



# **Estudio para la incorporación de la variable Cambio Climático en el plan de reconstrucción**

Elaborado por:

Ximena Vargas Mesa  
Franco Ricchetti Campos  
Eduardo Muñoz Castro  
Catalina Jerez Toledo

30 de diciembre 2023  
Santiago de Chile

# Tabla de contenido

## Tabla de contenido

### Contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Contexto.....	1
1.2.	Objetivos y alcances.....	1
2.	Bases del cambio climático .....	3
2.1.	Introducción .....	3
2.2.	Análisis de Frecuencia (AF) .....	4
2.2.1	AF Estacionario .....	4
2.2.2	Concepto de no estacionariedad.....	6
2.2.3	Pruebas Estadísticas.....	8
2.3	Nociones generales de cambio climático.....	9
2.3.1	Variabilidad y Cambio Climático.....	9
2.4	Fases del Desarrollo de Cambio Climático: AR5 y AR6 .....	10
2.5	Variables y Escenarios de AR5.....	12
2.6	Evolución de modelos y escenarios de cambio climático.....	14
3	Propuesta metodológica para la incorporación del cambio climático en el diseño de obras hidráulicas .....	16
3.1	Definición de cuencas de estudio.....	16
3.2	Análisis de la información meteorológica disponible.....	16
3.2.1	Red observacional.....	16
3.2.2	Reanálisis atmosférico ERA5 y producto grillado CR2Met .....	18
3.2.3	Evaluación de CR2Met.....	19
3.3	Impacto del cambio climático en infraestructura vial .....	21
3.3.1	Determinación de la Amenaza.....	22
3.3.2	Determinación de la Exposición .....	22
3.3.3	Estimación de la Vulnerabilidad .....	22
3.3.4	Estimación del Riesgo .....	23
3.4	Metodología para la incorporación de cambio climático .....	23

3.4.1	Selección de GCMs según propósitos del estudio .....	23
3.4.2	Selección de escenarios climáticos .....	25
3.4.3	Selección de ventanas de cambio climático .....	27
3.4.4	Escalamiento espacial.....	27
3.4.5	Corrección de sesgo (escalamiento estadístico) usando MBCn .....	27
3.4.6	Verificación del proceso de corrección de sesgo.....	28
3.5	Estimación de la línea de nieves .....	28
3.6	Selección de modelo precipitación-escorrentía.....	29
3.6.1	Distribución temporal de precipitación .....	29
3.6.2	Determinación del tiempo de concentración .....	30
3.6.3	Coeficientes de duración (CD) .....	31
3.6.4	Precipitación máxima de duración D asociadas a diversos períodos de retorno T.....	32
3.6.5	Determinación de la lluvia efectiva .....	33
3.6.6	Relación Precipitación-Escorrentía .....	33
4	Cuencas de Estudio .....	35
4.1	Cuenca Puente Maitenhuapi.....	35
4.1.1	Delimitación de la Cuenca .....	36
4.1.2	Parámetros Geomorfológicos.....	36
4.1.3	Tiempo de Concentración.....	37
4.1.4	Cobertura de Suelo .....	38
4.1.5	Tipo de Suelo .....	39
4.1.6	Curva Número Representativa .....	39
4.2	Cuenca Puente Claro en Los Vientos.....	41
4.2.1	Delimitación de la Cuenca .....	42
4.2.2	Parámetros Geomorfológicos.....	42
4.2.3	Tiempo de Concentración.....	43
4.2.4	Cobertura de Suelo .....	44
4.2.5	Tipo de Suelo .....	45
4.2.6	Curva Número Representativa .....	45
4.3	Cuenca Puente Chupallar .....	47
4.3.1	Delimitación de la Cuenca .....	48
4.3.2	Parámetros Geomorfológicos.....	49
4.3.3	Tiempo de Concentración.....	49
4.3.4	Cobertura de Suelo .....	50
4.3.5	Tipo de Suelo .....	51
4.3.6	Curva Número Representativa .....	51

4.4	Cuenca Puente Putagán .....	53
4.4.1	Delimitación de la Cuenca .....	54
4.4.2	Parámetros Geomorfológicos.....	55
4.4.3	Tiempo de Concentración.....	55
4.4.4	Cobertura de Suelo .....	56
4.4.5	Tipo de Suelo .....	57
4.4.6	Curva Número Representativa .....	57
4.5	Línea de Nieves .....	59
4.5.1	Peña y Vidal-Escobar.....	59
4.5.2	Covian y Stowhas .....	59
4.5.3	Observatorio Andino .....	59
4.6	Patrones climáticos representativos del dominio.....	63
4.6.1	Evaluación del producto CR2Met .....	63
4.6.2	Coeficiente de duración por estaciones de referencia.....	65
4.6.3	Coeficiente de transferencia espacial (relación estación-cuenca) .....	66
4.7	Análisis de cambio climático .....	67
4.7.1	Elección de escenarios, GCMs y ventanas de proyección climática.....	67
4.7.2	Desempeño histórico de GCMs .....	68
4.8.3.	Proyecciones de forzantes climáticas.....	76
4.9.	Análisis de frecuencia.....	88
4.10.	Análisis hidrológico precipitación – escorrentía .....	93
4.11.	Resúmenes de Caudales Proyectados.....	115
4.12.	Vulnerabilidad de puentes.....	120
4.12.1.	Diagnóstico de Cambios en Diseño Producidos por Cambios en Hidrología .....	120
4.12.2.	Diagnóstico de las Variables de Diseño del Puente.....	121
4.12.3.	Medidas de Mitigación y Adaptación.....	123
5.	Síntesis, conclusiones y recomendaciones.....	125
	Referencias.....	131

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto

Los eventos de precipitación ocurridos en junio y agosto de 2023 afectaron gravemente a la zona central del país, principalmente las regiones Metropolitana, O'Higgins, Maule y Ñuble. Dentro de estas afectaciones se incluyen daños a infraestructura vial (camino y puentes), la que deberá ser reconstruida.

A modo de asegurar la resiliencia de la infraestructura hidráulica en un contexto de clima cambiante, es fundamental la incorporación de proyecciones del clima futuro en la planificación, diseño, construcción y operación de esta. Lo anterior, a modo de disminuir el riesgo de falla ante la amenaza dada por eventos de precipitaciones extremos que, según se reporta en la literatura especializada, podrían ocurrir con mayor frecuencia e intensidad en el futuro. En consecuencia, se requiere el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías de análisis hidrológico para las obras de infraestructura que complementen aquellas que son utilizadas de manera tradicional.

El cambio climático y sus potenciales impactos son una preocupación a escala mundial. Así, la ciencia ha avanzado en nuevas herramientas que permiten mejorar los análisis hidrológicos considerando el cambio climático. Ejemplo de ello son las publicaciones del IPCC, las cuales, a grandes rasgos, sistematizan la información científica generada a nivel mundial y la presentan al público especializado y político. La literatura especializada, así como proyectos desarrollados por entidades gubernamentales como la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), ha demostrado que existen metodologías que permiten proyectar el comportamiento futuro del clima bajo distintos escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero y utilizarlas a escala de cuencas hidrográficas para su aplicación en el estudio del ciclo hidrológico (e.g., DGA, 2022), el dimensionamiento de proyectos de infraestructura resiliente (e.g., DOH, 2022, 2020), entre otros. Sin perjuicio de lo anterior, en Chile existen pocas experiencias aplicadas en materia de diseño de infraestructura hidráulica considerando cambio climático (e.g., actualización del Plan Maestro de Aguas Lluvias de la ciudad de Antofagasta) y las metodologías implementadas radican en la experiencia del consultor.

Considerando lo anterior, el Ministerio de Obras Públicas, a través de la Dirección General de Obras Públicas (DGOP) y la Dirección de Vialidad, ha contratado los servicios de la ingeniera Ximena Vargas Mesa y su equipo de especialistas para el desarrollo del estudio denominado "Estudio para la incorporación de la variable Cambio Climático en el plan de reconstrucción", el cual busca desarrollar y aplicar una metodología para considerar la variable de cambio climático en la planificación y diseño de obras de infraestructura vial (camino y puentes), en específico, orientado a la reconstrucción de la infraestructura afectada por los eventos meteorológicos extremos de 2023.

## 1.2. Objetivos y alcances

El presente estudio tiene por objetivo proponer y aplicar una metodología para incorporar el cambio climático en la planificación y diseño de la infraestructura vial afectada por los eventos meteorológicos extremos ocurridos en 2023.

Para efectos del desarrollo del estudio y, principalmente la aplicación de la metodología propuesta para la incorporación del cambio climático en el diseño de infraestructura hidráulica, el área de estudio considera cuatro cuencas hidrográficas tributarias a puentes que fueron afectados por los eventos extremos de 2023.

Dichas cuencas, que están ubicadas en la región del Maule, fueron seleccionadas por el mandante teniendo en consideración que la región fue afectada tanto en los eventos ocurridos en junio como en agosto de 2023 y que la brecha de recuperación en el mes de octubre alcanzaba sólo al 31% en la región. Las cuencas corresponden a i) cuenca puente Maitenhuapi, ii) cuenca Puente Claro Los Vientos, iii) cuenca puente Chupallar, y iv) cuenca puente Putagán.

## 2. Bases del cambio climático

### 2.1. Introducción

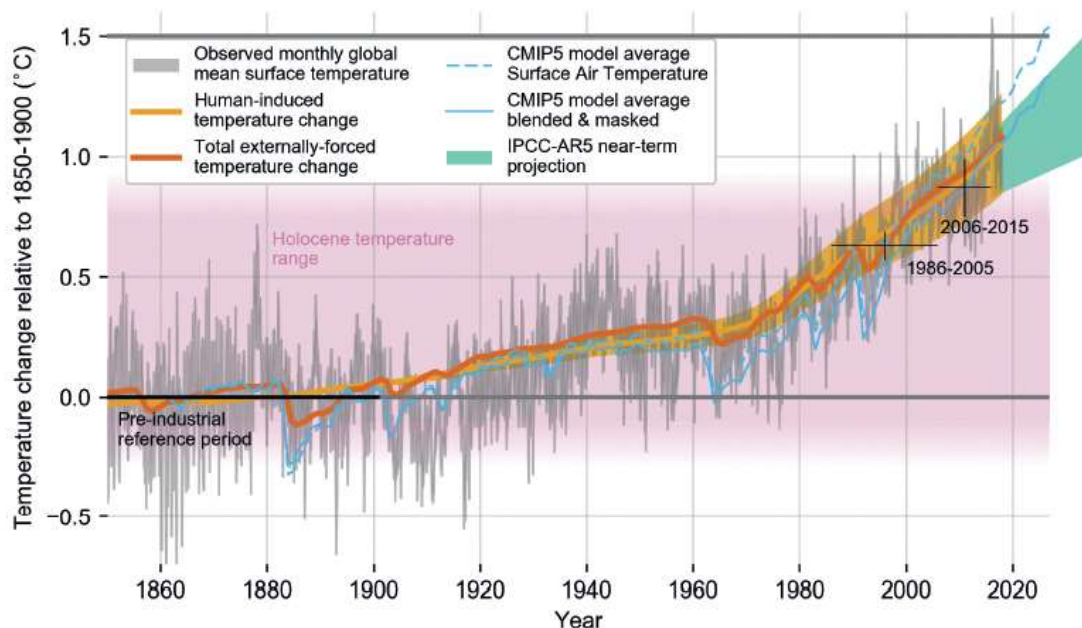
El Cambio Climático es una realidad latente en nuestros días: la evidencia recopilada, tanto a nivel internacional como nacional, dan cuenta de un cambio en el clima en comparación con la etapa preindustrial. En este contexto, son numerosas las fuentes que dan cuenta de este cambio, logrando cuantificar dichos cambios como también proyectar las condiciones hidrometeorológicas futuras en distintos puntos del mundo.

Durante las últimas décadas tanto entes estatales como privados han implementado y adoptado diversas metodologías y estrategias para comprender, mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático. Algunos sectores se han enfocado en la vulnerabilidad y adaptación, identificando las regiones más afectadas por el cambio climático y desarrollando estrategias de adaptación que incluyan medidas para reducir la vulnerabilidad de la diversa infraestructura que presenta una comunidad, como también las redes de salud, agricultura, gestión del agua, entre otros. Por otro lado, hay quienes velan por la planificación estratégica y política de lo que implica el fenómeno climático.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) determinó en su reporte asociado a la fase AR5 (publicado en 2014) un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación en algunas zonas del mundo, dentro de las cuales Chile se encontraba incluida. En este punto, se observa que, a nivel global, los treinta años comprendidos entre 1983 y 2012 muestran un aumento de 0,85 °C con respecto al promedio completo comprendido entre 1880 y 2012, siendo dichos años los más cálidos desde que se tienen registros confiables y homogéneamente distribuidos en el globo. En esta misma línea, al cierre de dicho informe, se tenía una tendencia sostenida de +0,05 °C/década en la escala global, donde dicha condición se registraba desde 1950. (IPCC 2014).

En 2018 el IPCC elaboró un informe especial, cuya conclusión sugería un aumento de la temperatura media anual, en la escala global, entre 0,8°C y 1,2°C con respecto a los niveles preindustriales. En este informe, se indica que es probable que, en los próximos 30 años, este nivel de calentamiento se incremente a 1,5°C, acentuando aún más las condiciones de sequía, tanto meteorológicas como hidrológicas. En particular, el documento expone que al comparar el periodo 1986-2015 se tiene un incremento de 0,63°C con respecto a los niveles pre-industriales mientras que en el periodo 2006-2015, el incremento corresponde a 0,87°C. Lo anterior demuestra que mientras más reciente se adopta el promedio, las temperaturas globales medias aumentan aún más con respecto al periodo pre-industrial, registrando una tendencia sostenida en el tiempo. Una imagen ilustrativa del cambio de temperatura global se muestra en la Figura 2.1.

La publicación reciente del reporte de la Fase 6 (AR 6, agosto de 2021) confirma los cambios enunciados anteriormente como también proyecta los cambios específicos en el ciclo hidrológico y el efecto del aumento de temperatura en las sequías.



**Figura 2.1: Incrementos en la temperatura a nivel global**

*Fuente: Informe especial IPCC, octubre de 2018*

## 2.2. Análisis de Frecuencia (AF)

### 2.2.1 AF Estacionario

Existen distintas técnicas hidrológicas para estimar los caudales pasantes en puntos de desfogue que determinan las hoyas hidrográficas. Estas técnicas tienen por objetivo armar una serie de tiempo de caudales, los cuales se presentan en determinadas escalas de tiempo. Las series de tiempo más comunes obedecen a caudales medios diarios o caudales medios mensuales. En este punto, y en líneas generales, cabe notar que mientras más pequeña es la escala temporal considerada, las estimaciones requieren una mayor cantidad de recursos y técnicas hidrológicas para su estimación.

La confección de dichas series hidrológicas puede ser mediante medición directa (e.g. midiendo con una estación fluviométrica), con una estimación mediante técnica estadística (e.g. una transposición de caudales) o confeccionando modelos de precipitación-escorrentía, los cuales transforman una serie de variables hidrometeorológicas en caudales, previa calibración de un set de parámetros.

Teniendo estimada una serie temporal sin datos faltantes, es útil ordenar los caudales en base a los distintos meses del año. Acorde a lo anterior, es válido suponer un universo definido por los distintos caudales medios mensuales de los distintos años, para un mes fijo.

En este punto, se supondrá que dichos caudales constituyen una muestra estadística que puede ser analizada bajo un supuesto estacionario. Esto quiere decir que los distintos momentos estadísticos (i.e. media, varianza y curtosis) no cambian en la ventana temporal en la que se considera la serie de tiempo.

Acorde a lo anterior, se les asigna una probabilidad empírica a los datos observados. El nivel de probabilidad empírica, asignada a los datos observados se realiza en base a la siguiente expresión:

$$Pb = 1 - \frac{m}{n + 1}$$

Donde:

$Pb [-]$  : Probabilidad de Excedencia.

$m[-]$  : Número de orden del Caudal Medio Mensual en la ordenación decreciente.

$n[-]$  : Número de años.

Luego, teniendo una muestra discreta, se procede a realizar un ajuste estadístico de los datos, mediante funciones densidad de probabilidad analíticas. Comúnmente, se utilizan los siguientes 7 modelos estadísticos:

- Normal
- LogNormal
- Gamma
- Pearson III
- Log Pearson Tipo III
- Gumbel
- GEV

El modelo que resulta tener una mejor representación de los datos discretos observados se selecciona para estimar distintos valores, logrando de esta forma interpolar y extrapolar la curva de valores de caudal v/s probabilidad de excedencia.

Comúnmente, se utilizan pruebas de bondad de ajuste, las cuales dan cuenta del rendimiento que tienen las funciones ajustadas en replicar los niveles empíricos de probabilidades. Los criterios de ajuste son:

- a) **Criterio Gráfico:** Corresponde a aquel modelo que presente el mejor ajuste gráfico, entre los datos observados/discretos y el modelo analítico continuo. En este punto, se deberá privilegiar un buen ajuste en los sectores de probabilidad de excedencia que sean de interés para el estudio.
- b) **Test de Kolmogorov-Smirnov:** Se evalúa el caso más desfavorable entre las probabilidades modeladas y empíricas, para todos los valores de la serie. Esto se expresa como:

$$D = (F_{empirico}(x_i) - F_{modelo}(x_i))$$

Donde:

$D[-]$  : Indicador prueba Kolmogorov - Smirnov

$F_x[-]$  : Función de probabilidad acumulada

$x_i [mm]$ : Valor de la serie de tiempo

Se considera que la distribución de probabilidades es adecuada si el valor  $D$  calculado es inferior a un valor  $D_c$  crítico, el cual es función del número de datos de la muestra.

- c) **Prueba  $\chi^2$ :** La prueba busca que las funciones densidad de probabilidad empírica, en su composición integral, se asemeje a la función de expresión analítica y continua. Dicha comparación se realiza mediante el cálculo de un parámetro  $\chi^2$ , el cual adopta la siguiente expresión:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^m \frac{n \cdot [f_s(x_i) - p(x_i)]^2}{p(x_i)}$$

Donde:

- $\chi_c^2$  [-]: Chi calculado
- $m$  [-]: Intervalos de evaluación
- $f_s$  [-]: Densidad de probabilidad empírica para el intervalo  $i$
- $p$  [-]: Densidad de probabilidad ajustada para el intervalo  $i$

Para que un modelo sea aceptado, el  $\chi_c^2$  debe ser menor al  $\chi_v^2$ , calculado en base a los grados de libertad de los modelos e intervalos considerados en la discretización del ajuste estocástico. Se supone que los mejores modelos tendrán un cociente  $\chi_c^2/\chi_v^2$  inferior a 1.

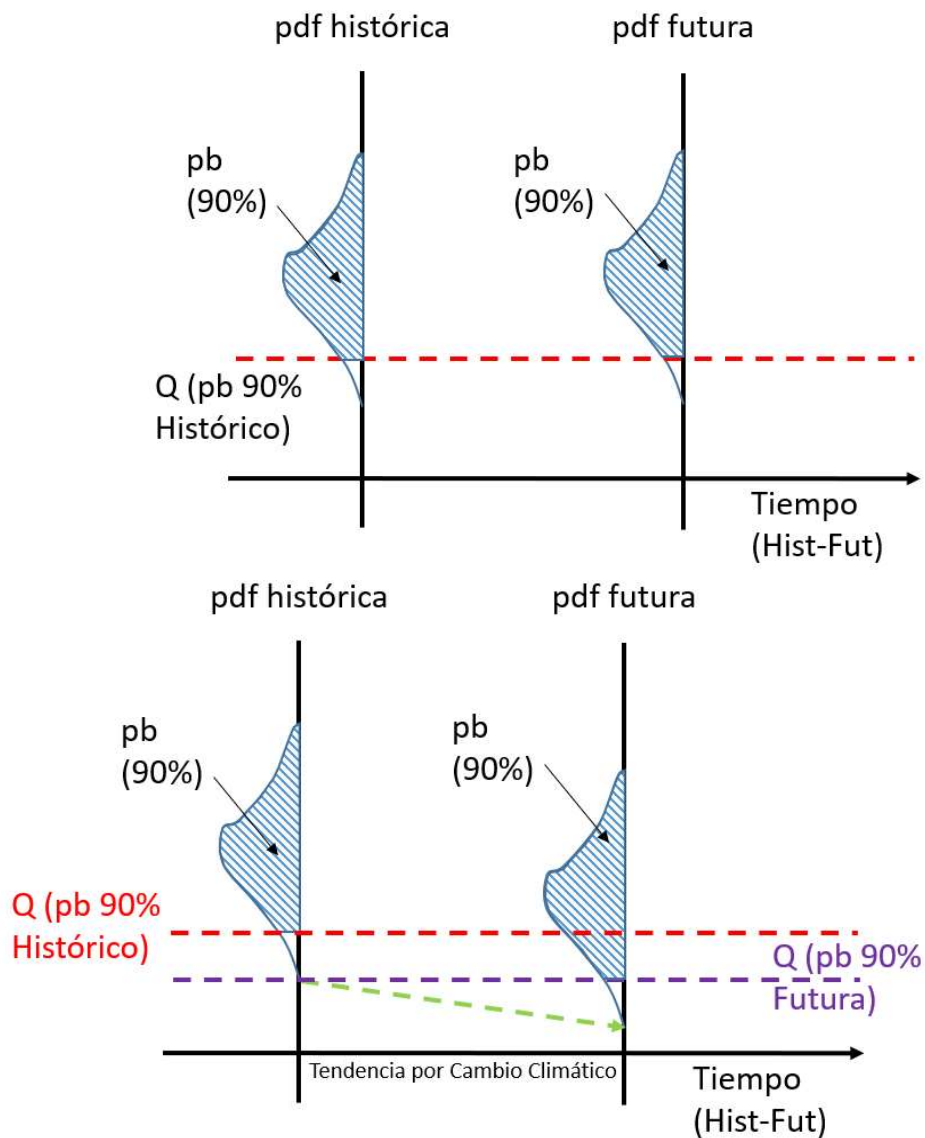
### 2.2.2 Concepto de no estacionariedad

Para caracterizar un Cambio en el evento extremo, existen dos variables o indicadores relevantes desde el punto de vista hidrológico, y que se relacionan entre sí:

- 1) **Magnitud del Extremo**, es decir, cuánta agua menos escurre por la sección de un río en comparación de la condición “normal”. Mientras más extrema sea la sequía, menos agua se tendrá en el río en comparación a la condición normal. Comúnmente, la condición normal se asocia a una determinada probabilidad de excedencia de diseño, la cual guarda relación con el tipo y finalidad de la obra hidráulica en cuestión.
- 2) **Frecuencia del Extremo**, es decir, qué tan recurrente es el déficit de la magnitud del caudal con respecto a la condición “normal”. Acorde a lo anterior, un aumento en la frecuencia obedece al incremento del tiempo en el cual se está bajo un cierto “caudal umbral”, definido en base a una condición normal.

El análisis de frecuencia tradicional supone que las observaciones corresponden a una lógica estacionaria. Esto quiere decir que la muestra analizada no presenta una dependencia con el tiempo, por lo cual un evento determinado tendrá la misma probabilidad de ocurrir en cualquier momento del tiempo. Acorde a lo anterior, la función densidad de probabilidad se mantiene constante en el tiempo, no cambiando su forma y, por ende, conservando sus estadígrafos representativos. Esta condición se ilustra en la Figura 2.2, panel superior, donde la función densidad de probabilidad es constante, tanto para un periodo histórico (observado) como también para un periodo futuro. En este supuesto es natural suponer que esta probabilidad no cambie en el tiempo, manteniéndose constante, como se ilustra en la Figura 2.2.

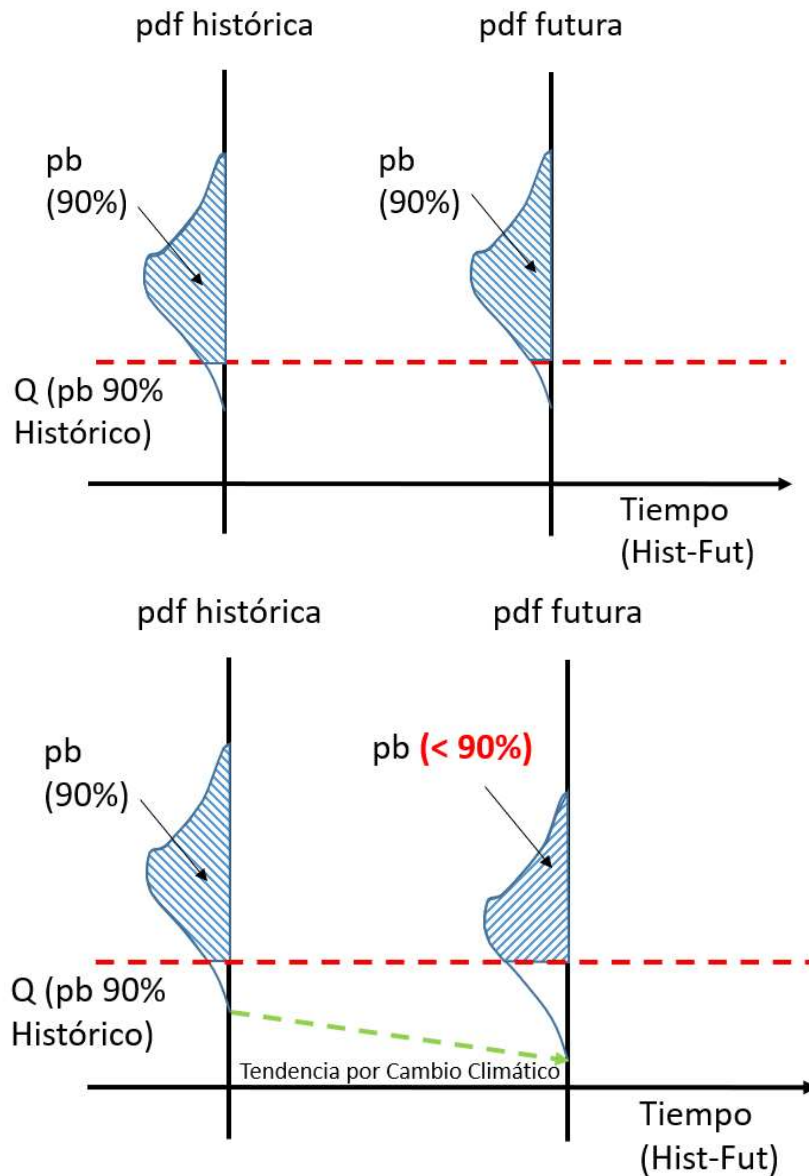
La evidencia de Cambio Climático reportada da cuenta de una intensificación de los extremos hidrológicos, razón por la cual se prevé que la función densidad de probabilidad cambie en un periodo futuro. Acorde a lo anterior, en base a la evidencia disponible, se tiene una disminución en el primer momento estadístico de la función (media), razón por la cual los caudales asociados a una misma probabilidad de excedencia disminuyen. Lo anterior se esquematiza en el panel inferior de la Figura 2.2: Al haber un cambio en la fdp, conservando una misma excedencia, los caudales disminuyen.



**Figura 2.2: Ilustración del cambio en la magnitud. Arriba: escenario estacionario donde en el presente y futuro la fdp se mantiene constante. abajo: producto de un cambio en la fdp, una misma probabilidad de excedencia, en periodo histórico y futuro, reporta dos caudales distintos.**

Relativo a lo anterior, donde se ha conservado una cierta probabilidad de excedencia para la definición de caudales, se puede abordar el problema en base a un cambio de la frecuencia de los eventos asociados a probabilidad de excedencias menores. Es por esto que el enfoque viene a determinar un caudal, basado en una probabilidad de excedencia histórica, donde dejando dicho umbral fijo, se observa que en un futuro la probabilidad de excedencia asociado a dicho caudal será menor. Esto quiere decir que, en una porción menor del tiempo con respecto al periodo histórico, se registrarán caudales mayores a los determinados previamente.

Lo anterior se grafica en la Figura 2.3, donde se observa el umbral determinado como caudal histórico a futuro quedará asociado a una menor probabilidad de excedencia debido principalmente al cambio en la función densidad de probabilidad.



**Figura 2.3: Ilustración del cambio en la frecuencia. arriba: escenario estacionario donde en el presente y futuro la fdp se mantiene constante. abajo: producto de un cambio en la fdp, la probabilidad de excedencia histórica corresponde a una probabilidad de excedencia más baja a futuro.**

### 2.2.3 Pruebas Estadísticas

Para verificar el cumplimiento de condiciones estadísticas en series temporales y robustecer el análisis de tendencias, de manera de validar la aplicación del análisis de frecuencias se aplican test estadísticos no paramétricos recomendados en la bibliografía (WMO, 2009a) (Machiwal & Jha, 2012) que confirman

condiciones estadísticas apropiadas. Los tests se aplican evaluando el rechazo de la hipótesis nula al 95% de significancia estadística, donde las hipótesis nulas corresponden a las siguientes condiciones:

- **Homogeneidad:** los elementos de la serie provienen de una única población. Para probar esta hipótesis se dispone de las pruebas de Von Neuman test de desviaciones acumuladas (Machiwal & Jha, 2012) y el test de Mann-Whitney (WMO, 2009).
- **Independencia:** Los valores no tiene influencia sobre algún otro valor de la serie. Para evaluar esta hipótesis se utiliza el test de Wald-Wolfowitz (WMO, 2009).
- **Estacionariedad:** Excluyendo las fluctuaciones aleatorias dentro de la misma serie, se dice que la serie es estacionaria si ésta no depende de la variable tiempo. Esto significa que los estadísticos de la serie (media y desviación estándar) no presentan una dependencia con el tiempo. Para efectuar el ajuste de funciones densidad de probabilidades es necesario que la serie sea estacionaria, de lo contrario, se deben ajustar distribuciones covariadas temporalmente, es decir, en las que se establezca la dependencia de los estadísticos en función del tiempo (DIC FCFM, 2019). En este caso, para detectar tendencias de las precipitaciones máximas diarias anuales, se utilizaron los métodos de Mann-Kendall (WMO, 2009) y la pendiente de Sen (Machiwal & Jha, 2012).
- **Puntos de Cambio:** En determinadas situaciones existe la posibilidad que en la serie a analizar haya saltos o cambios de tendencias en un determinado momento, lo cual no queda bien reflejado en los métodos de análisis de tendencia (Ricchetti, 2018). De esta forma y para caracterizar esta singularidad, se realiza un análisis del punto de cambio (*Change-Point Analysis*), siendo común para la detección de cambios en series continuas de variables hidrológicas o climáticas el uso del test no paramétrico de Pettitt (Pettitt, 1979).

## 2.3 Nociones generales de cambio climático

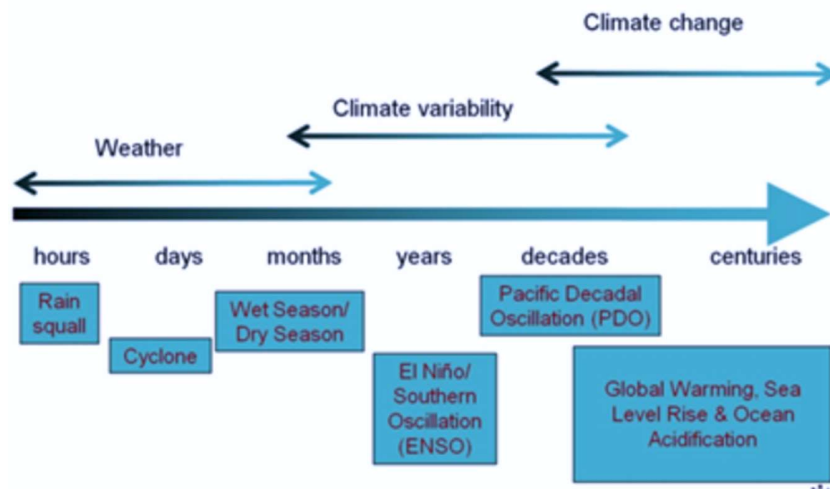
### 2.3.1 Variabilidad y Cambio Climático

Como primer concepto a introducir, se tiene la diferencia entre lo que es la variabilidad climática y el Cambio Climático. La variabilidad climática obedece a oscilación, con una distinta escala temporal, la cual se supone que siempre se encuentra centrada en una media y conserva una varianza definida. Esto quiere decir que existirán años caracterizados como húmedos, normales y secos, lo cual hace definir precisamente la Función Densidad de Probabilidades (fdp) de la observación hidroclimatológica.

Esta variabilidad climática se registra desde la escala de meses hasta décadas y abarca también fenómenos de gran escala para nuestro país, como lo es el fenómeno ENSO, conocido comúnmente como “El Niño” o la PDO (Pacific Decadal Oscillation). Se reitera que, en una escala inferior a las décadas es posible cuantificar esta variación climática, respondiendo intrínsecamente a fenómenos naturales de muestreo de la fdp.

Por otro lado, el fenómeno de Cambio Climático obedece a una escala que va desde las décadas hasta los siglos. Es importante recalcar que no es posible detectar de manera robusta un cambio en el clima en una ventana temporal inferior a los 30 años. En este sentido, la organización meteorológica mundial (WMO) sugiere que la definición del clima se debe considerar en base a una ventana temporal de 30 años como mínimo.

Las diferentes escalas temporales que definen tanto la variabilidad climática como el Cambio Climático se ilustran en la Figura 2.4.



**Figura 2.4: Distintas escalas de variabilidad y cambio climático.**  
**Fuente: Pacific Future Climate**

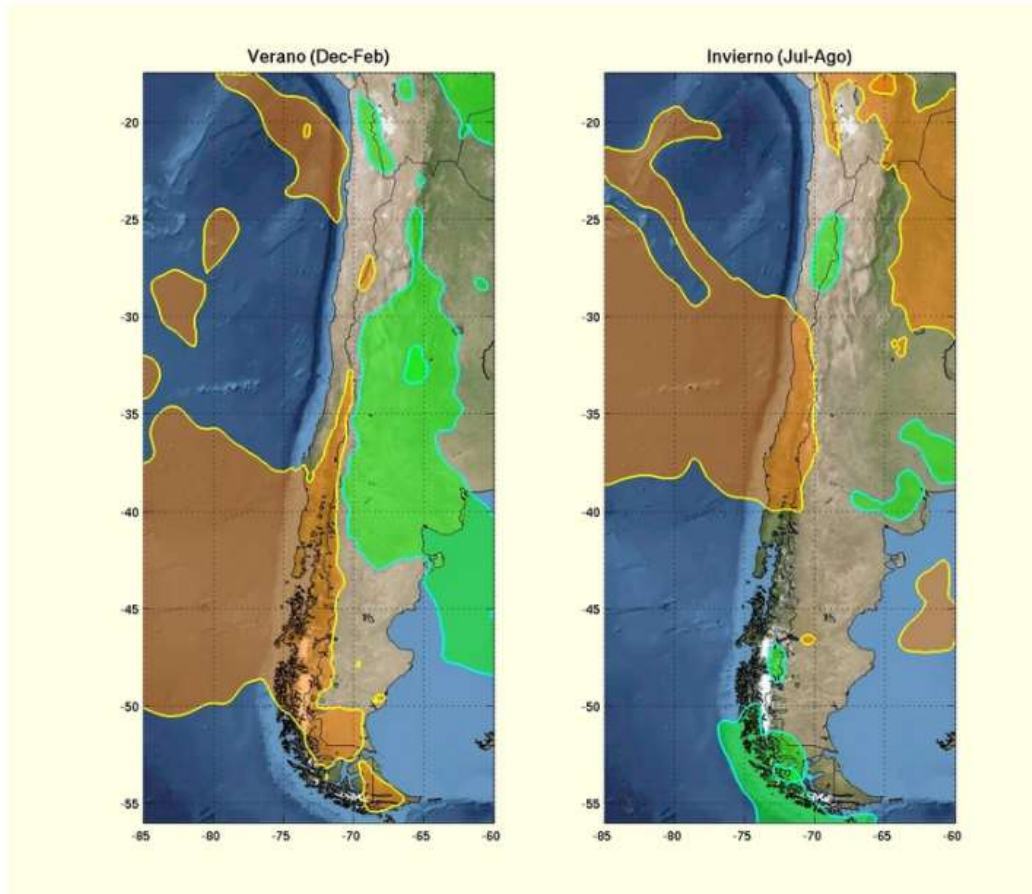
## 2.4 Fases del Desarrollo de Cambio Climático: AR5 y AR6

Las directrices asociadas a Cambio Climático vienen dadas por el IPCC, el cual corresponde a un organismo internacional compuesto por investigadores de distintas áreas de estudio. Los escenarios de cambio climático constituyen un supuesto sobre el desarrollo socio-económico-político-ambiental a escala global, el cual incide en las emisiones de gases efecto invernadero sobre la atmósfera, los cuales producen principalmente los cambios en el clima.

Desde el año 2000 a la fecha, los escenarios de modelación son actualizados en base a las directrices dadas por el IPCC. Las directrices de modelación se condensan en los reportes denominados Assessment Report (AR), los cuales se van trabajando a través de distintas fases, las cuales buscan una actualización de los escenarios en base a las observaciones decadales del clima. Acorde a lo anterior, se pueden reportar distintas fases de desarrollo de directrices de modelación, las cuales se reseñan a continuación:

**Año 2000:** Corresponde al tercer informe del IPCC (2000). Dicho reporte considera seis grupos de escenarios SRES (Special Report Emission Scenarios) del IPCC. Estos escenarios constituyen la base de múltiples estudios sobre el cambio climático y consideran una variedad de cambios plausibles en población y actividad económica a lo largo del siglo XXI. Entre los escenarios que asumen una economía mundial dominada por un comercio global y alianzas (A1 y B1), existe un grupo en que la población mundial alcanza su máximo de 8.7 billones en el año 2050, en tanto que los escenarios con menor globalización y cooperación (A2 y B2), la población mundial se espera que aumente hasta 2100, alcanzando los 10,4 billones (B2) y 15 billones (A2), respectivamente. En general, todos los escenarios SRES contemplan una sociedad más pudiente que la actual, con un PIB mundial que supera entre 10 a 26 veces el actual. En muchos escenarios también se suponen diferencias más estrechas entre las regiones del mundo con la tecnología representando una fuerza potenciadora junto a los cambios demográficos y el desarrollo económico (DGF, UChile 2007). En particular, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile realizó un escalamiento regional de los escenarios B2 (escenario moderado de cambio climático) y A2 (Escenario severo de Cambio Climático), acoplado los resultados del modelo de Circulación General HadCM3 con el modelo PRECIS para Chile Continental.

Parte de los resultados obtenidos en la modelación regional muestran una disminución superior al 15% en las precipitaciones para gran parte de la zona central. Esto se puede observar en la Figura 2.5.



**Figura 2.5: Áreas donde la precipitación disminuye (café)/aumenta (verde) más de un 15% según PRECIS.  
Fuente: Variaciones Climáticas en Chile para el Siglo XXI. DGF-CONAMA 2006**

**AR5:** El año 2014, IPCC actualizó las directrices de modelación, migrando a 4 escenarios de cambio climático equiprobables, los cuales guardan relación con una forzante radiativa estimada, la cual se basa en los escenarios de emisión de gases efecto invernadero. Los escenarios de cambio climático evaluados se denominan con el acrónimo RCP (Representative Concentration Pathways).

La descripción detallada de estas variables será abordada en la sección siguiente. Esto se debe a que actualmente, el desarrollo CMIP5 es aquel que se encuentra más divulgado, tanto a nivel nacional como internacional.

**AR6:** Esta etapa genera 5 escenarios de modelación, denominados con el acrónimo SSP (Shared Socio-economic Pathways). Se consideran dos escenarios con muy baja y baja emisión de concentración de CO<sub>2</sub> (SSP1-1.9 y SSP1-2.6), un escenario de emisión intermedia (SSP2-4.5) y dos escenarios de alta y muy alta emisión de CO<sub>2</sub> (SSP3-7.0 y SSP5-8.5).

El resumen de estos escenarios se muestra en la Figura 2.6.

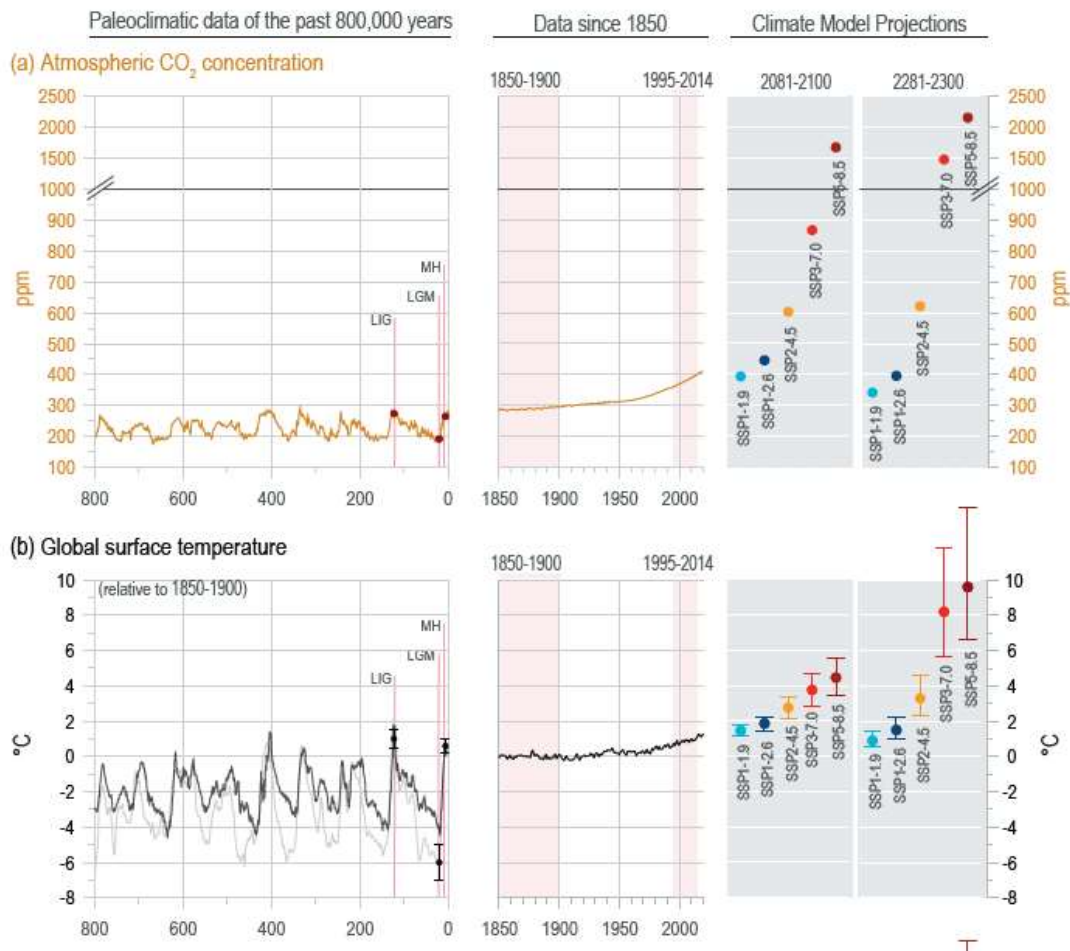


Figura 2.6: Cambios en la concentración atmosférica de  $CO_2$  y temperatura global según escenarios de cambio climático de CMIP6. Fuente: Capítulo 1, Informe de Cambio Climático 2021: Bases Físicas de Modelación.

## 2.5 Variables y Escenarios de AR5

Tal como se ha reseñado en la sección anterior, el CMIP5 es, en la actualidad, la directriz de modelación más divulgada, tanto internacional como nacional, donde se cuenta con escalamientos regionales de los modelos de circulación general para todo Chile Continental. En base a lo anterior, se introducen conceptos básicos asociados a la etapa de desarrollo 5, que son necesarios para entender los escenarios del CMIP6 considerados para la presente metodología.

- A. **Escenario de cambio climático:** Se refiere a un supuesto de emisiones de Gases Efecto Invernadero (G.E.I.), los cuales determinarán las forzantes radiativas. Se reconocen por las siglas R.C.P. (Representative Concentration Pathway). En ese contexto se definen 4 escenarios determinados por distintos valores de RCP, etiquetados según el forzamiento radiativo (FR), medido en  $Watts/m^2$  que se tendría en el año 2100 según cada escenario. De esta manera, se cuenta con los escenarios RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6 y RCP 8,5.

Cabe recalcar que el forzamiento radiativo corresponde a una alteración del flujo radiante en la atmósfera, debido a la absorción de radiación infrarroja terrestre (Santamaría, 2010) y está directamente relacionado

con el aumento de temperatura en la superficie terrestre. Las proyecciones de emisiones asociadas a los distintos escenarios como también el cambio de la temperatura proyectada se muestra en Figura 2.7.

