



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

COMPORTAMIENTO FUTURO DE UN PARQUE INUNDABLE.  
CASO PARQUE INTERCOMUNAL VÍCTOR JARA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

JORGE IGNACIO GUERRERO PAREDES

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FRANCO RICCHETTI CAMPOS  
EDUARDO MUÑOZ CASTRO

SANTIAGO DE CHILE  
2023

# Resumen

El valle de Santiago de Chile es atravesado por el Zanjón de la Aguada, cauce natural que recorre de oriente a poniente la ciudad, que ha sido caracterizado históricamente por ser una zona vulnerable y estigmatizada por la marginalidad, sus zonas industriales y recurrentes inundaciones. Como solución a estos problemas es que se propuso la construcción del *Parque Intercomunal Víctor Jara* (inicialmente nombrado como *Parque Inundable Zanjón de la Aguada*), proyectado como infraestructura hídrica capaz de controlar el caudal de crecidas proveniente del zanjón y así evitar desbordamientos, además de colaborar como una importante área verde para este sector de la capital. El presente trabajo de título estudia y proyecta el comportamiento en el futuro cercano (2030-2060) del Parque Intercomunal Víctor Jara considerando sus parámetros de diseño, e incorporando la hipótesis que por efectos del cambio climático estará expuesto a máximos diarios de precipitación más desfavorables. Esto se realiza utilizando el software de modelación HEC-HMS, el que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un episodio de lluvia. Para ello, se obtienen los datos de precipitación histórica del producto CR2MET, mientras mediante la calibración y escalamiento de los Modelos Climáticos Globales utilizados en el Balance Hídrico Nacional, se obtienen sus proyecciones de precipitación basadas en el escenario RCP8.5. Como resultado del estudio, se concluye que el Parque Intercomunal Víctor Jara será insuficiente para sostener las crecidas para períodos de retorno mayores a 25 años en el futuro cercano.



*A mis padres, mi novia y mis tres hermanos.  
¡Salud y vida!*

# Agradecimientos

Es increíble lo que se siente culminar etapas y cerrar ciclos. Es un sentimiento de alegría, satisfacción y gozo que se entremezclan con la nostalgia.

Agradecer es parte de lo bonito. Y yo, agradezco.

Agradezco en primer lugar a mi mamá y mi papá, que me han apoyado desde el momento 0. Desde que era aquel pequeño que bailaba Michael Jackson en el jardín infantil, o hacía de Arturo Prat en los actos oficiales del colegio. Desde mis primeros acordes en guitarra y hasta cuando representé los colores del archirrival jugando futsal. En mis peores penas y en mis mayores alegrías. Siempre han estado, y me han enseñado que siempre estarán, no importa cómo, ni cuándo, ni dónde.

Agradezco a mis hermanos, Pancho, Coty y Lucho, que su apoyo moral y anímico siempre ha sido fundamental en mi vida. Han sido guías, maestros, compañeros y hemos crecido juntos persiguiendo sueños y luchando por la justicia desde distintas trincheras. Gracias por enseñarme a darlo todo, y más. Gracias por enseñarme que podemos liberarnos de cadenas y ser quienes queramos ser. Gracias por tanto, gracias por todo.

No puedo olvidarme de quienes han compartido pedacitos de mi vida, que me han ayudado a forjarme como el humano que soy. Agradezco infinitamente la familia del futsal, que muchos aprendizajes y alegrías me dejaron, también al Club del Mate, les K de la E, el AGUANTE, la Bendita Invasión, mis amigos Biodanzantes y mis amigos porteños en general, que han hecho de esta etapa una de las más lindas. Gracias, gracias, gracias.

Y, por supuesto, gracias amor de mi vida, gracias Conti. Gracias por ser compañera, por ser soporte, por las risas inagotables y por marcar un antes y un después en mi existencia. Por aguantar mis mañas y mi estrés, por instarme a fortalecer los hábitos saludables, y por hacer que mi felicidad sea un poquito más grande a cada instante.

Estamos bien, mañana no se sabe. Este es el momento. Gracias a todos quienes se cruzan en mi camino. Seguimos avanzando, seguimos creciendo juntas.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción y Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Cambio Climático . . . . .	5
2.1.1. Modelación Climática . . . . .	7
2.1.2. Métodos de procesamiento de la información . . . . .	11
2.2. Modelación Hidrológica . . . . .	12
2.2.1. HEC-HMS . . . . .	13
2.2.2. Curva Número . . . . .	14
<b>3. Caracterización zona de estudio</b>	<b>15</b>
3.1. Antecedentes generales . . . . .	15
3.2. Clima . . . . .	15
3.3. Geología . . . . .	16
3.4. Hidrología . . . . .	16
3.5. Topografía y delimitación de la cuenca . . . . .	16
3.6. Cobertura de Suelo . . . . .	17
3.7. Información disponible . . . . .	18

3.8. Parque Intercomunal Víctor Jara . . . . .	20
3.8.1. Instalaciones . . . . .	20
<b>4. Metodología</b>	<b>25</b>
4.1. Precipitaciones . . . . .	25
4.1.1. Estimación Período Histórico . . . . .	25
4.1.2. Evaluación CR2MET . . . . .	26
4.1.3. Estimación Precipitaciones Futuras . . . . .	27
4.2. Escorrentía . . . . .	29
4.2.1. Modelo HEC-HMS . . . . .	29
4.2.2. Validación Modelo . . . . .	31
4.3. Estimación Caudales Futuros . . . . .	33
<b>5. Resultados</b>	<b>34</b>
5.1. Precipitación . . . . .	34
5.1.1. Período Histórico . . . . .	34
5.1.2. Período Futuro . . . . .	34
5.2. Escorrentía . . . . .	36
5.2.1. Parámetros base de modelación . . . . .	38
5.2.2. Período histórico . . . . .	38
5.2.3. Futuro cercano . . . . .	39
<b>6. Conclusiones</b>	<b>43</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>51</b>
<b>A. Precipitaciones Período Histórico</b>	<b>52</b>
<b>B. Precipitaciones Período futuro</b>	<b>59</b>

C. Caudales Período Histórico	65
D. Caudales Período Futuro	71

# Índice de Tablas

3.1. Parámetros topográficos de la cuenca del Parque Inundable Víctor Jara. . . .	17
3.2. Superficies cobertura de suelo Cuenca Parque Víctor Jara, sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF). . . . .	17
3.3. Ubicación espacial estaciones meteorológicas útiles para la zona de estudio, con las variables medidas y vigencia de cada una. . . . .	20
4.1. Clasificación de clases de humedad para el método de abstracción de lluvia SCS. Valores de Lluvia Antecedente de los 5 días previos al evento de precipitación en mm. . . . .	30
5.1. Resumen valores adoptados del análisis de frecuencias para las cinco series precipitación en [mm], con sus respectivas distribuciones de probabilidad en el período histórico, para TR de 2 a 200 años. . . . .	36
5.2. Resumen valores adoptados análisis de frecuencias de precipitación en [mm]. Período futuro cercano (2030-2060). . . . .	36
5.3. Factor de corrección de GCMs para ponderación de precipitaciones futuras. .	37
5.4. Valores de precipitación futura adoptados en base a la ponderación de las observaciones en [mm]. . . . .	37
5.5. Valores adoptados para curva número según antecedentes de humedad AMC.	38
5.6. Valores adoptados del análisis de frecuencias de caudales máximos anuales en el período histórico. Distribución Gumbel. Períodos de retorno de 2 a 200 años. Se incluye además valores nominales de estudios del Parque Intercomunal Víctor Jara para TR2 y TR100. . . . .	39
5.7. Principales eventos de inundación histórica y caudal modelado para estos eventos de precipitación. . . . .	40
5.8. Caudales simulados para los eventos de tormentas futuras estimada por los distintos GCMs y para TR de 2 a 200 años en $[\frac{m^3}{s}]$ . . . . .	40

5.9. Volumen de agua que desborda del cauce para cada GCM y períodos de retorno de 2 a 200 años en $[m^3]$ . . . . .	41
A.1. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CR2MET. . . . .	52
A.2. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CR2MET . . . . .	52
A.3. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CCSM4. . . . .	53
A.4. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CCSM4 . . . . .	54
A.5. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CSIRO MK3.6. . . . .	55
A.6. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CSIRO MK3.6. . . . .	55
A.7. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico IPSL-CM5A-LR . . . . .	55
A.8. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico IPSL-CM5A-LR . . . . .	56
A.9. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico MIROC-ESM . . . . .	57
A.10. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico MIROC-ESM . . . . .	58
B.1. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CCSM4 . . . . .	59
B.2. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CCSM4	59
B.3. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CSIRO MK3.6 . . . . .	60
B.4. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CSIRO MK3.6 . . . . .	61
B.5. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro IPSL-CM5A-LR . . . . .	62
B.6. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro IPSL-CM5A-LR . . . . .	62

B.7. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro MIROC-ESM . . . . .	62
B.8. Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro MIROC-ESM . . . . .	63
C.1. Escorrentía generada por los tres eventos de máxima precipitación anual. Período Histórico. Se incluye columna de humedad antecedente para determinar situación AMC. . . . .	65
C.2. Caudal máximo anual período histórico según CR2MET. . . . .	69
C.3. Resultados test $\chi^2$ análisis de frecuencias de caudales modelados en el período histórico. . . . .	69
C.4. Tabla resumen análisis de frecuencias de caudales modelados período histórico. . . . .	70
D.1. Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo CCSM4 asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200. . . . .	71
D.2. Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo CSIRO MK3.6 asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200. . . . .	73
D.3. Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo IPSL-CM5A-LR asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200. . . . .	75
D.4. Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo MIROC-ESM asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200. . . . .	77



# Índice de Ilustraciones

1.1. Inundación riberas Zanjón de La Aguada, año 2002. Fuente: Web oficial Parque Víctor Jara. . . . .	2
1.2. Cuencas definidas en el Plan Maestro de Aguas Lluvias del gran Santiago. En rojo la ubicación del parque. Fuente: DOH (2014). . . . .	3
1.3. Vista aérea Parque Intercomunal Víctor Jara. Fuente: Publimetro. . . . .	4
2.1. Emisiones de combustibles fósiles simuladas en modelos CMIP5 para los cuatro escenarios RCP. Series temporales de emisiones anuales. Fuente: Resumen técnico del quinto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2013). . . . .	7
2.2. Proyecciones de cambio climático en escenario RCP8.5, donde a) Serie de tiempo de Temperatura Promedio anual y b) Serie de tiempo de precipitación promedio anual. Región Suroeste de Sudamérica. Período 1950-2100. Fuente: IPCC WGI Interactive Atlas. . . . .	8
2.3. Influencia de ENSO y el modo anular del hemisferio sur (SAM) en la precipitación anual (1979-2015) sobre distintas regiones del globo. Se muestra también la correlación entre ambos índices y la presión a nivel del mar. Fuente: Balance Hídrico Nacional 2017, DGA. . . . .	9
2.4. Precipitación media anual periodo 1979 – 2015 según observaciones (panel izquierdo), reanálisis climático ERA-Interim (panel central) y reanálisis ERA Interim escalado con topografía. Fuente: Actualización del Balance Hídrico Nacional, DGA 2017. . . . .	12
3.1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y delimitación de la cuenca aportante del Parque Intercomunal Victor Jara. . . . .	18
3.2. Mapa de elevaciones de la cuenca del Parque Intercomunal Victor Jara y Uso de Suelo CONAF 2019. . . . .	19
3.3. Climograma característico de la cuenca de estudio. . . . .	19

3.4.	Localización estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas en el estudio. Fuente: Biblioteca Nacional de Chile. (2019). Estaciones Meteorológicas y Fluviométricas de Chile [Shapefile]. . . . .	20
3.5.	Ubicación punto de colapso cauce Zanjón de La Aguada. DOH 2023. . . . .	22
3.6.	Subdivisión por tramos del proyecto Parque Inundable Víctor Jara. DOH 2023.	22
3.7.	Tramo 1. Se habilita cauce abierto paralelo al original de modo que actúan en conjunto para soportar caudales superiores a un período de retorno superior a 20 años y hasta 100 años. DOH 2023. . . . .	23
3.8.	Tramos 3, 4 y 6, funcionamiento del parque como canal en simultáneo con cauce abovedado preexistente. Para caudales con período de retorno menor a 2 años sólo funciona bóveda; en caso contrario, se inunda el parque. DOH 2023.	23
3.9.	Laguna de retención, entra en acción para sostener caudales de períodos de retorno entre 20 y 100 años. Su principal función es disminuir la velocidad de entrada del caudal al parque. DOH 2023. . . . .	24
3.10.	Estanque de retención, entra en acción para sostener caudales de períodos de retorno entre 20 y 100 años. DOH 2023. . . . .	24
4.1.	Precipitación promedio anual del período histórico, estimada para cada pixel del producto grillado CR2MET. . . . .	26
4.2.	Porción de cada pixel del producto grillado que aporta a la precipitación total de la cuenca. . . . .	26
4.3.	Correlación precipitación acumulada mensual entre valores observados por la estación Antupirén y los estimados por el pixel que abarca esta estación del producto grillado CR2MET. . . . .	27
4.4.	Correlación precipitación máxima anual entre valores observados por la estación Antupirén y los estimados por el pixel que abarca esta estación del producto grillado CR2MET. . . . .	28
4.5.	Calibración Tormentas de junio de 2000 en la Quebrada de Ramón. . . . .	30
4.6.	Curva hipsométrica y altura mínima de la línea de nieve en el período histórico según portal Observatorio Andino. . . . .	31
4.7.	Validación modelo HEC-HMS: Simulación de escorrentía principales eventos de precipitación en la cuenca del Zanjón de la Aguada. En la imagen eventos de Julio 1991 (TR5), Agosto 1997 (TR5), Junio 2002 (TR100), y Abril 2016(TR5).	32
5.1.	Serie de precipitaciones diarias para la cuenca en estudio. Período histórico según CR2MET. . . . .	35

5.2.	Serie de precipitaciones máximas diarias anuales para la cuenca en estudio. Período histórico y futuro, según CR2MET y los GCMs utilizados. . . . .	35
5.3.	Proyecciones para eventos de tormenta en el período futuro por efecto del cambio climático para cada TR. . . . .	37
5.4.	Caudal máximo anual modelado para el período histórico en la cuenca del Parque Inundable Víctor Jara. . . . .	38
5.5.	Variabilidad esperada de las crecidas futuras asociadas a eventos de tormenta por efecto del cambio climático para cada TR. . . . .	41
5.6.	Volumen de agua que desborda el zanjón según cada GCM y para TR de 2 a 200 años en $[m^3]$ . Como línea continua se grafica la capacidad de acumulación del parque. . . . .	42
A.1.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CR2MET histórico. . . . .	53
A.2.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CCSM4 histórico. . . . .	54
A.3.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CSIRO MK3.6 histórico. . . . .	56
A.4.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con IPSL-CM5A-LR histórico. . . . .	57
A.5.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con MIROC-ESM histórico. . . . .	58
B.1.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CCSM4 período futuro. . . . .	60
B.2.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CSIRO MK3.6 período futuro. . . . .	61
B.3.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con IPSL-CM5A-LR período futuro. . . . .	63
B.4.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con MIROC-ESM período futuro. . . . .	64
C.1.	Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Caudales modelados período histórico. . . . .	68

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción y Motivación

El valle de Santiago de Chile es atravesado por el Zanjón de la Aguada, cauce natural que recorre de oriente a poniente la ciudad, que ha sido caracterizado históricamente por ser una zona vulnerable y estigmatizada por la marginalidad (INDH, 2021), sus zonas industriales y recurrentes inundaciones (ver figura 1.1).

En la búsqueda de solucionar esta problemática socio-territorial y estructural, es en 2007 que se presenta el proyecto *Parque Intercomunal Víctor Jara* (inicialmente nombrado como *Parque Inundable Zanjón de la Aguada*). Este parque tiene la funcionalidad de ser un área verde para la gente que habita en las comunas de Macul, San Joaquín, San Miguel, Pedro Aguirre Cerda y Santiago (ver figuras 1.2 para referenciar la ubicación en la capital, y 1.3 para reconocer el aporte paisajístico), del mismo modo que cumple un papel como infraestructura hídrica capaz de gestionar el caudal de crecidas proveniente del zanjón que pudiera provocar desbordes.

Este parque está ubicado estratégicamente aguas arriba del tramo abovedado del Zanjón de La Aguada, el cual tiene una capacidad de porteo de  $94 [m^3/s]$ , lo que equivale aproximadamente al caudal asociado a un período de retorno de 2 años (Ilustre Municipalidad de San Joaquín, 2019). Para caudales superiores, la bóveda entra en presión y por ende, se observan desbordes en la entrada que afectan ambas riberas del cauce, los cuales actualmente son encauzados hacia las instalaciones del parque.

Sin embargo, por efectos de cambio climático y un aumento en la temperatura global, las precipitaciones acumuladas anuales tenderán a disminuir, a la vez que los máximos diarios de precipitación aumentarían en Chile Central (Garreaud et al., 2017). Por otro lado, Lagos et al. (2015) proyecta aumentos de hasta un 100% en las magnitudes de caudales máximos instantáneos para distintos períodos de retorno en dos cuencas de Chile Central para el período 2046-2075. Estos aumentos en los caudales de crecidas en Chile Central podrían suponer un importante problema para las estructuras hidráulicas.

En ese sentido, estudiar el comportamiento del Parque Intercomunal Víctor Jara, evaluar si las estructuras que soportan la inundación de este serán suficientes para sostener caudales de crecidas en el largo plazo, y analizar la utilidad de implementar infraestructuras de este tipo son algunas de las motivaciones que animan a la realización de este trabajo de título. Sumado a lo anterior, la aplicación de modelos computacionales útiles para la investigación de comportamientos hidrológicos toma una mayor relevancia al considerar las proyecciones de cambio climático previstas desde los organismos competentes. Desde luego, este proyecto puede servir como base para futuros estudios tanto de mejoramiento de las obras hidráulicas del Zanjón de la Aguada, como para la implementación de parques inundables como solución al problema de desbordamiento de cauces en Chile.



