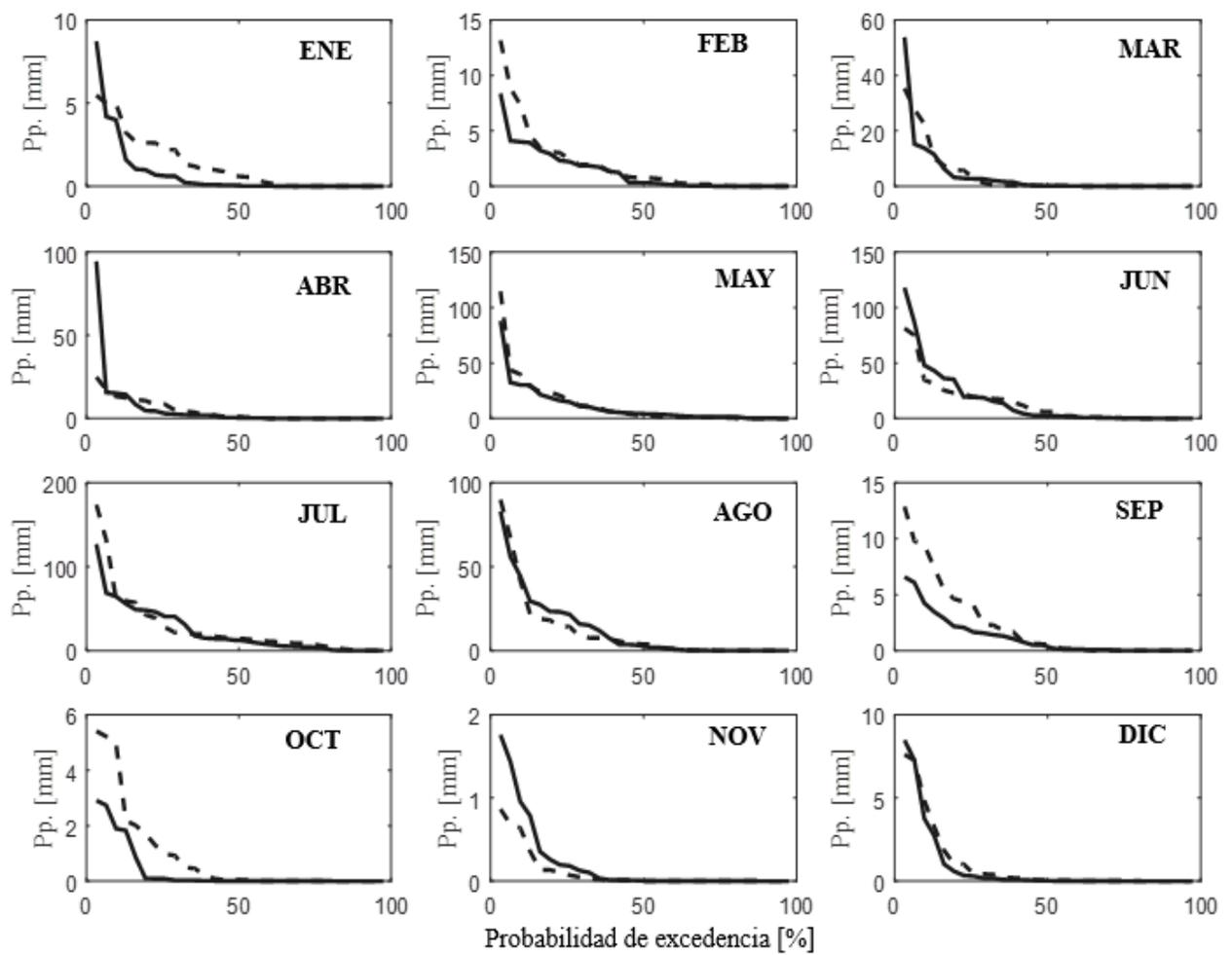


Figura C-7: Comparación de curvas de duración de precipitación. Corregida espacial y temporalmente. Modelo IPSL