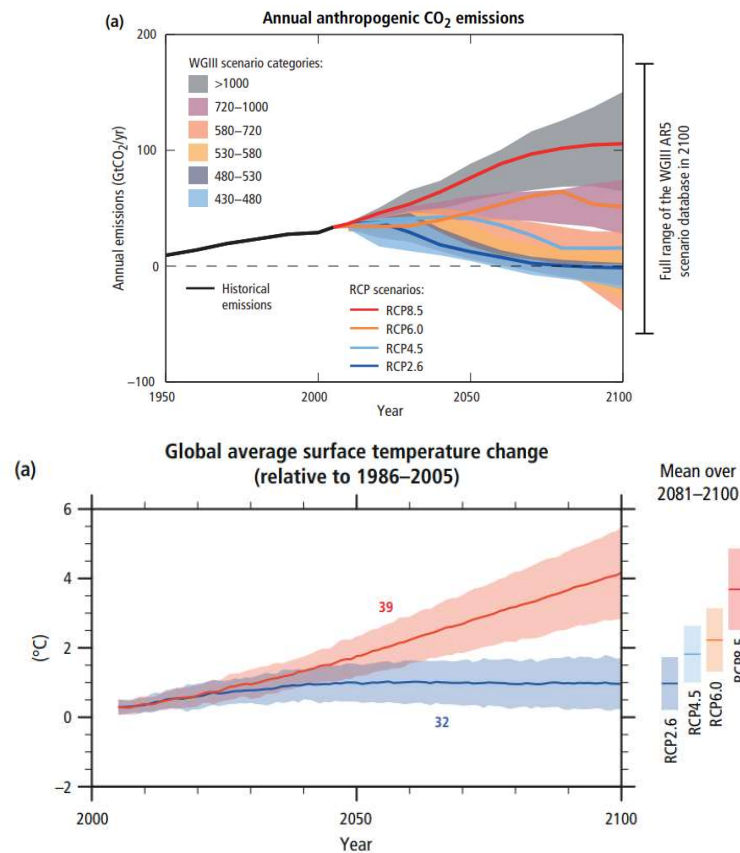


Figura 2.7: Emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y temperaturas en base a distintos escenarios de cambio climático según los escenarios de la fase 5 de desarrollo del IPCC. Fuente: IPCC 2014.

- B. **Modelo de cambio climático:** Proyección realizada por algún instituto científico que estima los valores de variables hidrometeorológicas en el futuro, estudiando la interacción de la atmósfera con la tropósfera, forzada por algún escenario de cambio climático. Estos modelos se conocen como G.C.M. (*General Circulation Model*)
- C. **Protocolo de modelación:** Unificación de los criterios de modelación de la comunidad científica. Estos se conocen como CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*).
- D. **Corridos R.I.P.:** Conjunto de condiciones para realizar la corrida de un modelo. Este concepto guarda relación con periodo inicial, base de datos y variables modeladas.
- E. **Downscaling o Escalamiento:** Técnica en la cual se corrigen los datos de los Modelos de Circulación General para adecuarlo a la hidroclimatología local. Se debe tener en cuenta que las proyecciones realizadas, modeladas tanto en el periodo histórico como futuro, son de carácter estocásticos, no teniendo una correlación temporal definida.

## 2.6 Evolución de modelos y escenarios de cambio climático

Durante el siglo XX se registraron cambios significativos en distintos procesos del sistema climático terrestre (atmósfera, biósfera, criósfera, hidrósfera y litósfera). Esta variabilidad acelerada, producto de la actividad antrópica, ha perdurado en el tiempo y continúa siendo analizada. El calentamiento global observado es atribuido a cambios en la forzante radiativa terrestre producto de la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) y cambios en el uso de suelo (Chapman, 2007). Los expertos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) han investigado de forma continua los riesgos asociados a los efectos e impactos del cambio climático, y han informado sobre las medidas de mitigación necesarias para enfrentar este fenómeno (CODELCO, 2023).

Ante las preocupaciones e interrogantes generadas por los potenciales impactos del cambio climático, la comunidad científica comienza a analizar escenarios climáticos futuros, los que permiten desarrollar simulaciones de la interacción física-tierra-atmósfera. Dichas interacciones se conocen como modelos climáticos globales (GCM) y han sido desarrollados bajo el alero del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP) (Eyring et al., 2016; Meehl et al., 2007; Taylor et al., 2012) desde la década de 1990. Los GCMs, son una representación matemática, implementada en computadores de alto desempeño, de las distintas componentes del sistema climático. Estos son desarrollados para comprender y representar la variabilidad climática natural, en conjunto con los efectos antropogénicos. Estos efectos están dados típicamente por diversos niveles de emisión de GEI, los que a su vez se traducen en distintos escenarios de forzamiento radiativo a finales del siglo XXI (Bock et al., 2020).

El origen de CMIP es el Proyecto de Intercomparación de Modelos Atmosféricos (AMIP), el que buscaba comprender la intercomparación sistemática y la validación del desempeño de los GCM atmosféricos en escalas de tiempo estacionales e interanuales, así también, para comprender la capacidad de los GCMs en la simulación del clima presente (Eyring et al., 2016; Touzé-Peiffer et al., 2020). Desde AMIP surgen las primeras dos fases complementarias de CMIP, la iniciativa CMIP1 (1996) encargada de medir y comprender la capacidad de los GCM para simular el clima actual, considerando que los modelos climáticos acoplados presentan concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), niveles de luminosidad solar, y otros forzamientos climáticos externos constantes (Covey et al., 2003). Mientras que CMIP2 (1997), tuvo como objetivo comparar los cambios climáticos simulados por modelos acoplados a una tasa de aumento constante del 1% anual de CO<sub>2</sub> (Meehl et al., 2007), sin incluirse otros factores climáticos antropogénicos o naturales (Covey et al., 2003). A partir de la iniciativa CMIP2 se desarrolla el primer informe complementario<sup>1</sup> de la evaluación científica del IPCC.

Posteriormente, el Grupo de Trabajo sobre la Modelización Acoplada (WGCM), subgrupo del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), desarrolla la iniciativa CMIP2+ (1999). El objetivo era avanzar en el campo tecnológico y suplir las limitaciones de procesamiento y capacidad de almacenamiento que presentaron CMIP1 y CMIP2 (salidas de algunos campos (e.g., precipitaciones, temperatura de la superficie y presión a nivel del mar), con una resolución temporal gruesa (Touzé-Peiffer et al., 2020)). Sin embargo, CMIP2+ no fue completado para el término del Tercer Informe de Evaluación (TAR) del IPCC en el año 2001, por lo que solo CMIP1 y CMIP2 fueron parte del reporte. Los expertos en clima recomendaron que las próximas fases de CMIP debían poseer simulaciones con una mayor variedad de escenarios de forzamiento radiativo y un mayor grupo de modelos para evaluar la extensión de las predicciones regionales (Giorgi et al., 2001).

---

<sup>1</sup> Un primer informe de evaluación (AR1) ya se había realizado por el IPCC en 1990 (Meehl et al., 2020). No obstante, AR1 no contaba con los resultados del CMIP hasta el desarrollo del AR2 en 1996.

La tercera fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3) consideró las recomendaciones descritas en el TAR y su Informe Especial sobre Escenarios de Emisión (SRES) (Nakicenovic & Swart, 2000). También fueron incorporadas proyecciones de cambio climático bajo diversos escenarios de emisión. Si bien el SRES identificaba 40 escenarios de emisión de GEI y de azufre (con una variedad de supuestos sobre desarrollos demográficos, económicos y tecnológicos), CMIP3 presenta tres escenarios: B1, A1B y A2 del SRES; los que dieron paso al Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC, aquí se buscaba proporcionar una mejor evaluación sobre la variabilidad del clima y cambio climático.

La siguiente fase del CMIP es CMIP5, desarrollado para satisfacer las motivaciones de la comunidad científica del clima y las prioridades de usuarios especialistas en los diversos sistemas de la tierra. CMIP5 además de incluir las recomendaciones del AR4, considera la gestión de recursos hídricos, la biogeoquímica, los impactos del cambio climático, fenómenos de gran escala, entre otros (Taylor et al., 2012). CMIP5 proporciona la base del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC.

Cuatro Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) basados en proyecciones de crecimiento demográfico, desarrollo tecnológico y respuestas sociales se formularon en CMIP5. La singularidad de cada escenario estipula el nivel de forzamiento radiativo (FR), identificándose un escenario optimista o de bajas emisiones RCP2.6 (FR alcanza su máximo cerca de la mitad del siglo XXI, previo a disminuir hasta un nivel nominal eventual de  $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ ), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) y, un escenario pesimista RCP8.5 (FR aumenta a lo largo del siglo XXI, previo a alcanzar un nivel de unos  $8,5 \text{ Wm}^{-2}$  a finales de siglo).

En CMIP6 conjunto al Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, se desarrollan las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP, (O'Neill et al., 2016)), como mejora y complemento a las antiguas Trayectorias de Concentración Representativas. Los escenarios SSP son los escenarios de mayor complejidad utilizados en el CMIP (Riahi et al., 2017). Lo anterior radica en que los SSP combinan dos iteraciones de los escenarios previamente utilizados por las distintas fases, siendo el Informe Espacial sobre Escenarios de Emisiones (SRES) y las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). De esta forma, los SSP reflejan las alternativas de cómo podría desarrollarse el planeta en ausencia de políticas y/o medidas de mitigación explícitas para limitar el forzamiento radiativo o mejorar la capacidad de adaptación.

### **3 Propuesta metodológica para la incorporación del cambio climático en el diseño de obras hidráulicas**

#### **3.1 Definición de cuencas de estudio**

Se deberá definir el punto de interés del estudio, el cual coincide con el punto de emplazamiento del puente de interés.

La delimitación podrá realizarse en base a Modelos de Elevación Digital (DEM) provenientes de la base de datos del United States Geological Survey (USGS). Específicamente, se podrá utilizar el radar Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), el cual tiene una resolución de 1 arcosegundo (píxel de ~30x30 m) o la base de datos de Alaska Satellite Facility (ASF), misión ALOS-PALSAR (píxel de ~12,5x12,5 m). La utilización de uno u otro DEM deberá siempre velar por una correcta delimitación de las cuencas, poniendo especial énfasis en la caracterización de las altas cumbres que dividen la escorrentía.

Una vez delimitadas las cuencas, se contrastan los resultados con los datos expuestos en las cartas del Instituto Geográfico Militar (IGM) escala 1: 250.000 como también con la delimitación de cuencas y subcuencas de la Dirección General de Aguas (DGA), validando la delimitación realizada. En caso de encontrar discrepancias, se realizará un análisis de los drenes e imágenes satelitales para determinar las adecuadas direcciones de drenaje.

#### **3.2 Análisis de la información meteorológica disponible**

##### **3.2.1 Red observacional**

Para el análisis de la información meteorológica disponible, se define un dominio de potencial interés en el entorno de la zona de estudio, según lo cual se identifican las estaciones allí disponibles. En términos generales, se consideran las estaciones meteorológicas emplazadas entre las regiones de O'Higgins y Ñuble. Así, a partir de los registros de precipitación y temperaturas extremas diarias (i.e., mínima y máxima) en el periodo 1979-2020 se filtran de manera independiente por variable aquellas estaciones con más del 90% y 80%, respectivamente, de datos diarios disponibles que caracterizan la zona en estudio. La Figura 3.1 muestra la distribución espacial de las estaciones que, para efectos del presente estudio, se consideran "completas" según los criterios expuestos anteriormente.

En el entorno más próximo a las cuencas seleccionadas definidas por los puentes Los Vientos, Maitenhuapi, Putagán y Chupallar, se identifican cinco estaciones meteorológicas que cuentan con registros tanto de precipitación como temperaturas extremas (ver Figura 3.1). Algunos atributos de dichas estaciones se resumen en la Tabla 3.1, donde queda en evidencia que, dada la elevación a la cual se encuentran las estaciones, existen ciertos procesos climáticos e hidrológicos en alta montaña que no se estarían capturando, problema que ya ha sido planteado en diferentes estudios a nivel nacional. Se identifican variadas estaciones fluviométricas en la región, pero poco más de una decena (ver Figura 3.1) cumple con el requisito de tener 80% de información completa en el periodo 1979-2020 y sólo una de las estaciones (Claro en Camarico) se visualiza en una de las cuencas de interés.

La falta de observaciones in-situ limita la caracterización de la climatología a escala de cuenca y, con ello, el estudio de la hidrología y la respuesta ante cambios en el clima. En este contexto, el desarrollo y mejoramiento de modelos de reanálisis atmosféricos a nivel global y productos grillados locales

disponibles para el estudio del clima en Chile constituyen una herramienta útil para mitigar el problema de escasez de observaciones, sobre todo en alta montaña para el caso de Chile continental.

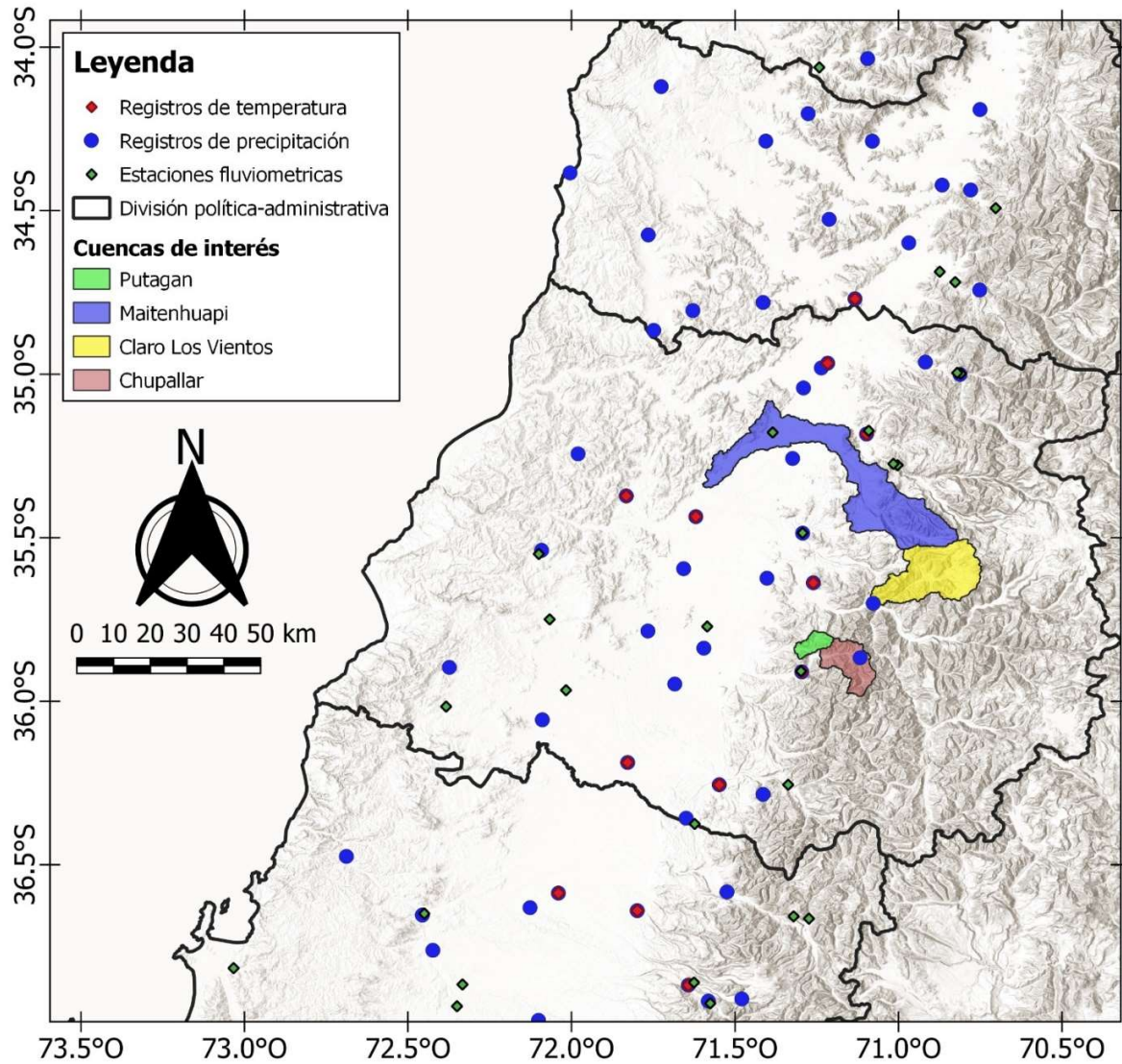


Figura 3.1: Distribución espacial de estaciones disponibles en la zona de interés extendida con más del 90% y 80% de completitud de registros diarios de precipitación, caudal y temperaturas extremas en el periodo 1979-2020 respectivamente.

**Tabla 3.1: Estaciones con registros simultáneos de precipitación y temperaturas extremas diarias ubicadas en el entorno próximo a las cuencas de interés.**

Código estación	Institución responsable	Nombre de la estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m s.n.m.)
340031	DMC	General Freire Curicó Ad.	-34.966	-71.217	225
7116005	DGA	Potrero Grande	-35.183	-71.098	445
7378002	DGA	Talca U.C.	-35.436	-71.620	130
7378003	DGA	Colorado	-35.638	-71.261	420
7355007	DGA	Ancoa Embalse	-35.911	-71.296	421

### 3.2.2 Reanálisis atmosférico ERA5 y producto grillado CR2Met

Los reanálisis atmosféricos corresponden a modelos numéricos orientados a representar la dinámica atmosférica, para lo cual incorporan observaciones terrestres de distintas fuentes de información y las asimilan en retrospectiva. Dichas simulaciones permiten generar estimaciones de variables espacialmente distribuidos a nivel horizontal y vertical (i.e., diferentes capas de la atmósfera).

Uno de los reanálisis atmosféricos corresponde a ERA5. Resulta de interés mencionar este reanálisis pues se utiliza como base para el desarrollo del producto grillado CR2Met que, hasta la fecha, es una de las herramientas de mejor desempeño para la caracterización de los patrones de precipitación y temperatura en Chile continental y ha sido empleado en diferentes estudios. El reanálisis atmosférico ERA5 es la quinta generación de reanálisis atmosféricos del Centro Europeo de Previsiones Meteorológica a Mediano Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés). Actualmente cuenta con una extensión temporal en retrospectiva hacia el periodo 1950–1978 (originalmente comprendía sólo el periodo 1979–Act), por lo que resulta de utilidad para efectos del presente estudio (mayor detalle en Hersbach et al., 2020). ERA5 permite contar con diferentes variables meteorológicas a nivel horario, entre las cuales se encuentran la precipitación y temperatura.

Por otra parte, el producto grillado CR2Met (disponible para su descarga libre y gratuita en <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>) surge como una alternativa para abordar el problema de la escasez de observaciones meteorológicas continuas y espacialmente distribuidas (i.e., densidad espacial). Su desarrollo comienza en el contexto del proyecto de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017; Boisier et al., 2018) y la construcción de los servicios climáticos del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia – (CR)2 de la Universidad de Chile. A la fecha, el producto CR2Met ha tenido diferentes actualizaciones y mejoras en base a la incorporación de nuevos datos y predictores, procedimiento de control de calidad de datos, y una rigurosa verificación en términos de la representación de los patrones climáticos observados en Chile continental.

A grandes rasgos, el producto grillado CR2Met podría entenderse como una versión ajustada del reanálisis atmosférico ERA5 a las observaciones locales de precipitación y temperaturas extremas mediante modelos estadísticos que incluyen, adicionalmente, información derivada de imágenes satelitales (e.g., temperatura superficial). Sin perjuicio del valor que entrega CR2Met, resulta necesario realizar una evaluación del desempeño del producto en contraste a los registros locales in-situ para efecto de entender los alcances y limitaciones de su utilización. Esta evaluación nunca debe perder de vista que se está comparando información puntual (estación meteorológica) respecto a un píxel de 0,05° latitud-longitud.

### 3.2.3 Evaluación de CR2Met

Para evaluar el desempeño del producto se realizó un análisis continuo a escala temporal diaria, mensual, estacional (periodo otoño-invierno y primavera-verano) y anual, usando tres métricas estadísticas que se indican en la Tabla 3.2: el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), la raíz del error cuadrático medio normalizada por la desviación estándar (NRMSE) y el coeficiente de eficiencia Kling-Gupta, KGE (Kling et al., 2012).

**Tabla 3.2: Métricas estadísticas de evaluación de desempeño.**

Métrica	Abreviación	Descripción	Valor óptimo [Rango]	Ecuación
Coeficiente de correlación de Pearson	$r$	Medida de la dependencia lineal entre dos variables	1 [-1 - 1]	3.1
raíz del error cuadrático medio normalizada	NRMSE	Proporciona información sobre la dispersión del conjunto y su rendimiento promedio	0 [0 - $\infty$ ]	3.2
Coeficiente de eficiencia Kling Gupta	KGE	Indica que tan representativa es una variable sobre otra, en este caso el producto respecto a la observación	1 [- $\infty$ - 1]	3.3

$$r = \frac{\sigma_{obs,CR2}}{\sigma_{CR2} \cdot \sigma_{obs}} \quad (3.1)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N (P_{CR2n} - P_{obsn})^2}}{\sigma_{obs}} \quad (3.2)$$

$$KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{CR2}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{P_{CR2}}{P_{obs}} - 1\right)^2} \quad (3.3)$$

Donde:

$P_{obs}$  : valor de precipitación observado.

- $P_{CR2}$  : valor de precipitación simulado por CR2MET.
- $\sigma_{obs}$  : desviación estándar de los valores observados.
- $\sigma_{CR2}$  : desviación estándar de los valores simulados.
- $\sigma_{obs,CR2}$  : covarianza entre valores observados y simulados.

Adicionalmente, se realiza un análisis discreto a partir de tablas de contingencia. La Figura 3.2 muestra un ejemplo de tabla de contingencia determinada para cierto “evento”. Las letras A y D indican los “aciertos”, es decir, ocurre el evento y el producto logra evidenciarlo o, por el contrario, el evento no ocurre y el producto indica lo mismo. Por su parte, B y C indican las “fallas”, es decir, las veces que no ocurre el evento y el producto evidencia que sí o, en caso contrario, ocurre el evento, pero el producto no lo detecta.

		Observado	
		Si	No
Valor CR2MET	Si	A	B
	No	C	D

**Figura 3.2: Ejemplo de tabla de contingencia.**

En este caso los eventos a evaluar, se definieron distintos rangos de intensidad de precipitación diaria (ver Tabla 3.3), los cuales se basan en la clasificación adoptada por Zambrano-Bigiarini et al. (2017). A partir de dichos rangos, se calculan cuatro índices categóricos (ver Tabla 2.4) que indican el rendimiento del producto CR2Met respecto a las observaciones: (i) la probabilidad de detección de sesgo, (ii) el sesgo de frecuencia, (iii) la tasa de falsa alarma y (iv) el índice de éxito crítico (Baez-Villanueva et al., 2020).

**Tabla 3.3: Rangos de intensidad diaria de los eventos de precipitación para el análisis.**

Eventos de precipitación	Intensidad (mm/d)
Sin Lluvia	[0,1)
Lluvia suave	[1,5)
Lluvia moderada	[5,20)
Lluvia pesada	[20,40)
Lluvia violenta	>40

**Tabla 3.4: Descripción de los índices categóricos calculados en el análisis discreto.**

Métrica	Abreviación	Descripción	Valor Óptimo	Ecuación
Probabilidad de detección de sesgo	POD	Representa la frecuencia con la que el producto estimó correctamente la intensidad de precipitación observada	1	3.4
Sesgo de frecuencia	fBIAS	Representa la subestimación o sobrestimación de intensidad por parte del modelo	1 <1 subestimación >1 sobrestimación	3.5
Tasa de falsa alarma	FAR	Representa la fracción de eventos que no fueron correctamente identificados por el modelo	0	3.6
Índice de éxito crítico	CSI	Representa la capacidad general del producto en el evento evaluado	1	3.7

$$POD=A/(B+C) \quad (3.4)$$

$$fBIAS=(A+B)/(A+C) \quad (3.5)$$

$$FAR=B/(A+B) \quad (3.6)$$

$$CSI=1/[(1/POD)+(1/(1-FAR))-1] \quad (3.7)$$

### 3.3 Impacto del cambio climático en infraestructura vial

Se analiza en este acápite la amenaza climática que impacta la infraestructura vial (puentes y caminos) y que producto de eventos extremos de tormenta cuya intensidad de precipitación en conjunto con aumentos del área pluvial aportante pueden dar origen a aumentos significativos de caudal, que impactan a la infraestructura vial comprometiendo su estabilidad y funcionamiento.

Se adopta el concepto de infraestructura crítica como aquella cuya perturbación en su funcionamiento o destrucción tendría un grave impacto sobre los servicios de utilidad pública para la población o para el eficaz funcionamiento de los órganos y la Administración del Estado.

En virtud de lo anterior, se considera como amenaza la falla de la obra por socavación o erosión debido ya sea a aumentos de la velocidad del flujo, de la capacidad de transporte de sedimentos y/o del esfuerzo de corte. A cada una de estas amenazas se les asigna un atributo que luego se combina con la exposición y vulnerabilidad considerando así tanto la estructura como a qué y quiénes afecta la falla de la obra.

### 3.3.1 Determinación de la Amenaza

Se considera tanto la severidad de la crecida definida a través de un atributo (muy baja, baja, moderada, alta, muy alta) asociado al período de retorno de ésta y el riesgo hidrológico de la falla de la obra (considerando su vida útil).

### 3.3.2 Determinación de la Exposición

Se define a través de la ponderación (P1% y P2%) de la denominada densidad de infraestructura crítica afectada  $\rho_{infCritica}$  y del porcentaje de población afectada %Pob

$$\text{Exposición} = p1\% * \rho_{infCritica} + p2\% * \%Pob(\%) \quad (3.8)$$

$\rho_{infCritica}$  considera que la falla afecta a redes viales de acceso a poblados ( $\rho_{infPob}$ ), a estaciones de medición ( $\rho_{infRed}$ ) o a centrales de energía, a embalses, o sectores de riego ( $\rho_{CAD}$ ) o a obras de infraestructura sanitaria ( $\rho_{infSan}$ ) de manera que se expresa como:

$$\rho_{infCritica} = \rho_{infRed} + \rho_{CAD} + \rho_{infSan} + \rho_{infVial} \quad (3.9)$$

El %Pob al igual que las densidades de la infraestructura afectada, en la cuenca aportante, por la falla del puente se define en función de la cantidad de infraestructura o población de un área representativa. Dicha área debe acordarse según las características de la región. Por ejemplo, a nivel regional se puede considerar que la densidad de población (Total de población/área total) representa un valor medio y ese valor se compara con la población afectada en el área aportante y se define si es valor alto, medio o bajo.

### 3.3.3 Estimación de la Vulnerabilidad

Para la construcción de este indicador, existen varias propuestas detalladas en INH (2021) que se basan en índices asociados al grado de susceptibilidad a la erosión (Richardson and Huber, 1991 y Shirole and Loftus, 1992; citados por INH, 2021) a la inestabilidad vertical producto de la interacción flujo-estructura (Tartaglia et al, 2002; citado por INH, 2021) y a la vulnerabilidad hidráulica considerando factores hidrológicos, geotécnicos, geomorfológicos, hidráulicos (velocidades, alturas y transporte de sedimentos del flujo) y geométricos del puente ( Farias, 2008; citado por INH, 2021). A través de la combinación de estos índices se define la vulnerabilidad hidráulica del puente como alta, media o baja.

En Arclim (<https://www.cr2.cl/arclim/>) se define la vulnerabilidad media  $V_m(T)$  a través de la comparación de la vulnerabilidad  $V(T)$  asociada al período de retorno de diseño de todos los elementos ( $E_i$ ) de la infraestructura.

$$V(T) = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{diseño} < T_{evaluación} \\ 0 & \text{si } T_{diseño} \geq T_{evaluación} \end{cases}$$

$$V_m(T) = \sum V(T)_{i(0.1)} * E_i / \sum E_i \quad (3.10)$$

### 3.3.4 Estimación del Riesgo

Finalmente, el riesgo se define como el producto de la Amenaza, la Exposición y la Vulnerabilidad media, habiendo previamente considerado criterios cualitativos de las variables: Muy Baja, Baja, Media, Alta, Muy Alta o Baja, Moderada, Alta, Severa y Muy Severa.

Cuando se ha considerado el cambio climático en el diseño se estima que debido a la incertidumbre asociada a los escenarios futuros que pueden ocurrir es conveniente considerar un factor multiplicativo  $k \leq 1$  para esa situación.

$$\text{Riesgo} = k * f(\text{Amenaza}, \text{Exposición}, \text{Vulnerabilidad}) \quad (3.11)$$

## 3.4 Metodología para la incorporación de cambio climático

### 3.4.1 Selección de GCMs según propósitos del estudio

La selección de los Modelos Climáticos Globales (GCMs) depende del objetivo del estudio y de los indicadores de rendimiento utilizados para evaluar los modelos. No existe un criterio universalmente aceptado para la evaluación de los GCMs, la elección del enfoque de selección y la escala temporal a la que se realiza la evaluación del rendimiento varía según los estudios (Ahmed et al., 2019; Raju & Kumar, 2020; Ruane & McDermid, 2017). Algunos clasifican los GCM en función de la media espacial del área, mientras que otros consideran el rendimiento de los GCM en todos los puntos de la cuadrícula que cubren el área de estudio (Ahmed et al., 2019). Sin embargo, la selección de GCMs basada en el rendimiento en puntos concretos de la cuadrícula de una región, no garantiza su capacidad para simular patrones espaciales del clima regional.

La elección de métricas adecuadas, especialmente para la precipitación, es un reto debido a las diferencias entre los modelos climáticos. Para hacer frente a este reto, se utilizan varios métodos, incluido el análisis de los ciclos anuales y los patrones espaciales.

#### Índice de Rendimiento Histórico

Un método eficaz es el Índice de Rendimiento Histórico (PPI, Ecuación 3.12, (Gateño et al., 2023)). El PPI ofrece un marco completo para evaluar las simulaciones mensuales de precipitaciones y temperaturas en los modelos climáticos, con el objetivo de mejorar la precisión de las proyecciones climáticas anuales y estacionales. El PPI se basa en diversos criterios, como las medias climatológicas, la variabilidad interanual, los ciclos estacionales, las distribuciones probabilísticas mensuales y los patrones espaciales de las medias climatológicas. Este índice admite métricas adicionales y ajustes de ponderación, facilitando la clasificación y el diagnóstico de los GCMs en un diagrama conciso que evalúa tanto el rendimiento de las precipitaciones como el de las temperaturas.

$$PPI_{k,m,n} = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^{N=5} S_k^2 (1 - M_{k,m,n})^2} \quad 3.12$$

donde  $PPI_{(k, n, m)}$  es el Índice de Rendimiento Pasado obtenido por el modelo climático  $n$  con el método de escalamiento  $m$  para la variable climática  $k$  (precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima),  $M_{(k, m, n)}$  es el valor de la métrica asociada a medias climatológicas, la variabilidad interanual, los ciclos

estacionales, las distribuciones probabilísticas mensuales y los patrones espaciales de las medias climatológicas, obtenidas por el modelo n con el método m para la variable climática k, y  $S_k$  es un factor que amplifica  $M_{(k, m, n)}$ , siendo mayor el valor de  $S_k$ , mayor influencia del índice. El PPI puede tomar valores entre  $-\infty$  y 1,0, donde  $PPI = 1,0$  indica que el GCM representa perfectamente los cinco aspectos de la climatología histórica.

### Distancia Euclidiana

El rendimiento conjunto para la precipitación y temperaturas se caracteriza mediante una Distancia Euclidiana (Ecuación 3.13) a los valores óptimos de  $PPI_{Pr} = 1$ ,  $PPI_{tasmax} = 1$  y  $PPI_{tasmin} = 1$ .

$$ED_{m,n} = 1 - \sqrt{(1 - PPI_{Pr})^2 + (1 - PPI_{tasmax})^2 + (1 - PPI_{tasmin})^2} \quad 3.13$$

Se considera un rendimiento satisfactorio del modelo climático con  $ED < 0,5$ , un rendimiento moderado con  $0,5 < ED < 1,0$ , y  $ED \geq 1,0$  indica un rendimiento deficiente.

### Índice de Impacto Climático Integrado

Por otro lado, para dar explicación sobre cómo el cambio climático afecta los patrones de precipitación y eventos climáticos extremos, es indispensable disponer de métricas que permitan evaluar el rendimiento de los GCMs a la hora de predecir eventos extremos húmedos. Estas métricas proporcionan información valiosa sobre los posibles cambios en la frecuencia, intensidad y distribución espacial de los eventos extremos húmedos, ayudando a desarrollar estrategias para mitigar sus impactos y mejorar la resiliencia frente al cambio climático. Jerez et al., (2023) proponen el Índice de Impacto Climático Integrado ( $CI^3$ , Ecuación 3.14) como métrica para la evaluación de eventos climáticos extremos húmedos. El índice compila las variables de precipitación máxima en 1 y 3 días, además de sus temperaturas asociadas, días húmedos consecutivos y aquellos días con precipitación sobre 50 mm. También, se consideran días asociados con procesos nivales. Gateño (2023) analiza los métodos de corrección estadística según el rendimiento de i) reproducción de eventos extremos, ii) climatología promedio y iii) coherencia intervariable. En relación con el primer criterio se incluyen variables asociadas a eventos extremos húmedos, fríos y cálidos, por lo que su aplicación implica comprender el impacto general de eventos climáticos extremos en una región. En consecuencia, si el objetivo es comprender el impacto específico de un evento extremo, por ejemplo, precipitaciones extremas desencadenantes en inundaciones, será más útil evaluar los eventos por separado. Así también es necesario tener en cuenta que los eventos difieren en términos de su distribución espacial y temporal.

$$CI_{m,n}^3 = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^{N=8} S_k^2 (1 - r_{S_k, m, n})^2} \quad 3.14$$

donde  $CI_{m,n}^3$  es el Índice Integrado de Impacto Climático obtenido por el modelo n con el método m,  $r_{S_k, m, n}$  es el valor de la correlación de Spearman obtenido por el modelo n con el método m para el índice climático k, y  $S_k$  es un factor que amplifica  $r_{S_k, m, n}$ , siendo a mayor el valor de  $S_k$ , mayor la influencia en el índice. El  $CI^3$  puede tomar valores entre  $-\infty$  y 1,0, donde  $CI^3 = 1,0$  indica que el GCM representa perfectamente los ocho índices climáticos en la climatología histórica analizada. Un rendimiento aceptable considera  $CI^3 \geq 0,4$ .

El presente estudio considera dos criterios de selección. Primero, se estudia la climatología histórica con el Índice de Rendimiento Histórico (PPI, Gateño et al., (2023)), donde tanto para precipitaciones como

temperaturas se debe cumplir la condición  $PPI \geq 0,5$ , siendo éste el valor mínimo del rango de desempeño aceptable. Seguidamente, se evalúa el Índice de Impacto Climático Integrado ( $CI^3$ , Jerez et al., (2023)) para evaluar el desempeño de los GCMs en la representación de eventos extremos húmedos.

### 3.4.2 Selección de escenarios climáticos

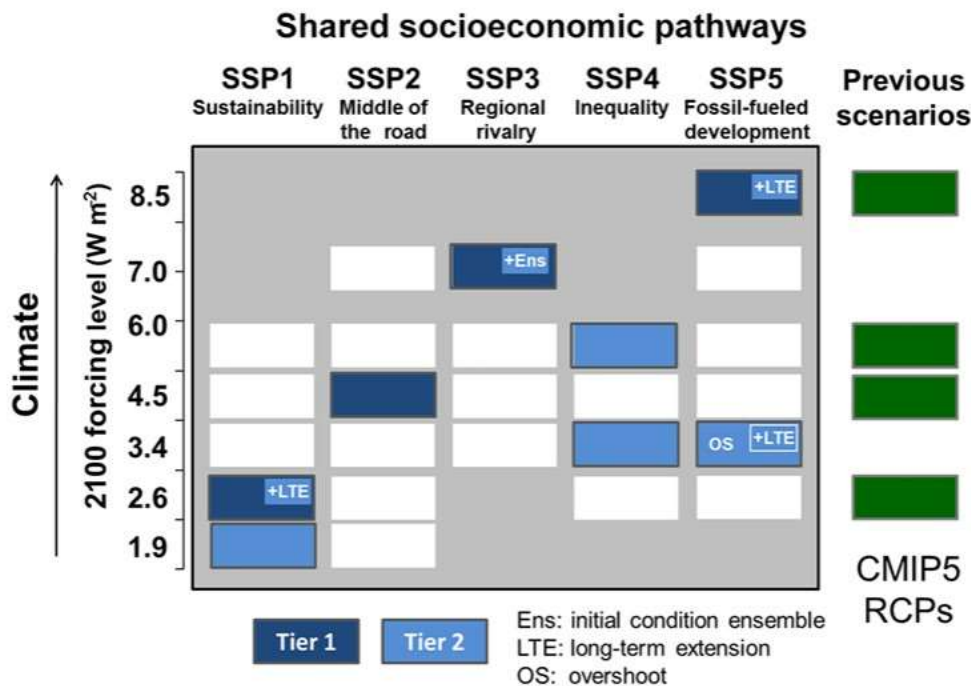
Las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) representan diferentes desarrollos socioeconómicos y diferentes trayectorias de concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero para el siglo XXI. Ofrecen una visión más amplia de un mundo sin políticas climáticas futuras, con un calentamiento global en 2100 que varía desde 3,1°C hasta 5,1°C por encima de los niveles preindustriales. Los escenarios están integrados en conjunto con proyecciones cuantitativas de los principales impulsores socioeconómicos, es decir, población, economía y urbanización; además de, proyecciones de energía, uso de la tierra y emisiones asociadas a los GEI. Los escenarios se dividen en cinco vías (Tabla 3.5), que van desde un escenario optimista que cumple con el objetivo del Acuerdo de París de mantener el calentamiento global en torno a 1,5°C, hasta un escenario que alcanza un calentamiento de 4,4°C para el año 2100.

Los escenarios de la Tabla 3.5 responden a casos de referencia para la mitigación, los impactos climáticos y los análisis de adaptación. Es decir, los SSP no consideran la respuesta del sistema climático sobre sus impulsores clave (e.g., impactos socioeconómicos y políticos). Luego, tal como se indica en párrafos anteriores, los SSP se combinan con nueva versión de los RCP siendo ésta la primera aplicación integral de una matriz de escenarios desde la perspectiva de la mitigación de emisiones (Figura 3.3).

**Tabla 3.5: Descripción general de las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP). Adaptado de (Riahi et al., 2017).**

Escenario	Trayectoria		
	Nombre	Descripción	Narrativa
SSP1	Sostenibilidad	Tomando el camino verde (bajos desafíos para la mitigación y adaptación)	Esta vía tiene una baja intensidad de recursos, una menor dependencia de la energía fósil y un elevado progreso tecnológico. La prevención de la degradación medioambiental es una prioridad. La internalización de las economías dentro de los países, especialmente los de bajos ingresos, se ha desarrollado rápidamente y ha reducido la pobreza.
SSP2	A la mitad del camino	Desafíos medianos para la mitigación y la adaptación	Vía intermedia con retos intermedios derivados del cambio climático. Los países han reducido continuamente la intensidad del uso de la energía y han avanzado hacia los objetivos de desarrollo sostenible, de acuerdo con las tendencias de desarrollo típicas de las últimas décadas.
SSP3	Rivalidad regional	Un camino rocoso (grandes desafíos para la mitigación y la adaptación)	Vía desafiante con importantes retos del cambio climático relacionados con la adaptación y la mitigación. Las políticas cambian y se orientan en cuestiones de seguridad nacional, producto de la competitividad y conflictos regionales. El desarrollo económico es lento, y el consumo de materiales intensivo, donde las desigualdades entre países se agravan con el tiempo. Existe una baja preocupación internacional para abordar políticas climáticas, los que genera una fuerte degradación ambiental en algunas regiones del planeta.
SSP4	Desigualdad	Un camino dividido (bajos desafíos para la mitigación, altos	Vía dividida y desequilibrada en la que los países deben adaptarse mayoritariamente a los desafíos. Existe desigualdad y estratificación de los países como dentro de ellos, producto de las inversiones altamente desiguales en

Escenario	Trayectoria		
	Nombre	Descripción	Narrativa
		desafíos para la adaptación)	capital humano, económico y poder político. La sociedad esta fragmentada en sectores de bajos ingresos y poca educación que trabajan en una economía basada en la mano de obra y de baja tecnología.
SSP5	Desarrollo impulsado por combustibles fósiles	Tomando la carretera (grandes desafíos para la mitigación, bajos desafíos para la adaptación)	Vía de desarrollo tradicional que se centra en los retos de la mitigación. Los países confían cada vez más en los mercados competitivos, la innovación y las sociedades participativas para producir un rápido progreso tecnológico y el desarrollo del capital humano como el camino hacia el desarrollo sostenible. Al mismo tiempo, el impulso por el desarrollo económico y social se combina con la explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles y la adopción de estilos de vida intensivos en recursos y energía en todo el mundo.



**Figura 3.3:** Matriz de escenarios SSP-RCP de las ilustraciones del Proyecto de Intercomparación de Modelos de Escenarios (ScenariMIP). Cada celda representa la combinación entre una vía socioeconómica compartida y un resultado representativo de un determinado forzamiento. El color azul identifica los escenarios prioritarios para el diseño experimental del proyecto, siendo identificados como Tier 1 (Nivel 1), mientras que Tier 2 es el Nivel 2 y las celdas en blanco representan los escenarios para los que la información climática procedería de las simulaciones CMIP5 o CMIP6. Figura de (O'Neill et al., 2016).

Riahi et al. (2017) indican que los niveles de forzamiento radiativo de la Figura 3.3 entre los SSP y RCP. De forma particular, los escenarios del Nivel 1 comprenden una amplia gama de incertidumbre en las futuras vías de forzamiento climático y socioeconómico, así también, son buenas comparaciones con los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, desarrollados en CMIP5.

El presente estudio evalúa dos escenarios con distinto forzamiento radiativo, siendo estos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Las razones de selección se justifican por la narrativa que describe cada uno. A continuación, se identifica cada escenario.

- SSP2-4.5: representa la parte media de las vías de forzamiento y es un escenario de interés para otros MIP del CMIP6 (e.g., CORDEX, Proyecto de Predicción del Clima Decenal y MIP de Detección y Atribución). Se selecciona SSP2 por el uso de las tierras y su baja intensidad en el uso de aerosoles en comparación a otros escenarios, así también es relevante en la Evaluación de Modelos Integrados (IAM) dado que combina la vulnerabilidad social intermedia con un nivel FR intermedio (CODELCO, 2023).
- SSP5-8.5: es el extremo superior de la gama de trayectorias futuras de la IAM. Se selecciona SSP5 para la vía de forzamiento  $8.5 \text{ Wm}^{-2}$ , debido a que es el único escenario SSP con emisiones suficientemente altas como para producir dicho forzamiento (CODELCO, 2023).

Se apoya también esta decisión en lo que indican estudios como el desarrollado en Mataquito en Licantén (Centro de Cambio Global UC et al., 2013) donde, para el futuro cercano 2020-2060, el escenario RCP 4.5 es más desfavorable, mientras que en el futuro lejano es más desfavorable el escenario 8.5, al considerar el período de retorno 100 años.

### 3.4.3 Selección de ventanas de cambio climático

Para seleccionar las ventanas de proyección climática adecuadas, es importante considerar el período de tiempo relevante para el análisis o la aplicación específica. En general, se recomienda utilizar períodos de tiempo de al menos 30 años para reducir el impacto de la variabilidad natural del clima. Sin embargo, debido al cambio climático, nos encontramos frente a un clima variable y los períodos de 30 años pueden no ser representativos de las condiciones climáticas futuras. Por lo tanto, algunos estudios sugieren el uso de ventanas de tiempo móviles para analizar la variabilidad del clima, así también el análisis de períodos de tiempo más cortos, como 10 o 20 años, para capturar mejor la variabilidad natural del clima y las tendencias a corto plazo. Considerando que lo usual en el diseño de puentes es considerar una vida útil de 50 años, se adoptan, en este estudio, las ventanas de 30 años desde 2030 a 2060 y 2040 a 2070.

### 3.4.4 Escalamiento espacial

El escalamiento espacial hace referencia al cambio de resolución espacial de los datos geoespaciales de una escala a otra. Esto puede ser desde una escala más fina a una más gruesa (agregación) o de una escala más gruesa a la una escala más fina (desagregación). El objetivo del escalamiento espacial es la obtención de datos a una escala adecuada (ej, escala de cuenca, producto observacional). En consecuencia, la interpolación espacial no entrega más información y/o precisión que la disponible por el modelo climático, siendo necesario aplicar un proceso de corrección de sesgo dinámico o estadístico de las variables climáticas.

### 3.4.5 Corrección de sesgo (escalamiento estadístico) usando MBCn

El método de corrección de sesgo multivariado n-dimensional (MBCn) es una técnica utilizada para corregir el sesgo de precipitaciones y temperaturas considerando la relación entre dichas co-variables (Cannon, 2018a, 2018b). MBCn es una generalización multivariada del método de asignación de cuantiles que transfieren todos los aspectos de una distribución multivariada continua observada a la distribución multivariada correspondiente de las variables de un modelo climático.

El método MBCn se basa en aplicar transformaciones matriciales a las series históricas de los modelos climáticos, buscando mantener la correlación entre datos de precipitación y temperaturas observadas (Dionizis et al., 2021). El método utiliza una transformación n-dimensional de las funciones de densidad de probabilidad de las variables, aplica una transformación ortogonal a las observaciones y modelos, con objetivo de corregir las distribuciones marginales (Cannon, 2018). Finalmente, se aplica una transformación inversa para volver al espacio original (Dionizis et al., 2021). Este grupo de consultores aplica el código de acceso libre disponible en el paquete MBC<sup>2</sup> (Cannon, 2018) implementado en la plataforma R<sup>3</sup>.