Figura 1.1: Inundación riberas Zanjón de La Aguada, año 2002. Fuente: Web oficial Parque Víctor Jara.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo consiste en evaluar el comportamiento futuro a corto plazo (período 2030-2060) del Parque Inundable Víctor Jara, considerando las proyecciones de cambio climático del escenario RCP8.5 del proyecto CMIP en su fase 5.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Utilizar modelos climáticos globales y locales para estimar valores de precipitación

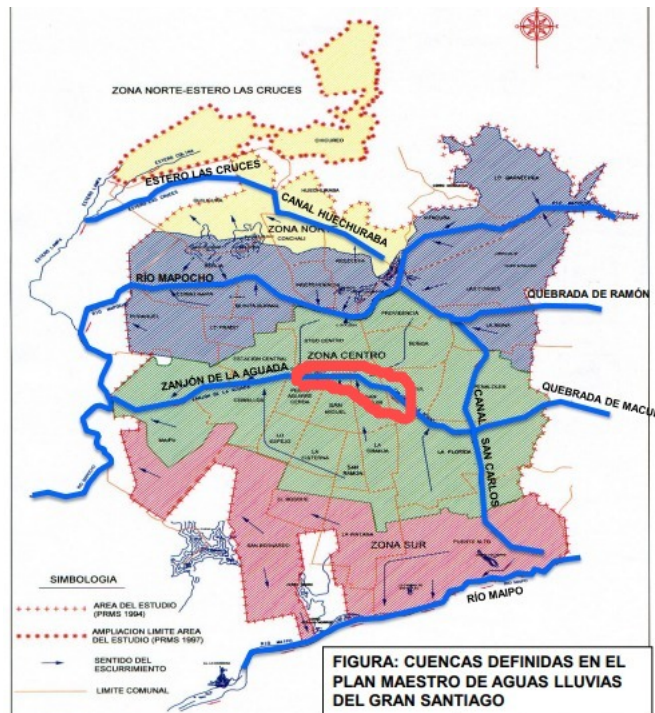


Figura 1.2: Cuencas definidas en el Plan Maestro de Aguas Lluvias del gran Santiago. En rojo la ubicación del parque. Fuente: DOH (2014).

- Implementar el modelo HEC-HMS para la elaboración del hidrograma de escorrentía en el punto de interés.
- Evaluar la funcionalidad como disipador de crecidas del parque inundable.





Figura 1.3: Vista aérea Parque Intercomunal Víctor Jara. Fuente: Publimetro.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Cambio Climático

El cambio climático es un fenómeno que preocupa a muchos científicos y líderes mundiales debido a su impacto en la vida humana y en la biodiversidad del planeta. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, es muy probable que la influencia humana haya sido la causa predominante del calentamiento observado desde mediados del siglo XX (IPCC, 2013), razón por la que el científico Michael E. Mann plantea que “El cambio climático no es solo una cuestión científica, sino una cuestión moral, ética y existencial” (Mann, 2012).

La principal causa del cambio climático es la emisión de gases de efecto invernadero debido a la quema de combustibles fósiles (Mann, 2017). Asimismo, la deforestación, la agricultura y los cambios en el uso del suelo son responsables de casi una cuarta parte de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (Jackson, 2019).

Adicionalmente, existen una serie de impactos significativos en el medio ambiente, la economía y la sociedad a raíz de esto. Algunos de los efectos más importantes del cambio climático incluyen:

- Aumento de la temperatura: La temperatura promedio de la superficie terrestre ha aumentado en alrededor de 1,1 grados Celsius desde la era preindustrial (IPCC, 2021).
- Cambios en los patrones climáticos: Eventos extremos, como las sequías, las inundaciones, los ciclones tropicales y los incendios forestales, están aumentando en frecuencia e intensidad (Pachauri, 2014).
- Afectación a la biodiversidad: Pérdida de biodiversidad a nivel global debido a la alteración de los hábitats naturales, la migración de especies y la interrupción de los procesos ecológicos (Ceballos, Ehrlich y Dirzo, 2017).
- Disponibilidad de recursos naturales: El cambio climático está afectando la disponibilidad de recursos naturales, como el agua, debido a la alteración de los patrones de



precipitación, la fusión del hielo y la salinización de las aguas subterráneas (IPCC, 2014).

- Impacto en la economía y la sociedad: Pérdida de empleos, el aumento de los costos de energía y la disminución de la productividad agrícola (Stern, 2006).

Chile no está exento de las alteraciones del ciclo hidrológico y las dificultades que esto acarrea. En los últimos años en la zona central del país se han registrado períodos prolongados de sequía, lo que ha generado importantes problemas para el abastecimiento de agua potable y para la agricultura (CNA, 2019). Del mismo modo, esta zona ha experimentado un aumento en las temperaturas máximas en los últimos años, lo que se traduce en un aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor (Aceituno et al., 2020).

El panorama futuro que se proyecta a nivel global tampoco es alentador. El IPCC con el objetivo de realizar proyecciones climáticas, en su proyecto CMIP5 genera cuatro diferentes escenarios futuros dependientes de las emisiones de Gases de efecto invernadero (GEI), llamados Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP por sus siglas en inglés). El RCP2.6 y el RCP4.5 representan un mundo con reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el primero el más optimista de todos los escenarios posibles, mientras que el RCP6.0 y el RCP8.5 representan un aumento continuo de las emisiones, con este último considerado el más extremo en términos de emisiones y sus consecuencias climáticas asociadas.

En la figura 2.1 se muestran los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero que proyecta el IPCC, mientras en la figura 2.2 se aprecian las proyecciones de las variables de Temperatura y Precipitación debidos al cambio climático para el escenario RCP8.5 en la región suroeste de Sudamérica, donde se emplaza la zona de estudio. Es importante notar que para dicho escenario, las proyecciones indican un aumento de la temperatura promedio de cerca de 3.5°C al año 2100 respecto de la línea de base establecida entre 1986 y 2005, a la misma vez que para el mismo período de tiempo se espera una reducción de las precipitaciones totales anuales alrededor de un 14% en la zona de análisis antes mencionada (IPCC, 2014). A la vez, la dispersión de los resultados presentados en la figura 2.2 justifica la necesidad de implementar estrategias de selección de modelos que permitan reducir la incertidumbre de proyecciones futuras.

Para este proyecto, se considerarán únicamente los resultados de este escenario, el RCP8.5, ya que es el escenario climático más desfavorable, el cual en virtud de los actuales niveles de emisiones en el planeta resulta ser el más consistente según los estudios realizados por la DGA en el Balance Hídrico Nacional 2017. Si bien en la región central de Chile los modelos sugieren que la cantidad de lluvia acumulada al año disminuirá (Garreaud et al., 2011 ; Garreaud et al., 2017), se espera que los eventos extremos de precipitación aumenten en intensidad. Esto llevará a un aumento de la variabilidad interanual de la precipitación y la frecuencia de sequías e inundaciones (Garreaud et al., 2017).

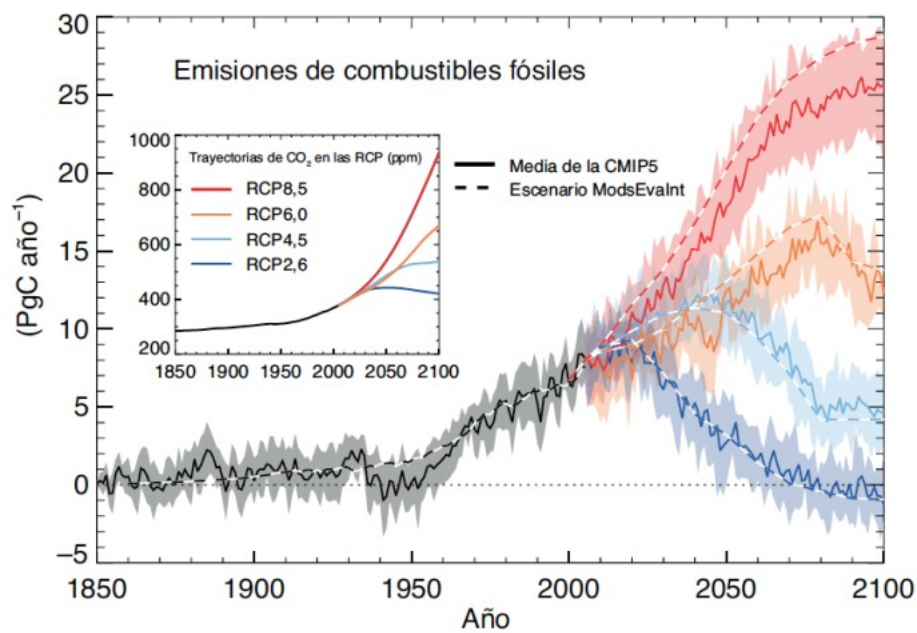


Figura 2.1: Emisiones de combustibles fósiles simuladas en modelos CMIP5 para los cuatro escenarios RCP. Series temporales de emisiones anuales. Fuente: Resumen técnico del quinto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2013).

### 2.1.1. Modelación Climática

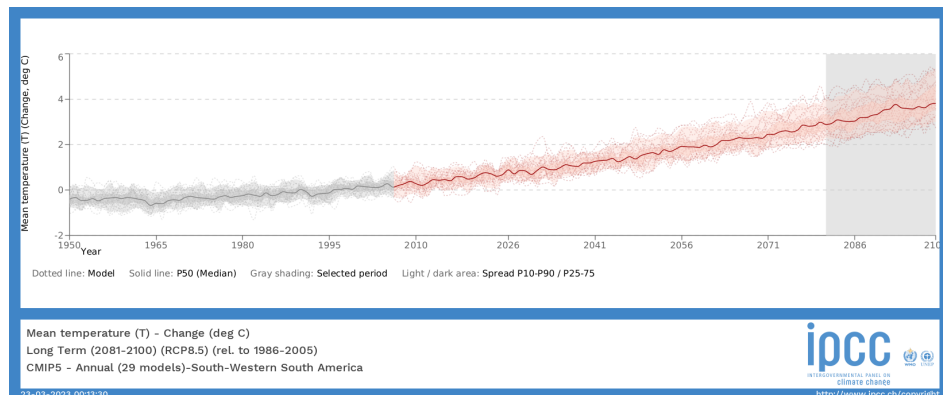
Los Modelos Climáticos Globales (GCM, por sus siglas en inglés) son herramientas que se utilizan para modelar el comportamiento del clima en el futuro, y han sido utilizados en Chile y el mundo para estudiar el cambio climático y sus posibles efectos.

Un GCM (Global Climate Model) es un modelo numérico que simula el sistema climático global, utilizando ecuaciones matemáticas para representar las interacciones entre la atmósfera, los océanos, la criósfera (hielo y nieve), la superficie terrestre y otros componentes del sistema climático (Flato et al., 2013). Los GCM son herramientas complejas que permiten hacer proyecciones del clima futuro y entender cómo puede cambiar en respuesta a diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y otros factores que afectan el clima (IPCC, 2013).

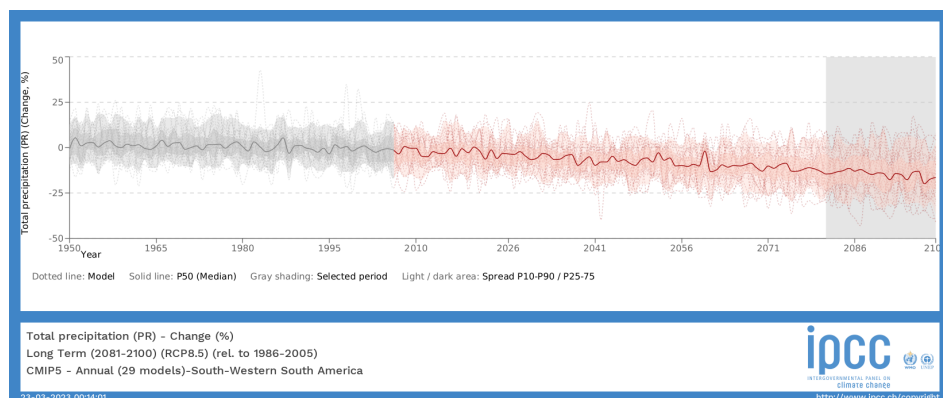
Estos modelos se basan en la física fundamental del sistema climático, y utilizan principios como la conservación de la energía y la masa para simular cómo se mueve el calor y el agua a través del sistema climático. Además, también tienen en cuenta procesos como la radiación solar, el viento, la humedad, la evaporación y la precipitación, entre otros (IPCC, 2013).

### Experiencias de estudios de cambio climático en Chile

Utilizando como base la actualización del Balance Hídrico Nacional de Chile publicada en 2017, existen algunos modelos climáticos que son de interés para este estudio, los cuales



(a) Temperatura



(b) Precipitación

Figura 2.2: Proyecciones de cambio climático en escenario RCP8.5, donde a) Serie de tiempo de Temperatura Promedio anual y b) Serie de tiempo de precipitación promedio anual. Región Suroeste de Sudamérica. Período 1950-2100. Fuente: IPCC WGI Interactive Atlas.

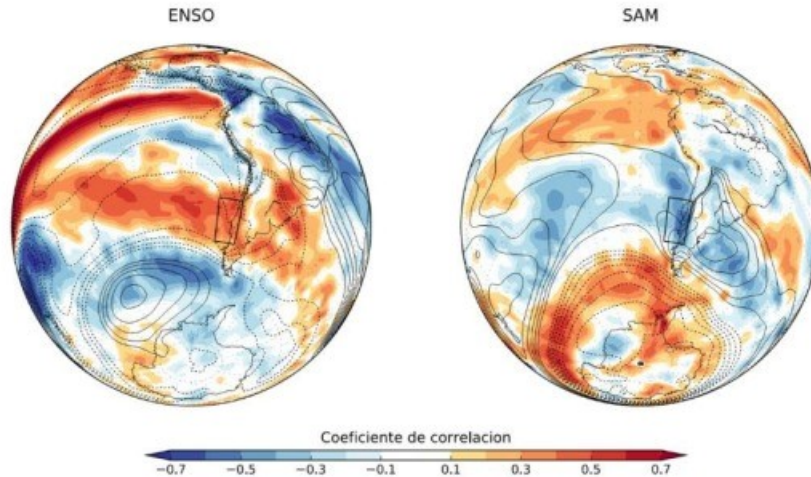


Figura 2.3: Influencia de ENSO y el modo anular del hemisferio sur (SAM) en la precipitación anual (1979-2015) sobre distintas regiones del globo. Se muestra también la correlación entre ambos índices y la presión a nivel del mar. Fuente: Balance Hídrico Nacional 2017, DGA.

representan con gran fidelidad los fenómenos ENSO (Oscilación del Sur - el Niño) y SAM (Modo Anular del Sur), (DGA, 2017).

El fenómeno del Niño es un patrón climático que ocurre en el Océano Pacífico, caracterizado por una variación cíclica en la temperatura de la superficie del mar y en los patrones de vientos y precipitaciones. El ENSO tiene un impacto significativo en el clima y los ecosistemas de todo el mundo, especialmente en América del Sur, donde puede causar sequías, inundaciones y otros desastres naturales. (Poveda y Mesa 1996.)

Por otro lado, el Modo Anular del Sur, es un patrón climático que ocurre en la atmósfera antártica y se caracteriza por una variación en la presión del aire y en los patrones de viento circumpolar antártico. Al igual que ENSO, el SAM tiene un impacto significativo en el clima y los ecosistemas de todo el mundo, especialmente en América del Sur, donde puede influir en la frecuencia y la intensidad de eventos extremos como sequías, inundaciones y tormentas. (Romero y Mendonça. 2010.)

Para comprender de mejor manera la elección de los modelos a utilizar en este estudio, es necesario conocer el término de Sensibilidad Climática. Esto es el cambio en la temperatura de equilibrio de un sistema en respuesta al forzamiento radiativo. Este cambio, en primer lugar, depende de un estado de clima inicial. Está demostrado que cambios en la superficie cubierta con hielo y la concentración de  $CO_2$  atmosférico influyen en esta sensibilidad (Sherwood et al, 2014), asociada a los procesos físicos que los modelos representan.

Vale decir, la sensibilidad climática se puede aplicar a los modelos GCM forzándolos a responder con cambios de temperatura hasta alcanzar equilibrio térmico, con un incremento

repentino en las concentraciones de  $CO_2$  atmosférico. Ese cambio se ha evaluado y cuantificado por modelo en el Balance Hídrico Nacional de 2017, de modo de apreciar cuán sensible son éstos a los cambios a las concentraciones de  $CO_2$ . Dicho informe selecciona cuatro modelos que representan distintos grados de sensibilidad a los fenómenos ENSO y SAM. Estos son:

- Sensibilidad baja extrema: CSIRO-Mk3-6-0
- Sensibilidad baja moderada: CCSM4
- Sensibilidad alta moderada: MIROC-ESM
- Sensibilidad alta extrema: IPSL-CM5A

En la figura 2.3 se puede apreciar el ajuste y la correlación que tienen los GCM seleccionados en este estudio para representar la influencia de ambos fenómenos en Chile. Se observa que para ENSO se obtienen altos coeficientes de correlación positiva, mientras que para SAM se obtienen fuertes coeficientes de correlación negativa en esta zona.

Adicionalmente, a continuación se describen brevemente algunos ejemplos de la utilización de los modelos considerados para este estudio en Chile:

- IPSL-CM5A-LR: En un estudio realizado por Gutiérrez et al. (2016), el modelo IPSL-CM5A-LR fue utilizado para simular el clima en Chile Central y los resultados mostraron que las precipitaciones disminuirán en el futuro en esta región.
- CCSM4: En el estudio realizado por Henríquez et al. (2017), el modelo CCSM4 fue utilizado para simular el clima en Chile Central y los resultados mostraron que las temperaturas aumentarán en esta región en el futuro.
- MIROC-ESM: Este modelo ha sido utilizado en varios estudios sobre el cambio climático en la zona central de Chile, incluyendo la evaluación de los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua y en la biodiversidad. (Maldonado et al., 2015; Vicuña et al., 2013)
- CSIRO-MK3.6.0: El estudio realizado por Vargas et al. (2015), utilizando este modelo, concluyó que existirá una disminución espacial de la precipitación anual de norte a sur desde la línea de base hasta el futuro, siendo mayor la caída para el futuro lejano. Del mismo modo, el número de días lluviosos disminuye en el futuro, a la vez que la temperatura aumentaría en el futuro en Chile para todos los sitios analizados.