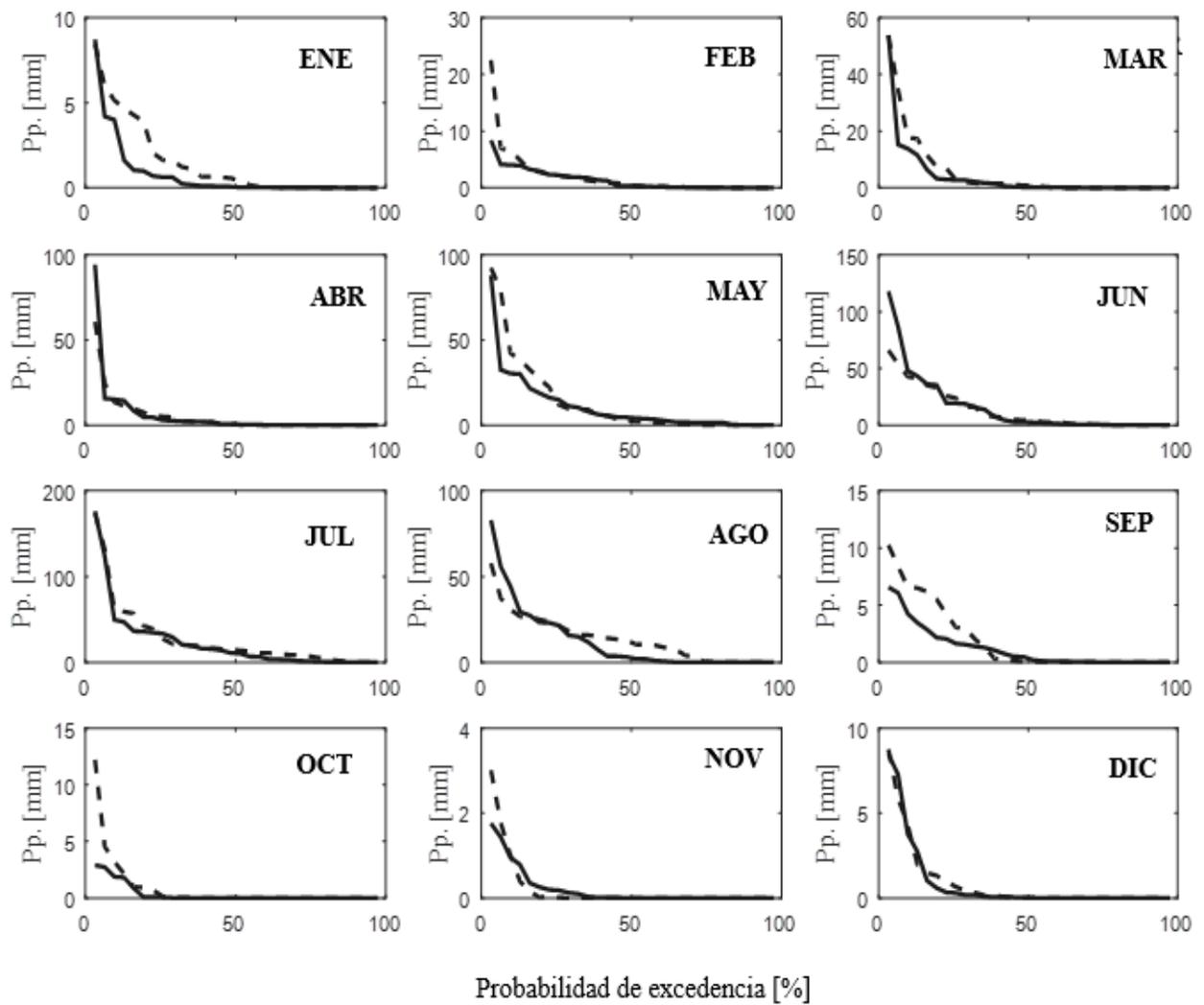


Figura C-8: Comparación de curvas de duración de precipitación. Corregida espacial y temporalmente. Modelo *MIROC*