### 3.4.6 Verificación del proceso de corrección de sesgo

Las simulaciones de CMIP6 corregidas con el método MBCn y seleccionadas según los criterios establecidos en la sección 3.4.1, son contrastadas con las observaciones de las estaciones patrón, verificándose en función de diversas métricas y escalas de tiempo. En relación con las métricas se puede calcular la amplitud y desviación de la precipitación y temperatura, como también, sus valores medios y máximos, para posteriormente evaluar los errores de las simulaciones en relación con las observaciones con la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), Coeficiente de Determinación (R<sup>2</sup>), Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Respecto de las escalas de tiempo, se sugiere evaluar escalas mensuales, anuales y estacionales.

## 3.5 Estimación de la línea de nieves

Un punto crítico para el estudio de crecidas es la determinación de la línea de nieves. Acorde al Manual DGA de crecidas de 1995, la línea de nieves se basa en el estudio de Peña y Vidal (1993) como también en el estudio de Escobar y Vidal (1992). Lo anterior presenta la falencia de estar desactualizada a la fecha de emisión del presente documento. La línea de nieves planteada por los autores anteriores corresponde a un método determinístico.

A continuación, se plantean tres metodologías para la determinación de la línea de nieves, a fin de realizar una comparación entre dichas metodologías y adoptar un valor representativo y conservador.

Como primer método de estimación histórico, con objeto de plantear una metodología actualizada para la determinación de la línea de nieves, se consulta el trabajo de Covian y Stowhas (2016), donde se explora la relación de la línea de nieves en base a la latitud de las cuencas y la probabilidad de excedencia. La propuesta metodológica del consultor corresponde a adoptar una probabilidad de excedencia del 25%, abarcando el cuartil más desfavorable cuando se considera que existe un evento de precipitación.

Como segundo método de estimación histórico, se contempla consultar los registros de línea de nieves estimados en base a procesamiento de imágenes satelitales MODIS, específicamente del satélite AQUA. Estos datos se encuentran previamente procesados en la plataforma del Observatorio Andino (<https://observatorioandino.com/nieve/>), iniciativa liderada en Chile por el Centro para la investigación del clima y la resiliencia (CR2) dependiente de la Universidad de Chile y se encuentran disponibles de manera gratuita para cuencas pilotos de Chile Central. Esta base de datos presenta observaciones procesadas desde el año 2000 hasta 2023. La serie de tiempo de elevaciones de la línea de nieves presenta una resolución diaria. Acorde a lo anterior, se determinarán las principales propiedades estadísticas de la

---

<sup>2</sup> <https://cran.r-project.org/web/packages/MBC/index.html>

<sup>3</sup> <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>

línea de nieves agrupada a nivel mensual, determinando en cada mes las probabilidades de excedencias 90%, 75%, 50%, 25% y 10%. Posteriormente, y basado en el análisis mensual, se realizará un análisis de líneas de nieves agregadas a nivel trimestral, caracterizando con especial cuidado los trimestres en los cuales se detectan históricamente los máximos de precipitación. Igualmente se procesarán los valores asociados a días de ocurrencia de la precipitación máxima diaria de cada año.

Finalmente, como tercer método de estimación histórica, se realizarán estimaciones basadas en las temperaturas durante las tormentas máximas anuales y gradientes verticales altitudinales. Para lo anterior, se deberá correlacionar la altura de la línea de nieves con la isoterma 0, donde la línea de nieves queda definida como isoterma 0-300 metros, según Garreaud (1993). La relación anterior determinará la cota de la línea de nieves en función de la temperatura de la estación patrón, por lo que, teniendo las proyecciones de temperatura, asociadas a cambio climático en la estación patrón, se podrá proyectar la cota de la línea de nieves.

Se realizará un análisis de sensibilidad de los resultados, adoptando fundadamente los valores de cota de línea de nieves que reporten cotas similares a los valores históricos reportados en la plataforma del Observatorio Andino.

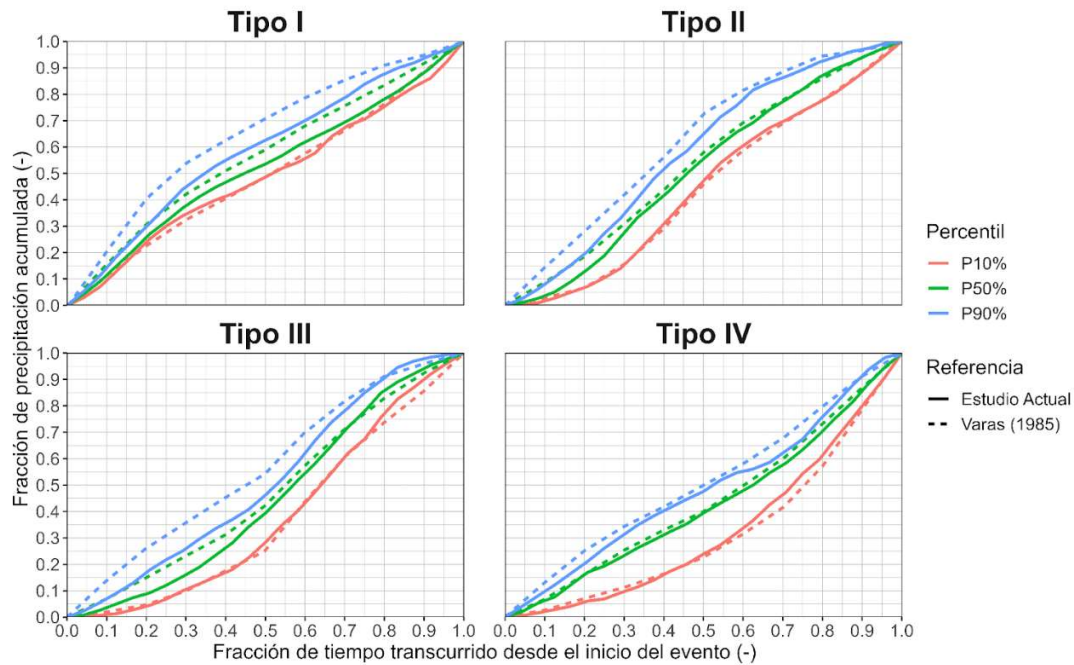
### 3.6 Selección de modelo precipitación-escorrentía

#### 3.6.1 Distribución temporal de precipitación

Para seleccionar el modelo precipitación - escorrentía, es fundamental tener en consideración la información disponible. Para determinar el caudal máximo instantáneo se necesitan datos subdiarios de la precipitación y, en particular, a intervalos inferiores al tiempo de concentración de la cuenca aportante. Considerando que la disponibilidad de dicha información es escasa se propone replicar la metodología de Varas (1985) para estimar distribuciones de precipitación representativas de la zona de estudio y la duración de la tormenta.

Para dichos efectos se considera en primer lugar los datos diarios del producto CR2Met validado según lo indicado en 3.2.3. Usando las distribuciones horarias derivadas del reanálisis ERA5 se determinan los patrones de distribución temporal característicos por duración (2, 4, 6, 12 y 24 hrs). Como ejemplo, en la Figura 3.4 se comparan las distribuciones de Varas con la metodología propuesta para lluvias de duración de 24 horas.

## Distribuciones de precipitación propuestas Tormentas con duración de 24 hrs



**Figura 3.4:** Comparación de distribuciones de Varas con las propuestas obtenidas de ERAS.

Considerando que en la mayoría de las cuencas de estudio no existe información fluviométrica que permita calibrar un modelo de simulación hidrológica, se propone utilizar el tradicional método del Hidrograma Unitario usando el método de la Curva Número para determinar el hietograma de precipitación efectiva asociado a las lluvias de distinta duración y período de retorno de interés.

### 3.6.2 Determinación del tiempo de concentración

En la tabla 3.6 se señalan las fórmulas tradicionalmente utilizadas para el cálculo del tiempo de concentración que se describen en el Manual de Carreteras.

**Tabla 3.6:** Fórmulas propuestas para la determinación del tiempo de concentración en las cuencas.

Autor	Expresión	Comentarios	VARIABLES
Kirpich	$T_c = 0,066 \left( \frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,77}$	Desarrollada a partir de cuencas rurales con pendientes de 3 a 10%	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce o drenaje principal (km) S: pendiente representativa de la cuenca (m/m)
California Highways	$T_c = 0,95 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	Para cuencas montañosas	H <sub>m</sub> : desnivel entre la cota media de la cuenca y la cota de salida (m)
Normas Españolas	$T_c = 0,3 \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}}$		H: desnivel entre cotas extremas (m)
Giandotti	$T_c = \frac{4A^{0,5} + 1,5L}{0,8 (H_m)^{0,5}}$	$\frac{L}{3,6} \geq T_c > \frac{L}{5,4}$	A: Área aportante (km <sup>2</sup> )

### 3.6.3 Coeficientes de duración (CD)

Considerando que las observaciones disponibles hacen referencia a valores de precipitación diaria (i.e., registradas de 8 a.m. a 8 a.m.) resulta necesario estimar coeficientes que permitan transformar la máxima precipitación diaria en la máxima precipitación en un bloque de, por ejemplo, 24 horas. Dichos coeficientes, denominados “Coeficientes de Duración” (CD), se estiman a partir de las series horarias derivadas del reanálisis ERA5 e interpoladas espacialmente a las coordenadas definidas por las estaciones de referencia o patrón. A partir de dichas series, para cada estación se identifican de manera independiente los eventos de máxima precipitación anual en bloques de diferentes duraciones, los cuales se contrastan con los valores de máxima precipitación diaria anual (i.e., agregadas temporalmente de 8 a.m. a 8 a.m.) para efecto de estimar un CD tal que se cumpla la relación propuesta en la ecuación (3.15). Allí,  $P_d$  corresponde a la máxima precipitación diaria anual, mientras que  $CD(D)$  es el coeficiente de duración asociado a “D” hrs.

$$P(D \text{ hrs}) = CD(D \text{ hrs}) * P_d \quad (3.15)$$

A modo de ejemplo, la Figura 3.5 muestra el cálculo del coeficiente de duración para 24 hrs asociado a la estación Ancoa Embalse. En términos prácticos, el CD estimado permite realizar la transformación de máxima precipitación diaria ( $P_d$ ) a máxima precipitación en 24 hrs ( $P_{24h}$ ), variable requerida para efecto del estudio de crecidas. Los resultados para el caso del ejemplo muestran un CD estimado de 1,14, cercano al valor 1,13 sugerido en el Manual de Cálculo de Crecidas (DGA, 1995). No obstante, para el dominio de estudio existen estaciones de referencia que presentan valores mayores, los cuales serán presentados en acápite posterior, dejando en evidencia la importancia de los análisis a nivel local y las precauciones que se deben tener al momento de extender el uso de coeficientes ajustados a una zona específica o recomendados en la literatura. Cabe mencionar que este método permite el análisis de las máximas precipitaciones que ocurren en bloques efectivos de la duración requerida (i.e., las 24 hrs pueden estar distribuidas en dos días e iniciar en cualquier hora y no se restringe a un día particular).

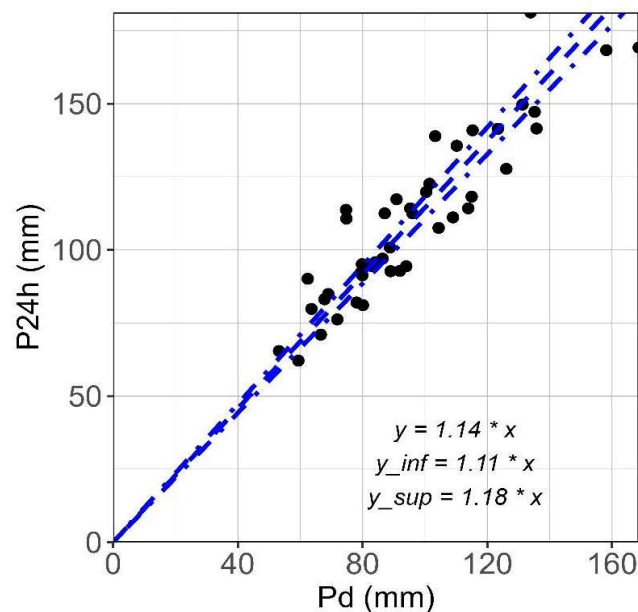


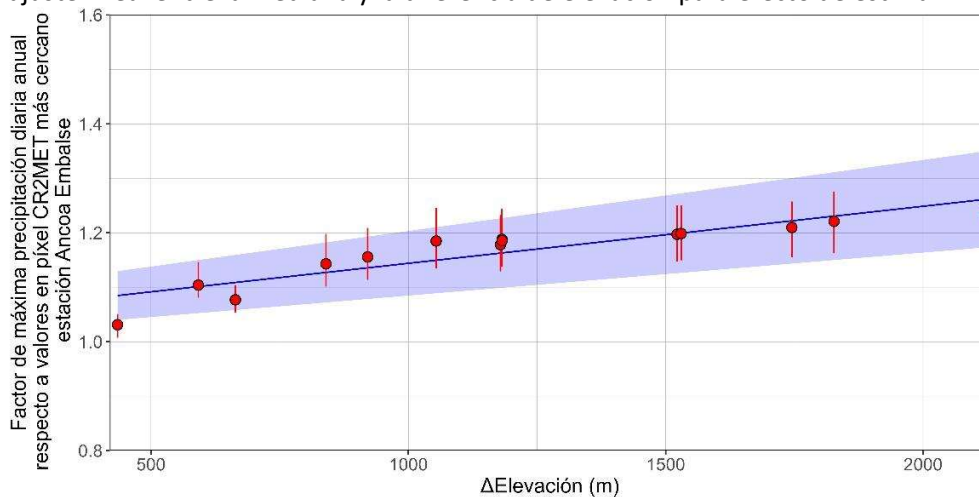
Figura 3.5: Ejemplo de estimación de coeficiente de duración para precipitaciones máximas en 24 hrs asociadas a la estación Ancoa Embalse.

### 3.6.4 Precipitación máxima de duración D asociadas a diversos períodos de retorno T

Usando la serie de máximas precipitaciones de duración D estimada en la celda de la estación patrón considerada para la cuenca (i.e.,  $CD * Pd$ ), se estima la precipitación sobre la cuenca para la tormenta máxima de cada año para dicha duración. Para ello se considera un coeficiente de transferencia espacial vinculado a la diferencia de elevación entre la estación patrón y la cota de interés. Lo anterior, a modo de ajustar la precipitación observada y extrapolarla a la cuenca de interés preservando los gradientes altitudinales de CR2Met. Para ello se propone la ecuación (3.16), la cual permite vincular la precipitación en una determinada cota respecto a la estación patrón. Allí  $H_0$  corresponde a la elevación de la estación patrón,  $P(H_0)$  es la precipitación registrada en la estación patrón,  $H$  es la elevación en la cual se busca estimar la precipitación, FTE es el factor de transferencia espacial ajustado y  $n$  el coeficiente de posición del ajuste.

$$P(H) = P(H_0) * [FTE * (H - H_0) + n] \quad (3.16)$$

A modo de ejemplo, la Figura 3.6 ilustra la forma en que se estiman los factores de transferencia espacial por elevación. Dados los píxeles CR2Met asociados a la cuenca de interés, se estima para cada año la razón entre la máxima precipitación en el píxel respecto al valor reportado en la estación (i.e.,  $P_{\text{Píxel}}/P_{\text{Estación}}$ ). De allí se estima la mediana, y los percentiles 25 y 75% para representar la dispersión de los factores, y se realiza un ajuste lineal entre la mediana y la diferencia de elevación para efecto de estimar FTE y  $n$ .



**Figura 3.6: Ejemplo de estimación de factor de transferencia espacial por elevación de la máxima precipitación registrada en la estación patrón Ancoa Embalse y la cuenca Chupallar. Puntos en rojo representan la mediana de los valores estimados por píxel, mientras que las barras representan el percentil 25 y 75%.**

Se adopta este enfoque de manera tal de vincular el factor de transferencia espacial con la posición de la línea de nieve, la cual varía para cada evento de máxima precipitación anual identificado en el periodo de estudio. De este modo, para efectos del Análisis de Frecuencia (AF) se propone estudiar el “volumen pluvial aportante de la tormenta”, el cual corresponde a la ponderación entre la precipitación media sobre la cuenca ajustada según los factores de banda de elevación hasta la posición de la línea de nieve (i.e., aplicación de ecuación 3.16 combinada con curva hipsométrica de cada cuenca) y el área pluvial aportante asociada.

Del Análisis de Frecuencias para la serie de volúmenes de precipitación aportantes en el punto de salida de la cuenca se seleccionan las distribuciones de mejor ajuste en cada cuenca derivadas de aplicar las pruebas estadísticas Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov, y las métricas determinísticas del coeficiente

de correlación de Pearson y Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Para el análisis de los valores históricos y proyectados de caudal asociadas a los períodos de retorno de diseño de interés (T=100 y 150 años) estimándose conveniente comparar los valores estimados para áreas predeterminadas en cada cuenca, asociadas a dos líneas de nieve específicas escogidas previamente.

Tomando en cuenta que la implementación de los hidrogramas unitarios sintéticos requiere de valores de precipitación y no volumen, se transforma el volumen pluvial aportante asociado a los periodos de retorno de 100 y 150 años respecto al área aportante asociada a una posición de línea de nieve ubicadas a 1830 y 2350 m s.n.m., las cuales se seleccionan considerando su probabilidad de recurrencia durante eventos de máxima precipitación en el periodo histórico. Mayor detalle se presenta en el acápite 4.9.

### 3.6.5 Determinación de la lluvia efectiva

Se propone utilizar el método de la curva número, CN, considerando la Cobertura de Suelo estimada específicamente para Chile Continental por Zhao et al. (2016) a una resolución de 30 metros, junto al producto que infiere el Grupo de Suelo Hidrológico a nivel global HYSOGs250m por Ross et al. (2018).

Siguiendo el procedimiento propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, se analiza el valor de la CN (II) según el tipo y cobertura de suelo para la condición de humedad antecedente normal y se plantea el valor para condición seca CN(I) y condición húmeda CN(III).

Se evaluará además la ocurrencia de dichas condiciones de humedad antecedente seca, normal, húmeda para determinar las probabilidades asociadas a cada duración de precipitación.

Una vez determinado el valor de CN se procede a estimar la precipitación en exceso que se considera igual a la precipitación efectiva.

### 3.6.6 Relación Precipitación-Escurrentía

El método del Hidrograma Unitario Sintético se basa en la regionalización de hidrogramas unitarios en cuencas piloto. Este método estima la escurrentía producida por 1 mm de precipitación en 1 km<sup>2</sup> de superficie. Naturalmente, la integral de dicho hidrograma, es decir, el volumen de escurrentía debe corresponder a 1000 m<sup>3</sup>

Para estimar la relación entre la precipitación y la escurrentía generada por dicho evento, se propone la utilización del Hidrograma Unitario Sintético (HUS) tipo Linsley recomendado en el Manual DGA (1995). Los parámetros que definen la forma del HUS y las fórmulas asociadas a la zona de interés, clasificada dentro de la Zona II, se resumen a continuación:

$$t_p = 0,323 \cdot \left( \frac{L \cdot L_g}{\sqrt{S}} \right)^{0,327} \quad (hr) \quad (3.17)$$

$$t_b = 1,822 \cdot (t_p)^{1,412} \quad (hr) \quad (3.18)$$

$$q_p = 522,514 \cdot (t_p)^{-1,511} \left( \frac{lt}{\frac{mm}{km^2}} \right) \quad (3.19)$$

Donde:

- $L_g$  [km]: Distancia desde el centroide de la cuenca al punto de salida de la cuenca
- $t_p$  [hr]: Tiempo al máximo
- $t_b$  [hr]: Tiempo base
- $q_p$  [lts/s/mm/km<sup>2</sup>]: Caudal máximo

Luego, los parámetros  $t_p$  y  $q_p$  permiten obtener el hidrograma unitario usando la distribución adimensional mostrada en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7: Hidrograma Unitario Adimensional.**

$t/t_p$ [-]	$q/q_p$ [-]
0,00	0,0
0,30	0,2
0,50	0,4
0,60	0,6
0,75	0,8
1,00	1,0
1,30	0,8
1,50	0,6
1,80	0,4
2,30	0,2
2,70	0,1

El hidrograma de escorrentía directa de la crecida se calcula en base a la siguiente expresión:

$$Q_n = \sum_i Pp_m U_{n-m+1} \quad (3.20)$$

Donde:

- $Q_n$  [m<sup>3</sup>/s]: Caudal en el intervalo  $n$
- $Pp_m$  [mm]: Precipitación efectiva en el intervalo  $m$
- $U_{n-m+1}$  [m<sup>3</sup>/s/mm]: Pulso unitario en el intervalo  $n$ , forzado por  $Pp$  caída en el intervalo  $m$

## 4 Cuencas de Estudio

Se realiza una reseña de los principales atributos de las cuencas de estudio.

### 4.1 Cuenca Puente Maitenhuapi

El puente Maitenhuapi se encuentra ubicado sobre las aguas del río Claro, en la ruta K-440 en la comuna de San Rafael que comunica con la ciudad de Talca (Imagen 4.1) y según antecedentes disponibles aguas arriba por ribera sur existe zona de extracción de áridos. A continuación, se presentan las principales características de la cuenca aportante al sector de interés, destacándose la delimitación de esta, sus parámetros geomorfológicos que permiten definir el tiempo de concentración y las características de tipo de suelo y su cobertura.



Imagen 4.1: detalle de ubicación del puente Maitenhuapi. Fuente Google Earth.



Imagen 4.2: Estado del puente Maitenhuapi luego de las crecidas del año 2023. Fuente: Presentación Dirección de Vialidad Cambio Climático Aplicación a Puentes.

#### 4.1.1 Delimitación de la Cuenca

La cuenca se delimita siguiendo las directrices expuestas en la metodología. La delimitación se basa en el DEM ASTER 1 arcosegundo. La delimitación se muestra en la Figura 4-1.

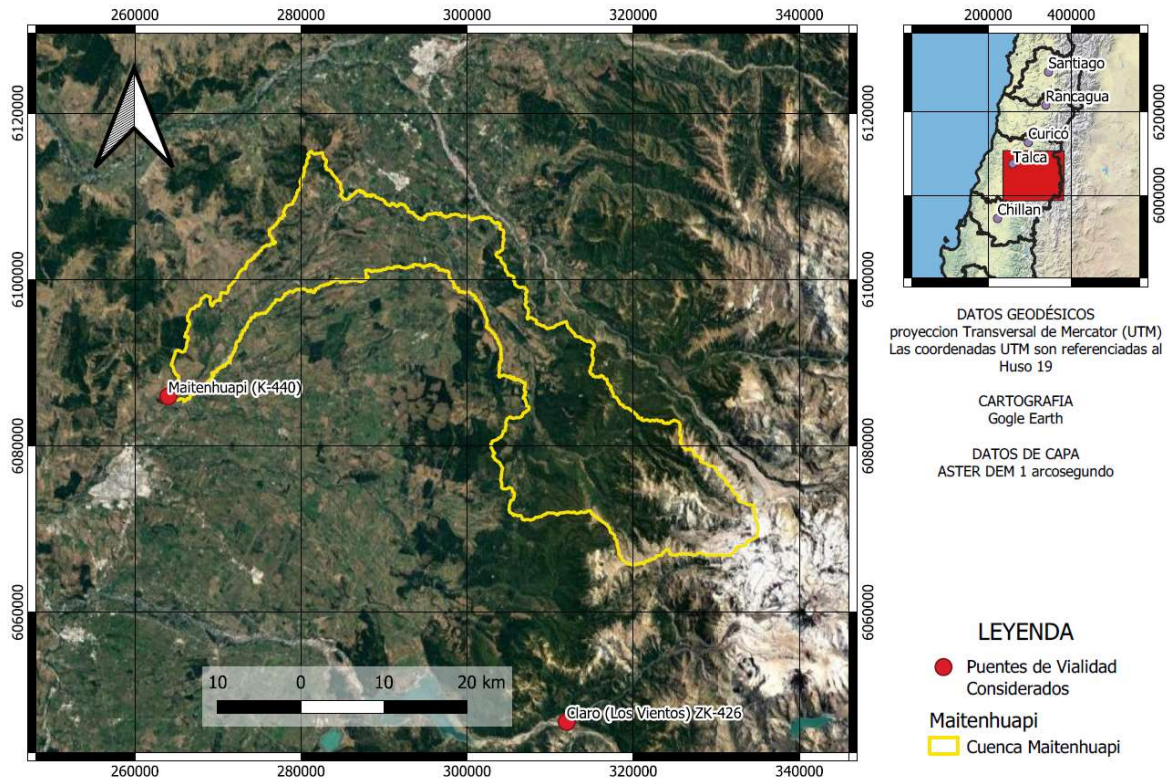


Figura 4.1: Delimitación de la cuenca de Maitenhuapi

#### 4.1.2 Parámetros Geomorfológicos

Los principales parámetros geomorfológicos, asociados a la delimitación de la cuenca previamente realizada se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Parámetros geomorfológicos, cuenca de Maitenhuapi**

Parámetro	Cuencas de Estudio	Unidad
	Maitenhuapi	
Área	885,599	[km <sup>2</sup> ]
Perímetro	315,452	[km]
Este Centroide	302973	[m]
Norte Centroide	6088797	[m]
Longitud del Cauce Principal	104,495	[km]
Cota Máxima	2653	[m.s.n.m.]
Cota 50%	640	[m.s.n.m.]
Cota Media	833	[m.s.n.m.]
Cota Mínima	105	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cuenca	14,88	[%]
Cota Inicio Cauce	2189	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cauce	0,020	[m/m]

#### 4.1.3 Tiempo de Concentración

El cálculo del tiempo de concentración con distintos métodos se muestra en la Tabla 4.2

**Tabla 4.2: Tiempos de concentración con distintas metodologías, Cuenca de Maitenhuapi**

Tiempos de Concentración Cuenca Completa [min]	Cuencas de Estudio	Unidad
	Maitenhuapi	
Kirpich	667	[min]
California Highways	635	[min]
Normas Españolas	885	[min]
Giandotti	766	[min]
Giandotti LB	1129	[min]
Giandotti UP	1693	[min]
Adoptado	729	[min]
Adoptado	12,2	[hrs]

#### 4.1.4 Cobertura de Suelo

Se extrae la cobertura del suelo según mapa de Zhao 2014. Las coberturas de suelo para la cuenca se muestran en la Figura 4.2 mientras que la partición por porcentajes se muestra en la Figura 4.3.

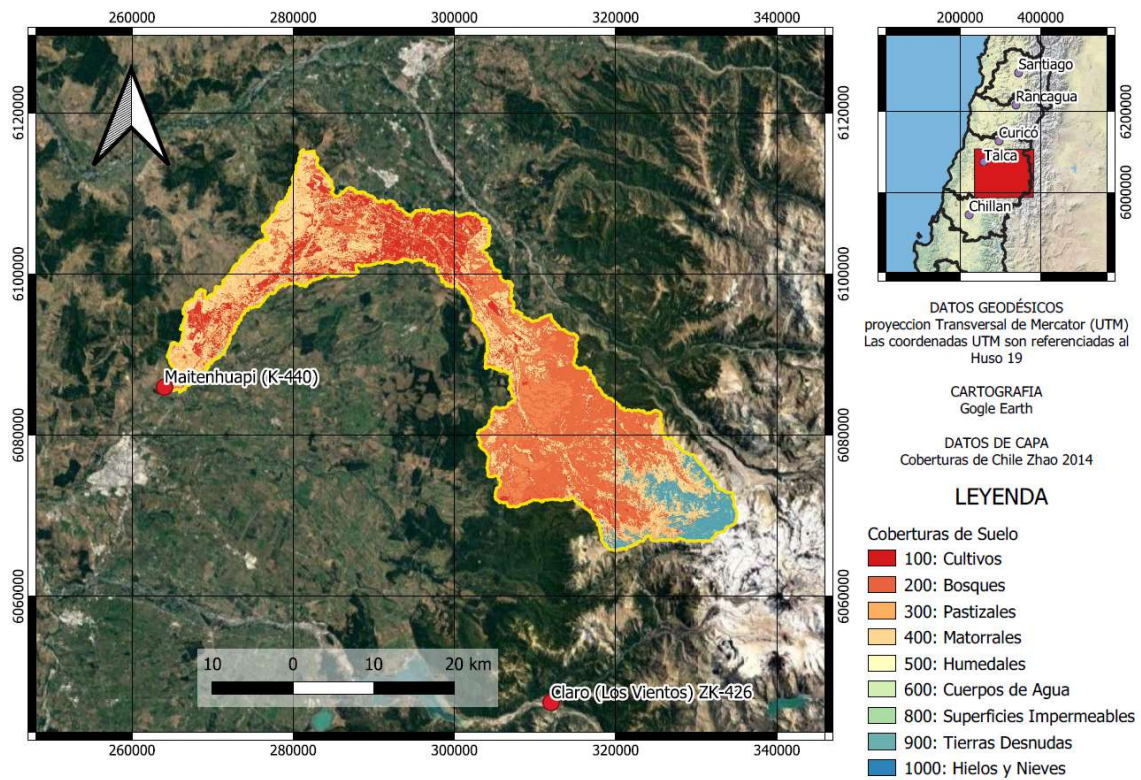


Figura 4.2: Cobertura de suelos en cuenca de Maitenhuapi

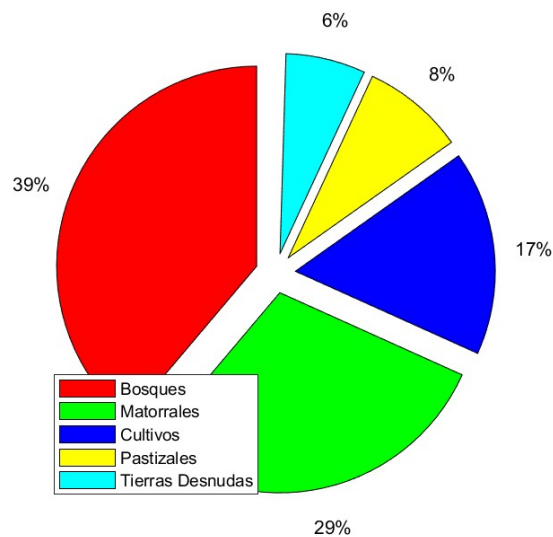


Figura 4.3: Porcentajes de coberturas de suelo para la cuenca de Maitenhuapi

#### 4.1.5 Tipo de Suelo

Se extrae el tipo de suelo según producto HYSOG 250 m. El tipo de suelo para la cuenca se muestra en la Figura 4.4.

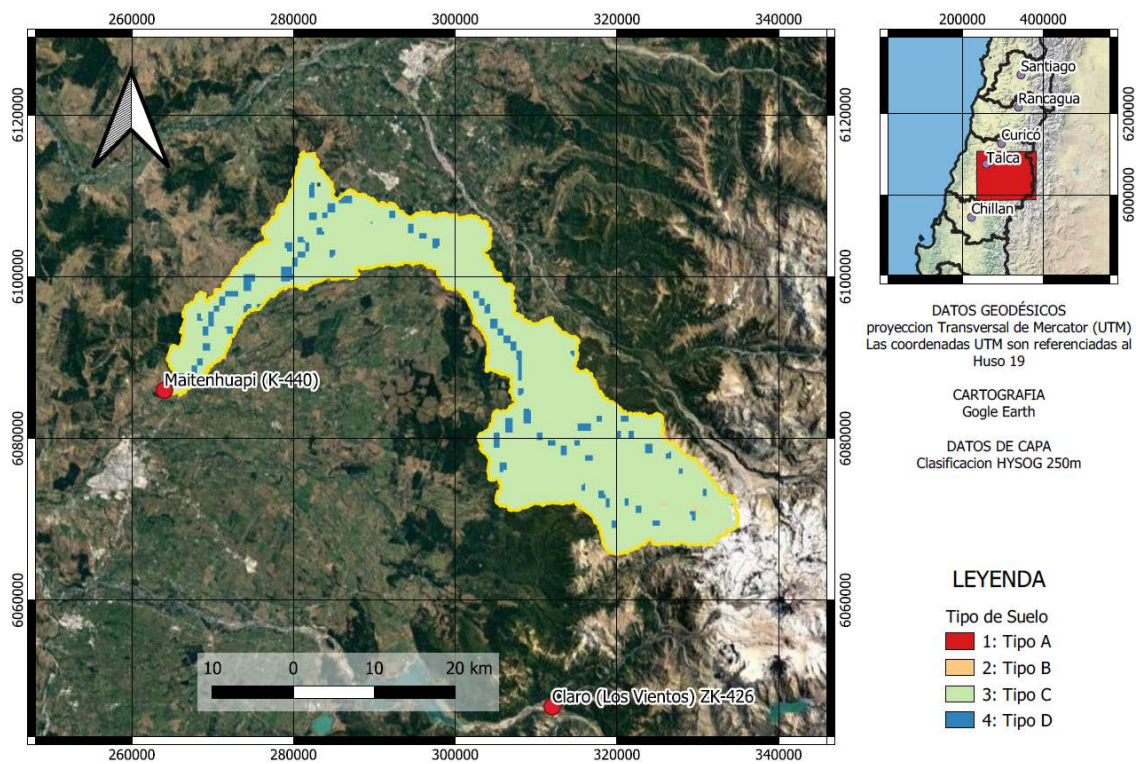


Figura 4.4: Tipo de suelos en cuenca de Maitenhuapi

#### 4.1.6 Curva Número Representativa

Se calcula la Curva Número representativa de la cuenca de estudio. El cálculo se expone en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3: Cálculo de la curva número para la cuenca de Maitenhuapi**

Tipo de Suelo	CN TIPO 3 [-]	Comentario desde TR-55	Tipo de Suelos	CN Ponderada
			[%]	[-]
Bosques	41	Tabla 2-2D TR-55, Oak Aspen, Condición Buena	39%	16
Matorrales	74	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condición Buena	29%	22
Cultivos	77	Tabla 2-2B TR-55, Row Crops, Condición Buena	17%	13
Pastizales	74	Tabla 2-2C TR-55, Pasture, Condición Buena	8%	6
Tierras Desnudas	87	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condición Pobre	6%	6
Cuerpos de Agua	100	-	0%	0
Superficies Impermeables	100	-	0%	0
SUMA	-	-	100%	62

## 4.2 Cuenca Puente Claro en Los Vientos

Este puente, tal como lo indica su nombre, se encuentra ubicado sobre el río Claro, en la comuna de San Clemente, en la ruta CH-115, que sube a la Laguna del Maule y el Paso Internacional Pehuenche, hacia Malargüe, Argentina (Imagen 4.3 e Imagen 4.4). Se emplaza en la confluencia del río Claro con estero Los Trichahues que se proyecta en diagonal hacia el puente. A continuación, se presentan las principales características de la cuenca aportante al sector de interés, destacándose la delimitación de esta, sus parámetros geomorfológicos que permiten definir el tiempo de concentración y las características de tipo de suelo y su cobertura.

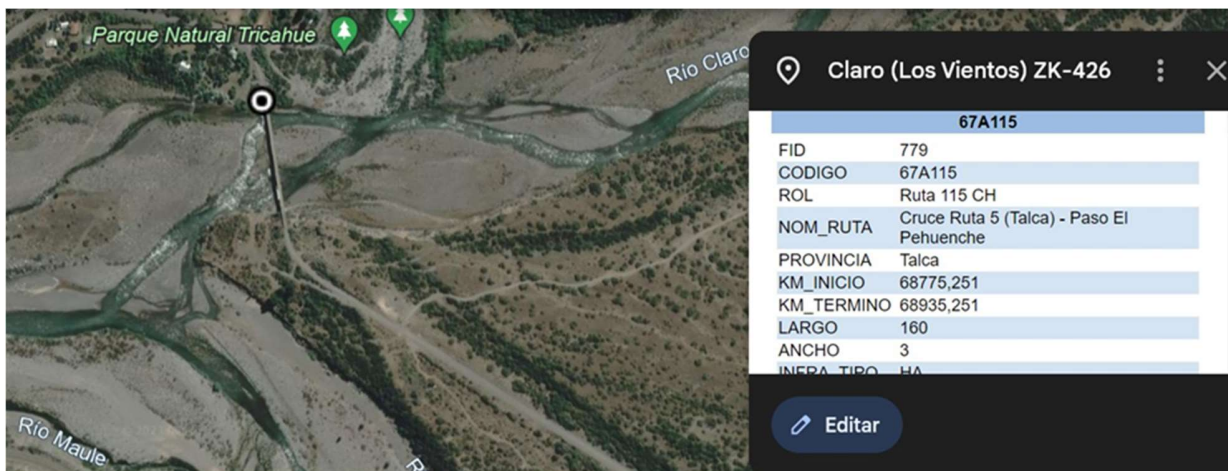


Imagen 4.3: detalle de ubicación del puente Claro en Los Vientos. Fuente: Google Earth según KMZ proporcionado por Dirección de Vialidad.



Imagen 4.4: Detalle del Puente Los Vientos luego de las crecidas del año 2023. Fuente: Informe de Emergencias Agosto 2023

#### 4.2.1 Delimitación de la Cuenca

La cuenca se delimita siguiendo las directrices expuestas en la metodología. La delimitación se basa en el DEM ASTER 1 arcosegundo. La delimitación se muestra en la Figura 4.5

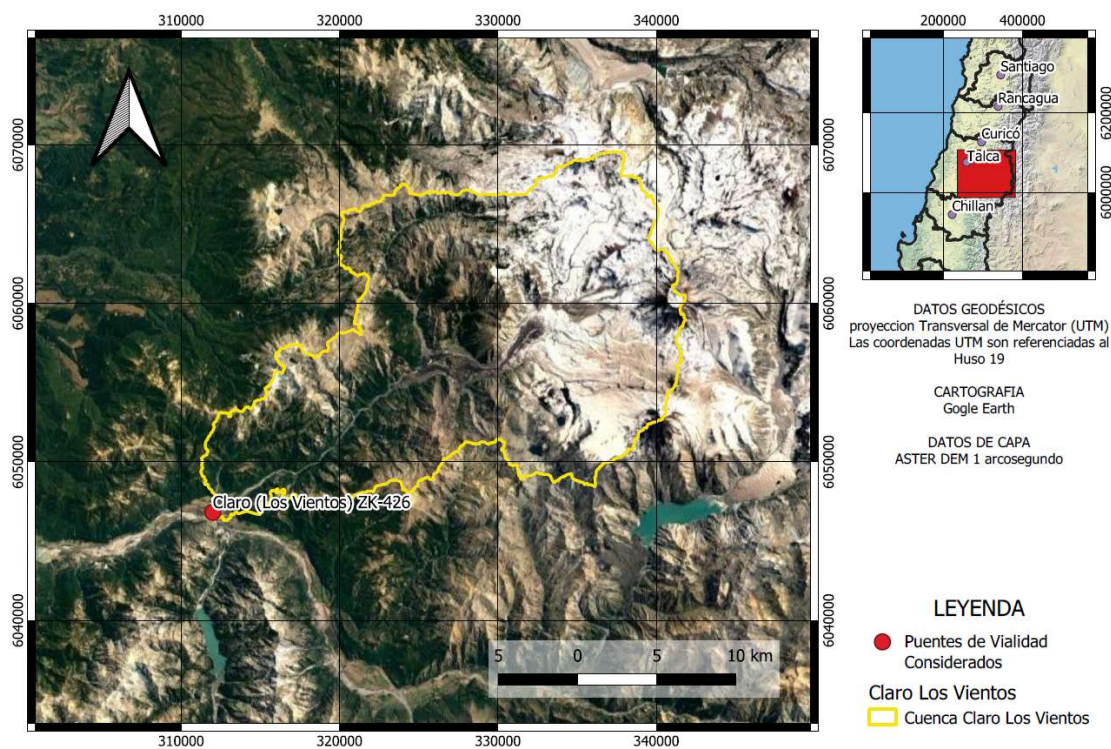


Figura 4.5: Delimitación de la cuenca de Claro en Los Vientos

#### 4.2.2 Parámetros Geomorfológicos

Los principales parámetros geomorfológicos, asociados a la delimitación de la cuenca previamente realizada se muestran en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4: Parámetros geomorfológicos, cuenca de Claro en Los Vientos**

Parámetro	Cuencas de Estudio	Unidad
	Los Vientos	
Área	430.055	[km <sup>2</sup> ]
Perímetro	132.081	[km]
Este Centroides	328335	[m]
Norte Centroides	6057376	[m]
Longitud del Cauce Principal	37.785	[km]
Cota Máxima	3918	[m.s.n.m.]
Cota 50%	1940	[m.s.n.m.]
Cota Media	1917	[m.s.n.m.]
Cota Mínima	527	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cuenca	38.5	[%]
Cota Inicio Cauce	2388	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cauce	0.049	[m/m]

#### 4.2.3 Tiempo de Concentración

El cálculo del tiempo de concentración con distintos métodos se muestra en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5: Tiempos de concentración con distintas metodologías, cuenca de Claro en Los Vientos**

Tiempos de Concentración Cuenca Completa [min]	Cuencas de Estudio	Unidad
	Los Vientos	
Kirpich	213	[min]
California Highways	170	[min]
Normas Españolas	341	[min]
Giandotti	281	[min]
Giandotti LB	408	[min]
Giandotti UP	612	[min]
Adoptado	241	[min]
Adoptado	4.0	[hrs]

#### 4.2.4 Cobertura de Suelo

Se extrae la cobertura del suelo según mapa de Zhao 2014. Las coberturas de suelo para la cuenca se muestran en la Figura 4.6 mientras que la partición por porcentajes se muestra en la Figura 4.7.