## CR2MET-2.5

Para la estimación de las precipitaciones del período histórico se utilizará el producto grillado **CR2MET** en su versión 2.5, generado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>. Este consiste en una grilla de datos que cubre todo el territorio de Chile con una

resolución espacial de 5 x 5 km y una resolución temporal diaria. Su base de datos proviene de modelos estadísticos multivariados de precipitación y temperatura diaria, calibrados mediante observaciones locales. (DGA, 2022.) Contiene información sobre diferentes variables climáticas, como temperatura y precipitación, sin embargo, se utiliza principalmente para generar los datos de Precipitación y Temperaturas diurnas mínimas y máximas ( $T_N$  y  $T_X$ ) distribuidas en la grilla antes mencionada.

Se identifica la necesidad de ajustar las mediciones y datos generados desde este producto grillado de manera de reducir sesgos y aumentar la resolución espacial, enfocándonos en un punto único, el punto crítico de la zona de estudio. Para ello, es imperioso realizar un ajuste del CR2MET para mejorar su precisión en el sitio de interés.

Entre los métodos de validación de datos del producto grillado destaca el método del coeficiente  $R^2$ , ya que indica cuánta variabilidad en la variable dependiente se puede explicar mediante el modelo. Un  $R^2$  alto sugiere una mejor capacidad del modelo para ajustarse a los datos, lo que es especialmente relevante en la predicción y explicación de fenómenos en diversas disciplinas. Sin embargo, es esencial recordar que  $R^2$  tiene limitaciones y solo mide la bondad de ajuste del modelo a los datos, no la calidad intrínseca del modelo en sí. En el contexto de la validación de estimaciones del producto grillado CR2MET con estaciones meteorológicas, se puede utilizar este método para comparar los valores interpolados con los datos observados y evaluar así la precisión del producto grillado.

### 2.1.2. Métodos de procesamiento de la información

Es fundamental comprender que los modelos climáticos globales son herramientas que permiten hacer proyecciones sobre el clima en el futuro, pero muchas veces pueden tener limitaciones en la representación de algunos procesos climáticos complejos. Además, estas proyecciones están sujetas a cierta incertidumbre y dependen de las suposiciones y escenarios utilizados en el modelo (IPCC, 2014).

En esa línea, para corregir los sesgos sistemáticos de los datos obtenidos del GCM seleccionado, y mejorar su capacidad de proyectar situaciones futuras es que existen procesos para la regionalización (downscaling), que incluyen distintas técnicas de tipo estadísticas y dinámicas. Estas se alimentan de variables de entrada locales como la topografía o campos geofísicos, incorporando modelos empíricos de precipitación a la vez que modelos complejos que integran la dinámica atmosférica y procesos físicos y químicos de la corteza terrestre.

En la Actualización del Balance Hídrico Nacional 2017, se corrigieron localmente datos de precipitación de gran escala ( $\sim 0,75^\circ$  latitud-longitud) con datos topográficos (elevación y gradiente). Además de la precipitación, el método utiliza información de viento y humedad de gran escala provenientes del reanálisis ERA-INTERIM (Dee et al. 2011). En este caso, se utiliza un modelo de regresión lineal múltiple calibrado con información de más de 1.000 estaciones pluviométricas. Este y otros productos en desarrollo fueron evaluados a nivel de cuencas con información independiente, en particular de caudales y acumulación de nieve.

En la figura 2.4 se ilustra gráficamente el proceso de escalamiento por el que debe pasar la información de los GCM de manera que puedan ser utilizados apropiadamente en la zona de estudio requerida.

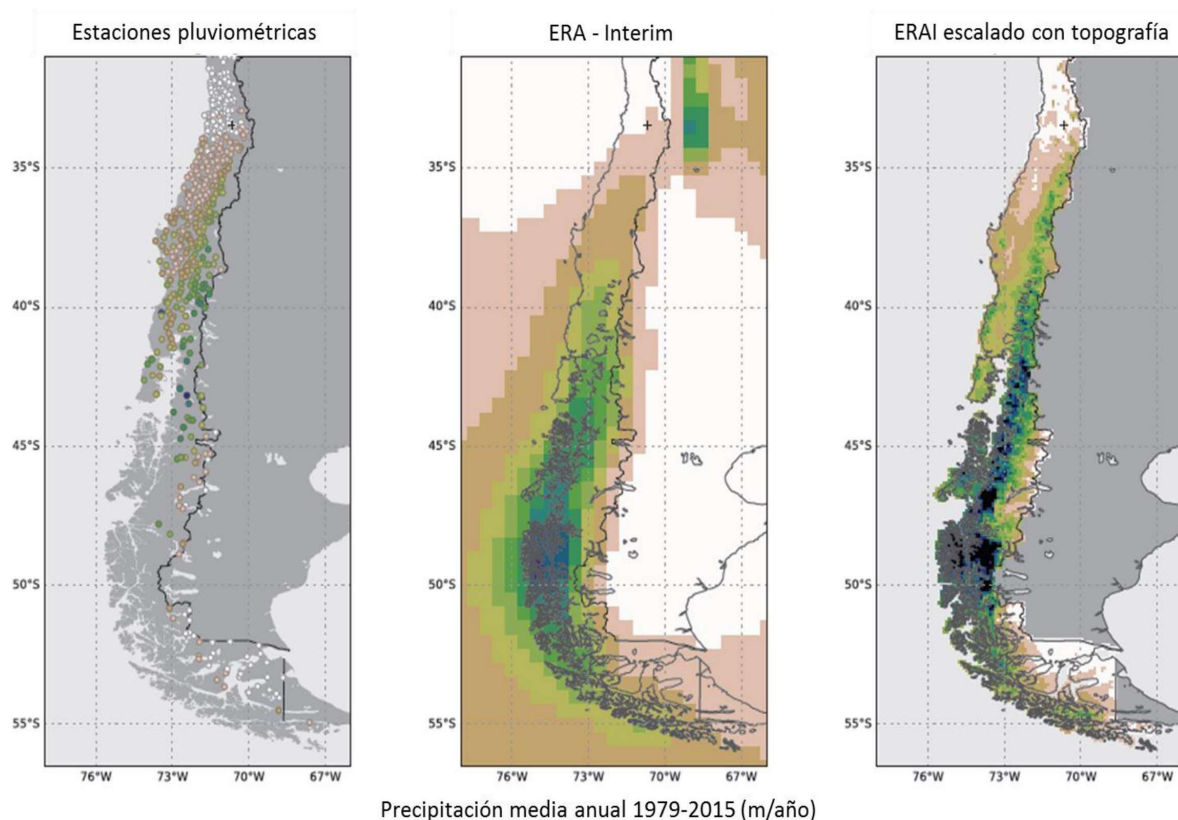


Figura 2.4: Precipitación media anual periodo 1979 – 2015 según observaciones (panel izquierdo), reanálisis climático ERA-Interim (panel central) y reanálisis ERA Interim escalado con topografía. Fuente: Actualización del Balance Hídrico Nacional, DGA 2017.

## 2.2. Modelación Hidrológica

Una vez obtenidos los resultados de los modelos climáticos, es necesario incorporarlos en modelos hidrológicos para poder analizar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Según Wilby et al. (2004), la modelación hidrológica es esencial para la gestión del agua, ya que proporciona información sobre el comportamiento del sistema hidrológico bajo diferentes escenarios climáticos y permite diseñar estrategias de adaptación y mitigación frente a los cambios en el clima. Además, según Teng et al. (2019), la incorporación de datos de modelos climáticos en los modelos hidrológicos puede mejorar la precisión de las proyecciones hidrológicas, permitiendo una gestión más eficiente de los recursos hídricos en el futuro. En definitiva, la combinación de modelos climáticos y modelos hidrológicos es esencial para entender cómo el cambio climático afecta los recursos hídricos y cómo podemos adaptarnos a estos cambios.

### 2.2.1. HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) es un modelo hidrológico ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería civil y ambiental para la gestión del agua y la planificación hidrológica. Según Regan et al. (2017), HEC-HMS es un modelo hidrológico de lluvia-escorrentía que utiliza la metodología de balance hídrico para simular el ciclo hidrológico, y se enfoca en la modelación de la escorrentía superficial. Además, cuenta con diversas herramientas para la calibración y validación del modelo, lo que permite asegurar la precisión de los resultados.

El modelo HEC-HMS requiere de diferentes tipos de datos para la simulación hidrológica, donde algunos de los principales son:

- Datos meteorológicos: Serie temporal de precipitación y humedad antecedente.
- Datos topográficos: Elevación, pendiente, longitud y perfil del cauce.
- Datos de uso del suelo: Cobertura vegetal, la urbanización, entre otros.
- Datos hidrológicos: Infiltración, la escorrentía superficial y la evaporación.

Estos datos se utilizan para calibrar y validar el modelo, y para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio. La selección y calidad de los datos de entrada es esencial para obtener resultados precisos y confiables del modelo.

Asimismo, este modelo produce varias salidas que permiten analizar y evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca. Algunos de estos outputs incluyen:

- Hidrogramas de caudal: Son series de datos que representan la variación temporal del caudal en un punto específico de la cuenca, y son una herramienta importante para la evaluación de los eventos hidrológicos extremos como las crecidas.
- Análisis de sensibilidad: Permite evaluar cómo cambia la respuesta hidrológica de la cuenca ante cambios en los parámetros del modelo, y es útil para la evaluación de la incertidumbre del modelo.
- Análisis de escenarios: Permite evaluar cómo cambia la respuesta hidrológica de la cuenca ante cambios en las condiciones climáticas o en el uso del suelo, y es útil para la evaluación de impactos y la planificación de adaptación.

En Chile, HEC-HMS ha sido ampliamente utilizado para la gestión de recursos hídricos y la evaluación de riesgos de inundaciones. Entre los proyectos en los que se ha utilizado, se pueden destacar la evaluación del balance hídrico de la cuenca del río Maipo (Gironás et al., 2011), el análisis de la disponibilidad hídrica superficial y subterránea en la cuenca del río Cachapoal (González et al., 2015), la evaluación de escenarios de cambio climático en la cuenca del río Limarí (Poblete et al., 2017), entre otros. Inclusive permitió identificar las zonas de mayor vulnerabilidad y la necesidad de implementar medidas de prevención y respuesta ante eventos extremos en la cuenca del río Mapocho (Ebert et al., 2009), y así otras grandes decisiones que han sido tomadas en base a resultados de este modelo.



### 2.2.2. Curva Número

Para poder evaluar la fracción de la precipitación que se transformará en escorrentía directa se utiliza el método de la curva número. Este es un parámetro empírico que describe la capacidad de infiltración del suelo, la cantidad de precipitación que puede infiltrarse y la cantidad de precipitación que se convierte en escorrentía (Beven y Kirkby, 1979). Para ello, la curva número tiene en cuenta el uso del suelo, ya que diferentes tipos de suelo y vegetación tienen diferentes tasas de infiltración.

La clasificación de uso del suelo se divide en varias categorías como praderas, cultivos, zonas rocosas y otras tierras. El coeficiente de curva número se asigna a cada categoría de uso del suelo, y se basa en la capacidad de infiltración del suelo y la rugosidad de la superficie.

Particularmente para Chile, la reciente publicación del producto grillado CN30-CL logra estimar el valor de CN para todo el país a una resolución de 30 metros reflejando la heterogeneidad de las cuencas a escalas pequeñas. Este producto grillado utiliza como base al *Land Cover de Chile* definido por Zhao et al. (2014) y a la inferencia del Grupo de Suelo Hidrológico HYSOGs, antecedentes que son dinámicos y que poseen inherentemente incertidumbre asociada, razón por la cual la decisión que tome cada especialista en base a bibliografía y a su propia experiencia toma mayor relevancia (Toro et al., 2023).

# Capítulo 3

## Caracterización zona de estudio

En esta sección se presentan los antecedentes generales de la zona de estudio, específicamente el Zanjón de la Aguada y el Parque Intercomunal Víctor Jara. Se da a conocer información relevante sobre la ubicación geográfica de la zona, sus características topográficas, hidrológicas y climáticas, así como también su historia y desarrollo urbanístico. Además, se describe la importancia de esta zona como área de protección y control de inundaciones en la ciudad, y se detallan las principales amenazas y riesgos a los que está expuesta en la actualidad.

### 3.1. Antecedentes generales

El Parque Intercomunal Víctor Jara es una zona verde ubicada entre las comunas de Macul, San Joaquín, San Miguel, Pedro Aguirre Cerda, y Santiago en la ciudad de Santiago de Chile, entre las calles Vicuña Mackenna al oriente y Club Hípico al poniente. Sus coordenadas geográficas aproximadas son  $33^{\circ} 32'$  S de latitud y  $70^{\circ} 34'$  W de longitud. Fue inaugurado en el año 2019 y se encuentra en la cuenca hidrográfica del Zanjón de la Aguada, la que tiene un área aproximada de  $168 \text{ km}^2$ , y elevaciones máxima, media y de salida de 3.255, 1.230 y 550 msnm respectivamente. Esta es una zona de alta vulnerabilidad ante las inundaciones debido a la poca capacidad hidráulica del abovedamiento existente en la intersección de las calles Carmen con Isabel Riquelme, estructura que soporta el caudal del zanjón.

### 3.2. Clima

El clima de esta zona es asociable al de todo Chile Central: De tipo mediterráneo, con una estación seca prolongada de precipitaciones escasas y temperaturas altas en verano, y una estación húmeda corta, con precipitaciones intensas y temperaturas más bajas en invierno. Estos patrones de precipitación y temperatura son influenciados por la topografía, la latitud y la corriente fría de Humboldt. (Garreaud et al., 2017)

### **3.3. Geología**

Se reconoce la pertenencia del área en que se emplaza el Parque La Aguada, a la estructura geomorfológica de Depresión Intermedia, y en específico en la continuidad de un curso de agua que se origina en una quebrada natural del piedemonte de la cuenca cual es la Quebrada de Macul. Sobre ella, existe un alto nivel de peligro frente a la ocurrencia de eventos de remoción en masa que en la historia reciente ha tenido connotaciones catastróficas, ya que existen factores favorables para crear una condición de inestabilidad geomorfológica.

En general, los suelos del área de estudio son clasificados como áreas que han sido urbanizadas, con alto grado de artificialización del medio edáfico y que han perdido valor desde el punto de vista de la producción agrícola a gran escala. La geología está compuesta principalmente por depósitos volcánicos, intrusivos del Cretácico y del Mioceno, depósitos cuaternarios y depósitos aluviales. Además, se considera la presencia de un subsuelo formado por capas de sedimentos sueltos de baja y regular calidad geomecánica.

### **3.4. Hidrología**

En sus orígenes el Zanjón de La Aguada era el curso natural de las aguas lluvias y de deshielo provenientes de la quebrada de Macul y quedaba fuera del radio urbano de la ciudad de Santiago. Sin embargo, en la actualidad, es un curso superficial de aguas que cruza la ciudad de Santiago de oriente a poniente desde el pie de la quebrada de Macul hasta el río Mapocho en la comuna de Maipú. Se extiende en una longitud de 27 Km, atravesando 9 comunas del Gran Santiago y recibe los aportes no sólo de las aguas lluvias y de deshielo provenientes de la quebrada de Macul, sino también de aquellos de la cuenca aportante que conforman parte de 21 comunas de la ciudad de Santiago recolectando este cauce los escurrimientos de aproximadamente el 40 % del área urbana del Gran Santiago. La propia condición topográfica de la ciudad de Santiago permitió que el Zanjón de La Aguada fuera utilizado también como colector de aguas servidas hasta junio de 2004, fecha en que las últimas aguas servidas que llegaban a él fueran derivadas hacia la planta de tratamiento de La Farfana.

### **3.5. Topografía y delimitación de la cuenca**

Con la cuenca definida y delimitada digitalmente gracias al mapa digital de elevaciones (DEM) proporcionado desde SRTM, se lleva a cabo un análisis geomorfológico mediante la utilización de las propiedades extraídas de la imagen digital. La caracterización de la cuenca de estudio, se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros topográficos de la cuenca del Parque Inundable Víctor Jara.

Parámetro	Valor
Área [ $km^2$ ]	167,7
Altura media [msnm]	1.032
Altura mínima [msnm]	549
Altura máxima [msnm]	3.251
Pendiente promedio [%]	9,6
Pendiente mínima [%]	0,1
Pendiente máxima [%]	89,2

### 3.6. Cobertura de Suelo

Para el estudio de cobertura de suelo se utilizaron los antecedentes reunidos por la CONAF en 2019. Estos muestran que el área en la zona de estudio está constituido básicamente por 11 tipos de suelo, señalados en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.1. La cobertura de suelo predominante - aproximadamente 55 % del área en la zona de interés - corresponde a asentamientos propios de la gran urbe, mientras que la segunda cobertura predominante corresponde a bosque nativo, abarcando alrededor del 22 % del área total de la cuenca en estudio. En tercer lugar se encuentra la clasificación denominada Áreas desprovistas de Vegetación, con un aporte cercano al 7 % del área total de la cuenca, la cual junto con los asentamientos tendrán una importante influencia en la determinación de la escorrentía directa generada por las precipitaciones, debido a su alta impermeabilidad.

Tabla 3.2: Superficies cobertura de suelo Cuenca Parque Víctor Jara, sectorización por actividades (Sistema de Información Territorial SIT CONAF).