Anexo D – Forzantes metrológicas escaladas

Resultados linea base (1979-2015)

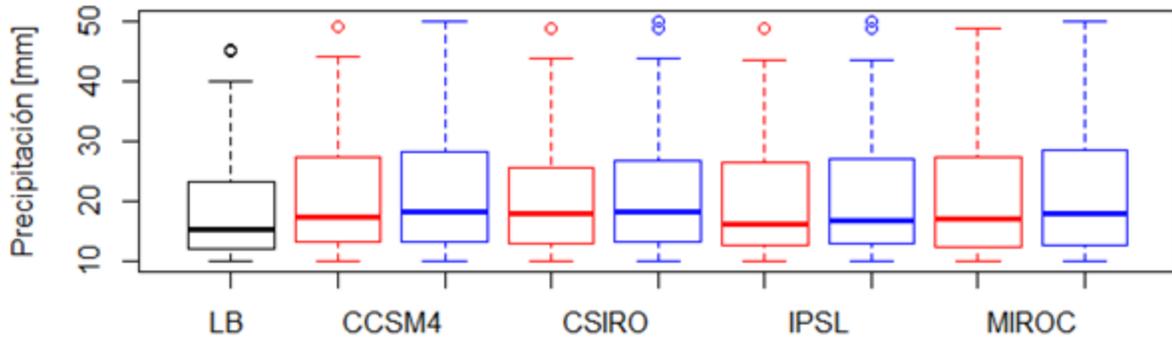


Figura D-1: Precipitación mayor a 10 mm para el periodo histórico.

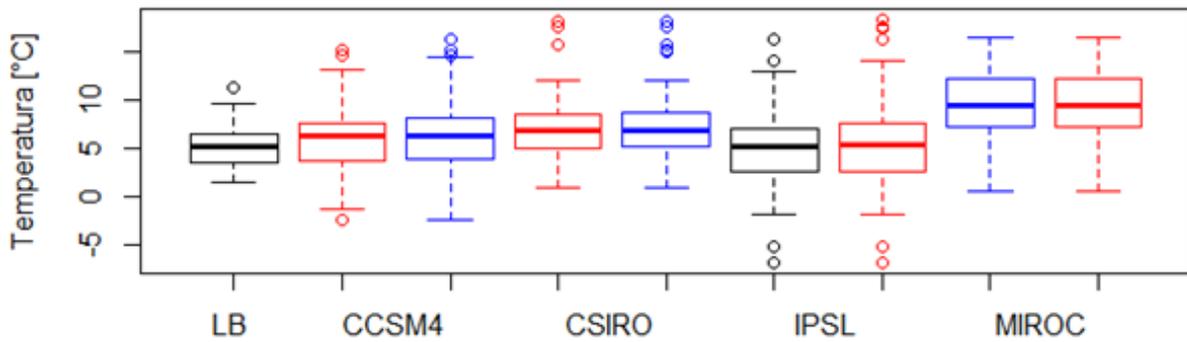


Figura D-2: Temperatura asociada a precipitación mayor a 10 mm para el periodo histórico.

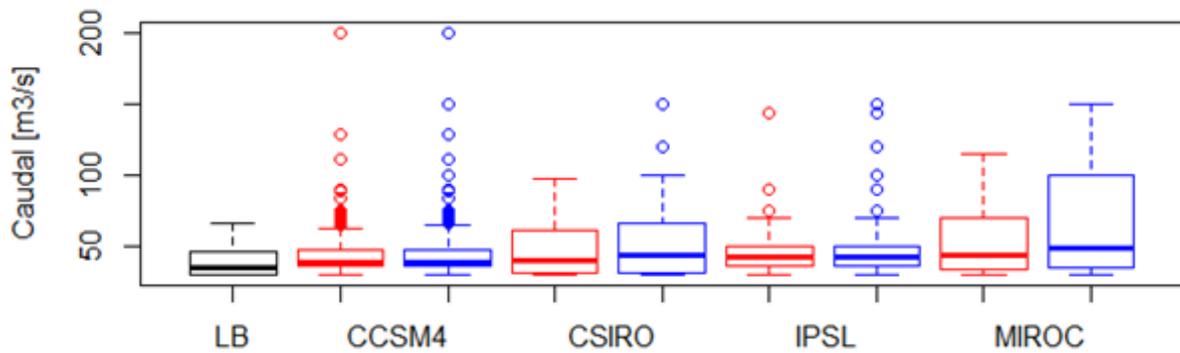


Figura D-3: Caudal mayor a 30 m³/s para el periodo histórico.