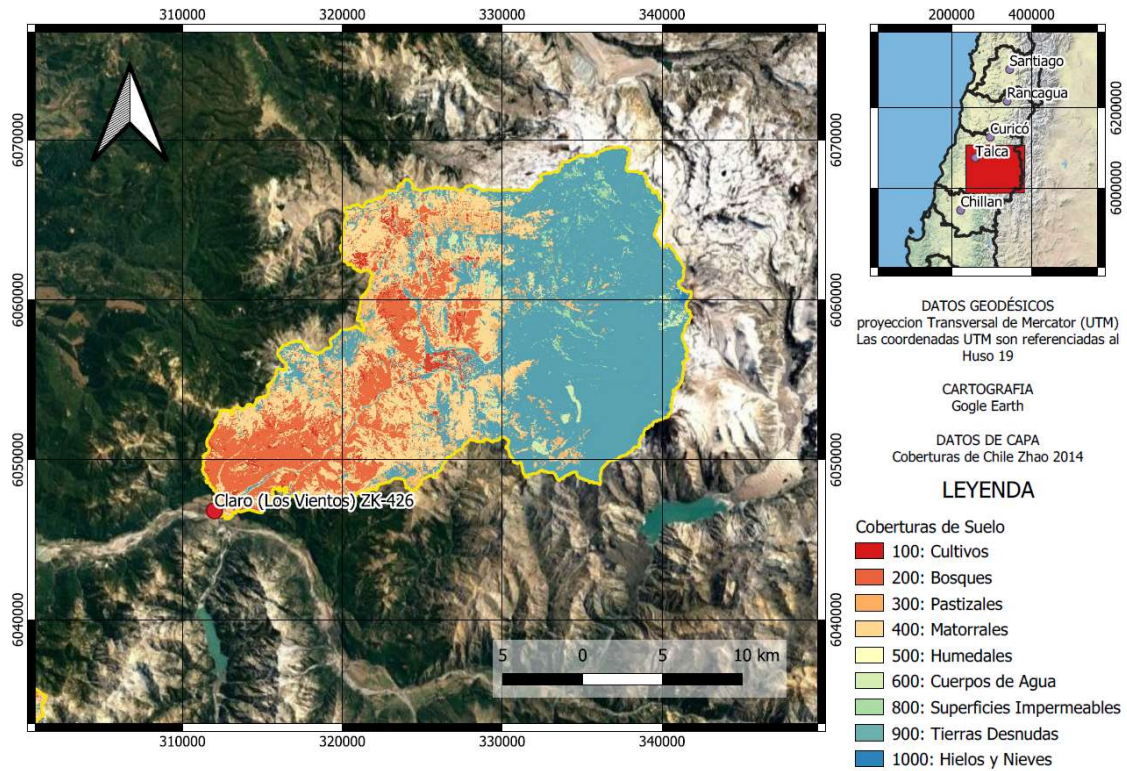


Figura 4.6: Cobertura de suelos en cuenca de Claro en Los Vientos

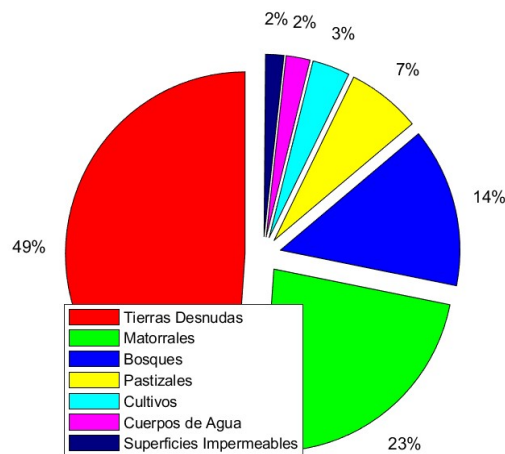


Figura 4.7: Porcentajes de coberturas de suelo para la cuenca de Claro en Los Vientos

#### 4.2.5 Tipo de Suelo

Se extrae el tipo de suelo según producto HYSOG 250 m. El tipo de suelo para la cuenca se muestran en la Figura 4.8

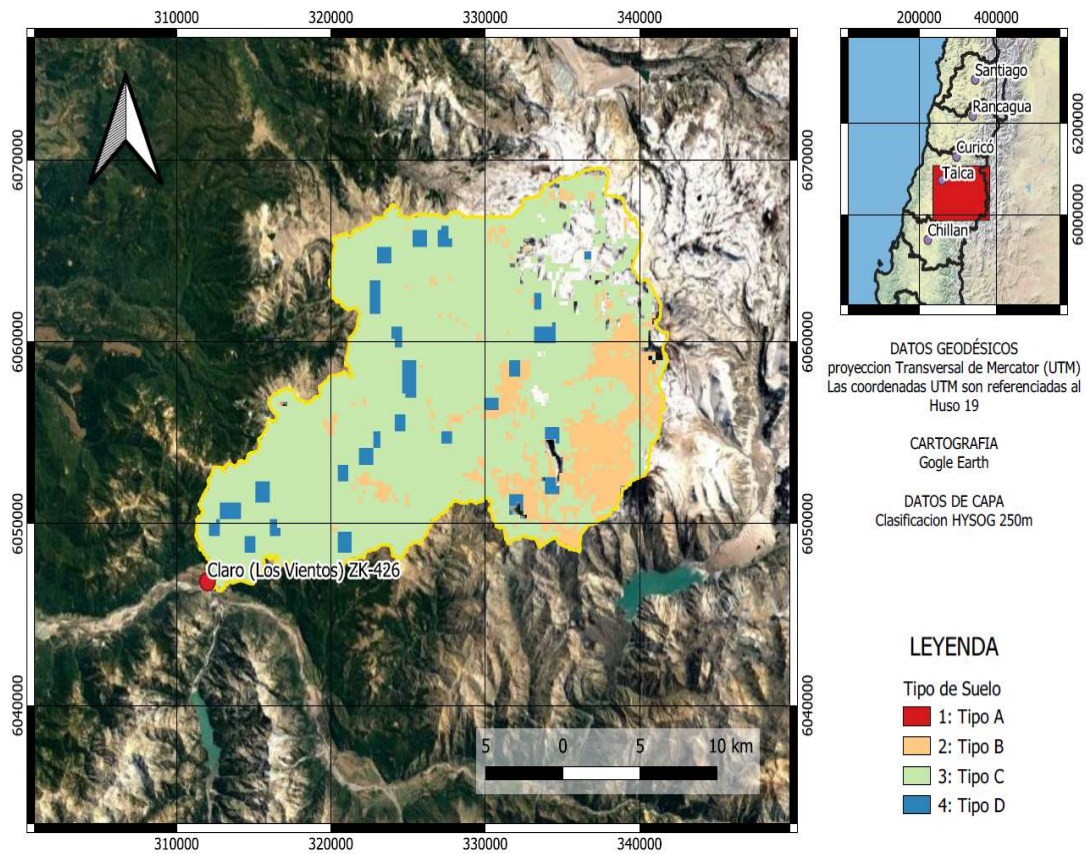


Figura 4.8: Tipo de suelos en cuenca de Claro en Los Vientos

#### 4.2.6 Curva Número Representativa

Se calcula la Curva Número representativa de la cuenca de estudio. El cálculo se expone en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Cálculo de la Curva Número para la cuenca de Claro en Los Vientos

Tipo de Suelo	CN TIPO 3 [-]	Comentario desde TR-55	Tipo de Suelos	CN Ponderada
			[%]	[-]
Bosques	41	Tabla 2-2D TR-55, Oak Aspen, Condición Buena	14%	6
Matorrales	74	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condición Buena	23%	17
Cultivos	77	Tabla 2-2B TR-55, Row Crops, Condición Buena	3%	3
Pastizales	74	Tabla 2-2C TR-55, Pasture, Condición Buena	7%	5
Tierras Desnudas	87	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condición Pobre	49%	43
Cuerpos de Agua	100	-	2%	2
Superficies Impermeables	100	-	2%	2
SUMA	-	-	100%	77

### 4.3 Cuenca Puente Chupallar

El puente Chupallar está ubicado sobre el río Ancoa en la precordillera de la comuna de Linares, en la región del Maule, en las cercanías del embalse Ancoa, permite el acceso al sector de Chupallar a través de la ruta L-431 (Imagen 4.5 e Imagen 4.6). Se exponen a continuación las principales características de la cuenca aportante al sector de interés, destacándose la delimitación de esta, sus parámetros geomorfológicos que permiten definir el tiempo de concentración y las características de tipo de suelo y su cobertura.



Imagen 4.5: Detalle de ubicación del puente Chupallar. Fuente: Google Earth según kmz proporcionado por Dirección de Vialidad.



Imagen 4.6: Detalle del Puente Chupallar luego de las crecidas del año 2023. Fuente: adaptado de <https://www.t13.cl/noticia/nacional/rio-ancoa-destruyo-puente-acceso-al-sector-chupallar-linares-senapred-solicita-24-6-2023>

### 4.3.1 Delimitación de la Cuenca

La cuenca se delimita siguiendo las directrices expuestas en la metodología. La delimitación se basa en el DEM ASTER 1 arco segundo. La delimitación se muestra en la Figura 4.9

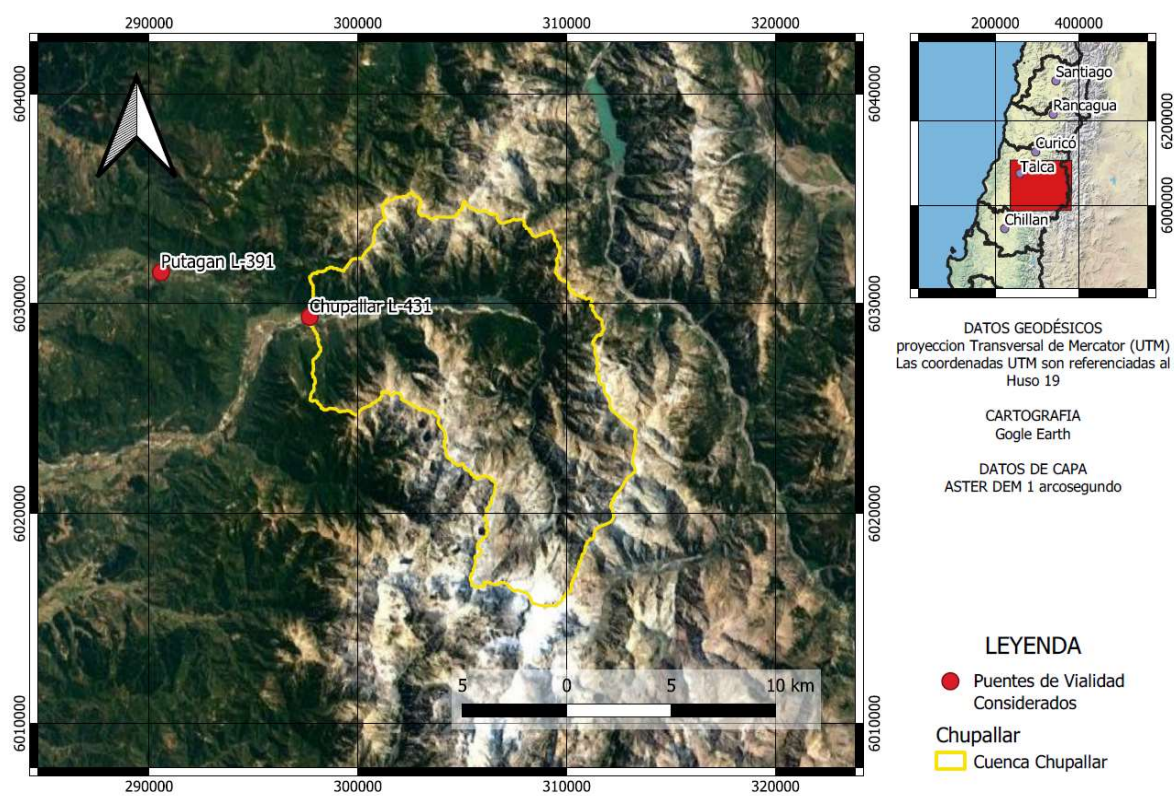


Figura 4.9: Delimitación de la cuenca de Chupallar

### 4.3.2 Parámetros Geomorfológicos

Los principales parámetros geomorfológicos, asociados a la delimitación de la cuenca previamente realizada se muestran en la Tabla 4.7

**Tabla 4.7: Parámetros geomorfológicos, cuenca de Chupallar**

Parámetro	Cuenca de Estudio	Unidad
	Chupallar	
Área	169,692	[km <sup>2</sup> ]
Perímetro	75,743	[km]
Este Centroide	306039	[m]
Norte Centroide	6026464	[m]
Longitud del Cauce Principal	25,035	[km]
Cota Máxima	2554	[m.s.n.m.]
Cota 50%	1440	[m.s.n.m.]
Cota Media	1483	[m.s.n.m.]
Cota Mínima	612	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cuenca	53,6	[%]
Cota Inicio Cauce	2129	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cauce	0,061	[m/m]

### 4.3.3 Tiempo de Concentración

El cálculo del tiempo de concentración con distintos métodos se muestra en la TABLA 4.8

**Tabla 4.8: Tiempos de concentración con distintas metodologías, cuenca de Chupallar**

Tiempos de Concentración Cuenca Completa [min]	Cuencas de Estudio	Unidad
	Chupallar	
Kirpich	143	[min]
California Highways	130	[min]
Normas Españolas	234	[min]
Giandotti	228	[min]
Giandotti LB	270	[min]
Giandotti UP	406	[min]
Adoptado	169	[min]
Adoptado	2,8	[hrs]

#### 4.3.4 Cobertura de Suelo

Se extrae la cobertura del suelo según mapa de Zhao 2014. Las coberturas de suelo para la cuenca se muestran en la Figura 4.10 mientras que la partición por porcentajes se muestra en la Figura 4.11.

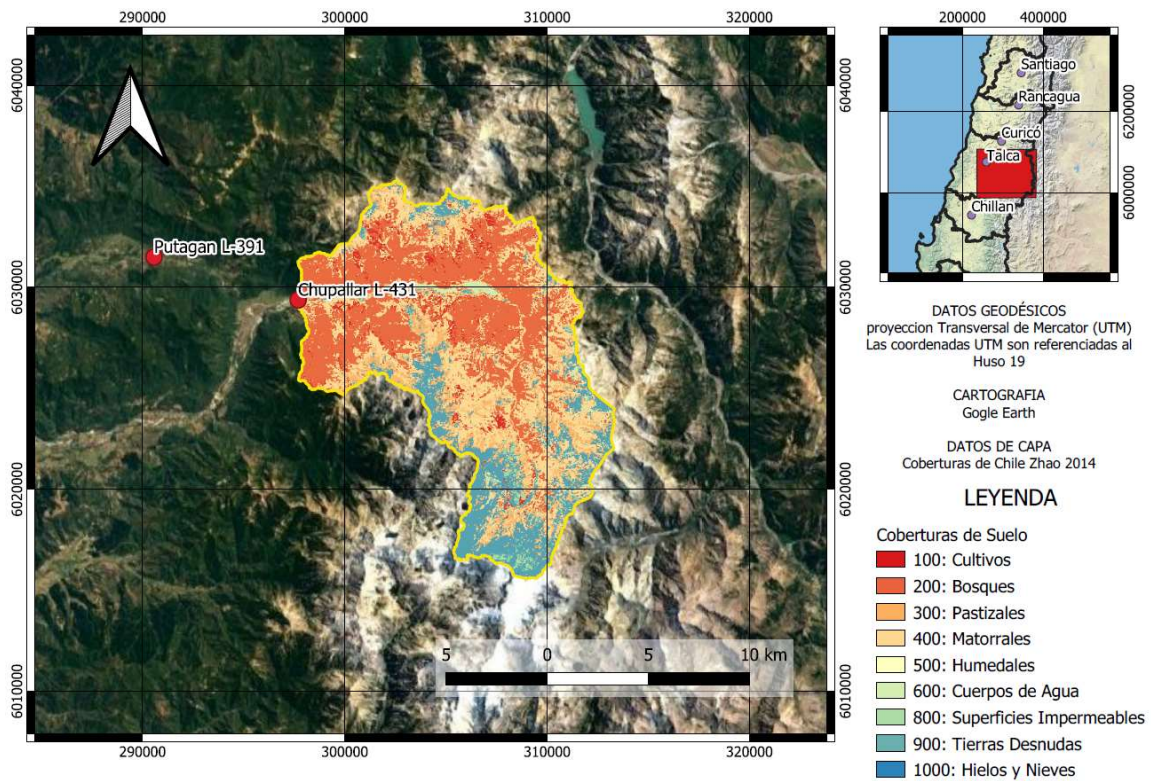


Figura 4.10: Cobertura de suelos en cuenca de Chupallar

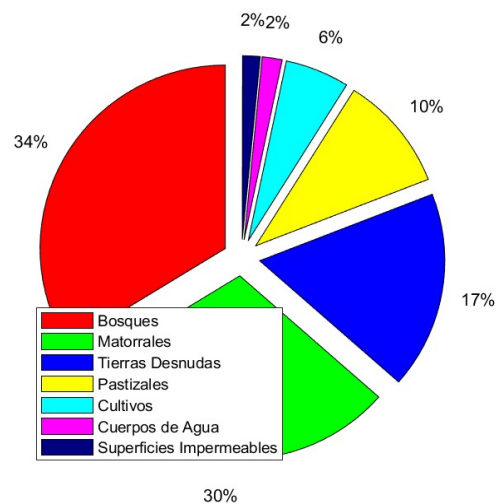


Figura 4.11: Porcentajes de coberturas de suelo para la cuenca de Chupallar

### 4.3.5 Tipo de Suelo

Se extrae el tipo de suelo según producto HYSOG 250 m. El tipo de suelo para la cuenca se muestran en la Figura 4.12.

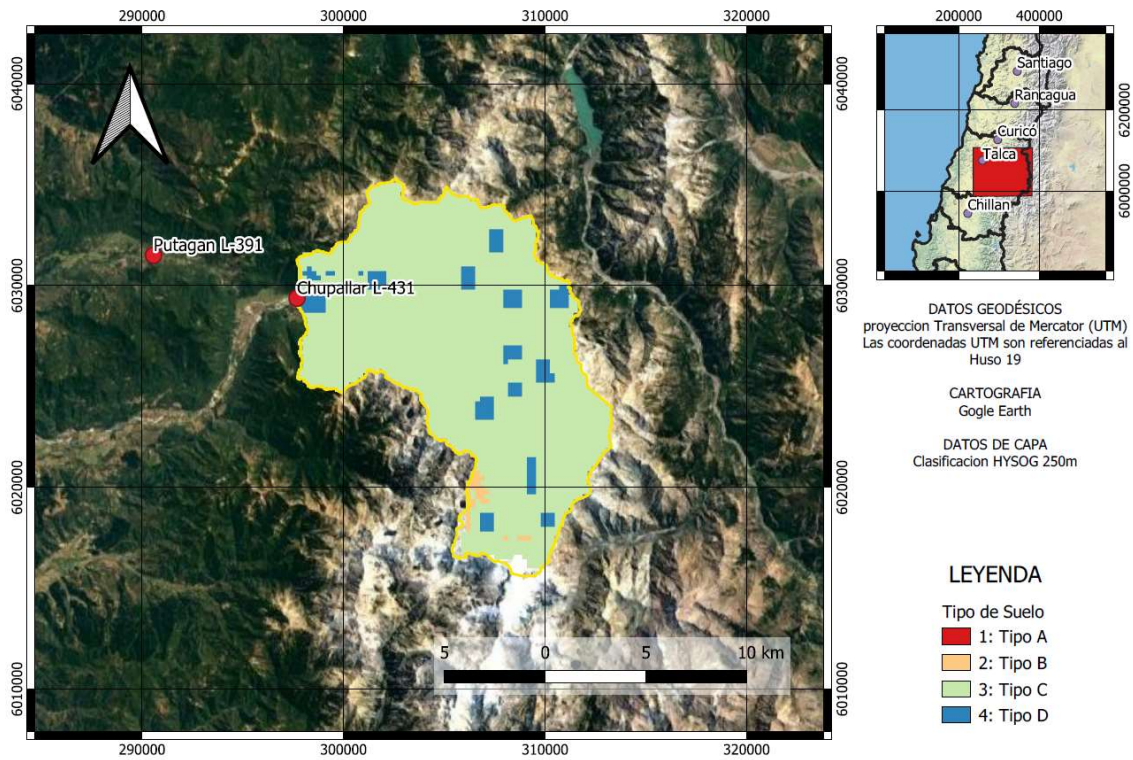


Figura 4.12: Tipo de suelos en cuenca de Chupallar

### 4.3.6 Curva Número Representativa

Se calcula la Curva Número representativa de la cuenca de estudio. El cálculo se expone en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Cálculo de la curva número para la cuenca de Chupallar

Tipo de Suelo	CN TIPO 3 [-]	Comentario desde TR-55	Tipo de Suelos	CN Ponderada
			[%]	[-]
Bosques	41	Tabla 2-2D TR-55, Oak Aspen, Condición Buena	34%	14
Matorrales	74	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condición Buena	30%	22
Cultivos	77	Tabla 2-2B TR-55, Row Crops, Condición Buena	6%	4
Pastizales	74	Tabla 2-2C TR-55, Pasture, Condición Buena	10%	8
Tierras Desnudas	87	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condición Pobre	17%	15
Cuerpos de Agua	100	-	2%	2
Superficies Impermeables	100	-	2%	2
SUMA	-	-	100%	66

#### 4.4 Cuenca Puente Putagán

El puente Putagán está situado sobre el río del mismo nombre en la ruta L-391 en la comuna de Colbún, al sur de Villa Alegre. (Imagen 4.7 e Imagen 4.8). Se reportan a continuación los principales antecedentes de la cuenca aportante al sector de interés, destacándose la delimitación de esta, sus parámetros geomorfológicos que permiten definir el tiempo de concentración y las características de tipo de suelo y su cobertura.

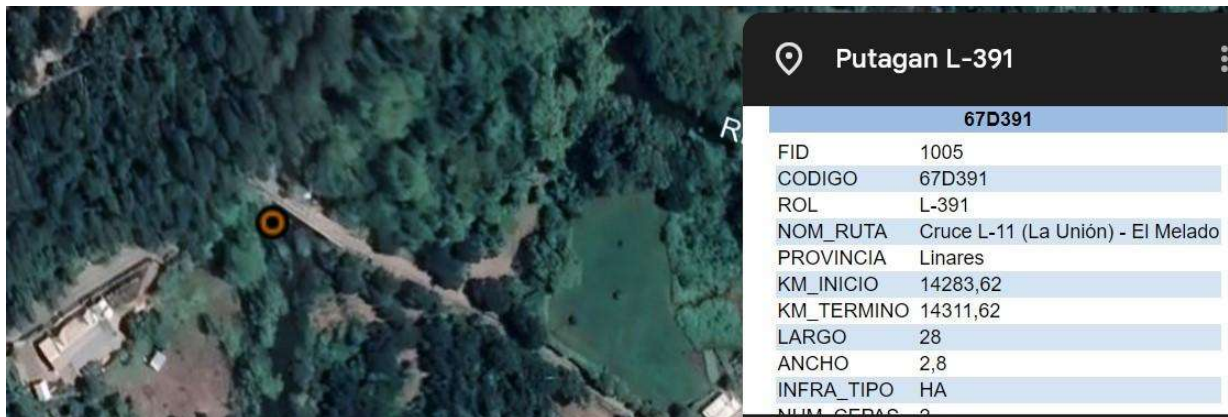


Imagen 4.7: Detalle de ubicación del puente Putagán. Fuente: Google Earth según KMZ proporcionado por Dirección de Vialidad.



Imagen 4.8: Detalle del Puente Putagán luego de las crecidas del año 2023. Fuente: adaptado de <https://diarioelheraldo.cl/noticia/a-raiz-de-las-intensas-lluvias-serios-danos-sufre-puente-recien-construido-en-el-rio-putagan-al-sur-de-villa-alegre>

#### 4.4.1 Delimitación de la Cuenca

La cuenca se delimita siguiendo las directrices expuestas en la metodología. La delimitación se basa en el DEM ASTER 1 arcosegundo. La delimitación se muestra en la Figura 4.13

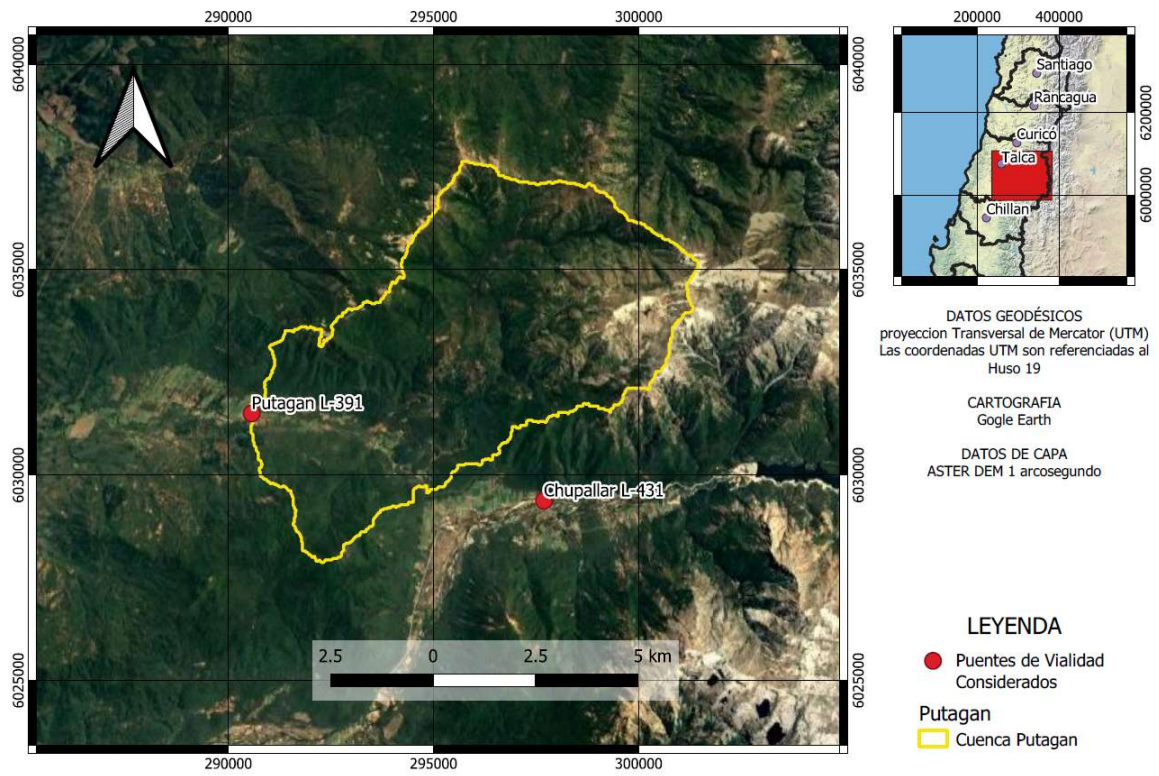


Figura 4.13: Delimitación de la cuenca de Putagán

#### 4.4.2 Parámetros Geomorfológicos

Los principales parámetros geomorfológicos, asociados a la delimitación de la cuenca previamente realizada se muestran en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10: Parámetros geomorfológicos, cuenca de Putagán**

Parámetro	Cuencas de Estudio	Unidad
	Putagan	
Área	55,623	[km <sup>2</sup> ]
Perímetro	40,096	[km]
Este Centroide	295821	[m]
Norte Centroide	6033072	[m]
Longitud del Cauce Principal	13,423	[km]
Cota Máxima	1791	[m.s.n.m.]
Cota 50%	1080	[m.s.n.m.]
Cota Media	1089	[m.s.n.m.]
Cota Mínima	401	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cuenca	39,33	[%]
Cota Inicio Cauce	1213	[m.s.n.m.]
Pendiente Media Cauce	0,060	[m/m]

#### 4.4.3 Tiempo de Concentración

El cálculo del tiempo de concentración con distintos métodos se muestra en la Tabla 4.11

*Tabla 4.11: TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN CON DISTINTAS METODOLOGÍAS, CUENCA DE PUTAGÁN*

Tiempos de Concentración Cuenca Completa [min]	Cuencas de Estudio	Unidad
	Putagan	
Kirpich	89	[min]
California Highways	71	[min]
Normas Españolas	155	[min]
Giandotti	143	[min]
Giandotti LB	145	[min]
Giandotti UP	217	[min]
Adoptado	105	[min]
Adoptado	1,7	[hrs]

#### 4.4.4 Cobertura de Suelo

Se extrae la cobertura del suelo según mapa de Zhao 2014. Las coberturas de suelo para la cuenca se muestran en la Figura 4.14 mientras que la partición por porcentajes se muestra en la Figura 4.15.

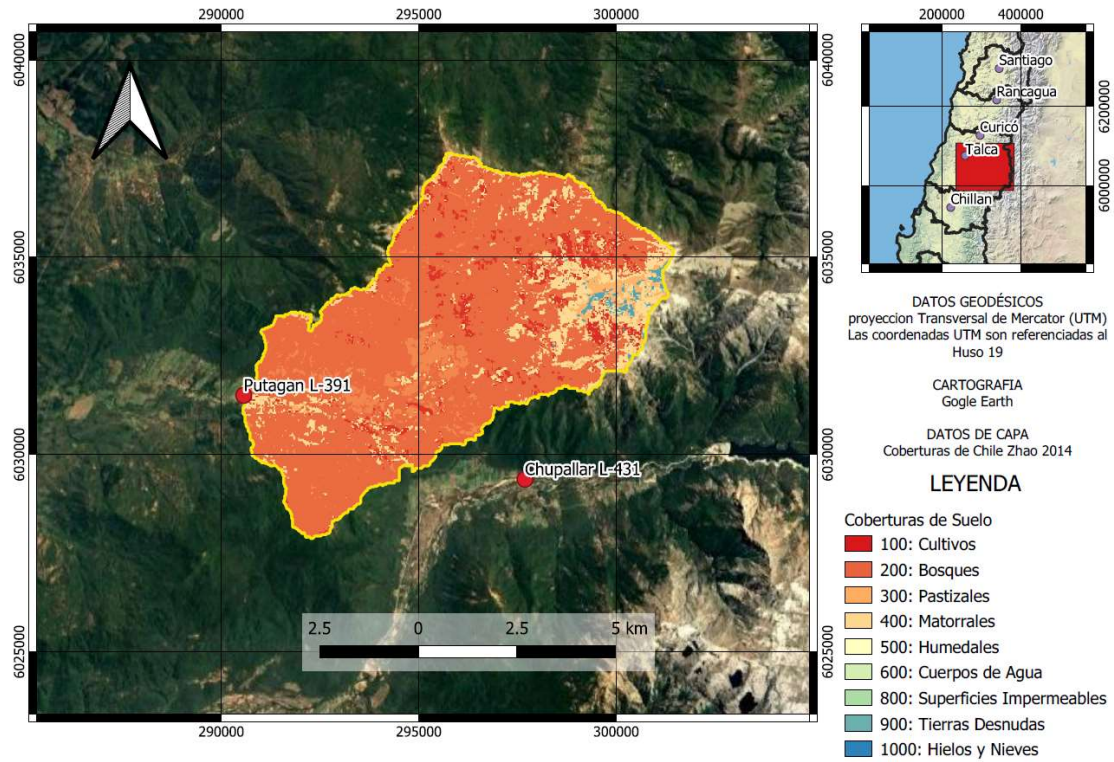


Figura 4.14: cobertura de suelos en la cuenca de Putagán

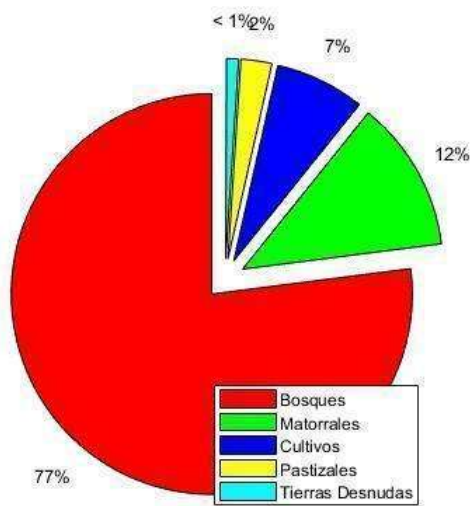


Figura 4.15: Porcentajes de coberturas de suelo en la cuenca de Putagán

#### 4.4.5 Tipo de Suelo

Se extrae el tipo de suelo según producto HYSOG 250 m. El tipo de suelo para la cuenca se muestran en la Figura 4.16

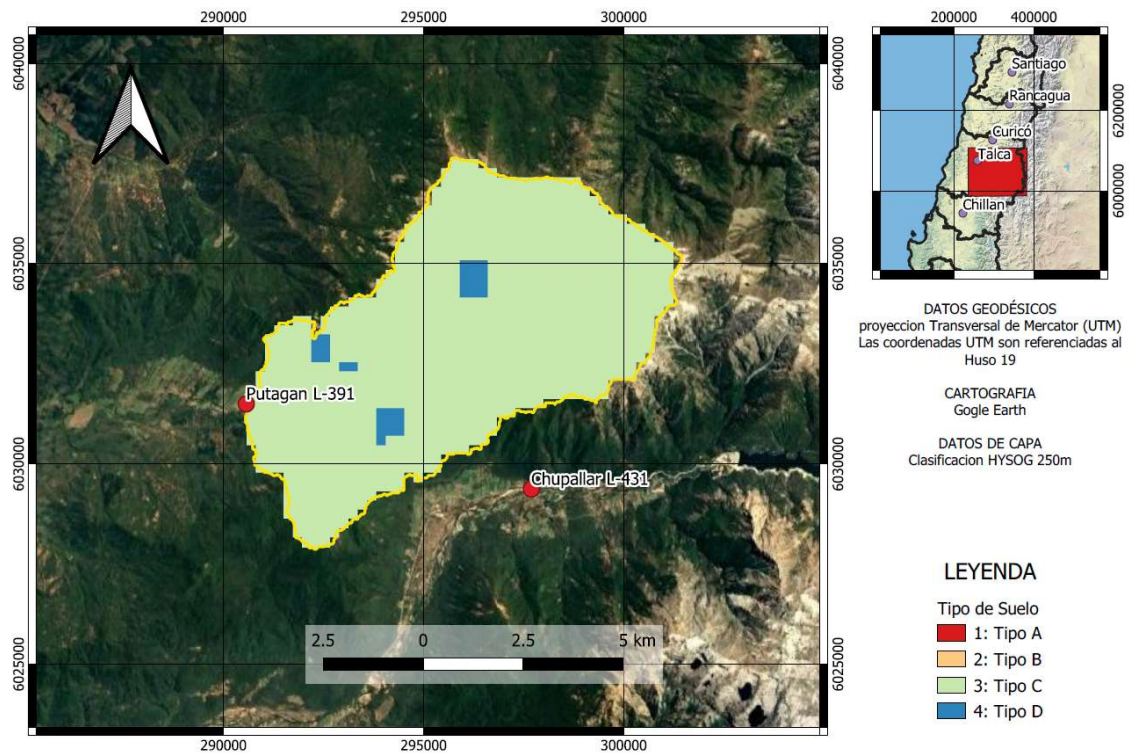


Figura 4.16: Tipo de suelos en la cuenca de Putagán

#### 4.4.6 Curva Número Representativa

Se calcula la Curva Número representativa de la cuenca de estudio. El cálculo se expone en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12: Cálculo de la curva número en la cuenca de Putagán**

Tipo de Suelo	CN TIPO 3 [-]	Comentario desde TR-55	Tipo de Suelos	CN Ponderada
			[%]	[-]
Bosques	41	Tabla 2-2D TR-55, Oak Aspen, Condicion Buena	77%	32
Matorrales	74	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condicion Buena	12%	9
Cultivos	77	Tabla 2-2B TR-55, Row Crops, Condicion Buena	7%	6
Pastizales	74	Tabla 2-2C TR-55, Pasture, Condicion Buena	2%	2
Tierras Desnudas	87	Tabla 2-2D TR-55, Herbaceous, Condicion Pobre	1%	1
Cuerpos de Agua	100	-	0%	0
Superficies Impermeables	100	-	0%	0
SUMA	-	-	100%	49

## 4.5 Línea de Nieves

A continuación, se exponen los distintos métodos para la estimación de la Línea de Nieves.

### 4.5.1 Peña y Vidal-Escobar

Las estimaciones de Línea de Nieves en base a Peña y Vidal y Escobar, se muestran en la Tabla 4.13

**Tabla 4.13: Estimación de la línea de nieves según Peña y Vidal y Escobar**

Estimación de la Línea de Nieves	Cuencas de Estudio				Unidad
	Maitenhuapi	Claro Los Vientos	Chupallar	Putagán	
Latitud	35,32	35,61	35,88	35,83	[°deg]
Peña y Vidal	1470	1300	1150	1150	[m.s.n.m.]
Escobar	1980	1820	1680	1680	[m.s.n.m.]

### 4.5.2 Covian y Stowhas

Las estimaciones de Línea de Nieves en base a Covian y Stowhas, se muestran en la Tabla 4.14

**Tabla 4.14: Estimación de la línea de nieves según Covian y Stowhas**

Estimación de la Línea de Nieves	Cuencas de Estudio				Unidad
	Maitenhuapi	Claro Los Vientos	Chupallar	Putagán	
P exc	0,25	0,25	0,25	0,25	[exc)
Latitud	35,32	35,61	35,88	35,83	[°deg]
Línea de Nives Covian	2071	2028	1990	1997	[m.s.n.m.]

### 4.5.3 Observatorio Andino

Se procesan los datos de la cuenca de Maule en Armerillo, la cual es colindante a la cuenca de Maitenhuapi mientras que las otras tres cuencas de estudio son anidadas a la mencionada. El proceso de las imágenes satelitales para todos los días se muestra en la Figura 4.17.

Por otro lado, la Tabla 4.15 muestra el procesamiento por percentiles mientras que la Tabla 4.16 muestra el procesamiento exclusivamente de los últimos 10 años. La diferencia entre ambos periodos se muestra en la Tabla 4.17.

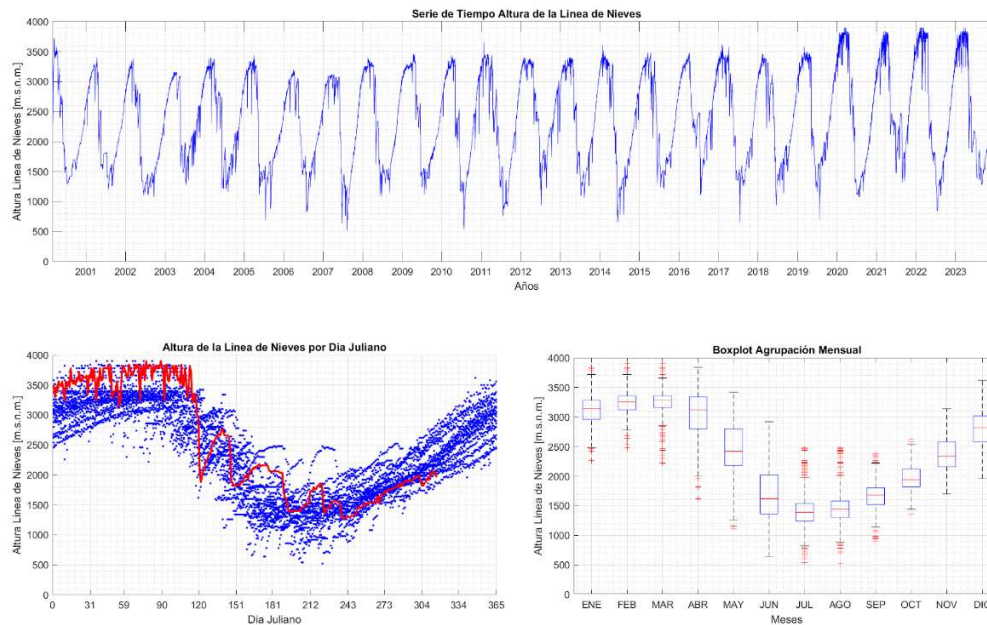


Figura 4.17: Altura de la Línea de Nieves. Cuenca de Maule en Armerillo

Tabla 4.15: Procesamiento de la línea de nieves Observatorio Andino. Serie completa

MES	PERCENTILES				
	10%	25%	50%	75%	90%
ENE	2720	2960	3140	3280	3400
FEB	2962	3120	3260	3360	3518
MAR	3014	3160	3280	3360	3620
ABR	2560	2800	3120	3340	3460
MAY	1840	2180	2420	2800	3000
JUN	1180	1360	1620	2020	2360
JUL	1080	1240	1390	1540	1800
AGO	1100	1300	1440	1580	1780
SEPT	1380	1520	1680	1800	2020
OCT	1720	1820	1940	2120	2326
NOV	2020	2160	2340	2580	2800
DIC	2320	2580	2820	3020	3206
1ER Trimestre	2899	3080	3227	3333	3513
2do Trimestre	1860	2113	2387	2720	2940
3er Trimestre*	1120	1300	1483	1713	1980
4to Trimestre	2020	2187	2367	2573	2777
Semestre Pluvial	1523	1733	1945	2180	2403
Semestre Nival	2459	2633	2797	2953	3145

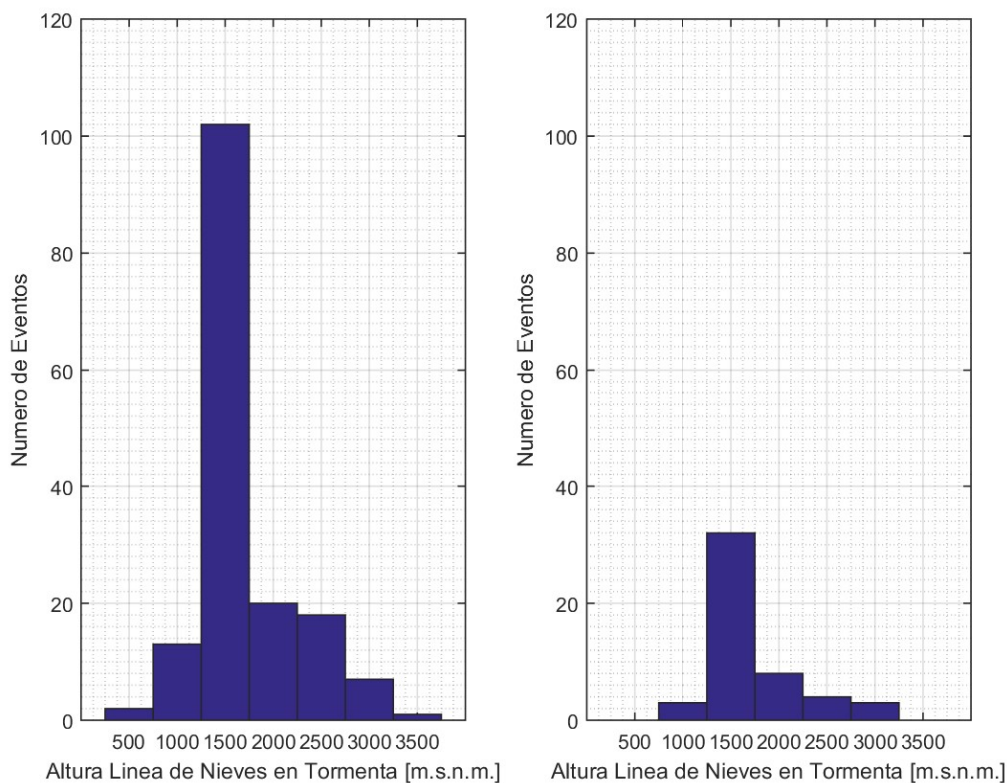
**Tabla 4.16: Procesamiento de la Línea de Nieves Observatorio Andino. Últimos 10 años**

MES	PERCENTILES				
	10%	25%	50%	75%	90%
ENE	3032	3120	3240	3380	3580
FEB	3200	3240	3340	3430	3720
MAR	3220	3300	3360	3480	3780
ABR	2620	2880	3260	3400	3720
MAY	2012	2200	2420	2780	2980
JUN	1170	1360	1720	2100	2360
JUL	1100	1200	1380	1585	1908
AGO	1280	1360	1480	1660	1860
SEPT	1500	1620	1720	1920	2090
OCT	1780	1880	2020	2205	2380
NOV	2160	2280	2500	2720	2880
DIC	2580	2760	2940	3140	3300
1ER Trimestre	3151	3220	3313	3430	3693
2do Trimestre	1934	2147	2467	2760	3020
3er Trimestre*	1183	1307	1527	1782	2043
4to Trimestre	2173	2307	2487	2688	2853
Semestre Pluvial	1614	1770	1997	2241	2486
Semestre Nival	2662	2763	2900	3059	3273

**Tabla 4.17: Diferencias en metros de altura Línea de Nieves v/s periodo completo**

MES	PERCENTILES				
	10%	25%	50%	75%	90%
ENE	312	160	100	100	180
FEB	238	120	80	70	202
MAR	206	140	80	120	160
ABR	60	80	140	60	260
MAY	172	20	0	-20	-20
JUN	-10	0	100	80	0
JUL	20	-40	-10	45	108
AGO	180	60	40	80	80
SEPT	120	100	40	120	70
OCT	60	60	80	85	54
NOV	140	120	160	140	80
DIC	260	180	120	120	94

Con los mismos datos del observatorio andino se filtran los días solo con precipitaciones. Para lo anterior se adopta como estación patrón la estación de Potrero Grande la cual corresponde a la de mayor altura. La Figura 4.18 muestra el histograma de la altura de la línea de nieves considerando los eventos sobre dos umbrales: 30 mm (panel izquierdo) y 60 mm (panel derecho). Los percentiles significativos se muestran en la Tabla 4.18.



**Figura 4.18: Altura de la Línea de Nieves para eventos de precipitación sobre umbral. Izquierda: umbral de 30 mm. Derecha: umbral de 60 mm**

**Tabla 4.18: Línea de nieves en msnm exclusivamente para eventos de precipitación sobre umbrales**

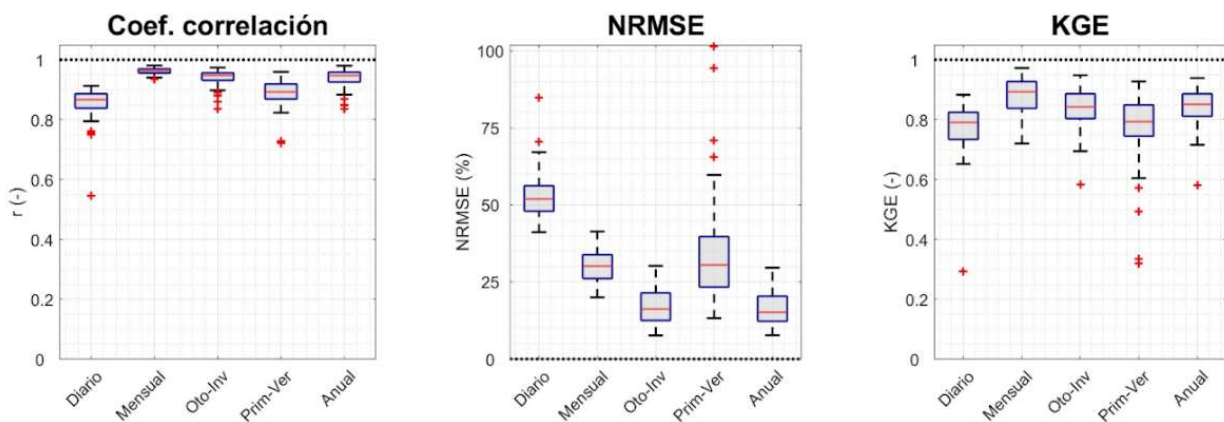
Percentil	>30 mm	>60 mm
q1 (10%)	2404	2320
q2 (25%)	1835	1820
q3 (50%)	1540	1580
q4 (75%)	1365	1360
q5 (90%)	1260	1270

Según lo indicado en la metodología se seleccionan las líneas de nieve asociadas al 25% y 10% para los análisis del volumen de precipitación aportante en los eventos de período de retorno 100 y 150 años, considerándose los valores de 1830 msnm y 2350 msnm.

## 4.6 Patrones climáticos representativos del dominio

### 4.6.1 Evaluación del producto CR2Met

A partir del análisis es posible observar en las Figuras 4.19 y 4.20 que el producto CR2Met logra representar de manera adecuada la temporalidad de la precipitación para las diferentes agregaciones temporales analizadas lo cual se evidencia con los valores derivados del coeficiente de correlación de Pearson. Respecto al NRMSE se observan algunos sesgos en los valores diarios los cuales podrían ser atribuidos principalmente a precipitaciones ocurridas en primavera-verano dado el valor que reporta el indicador para dicha agregación temporal. Sin perjuicio de lo anterior el KGE indica que para las estaciones del dominio estarían capturando además de la temporalidad los valores promedio y su variabilidad en el periodo analizado.