Clasificación	Superficie ( $Km^2$ )	Superficie (%)
Áreas desprovistas de Vegetación	11,2	6,7 %
Asentamientos	92,7	55,3 %
Bosque Nativo	37,6	22,4 %
Cuerpos de Agua	0,03	0,0 %
Humedales	0,03	0,0 %
Matorral	5,2	3,1 %
Matorral Arborescente	7,7	4,6 %
Nieves y Glaciares	0,0	0,0 %
Plantación	0,7	0,4 %
Praderas	7,5	4,5 %
Tierras de cultivo	5,0	3,0 %
<b>Total</b>	167,7	100 %

En la figura 3.1 se presenta la ubicación geográfica de la cuenca asociada al Parque Intercomunal Víctor Jara, y en la figura 3.2 su mapa de elevación y el mapa de uso de suelos proporcionado por CONAF en 2019. También se presenta el climograma característico de la cuenca en la figura 3.3, donde se observa la mayor acumulación de precipitaciones entre los

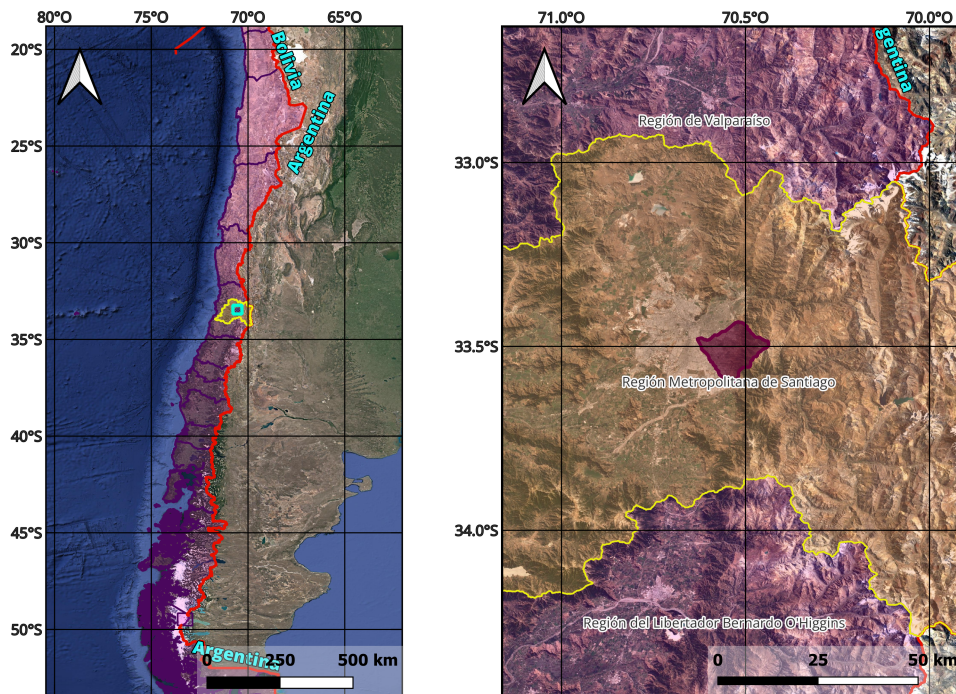


Figura 3.1: Mapa de ubicación de la zona de estudio y delimitación de la cuenca aportante del Parque Intercomunal Víctor Jara.

meses de Abril y Septiembre, los mismos meses donde la temperatura es más baja. A su vez, en los meses de verano se aprecian altas temperaturas y casi nulas precipitaciones.

Como se consigna en la sección 3.7, es importante notar que dentro de la cuenca no existe ninguna estación fluviométrica que proporcione mediciones de caudal, por lo que se omite la inclusión de este parámetro.

### 3.7. Información disponible

Para este estudio se utiliza la información proporcionada desde las estaciones meteorológicas de la DGA consignadas en la tabla 3.3 que pueden verse ubicadas espacialmente en la figura 3.4.

Se destaca que al interior de la cuenca de estudio no existen estaciones fluviométricas, debiéndose entonces realizar una trasposición de caudales desde la cuenca aledaña Quebrada de Ramón para la determinación de la variación estacional. Por otro lado, se cuenta únicamente con dos estaciones meteorológicas en la zona de estudio, las cuales se encuentran a muy corta distancia, lo que dificulta la elaboración de modelos orográficos de temperatura y precipitación. En el Capítulo 4 se detalla más profundamente las transformaciones y métodos utilizados para distribuir estos parámetros a nivel cuenca.

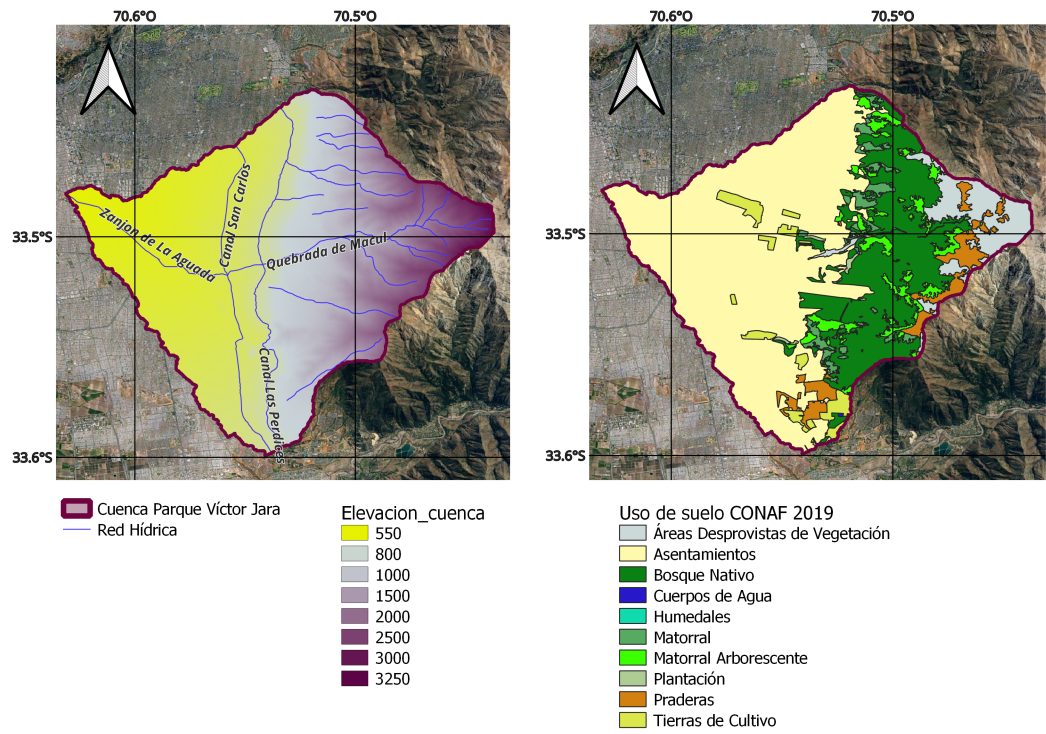


Figura 3.2: Mapa de elevaciones de la cuenca del Parque Intercomunal Víctor Jara y Uso de Suelo CONAF 2019.

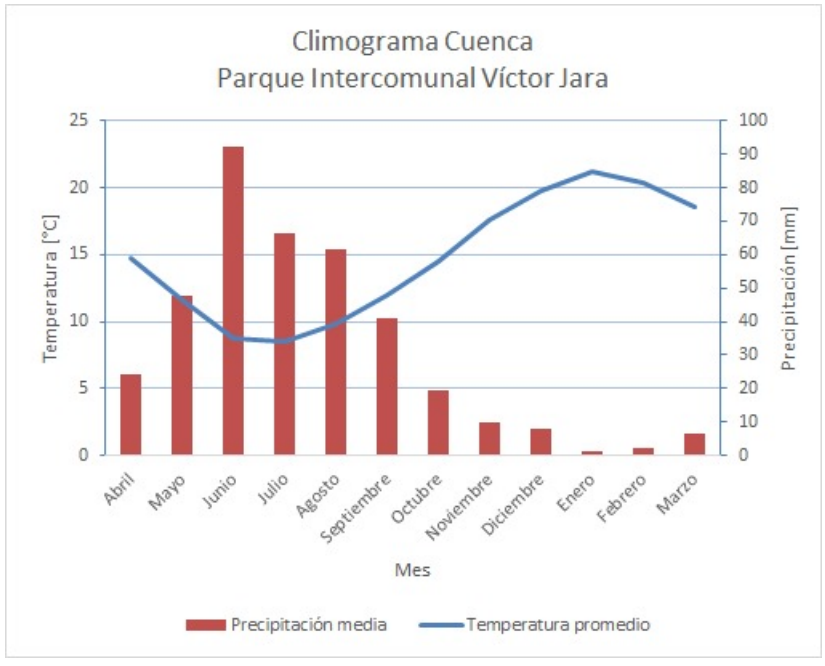


Figura 3.3: Climograma característico de la cuenca de estudio.



Tabla 3.3: Ubicación espacial estaciones meteorológicas útiles para la zona de estudio, con las variables medidas y vigencia de cada una.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]	Variables	Vigencia
Quebrada de Macul	33.502°S	70.514°O	950	Pp y T°	2003-2022
Antupirén	33.496°S	70.516°O	904	Pp	1979-2019
Quebrada Ramón	33.433°S	70.514°O	845	Pp y Q	2007-2022

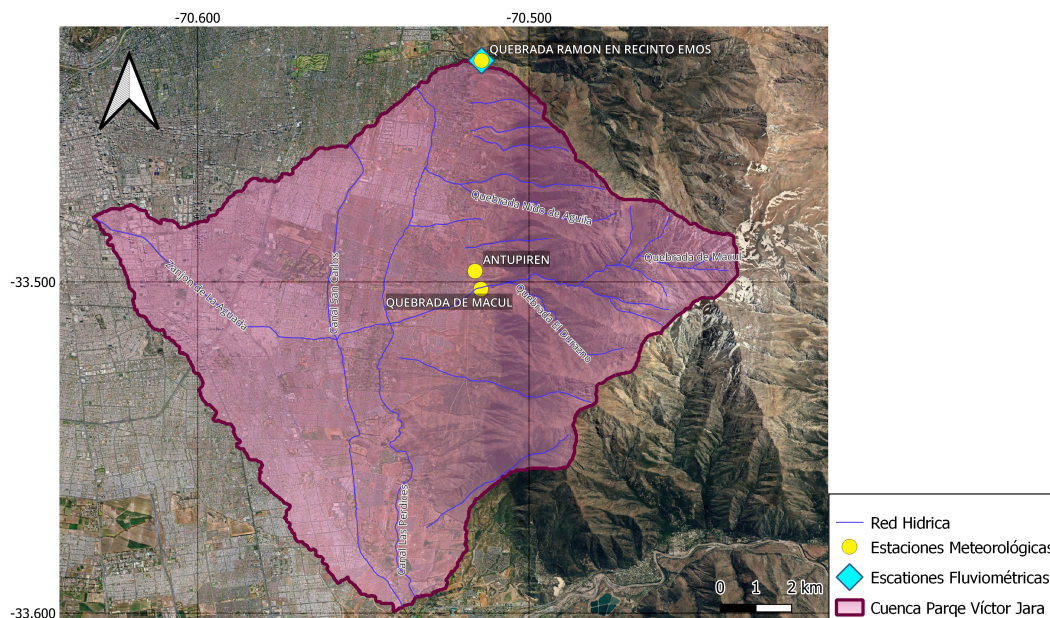


Figura 3.4: Localización estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas en el estudio. Fuente: Biblioteca Nacional de Chile. (2019). Estaciones Meteorológicas y Fluviométricas de Chile [Shapefile].

### 3.8. Parque Intercomunal Víctor Jara

El parque tiene una superficie de 14 hectáreas y una extensión de más de 4 km de largo. Su particularidad es que fue concebido como una solución para disminuir los riesgos de inundación en la zona, ya que su diseño permite la infiltración y almacenamiento temporal de agua en caso de lluvias intensas. Además, cuenta con senderos peatonales, ciclovías, espacios para la recreación y la práctica deportiva, a la vez que áreas de flora y fauna.

#### 3.8.1. Instalaciones

En la figura 3.5 se observan las diferentes estructuras que soportan la escorrentía del Zanjón de la Aguada, el cual desde la bajada de la Quebrada de Macul escurre como canal abierto con una capacidad de porteo de 252  $[m^3/s]$ , asociados a un período de retorno de 100 años según los estudios de la DOH, mientras que en la intersección de las calles Carmen con Isabel Riquelme comienza su escurrimiento por un tramo abovedado de capacidad 94  $[m^3/s]$ , que

corresponden aproximadamente al caudal de un período de retorno de 2 años (DOH, 2007). Este último, es referido como el punto de colapso del zanjón, donde comienzan a reportarse las inundaciones históricas de este cauce.

Esa es la causa que justifica la construcción del parque, cuyas estructuras están diseñadas para soportar y encauzar estas inundaciones hacia el fin del tramo abovedado. En la figura 3.6 se presentan los distintos tramos en las que se subdivide el proyecto Parque Inundable Víctor Jara. Se puede apreciar que el punto crítico de colapso del zanjón se encuentra en el límite de los tramos 2 y 3.

Para ilustrar de mejor forma el funcionamiento del parque, en las figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran las proyecciones de cómo se comportarían los distintos sectores y estructuras frente a las crecidas según los consignados períodos de retorno. En el tramo 1 (figura 3.7), se habilita un cauce abierto paralelo al original de modo que actúan en conjunto para soportar caudales asociados a períodos de retorno superior a 20 años. Este cauce paralelo transporta el agua hacia la laguna de retención ilustrada en la figura 3.9, de manera de actuar como regulador de la velocidad del caudal de entrada. Desde esta laguna escurre el agua hacia el estanque de acumulación el cual tiene función también hacer de disipador de crecidas, controlando la descarga que se tiene hacia el cauce abierto que es el parque (tramos 3, 4 y 6), al mismo tiempo que acumula los desbordes generados por el colapso de la bóveda.

La laguna tiene una superficie de 2,1 [há], un volumen de almacenamiento máximo de 78.000 [ $m^3$ ], y mantendrá un pequeño espejo de agua permanente con fines paisajísticos. Tiene además, la capacidad de regular un caudal máximo de 45 [ $\frac{m^3}{s}$ ], funcionando sólo para crecidas superiores a un período de retorno  $T=20$  años. El estanque tiene una superficie de 4,4 [há], un volumen máximo a almacenar de 120.000 [ $m^3$ ], y permanecerá seco normalmente, por lo cual el diseño incorpora su uso alternativo como recinto deportivo y recreativo, con elementos tales como canchas de fútbol, tenis, básquetbol y áreas verdes. Ambos elementos de regulación ocupan sectores del parque limitados por pretilos de tierra con taludes suaves de manera de integrarlos al diseño paisajístico del parque. La alimentación a los elementos de regulación se efectúa por un parque de 700m de largo y 30m de ancho ubicado al sur del Zanjón que nace en un vertedero de crecidas inmediatamente aguas abajo de V. Mackenna.

La solución del parque además proyecta una obra de conducción hidráulica paralela al tramo abovedado desde calle Carmen hasta Club Hípico [tramos 3, 4, 5 y 6], superficial en algunos tramos y subterránea en otros, que permite portear el caudal laminado desde las lagunas conjuntamente con el caudal aportado como excedente de la bóveda. Esta obra conducirá un caudal de 110  $\frac{m^3}{s}$  para una crecida de TR=100 años de período de retorno y presentará un diseño armonioso con el parque. El diseño de los tramos abiertos, contempla diferentes niveles de inundación, para crecidas entre 2 y 100 años de período de retorno y se ha limitado su escurrimiento a velocidades máximas de 2  $\frac{m}{s}$ , para evitar el deterioro de las áreas verdes y por motivos de seguridad.





Figura 3.5: Ubicación punto de colapso cauce Zanjón de La Aguada. DOH 2023.



Figura 3.6: Subdivisión por tramos del proyecto Parque Inundable Víctor Jara. DOH 2023.

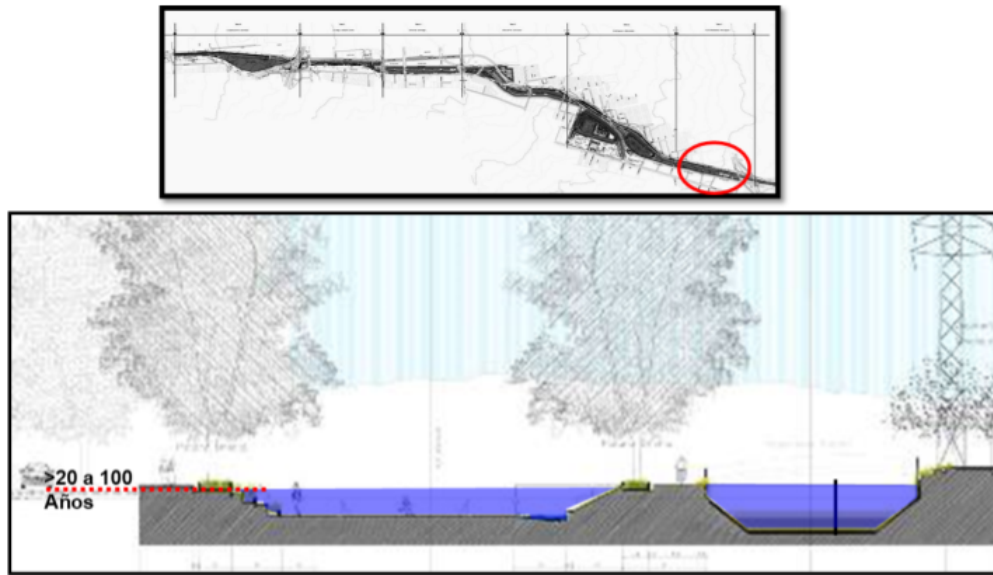


Figura 3.7: Tramo 1. Se habilita cauce abierto paralelo al original de modo que actúan en conjunto para soportar caudales superiores a un período de retorno superior a 20 años y hasta 100 años. DOH 2023.

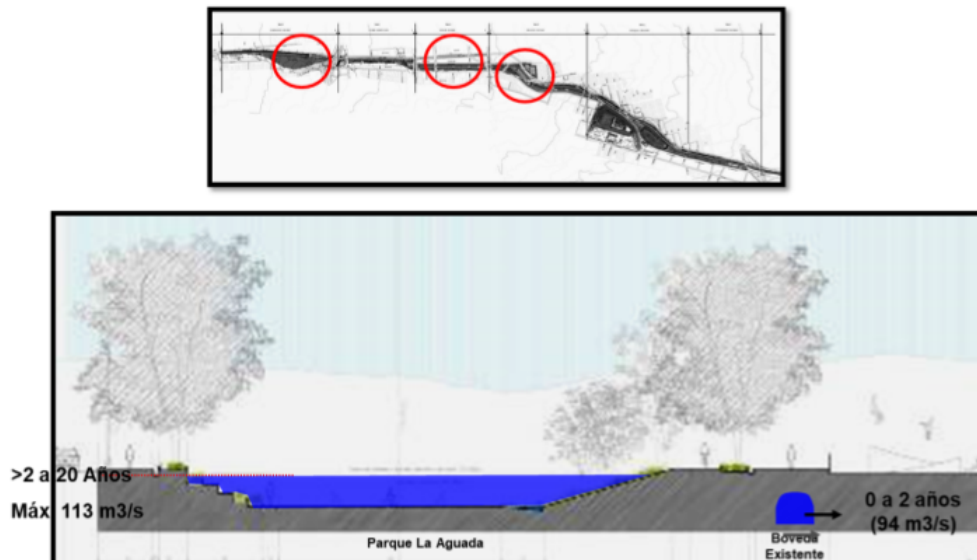


Figura 3.8: Tramos 3, 4 y 6, funcionamiento del parque como canal en simultáneo con cauce abovedado preexistente. Para caudales con período de retorno menor a 2 años sólo funciona bóveda; en caso contrario, se inunda el parque. DOH 2023.