Resultados periodo futuro (2030-2060)

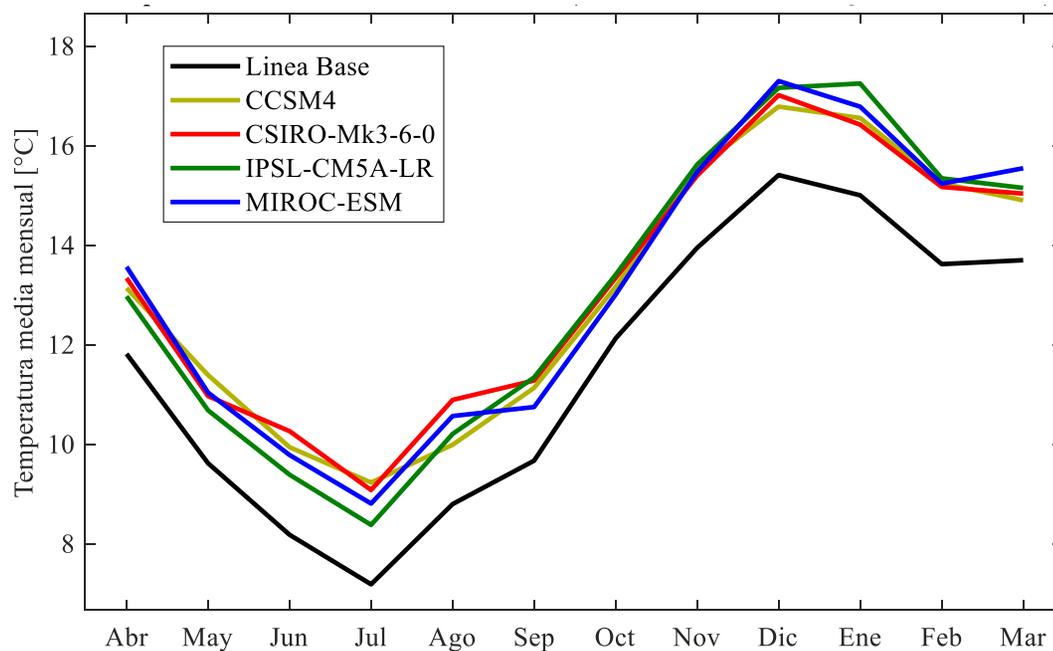


Figura D-4: Temperatura media mensual para el periodo 2030-2060. Método QDM

Tabla D-1: Variación temperatura media mensual para el periodo 2030-2060. Método QDM

	Variación Temperatura Método QDM			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
ABR	1.32	1.52	1.16	1.75
MAY	1.77	1.35	1.06	1.42
JUN	1.76	2.08	1.21	1.60
JUL	2.05	1.89	1.19	1.62
AGO	1.19	2.09	1.41	1.77
SEP	1.46	1.61	1.67	1.08
OCT	1.03	1.21	1.28	0.88
NOV	1.58	1.45	1.67	1.52
DIC	1.37	1.61	1.75	1.89
ENE	1.55	1.42	2.25	1.78
FEB	1.63	1.55	1.73	1.62
MAR	1.20	1.34	1.45	1.85
Δ Anual [°C]	+1.49	+1.59	+1.49	+1.57