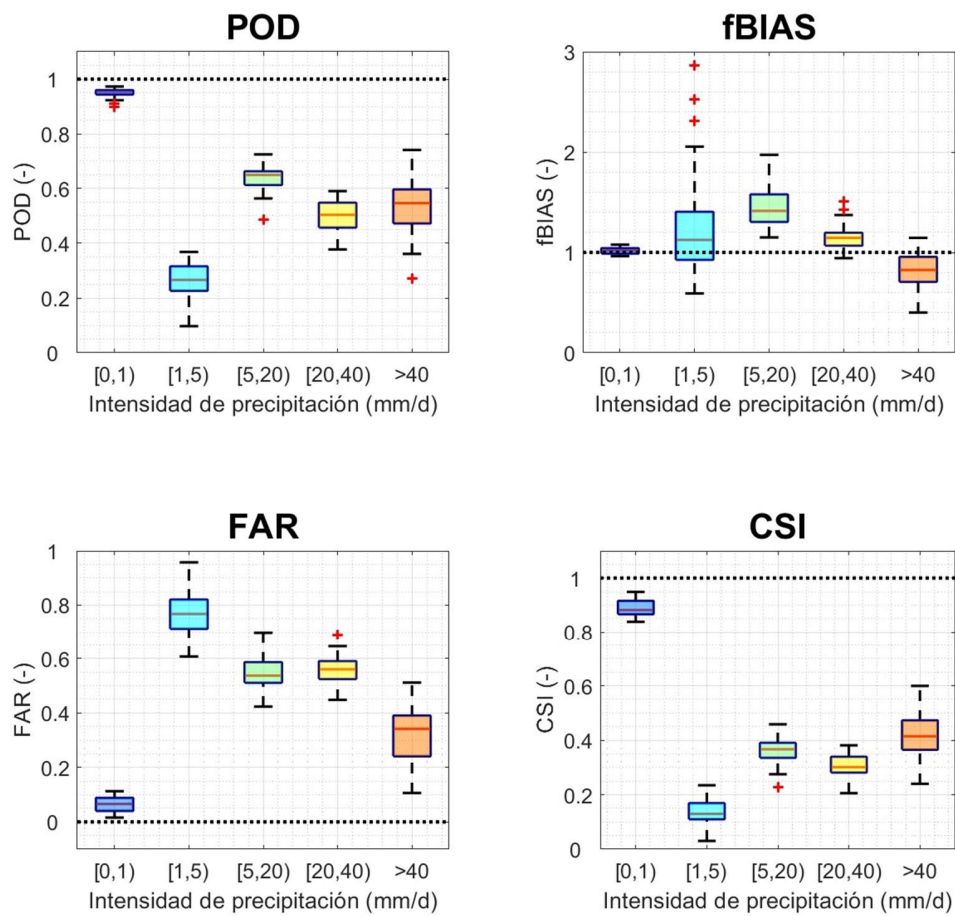


**Figura 4.19: Resultados de evaluación de desempeño del producto CR2Met de precipitación en las estaciones seleccionadas. Línea segmentada representa el óptimo por indicador.**

Al profundizar el análisis se revisa en la figura 4.19 el desempeño a nivel discreto y categorizado según magnitudes de precipitación diaria, se observa que si bien los valores se acercan a los óptimos por índice (línea segmentada) existen oportunidades de mejora. Sin embargo, para efecto de la caracterización de eventos de máxima precipitación, en la Figura 4.20 se observa que existe un desempeño adecuado que, sumado al análisis anterior, permite concluir que CR2Met es una herramienta útil para caracterizar, a lo menos, los patrones de distribución espacial de precipitación y, en casos de no contar con información suficiente, útil para la caracterización de los montos de precipitación.

En la Figura 4.21 se comparan las temperaturas mínimas y máximas diarias observadas e interpoladas a las coordenadas de la estación. Se aprecia que el coeficiente de correlación de Pearson (temporalidad) a nivel diario reporta valores entre 0.79 y 0.97, mientras que el KGE entre 0.67 y 0.91, lo que indica una muy buena correlación. Esta comparación es referencial pues existen diferencias entre la elevación de la estación y el punto interpolado para efectos de extraer la variable desde CR2Met.

Estas evaluaciones entregan una buena idea del desempeño del producto y valida su utilización para efecto del estudio de gradientes y patrones de distribución espacio-temporal de precipitación y temperatura.



**Figura 4.20: Resultados de evaluación de los índices categóricos de precipitación en las estaciones seleccionadas. Línea segmentada representa el óptimo por indicador.**

### Análisis del desempeño a nivel diario del producto CR2Met

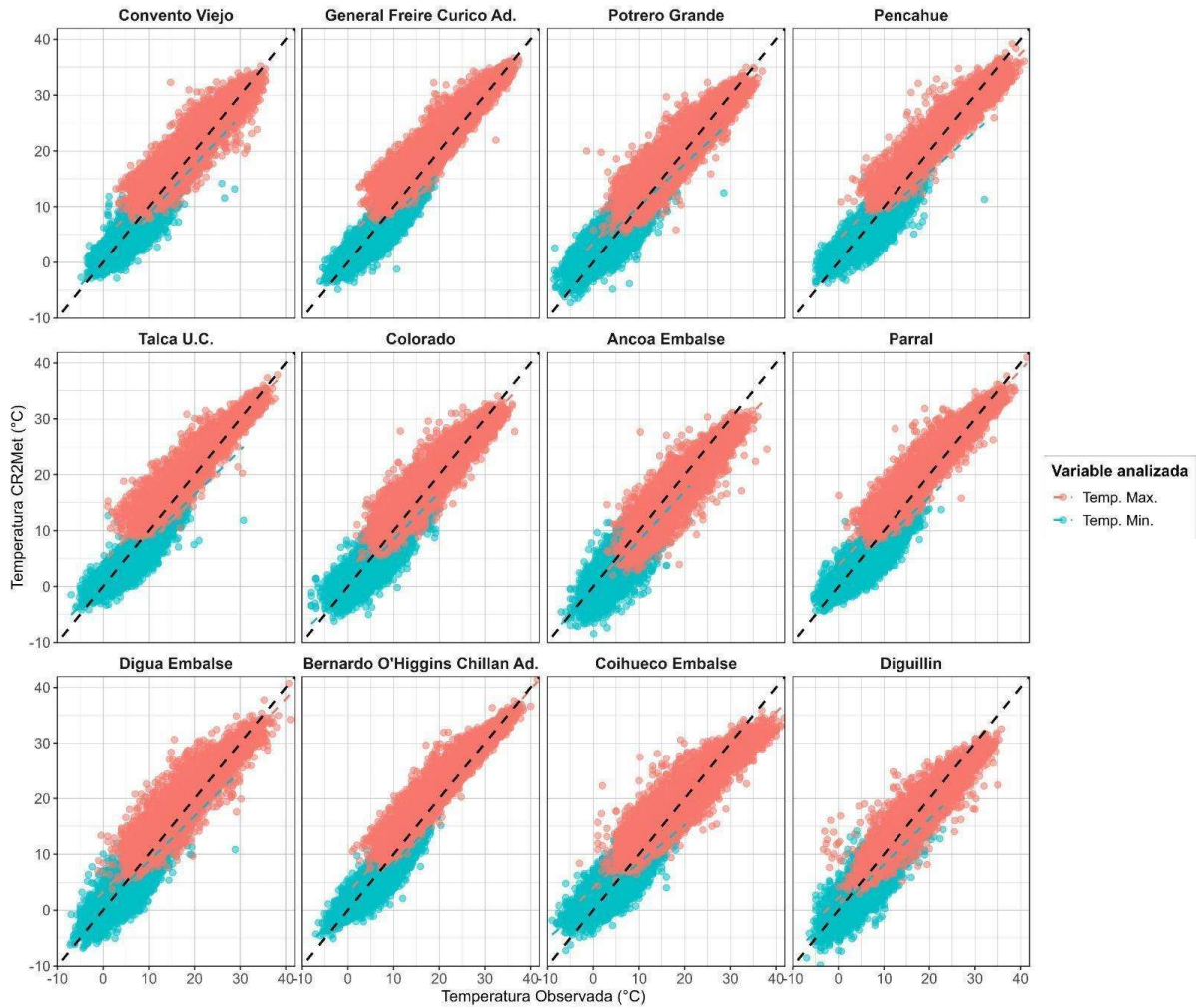


Figura 4.21: Resultados de evaluación de las series diarias de temperatura del producto CR2Met en las estaciones seleccionadas. Línea segmentada representa el óptimo por indicador.

#### 4.6.2 Coeficiente de duración por estaciones de referencia

A partir del análisis de la relación entre máxima precipitación diaria anual y máxima precipitación anual acumulada en diferentes duraciones, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 4.19. Allí, además del valor estimado, se presenta el intervalo de confianza al 95% asociado al CD por estación de referencia y duración. Cabe mencionar que, si bien para efectos de visualización en el informe se presentan algunas duraciones referenciales, la estimación de los CD se realiza de manera continua y a paso de tiempo horario para duraciones de 1 a 96 hrs, resultados que pueden ser encontrados en los anexos digitales.

**Tabla 4.19: Resumen de coeficientes de duración (CD) por estación de referencia. En corchete se representa el intervalo de confianza al 95% asociado al ajuste del CD.**

Duración (hrs)	General Freire	Potrero Grande	Talca U.C.	Colorado	Ancoa Embalse
1	0,098 [0,091 - 0,104]	0,088 [0,083 - 0,093]	0,107 [0,099 - 0,116]	0,09 [0,085 - 0,096]	0,087 [0,082 - 0,093]
2	0,185 [0,173 - 0,197]	0,169 [0,159 - 0,178]	0,202 [0,188 - 0,216]	0,174 [0,164 - 0,185]	0,168 [0,158 - 0,179]
3	0,264 [0,248 - 0,28]	0,244 [0,23 - 0,258]	0,288 [0,27 - 0,305]	0,251 [0,237 - 0,265]	0,241 [0,228 - 0,255]
4	0,336 [0,316 - 0,355]	0,314 [0,296 - 0,331]	0,363 [0,343 - 0,383]	0,322 [0,305 - 0,34]	0,31 [0,294 - 0,326]
5	0,402 [0,38 - 0,425]	0,378 [0,357 - 0,398]	0,432 [0,411 - 0,454]	0,388 [0,369 - 0,408]	0,374 [0,356 - 0,393]
6	0,463 [0,438 - 0,488]	0,438 [0,416 - 0,461]	0,495 [0,472 - 0,518]	0,451 [0,431 - 0,471]	0,435 [0,416 - 0,455]
12	0,753 [0,719 - 0,787]	0,737 [0,707 - 0,767]	0,783 [0,753 - 0,814]	0,761 [0,739 - 0,783]	0,744 [0,72 - 0,769]
24	1,112 [1,068 - 1,157]	1,116 [1,082 - 1,15]	1,122 [1,082 - 1,161]	1,143 [1,11 - 1,177]	1,144 [1,106 - 1,183]
48	1,543 [1,478 - 1,609]	1,565 [1,499 - 1,631]	1,553 [1,481 - 1,626]	1,624 [1,556 - 1,692]	1,645 [1,577 - 1,713]
72	1,834 [1,747 - 1,922]	1,894 [1,807 - 1,981]	1,827 [1,71 - 1,945]	1,967 [1,861 - 2,072]	1,974 [1,862 - 2,086]
96	2,065 [1,943 - 2,187]	2,179 [2,049 - 2,309]	2,093 [1,928 - 2,257]	2,263 [2,111 - 2,415]	2,283 [2,119 - 2,447]

#### 4.6.3 Coeficiente de transferencia espacial (relación estación-cuenca)

La Tabla 4.20 resume los Factores de Transferencia Espacial (FTE) y coeficientes de posición (n) estimados por cuenca según la estación patrón que reporta los mejores indicadores de RMSE, coeficiente de correlación de Pearson y KGE asociados al ajuste lineal. Dichos coeficientes son empleados para estimar la precipitación media en la cuenca hasta la elevación definida por la línea de nieve durante cada evento de máxima precipitación anual (i.e., se integra la ecuación sobre la curva hipsométrica hasta la posición de la línea de nieve).

**Tabla 4.20: Resumen de factor de transferencia espacial por elevación (relación estación-cuenca).**

Cuenca	Estación Patrón	n	FTE	RMSE (mm/d)	r-Pearson	KGE
Chupallar	Ancoa Embalse	1,039	0,000105	0,047	0,895	0,852
ClaroLosVientos	Potrero Grande	1,324	0,000075	0,020	0,928	0,899
Maitenhuapi	Potrero Grande	0,757	0,000195	0,036	0,965	0,951
Putagan	Ancoa Embalse	0,977	0,000043	0,022	0,593	0,424

Cabe mencionar que, a pesar de adoptar sólo dos estaciones como patrón para las cuencas del dominio, se exploran todos los FTE y n asociados al resto de las combinaciones estación patrón-cuenca, lo cual se incluye en la sección de anexos digitales.

## 4.7 Análisis de cambio climático

### 4.7.1 Elección de escenarios, GCMs y ventanas de proyección climática

El presente estudio evalúa dos escenarios con distinto forzamiento radiativo, siendo SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

- SSP2-4.5: representa la parte media de las vías de forzamiento y es un escenario de interés para otros MIP del CMIP6 (e.g., CORDEX, Proyecto de Predicción del Clima Decenal y MIP de Detección y Atribución). Se selecciona SSP2 por el uso de las tierras y su baja intensidad en el uso de aerosoles en comparación a otros escenarios, así también es relevante en la Evaluación de Modelos Integrados (IAM) dado que combina la vulnerabilidad social intermedia con un nivel FR intermedio (CODELCO, 2023).
- SSP5-8.5: es el extremo superior de la gama de trayectorias futuras de la IAM. Se selecciona SSP5 para la vía de forzamiento  $8.5 \text{ Wm}^{-2}$ , debido a que es el único escenario SSP con emisiones suficientemente altas como para producir dicho forzamiento (CODELCO, 2023).

Se toman los escenarios SSP2 y SSP5 en consideración a las narrativas que describen y dado que:

- SSP1 ( $1.9 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $2.6 \text{ Wm}^{-2}$ ) representa un futuro en el que se implementan políticas que llevan a una rápida transición hacia una sociedad sostenible con bajas emisiones de carbono. El nivel de forzamiento radiativo de  $1.9 \text{ Wm}^{-2}$  o  $2.6 \text{ Wm}^{-2}$  es un objetivo ambicioso, y las condiciones climáticas actuales inhabilitan el posible desarrollo del escenario.
- SSP3 ( $7.0 \text{ Wm}^{-2}$ ) representa un futuro en el que las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, llevando a un alto nivel de forzamiento radiativo. Refleja un mundo con desarrollo económico desigual y un crecimiento poblacional moderado. Se puede considerar como una vía intermedia entre los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, por lo que no agregaría valor a la gama de proyecciones climáticas.
- SSP4 ( $3.4 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $6.0 \text{ Wm}^{-2}$ ) se relaciona con la desigualdad social y tiene dos subescenarios, es decir, no presenta escenarios prioritarios (*tier 1*, Figura 3.3) para el diseño experimental de proyectos. SSP4-3.4 implica un nivel de emisiones de gases de efecto invernadero más. Puede sugerir una trayectoria en la que se toman medidas significativas para abordar la desigualdad y reducir las emisiones de GEI. En tanto, SSP4-6.0 podría representar un escenario en el que las medidas para abordar la desigualdad son menos efectivas o más limitadas, lo que lleva a mayores emisiones.

En relación con los Modelos Climáticos Globales, se evalúan aquellos GCMs de CMIP6 que tengan simulaciones disponibles, de precipitación, temperatura mínima y máxima, para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 conjuntamente (Tabla 4.21). Los modelos descargados corresponden a aquellos del conjunto r1i1p1f1, disponibles para el período histórico de Ene 1985 a Dic 2014, mientras que las proyecciones representan el período Ene 2015 a Dic 2100.

**Tabla 4.21: Modelos Climáticos Globales del proyecto CMIP6. Disponibles para descarga en <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>**

ID	Modelo Climático	Institución	Resolución Lat – Lon (°)
G1	ACCESS-CM2	CSIRO & ARCCSS	1,3 – 1,9
G2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO	1,3 – 1,9
G3	CanESM2	CCCMA	2,8 – 2,8

ID	Modelo Climático	Institución	Resolución Lat – Lon (°)
G4	CMCC-ESM2	CMCC	0,9 – 1,3
G5	EC-Earth-CC	EC-Earth consortium	0,7 – 0,7
G6	EC-Earth-Veg		0,7 – 0,7
G7	EC-Earth-Veg-LR		1,1 – 1,1
G8	GFDL-ESM4	NOAA-GFDL	1,0 – 1,3
G9	INM-CM4-8	INM	1,5 – 2,0
G10	INM-CM5-0		1,5 – 2,0
G11	IPSL-CM6A-LR	IPSL	1,3 – 2,0
G12	KIOST-ESM	KIOST	1,9 – 1,9
G13	MIROC6	MIROC6 JAMSTEC	1,4 – 1,4
G14	MPI-ESM1-2-HR	MPI-M	0,9 – 0,9
G15	MPI-ESM1-2-LR		1,9 – 1,9
G16	MRI-ESM2-0	MRI	1,1 – 1,1
G17	NorESM2-MM		0,9 – 1,3
G18	TaiESM1	AS-RCEC	0,9 – 1,3

Las ventanas de análisis climática consideran Ene 1985 a Dic 2014 y Ene 1990 a Dic 2020 para el análisis histórico. Luego, en consideración a la vida útil de los puentes, se consideran los períodos climáticos 2030 - 2060 y 2040 – 2070.

#### 4.7.2 Desempeño histórico de GCMs

El desempeño histórico de los GCMs, y por tanto la selección de estos se realiza en base a las observaciones de las estaciones patrón óptimas para llevar a cabo el estudio (i.e., cota de elevación  $\geq 400$  m s.n.m.). Siendo las estaciones 7116005: Potrero Grande y 7355007: Ancoa Embalse las que satisfacen este requisito.

Tal como se describe en la sección 3.4, la selección de modelos climáticos considera la aplicación de dos criterios en base a la climatología histórica y la representación de índices climáticos extremos húmedos. En relación con el primero, el Índice de Rendimiento Pasado (PPI) resulta en la selección de cuatro modelos climáticos (Tabla 4.22) para la zona de estudio, de acuerdo con los resultados de Gateño et al., (2023).

**Tabla 4.22: Valores de los GCMs seleccionados según el Índice de Rendimiento Pasado para precipitaciones y temperaturas medias. Se presenta la distancia al valor óptimo (1-ED = 0).**

ID	Modelo Climático	PPI <sub>Pr</sub>	PPI <sub>Tas</sub>	1 - ED
G4	CMCC-ESM2	0,64	0,57	0,44
G7	EC-Earth-Veg-LR	0,60	0,27	0,17
G8	GFDL-ESM4	0,50	0,54	0,32
G17	NorESM2-MM	0,45	0,39	0,18

El PPI se basa en los valores medios de precipitación y temperaturas históricas, cuyos valores se presentan en la Tabla 4.23. Adicionalmente, la Tabla 4.24 muestra las métricas de desempeño entre simulaciones históricas y observaciones en las estaciones patrón.

**Tabla 4.23: Valores medios anuales históricos. Se presentan las variables de pr: precipitación (mm), tasmax: temperatura máxima (°C) y tasmin: temperatura mínima (°C).**

Código estación	Nombre GCM	Variable	1985 - 2014		1990 - 2019	
			Estación	Modelo	SSP2-4,5	SP5-8,5
7116005	CMCC-ESM2	pr	1106,95	1092,82	1087,22	1141,77
		tasmax	20,53	20,33	20,37	20,47
		tasmin	4,64	4,90	4,82	4,78
	GFDL-ESM4	pr	1106,95	892,53	959,28	900,26
		tasmax	20,53	20,44	20,45	20,61
		tasmin	4,64	5,03	5,07	5,07
7355007	NorESM2-MM	pr	1528,84	1548,02	1687,09	1621,80
		tasmax	18,67	18,84	18,90	18,83
		tasmin	6,84	6,91	7,14	7,02

**Tabla 4.24: Métricas de desempeño entre simulaciones históricas y observaciones en las estaciones patrón.**

Período	SSP	Código estación	GCM	Variable	RMSE	R2	Error	NSE	KGE
					(mm o °C)	(-)	(%)	(-)	(-)
1985 - 2015	-	7116005	CMCC-ESM2	pr	3,09	0,98	-2,10	1,00	0,97
				tasmax	0,12	0,99	-0,50	1,00	0,99
				tasmin	0,05	0,99	-0,60	1,00	0,99
			GFDL-ESM4	pr	4,01	0,97	-3,00	1,00	0,96
				tasmax	0,12	0,99	-0,50	1,00	0,99
				tasmin	0,05	0,99	-0,60	1,00	0,99
		7355007	NorESM2-MM	pr	0,68	1,00	-0,40	1,00	0,99
				tasmax	1,33	0,93	-6,00	0,94	0,92
				tasmin	0,49	0,94	-6,00	0,96	0,92
1990 - 2020	SSP2-4,5	7116005	CMCC-ESM2	pr	8,33	0,96	-1,30	0,99	0,95
				tasmax	0,15	1,00	0,30	1,00	1,00
				tasmin	0,14	0,99	-0,80	1,00	0,99
		GFDL-ESM4	pr	12,73	0,94	-4,30	0,98	0,95	
			tasmax	0,21	1,00	0,30	1,00	0,99	
			tasmin	0,17	0,98	1,40	1,00	0,98	
	7355007	NorESM2-MM	pr	22,06	0,90	11,30	0,96	0,85	
			tasmax	1,37	0,93	-6,20	0,93	0,92	
			tasmin	0,37	0,95	-3,50	0,98	0,94	
			pr	9,98	0,96	0,70	0,98	0,95	
SSP5-8,5	7116005	CMCC-ESM2	pr	9,98	0,96	0,70	0,98	0,95	

Período	SSP	Código estación	GCM	Variable	RMSE	R2	Error	NSE	KGE
					(mm o °C)	(-)	(%)	(-)	(-)
				tasmax	0,20	0,99	0,80	1,00	0,99
				tasmin	0,17	1,00	-1,20	1,00	0,96
			GFDL-ESM4	pr	8,92	0,93	-8,40	0,99	0,90
				tasmax	0,24	0,99	0,80	1,00	0,99
				tasmin	0,17	0,98	1,80	1,00	0,98
		7355007	NorESM2-MM	pr	13,25	0,94	7,70	0,99	0,92
				tasmax	1,40	0,93	-6,30	0,93	0,90
				tasmin	0,41	0,95	-4,30	0,97	0,92

En las Figuras 4.22 a 4.24 se comparan las curvas de variación estacional de los valores observados y simulados por los modelos GCM en las estaciones Potrero Grande y Ancoa Embalse para las variables precipitaciones y temperaturas máximas y mínimas en los periodos históricos 1985-2014 y 1990-2019 para ambos escenarios climáticos. Se aprecian algunas pequeñas diferencias (subestimaciones) en las temperaturas extremas simuladas en la estación Ancoa Embalse en el periodo 1985-2014 con el modelo climático NorESM2-MM. (Recordar que ambos escenarios entregan los mismos resultados en este periodo). Al considerar el periodo histórico 1990-2019 en el escenario SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y tomando como base el periodo 1985-2014 dichas diferencias persisten, observándose además leves sobreestimaciones de precipitación con el mismo modelo y también variaciones menores en los valores simulados en la estación Potrero Grande.

Período 1985 - 2015

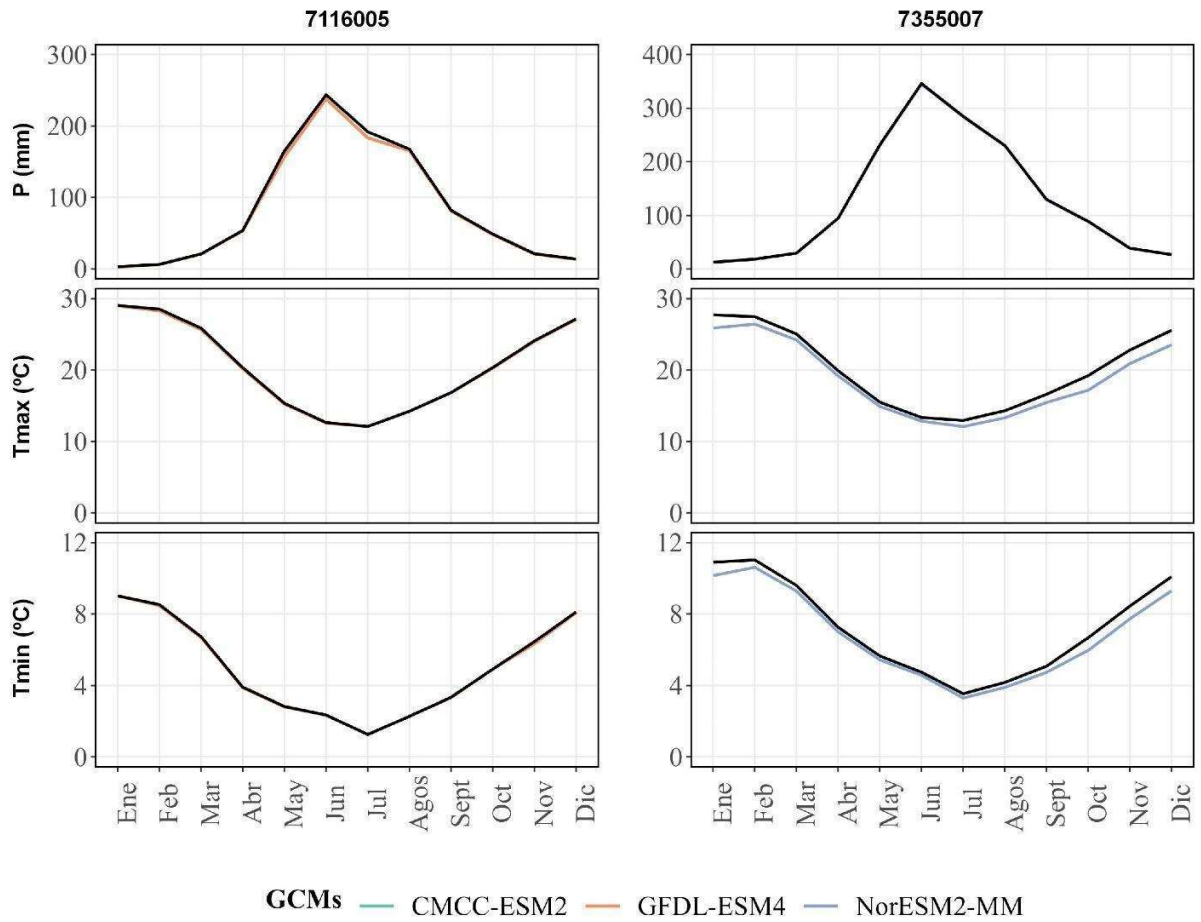


Figura 4.22: Curva de variación estacional de variables climáticas para el período 1985 – 2014. P: precipitación, Tmax: temperatura máxima, Tmin: temperatura mínima. La curva negra corresponde a las observaciones de cada estación patrón.

Período 1990 - 2020; SSP2-4.5

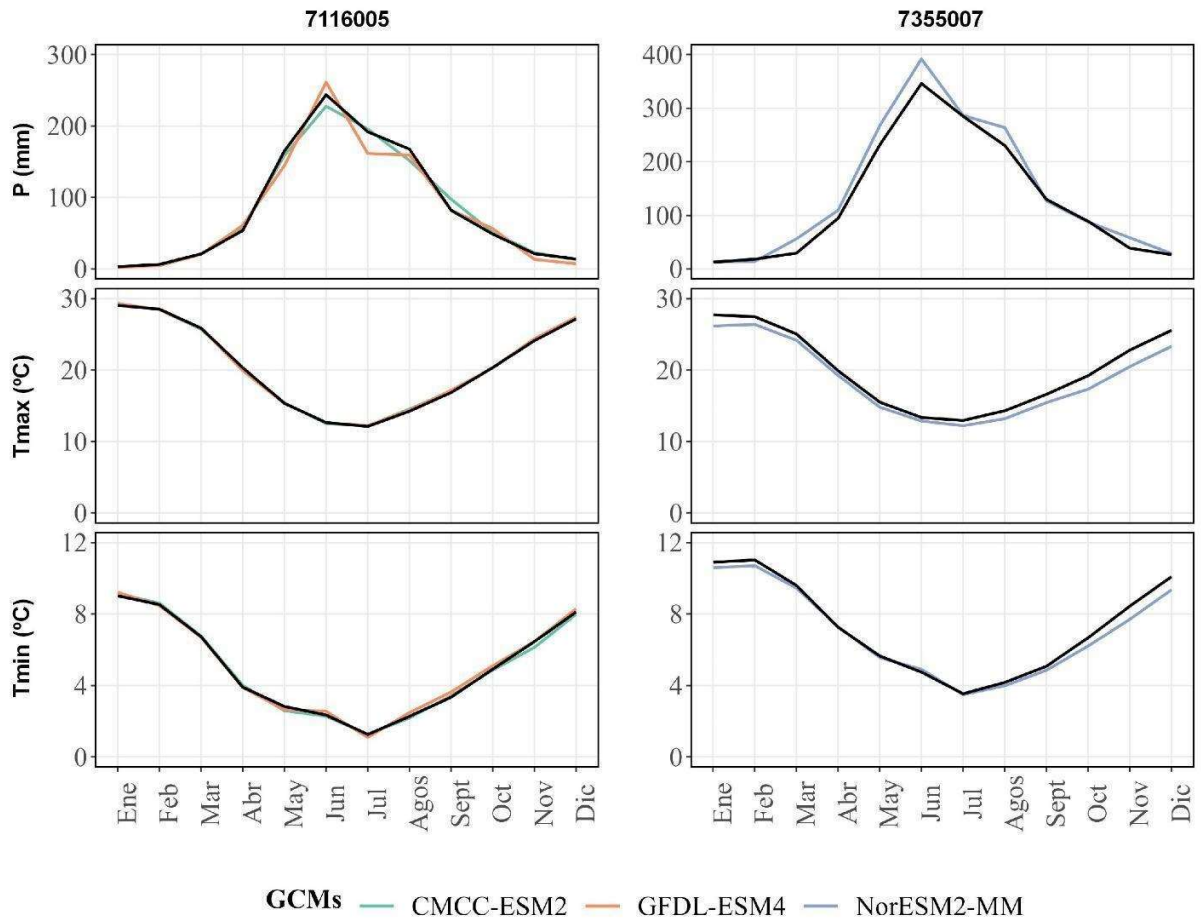


Figura 4.23: Curva de variación estacional de variables climáticas para el período 1990 – 2020. bajo escenario climático SSP2-4.5. La curva negra corresponde a las observaciones de cada estación patrón durante el período 1985 – 2014.

Período 1990 - 2020; SSP5-8.5

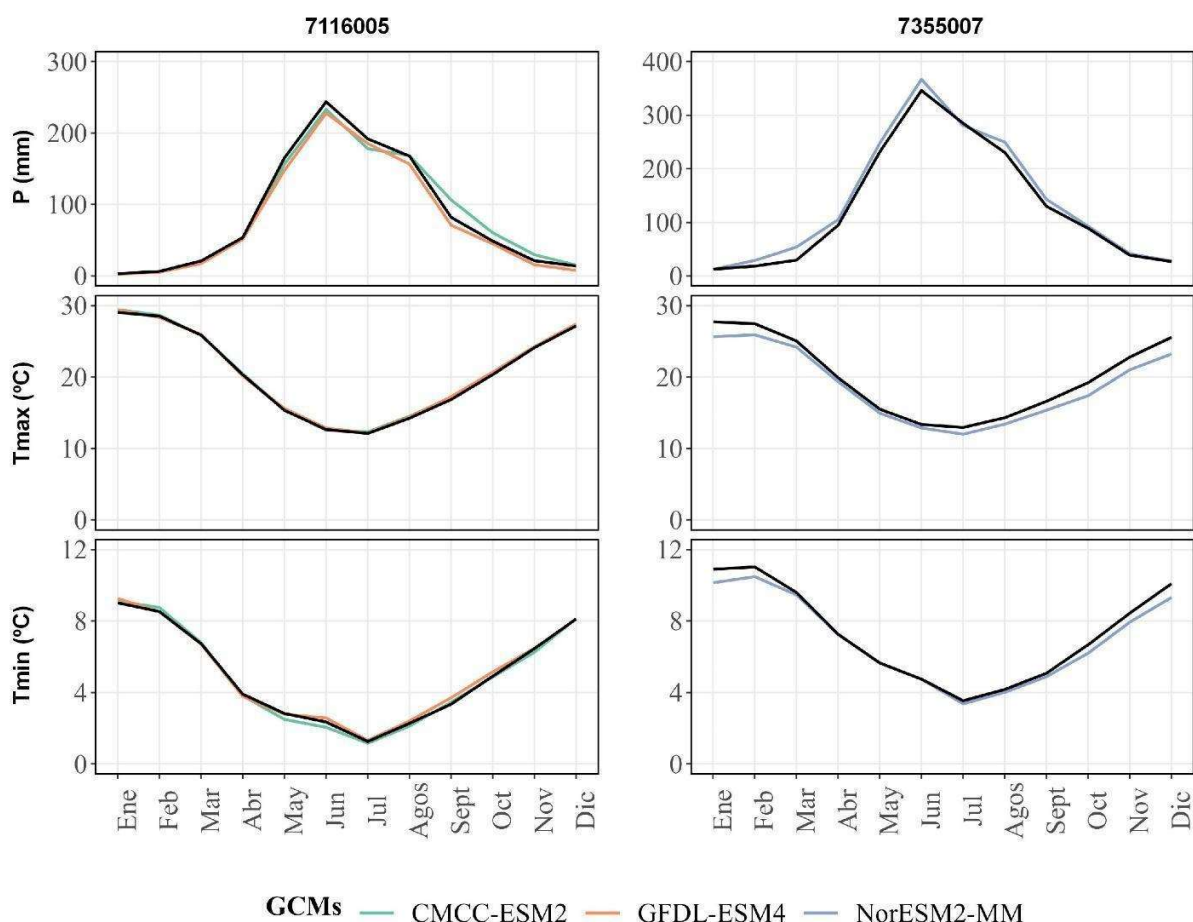


Figura 4.24: Curva de variación estacional de variables climáticas para el período 1990 – 2020 bajo escenario climático SSP5-8.5. La curva negra corresponde a las observaciones de cada estación patrón durante el período 1985 – 2014.

En la Tabla 4.25 se presentan los valores extremos de las variables de interés en ambos periodos históricos, apreciándose que los órdenes de magnitud de las variables son similares se observan diferencias máximas cercanas al 10% en precipitaciones y de hasta 1,2 °C en la temperatura mínima.

El segundo criterio de selección (CI<sup>3</sup>, Índice de Impacto Climático Integrado) consiste en calcular ocho índices asociados a eventos extremos húmedos tanto para las simulaciones de los modelos climáticos como para las observaciones de las estaciones patrón. La Tabla 4.26 muestra los valores medios obtenidos para simulaciones y observaciones mientras que la Figura 4.25 muestra la variación de los índices en cada estación.

**Tabla 4.25: Valores extremos anuales históricos. Se presentan las variables de pr: precipitación máxima diaria (mm), tasmax: temperatura máxima diaria (°C) y tasmin: temperatura mínima diaria(°C).**

Código estación	Nombre GCM	Variable	1985 - 2014		1990 - 2019	
			Estación	Modelo	SSP2-4,5	SP5-8,5
7116005	CMCC-ESM2	pr	99,29	87,29	92,02	106,18
		tasmax	34,14	33,72	33,85	33,96
		tasmin	-7,04	-6,38	-6,47	-7,17
	GFDL-ESM4	pr	99,29	92,20	85,48	81,73
		tasmax	34,14	34,07	34,11	34,30
		tasmin	-7,04	-5,85	-5,53	-5,92
7355007	NorESM2-MM	pr	120,85	103,81	113,27	109,18
		tasmax	30,43	33,27	33,54	33,42
		tasmin	-1,58	-3,55	-3,50	-3,51

**Tabla 4.26: Valores medios anuales históricos de índices climáticos empleados en el criterio de evaluación del Índice de Impacto Climático Integrado. Rx1day y Rx3day precipitaciones máximas de uno y tres días; T4x1day y T4x3day temperaturas medias asociadas a Rx1day y Rx3day; Tn4x1day y Tx4x1day temperatura mínima y máxima de Rx1day; MB\_ condición de humedad antecedente de 5 días; SPD días con precipitación sólida; SPA precipitación acumulada de los SPD; CWD días consecutivos húmedos; d50mm días con precipitación sobre 50 mm.**

Código estación	Modelo climático	Variable	Unidad	1985 - 2014		1990 - 2020	
				Estación	GCM	SSP2-4,5	SSP5-8,5
7116005	CMCC-ESM2	Rx1day	mm	99,29	87,29	92,02	106,18
		T4x1day	°C	9,50	10,72	9,87	10,74
		Tn4x1day	°C	5,86	9,13	7,98	9,04
		Tx4x1day	°C	13,15	12,31	11,76	12,45
		MB_Rx1day	mm	5,31	0,62	0,71	1,90
		MB_T4x1day	°C	9,17	8,69	7,57	8,92
		Rx3day	mm	147,19	179,35	171,06	221,64
		T4x3day	°C	9,14	8,66	8,12	8,82
		MB_Rx3day	mm	2,00	6,21	2,02	2,50
		MB_T4x3day	°C	9,13	7,34	7,79	7,73
		SPA	mm	0,00	2,96	3,38	3,38
		SPD	días	0,00	0,38	0,43	0,43
		CWD	días	5,00	5,50	5,14	5,71
		d50mm	días	6,25	6,63	6,71	6,71
	GFDL-ESM4	Rx1day	mm	99,29	92,20	85,48	81,73
		T4x1day	°C	9,50	11,02	12,02	11,69
		Tn4x1day	°C	5,86	8,46	9,06	9,39
		Tx4x1day	°C	13,15	13,58	14,98	13,99
		MB_Rx1day	mm	5,31	0,00	0,00	0,00
		MB_T4x1day	°C	9,17	8,56	9,91	10,02
		Rx3day	mm	147,19	151,02	137,06	129,23

Código estación	Modelo climático	Variable	Unidad	1985 - 2014		1990 - 2020	
				Estación	GCM	SSP2-4,5	SSP5-8,5
7355007	NorESM2-MM	T4x3day	°C	9,14	8,40	8,29	8,36
		MB_Rx3day	mm	2,00	2,50	2,85	2,85
		MB_T4x3day	°C	9,13	7,37	8,53	8,52
		SPA	mm	0,00	1,51	1,73	1,73
		SPD	días	0,00	0,13	0,14	0,14
		CWD	días	5,00	4,00	4,14	4,14
		d50mm	días	6,25	3,50	3,71	3,57
		Rx1day	mm	120,85	103,81	113,27	109,18
		T4x1day	°C	10,82	11,76	11,65	10,70
		Tn4x1day	°C	8,26	10,14	9,63	8,89
		Tx4x1day	°C	13,39	13,38	13,66	12,51
		MB_Rx1day	mm	18,77	10,98	15,43	14,18
		MB_T4x1day	°C	10,29	10,36	9,89	10,61
		Rx3day	mm	210,25	195,49	211,10	207,63
		T4x3day	°C	10,27	9,83	8,69	8,82
		MB_Rx3day	mm	6,47	10,52	15,00	14,65
MB_T4x3day	°C	9,75	10,07	9,47	10,12		
SPA	mm	106,73	47,95	52,84	59,90		
SPD	días	5,40	3,13	3,13	3,44		
CWD	días	7,33	6,33	6,44	6,31		
d50mm	días	7,67	8,33	9,19	8,81		

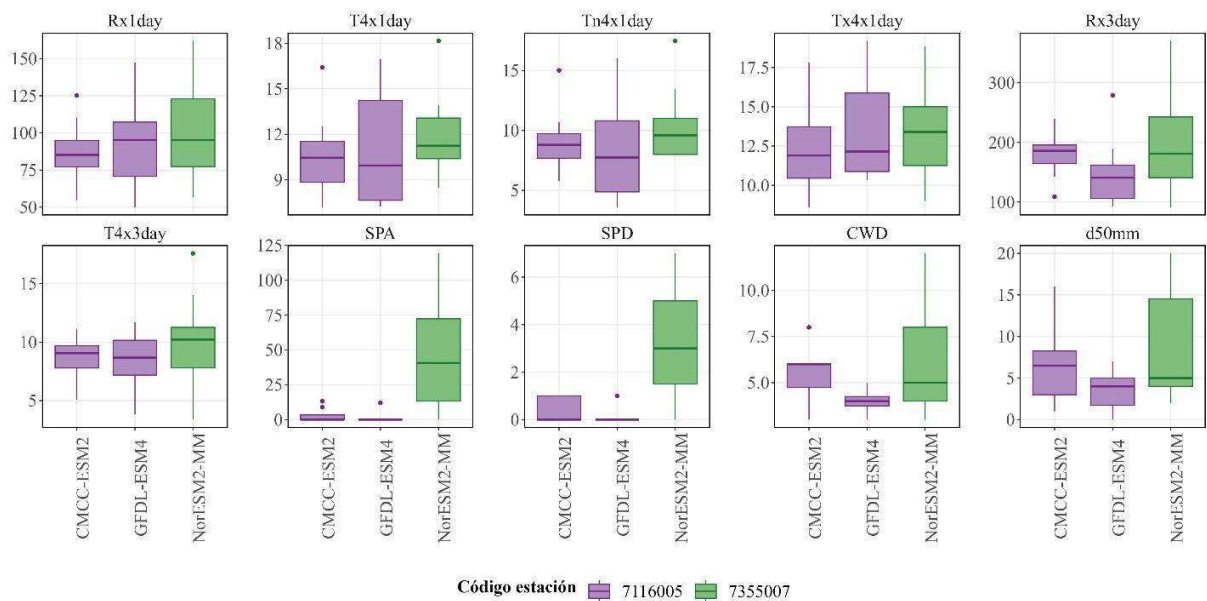


Figura 4.25: Índices climáticos simulados por modelos CMIP6 empleados en el Índice de Impacto Climático Integrado. Período 1985 – 2014.

Se aprecia que en ambas estaciones meteorológicas se reproduce una magnitud similar de las precipitaciones diarias máximas, Rx1day, observadas en el período 1985 a 2014, siendo estas mayores en la estación Ancoa Embalse. En el período 1990 a 2019, los valores medios de esta variable aumentan en Ancoa Embalse con el modelo seleccionado y en Potrero Grande con el modelo GCM CMCC-ESM2, en ambos escenarios futuros. Los valores de temperatura mínima, Tn4x1day, presentan diferencias en el valor medio entre 2°C y 4°C (dependiendo del modelo GCM) en el período 1985 a 2014 y el valor medio en el período 1990 a 2019 tiende a disminuir en Ancoa Embalse con el modelo seleccionado y en Potrero Grande con el modelo GCM CMCC-ESM2, en ambos escenarios futuros. En esta última estación, el modelo GFDL-ESM4 señala que los valores de temperatura mínima en los días en que ocurre la precipitación máxima tenderían a aumentar en el período 1990 a 2019.

El análisis de las condiciones de humedad antecedente promedio, a través del índice MB\_Rx1day, señala condiciones secas en Potrero Grande, en ambos períodos y escenarios. Para Ancoa Embalse la representación de este índice difiere en el período 1985 a 2014 pues mientras la humedad antecedente promedio observada representa una condición normal (entre 12,7 y 28 mm), la simulada promedio corresponde a condición seca la que cambia a condición normal en el periodo 1990 a 2019 en ambos escenarios; sin embargo, la mediana indica condición seca en todos los periodos y escenarios.

Se destaca que en Ancoa Embalse los eventos que ocurren en condición de humedad antecedente húmeda en promedio tienen un valor de precipitación máxima de 118,6 mm.