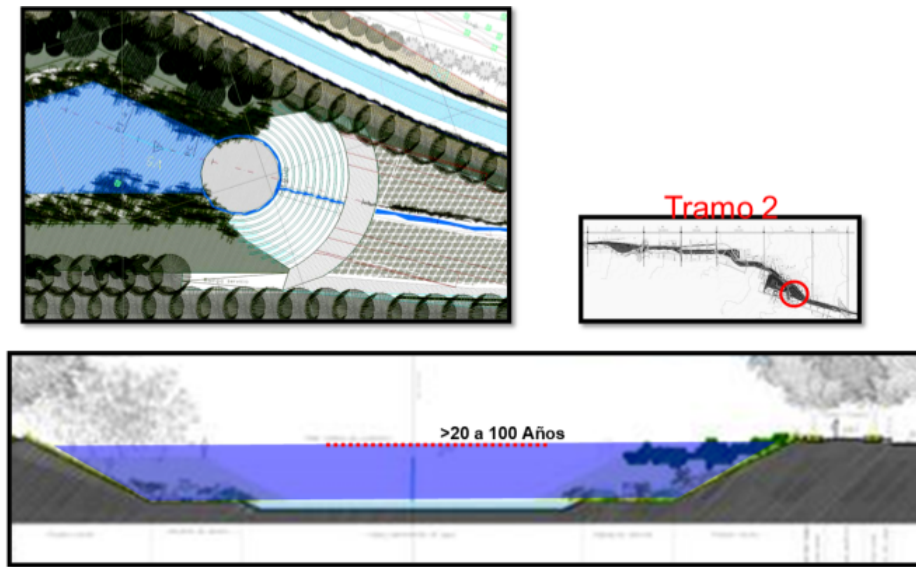


Figura 3.9: Laguna de retención, entra en acción para sostener caudales de períodos de retorno entre 20 y 100 años. Su principal función es disminuir la velocidad de entrada del caudal al parque. DOH 2023.

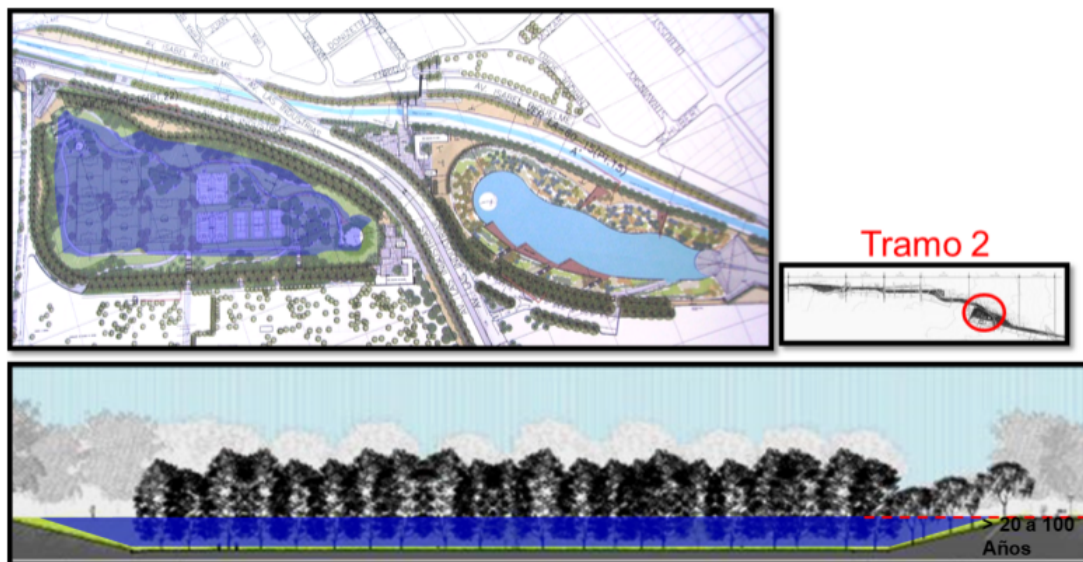


Figura 3.10: Estanque de retención, entra en acción para sostener caudales de períodos de retorno entre 20 y 100 años. DOH 2023.

# Capítulo 4

## Metodología

En este capítulo se describen los enfoques empleados para la estimación tanto de la precipitaciones históricas y futuras, como de la escorrentía superficial y caudales de crecida asociados a dichos eventos de tormenta.

### 4.1. Precipitaciones

#### 4.1.1. Estimación Período Histórico

Para la estimación de precipitaciones del período comprendido entre los años 1990 y 2020 (a partir de ahora período histórico), se utilizan los valores extraídos del producto grilla-do CR2MET 2.5. Su uso se justifica en el hecho que dentro de la zona de estudio sólo se encuentran dos estaciones meteorológicas y ubicadas a muy corta distancia una de la otra (menor a 1 km), lo que impide la generación de una distribución de precipitación fiable a partir únicamente de estas fuentes de información. Asimismo, el producto CR2MET 2.5 utiliza estos valores observacionales para el estudio del clima e hidrología regional, por lo que la información de las estaciones está implícitamente incorporada.

La cuenca del Parque Inundale Víctor Jara siente la influencia de 20 pixeles de este producto en distintas proporciones, debido a la porción de pixel que se contiene dentro del área de estudio, y por ende, se considera el aporte de precipitación de cada pixel según esa proporción. Este cálculo se puede ver graficado en las figuras 4.1 y 4.2. Luego, la precipitación unificada de la cuenca queda definida por la ecuación 4.1

$$P_t = \sum k_{i,j} \cdot P_{i,j}^t \quad (4.1)$$

Donde  $P_t$  es la precipitación en el instante  $t$  de la serie temporal;  $k_{i,j}$  es la porción de área de la cuenca contenida en el pixel  $(i,j)$ ;  $P_{i,j}^t$  es la precipitación en el instante  $t$  obtenida para el pixel  $(i,j)$  de la grilla.

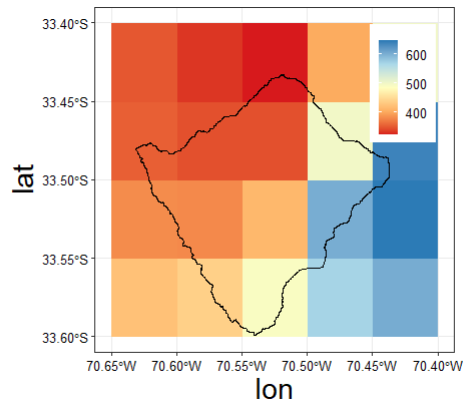


Figura 4.1: Precipitación promedio anual del período histórico, estimada para cada pixel del producto grillado CR2MET.

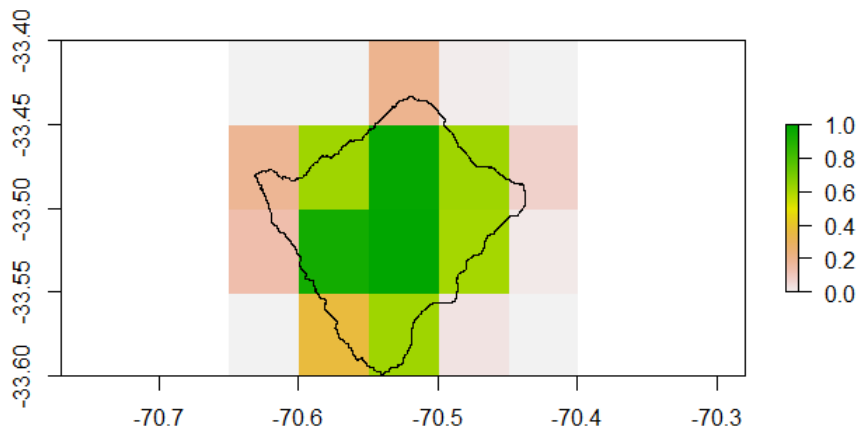


Figura 4.2: Porción de cada pixel del producto grillado que aporta a la precipitación total de la cuenca.

Para este estudio, se contó con la información del producto CR2MET ya escalada y con su respectiva corrección de sesgo, de manera que se cuenta con valores de precipitación con una distribución temporal tri-horaria (DGA, 2022).

#### 4.1.2. Evaluación CR2MET

Para validar los resultados del producto grillado CR2MET, se calcula el valor del coeficiente  $R^2$  para la correlación entre la precipitación observada por la estación Antupirén durante los últimos 30 años, con el pixel del producto CR2MET que abarca la zona donde se encuentra dicha estación. Si esta correlación es buena, es decir, si el valor de  $R^2$  es mayor a 0,8, entonces se considera que es pertinente la utilización del producto grillado para la estimación de precipitaciones en el período histórico para la cuenca en estudio. En las figuras 4.3 y 4.4 se



presentan las correlaciones calculadas para las series de precipitación acumulada mensual y la precipitación máxima anual en el período histórico entre las observaciones y estimaciones. Se observa que en ambos casos la pendiente de la línea de tendencia es cercana a 1, y que el coeficiente  $R^2$  también tiene valores más que aceptables para validar la correlación.

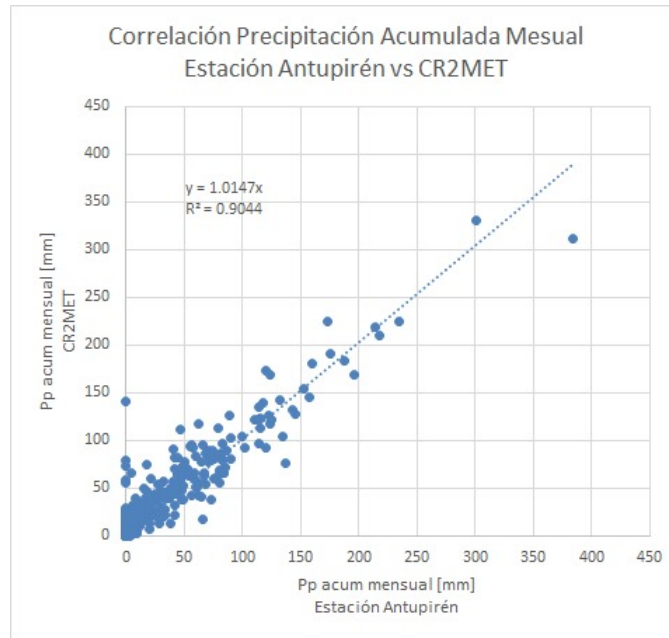


Figura 4.3: Correlación precipitación acumulada mensual entre valores observados por la estación Antupirén y los estimados por el pixel que abarca esta estación del producto grillado CR2MET.

### 4.1.3. Estimación Precipitaciones Futuras

Para la estimación de las precipitaciones del futuro cercano (2030-2060) se utilizan los datos previamente escalados a la zona de estudio con la misma resolución espacial y horaria de CR2MET (5x5km y tri-horarios) de los cuatro GCM identificados en la sección 2.1.1.

Para el cálculo de estas estimaciones se elaboran análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas en 24h durante el período histórico, de manera de obtener valores de precipitación para los distintos períodos de retorno que serán considerados en este estudio: 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

El cálculo del análisis de frecuencias de precipitaciones máximas anuales es un procedimiento crucial en hidrología para comprender y cuantificar los eventos extremos de lluvia. La metodología implica los siguientes pasos:

- Recopilación de datos históricos de precipitación diaria. La serie temporal debe ser lo suficientemente larga para capturar variaciones a lo largo del tiempo. En este caso se utilizan series de 30 años.

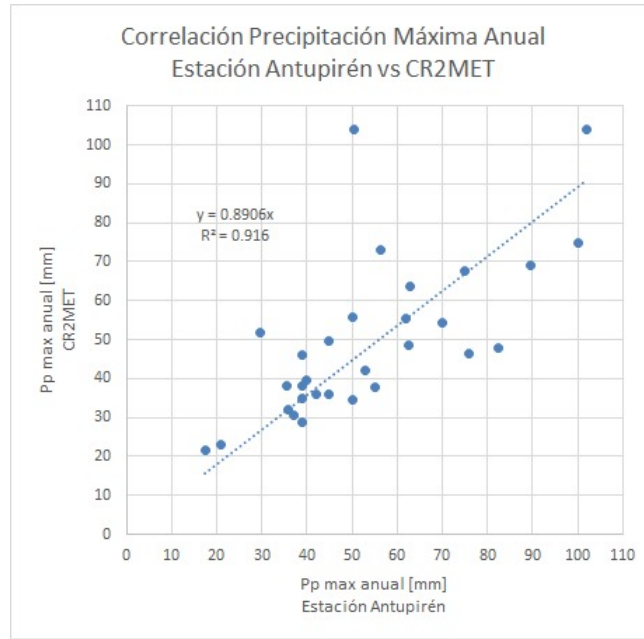


Figura 4.4: Correlación precipitación máxima anual entre valores observados por la estación Antupirén y los estimados por el pixel que abarca esta estación del producto grillado CR2MET.

- Se identifican y seleccionan los eventos de precipitación máxima anual en la serie temporal. Estos eventos representan los peaks de intensidad de lluvia en un año.
- Se ajustan diversas distribuciones de probabilidad. Para este estudio se ajusta la distribución Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson y Gumbel a los datos de eventos extremos. El ajuste se realiza mediante métodos estadísticos para encontrar la distribución que mejor se adapte a los datos.
- A partir de la distribución ajustada, se calculan los cuantiles para diferentes períodos de retorno. Estos cuantiles representan la magnitud de la precipitación que se espera que ocurra con la frecuencia especificada.
- Se realiza una validación del modelo ajustado utilizando la técnica de la bondad de ajuste o test de  $\chi^2$ . Además, se evalúan los resultados considerando la incertidumbre asociada a la estimación de eventos extremos.

Así entonces, se elabora el análisis de frecuencias del período histórico para CR2MET y los GCM, a la vez que para estos últimos también se realiza para el período futuro 2030-2060. Paralelamente, para el caso de los GCM, se establece el resultado del análisis de frecuencias del período histórico como resultado base, y se calcula un factor de cambio de los resultados obtenidos para los distintos períodos de retorno como indica la ecuación 4.2.

$$f_{i,j} = \frac{P_{i,j}^F}{P_{i,j}^H} \quad (4.2)$$

Donde:

- $f_{i,j}$  es el factor de cambio futuro del GCM  $i$  en TR  $j$
- $P_{i,j}^F$  es la precipitación calculada para el GCM  $i$  en el período futuro para TR  $j$
- $P_{i,j}^H$  es la precipitación calculada para el GCM  $i$  en el período histórico para TR  $j$
- $i$  son los GCM: IPSL-CM5A-LR; CCSM4; MIROC-ESM; CSIRO-MK-3.6.
- $j$  son los períodos de retorno utilizados en el estudio: 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

Una vez obtenido el factor de cambio, se ponderan los valores del análisis de frecuencias de los datos de referencia, obtenidos de CR2MET en el período histórico, por el respectivo factor de cada GCM, y de esta manera queda determinada la variabilidad esperada por efectos de cambio climático a los eventos de tormenta según indica la variación de cada GCM. Esto queda resumido en la ecuación 4.3

$$P_{i,j}^F = P_j^{CR2MET} \cdot f_{i,j} \quad (4.3)$$

Donde  $P_{i,j}^F$  es la precipitación futura para el modelo  $i$  en TR  $j$  adoptada para la modelación de escorrentía futura;  $P_j^{CR2MET}$  es la precipitación extraída de CR2MET en TR  $j$ ;  $f_{i,j}$  es el factor de corrección futuro del GCM  $i$  en TR  $j$ .

## 4.2. Escorrentía

### 4.2.1. Modelo HEC-HMS

La estimación de la escorrentía y el caudal generado en el Zanjón de la Aguada es realizada mediante el software HEC-HMS. Este programa requiere calibrar algunos parámetros importantes para la determinación de la escorrentía, los que son: el tiempo de retardo, la curva número, la abstracción inicial, el caudal inicial, el coeficiente de recesión y el coeficiente de relación al caudal base.

Para calibrar estos parámetros se requiere información fluviométrica, pero como se menciona en la sección 3.7 es inviable para la cuenca en estudio debido a la inexistencia de estaciones fluviométricas en ella. Por esta razón, la calibración se realizó con una estación fluviométrica de la cuenca aledaña: La estación Quebrada de Ramón. La cuenca aportante a dicha estación se considera similar hidráulicamente a la cuenca del Parque Inundable Víctor Jara.