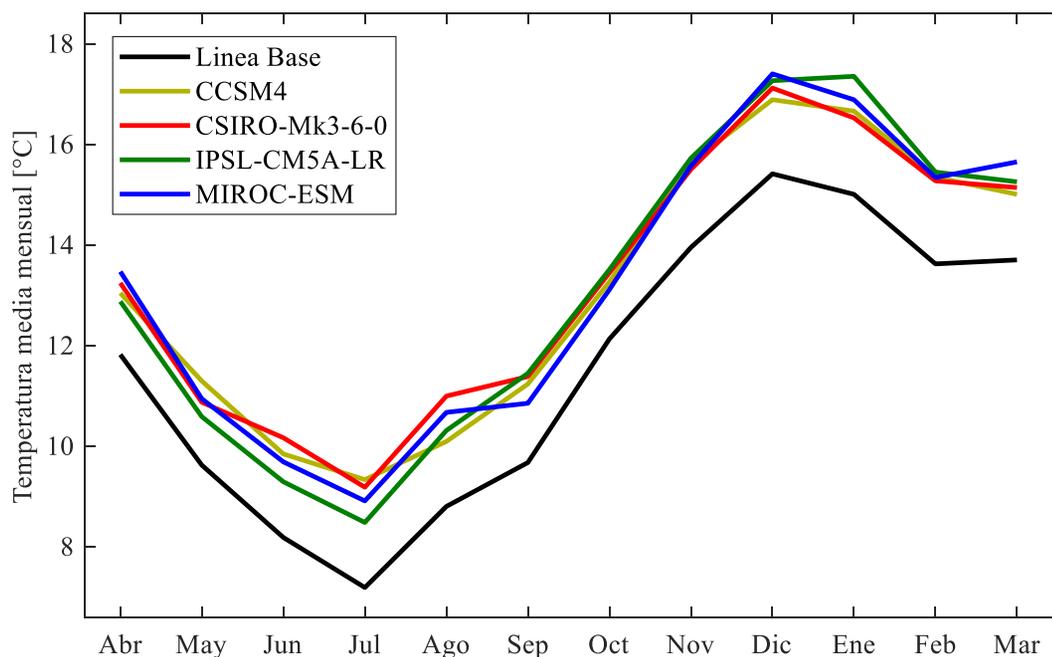


Figura D-5: Temperatura media mensual para el periodo 2030-2060. Método AR

Tabla D-2: Variación temperatura media mensual para el periodo 2030-2060. Método AR

	Variación temperatura Método AR			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
ABR	1.32	1.23	1.56	1.75
MAY	1.77	1.35	1.06	1.42
JUN	1.76	2.08	1.21	1.60
JUL	2.54	1.89	1.19	1.62
AGO	1.19	2.09	1.41	1.77
SEP	1.46	1.61	1.67	1.08
OCT	1.03	1.47	1.28	0.88
NOV	1.58	1.45	1.67	1.52
DIC	1.37	1.61	1.52	1.89
ENE	1.55	1.49	2.25	1.78
FEB	1.26	1.55	1.73	1.62
MAR	1.20	1.34	1.45	1.49
Δ Anual [°C]	+1.5	+1.6	+1.5	+1.54