#### 4.8.3. Proyecciones de forzantes climáticas

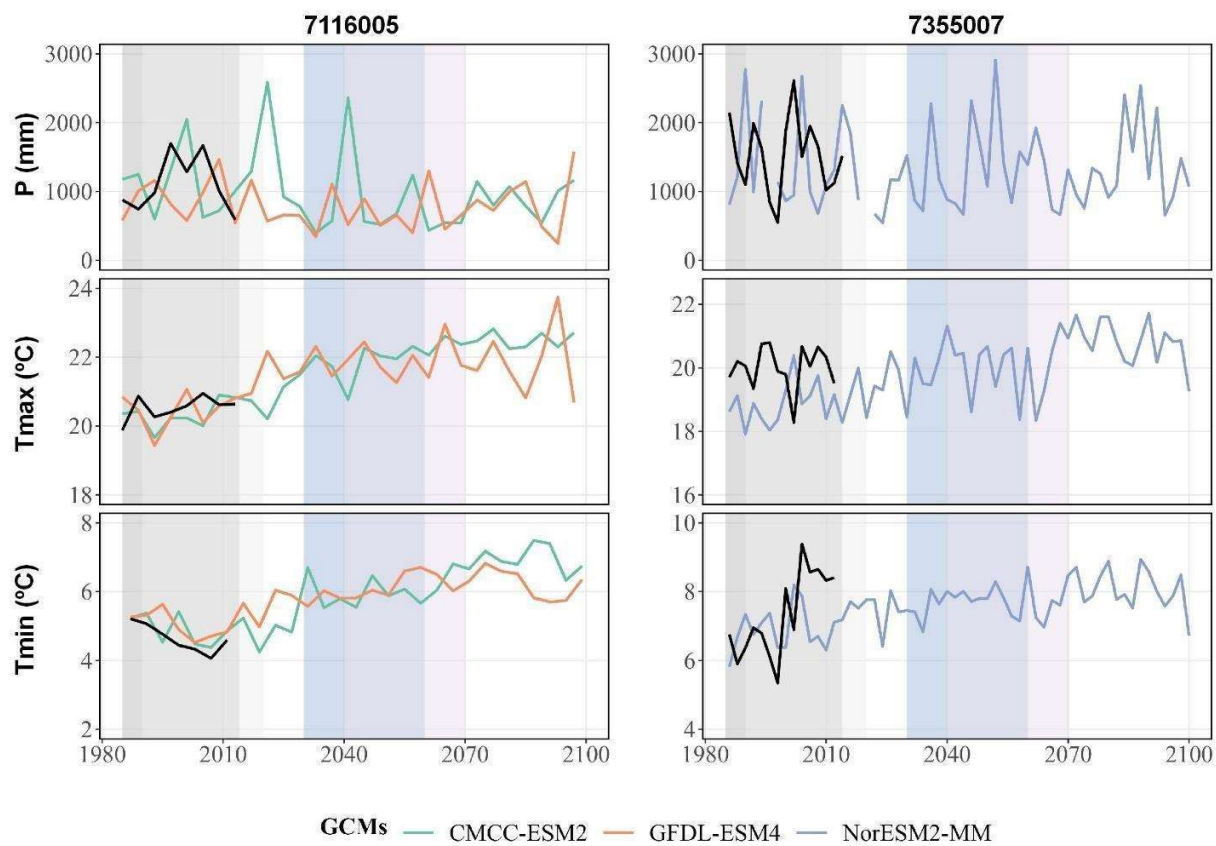
Se tienen las siguientes tuplas de análisis climático para ambos escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5):

- PH1-PJ1: Período 1985 – 2014 vs 2030 – 2060
- PH2-PJ1: Período 1990 – 2020 vs 2030 – 2060
- PH1-PJ2: Período 1985 – 2014 vs 2040 – 2070
- PH2-PJ2: Período 1990 – 2020 vs 2040 – 2070

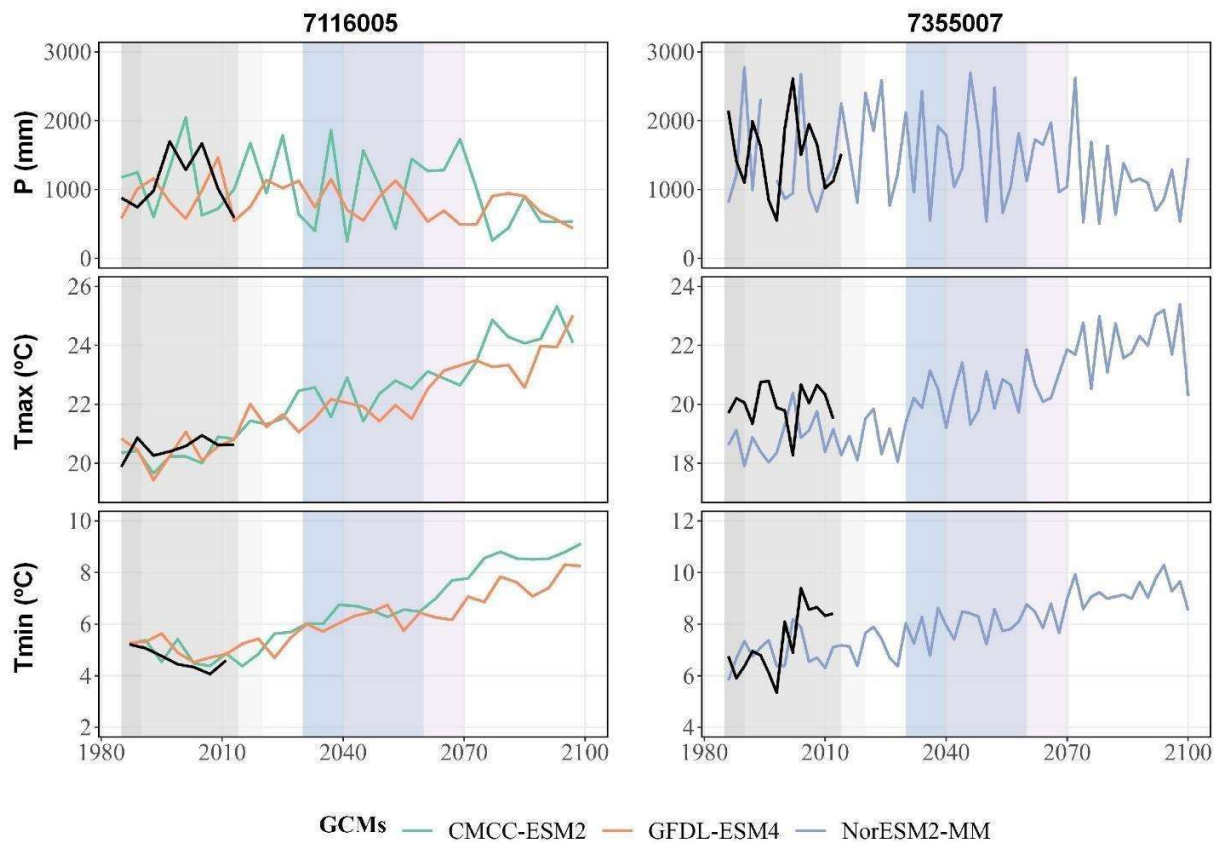
Las Figura 4.26 y Figura 4.27 muestran los valores medios históricos y proyectados para cada estación patrón. Las áreas sombreadas grises identifican los períodos climáticos históricos (1985 – 2014 & 1990 – 2020), mientras que las áreas sombreadas moradas marcan las ventanas climáticas de interés para el estudio (2030 – 2060 y 2040 – 2070).

En el escenario SP2-4.5, se aprecia en la estación Potrero Grande un disímil comportamiento futuro en la variabilidad de la precipitación anual proyectada por ambos modelos en ambos escenarios, mostrando el modelo CMCC-ESM2 valores significativamente mayores en el futuro cercano. La tendencia de la temperatura proyectada por ambos modelos GCM es claramente al aumento alcanzándose valores de 2,5°C superiores a los del período histórico en las temperaturas máxima y mínima hacia fines del 2100. En Ancoa Embalse la tendencia al aumento de la temperatura es mayor en las máximas (casi 3°C hacia fines del 2100) que en los valores mínimos.

En el escenario SP5-8.5 las tendencias al alza de las temperaturas en Potrero Grande se acentúan (4 a 5°C hacia fines del 2100) mientras la variabilidad de las precipitaciones anuales del periodo histórico tiende a mantenerse en el futuro con tendencia a la disminución de la variable. Las proyecciones en Ancoa Embalse tienen un comportamiento similar a Potrero Grande.



**Figura 4.26: Variables climáticas anuales históricas y proyectadas con el escenario SSP2-4.5. Las áreas sombreadas responden a los períodos de análisis climáticos.**



**Figura 4.27: Variables climáticas anuales históricas y proyectadas con el escenario SSP5-8.5**

El comportamiento estacional de las variables anuales se aprecia en las curvas de variación estacional que se presentan en las Figura 4.28 a Figura 4.31. La línea negra corresponde a la observación de la estación patrón durante el período histórico 1985 – 2014. Las Figuras confirman que en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 las tendencias al aumento de las temperaturas extremas son sostenidas durante todo el año en la estación Potrero Grande mientras que en Ancoa Embalse este aumento ocurriría solo para la temperatura mínima. La precipitación disminuiría principalmente en el período de invierno en ambas estaciones y de manera más significativa en Ancoa Embalse tanto en el futuro cercano como lejano para ambos escenarios. En Potrero Grande la disminución de precipitación en invierno es más notoria en el escenario SSP5-8.5.

Período 2030 - 2060; SSP2-4.5

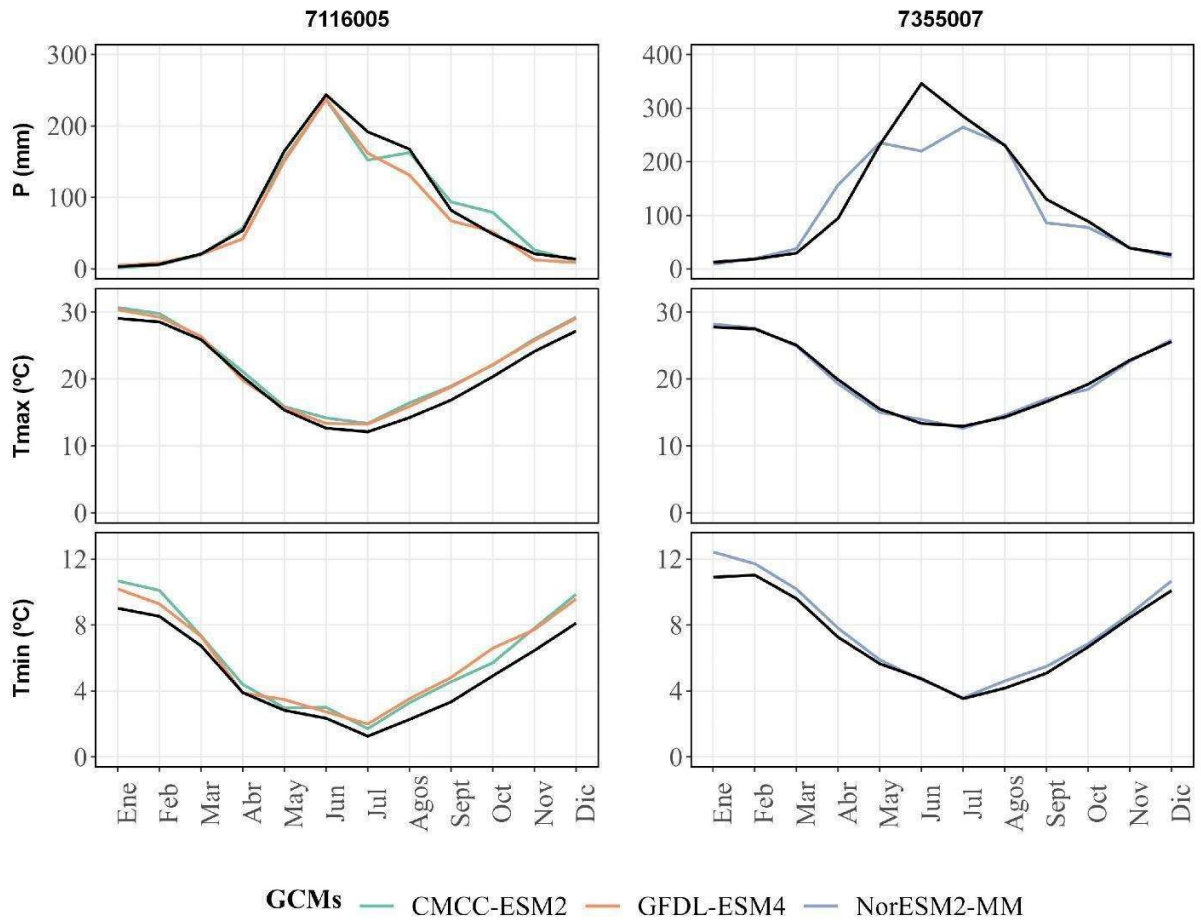


Figura 4.28: Curva de variación estacional de variables climáticas para el período 2030 – 2060 para escenario climático SSP2-4.5. La curva negra corresponde a las observaciones 1985 – 2014 de cada estación patrón.

Período 2030 - 2060; SSP5-8.5

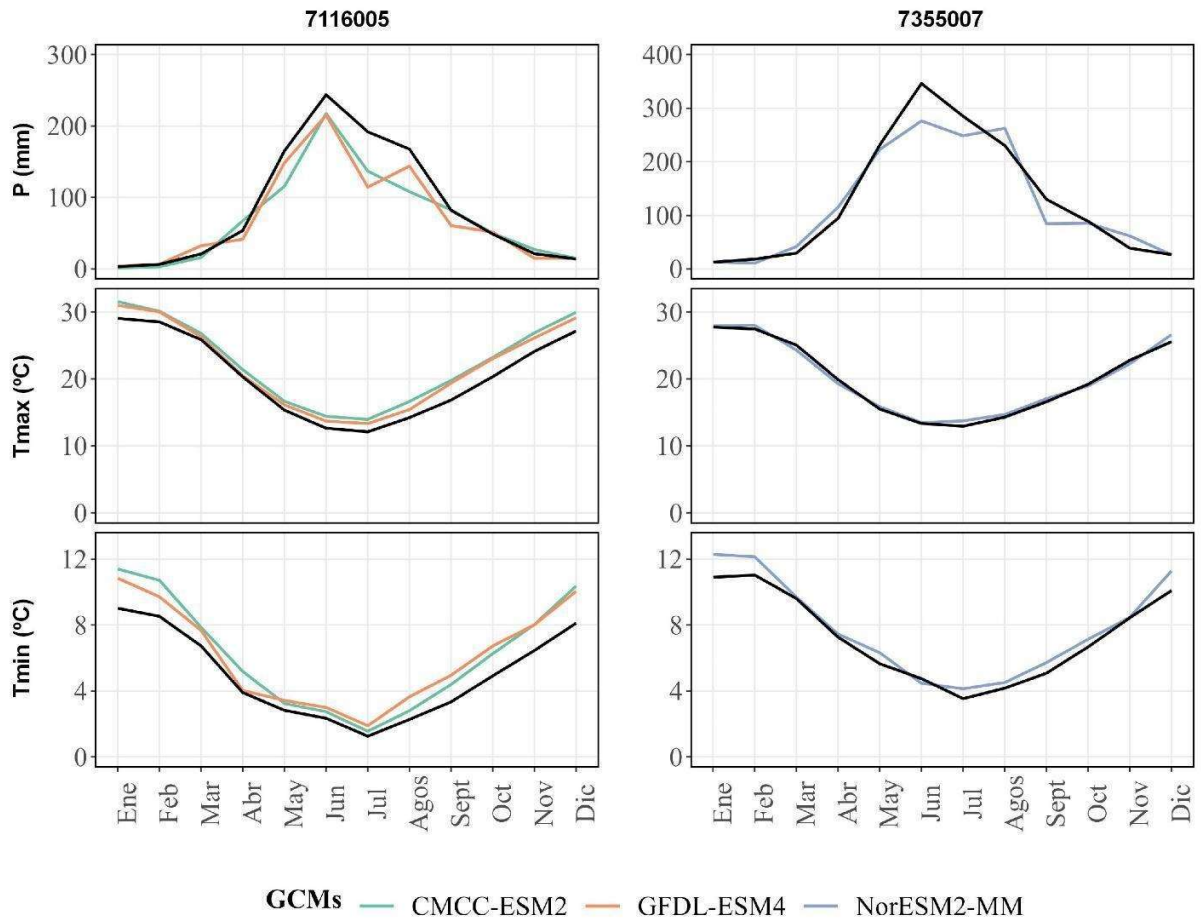


Figura 4.29: Curva de variación estacional de variables climáticas para el período 2030 – 2060 para escenario climático SSP5-8.5. La curva negra corresponde a las observaciones 1985 – 2014 de cada estación patrón.

Período 2040 - 2070; SSP2-4.5

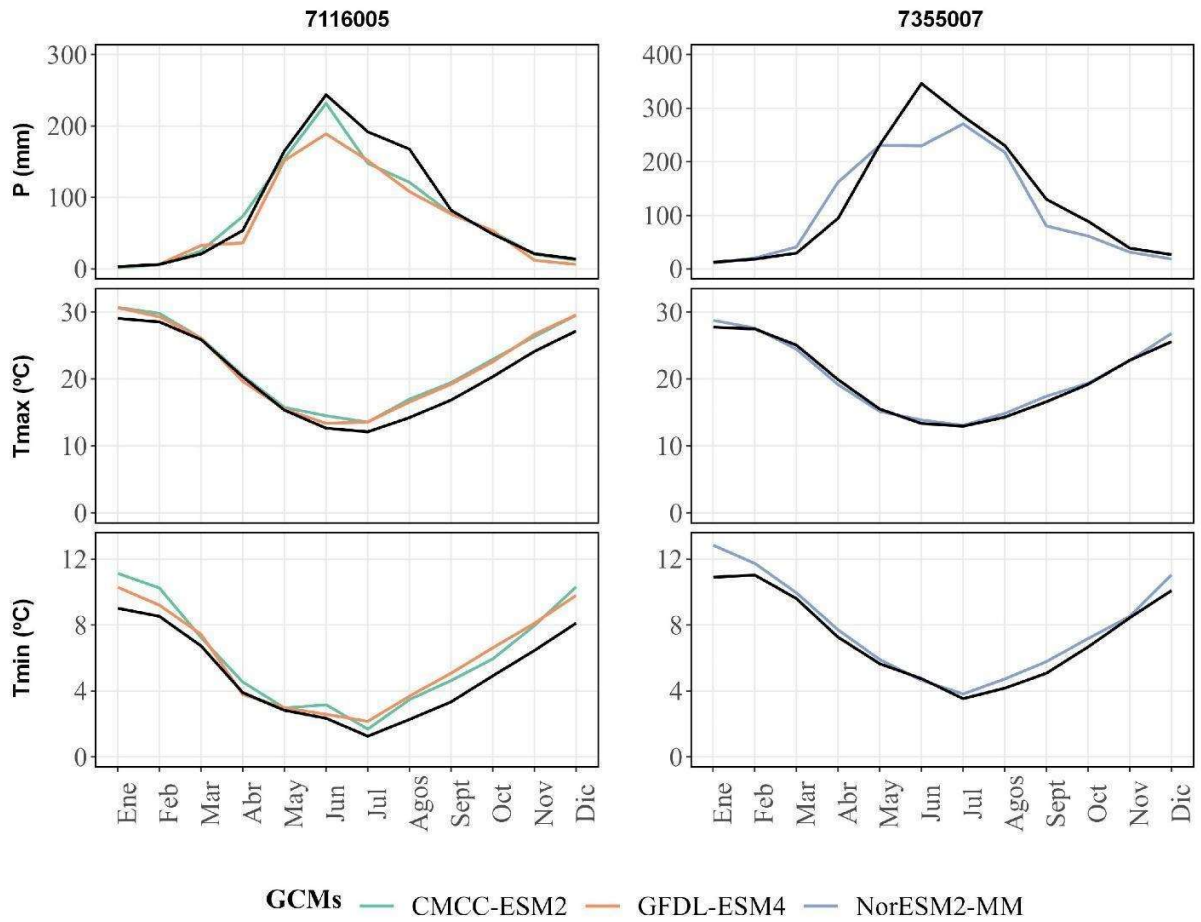


Figura 4.30: Curva de variación estacional de variables climáticas para el período 2040 – 2070 para escenario climático SSP2-4.5. La curva negra corresponde a las observaciones 1985 – 2014 de cada estación patrón.

Período 2040 - 2070; SSP5-8.5

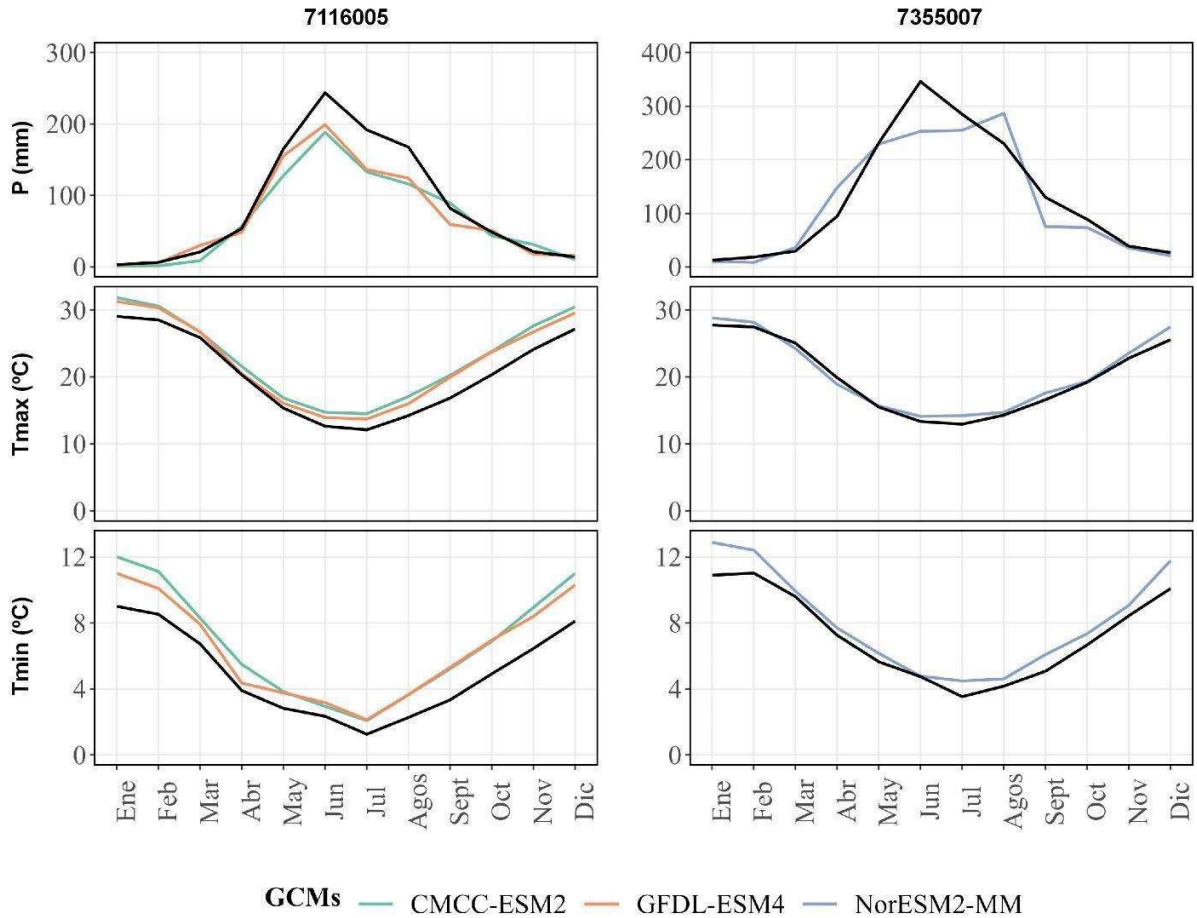


Figura 4.31. Curva de variación estacional de variables climáticas para el período 2040 – 2070 para escenario climático SSP5-8.5. La curva negra corresponde a las observaciones 1985 – 2014 de cada estación patrón.

Los valores medios proyectados de los índices climáticos se resumen en la Tabla 4.27 mientras que las Figuras 4.32 a 4.35 ilustran la variación proyectada en los mismos. En general, la estación Potrero Grande (7116005) muestra una tendencia a la disminución en la precipitación máxima de uno y tres días, en particular con SSP5-8.5. Mientras que Ancoa Embalse (7355007) presenta aumentos en la precipitación, también para SSP5-8.5. En relación con las temperaturas asociadas a las precipitaciones máximas se observan aumentos en ambos escenarios climáticos y períodos de tiempo, siendo más pronunciado en el escenario SSP5-8,5 y en la estación Ancoa Embalse. Desde lo anterior, se infiere que la zona de estudio será más susceptible a presentar tormentas cálidas (i.e., isoterma 0 altas). En consecuencia, se prevé un aumento en el riesgo de tormentas como las presenciadas en junio 2023.

En relación con los días de precipitación sólida (SPD) y las precipitaciones asociadas a éstos (SPA) no existe una tendencia clara de aumento o disminución, es decir, bajo un escenario climático y determinada estación aumenta el índice SPD, mientras que en otro escenario disminuye el índice. No obstante, Ancoa embalse presenta aumentos significativos en los días consecutivos de precipitación (CWD) como también en aquellos días con precipitación sobre los 50 mm.

**Tabla 4.27: Valores medios proyectados de índices climáticos.**

Código estación	Modelo Climático	Variable	Unidad	SSP2-4,5		SSP5-8,5	
				2030-2060	2040-2070	2030-2060	2040-2070
7116005	CMCC-ESM2	Rx1day	mm	96,69	85,25	105,55	115,36
		T4x1day	°C	10,13	10,83	12,82	14,48
		Tn4x1day	°C	7,70	8,00	8,48	8,66
		Tx4x1day	°C	12,55	13,65	17,16	20,29
		MB_Rx1day	mm	0,64	0,56	1,75	2,79
		MB_T4x1day	°C	9,24	10,87	11,56	11,80
		Rx3day	mm	166,53	129,86	191,84	205,10
		T4x3day	°C	9,77	11,68	9,65	11,10
		MB_Rx3day	mm	0,00	0,00	1,48	2,77
		MB_T4x3day	°C	10,08	11,56	10,02	11,44
		SPA	mm	1,82	1,59	5,24	0,79
		SPD	días	0,14	0,13	0,57	0,13
		CWD	días	4,86	4,13	6,57	6,50
		d50mm	días	5,86	5,00	6,71	7,13
	GFDL-ESM4	Rx1day	mm	74,55	71,69	96,83	97,84
		T4x1day	°C	10,43	10,93	11,56	10,78
		Tn4x1day	°C	8,79	8,84	10,00	9,94
		Tx4x1day	°C	12,06	13,02	13,12	11,62
		MB_Rx1day	mm	0,00	0,00	3,87	3,39
		MB_T4x1day	°C	9,17	9,41	10,86	10,64
		Rx3day	mm	125,04	134,49	159,65	137,82
		T4x3day	°C	8,80	9,41	10,34	9,33
		MB_Rx3day	mm	0,00	0,00	3,15	2,75
		MB_T4x3day	°C	6,82	7,70	11,30	11,54
SPA		mm	20,15	17,63	0,00	1,94	
SPD		días	0,29	0,25	0,00	0,13	
CWD		días	3,86	4,13	4,71	4,38	
d50mm		días	2,86	3,25	4,14	3,13	
7355007	NorESM2-MM	Rx1day	mm	128,06	124,33	154,60	141,38
		T4x1day	°C	12,29	12,50	10,79	11,48
		Tn4x1day	°C	9,80	8,96	8,13	9,50
		Tx4x1day	°C	14,78	16,04	13,46	13,46
		MB_Rx1day	mm	0,00	1,09	2,24	2,20
		MB_T4x1day	°C	11,66	9,92	11,64	11,88
		Rx3day	mm	224,21	220,58	238,39	233,64
		T4x3day	°C	9,14	9,41	9,97	9,35
		MB_Rx3day	mm	4,06	3,13	5,92	6,58

	MB_T4x3day	°C	10,70	9,38	11,43	11,79
	SPA	mm	87,27	81,18	44,93	46,71
	SPD	días	4,38	4,38	2,50	2,13
	CWD	días	5,94	5,81	6,44	6,31
	d50mm	días	7,50	7,31	8,06	7,88

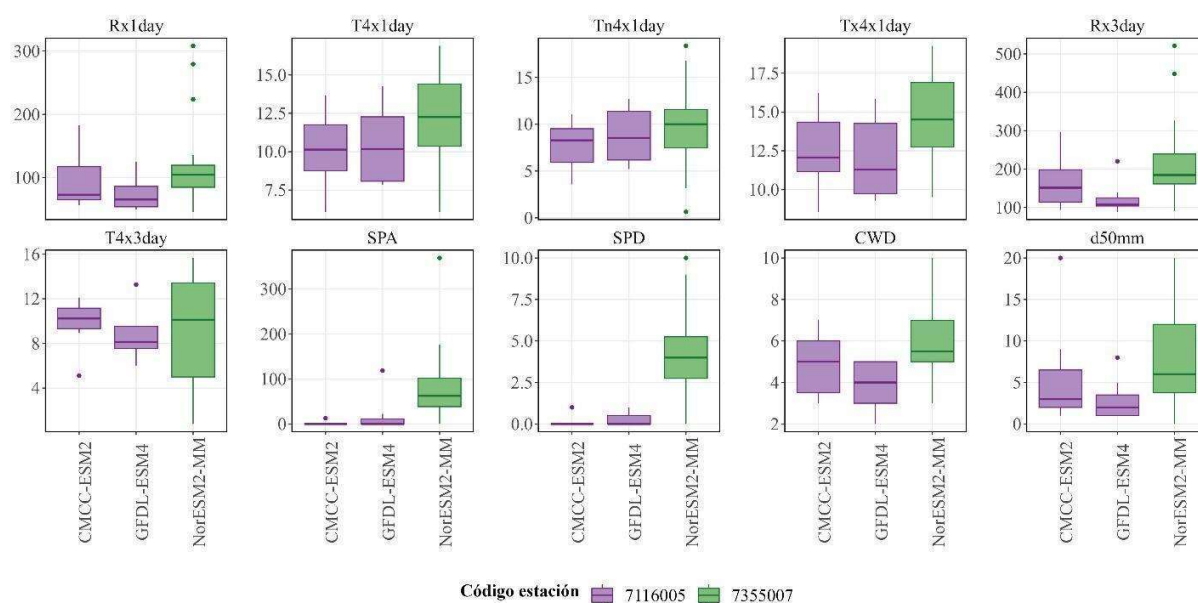


Figura 4.32: Índices climáticos simulados por modelos CMIP6 empleados en el Índice de Impacto Climático Integrado. Período 2030 – 2060; Escenario SSP2-4.5.

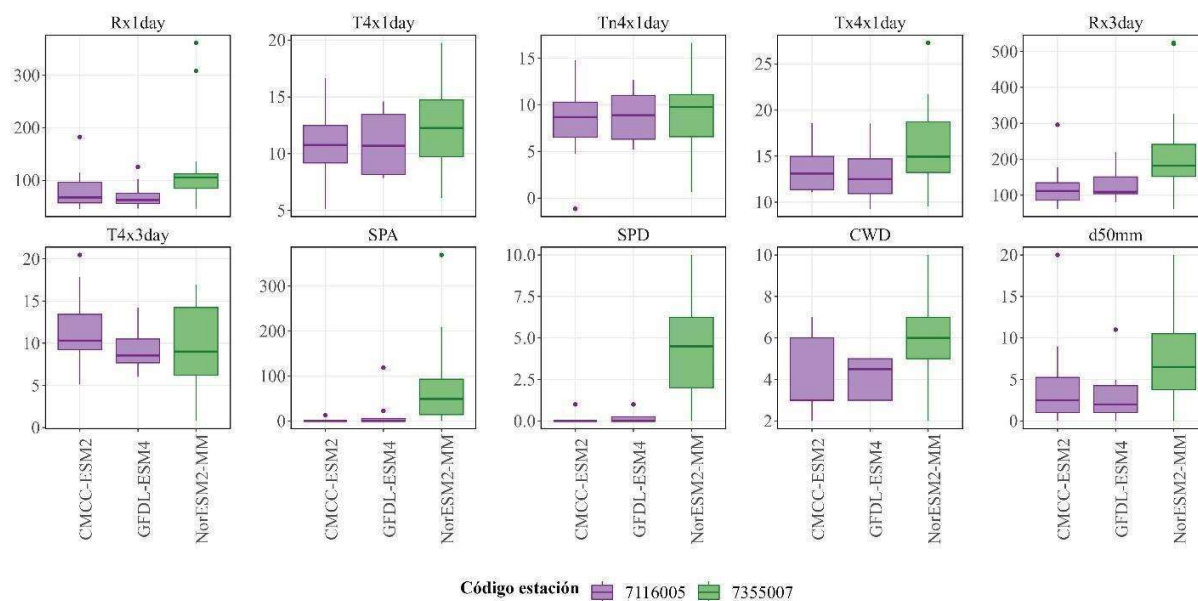
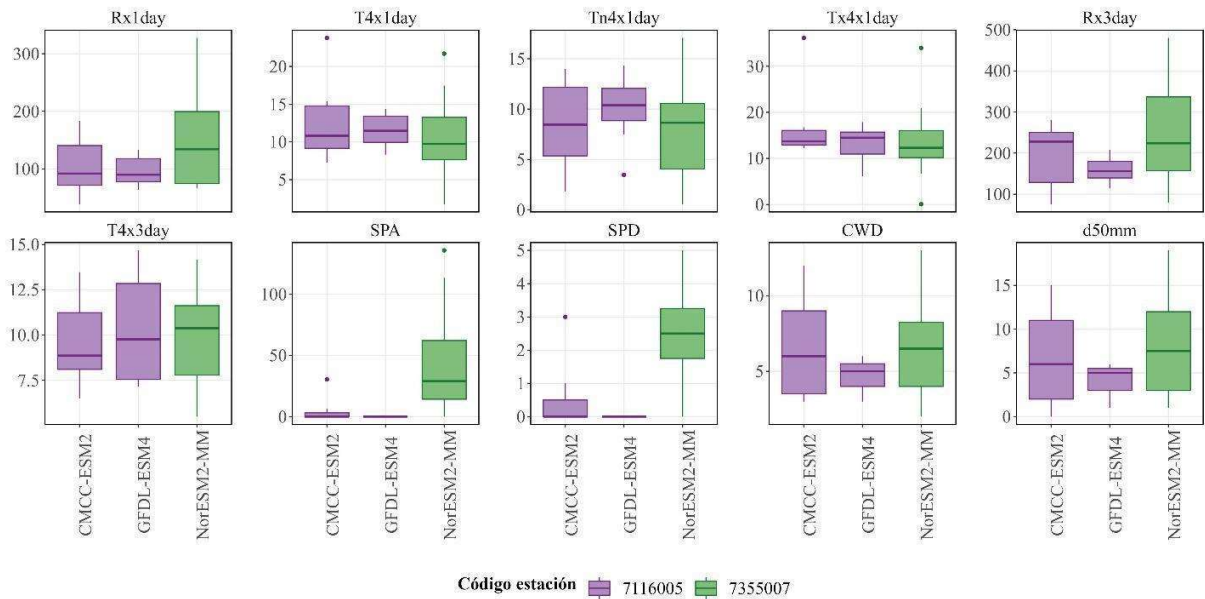
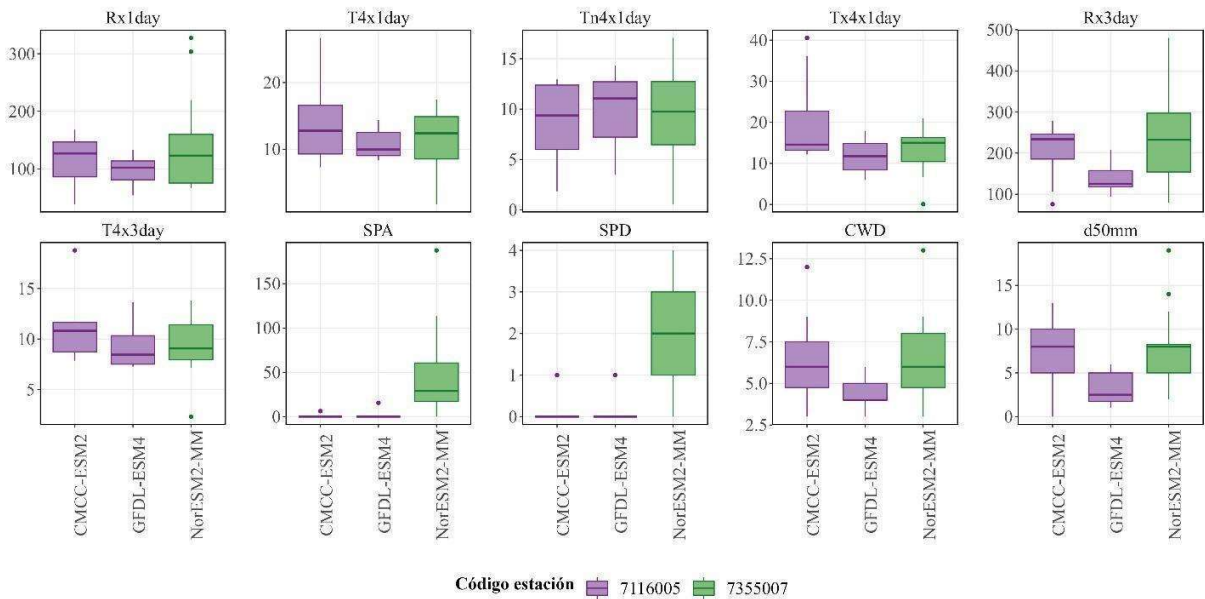


Figura 4.33: Índices climáticos simulados por modelos CMIP6 empleados en el Índice de Impacto Climático Integrado. Período 2040 – 2070; Escenario SSP2-4.5.



**Figura 4.34. Índices climáticos simulados por modelos CMIP6 empleados en el Índice de Impacto Climático Integrado. Período 2030 – 2060; Escenario SSP5-8.5.**



**Figura 4.35. Índices climáticos simulados por modelos CMIP6 empleados en el Índice de Impacto Climático Integrado. Período 2040 – 2070; Escenario SSP5-8.5.**

Las Tabla 4.28 y Tabla 4.29 presentan la diferencia porcentual y unitaria de precipitaciones y temperaturas para las tuplas indicadas de forma previa, según cada escenario climático, respectivamente. El cambio de los índices climáticos se presenta en las Tabla 4.30 y Tabla 4.31, para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente.

**Tabla 4.28: Cambio de variables climáticas bajo el escenario SSP2-4.5. El cambio de la precipitación se mide en términos porcentuales  $\left(100 \cdot \frac{GCM_{proj} - GCM_{hist}}{GCM_{hist}}\right)$ , mientras que los cambios de las temperaturas responden a la diferencia unitaria  $(GCM_{proj} - GCM_{hist})$ .**

Código estación	GCM	Variable	SSP2-4,5			
			PH1 – PJ1	PH2 – PJ1	PH1 – PJ2	PH2 – PJ2
7116005	CMCC-ESM2	pr	-17,12	-16,69	-21,15	-20,75
		tasmax	1,54	1,50	1,72	1,68
		tasmin	1,06	1,14	1,17	1,25
	GFDL-ESM4	pr	-29,19	-34,12	-24,64	-29,88
		tasmax	1,44	1,43	1,50	1,49
		tasmin	1,03	0,99	1,20	1,16
7355007	NorESM2-MM	pr	-10,46	-17,84	-12,31	-19,54
		tasmax	1,12	1,06	1,27	1,21
		tasmin	0,83	0,60	0,87	0,64

**Tabla 4.29: Cambio de variables climáticas bajo el escenario SSP5-8.5. El cambio de la precipitación se mide en términos porcentuales  $\left(100 \cdot \frac{GCM_{proj} - GCM_{hist}}{GCM_{hist}}\right)$ , mientras que los cambios de las temperaturas responden a la diferencia unitaria  $(GCM_{proj} - GCM_{hist})$ .**

Código estación	GCM	Variable	SSP5-8,5			
			PH1 – PJ1	PH2-PJ1	PH1 - PJ2	PH2 - PJ2
7116005	CMCC-ESM2	pr	-8,47	-12,39	3,24	-1,18
		tasmax	1,98	1,84	2,25	2,11
		tasmin	1,52	1,64	1,85	1,97
	GFDL-ESM4	pr	-3,41	-4,24	-17,99	-18,69
		tasmax	1,36	1,19	1,79	1,63
		tasmin	1,16	1,11	1,28	1,23
7355007	NorESM2-MM	pr	-1,74	-6,21	-4,26	-8,62
		tasmax	1,50	1,50	1,67	1,67
		tasmin	1,07	0,96	1,24	1,13

**Tabla 4.30: Cambio de índices climáticos bajo el escenario SSP2-4.5. El cambio de los índices con (\*) se mide en términos porcentuales  $\left(100 \cdot \frac{GCM_{proj} - GCM_{hist}}{GCM_{hist}}\right)$ , mientras que los cambios de los índices con (†) responden a la diferencia unitaria  $(GCM_{proj} - GCM_{hist})$ .**

Código estación	GCM	Variable	SSP2-4.5			
			PH1 – PJ1	PH2 – PJ1	PH1 – PJ2	PH2 – PJ2
7116005	CMCC-ESM2	Rx1day*	10,77	5,07	-2,34	-7,36
		T4x1day†	-0,60	0,26	0,10	0,96
		Rx3day*	-7,15	-2,65	-27,60	-24,08
		T4x3day	1,17	0,75	2,66	2,24
		SPA*	-38,53	-46,22	-46,22	-52,94
		SPD†	-0,23	-0,29	-0,25	-0,30

Código estación	GCM	Variable	SSP2-4.5			
			PH1 – PJ1	PH2 – PJ1	PH1 – PJ2	PH2 – PJ2
		CWD†	-0,64	-0,29	-1,38	-1,02
		d50mm†	-0,77	-0,86	-1,63	-1,71
	GFDL-ESM4	Rx1day*	-19,15	-12,79	-22,25	-16,14
		T4x1day†	-0,59	-1,59	-0,09	-1,09
		Rx3day*	-17,20	-8,77	-10,95	-1,87
		T4x3day	0,47	0,18	0,80	0,51
		SPA *	1233,44	1066,76	1066,76	920,92
		SPD†	0,16	0,14	0,13	0,11
		CWD†	-0,14	-0,29	0,13	-0,02
		d50mm†	-0,64	-0,86	-0,25	-0,46
7355007	NorESM2-MM	Rx1day*	23,36	13,05	19,76	9,76
		T4x1day†	0,53	0,64	0,73	0,85
		Rx3day*	14,69	6,21	12,84	4,49
		T4x3day	-0,99	-0,40	-0,71	-0,13
		SPA *	82,01	65,15	69,33	53,64
		SPD†	1,24	1,25	1,24	1,25
		CWD†	-0,40	-0,50	-0,52	-0,63
		d50mm†	-0,83	-1,69	-1,02	-1,88

Tabla 4.31: Cambio de índices climáticos bajo el escenario SSP5-8.5. El cambio de los índices con (\*) se mide en términos porcentuales  $\left(100 \cdot \frac{GCM_{proj} - GC_{hist}}{GCM_{hist}}\right)$ , mientras que los cambios de los índices con (†) responden a la diferencia unitaria  $(GCM_{proj} - GCM_{hist})$ .

Código estación	GCM	Variable	SSP5-8.5			
			PH1 – PJ1	PH2 – PJ1	PH1 – PJ2	PH2 – PJ2
7116005	CMCC-ESM2	Rx1day*	20,92	-0,60	32,16	8,64
		T4x1day†	2,10	2,07	3,75	3,73
		Rx3day*	6,96	-13,44	14,35	-7,46
		T4x3day	0,78	0,25	2,73	2,20
		SPA *	77,19	55,05	-73,42	-76,75
		SPD†	0,20	0,14	-0,25	-0,30
		CWD†	1,07	0,86	1,00	0,79
		d50mm†	0,09	0,00	0,50	0,41
	GFDL-ESM4	Rx1day*	5,02	18,48	6,11	19,71
		T4x1day†	0,54	-0,13	-0,24	-0,91
		Rx3day*	5,71	23,53	-8,74	6,64
		T4x3day	2,09	1,80	-0,09	-0,38
		SPA *	-100,00	-100,00	28,48	12,42
		SPD†	-0,13	-0,14	0,00	-0,02

Código estación	GCM	Variable	SSP5-8.5			
			PH1 – PJ1	PH2 – PJ1	PH1 – PJ2	PH2 – PJ2
7355007	NorESM2-MM	CWD†	0,71	0,57	0,38	0,23
		d50mm†	0,64	0,57	-0,38	-0,45
		Rx1day*	48,92	41,60	36,18	29,49
		T4x1day†	-0,97	0,09	-0,28	0,78
		Rx3day*	21,95	14,81	19,52	12,52
		T4x3day	-0,36	1,09	0,33	1,78
		SPA*	-6,29	-25,00	-2,57	-22,02
		SPD†	-0,63	-0,94	-1,01	-1,31
CWD†	0,10	0,13	-0,02	0,00		
d50mm†	-0,27	-0,75	-0,46	-0,94		

#### 4.9. Análisis de frecuencia

A partir del cálculo del volumen pluvial por evento de máxima precipitación anual por periodo y caso de estudio (i.e., cálculo  $P(LN) * A(LN)$ ; donde LN corresponde a la posición de la línea de nieve), para cada cuenca se realiza el análisis de frecuencia correspondiente. De allí se obtiene resultados como los presentados, a modo de ejemplo, en la Figura 4.36 para la cuenca Chupallar. El resto de los resultados se presentan en Anexo.