Para ello, se selecciona un episodio de tormenta del período histórico, revisando la información de precipitación disponible y esta información se ingresa al modelo HEC-HMS. La modalidad del programa permite hacer corridas de simulación y optimización, por lo que en primer lugar se simula y en base a esta simulación se corre la optimización. La función objetivo de optimización busca minimizar el error entre las diferencias de caudal al instante del máximo y el volumen de agua generada por la crecida. Esto se realiza iterativamente hasta encontrar



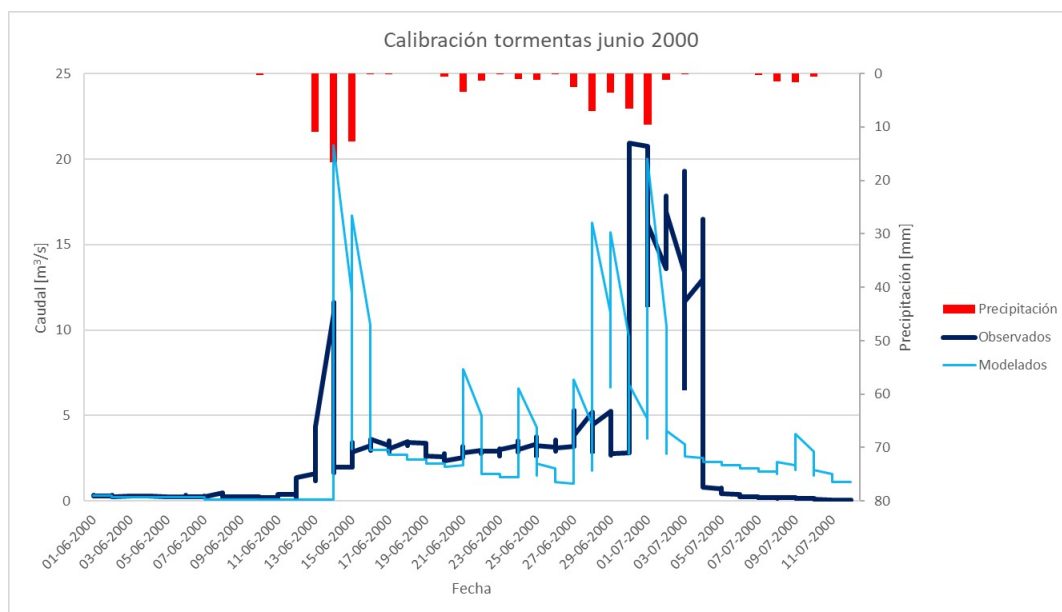


Figura 4.5: Calibración Tormentas de junio de 2000 en la Quebrada de Ramón.

Tabla 4.1: Clasificación de clases de humedad para el método de abstracción de lluvia SCS. Valores de Lluvia Antecedente de los 5 días previos al evento de precipitación en mm.

Grupo AMC	Estación Inactiva (otoño-invierno)	Estación de Crecimiento (primavera-verano)
I	Menos de 12,7	Menos de 35,6
II	12,7 a 27,9	35,6 a 53,3
III	Sobre 27,9	Sobre 53,3

la mejor combinación de valores para representar la crecida. En la figura 4.5 se muestra el resultado de la calibración de las tormentas generadas en junio del 2000.

Una vez calibrados los parámetros base del modelo para la cuenca de la Quebrada de Ramón, se suponen como válidos para la cuenca del Parque Intercomunal Víctor Jara.

Para el caso de la curva número, esta se determinó utilizando la cobertura de suelo caracterizada por CONAF en 2019, presentada en la figura 3.1 y tabla 3.2, y su valor correspondiente de Curva Número de la SCS. El resultado obtenido mediante este método fue validado con el producto CN30-CL, mediante el cual se obtuvo un valor semejante para la CN en la cuenca en estudio.

La curva número adopta distintos valores dependiendo de los antecedentes de humedad previos al evento de precipitación que se busca modelar. La SCS define 3 clases de humedad antecedente (AMC por sus siglas en inglés) dependientes de la estación del año en que ocurra el evento. Estos se presentan en la tabla 4.1.

Con la curva número calculada es posible obtener el valor de la abstracción inicial siguiendo la metodología indicada en el manual del software HEC-HMS, básicamente definido por la ecuación 4.4.

$$I_a = 0,2 \cdot \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right) [mm] \quad (4.4)$$

El tiempo de retardo, o *lag time*, se calcula siguiendo la ecuación 4.5, obteniendo el tiempo de concentración con la fórmula de Kirpich, válida para la cuenca en estudio ya que sus restricciones son para cuencas mayores a 200 [há] y de zonas urbanas.

$$t_r = 0,6 \cdot t_c \quad (4.5)$$

$$t_c = 0,95 \cdot \left( \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}$$

Donde  $t_r$  es el *lag time* o tiempo de retardo [hr];  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca [hr];  $L$  es el largo del cauce [km];  $\Delta H$  es la diferencia de alturas entre el punto más elevado y el punto de salida de la cuenca [m].

Por otro lado, es importante la consideración que se hizo respecto del aporte nival al flujo generado por las altas precipitaciones. Al realizar el estudio de la altura de línea de nieves con información que proporciona el portal Observatorio Andino (elaborado por CR2), desde el año 2000 a la actualidad, se comprueba que la cobertura nival máxima en la cuenca es menor al 2% durante este período como se aprecia en la figura 4.6, lo cual para efectos del aporte o disminución de la escorrentía se considera despreciable para este estudio, considerando el supuesto de que, según el IPCC, las temperaturas en la zona tenderán a aumentar, y con ello el aporte nival tenderá a disminuir.

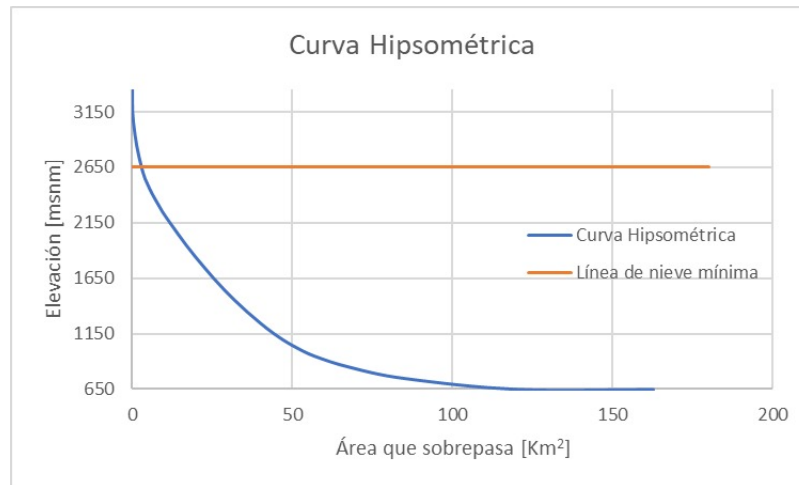


Figura 4.6: Curva hipsométrica y altura mínima de la línea de nieve en el período histórico según portal Observatorio Andino.

#### 4.2.2. Validación Modelo

Una vez realizada la calibración del modelo con los parámetros de la Quebrada de Ramón, se procede a validar el mismo en la cuenca del Parque Inundable, mediante la simulación de

los tres eventos de precipitación más importantes de cada año para los 30 años del período histórico, es decir, 90 simulaciones de escorrentía que abarca desde los dos días previos al máximo de precipitación anual, hasta dos días después de este máximo.

El modelo será válido, siempre y cuando los resultados arrojados en la modelación para caudales sobre  $94 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  coincidan con las fechas de inundación efectiva de las riberas aledañas al zanjón de la aguada en la intersección de las calles Carmen con Isabel Riquelme. Además, se considera la información recopilada de los estudios del Parque Inundable, donde se señala que los caudales adoptados para TR2 y TR100 fueron de  $94$  y  $252 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  respectivamente, por lo que se espera que los valores calculados mantengan esa lógica.

Para ello, se realiza el análisis de frecuencias de los caudales generados mediante el modelo, reconociendo los caudales máximos anuales generados del análisis de los tres eventos de precipitación estudiados anualmente, para la comparación de los valores obtenidos de este análisis con los valores señalados en los estudios del Parque Inundable. En la figura 4.7 se muestran algunos ejemplos de estas simulaciones.

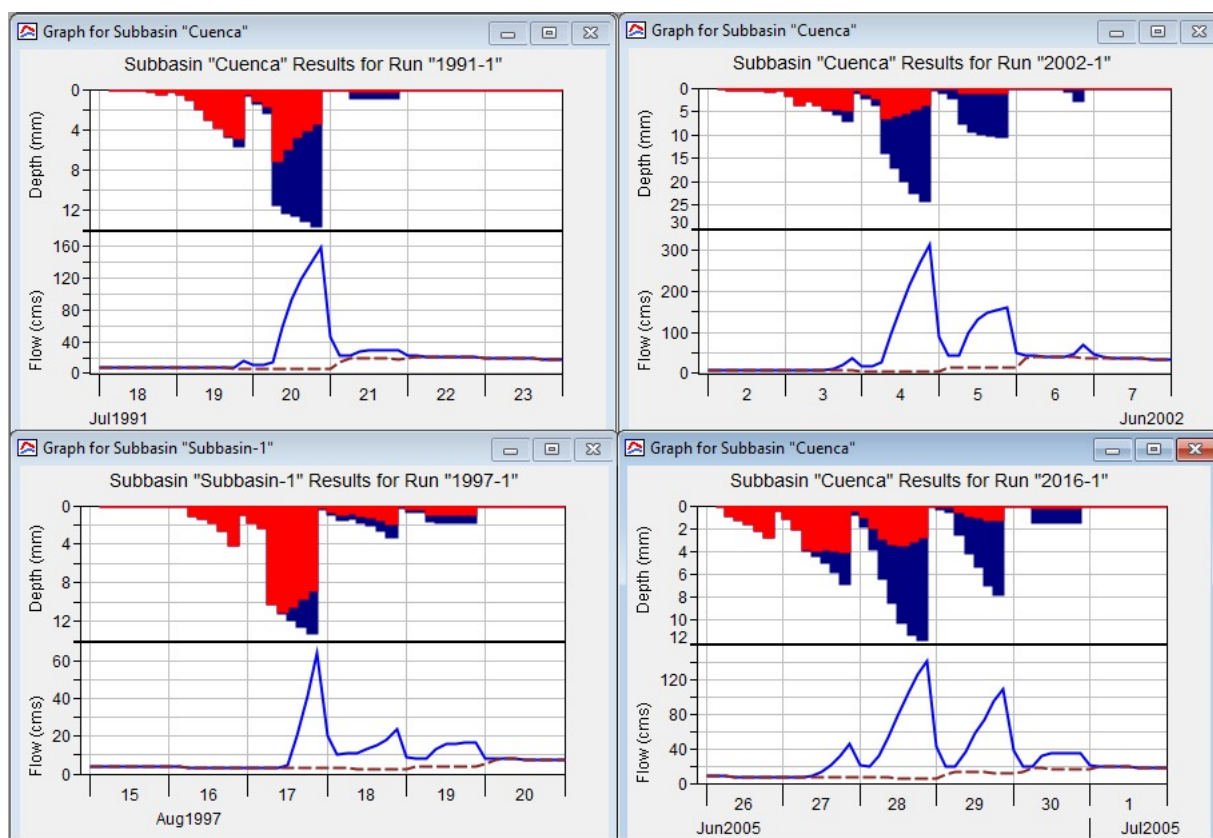


Figura 4.7: Validación modelo HEC-HMS: Simulación de escorrentía principales eventos de precipitación en la cuenca del Zanjón de la Aguada. En la imagen eventos de Julio 1991 (TR5), Agosto 1997 (TR5), Junio 2002 (TR100), y Abril 2016 (TR5).

### 4.3. Estimación Caudales Futuros

Para la estimación de las futuras crecidas asociadas a las tormentas obtenidas del análisis de frecuencias de precipitaciones futuras, se analiza la distribución tri-horaria de las principales tormentas del período histórico. Esto se realiza de la siguiente manera:

- Se seleccionan los eventos de máxima precipitación cada año durante los 30 años del período.
- Se define la condición de humedad antecedente al evento de precipitación, sumando las precipitaciones acumuladas de los 5 días anteriores a cada evento, para posteriormente promediar los valores obtenidos entre los 30 años y definir una humedad antecedente estándar.
- Se determina la distribución tri-horaria de precipitaciones de cada evento.
- Se calcula un promedio de precipitación cada tres horas para eventos de tormenta, y con ello se define la serie temporal estándar de estos eventos. Es decir, la porción de precipitación que cae en cada intervalo de tiempo en promedio.

Luego, con la serie tri-horaria definida para un día promedio de tormenta, y considerando las precipitaciones consignadas para cada período de retorno, calculados en la sección 4.1.3, se incorporan estos valores para la modelación en el software HEC-HMS y así obtener los caudales de salida de la cuenca, para realizar la comparación con la capacidad de las instalaciones del parque.

La evaluación de la suficiencia de la infraestructura del parque para el caso de los caudales es directa: Se comparan los valores de caudal máximo obtenidos de la simulación para cada TR, y se define si superan o no los  $252 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  que soporta la canalización existente. En cuanto a las obras de acumulación de agua, se calcula el volumen de agua que ingresa a estas obras como el caudal que sobrepasa los  $139 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ . Este valor corresponde a los  $94 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  de capacidad del tramo abovedado, el cual es el limitante donde comienza a inundarse las estructuras, sumado a los  $45 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  que es capaz de regular la laguna de inundación. Luego, el volumen calculado es comparado con la capacidad nominal del parque.

Así entonces, se resuelve la incógnita que motiva esta investigación, sobre si el Parque Inundable es o no suficiente para soportar las crecidas del Zanjón de la Aguada en el futuro cercano (2030-2060).

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Precipitación

En la presente sección se exponen los principales resultados obtenidos de los procesos de estimación de precipitaciones históricas y futuras, con los distintos modelos y productos utilizados en este estudio.

#### 5.1.1. Período Histórico

Como se detalla en el capítulo anterior, se realiza la unificación de las precipitaciones en la cuenca sumando el aporte de cada pixel a la precipitación total acumulada en la zona de estudio. En la figura 5.1 se presenta la serie de tiempo completa de precipitaciones diarias en la cuenca en el período histórico, mientras en la figura 5.2 se exhiben los máximos de precipitación diaria anual para el producto grillado CR2MET y los cuatro GCM utilizados en este proyecto: CCSM4, CSIRO MK-3.6, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM.

Con las series de precipitación de los GCM se realiza el análisis de frecuencias del período histórico, tanto para las obtenidas de CR2MET como de los GCM según lo precisado en la metodología. Al realizar este procedimiento, se obtienen los valores de precipitación para períodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años de las cinco series de precipitación, los que se presentan en la tabla 5.1. Cabe destacar, que la selección de las distribuciones de probabilidad se rigen por los resultados del test  $\chi^2$ , y por el ajuste gráfico de las curvas de probabilidad que se presentan en anexos.

#### 5.1.2. Período Futuro

Así pues, se abre paso a la estimación de precipitaciones futuras. En la figura 5.2 se presenta la serie temporal continua de precipitaciones estimadas por los GCM para el período futuro,

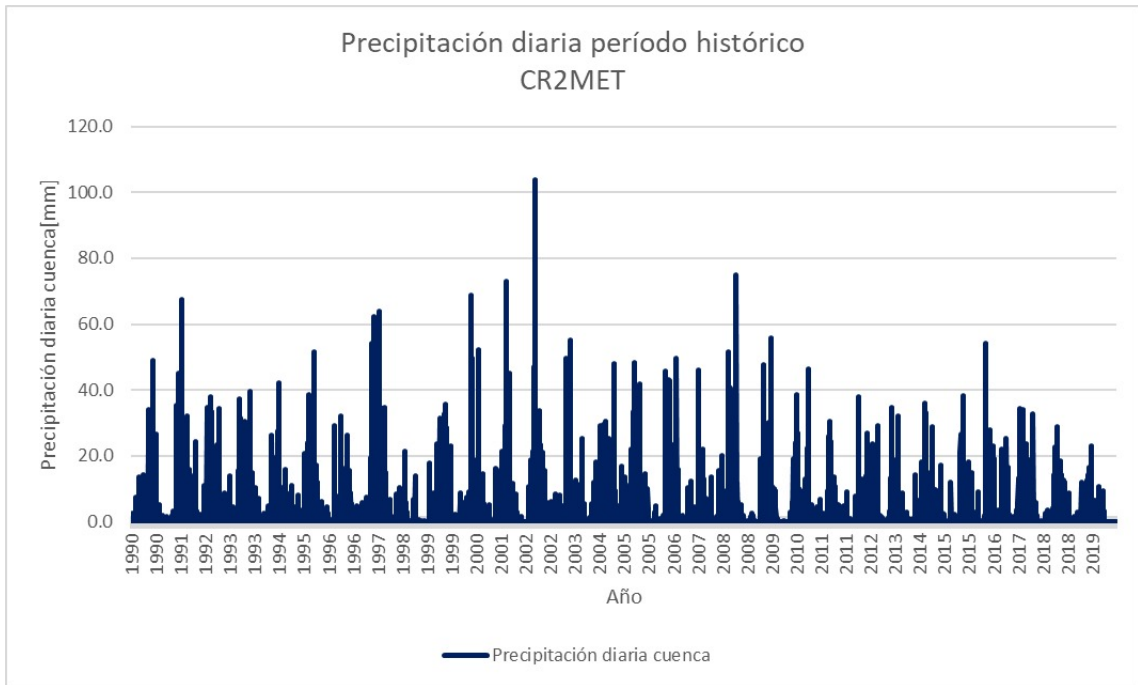


Figura 5.1: Serie de precipitaciones diarias para la cuenca en estudio. Período histórico según CR2MET.