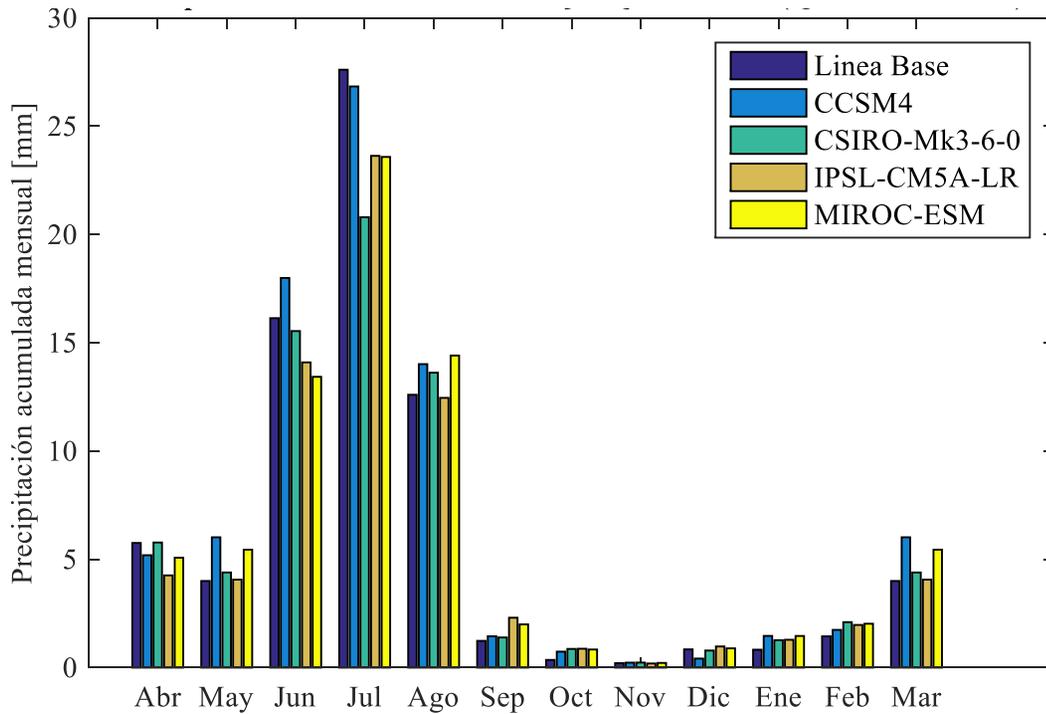


Figura D-6: Precipitación acumulada mensual para el periodo 2030-2060. Método QDM

Tabla D-3: Variación Precipitación acumulada mensual para el periodo 2030-2060. Método QDM

	Variación Precipitación Método QDM			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
ABR	-0.57	0.02	-1.50	-0.68
MAY	1.23	0.20	1.60	3.07
JUN	1.86	-0.60	-2.04	-2.71
JUL	-0.77	-6.81	-3.98	-4.03
AGO	1.42	1.02	-0.14	1.81
SEP	0.21	0.16	1.07	0.76
OCT	0.38	0.51	0.52	0.48
NOV	0.02	0.02	-0.02	0.01
DIC	-0.43	-0.05	0.13	0.05
ENE	0.64	0.44	0.46	0.63
FEB	0.30	0.65	0.52	0.58
MAR	2.02	0.39	0.06	1.45
Δ Anual [mm]	6.30	-4.04	-3.31	1.42
% Pp.	7.68	-4.93	-4.04	1.73