### AF con proyecciones futuras - Cuenca Chupallar

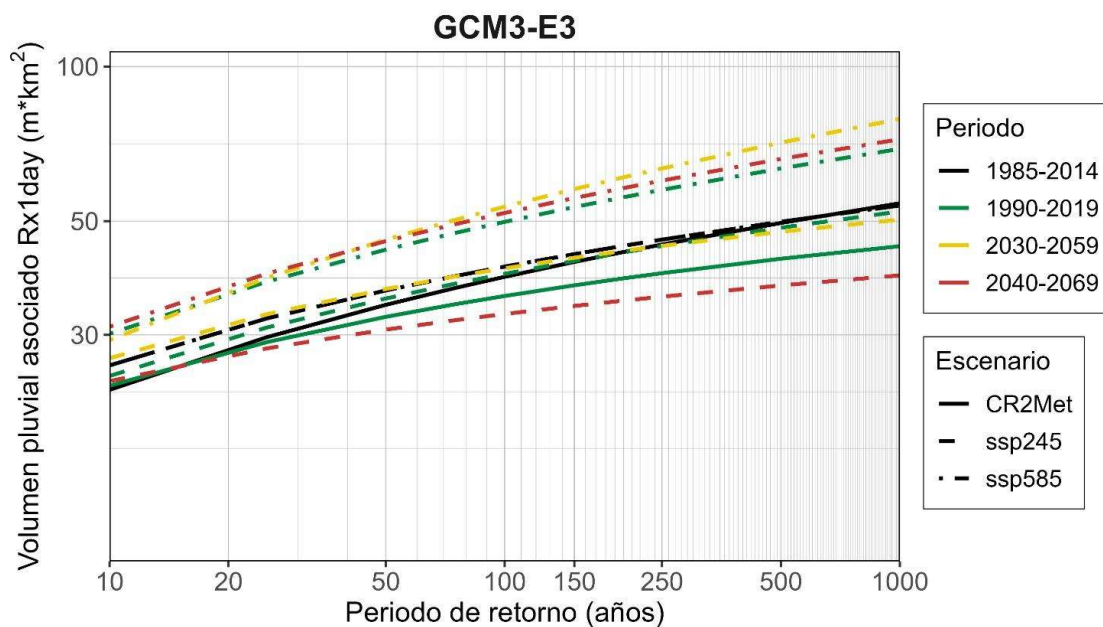


Figura 4.36. Ejemplo de resultados de análisis de frecuencia asociado al volumen pluvial para diferentes casos y periodos. Referencia (línea continua) corresponde a resultados derivados del análisis de CR2Met.

La Tabla 4.32 resume los resultados asociados a los periodos de retorno 100 y 150 años derivados del análisis de frecuencia del volumen pluvial aportante por evento de máxima precipitación anual en el periodo histórico y proyecciones futuras. Adicionalmente, se incluye la transformación a precipitación líquida aportante en 24 hrs, requerida para el análisis hidrológico mediante hidrograma unitario sintético, luego de aplicar como referencia la línea de nieve ubicada a 1.830 y 2.350 m s.n.m.

**Tabla 4.32: Resultados periodo de retorno 100 y 150 años derivado del análisis de frecuencia del volumen pluvial aportante por evento de máxima precipitación para el periodo histórico de referencia (CR2Met) y derivado de la selección de modelos de cambio climático para el periodo de referencia de referencia y futuro. Se incluye además la transformación a precipitación líquida en 24 hrs aportante según la incorporación de la línea de nieve (LN) ubicada a 1.830 y 2.350 m s.n.m.**

Cuenca	Producto / Modelo	Escenario	Periodo	Función de mejor ajuste	Volumen pluvial aportante (m*Km <sup>2</sup> )		Precipitación líquida aportante (mm)			
					T100	T150	LN 1830 m s.n.m.		LN 2350 m s.n.m.	
							P100	P150	P100	P150
<b>Chupallar</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1985-2014</b>	<b>Gumbel</b>	<b>44,5</b>	<b>47,6</b>	<b>333,8</b>	<b>356,9</b>	<b>269,2</b>	<b>356,9</b>
<b>Chupallar</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1990-2019</b>	<b>GEV</b>	<b>40,9</b>	<b>42,9</b>	<b>306,3</b>	<b>321,3</b>	<b>247,0</b>	<b>321,3</b>
Chupallar	GCM3-E3	Referencia	1985-2014	Pearson III	46,6	49,3	349,5	369,6	281,8	369,6
Chupallar	GCM3-E3	ssp245	1990-2019	GEV	45,2	47,8	338,4	358,5	272,8	358,5
Chupallar	GCM3-E3	ssp245	2030-2059	GEV	46,3	48,5	346,8	363,7	279,7	363,7
Chupallar	GCM3-E3	ssp245	2040-2069	Normal	37,7	39,1	282,6	292,9	227,8	292,9
Chupallar	GCM3-E3	ssp585	1990-2019	Gumbel	57,0	60,9	427,2	456,3	344,4	456,3
Chupallar	GCM3-E3	ssp585	2030-2059	GEV	61,0	66,0	457,3	494,7	368,7	494,7
Chupallar	GCM3-E3	ssp585	2040-2069	Gumbel	59,3	63,4	444,6	475,3	358,5	475,3
<b>Claro Los Vientos</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1985-2014</b>	<b>Gumbel</b>	<b>51,9</b>	<b>55,7</b>	<b>277,5</b>	<b>297,7</b>	<b>157,3</b>	<b>168,8</b>
<b>Claro Los Vientos</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1990-2019</b>	<b>GEV</b>	<b>51,7</b>	<b>55,1</b>	<b>276,4</b>	<b>294,5</b>	<b>156,7</b>	<b>166,9</b>
Claro Los Vientos	GCM1-E2	Referencia	1985-2014	Gamma (2p)	87,7	94,7	469,1	506,6	265,9	287,1
Claro Los Vientos	GCM1-E2	ssp245	1990-2019	LogPearson III	69,8	70,9	373,2	379,0	211,6	214,8
Claro Los Vientos	GCM1-E2	ssp245	2030-2059	LogPearson III	77,2	79,1	412,9	422,9	234,0	239,7
Claro Los Vientos	GCM1-E2	ssp245	2040-2069	GEV	94,0	101,4	502,6	542,0	284,9	307,2
Claro Los Vientos	GCM2-E2	ssp245	1985-2014	Gumbel	62,6	67,1	335,0	359,1	189,9	203,5
Claro Los Vientos	GCM2-E2	ssp245	1990-2019	LogPearson III	57,2	58,5	305,8	313,1	173,3	177,5
Claro Los Vientos	GCM2-E2	ssp245	2030-2059	Normal	33,5	34,7	179,0	185,8	101,4	105,3

Claro Vientos	Los	GCM2-E2	ssp245	2040-2069	Gumbel	42,1	45,0	225,3	240,6	127,7	136,4
Claro Vientos	Los	GCM1-E2	ssp585	1990-2019	Gamma (2p)	106,7	115,7	570,7	618,6	323,5	350,6
Claro Vientos	Los	GCM1-E2	ssp585	2030-2059	Normal	92,3	96,0	493,4	513,2	279,6	290,9
Claro Vientos	Los	GCM1-E2	ssp585	2040-2069	Gumbel	101,6	109,3	543,3	584,3	307,9	331,2
Claro Vientos	Los	GCM2-E2	ssp585	1990-2019	LogPearson III	57,4	58,1	307,1	310,7	174,1	176,1
Claro Vientos	Los	GCM2-E2	ssp585	2030-2059	Gumbel	69,2	74,1	370,2	396,5	209,9	224,7
Claro Vientos	Los	GCM2-E2	ssp585	2040-2069	Gumbel	71,4	76,5	381,7	408,9	216,4	231,7
<b>Maitenhuapi</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1985-2014</b>	<b>Normal</b>	<b>90,5</b>	<b>93,2</b>	<b>113,6</b>	<b>116,9</b>	<b>103,6</b>	<b>106,6</b>	
<b>Maitenhuapi</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1990-2019</b>	<b>GEV</b>	<b>84,4</b>	<b>85,6</b>	<b>106,0</b>	<b>107,5</b>	<b>96,6</b>	<b>97,9</b>	
Maitenhuapi	GCM1-E2	Referencia	1985-2014	Normal	114,6	117,6	143,9	147,7	131,2	134,6	
Maitenhuapi	GCM1-E2	ssp245	1990-2019	LogPearson III	113,0	114,2	141,8	143,4	129,3	130,7	
Maitenhuapi	GCM1-E2	ssp245	2030-2059	GEV	175,2	188,4	219,9	236,5	200,4	215,6	
Maitenhuapi	GCM1-E2	ssp245	2040-2069	LogNormal	142,2	149,7	178,5	187,9	162,7	171,3	
Maitenhuapi	GCM2-E2	Referencia	1985-2014	GEV	103,3	104,0	129,6	130,6	118,1	119,0	
Maitenhuapi	GCM2-E2	ssp245	1990-2019	LogPearson III	102,1	102,3	128,2	128,4	116,9	117,1	
Maitenhuapi	GCM2-E2	ssp245	2030-2059	GEV	83,2	84,3	104,5	105,8	95,2	96,5	
Maitenhuapi	GCM2-E2	ssp245	2040-2069	LogPearson III	94,3	96,3	118,3	120,9	107,8	110,2	
Maitenhuapi	GCM1-E2	ssp585	1990-2019	LogPearson III	129,6	133,4	162,7	167,4	148,3	152,6	
Maitenhuapi	GCM1-E2	ssp585	2030-2059	GEV	169,7	175,5	213,0	220,3	194,1	200,8	
Maitenhuapi	GCM1-E2	ssp585	2040-2069	Pearson III	197,0	211,4	247,2	265,3	225,3	241,8	
Maitenhuapi	GCM2-E2	ssp585	1990-2019	LogPearson III	102,0	102,3	128,1	128,5	116,8	117,1	
Maitenhuapi	GCM2-E2	ssp585	2030-2059	GEV	124,6	127,9	156,4	160,5	142,5	146,3	
Maitenhuapi	GCM2-E2	ssp585	2040-2069	LogPearson III	119,4	120,8	149,9	151,6	136,6	138,2	
<b>Putagán</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1985-2014</b>	<b>Normal</b>	<b>11,2</b>	<b>11,5</b>	<b>200,6</b>	<b>207,1</b>	<b>200,6</b>	<b>207,1</b>	
<b>Putagán</b>	<b>CR2Met</b>	<b>Referencia</b>	<b>1990-2019</b>	<b>Normal</b>	<b>11,6</b>	<b>12,0</b>	<b>209,1</b>	<b>215,9</b>	<b>209,1</b>	<b>215,9</b>	
<b>Putagán</b>	GCM3-E3	Referencia	1985-2014	Pearson III	12,5	13,0	225,1	233,9	225,1	233,9	

<b>Putagán</b>	GCM3-E3	ssp245	1990-2019	Normal	11,8	12,2	211,7	218,5	211,7	218,5
<b>Putagán</b>	GCM3-E3	ssp245	2030-2059	Pearson III	9,8	10,0	176,2	179,4	176,2	179,4
<b>Putagán</b>	GCM3-E3	ssp245	2040-2069	LogPearson III	8,6	8,6	154,7	154,7	154,7	154,7
<b>Putagán</b>	GCM3-E3	ssp585	1990-2019	Pearson III	14,5	15,1	260,6	271,9	260,6	271,9
<b>Putagán</b>	GCM3-E3	ssp585	2030-2059	Gumbel	16,8	17,9	301,6	322,0	301,6	322,0
<b>Putagán</b>	GCM3-E3	ssp585	2040-2069	Pearson III	13,1	13,6	235,9	245,2	235,9	245,2

#### 4.10. Análisis hidrológico precipitación – escorrentía

De acuerdo con lo expuesto en la sección de metodología, se adoptan los valores de precipitación asociados a los períodos de retorno de interés  $T=100$  y  $T=150$  años en cada una de las cuencas, consignados en la Tabla 4.32, para cada escenario y área pluvial de interés. En consideración a lo observado y proyectado para el futuro, se seleccionan las condiciones de humedad antecedente secas y normales y las distribuciones de precipitación centrada y tardía (Tipo II y Tipo III, con probabilidad 50%) para efectuar los análisis. Estas decisiones se adoptan considerando que las líneas de nieve seleccionadas representan condiciones que según el Observatorio Andino ocurren con excedencias del 25% y 10% desde el año 2000.

Los resultados de los hidrogramas para cada una de las simulaciones realizadas se presentan en el Anexo digital Hidrogramas de Escorrentía Directa. En las tablas 4.33 a 4.36 se detallan los resultados de los caudales máximos de escorrentía directa para cada simulación en los escenarios de Línea de Base mientras que en las tablas 4.37 a 4.40 se muestran las proyecciones realizadas con los escenarios de Cambio Climático. En cada caso simulado en un escenario dado, para igual condición en periodo histórico (1990-2019) y futuro se calcula el factor entre los caudales máximos simulados y se selecciona el mayor factor para cada escenario futuro. Dicho factor se aplica posteriormente a los valores de caudal máximo instantáneo (QMI) determinados bajo iguales condiciones en el periodo histórico 1990-2019, considerado como referencia, usando observaciones en las estaciones y el producto CR2Met (Tablas 4.33 a 4.36). Por ejemplo, en la cuenca de Maitenhuapi con la línea de nieve  $LN=1830$  m s.n.m., la P de 24 horas de período retorno 100 años en la Línea de Base es 106 mm, mientras que para el escenario SSP2-4.5 es 141,8 mm con el GCM1 y 128,2 mm con el GCM2; en el futuro cercano los valores se modifican a 219,9 mm y 104,5 mm, respectivamente, apreciándose grandes diferencias entre los valores. Teniendo en consideración la escasa representatividad de los valores simulados en los períodos base del modelo GCM1 (simula precipitación 33% mayor), este se descarta para los futuros análisis tanto en esta cuenca como en Claro en Los Vientos. Con cada uno de estos valores de precipitación se simulan los hidrogramas de crecida asociados a las condiciones de humedad (CN) y distribución temporal de la precipitación (hietograma) que conducen a los volúmenes y Caudal Máximo Instantáneo (QMI) indicados en las Tablas 4.37 a 4.40. En particular para la cuenca Maitenhuapi en la tabla 4.33 para el período histórico, se simula para  $T=100$  años un valor máximo  $QMI=217$  m<sup>3</sup>/s asociado a CN II con distribución tardía. En la Tabla 4.37 se presentan las 96 simulaciones para la cuenca de Maitenhuapi considerando el caso del modelo GCM2 que indica para  $T=100$  años en el período histórico con  $LN=1830$  m s.n.m y en igual condición de CN y distribución un  $QMI=333,72$  m<sup>3</sup>/s, valor que en el futuro cercano disminuye a  $QMI=209,57$  m<sup>3</sup>/s por lo que el factor a aplicar sobre el valor histórico observado es 0,63, que indicaría en el futuro cercano (NF) un valor de  $QMI=136,3$  m<sup>3</sup>/s para esta cuenca en las condiciones señaladas.

En las Tablas 4.41 a 4.44 se sintetizan los valores de los factores adimensionales de cada simulación.

**Tabla 4.33: Resultados de la modelación de 16 escenarios base, cuenca del puente Maitenhuapi**

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
101	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	CENTRADA	17,44	199,85
102	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	II	CENTRADA	16,98	191,83
103	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	CENTRADA	18,05	206,57
104	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	II	CENTRADA	17,58	198,39
105	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	CENTRADA	1,29	16,98
106	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	I	CENTRADA	1,14	14,74
107	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	CENTRADA	1,44	18,78
108	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	I	CENTRADA	1,27	16,42
109	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	TARDIA	17,44	216,98
110	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	II	TARDIA	16,98	207,66
111	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	TARDIA	18,05	224,33
112	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	II	TARDIA	17,58	214,71
113	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	TARDIA	1,29	18,24
114	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	I	TARDIA	1,14	15,54
115	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	TARDIA	1,44	20,25
116	Maitenhuapi	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	I	TARDIA	1,27	17,37

**Tabla 4.34: Resultados de la modelación de 16 escenarios base, cuenca del puente Claro Los Vientos**

IDENTIFICACION									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
101	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	CENTRADA	30,27	501,38
102	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	II	CENTRADA	27,35	445,59
103	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	CENTRADA	33,26	548,58
104	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	II	CENTRADA	30,21	488,91
105	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	CENTRADA	15,84	299,89
106	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	I	CENTRADA	12,70	239,00
107	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	CENTRADA	18,05	336,61
108	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	I	CENTRADA	14,66	272,13
109	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	TARDIA	30,27	641,96
110	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	II	TARDIA	27,35	558,37
111	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	TARDIA	33,26	696,82
112	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	II	TARDIA	30,21	609,38
113	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	TARDIA	15,84	409,15
114	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	I	TARDIA	12,70	314,07
115	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	TARDIA	18,05	457,29
116	Claro Los Vientos	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	I	TARDIA	14,66	356,82

**Tabla 4.35: Resultados de la modelación de 16 escenarios base, cuenca del puente Chupallar**

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
101	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	CENTRADA	22,72	392,53
102	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	II	CENTRADA	22,34	376,48
103	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	CENTRADA	24,44	422,22
104	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	II	CENTRADA	33,09	548,03
105	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	CENTRADA	11,25	224,93
106	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	I	CENTRADA	10,80	212,18
107	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	CENTRADA	12,47	246,22
108	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	I	CENTRADA	18,66	345,77
109	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	TARDIA	22,72	522,35
110	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	II	TARDIA	22,34	491,40
111	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	TARDIA	24,44	555,89
112	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	II	TARDIA	33,09	691,17
113	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	TARDIA	11,25	327,12
114	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	100	2350	I	TARDIA	10,80	293,02
115	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	TARDIA	12,47	357,00
116	Chupallar	Histórico	Observado	CR2MET	150	2350	I	TARDIA	18,66	471,54

**Tabla 4.36: Resultados de la modelación de 8 escenarios base, cuenca del puente Putagán**

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
101	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	CENTRADA	3,16	64,29
102	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	CENTRADA	3,39	68,31
103	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	CENTRADA	0,52	16,21
104	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	CENTRADA	0,61	18,18
105	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	II	TARDIA	3,16	98,52
106	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	II	TARDIA	3,39	104,50
107	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	100	1830	I	TARDIA	0,52	25,56
108	Putagán	Histórico	Observado	CR2MET	150	1830	I	TARDIA	0,61	29,09

**Tabla 4.37: Resultados de la modelación de 96 escenarios, cuenca del puente Maitenhuapi**

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
1	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	27,25	306,81
2	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	26,65	296,58
3	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	27,36	307,95
4	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	26,76	297,70
5	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	27,20	306,24
6	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	26,60	296,02
7	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	27,38	308,16
8	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	26,78	297,91
9	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	4,18	53,33
10	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	3,89	48,55
11	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	4,22	53,79
12	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	3,92	48,98
13	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	4,17	53,11
14	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	3,87	48,34
15	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	4,23	53,87
16	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	3,93	49,06
17	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	27,25	333,72
18	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	26,65	319,86
19	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	27,36	334,96
20	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	26,76	321,06
21	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	27,20	333,10
22	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	26,60	319,26
23	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	27,38	335,19
24	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	26,78	321,28
25	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	4,18	57,49
26	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	3,89	51,99
27	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	4,22	57,98

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
28	Maitenhuapi	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	3,92	52,46
29	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	4,17	57,25
30	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	3,87	51,76
31	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	4,23	58,07
32	Maitenhuapi	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	3,93	52,54
33	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	16,82	193,06
34	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	16,37	185,30
35	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	17,38	199,22
36	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	16,92	191,22
37	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	41,43	460,77
38	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	40,68	445,41
39	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	43,66	484,76
40	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	42,88	468,59
41	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	1,15	15,23
42	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	1,01	13,12
43	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	1,28	16,81
44	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	1,12	14,59
45	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	9,85	121,67
46	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	9,36	113,61
47	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	10,85	133,43
48	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	10,34	124,93
49	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	16,82	209,57
50	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	16,37	200,54
51	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	17,38	216,29
52	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	16,92	206,99
53	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	41,43	498,15
54	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	40,68	478,48
55	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	43,66	523,64
56	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	42,88	503,30
57	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	1,15	16,29

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
58	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	1,01	13,77
59	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	1,28	18,06
60	Maitenhuapi	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	1,12	15,37
61	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	9,85	130,85
62	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	9,36	121,85
63	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	10,85	143,56
64	Maitenhuapi	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	10,34	134,04
65	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	22,71	257,65
66	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	22,18	248,37
67	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	23,86	270,09
68	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	23,30	260,57
69	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	38,01	423,87
70	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	37,30	409,77
71	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	38,90	433,50
72	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	38,18	419,07
73	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	2,71	34,85
74	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	2,48	31,33
75	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	3,06	39,31
76	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	2,81	35,49
77	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	8,36	104,09
78	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	7,92	96,70
79	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	8,74	108,62
80	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	8,29	101,05
81	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	22,71	280,11
82	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	22,18	268,32
83	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	23,86	293,69
84	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	23,30	281,38
85	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	38,01	458,89
86	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	37,30	440,29
87	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	38,90	469,14

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
88	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	38,18	450,26
89	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	2,71	37,66
90	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	2,48	33,44
91	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	3,06	42,42
92	Maitenhuapi	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	2,81	37,87
93	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	8,36	111,92
94	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	7,92	103,73
95	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	8,74	116,79
96	Maitenhuapi	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	8,29	108,39

**Tabla 4.38: Resultados de la modelación de 96 escenarios, cuenca del puente Claro Los Vientos**

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
1	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	35,14	578,39
2	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	32,01	515,99
3	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	36,35	597,69
4	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	33,18	533,52
5	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	35,36	581,87
6	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	32,22	519,14
7	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	35,95	591,36
8	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	32,80	527,77
9	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	19,46	360,06
10	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	15,92	293,18
11	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	20,38	375,62
12	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	16,75	306,94
13	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	19,62	362,85
14	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	16,07	295,65
15	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	20,08	370,50
16	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	16,47	302,41

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
17	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	35,14	730,94
18	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	32,01	641,17
19	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	36,35	752,97
20	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	33,18	661,72
21	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	35,36	734,91
22	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	32,22	644,88
23	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	35,95	745,74
24	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	32,80	654,98
25	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	19,46	488,35
26	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	15,92	383,94
27	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	20,38	508,56
28	Claro Los Vientos	Histórico	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	16,75	401,65
29	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	19,62	491,99
30	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	16,07	387,12
31	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	20,08	501,92
32	Claro Los Vientos	Histórico	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	16,47	395,82
33	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	15,09	263,70
34	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	13,00	224,94
35	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	16,08	279,36
36	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	13,93	239,62
37	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	46,06	754,01
38	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	42,56	674,68
39	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	50,59	826,74
40	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	46,96	740,55
41	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	5,69	121,06
42	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	4,00	85,40
43	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	6,29	132,04
44	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	4,48	94,70
45	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	27,99	501,09
46	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	23,65	418,90
47	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	31,66	560,25

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
48	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	27,02	472,57
49	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	15,09	350,12
50	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	13,00	290,46
51	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	16,08	370,18
52	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	13,93	308,60
53	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	46,06	925,76
54	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	42,56	823,46
55	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	50,59	1004,96
56	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	46,96	897,84
57	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	5,69	170,28
58	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	4,00	113,40
59	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	6,29	185,47
60	Claro Los Vientos	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	4,48	125,55
61	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	27,99	670,74
62	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	23,65	545,26
63	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	31,66	746,85
64	Claro Los Vientos	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	27,02	613,40
65	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	22,10	374,03
66	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	19,57	327,27
67	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	24,50	411,21
68	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	21,84	361,77
69	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	48,03	785,71
70	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	44,48	703,39
71	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	52,73	861,05
72	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	49,05	772,35
73	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	10,12	201,14
74	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	7,71	153,52
75	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	11,75	229,77
76	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	9,11	177,96
77	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	29,58	526,81
78	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	25,11	442,05

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
79	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	33,42	588,34
80	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	28,65	498,68
81	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	22,10	488,14
82	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	19,57	416,26
83	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	24,50	533,90
84	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	21,84	458,37
85	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	48,03	960,34
86	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	44,48	855,92
87	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	52,73	1042,18
88	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	49,05	932,83
89	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	10,12	278,97
90	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	7,71	202,10
91	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	11,75	316,85
92	Claro Los Vientos	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	9,11	233,79
93	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	29,58	703,85
94	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	25,11	574,85
95	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	33,42	782,92
96	Claro Los Vientos	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	28,65	645,84

**Tabla 4.39: Resultados de la modelación de 96 escenarios, cuenca del puente Chupallar**

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
1	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	26,41	456,21
2	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	26,01	434,25
3	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	28,77	496,60
4	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	38,65	638,44
5	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	36,97	635,75
6	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	36,53	604,15
7	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	40,51	695,26
8	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	53,61	883,87
9	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	13,90	270,82
10	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	13,40	256,63
11	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	15,64	300,35
12	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	22,99	417,38
13	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	21,96	404,45
14	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	21,33	390,07
15	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	24,79	450,88
16	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	35,27	613,75
17	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	26,41	594,05
18	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	2350	II	TARDIA	26,01	560,80
19	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	28,77	639,11
20	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	2350	II	TARDIA	38,65	791,18
21	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	36,97	792,51
22	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	2350	II	TARDIA	36,53	753,36
23	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	40,51	857,47
24	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	2350	II	TARDIA	53,61	1053,10
25	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	13,90	391,47
26	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	100	2350	I	TARDIA	13,40	353,30
27	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	15,64	432,79
28	Chupallar	Histórico	SSP2	GCM3	150	2350	I	TARDIA	22,99	565,29

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
29	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	21,96	577,37
30	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	100	2350	I	TARDIA	21,33	529,58
31	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	24,79	640,06
32	Chupallar	Histórico	SSP5	GCM3	150	2350	I	TARDIA	35,27	819,34
33	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	27,40	473,19
34	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	27,00	449,85
35	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	29,38	506,95
36	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	39,42	650,99
37	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	40,63	697,19
38	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	40,18	663,32
39	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	45,23	774,96
40	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	59,58	981,88
41	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	14,62	283,20
42	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	14,11	268,64
43	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	16,09	307,97
44	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	23,61	427,42
45	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	24,88	452,40
46	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	24,22	437,30
47	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	28,63	512,92
48	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	40,36	694,72
49	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	27,40	613,03
50	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	2350	II	TARDIA	27,00	579,19
51	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	29,38	650,62
52	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	2350	II	TARDIA	39,42	804,99
53	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	40,63	859,57
54	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	2350	II	TARDIA	40,18	818,53
55	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	45,23	942,89
56	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	2350	II	TARDIA	59,58	1155,46
57	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	14,62	408,80
58	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	100	2350	I	TARDIA	14,11	369,66
59	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	16,09	443,43

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
60	Chupallar	NF	SSP2	GCM3	150	2350	I	TARDIA	23,61	578,41
61	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	24,88	642,09
62	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	100	2350	I	TARDIA	24,22	591,30
63	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	28,63	723,51
64	Chupallar	NF	SSP5	GCM3	150	2350	I	TARDIA	40,36	920,95
65	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	20,04	345,98
66	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	19,68	334,50
67	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	21,20	366,24
68	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	28,92	480,65
69	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	39,08	671,26
70	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	38,64	638,34
71	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	42,83	734,04
72	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	56,55	932,18
73	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	9,40	191,99
74	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	8,99	180,35
75	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	10,19	206,26
76	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	15,52	292,62
77	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	23,64	432,10
78	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	22,99	417,30
79	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	26,67	481,38
80	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	37,76	653,58
81	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	20,04	469,32
82	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	2350	II	TARDIA	19,68	440,17
83	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	21,20	492,47
84	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	2350	II	TARDIA	28,92	614,85
85	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	39,08	831,31
86	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	2350	II	TARDIA	38,64	791,06
87	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	42,83	899,63
88	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	2350	II	TARDIA	56,55	1103,63
89	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	9,40	280,79
90	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	100	2350	I	TARDIA	8,99	250,70

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
91	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	10,19	300,87
92	Chupallar	FF	SSP2	GCM3	150	2350	I	TARDIA	15,52	401,69
93	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	23,64	614,72
94	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	100	2350	I	TARDIA	22,99	565,18
95	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	26,67	681,12
96	Chupallar	FF	SSP5	GCM3	150	2350	I	TARDIA	37,76	869,37

Tabla 4.40: Resultados de la modelación de 48 escenarios, cuenca del puente Putagán

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
1	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	3,42	68,96
2	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	3,66	73,13
3	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	5,23	99,67
4	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	5,67	106,94
5	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,62	18,51
6	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	0,71	20,60
7	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	1,40	36,19
8	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	1,62	41,02
9	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	3,42	105,47
10	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	3,66	111,67
11	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	5,23	151,02
12	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	5,67	161,76
13	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,62	29,67
14	Putagán	Histórico	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	0,71	33,44
15	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	1,40	58,84
16	Putagán	Histórico	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	1,62	66,16
17	Putagán	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	2,26	48,34
18	Putagán	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	2,36	50,12
19	Putagán	NF	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	6,88	126,41
20	Putagán	NF	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	7,75	140,02
21	Putagán	NF	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,23	8,57
22	Putagán	NF	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	0,26	9,40
23	Putagán	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	2,24	54,45
24	Putagán	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	2,72	64,21
25	Putagán	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	2,26	74,46
26	Putagán	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	2,36	77,11
27	Putagán	NF	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	6,88	190,51
28	Putagán	NF	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	7,75	210,57
29	Putagán	NF	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,23	12,41

IDENTIFICACIÓN									Resultados Hidrograma	
ID	Cuenca	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	Vol (m <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup> )	QMI (m <sup>3</sup> /s)
30	Putagán	NF	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	0,26	13,77
31	Putagán	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	2,24	86,46
32	Putagán	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	2,72	101,16
33	Putagán	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	1,64	36,79
34	Putagán	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	1,64	36,79
35	Putagán	FF	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	4,30	83,97
36	Putagán	FF	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	4,64	89,80
37	Putagán	FF	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,08	3,87
38	Putagán	FF	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	0,08	3,87
39	Putagán	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,98	26,61
40	Putagán	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	1,13	30,09
41	Putagán	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	1,64	57,21
42	Putagán	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	1,64	57,21
43	Putagán	FF	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	4,30	127,77
44	Putagán	FF	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	4,64	136,40
45	Putagán	FF	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,08	4,95
46	Putagán	FF	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	0,08	4,95
47	Putagán	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,98	43,54
48	Putagán	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	1,13	49,13

**Tabla 4.41: Factores adimensionales de simulaciones en escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en periodos de futuro cercano (NF) y lejano (FF) respecto a los valores simulados en Línea de Base. Cuenca del puente Maitenhuapi.**

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
1	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	0,62	0,63
2	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	0,61	0,62
5	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	1,52	1,50
6	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	1,53	1,50
9	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	0,27	0,29
10	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	0,26	0,27
13	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	2,36	2,29
14	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	2,42	2,35
17	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	0,62	0,63
18	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	0,61	0,63
21	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	1,52	1,50
22	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	1,53	1,50
25	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	0,27	0,28
26	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	0,26	0,26
29	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	2,36	2,29
30	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	2,42	2,35
1	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	0,83	0,84
2	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	0,83	0,84
5	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	1,40	1,38
6	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	1,40	1,38
9	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	0,65	0,65
10	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	0,64	0,65
13	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	2,01	1,96
14	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	2,05	2,00
17	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	0,83	0,84
18	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	0,83	0,84
21	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	1,40	1,38
22	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	1,40	1,38
25	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	0,65	0,66
26	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	0,64	0,64
29	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	2,01	1,95
30	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	2,05	2,00
3	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	0,64	0,65
4	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	0,63	0,64
7	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	1,59	1,57
8	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	1,60	1,57
11	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	0,30	0,31
12	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	0,29	0,30
15	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	2,57	2,48
16	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	2,63	2,55

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
19	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	0,64	0,65
20	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	0,63	0,64
23	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	1,59	1,56
24	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	1,60	1,57
27	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	0,30	0,31
28	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	0,29	0,29
31	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	2,57	2,47
32	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	2,63	2,55
3	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	0,87	0,88
4	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	0,87	0,88
7	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	1,42	1,41
8	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	1,43	1,41
11	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	0,73	0,73
12	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	0,72	0,72
15	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	2,07	2,02
16	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	2,11	2,06
19	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	0,87	0,88
20	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	0,87	0,88
23	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	1,42	1,40
24	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	1,43	1,40
27	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	0,73	0,73
28	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	0,72	0,72
31	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	2,07	2,01
32	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	2,11	2,06

**Tabla 4.42: Factores adimensionales de simulaciones en escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en periodos de futuro cercano y lejano respecto a los valores simulados en Línea de Base. Cuenca del puente Claro en Los Vientos.**

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
1	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	0,43	0,46
2	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	0,41	0,44
5	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	1,30	1,30
6	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	1,32	1,30
9	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	0,29	0,34
10	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	0,25	0,29
13	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	1,43	1,38
14	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	1,47	1,42
17	NF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	0,43	0,48
18	NF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	0,41	0,45
21	NF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	1,30	1,26
22	NF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	1,32	1,28
25	NF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	0,29	0,35

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
26	NF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	0,25	0,30
29	NF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	1,43	1,36
30	NF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	1,47	1,41
1	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	0,63	0,65
2	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	0,61	0,63
5	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	CENTRADA	1,36	1,35
6	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	CENTRADA	1,38	1,35
9	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	0,52	0,56
10	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	0,48	0,52
13	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	CENTRADA	1,51	1,45
14	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	CENTRADA	1,56	1,50
17	FF	SSP2	GCM2	100	1830	II	TARDIA	0,63	0,67
18	FF	SSP2	GCM2	100	2350	II	TARDIA	0,61	0,65
21	FF	SSP5	GCM2	100	1830	II	TARDIA	1,36	1,31
22	FF	SSP5	GCM2	100	2350	II	TARDIA	1,38	1,33
25	FF	SSP2	GCM2	100	1830	I	TARDIA	0,52	0,57
26	FF	SSP2	GCM2	100	2350	I	TARDIA	0,48	0,53
29	FF	SSP5	GCM2	100	1830	I	TARDIA	1,51	1,43
30	FF	SSP5	GCM2	100	2350	I	TARDIA	1,56	1,48
3	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	0,44	0,47
4	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	0,42	0,45
7	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	1,41	1,40
8	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	1,43	1,40
11	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	0,31	0,35
12	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	0,27	0,31
15	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	1,58	1,51
16	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	1,64	1,56
19	NF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	0,44	0,49
20	NF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	0,42	0,47
23	NF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	1,41	1,35
24	NF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	1,43	1,37
27	NF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	0,31	0,36
28	NF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	0,27	0,31
31	NF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	1,58	1,49
32	NF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	1,64	1,55
3	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	0,67	0,69
4	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	0,66	0,68
7	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	CENTRADA	1,47	1,46
8	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	CENTRADA	1,50	1,46
11	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	0,58	0,61
12	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	0,54	0,58
15	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	CENTRADA	1,66	1,59

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
16	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	CENTRADA	1,74	1,65
19	FF	SSP2	GCM2	150	1830	II	TARDIA	0,67	0,71
20	FF	SSP2	GCM2	150	2350	II	TARDIA	0,66	0,69
23	FF	SSP5	GCM2	150	1830	II	TARDIA	1,47	1,40
24	FF	SSP5	GCM2	150	2350	II	TARDIA	1,50	1,42
27	FF	SSP2	GCM2	150	1830	I	TARDIA	0,58	0,62
28	FF	SSP2	GCM2	150	2350	I	TARDIA	0,54	0,58
31	FF	SSP5	GCM2	150	1830	I	TARDIA	1,66	1,56
32	FF	SSP5	GCM2	150	2350	I	TARDIA	1,74	1,63

**Tabla 4.43: Factores adimensionales de simulaciones en escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en periodos de futuro cercano (NF) y lejano (FF) respecto a los valores simulados en Línea de Base. Cuenca del puente Chupallar.**

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
1	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	1,04	1,04
2	NF	SSP2	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	1,04	1,04
5	NF	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	1,10	1,10
6	NF	SSP5	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	1,10	1,10
9	NF	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	1,05	1,05
10	NF	SSP2	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	1,05	1,05
13	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	1,13	1,12
14	NF	SSP5	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	1,14	1,12
17	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	1,04	1,03
18	NF	SSP2	GCM3	100	2350	II	TARDIA	1,04	1,03
21	NF	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	1,10	1,08
22	NF	SSP5	GCM3	100	2350	II	TARDIA	1,10	1,09
25	NF	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	1,05	1,04
26	NF	SSP2	GCM3	100	2350	I	TARDIA	1,05	1,05
29	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	1,13	1,11
30	NF	SSP5	GCM3	100	2350	I	TARDIA	1,14	1,12
1	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	0,76	0,76
2	FF	SSP2	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	0,76	0,77
5	FF	SSP5	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	1,06	1,06
6	FF	SSP5	GCM3	100	2350	II	CENTRADA	1,06	1,06
9	FF	SSP2	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,68	0,71
10	FF	SSP2	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	0,67	0,70
13	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	1,08	1,07
14	FF	SSP5	GCM3	100	2350	I	CENTRADA	1,08	1,07
17	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	0,76	0,79
18	FF	SSP2	GCM3	100	2350	II	TARDIA	0,76	0,78
21	FF	SSP5	GCM3	100	1830	II	TARDIA	1,06	1,05
22	FF	SSP5	GCM3	100	2350	II	TARDIA	1,06	1,05
25	FF	SSP2	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,68	0,72

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
26	FF	SSP2	GCM3	100	2350	I	TARDIA	0,67	0,71
29	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	1,08	1,06
30	FF	SSP5	GCM3	100	2350	I	TARDIA	1,08	1,07
3	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	1,02	1,02
4	NF	SSP2	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	1,02	1,02
7	NF	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	1,12	1,11
8	NF	SSP5	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	1,11	1,11
11	NF	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	1,03	1,03
12	NF	SSP2	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	1,03	1,02
15	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	1,16	1,14
16	NF	SSP5	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	1,14	1,13
19	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	1,02	1,02
20	NF	SSP2	GCM3	150	2350	II	TARDIA	1,02	1,02
23	NF	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	1,12	1,10
24	NF	SSP5	GCM3	150	2350	II	TARDIA	1,11	1,10
27	NF	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	1,03	1,02
28	NF	SSP2	GCM3	150	2350	I	TARDIA	1,03	1,02
31	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	1,16	1,13
32	NF	SSP5	GCM3	150	2350	I	TARDIA	1,14	1,12
3	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	0,74	0,74
4	FF	SSP2	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	0,75	0,75
7	FF	SSP5	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	1,06	1,06
8	FF	SSP5	GCM3	150	2350	II	CENTRADA	1,05	1,05
11	FF	SSP2	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	0,65	0,69
12	FF	SSP2	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	0,68	0,70
15	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	1,08	1,07
16	FF	SSP5	GCM3	150	2350	I	CENTRADA	1,07	1,06
19	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	0,74	0,77
20	FF	SSP2	GCM3	150	2350	II	TARDIA	0,75	0,78
23	FF	SSP5	GCM3	150	1830	II	TARDIA	1,06	1,05
24	FF	SSP5	GCM3	150	2350	II	TARDIA	1,05	1,05
27	FF	SSP2	GCM3	150	1830	I	TARDIA	0,65	0,70
28	FF	SSP2	GCM3	150	2350	I	TARDIA	0,68	0,71
31	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	1,08	1,06
32	FF	SSP5	GCM3	150	2350	I	TARDIA	1,07	1,06

**Tabla 4.44: Factores adimensionales de simulaciones en escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en periodos de futuro cercano (NF) y lejano (FF) respecto a los valores simulados en Línea de Base. Cuenca del puente Putagán.**

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
1	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	0,66	0,70
3	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	1,32	1,27
5	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,38	0,46
7	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	1,60	1,50

ID	Tiempo	Escenario	GCM	Tr (años)	LN (m s.n.m.)	CN	Distribución	f <sub>Vol</sub>	f <sub>QMI</sub>
9	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	0,66	0,71
11	NF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	1,32	1,26
13	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,38	0,42
15	NF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	1,60	1,47
1	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	0,48	0,53
3	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	CENTRADA	0,82	0,84
5	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,14	0,21
7	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	CENTRADA	0,70	0,74
9	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	0,48	0,54
11	FF	SSP2	GCM3	100	1830	II	TARDIA	0,82	0,85
13	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,14	0,17
15	FF	SSP5	GCM3	100	1830	I	TARDIA	0,70	0,74
2	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	0,64	0,69
4	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	1,37	1,31
6	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	0,37	0,46
8	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	1,68	1,57
10	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	0,64	0,69
12	NF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	1,37	1,30
14	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	0,37	0,41
16	NF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	1,68	1,53
2	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	0,45	0,50
4	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	CENTRADA	0,82	0,84
6	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	0,12	0,19
8	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	CENTRADA	0,70	0,73
10	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	0,45	0,51
12	FF	SSP2	GCM3	150	1830	II	TARDIA	0,82	0,84
14	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	0,12	0,15
16	FF	SSP5	GCM3	150	1830	I	TARDIA	0,70	0,74

#### 4.11. Resúmenes de Caudales Proyectados

En base a las simulaciones ejecutadas con los escenarios de Cambio Climático, se calcularon los factores de cambio asociado a los caudales máximos registrados en cada uno de los hidrogramas modelados.

Luego, acoplado los factores de cambio de los hidrogramas modelados con los caudales máximos instantáneos obtenidos en el período histórico con los valores basados en CR2Met, las Tablas 4.45 a 4.52 muestran los resultados de los máximos valores obtenidos para las distintas cuencas y periodos de retorno. Se incluyen los diferentes escenarios en cada una de las condiciones consideradas, visualizando los resultados en la Figura 4.37.

**Tabla 4.45: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 100 años, cuenca de Maitenhuapi.**  
Unidades en m<sup>3</sup>/seg.

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
1830	II	CENTRADA	199,8	125,8	300,7	167,8	276,6
2350	II	CENTRADA	191,8	119,9	288,6	160,6	265,5
1830	I	CENTRADA	17,0	4,8	38,9	11,1	33,3
2350	I	CENTRADA	14,7	4,0	34,6	9,5	29,5
1830	II	TARDIA	217,0	136,3	324,5	182,1	298,9
2350	II	TARDIA	207,7	130,2	311,2	174,2	286,4
1830	I	TARDIA	18,2	5,2	41,7	11,9	35,7
2350	I	TARDIA	15,5	4,1	36,6	10,0	31,1

**Tabla 4.46: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 150 años, cuenca de Maitenhuapi.**  
Unidades en m<sup>3</sup>/seg.

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
1830	II	CENTRADA	206,6	133,6	325,0	181,2	290,6
2350	II	CENTRADA	198,4	127,4	312,1	173,6	279,1
1830	I	CENTRADA	18,8	5,9	46,5	13,7	37,9
2350	I	CENTRADA	16,4	4,9	41,8	11,9	33,8
1830	II	TARDIA	224,3	144,9	350,4	196,7	314,0
2350	II	TARDIA	214,7	138,4	336,4	188,2	300,9
1830	I	TARDIA	20,3	6,3	50,1	14,8	40,7
2350	I	TARDIA	17,4	5,1	44,3	12,5	35,8

**Tabla 4.47: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 100 años, cuenca de Claro Los Vientos.**  
Unidades en m<sup>3</sup>/seg.

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
1830	II	CENTRADA	501,4	228,6	649,7	324,2	677,0
2350	II	CENTRADA	445,6	194,3	579,1	282,6	603,7
1830	I	CENTRADA	299,9	100,8	414,1	167,5	435,4
2350	I	CENTRADA	239,0	69,6	338,6	125,1	357,3
1830	II	TARDIA	642,0	307,5	808,7	428,7	838,9
2350	II	TARDIA	558,4	252,9	713,0	362,5	741,1
1830	I	TARDIA	409,1	142,7	557,8	233,7	585,3
2350	I	TARDIA	314,1	92,8	442,4	165,3	466,4

**Tabla 4.48: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 150 años, cuenca de Claro Los Vientos**  
Unidades en m<sup>3</sup>/seg.

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
1830	II	CENTRADA	548,6	256,4	766,9	377,4	798,8
2350	II	CENTRADA	488,9	219,6	686,0	331,5	715,5
1830	I	CENTRADA	336,6	118,3	509,0	205,9	534,5
2350	I	CENTRADA	272,1	84,0	425,2	157,8	448,7
1830	II	TARDIA	696,8	342,6	939,0	494,1	973,8
2350	II	TARDIA	609,4	284,2	835,3	422,1	867,9
1830	I	TARDIA	457,3	166,8	680,4	284,9	713,3
2350	I	TARDIA	356,8	111,5	553,0	207,7	582,2

**Tabla 4.49: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 100 años, cuenca de Chupallar**  
Unidades en m<sup>3</sup>/seg.

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
1830	II	CENTRADA	392,5	407,1	430,5	297,7	414,5
2350	II	CENTRADA	376,5	390,0	413,3	290,0	397,8
1830	I	CENTRADA	224,9	235,2	251,6	159,5	240,3
2350	I	CENTRADA	212,2	222,1	237,9	149,1	227,0
1830	II	TARDIA	522,3	539,0	566,5	412,7	547,9
2350	II	TARDIA	491,4	507,5	533,9	385,7	516,0
1830	I	TARDIA	327,1	341,6	363,8	234,6	348,3
2350	I	TARDIA	293,0	306,6	327,2	207,9	312,7

**Tabla 4.50: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 150 años, cuenca de Chupallar**  
Unidades en m<sup>3</sup>/seg.