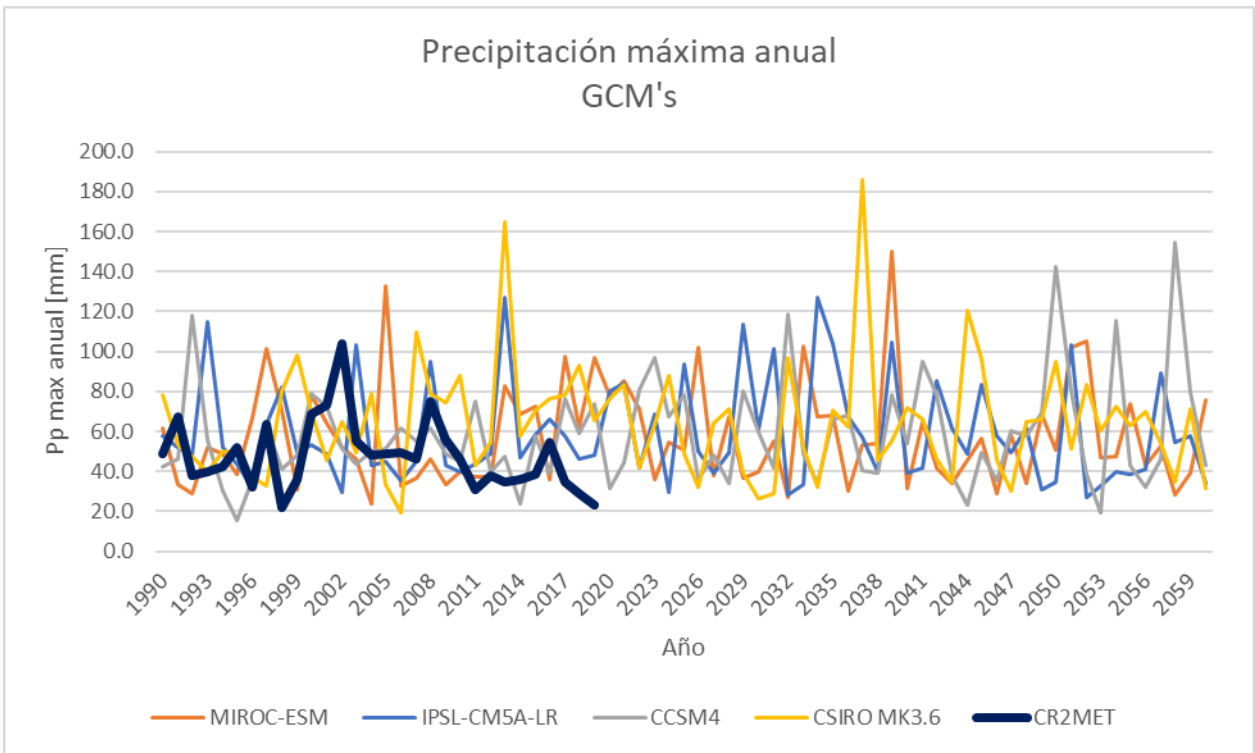


Figura 5.2: Serie de precipitaciones máximas diarias anuales para la cuenca en estudio. Período histórico y futuro, según CR2MET y los GCMs utilizados.

Tabla 5.1: Resumen valores adoptados del análisis de frecuencias para las cinco series precipitación en [mm], con sus respectivas distribuciones de probabilidad en el período histórico, para TR de 2 a 200 años.

<b>TR [años]</b>	$P_{exc}$ [%]	<b>CR2MET Log-Normal</b>	<b>CCSM4 Gumbel</b>	<b>CSIRO Log-Normal</b>	<b>IPSL Gumbel</b>	<b>MIROC Gumbel</b>
2	50	44,83	50,49	61,09	54,36	53,64
5	20	60,39	70,37	87,21	78,47	79,99
10	10	70,58	83,53	105,07	94,44	97,44
25	4	83,35	100,16	128,15	114,61	119,48
50	2	92,79	112,50	145,69	129,58	135,84
100	1	102,20	124,75	163,50	144,43	152,07
200	0,5	111,64	136,95	181,70	159,23	168,24

mientras en la tabla 5.2 se exponen los valores adoptados del análisis de frecuencia del período futuro cercano.

Tabla 5.2: Resumen valores adoptados análisis de frecuencias de precipitación en [mm]. Período futuro cercano (2030-2060).

<b>TR [años]</b>	<b>CCSM4 Log-Normal</b>	<b>CSIRO Log-Normal</b>	<b>IPSL Gumbel</b>	<b>MIROC Gumbel</b>
<b>2</b>	55,65	57,85	54,93	53,05
<b>5</b>	84,53	84,46	82,78	80,94
<b>10</b>	105,2	102,96	101,22	99,41
<b>25</b>	132,84	127,16	124,52	122,74
<b>50</b>	154,43	145,73	141,80	140,05
<b>100</b>	176,83	164,74	158,96	157,23
<b>200</b>	200,16	184,29	176,05	174,35

Luego, los factores de corrección calculados para cada GCM son presentados en la tabla 5.3. Los nombres de los modelos en estas tablas fueron abreviados para una mejor presentación.

Como resultado de la proyección de precipitaciones se presenta en la figura 5.3 un gráfico que muestra el rango de variabilidad esperada para los eventos de tormenta en el período futuro en base a los valores presentados en la tabla 5.4, en donde aparecen los valores de precipitación observada, ponderados por los factores calculados para cada GCM y cada TR, los que serán utilizados para la modelación de la escorrentía en el período futuro. Adicionalmente se incluye una columna con los valores observados por CR2MET en el período histórico, a modo de referencia..

## 5.2. Escorrentía

En la presente sección se exponen los principales resultados obtenidos de los procesos de estimación de escorrentía histórica, la calibración del modelo HEC-HMS y su validación, así

Tabla 5.3: Factor de corrección de GCMs para ponderación de precipitaciones futuras.

TR [años]	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
<b>2</b>	1,11	0,95	1,01	0,99
<b>5</b>	1,22	0,97	1,05	1,01
<b>10</b>	1,28	0,98	1,07	1,02
<b>25</b>	1,35	0,99	1,09	1,03
<b>50</b>	1,39	1,00	1,09	1,03
<b>100</b>	1,43	1,01	1,10	1,03
<b>200</b>	1,47	1,01	1,11	1,04

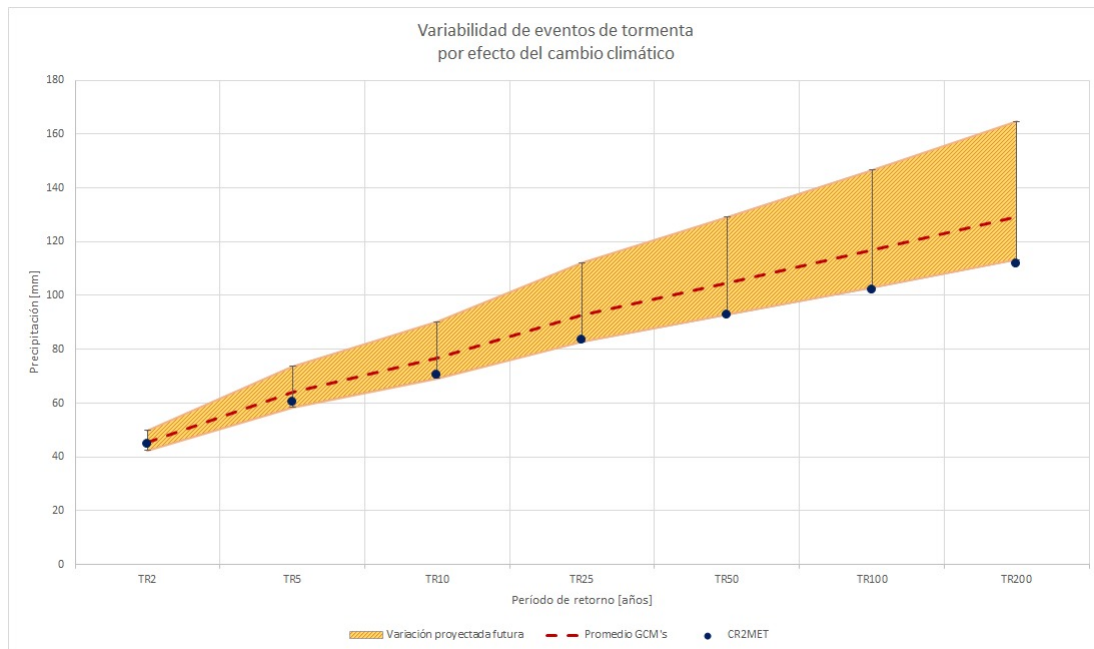


Figura 5.3: Proyecciones para eventos de tormenta en el período futuro por efecto del cambio climático para cada TR.

Tabla 5.4: Valores de precipitación futura adoptados en base a la ponderación de las observaciones en [mm].

Período de Retorno	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC	CR2MET
TR2	49,8	42,5	45,3	44,3	44,83
TR5	73,6	58,5	63,7	61,1	60,39
TR10	90,3	69,2	75,7	72,0	70,58
TR25	112,2	82,7	90,6	85,6	83,35
TR50	129,2	92,8	101,5	95,7	92,79
TR100	146,6	103,0	112,5	105,7	102,2
TR200	164,5	113,2	123,4	115,7	111,64



como los caudales estimados para la situación futura.

### 5.2.1. Parámetros base de modelación

Gracias a la utilización del producto grillado CN30-CL, y la corroboración de los resultados obtenidos con la cobertura de suelo de CONAF (tabla 3.2), y la tabla de asignación de curva número del SCS, se definieron los valores de curva número correspondientes a los respectivos antecedentes de humedad. Con los valores de CN determinados es posible calcular el valor de abstracción inicial (Ia) asociada a cada curva número según lo expuesto en la metodología. Estos resultados se exhiben en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Valores adoptados para curva número según antecedentes de humedad AMC.

Humedad Antecedente	AMC I	AMC II	AMC III
CN [-]	61,8	78,8	89,6
Ia [mm]	31,5	13,7	5,9

### 5.2.2. Período histórico

La simulación de caudales del período histórico se realiza a modo de validación del modelo, y esta es efetuada a los 3 eventos de mayor precipitación diaria anual de cada año. Examinando los resultados obtenidos, se determina la serie de máximo caudal instantáneo anual, los cuales son consignados en la tabla C.2 del anexo, y en la figura 5.4.

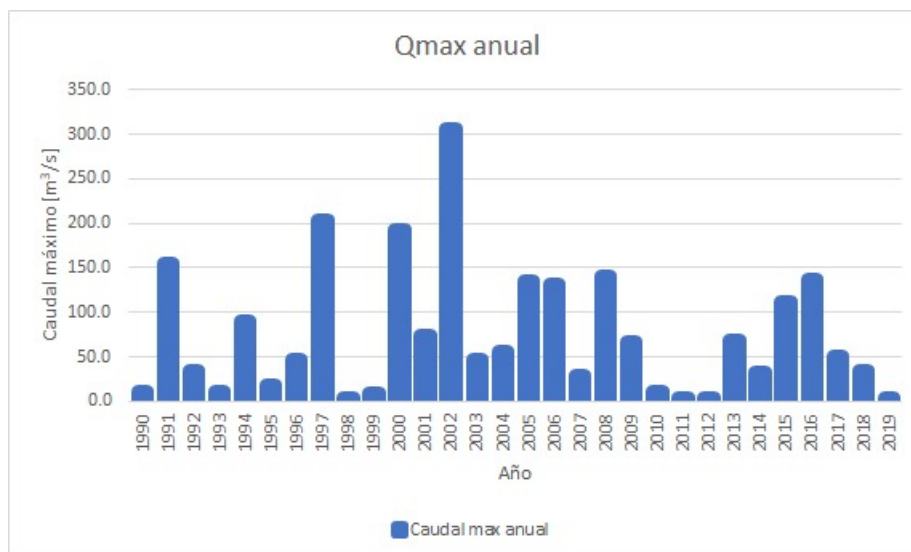


Figura 5.4: Caudal máximo anual modelado para el período histórico en la cuenca del Parque Inundable Víctor Jara.

Así entonces, se realiza un análisis de frecuencias de estos resultados con el fin de validarlos comparándolos con los valores nominales de los informes de impacto ambiental del Parque

Intercomunal Víctor Jara. Se observa en la tabla 5.6 que los valores que se adoptan de la distribución de probabilidad Gumbel varían considerablemente respecto de los valores nominales de caudal en la cuenca: un 17% de subestimación en TR2, a la vez de un 43% de sobreestimación para TR100. Estos resultados tan dispares se justifican con el período de tiempo que se consideró en el estudio, ya que el proceso de diseño del parque comenzó el año 2007, mientras que el presente proyecto tiene como año límite el 2020, significando 13 años posteriores de estadística que modifican considerablemente los resultados. También se debe considerar que en este estudio se estiman las precipitaciones mediante el producto grillado CR2MET para obtener valores representativos de la cuenca completa, a diferencia del estudio del parque donde se utilizaron métodos indirectos para distribuir la precipitación desde las observaciones de las estaciones meteorológicas.

Tabla 5.6: Valores adoptados del análisis de frecuencias de caudales máximos anuales en el período histórico. Distribución Gumbel. Períodos de retorno de 2 a 200 años. Se incluye además valores nominales de estudios del Parque Intercomunal Víctor Jara para TR2 y TR100.

Período de Retorno	Q modelado [ $\frac{m^3}{s}$ ]	Q nominal [ $\frac{m^3}{s}$ ]
TR2	77	94
TR5	153	-
TR10	203	-
TR25	267	-
TR50	314	-
TR100	361	252
TR200	407	-

En la tabla 5.7 se presentan referencias de las principales inundaciones históricas del sector de la capital donde se emplaza el parque, comparadas con los caudales modeladas en este estudio.

### 5.2.3. Futuro cercano

Considerando los valores de precipitación futura estimados y corregidos en la sección 5.1.2, se realiza la simulación de escorrentía de los eventos de tormentas para los distintos períodos de retorno considerados en este estudio y consignados en la tabla 5.4, de manera de obtener los caudales generados por estos eventos de tormenta para cada período de retorno y según cada GCM. Los resultados obtenidos de dichas simulaciones se presentan en la tabla 5.8

Y de manera análoga a lo hecho para las precipitaciones, se presenta la figura 5.5 donde se grafica la variabilidad proyectada de los caudales por efecto de cambio climático, respecto de los caudales simulados para el período histórico.

Además, se presenta la tabla 5.9 donde se muestra el volumen de agua que desborda del cauce proyectado para cada GCM, y la figura 5.6 donde se comparan estos volúmenes con la

Fecha de desborde	Link noticia	Fecha desborde modelado	Caudal modelado
17-21 de junio 1997	<a href="#">Así fue la tormenta de 1997 que según la NASA podría ser igualada con este temporal - El Dínamo</a>	21 de junio 1997	203 $[\frac{m^3}{s}]$
14 de junio 2000	<a href="#">Grave, entre Santiago y Concepción - EMOL</a>	14 de junio 2000	193 $[\frac{m^3}{s}]$
4 de junio 2002	<a href="#">Chile azotado por fuertes lluvias - BBC Mundo</a>	4 de junio 2002	306 $[\frac{m^3}{s}]$
27 de agosto 2005	<a href="#">Desborde del Zanjón de la Aguada complica a locatarios del persa Bío Bío - EMOL</a>	29 de agosto 2005	135 $[\frac{m^3}{s}]$
17 de abril 2016	<a href="#">Santiago de Chile, en emergencia por lluvias, inundaciones y cortes de agua - El País</a>	17 de abril 2016	137 $[\frac{m^3}{s}]$

Tabla 5.7: Principales eventos de inundación histórica y caudal modelado para estos eventos de precipitación.

Tabla 5.8: Caudales simulados para los eventos de tormentas futuras estimada por los distintos GCMs y para TR de 2 a 200 años en  $[\frac{m^3}{s}]$ .

Período de Retorno	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
TR2	160,4	133,7	144,1	140,5
TR5	245,8	191,8	210,4	201,1
TR10	305,1	230,0	253,1	240,1
TR25	382,5	278,2	306,0	288,6
TR50	441,9	314,1	344,9	324,1
TR100	502,9	349,9	383,3	359,4
TR200	565,6	386,0	421,8	394,7

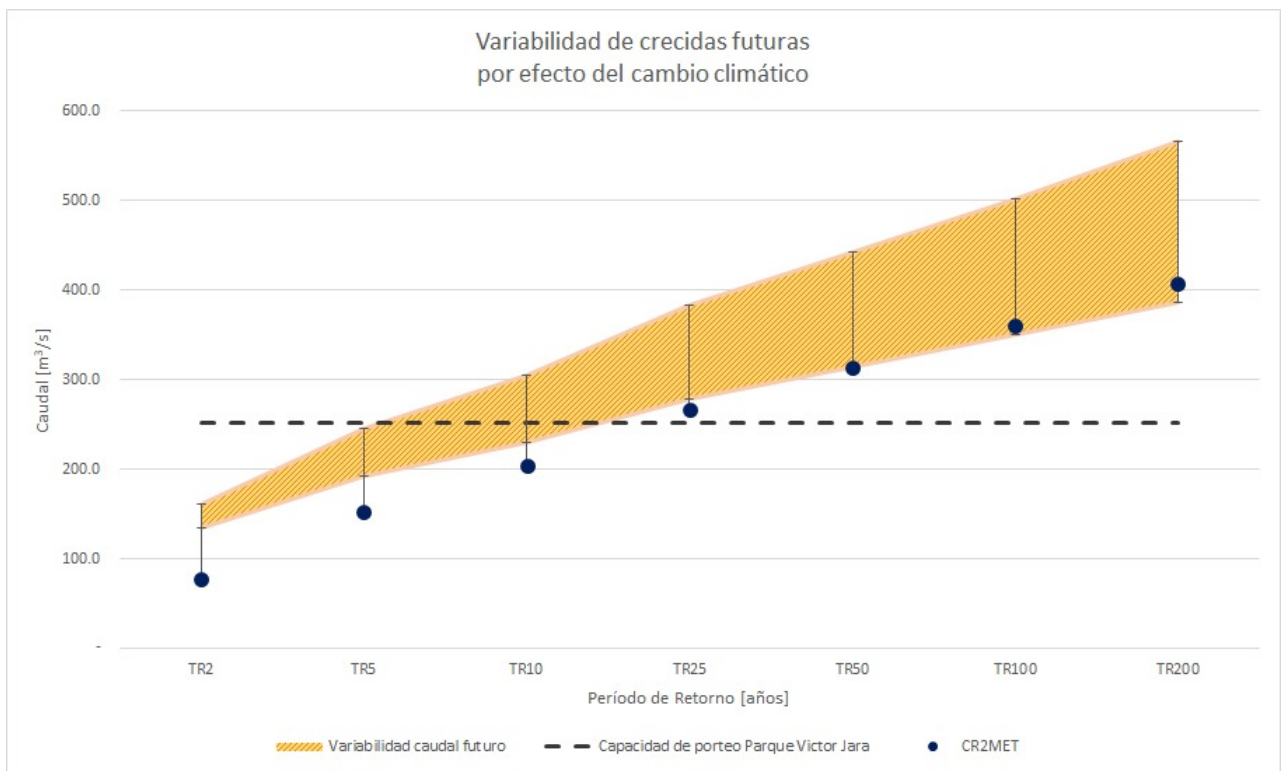


Figura 5.5: Variabilidad esperada de las crecidas futuras asociadas a eventos de tormenta por efecto del cambio climático para cada TR.

capacidad de acumulación que tiene el parque. Se destaca que estos valores son calculados mediante la modelación que incluye desde los dos días previos y hasta los dos días siguientes a cada evento de tormenta, a la vez que se incorpora la regulación de caudal realizada por la laguna de  $45 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ .