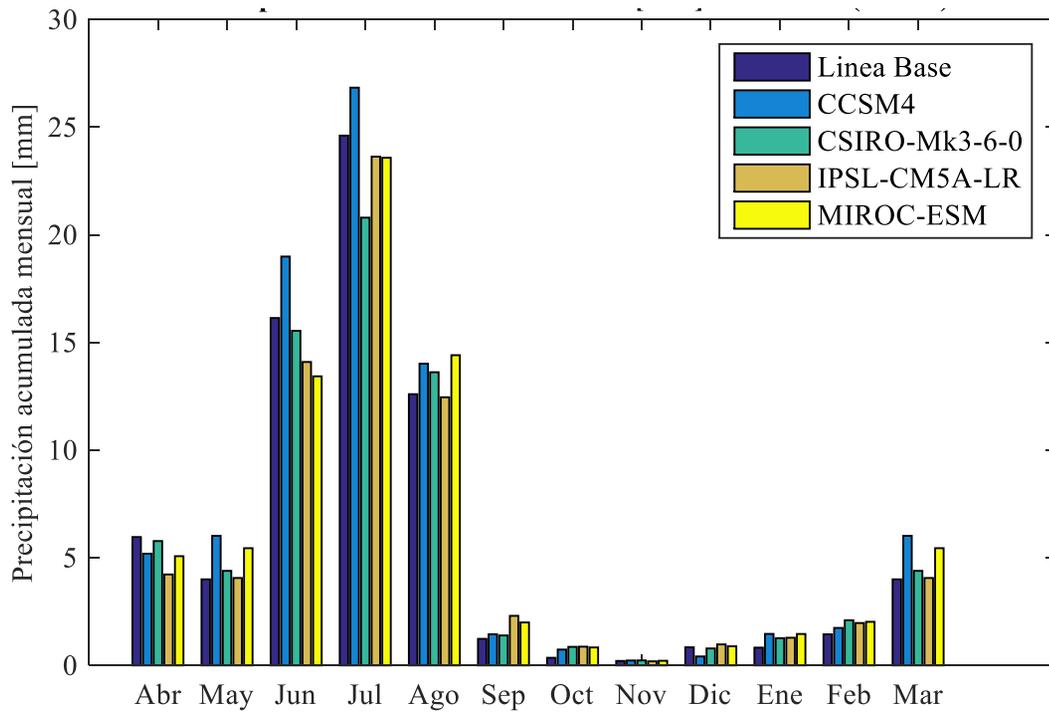


Figura D-7: Precipitación acumulada mensual para el periodo 2030-2060. Método AR

Tabla D-4: Variación Precipitación acumulada mensual para el periodo 2030-2060. Método AR

	Variación Precipitación Método AR			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
ABR	-0.51	0.02	-1.50	-0.68
MAY	1.23	0.20	1.76	3.07
JUN	1.86	-0.60	-2.04	-2.71
JUL	-0.73	-6.99	-3.10	-4.04
AGO	1.42	1.02	-0.14	1.81
SEP	0.21	0.16	1.07	0.76
OCT	0.38	0.51	0.52	0.48
NOV	0.04	0.02	-0.02	0.01
DIC	-0.43	-0.05	0.17	0.06
ENE	0.64	0.44	0.46	0.63
FEB	0.30	0.65	0.52	0.58
MAR	2.02	0.39	0.06	1.05
Δ Anual [mm]	6.42	-4.22	-2.24	1.03
% Pp.	7.83	-5.15	-2.73	1.26

Tabla D-5: Variación caudal mensual para el periodo 2030-2060. Método QDM

	Variación caudal Método QDM			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
ABR	-0.38	-0.11	-0.49	-0.67
MAY	-0.28	0.42	-0.45	-0.66
JUN	-0.41	0.82	-0.15	-0.81
JUL	-1.54	-0.09	-0.89	-1.74
AGO	-0.83	-0.81	-1.03	-1.81
SEP	-1.12	-1.57	-1.68	-2.39
OCT	-1.54	-1.86	-2.18	-2.69
NOV	-1.14	-1.30	-1.57	-1.94
DIC	-0.70	-0.78	-0.95	-1.26
ENE	-0.39	-0.48	-0.62	-0.91
FEB	-0.29	-0.36	-0.45	-0.72
MAR	-0.15	-0.19	-0.37	-0.47
Δ Anual [m ³ /s]	-8.77	-6.30	-10.82	-16.08
% Q	-26.58	-19.10	-32.79	-48.72

Tabla D-5: Variación caudal mensual para el periodo 2030-2060. Método AR

	Variación caudal Método AR			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
ABR	-0.38	-0.11	-0.49	-0.67
MAY	-0.28	0.42	-0.45	-0.66
JUN	-0.41	0.82	-0.15	-0.81
JUL	-1.54	-0.09	-0.89	-1.74
AGO	-0.19	0.03	-1.19	-1.20
SEP	-1.06	-1.45	-1.45	-2.58
OCT	-1.70	-2.36	-2.09	-3.00
NOV	-1.14	-1.30	-1.57	-2.20
DIC	-0.70	-0.78	-0.95	-1.26
ENE	-0.39	-0.48	-0.62	-0.80
FEB	-0.29	-0.36	-0.45	-0.72
MAR	-0.15	-0.19	-0.37	-0.46
Δ Anual [m ³ /s]	-8.22	-5.83	-10.66	-16.11
% Q	-24.92	-17.68	-32.31	-48.83