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4,5	SSP5-8,5	SSP2-4,5	SSP5-8,5
1830	II	CENTRADA	422,2	431,0	470,6	311,4	445,8
2350	II	CENTRADA	548,0	558,8	608,8	412,6	578,0
1830	I	CENTRADA	246,2	252,5	280,1	169,1	262,9
2350	I	CENTRADA	345,8	354,1	391,4	242,4	368,2
1830	II	TARDIA	555,9	565,9	611,3	428,3	583,2
2350	II	TARDIA	691,2	703,2	758,4	537,1	724,3
1830	I	TARDIA	357,0	365,8	403,5	248,2	379,9
2350	I	TARDIA	471,5	482,5	530,0	335,1	500,3

**Tabla 4.51: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 100 años, cuenca de Putagán**  
**Unidades en m<sup>3</sup>/seg.**

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
1830	II	CENTRADA	64,3	45,1	81,5	34,3	54,2
1830	I	CENTRADA	16,2	7,5	24,4	3,4	11,9
1830	II	TARDIA	98,5	69,6	124,3	53,4	83,4
1830	I	TARDIA	25,6	10,7	37,6	4,3	18,9

**Tabla 4.52: Resumen de Caudales Proyectados para Periodo de Retorno 150 años, cuenca de Putagán**  
**Unidades en m<sup>3</sup>/seg.**

Identificación Escenario			Histórico	Futuro Cercano		Futuro Lejano	
LN (m s.n.m.)	CN	Distribución		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
1830	II	CENTRADA	68,31	46,8	89,4	34,4	57,4
1830	I	CENTRADA	18,18	8,3	28,5	3,4	13,3
1830	II	TARDIA	104,50	72,2	136,0	53,5	88,1
1830	I	TARDIA	29,09	12,0	44,5	4,3	21,6



Figura 4.37: Caudales máximos instantáneos asociados a T=100 y 150 años para todos los escenarios analizados

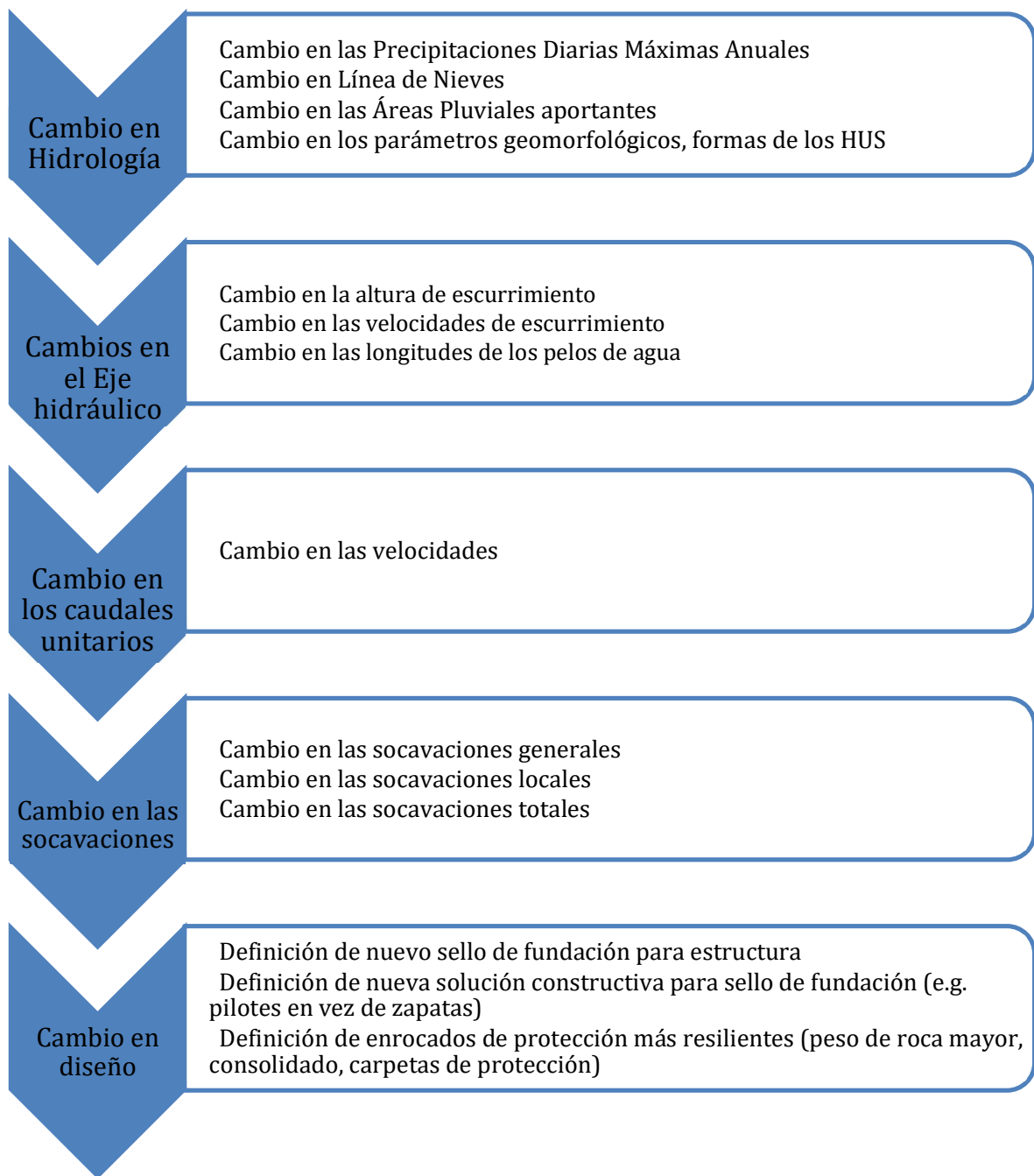
## 4.12. Vulnerabilidad de puentes

La presente sección ofrece un diagnóstico de los impactos producidos por el cambio climático en el diseño de puentes como también potenciales medidas de mitigación y adaptación de la infraestructura, apuntando a un diseño resiliente que no comprometa la conectividad de las rutas en eventos de catástrofe.

### 4.12.1. Diagnóstico de Cambios en Diseño Producidos por Cambios en Hidrología

Las conclusiones de la sección de hidrología del informe señalan un aumento de los caudales de crecida, producto de la interacción de la Línea de Nieves como también del aumento de las precipitaciones diarias máximas anuales. Esto produce un cambio en los caudales de crecida, los cuales constituyen una cadena de implicancias en las variables de diseño el puente.

La cadena de impactos producidos por el cambio en los caudales de crecida de diseño se resume en el esquema de la Figura 4.38.



**Figura 4.38: Diagrama de flujo para el diagnóstico del puente introduciendo el cambio climático**

#### 4.12.2. Diagnóstico de las Variables de Diseño del Puente

El diseño hidráulico de un puente posee, como factor principal, una correcta definición en la geometría de las cepas, los estribos y la definición de la cota inferior de las vigas del puente.

Este diseño obedece a las siguientes variables de diseño:

#### **Estribos**

Corresponden a las estructuras de entrada y salida de un puente, las cuales se encuentran tanto en contacto con el agua del cauce como también con la carpeta previo a la entrada y salida del puente, Las variables de diseño de los estribos corresponden, mayoritariamente a:

- (1) Definición del sello de fundación: El sello de fundación se define en base a la socavación total del lecho, vale decir, la sumatoria de la socavación general y la local. El estribo debe ir fundado, al menos, bajo las cotas de socavación total estimadas. Los sistemas de fundación del estribo pueden ser comúnmente una batería de pilotes o una zapata de fundación.
- (2) Definición de la geometría del estribo: Corresponde a la geometría del estribo, la cual define su forma, Dicha geometría interactúa entre el estribo y el lecho del río. Conforme se tiene taludes menos pronunciados, las socavaciones del estribo disminuyen. Este concepto queda explícitamente considerado en el factor de forma del estribo para el cálculo de las socavaciones (ver punto 3.707.403(2)b) del Manual de Carreteras, Volumen N°3).
- (3) Penetración del estribo en Lecho: El concepto de penetración del estribo en el lecho guarda directa relación con la luz total del puente. Conforme se tenga una mayor penetración del estribo en el lecho, la luz del puente se disminuye, aumentando la socavación. Esto guarda relación directa con el factor de profundidad del flujo, reseñado en el acápite 3.707.403(2)c) del Manual de Carreteras. Por otro lado, en secciones angostas de los ríos, ante el aumento de caudal, el puente puede producir una condición de crisis hidráulica, pudiendo aumentar localmente las velocidades y por ende las socavaciones generales en la sección completa del puente.

#### **Cepas**

Corresponden a estructuras de soporte emplazadas entre medio de los estribos y en pleno lecho activo en la condición de crecidas. Las variables de diseño de las cepas corresponden, mayoritariamente a:

- (1) Definición del sello de fundación: El sello de fundación se define en base a la socavación total del lecho, vale decir, la sumatoria de la socavación general y la local. La cepa debe ir fundada, al menos, bajo las cotas de socavación total estimadas. Los sistemas de fundación de las cepas pueden ser comúnmente una batería de pilotes o una zapata de fundación.
- (2) Definición de la geometría de la cepa: Corresponde a la geometría de la cepa, la cual define su forma. Dicha geometría interactúa con el lecho del río. Conforme se tiene una geometría con transición hidrodinámica entre la sección de aguas arriba de la cepa y una transición paulatina con la sección media de la cepa, las socavaciones del estribo disminuyen. Este concepto queda explícitamente considerado en el factor de forma de la cepa para el cálculo de las socavaciones (ver punto 3.707.402(2)a) del Manual de Carreteras, Volumen N°3). En general, el diseño debería optar por geometrías elípticas o lenticulares.
- (3) Esviaje: para cepas de geometría que posean dos ejes asimétricos (e.g, rectangulares, elíptico, lenticulares), se privilegiará alinear de la mejor manera posible la cepa con las líneas de flujo del cauce. Esto disminuye los ángulos de esviaje entre los semiejes mayores de la cepa y las líneas de flujo, disminuyendo el factor de esviaje y por ende las socavaciones locales de la infraestructura (Ver el acápite 3.707.402(2)b) del Manual de Carreteras).

#### **Definición de la cota de las vigas del puente**

En general, acorde a la tabla 3.702.2.B, la cota inferior de las vigas del puente como también aquella de las defensas fluviales debe ser definida 1 metro por sobre la cota de Nivel de Aguas Máximo (N.A.M.) en la condición de diseño y 0,3 metros sobre N.A.M: en la condición de verificación.

### 4.12.3. Medidas de Mitigación y Adaptación

La batería de medidas de mitigación se debe distinguir entre nueva infraestructura a proyectar e infraestructura existente, donde esta última se debe intervenir para volverla resiliente ante el cambio climático, adaptando las componentes de dichos puentes para proteger las obras hidráulicas, asegurando la operatividad del puente. Se ofrece una reseña de medidas propuestas:

#### En nueva infraestructura proyectada

Los criterios de diseño comienzan con adoptar un caudal apropiado para el diseño, considerando la variable de cambio climático. Las consideraciones asociadas a este caudal de crecidas han sido desarrolladas en detalle, en la sección de hidrología.

En general, la adopción de los periodos de retorno reseñados en Tabla 3.702.2.B del Manual de Carreteras Volumen N°3 resultan ser adecuados, sin embargo, estos deben considerar estadística proyectada con diferentes escenarios de Cambio Climático. Para el caso de puentes de carreteras, se sugiere un diseño con periodo de retorno de 100 años y verificación con periodo de retorno 150 años.

Se debe notar que lo anterior conserva las probabilidades de excedencia de los caudales extremos, modificando las magnitudes de los eventos extremos, producto de las proyecciones.

Estadísticamente, y suponiendo que los caudales instantáneos en el futuro serán de mayor magnitud, una aproximación alternativa sugiere elevar los periodos de retorno ante un escenario estacionario (por ejemplo, adoptar un  $Tr=150$  en vez de  $Tr=100$  para diseño). Si bien esto resulta ser un enfoque alternativo, no existe una certeza, determinada a priori, que pueda determinar un valor que sea representativo en el futuro de equivalencia para el caudal de diseño actual. Esto probablemente cambiará caso a caso, dependiendo de las proyecciones específicas que se tengan en las diferentes cuencas de estudio.

Por lo demás, las consignas generales son las siguientes:

- 1) Cálculo de las cotas de socavación total para estribos y cepas en base a las condiciones de eje hidráulico que sean proyectadas con la nueva hidrología. Proyectar sistemas de fundación bajo las nuevas cotas de socavación.
- 2) Favorecer geometrías de cepas y estribos que minimicen la socavación local. Esto es utilizar taludes en estribos de baja pendiente, privilegiar geometrías de cepas hidrodinámicas.
- 3) Minimizar la penetración de estribos en los lechos, evitando angostamiento de las cajas naturales de los ríos, evitando de esta forma entrar en una crisis hidráulica que maximice los caudales unitarios y, por ende, las socavaciones en las secciones de los puentes.
- 4) Proyecto de defensas fluviales en base a las condiciones proyectadas del Eje Hidráulico con caudales que consideren el efecto del Cambio Climático. Usualmente, en la premisa que los caudales máximos instantáneos aumentan, se requieren pesos de roca W50 mayores al escenario de Línea de Base.

#### En infraestructura existente

Se entiende por adaptación de la infraestructura existente, un conjunto de obras hidráulicas complementarias al puente, a fin de resguardar la infraestructura construida.

Esto en el entendido de que la modificación de cepas o estribos existentes no puede ser re proyectada, lo anterior requiere de análisis previos que buscan identificar falencias, las cuales se reseñan en la Tabla 4.53, dependiendo de cuál sea el diagnóstico que se realice en la infraestructura se señalan posibles soluciones.

**Tabla 4.53: Potenciales diagnóstico y soluciones para adaptación de infraestructura existente ante cambio en los caudales de crecida**

Diagnóstico	Potencial Solución	Justificación
Cota de socavación inferior al actual sello de fundación de cepa.	Construcción de carpeta de enrocado de fondo, con tamaño de enrocado que asegure arrastre nulo.	Se requiere proteger entorno de la cepa. Luego, en el proceso de degradación del lecho, se tiene un tamaño de sedimento mayor al natural, por lo que se logra controlar socavación, resguardando sello de fundación.
Cota de socavación inferior al actual sello de fundación de estribos.	Construcción de carpeta de enrocado de fondo, con tamaño de enrocado que asegure arrastre nulo. El enrocado de fondo debe rodear completamente el estribo.	Se requiere proteger entorno del estribo. Luego, en el proceso de degradación del lecho, se tiene un tamaño de sedimento mayor al natural, por lo que se logra controlar socavación, resguardando sello de fundación.
Riberas mal definidas en estribos, sujetas a socavación y degradación lateral del lecho,	Construcción de defensas fluviales laterales, cubriendo totalmente el estribo, por una longitud mínima asociada al bulbo de socavaciones. Se debe considerar además proteger singularidades en los costados del estribos, como caminos de acceso.	En el proceso de degradación del lecho, existe una socavación lateral, la cual podría conducir flujo entre el estribo y carpetas de entrada y salida. Protección de riberas impide dicho flujo,
Peso de enrocado, lateral o de fondo, insuficiente.	Consolidación del enrocado con hormigón pobre, lo cual aumenta en un 50% el peso nominal de la roca para efectos de cálculo. Refuerzo con hormigón estructural.	Se requiere aumentar tamaño de la roca, a fin de evitar arrastre del enrocado.
Diminución de la revancha de diseño.	No existen medidas no estructurales para revancha insuficiente en infraestructura. Una solución parcial corresponde a ejecutar reperfilados y limpieza periódica del lecho.	Se desea controlar rugosidades, optimizando las alturas de escurrimiento.
Daños estructurales en cepas y estribos.	Rehabilitación de cepas mediante soluciones de micropilotaje y complemento con enrocados de fondo. Reestructuración de la geometría de cepa y estribos a fin de disminuir factores de corrección de socavación por forma.	
Daños estructurales en defensas fluviales	Rehabilitación de defensas fluviales con relleno de rocas nuevas y consolidación con hormigón pobre. Relleno de vacíos con lechada.	

## 5. Síntesis, conclusiones y recomendaciones

Se ha presentado una metodología (ver síntesis en Figura 5.1) para estimar caudales de diseño en cuencas sin control fluviométrico. La metodología se basa en la información medida en estaciones meteorológicas y la información del producto CR2Met, que permite distribuir las variables precipitación y temperaturas extremas espacialmente, previa validación del producto en las celdas donde se ubican las estaciones meteorológicas. Al conocer las cotas de las celdas de la grilla del producto, es posible determinar la variación altitudinal de las variables en cada cuenca en función sólo de la variable conocida en la estación meteorológica. Considerando un gradiente vertical de la temperatura mínima diaria de  $-5,8 \text{ }^\circ\text{C/Km}$  se estima la cota de la isoterma  $0^\circ\text{C}$ ,  $H_0$ , y con ésta se estima la posición de la línea de nieve con la relación establecida por Garreaud (2016) como  $H_0-300 \text{ m}$ , la que se considera representativa según los valores que informa el Observatorio Andino para la Región del Maule en el período 2000 a 2020.

Conjuntamente, se procedió a seleccionar los modelos climáticos del proyecto CMIP6 que según los criterios establecidos por Gateño et al (2023) y Jerez et (2023) se estiman apropiados para efectuar proyecciones en la región del Maule. Los modelos considerados fueron CMCC-ESM2 y GFDL-CSM4 para la Estación Potrero Grande y NorESM2-MM para la estación Ancoa Embalse. De las series diarias de precipitación y temperaturas extremas proyectadas desde 1985 a 2100, se extrajo la información de precipitaciones máximas diarias anuales y los valores de temperaturas extremas asociadas a los días en que ocurre la precipitación. Igualmente se extrajo la información de precipitaciones diarias ocurridas en los 5 días anteriores a cada evento, lo que posibilitó el análisis de la condición de humedad antecedente en cada evento.

La información anterior permitió estimar le serie de máximos anuales de los volúmenes de precipitación tanto observados como aquellos simulados por los modelos climáticos seleccionados y realizar el análisis de frecuencias en el período histórico 1985-2014 y 1990-2019 para determinar aquellos volúmenes asociados a los períodos de retorno de interés,  $T=100$  años para el diseño y 150 años para la verificación.

Para determinar la precipitación a considerar para la estimación del caudal máximo se seleccionaron dos valores de línea de nieve de acuerdo con los valores indicados en eventos de precipitación por el Observatorio Andino para la Región del Maule que se superan el 25% y 10% del tiempo en el periodo 2000 a 2020. Dichos valores, a base de los cuales se definieron las áreas en cada cuenca fueron 1830 y 2350 m s.n.m. que determinaron las precipitaciones medias en dichas áreas para realizar el análisis de los hidrogramas de crecida.

Para determinar los hidrogramas de escorrentía directa se consideraron las condiciones de humedad antecedentes seca y normal para estimar el calor de la curva número y calcular la precipitación efectiva necesaria para aplicar el método del hidrograma unitario sintético de Linsley y estimar el caudal máximo instantáneo asociado a dos distribuciones (centrada y tardía) de la precipitación diaria afectada por el coeficiente de duración 1,116 para transformarla a una duración de 24 horas,

Los valores de caudal máximo instantáneo fueron obtenidos para los dos periodos de retorno de interés en tres periodos climatológicos (histórico 1990-2019; futuro cercano NF 2030-2060 y futuro lejano FF 2040-2070) para cada una de las configuraciones (escenario, modelo climático, humedad antecedente; distribución de precipitación). El conjunto de valores simulados permitió obtener los factores de cambio que el cambio climático proyecta sobre estos caudales. Al aplicar estos factores para las mismas condiciones de humedad y distribución de precipitación, a los valores de caudal obtenidos a base de la información histórica del producto CR2MET asociados a las estaciones Potrero Grande y Ancoa Embalse,

se seleccionan los valores máximos para determinar los caudales de diseño con y sin cambio climático que se consignan en la Tabla 5.1. A modo de ejemplo, en la Figura 5.2 se presentan los hidrogramas modelados para el periodo de retorno T=100 años en el período histórico y futuro lejano en la cuenca de Claro en Los Vientos con el GCM2, correspondiente a GFDL-ESM4, lo que permite visualizar los caudales máximos instantáneos simulados 734,9 m<sup>3</sup>/s y 960,4 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, y luego obtener el factor de cambio de 1,307 que conduce a un valor de diseño (T=100 años) de 838,9 m<sup>3</sup>/s. En los sistemas analizados, los valores máximos con cambio climático, en general se obtienen bajo el escenario SSP5-8.5 independiente del futuro cercano o lejano que se haya considerado para las proyecciones. Se constata que son más desfavorables una mayor curva número (asociada a mayor humedad en el suelo) y una distribución tardía (con mayor precipitación hacia fines de la tormenta).

**Tabla 5.1: Caudales de diseño (m<sup>3</sup>/s) usando información del período histórico y con Cambio Climático en las cuencas en estudio,**

Cuenca	Sin Cambio Climático		Con Cambio Climático	
	T=100 años	T=150 años	T=100 años	T=150 años
Maitenhuapi	217,0 <sup>2,4</sup>	224,3 <sup>2,4</sup>	324,5 <sup>2,4,5</sup>	350,4 <sup>2,4,5</sup>
Los Vientos	642,0 <sup>2,4</sup>	696,8 <sup>2,4</sup>	838,9 <sup>2,4,6</sup>	973,8 <sup>2,4,6</sup>
Putagán	98,5 <sup>2,4</sup>	104,5 <sup>2,4</sup>	124,3 <sup>2,4,5</sup>	136,0 <sup>2,4,5</sup>
Chupallar	522,3 <sup>2,4</sup>	691,2 <sup>2,4</sup>	566,5 <sup>2,4,5</sup>	758,4 <sup>2,4,5</sup>

Nota: <sup>1</sup> CN I; <sup>2</sup> CN II; <sup>3</sup> Dist. Centrada; <sup>4</sup> Dist. Tardía; <sup>5</sup> NF; <sup>6</sup> FF

La metodología utilizada se basó sólo en información meteorológica por no contarse en los lugares de interés con información fluviométrica. En los casos en que ésta estuviera disponible y el proyecto considera el tiempo requerido para dichos efectos, se sugiere calibrar un modelo de simulación hidrológica a paso temporal subdiario. De esta manera se podrían simular de manera continua las series de caudales horarios que pueden considerarse como caudales máximos instantáneos en la mayoría de las cuencas. Esfuerzos pasados realizados en este sentido se han basado en la modelación a escala temporal diaria y han determinado los caudales máximos instantáneos estimando que la relación existente en el periodo histórico con los caudales medios diarios máximos se mantiene constante en el futuro, que podría no considerar que el sistema puede cambiar en el futuro por efecto de los cambios en la línea de nieve.

La metodología propuesta se refiere, principalmente, a la determinación de la escorrentía directa en condiciones de cambio climático, metodología que puede ser usada en otras zonas geográficas de características similares a los sistemas en estudio (cuencas pluvio-nivales o nivo-pluviales).

En cuencas pluviales pequeñas (menores a 20 Km<sup>2</sup>) sin información fluviométrica, puede ocuparse la fórmula racional para estimar el caudal máximo instantáneo necesario para el diseño de obras. En estos casos es necesario investigar sobre los cambios que se proyectan en las curvas IDF (Intensidad, Duración, Frecuencia). En este sentido, es necesario considerar que la mayoría de los modelos climáticos globales están disponibles a nivel diario; por ello si no existen modelos GCM que se consideren apropiados para la zona de interés será difícil efectuar dicho análisis.

El presente estudio considera que se mantiene el riesgo hidrológico por lo que se han adoptado los mismos periodos de retorno preestablecidos en la normativa actual, pero cambiando las series de análisis, sustituyendo la “estadística histórica” por “estadística proyectada” en base a los escenarios de Cambio Climático y Modelos de Circulación General. El enfoque, en cada una de las ventanas de análisis proyectadas, es estacionario, a pesar de que la serie completa no lo es, puesto que considera las proyecciones de cambio climático, las cuales muestran modificaciones en sus estadísticos, por ende, en la función densidad de probabilidad. Es por esto que no se requiere cambio normativo o brechas en cuanto

a las definiciones de periodo de retorno, sino que el enfoque es trabajar con series futuras proyectadas, adoptando los mismos criterios. Finalmente, se debe mencionar que otro enfoque es dejar fijo un cierto valor de la variable estocástica ( $P_p$  o  $Q$ ) y recalcular su nuevo periodo de retorno en el enfoque no estacionario, sin embargo, esto implicaría no dejar un criterio fijo para todos los casos, lo cual no es recomendable.

Se sugiere considerar algunos cambios técnicos en la normativa de diseño, referida, principalmente, a tener en consideración el cambio climático lo que incluye la selección de modelos climáticos y el tratamiento de la información (escalamiento y corrección de sesgo). Asimismo, se reitera que dadas las características diversas de nuestros sistemas hidrológicos tanto la información disponible como el tratamiento de la información no puede fijarse a priori. Por esto se sugiere dirigir los esfuerzos a plantear qué escenarios futuros deberían considerarse para el diseño, los cuales podrían ser diferentes dependiendo de las estructuras que se estén diseñando y de la zona del país donde se insertan.

En este estudio se han analizado dos posibles escenarios futuros cuya ocurrencia depende del camino que las grandes potencias adopten sobre las emisiones de los gases de efecto invernadero. Al analizar estos en las cuencas en estudio se obtuvo que uno de ellos era el más desfavorable (SSP5-8.5) y se definieron los valores de diseño y verificación de acuerdo con esa selección de realidad futura, teniendo como base la información meteorológica disponible. Las características de uso y coberturas de suelo de los sistemas se consideraron invariantes en el futuro, lo que agrega incertidumbre adicional en los valores determinados. De acuerdo con esto se sugiere realizar estudios donde se evalúe la seguridad asociada a las estructuras hidráulicas existentes y proyectadas considerando la nueva información disponible cada al menos 10 años tanto de modelos climáticos como hidrometeorológica y física de los sistemas. Otro tipo de estudios que podrían realizarse se refieren al impacto de medidas que aminoren los efectos del cambio climático sobre las crecidas como, por ejemplo, considerar cambios en la cobertura de suelo que disminuyan el valor de la curva número.

Los aumentos de los valores de diseño y verificación de estructuras hidráulicas, que ocasiona el cambio climático en los caudales líquidos, sirven de base para el posterior análisis hidráulico y de las disciplinas asociadas tales como geotecnia y estructuras, para así considerar el riesgo en el diseño general de éstas. Esto significa que se deben estudiar los cambios en la hidráulica y mecánica fluvial, y por ende sus impactos en el diseño de las fundaciones de las cejas, estribos y enrocados emplazados en los cauces

Uno de los aspectos importantes de tener en cuenta en los análisis hidrológicos se refiere a la información disponible. Se recomienda insistir sobre la necesidad de contar con estaciones hidrometeorológicas (meteorológicas y pluviométricas) en cotas más altas que permitan validar los supuestos de distribución espacial y temporal de precipitación y temperatura, además de permitir la validación de los modelos hidrológicos en cuencas en régimen natural.

### a) Base de datos

- **Escenarios climáticos:**
  - SSP2-4.5 y SSP5-8.5
- **Modelos climáticos globales (GCMs) del CMIP6:**
  - Etiqueta de la variante: r1i1p1f1
  - Períodos: 1979 - 2014 y 2015 - 2100
- **Producto observacional:**
  - Estaciones meteorológicas patrón
  - Período: 1979 - 2014
- **Escala temporal: diaria**

### c) Selección de GCMs

- PPI: Índice de Rendimiento Histórico

$$PPI_{k,m,n} = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^{N=5} S_k^2 (1 - M_{k,m,n})^2}$$

- CI3: Índice de Impacto Climático Integrado

$$CI_{m,n}^3 = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^{N=8} S_k^2 (1 - r_{s_{k,m,n}})^2}$$

donde: n = GCM; m = SDM; k = variable climática para PPI e índice climático para CI3; M = valor de la función objetivo; rs = correlación de Spearman; Sk = factor de amplificación.

### b) Escalamiento

- Escalamiento Espacial → Método bilineal
- Escalamiento Estadístico → Multivariate Bias Correction MBCn

#### Precipitación Máxima Media Diaria (1985 - 2014)

i) GCM Nativo      ii) Escal. Espacial      iii) Escal. Estadístico



Figura esquemática sobre el proceso de escalamiento para una variable climática de interés.

### d) Proyecciones climáticas

- **Valores medios de variables de interés** (Pmean, Pmax, Pantecedente, Tmin, Tmax) para ventanas de tiempo de 30 años.
- **Señal de cambio** entre período proyectado y período histórico.

$$\Delta X = \frac{GCM_{proj} - GCM_{hist}}{GCM_{hist}}$$

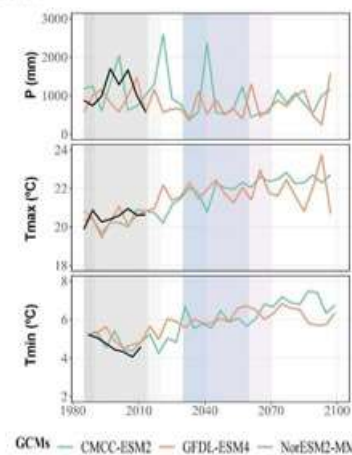
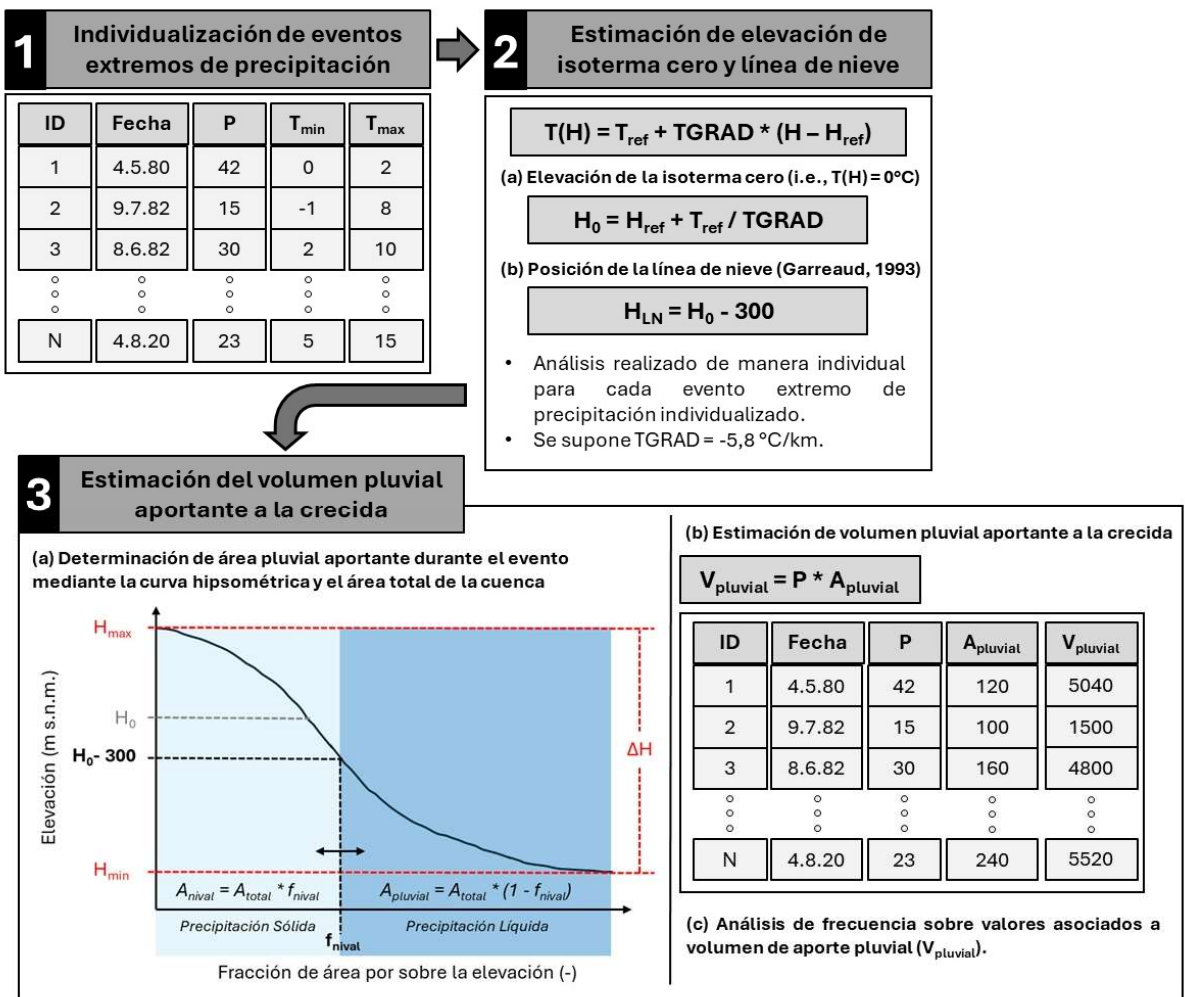


Figura 5.1 a): Esquema de la metodología para estimar caudales de diseño en cuencas sin control fluviométrico en escenarios de cambio climático. Aplicación a puentes. Etapa 1: Selección de escenarios de modelación

b)



### 3 Estimación del volumen pluvial aportante a la crecida

(a) Determinación de área pluvial aportante durante el evento mediante la curva hipsométrica y el área total de la cuenca

Fracción de área por sobre la elevación (-)

(b) Estimación de volumen pluvial aportante a la crecida

$$V_{pluvial} = P * A_{pluvial}$$

ID	Fecha	P	A <sub>pluvial</sub>	V <sub>pluvial</sub>
1	4.5.80	42	120	5040
2	9.7.82	15	100	1500
3	8.6.82	30	160	4800
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	4.8.20	23	240	5520

(c) Análisis de frecuencia sobre valores asociados a volumen de aporte pluvial (V<sub>pluvial</sub>).

Figura 5.1 b): Esquema de la metodología para estimar caudales de diseño en cuencas sin control fluviométrico en escenarios de cambio climático. Aplicación a puentes. Etapa 2: AF Volumen Pluvial asociado a periodos de retorno de diseño y verificación

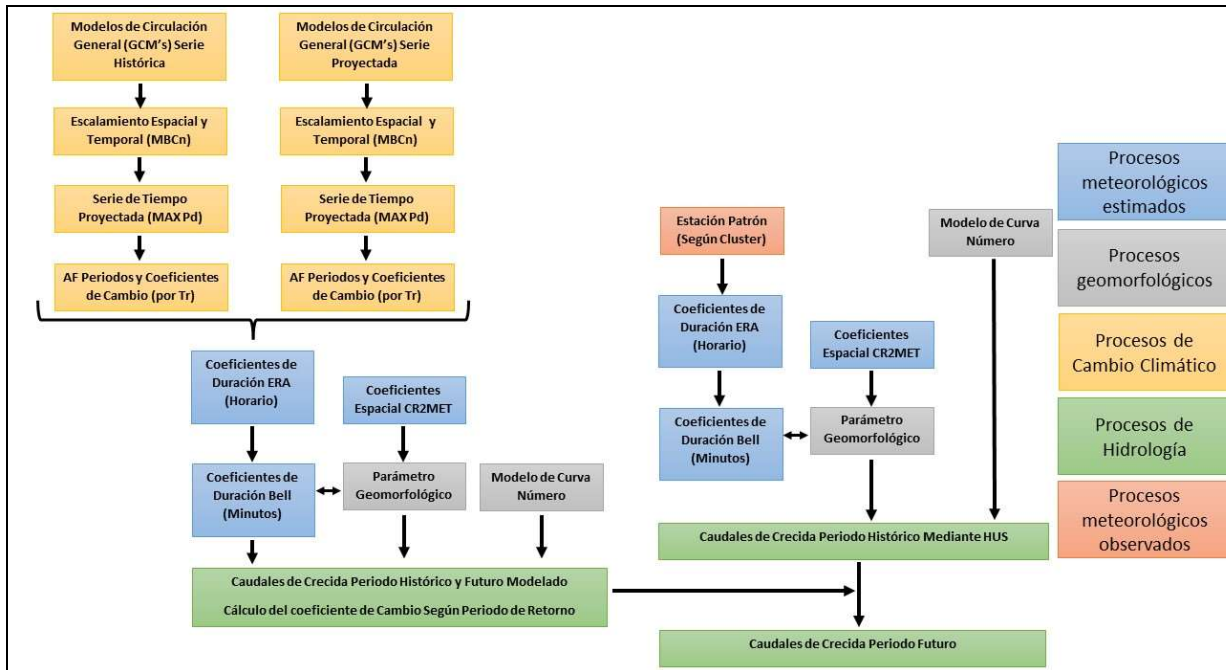


Figura 5.1 c): Esquema de la metodología para estimar caudales de diseño en cuencas sin control fluviométrico en escenarios de cambio climático. Aplicación a puentes. Etapa 3: Modelación P-Q

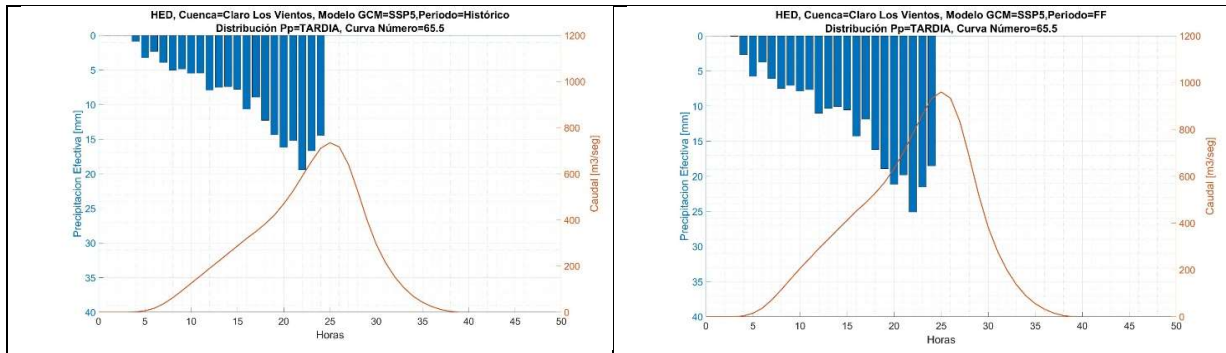


Figura 5.2: Hidrogramas de escorrentía directa. Ejemplo de cálculo de factor de cambio en Caudales Máximos Instantáneos de Escorrentía Directa en la Cuenca Claro Los Vientos asociados al periodo de retorno T=100 años. Condiciones de cálculo: Escenario SSP5-8.5; CN II; Distribución tardía; GCM2. Izquierda Línea base; Derecha: Futuro Lejano.

## Referencias

Ahmed K. Sachindra D. A. Shahid S. Demirel M. C. & Chung E. S. (2019) Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(11) 4803–4824, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4803-2019>

Baez-Villanueva O. M. Zambrano-Bigiarini M. Beck H. E. McNamara I. Ribbe L. Nauditt A. ... & Thinh N. X. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment* 239 111606.

Bock L. Lauer A. Schlund M. Barreiro M. Bellouin N. Jones C. Meehl G. A. Predoi V. Roberts M. J. & Eyring V. (2020). Quantifying Progress Across Different CMIP Phases With the ESMValTool. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125(21). <https://doi.org/10.1029/2019JD032321>

Boisier J.P. et al. 2018. CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In EGU general assembly conference abstracts (p. 19739).

Cannon A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics* 50(1–2) 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>

Centro de Cambio Global UC. CIGIDEN. Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y Universidad de Valparaíso. 2013. "Marco Estratégico para la Adaptación de la infraestructura al cambio climático" Financiado por Environmental Canada/Environnement Canada ([www.ec.gc.ca](http://www.ec.gc.ca))

Chapman L. (2007). Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography* 15(5) 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.008>

CODELCO. (2023). Guía Metodológica: Evaluación de Disponibilidad Hídrica ante Escenarios de Cambio Climático. Informe Rev.0. OT N07 22. Contrato No 4600020351. Contrato Convenio Marco de Desarrollo Tecnológico Entre Corporación Nacional Del Cobre y Universidad de Chile. Elaborado Por Advanced Mining Technology Center (AMTC) págs 110.

Covey C. AchutaRao K. M. Cubasch U. Jones P. Lambert S. J. Mann M. E. Phillips T. J. & Taylor K. E. (2003). An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. *Global and Planetary Change*. 37(1–2) 103–133. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00193-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00193-5)

DGA (1995) Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica. Ministerio de Obras Públicas. S.E.B. N°4

DGA 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional. SIT N° 417 Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. Realizado por: Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile.

DGA (2022) Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile. S.I.T. 524 Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. División de Estudios

y Planificación. Santiago. Chile. Elaborado por: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

DIC FCFM. (2019) Incorporación del efecto de la no estacionariedad en el análisis de series hidrometeorológicas de precipitación diaria y temperatura media diaria, Caso de estudio: valores extremos y mensuales en Chile Central. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, desarrollada por el ingeniero Franco Ricchetti Campos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Dionizis D. Ojeda P. Quezada S. Lagos M. & Monserrat S. (2021). Implicancias de la elección del método de escalamiento estadístico de modelos de circulación general en proyecciones de cambio climático. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

DOH (2020) Actualización hidrológica embalse Aromos. Región de Valparaíso, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. Elaborado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

DOH (2022) Actualización de diseño de Obras de control aluvional en quebrada Bonilla, Antofagasta. Desarrollado por AC Ingenieros Consultores Ltda. en el marco del proyecto PNUD-CHL/SDP/073/21.

Eyring V. Bony S. Meehl G. A. Senior C. A. Stevens B. Stouffer R. J. & Taylor K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9(5) 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Gateño F. (2023). Selección del método de corrección estadística de productos grillados según aplicación y zona de interés. XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica pags 13.

Gateño F. Mendoza P. A. Vásquez N. Jimenez H. Jerez C. Lagos-Zúñiga M. Vargas X. Eduardo R.-Á. & Montserrat S. (2023). Evaluating CMIP6 Models for climate impact assessments in Chile. Submitted to *Earth's Future*.

Garreaud R. (2016) Impacto de la variabilidad de la línea de nieve en crecidas invernales en cuencas pluvio-nivales de Chile central. XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica págs.271-285.

Giorgi F. Hewitson B. Arritt R. Gutowski W. Gutowski W. Knutson T. & Landsea C. (2001). Regional climate information—evaluation and projections.

Hersbach H. Bell B. Berrisford P. Hirahara S. Horányi A. Muñoz-Sabater J. ... & Thépaut J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146(730) 1999-2049.

INH (2021) Diagnóstico estudio hidráulico de puentes. Varias Regiones. Realizado para la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas

Jerez C. Lagos M. & Montserrat S. (2023). Impacto de los métodos de escalamiento en la reproducibilidad de eventos extremos húmedos para la selección de modelos climáticos en una cuenca árida. Simposio Internacional Clima y Resiliencia En Tiempos de Cambio.

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

Meehl G. A. Covey C. Delworth T. Latif M. McAvaney B. Mitchell J. F. B. Stouffer R. J. & Taylor K. E. (2007). THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88(9) 1383–1394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383>

Machiwal D. and Jaha K. (2012) *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*. Publisher: Springer. Berlin and Capital Publishing Company. New Delhi, India ISBN: 978-94-007-1860-9. DOI: 10.1007/978-94-007-1861-6

O'Neill B. C. Tebaldi C. Van Vuuren D. P. Eyring V. Friedlingstein P. Hurtt G. Knutti R. Kriegler E. Lamarque J. F. Lowe J. Meehl G. A. Moss R. Riahi K. & Sanderson B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* 9(9) 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

Pettitt A.N. (1979) *A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem*. Royal Statistical Society. <https://doi.org/10.2307/2346729>

Raju K. S. & Kumar D. N. (2020). Review of approaches for selection and ensembling of GCMS. *Journal of Water and Climate Change* 11(3) 577–599. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>

Riahi K. van Vuuren D. P. Kriegler E. Edmonds J. O'Neill B. C. Fujimori S. Bauer N. Calvin K. Dellink R. Fricko O. Lutz W. Popp A. Cuaresma J. C. KC S. Leimbach M. Jiang L. Kram T. Rao S. Emmerling J. ... Tavoni M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy land use and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Ruane A. C. & McDermid S. P. (2017). Selection of a representative subset of global climate models that captures the profile of regional changes for integrated climate impacts assessment. *Earth Perspectives* 4(1) 1–20. <https://doi.org/10.1186/s40322-017-0036-4>

Ross C. Prihodko L. Anchang J. Kumar S. Ji W. y Hana N. (2018). HYSOGs250m global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data* 5 180091. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91>

Taylor K. E. Stouffer R. J. & Meehl G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4) 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

Touzé-Peiffer L. Barberousse A. & Le Treut H. (2020). The Coupled Model Intercomparison Project: History uses and structural effects on climate research. *WIREs Climate Change* 11(4). <https://doi.org/10.1002/wcc.648>

WMO (2009). *Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)* WMO 1045

Zhao Y. Feng D. Yu L. Wang X. Chen Y. Bai Y. Hernández Palma H. Galleguillos Torres M. Estades Marfán C. Biging G. Radke J. y Gong P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. *Remote Sensing of Environment* 183 170–185. doi:10.1016/j.rse.2016.05.016. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142288>