Tabla 5.9: Volumen de agua que desborda del cauce para cada GCM y períodos de retorno de 2 a 200 años en  $[m^3]$ .

Período de Retorno	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
TR2	0	0	0	0
TR5	0	0	0	0
TR10	87.480	0	0	240.1
TR25	1.381.320	0	97.200	288.6
TR50	2.934.360	184.680	608.040	292.680
TR100	4.689.360	710.640	1.398.600	906.120
TR200	7.057.800	1.453.680	2.354.400	1.631.880

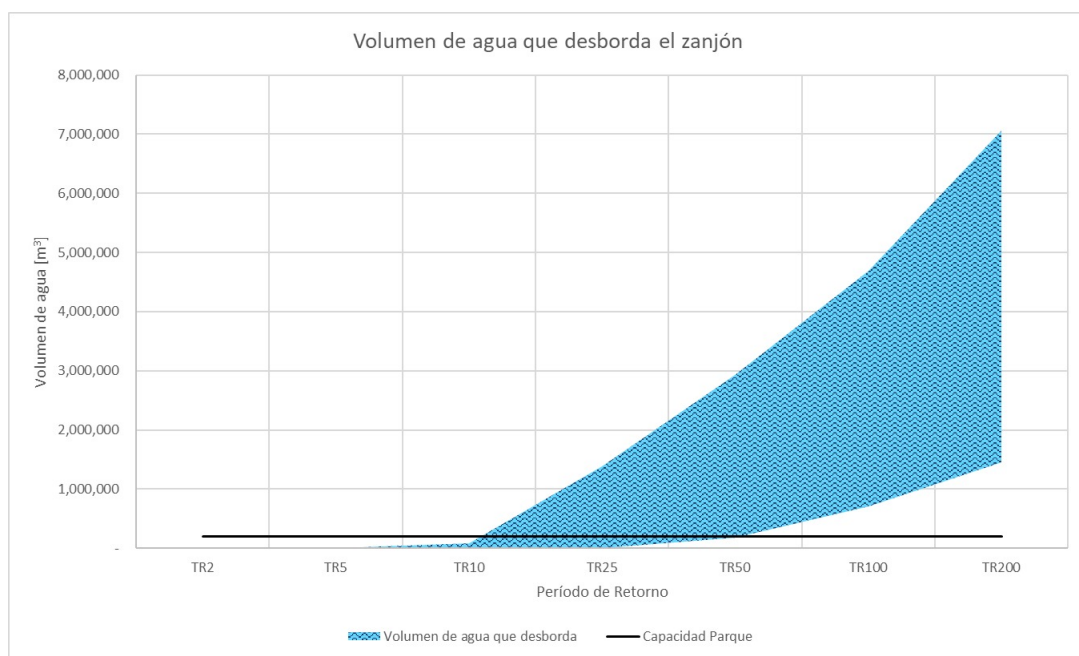


Figura 5.6: Volumen de agua que desborda el zanjón según cada GCM y para TR de 2 a 200 años en  $m^3$ . Como línea continua se grafica la capacidad de acumulación del parque.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Este proyecto de título aborda la determinación de la respuesta hidrológica de la cuenca del Parque Intercomunal Víctor Jara en la Región Metropolitana de Santiago de Chile, para crecidas futuras considerando el escenario de cambio climático RCP8.5 del IPCC. Esto implica la generación de precipitaciones diarias con modelos climáticos globales y un modelo meteorológico local, análisis de las precipitaciones históricas y futuras, selección de una metodología de distribución temporal de la precipitación diaria (tri-horaria en este caso), modelar, calibrar y validar hidrogramas mediante el uso del software HEC-HMS. Finalmente, se realizó un análisis de los caudales instantáneos máximos anuales y proyectados para distintos períodos de retorno. Con esto en consideración, las principales conclusiones que se derivan del estudio se presentan a continuación.

En relación con el uso del modelo meteorológico local, el producto grillado CR2MET, se considera que este es válido y útil debido a su correcto índice de correlación con las precipitaciones observadas en la estación Antupirén al interior de la zona de estudio, a la vez que su uso permite la realización de una distribución espacial de las precipitaciones en la cuenca de manera más completa que con otros métodos. Asimismo, el haber utilizado la información de los GCM escalados temporal y espacialmente, fue de gran ayuda para asegurar la consecución de resultados precisos de las proyecciones futuras que permiten resolver el problema que motiva este estudio.

Se efectúa una caracterización de la zona de interés que considera información geológica, de usos de suelo, topográficas y otras cualidades que permite estimar a ciencia cierta parámetros fundamentales para realizar las simulaciones de escorrentía, como lo son la curva número y la abstracción inicial. Estos parámetros indican la capacidad de infiltración que tiene la cuenca, la cual en este caso se ve muy disminuida debido a la gran porción de la zona que está cubierta por asentamientos y urbanización (sobre el 55 % del territorio). Esto genera que gran parte de las precipitaciones se transformen en escorrentía directa y por ende, las crecidas del Zanjón de la Aguada ocurran inmediatamente al presentarse eventos de precipitación intensas, dependiendo eso sí de los niveles de humedad antecedente a cada evento de precipitación. Sumado a esto, la caracterización de la cuenca da cuenta de que esta se comporta de manera netamente pluvial, donde en el período histórico se observa que la línea de nieves alcanza

a abarcar un máximo de 1.8 % de la cuenca, siendo su aporte despreciado en este estudio considerando el supuesto que, según el IPCC, las temperaturas deberían ser más elevadas en el período futuro y, por ende, ese aporte tenderá a disminuir.

En cuanto a los caudales obtenidos de la simulación histórica, se confirma que el modelo tiende a ser preciso a la hora de estimar los eventos de precipitación que generaron desbordes del zanjón históricamente como se observa en la tabla 5.7. Sin embargo, el análisis de frecuencias realizado indica que la recurrencia de estos eventos es menor para períodos de retorno pequeños (para TR2 no se generan desbordes en la zona de la bóveda), mientras que que serían potencialmente más catastróficos para TR mayores. De hecho, el análisis de estos resultados concluye que las estructuras que soportan los caudales aportantes al parque serán insuficientes con un período de retorno de 25 años, equivalentes a una probabilidad de excedencia de 4 % y no de 100 años como se estimó en el diseño del parque. Un detalle importante a considerar al comparar los resultados obtenidos del análisis de frecuencias con los valores nominales extraídos de los informes del Parque Inundable, es el período de tiempo que se consideró en el estudio, ya que el proceso de diseño del parque comenzó el año 2007, mientras que el presente proyecto tiene como año límite el 2020, significando 13 años posteriores de estadística que modifican considerablemente los resultados obtenidos principalmente para altos períodos de retorno.

Es importante destacar que el modelo HEC-HMS es particularmente sensible a los valores de humedad antecedente a cada evento de precipitación modelado. Esto puede verse reflejado para precipitaciones de similar magnitud pero con distinta humedad antecedente y, por ende, distinto valor AMC de la curva número. En la tabla C.1 se destacan a modo de ejemplo las lluvias del año 1997, donde el 21 de junio se registró una precipitación de 62,3 mm generando un caudal peak superior a los  $200 \frac{m^3}{s}$ , mientras el 17 de agosto del mismo año se registró una precipitación de 63,8 mm, superior a la de junio pero generando un caudal cercano a los  $50 \frac{m^3}{s}$ .

Ahora bien, para las proyecciones de escorrentía futura, se espera que en el futuro cercano la probabilidad de superar los 94  $[\frac{m^3}{s}]$  de capacidad de la bóveda del zanjón aumente considerablemente, siendo prácticamente un hecho que al menos cada 2 años esta se desbordará dando uso a la inundabilidad del parque, esperando caudales entre 133 y 160  $[\frac{m^3}{s}]$  para ese período de retorno. En general, como se extrae de la figura 5.5, la variabilidad de los caudales de crecida será definitivamente al alza para períodos de retorno de 50 años y menores, mientras que para TR100 y TR200 dos de los GCM proyectan que las crecidas serán ligeramente menores a las observadas en el período histórico.

De los resultados obtenidos, se destaca que las estructuras que soportan los caudales aportantes al parque son insuficientes para períodos de retorno entre 10 y 25 años, equivalentes a probabilidades de excedencia entre el 4 % y el 10 %, debido a que su máxima capacidad de porteo de 252  $[\frac{m^3}{s}]$  sería inferior a los caudales proyectados para las probabilidades de excedencia antes mencionada pese a la capacidad de regulación de caudal de la laguna. Por su parte, las obras de acumulación serían suficientes con total seguridad para períodos de retorno de 10 años y menores, sin embargo para períodos mayores a eso aumentarían las

probabilidades de ser insuficientes, con leves esperanzas para TR25 y TR50 (sostenidas por el modelo CSIRO, el cual es el que presenta resultados más optimistas), y fallando totalmente en su misión de contener los volúmenes de agua asociados a TR100 y TR200.

Finalmente, de este estudio se concluye que las instalaciones del Parque Intercomunal Víctor Jara serán insuficientes para sostener caudales asociados a períodos de retorno de 25 años o mayores en el futuro cercano. De igual forma, las estructuras diseñadas para la acumulación de agua y regulación también serían incapaces de sostener las crecidas asociadas a TR25 o mayores.

Estos resultados concuerdan con estudios previos de proyecciones de cambio climático, reafirmando disminuciones en cuanto a precipitaciones y caudales medios anuales, y aumentos en precipitaciones máximas anuales y caudales máximos anuales para distintos períodos de retorno. Si bien este estudio considera el escenario más desfavorable de emisiones de GEI según el IPCC, los resultados obtenidos reducen las expectativas de suficiencia de las obras, por lo que invitan a enfatizar sobre la necesidad de incluir estos análisis para distintas tomas de decisión: sobre la estimación de caudales de diseño de todo tipo de obras hidráulicas, en la planificación urbana y social considerando riesgos asociados a eventos hidrológicos extremos y en medidas de adaptación y mitigación para asegurar el acceso universal al agua de los habitantes del país.



# Bibliografía

# Bibliografía

- [1] Aceituno, P., Garreaud, R. D., & Boisier, J. P. (2020). Variabilidad interanual de la temperatura máxima en la zona central de Chile. *Revista Chilena de Agronomía*, 36(2), 123-134.
- [2] Bao, Y., Wen, X., Zhang, Y., Huang, Y., Zhu, J., Liu, J. & Wang, X. (2021). Spatiotemporal variation and attribution analysis of meteorological drought in a major wheat-producing region of China. *Journal of Hydrology*.
- [3] Beven, K., & Kirkby, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24(3), 43-69.
- [4] Ceballos, G., Ehrlich, P. R., & Dirzo, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), E6089-E6096.
- [5] Chow, V.T., Maidment, D.R., y Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- [6] Corporación Nacional Forestal. (2019). Monitoreos de Cambios de Usos de la Tierra (CONAF) 2019. Recuperado de <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/22/planificacion-catastral/>
- [7] Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P. and Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration 339 and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), pp.553-597
- [8] Dirección Meteorológica de Chile. (2017). Reporte Especial: Sistema Frontal Mayo 2017. Gobierno de Chile.
- [9] DGA (2022). Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile. Etapa II.
- [10] DOH. (2020). Actualización hidrológica embalse Aromos región de Valparaíso. Ministerio de Obras Públicas
- [11] Ebert, A., Banzhaf, E. & McPhee, J. (2009). "The influence of urban expansion on the flood hazard in Santiago de Chile," 2009 Joint Urban Remote Sensing Event, Shanghai, China, 2009.

- [12] Falvey, M., Garreaud, R., & González, P. (2018). *Climate Change in Chile: A Comprehensive Analysis of Multiple Observational and Modelled Data Sources*. Springer International Publishing.
- [13] Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., ... & Fyfe, J. (2013). *Evaluation of Climate Models*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866). Cambridge University Press.
- [14] Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C. D., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D. A., Galleguillos, M., ... & McPhee, J. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(12), 6307-6327.
- [15] Gironás, E., Rojas, A.y Poblete, J. (2011). Evaluación del balance hídrico de la cuenca del río Maipo en Chile Central mediante modelos hidrológicos.
- [16] González, G., Valdés, P. y Oyarzún, M. (2015). Análisis de la disponibilidad hídrica superficial y subterránea en la cuenca del río Cachapoal mediante el modelo hidrológico HEC-HMS”
- [17] Gutiérrez, D., Donoso, P., Vicuña, S., Meza, F., & Früh, B. (2016). Assessing the Vulnerability of Water Supply Systems in Chile Under Climate Change. *Journal of Hydrology*, 538, 744-758. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.04.027
- [18] Henríquez, D. A., González, M. E., Santibáñez, F. I., & Meza, F. J. (2017). The Impact of Climate Change on Streamflows in the Andes of Chile
- [19] Ilustre Municipalidad de San Joaquín. (2019). Actualización plan regulador comunal San Joaquín.
- [20] INDH. (2021). Violencia y vulneraciones a los Derechos HUmanos en barrios críticos.
- [21] IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [22] IPCC. (2013). *Summary for Policymakers*. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- [23] IPCC. (2014). *Atlas interactivo del cambio climático*. Recuperado de <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- [24] IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- [25] IPCC. (2014). *Summary for Policymakers*. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

- [26] IPCC. (2021). Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2021: Informe de los Grupos de trabajo I, II y III del Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- [27] Jackson, R. B. (2019). Tracking the sources and sinks of greenhouse gases. En: *Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future*. ABC-CLIO.
- [28] Lagos, M, Bobadilla, M. P., Vargas, X., Cepeda, J., Silva, V., Uribe, F. Vásquez, N. (2015). Evaluación del impacto del cambio climático en eventos extremos. Análisis de riesgo de sequías e inundaciones usando métodos simples.
- [29] Li, Y., Liu, P., Hu, Y., Wu, L., & Zhang, K. (2018). Comparison of statistical models for river discharge forecasting: A case study in the Weihe River basin, China. *Water*, 10(3), 295.
- [30] López, J. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas.
- [31] Maldonado, T., Henríquez D., Muñoz, A.A. (2018). Assessment of Future Climate Change Scenarios in Chile: A Multi-Model Ensemble Approach. *Climate*, 6(2), 34. doi: 10.3390/cli6020034
- [32] Mann, M. E. (2012). *The Hockey Stick and the Climate Wars: Dispatches from the Front Lines*. Columbia University Press.
- [33] Mann, M. (2017). *Climate Change: The Science, Impacts, and Solutions*. Columbia University Press.
- [34] Pachauri, R. K. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. IPCC.
- [35] Poblete, L., Rojas, P. y Álvarez, C. (2017) "Evaluación de escenarios de cambio climático en la cuenca del río Limarí, Chile, mediante modelos hidrológicos".
- [36] Poveda, G., & J. Mesa, Óscar. (2015). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Tecnología Y ciencias del agua*, 11(1), 21-37.
- [37] Regan, H. M., Colyvan, M., & Burgman, M. A. (2002). A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. *Ecological Applications*, 12(2), 618-628.
- [38] Romero A., H., & Mendonça, M. (2010). Ondas de frío registradas en invierno de 2010: Necesidad de una perspectiva regional integrada para la climatología Latinoamericana. *Revista Geográfica De América Central*.
- [39] Sepúlveda, H. H., Poblete, D. A., & Muñoz, A. A. (2015). Hydrological projections in the Maipo River Basin under climate change scenarios: A spatial approach. *Hydrology Research*, 46(6), 916-929.
- [40] Sprohnle, K., Vasquez, P., & Muñoz, A. (2018). Climate change impact on the water balance of a Mediterranean watershed in central Chile. *International Journal of Water Resources Development*, 34(4), 513-530.

- [41] Stern, N. (2006). *The economics of climate change: The Stern review*. Cambridge University Press.
- [42] Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., Moss, R., Bauer, S. E., Boucher, O., Brovkin, V., Byun, Y.-H., Dix, M., Gualdi, S., Guo, H., John, J. G., Kharin, S., Kim, Y., Koshiro, T., Ma, L., Olivié, D., Panickal, S., Qiao, F., Rong, X., Rosenbloom, N., Schupfner, M., Séférian, R., Sellar, A., Semmler, T., Shi, X., Song, Z., Steger, C., Stouffer, R., Swart, N., Tachiiri, K., Tang, Q., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E., Wyser, K., Xin, X., Yang, S., Yu, Y., and Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 253–293,
- [43] Teng, J., Chiew, F. H., Vaze, J., & Post, D. A. (2009). Estimating the relative uncertainty contributions from GCMs and hydrological models in modelling climate change impact on runoff. *Journal of Hydrology*, 379(1-2), 188-197.
- [44] Toro, I., Morales, H., González, R. y Vargas, X. (2023). CN30-CL, CURVA NÚMERO GRILLADA DE 30 METROS DE RESOLUCIÓN PARA CHILE CONTINENTAL.
- [45] USDA (1985). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55. US Government Printing Office, Washington D.C.
- [46] Vargas, X. ; Lagos Zúñiga, M. A. ; Vásquez, N. A. ; Cepeda, J. A. ; Bobadilla, M. P. ; Uribe, F. ; Silva, V. (2015). Analysis of RCP8.5 Projections of Precipitation and Temperatures in Chilean Basins.
- [47] Vicuña, S., McPhee, J., Breña-Naranjo, J., Meza, F. J., Fuster, R., & Meza, A. (2017). Local impact analysis of climate change on hydrology and water resources in a Chilean basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 79-95.
- [48] Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM: a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental modelling & software*, 17(2), 145-157.

# ANEXOS

# Anexo A

## Precipitaciones Período Histórico

Tabla A.1: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CR2MET.

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	5.66	4.85	3.43	4.52	3.06
$\chi^2(0,05)=$	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
<b>Test</b>	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	1.06	1.24	1.12	0.85	1.96

Tabla A.2: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CR2MET

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	88.18	61.14	73.05	64.89	77.24
5	20	149.57	134.88	140.16	136.47	153.11
10	10	181.70	204.04	185.21	195.01	203.34
25	4	215.94	317.22	241.61	278.76	266.81
50	2	238.06	421.82	282.95	346.77	313.89
100	1	257.95	545.06	323.62	418.59	360.63
200	0.5	276.15	689.13	363.86	494.00	407.19

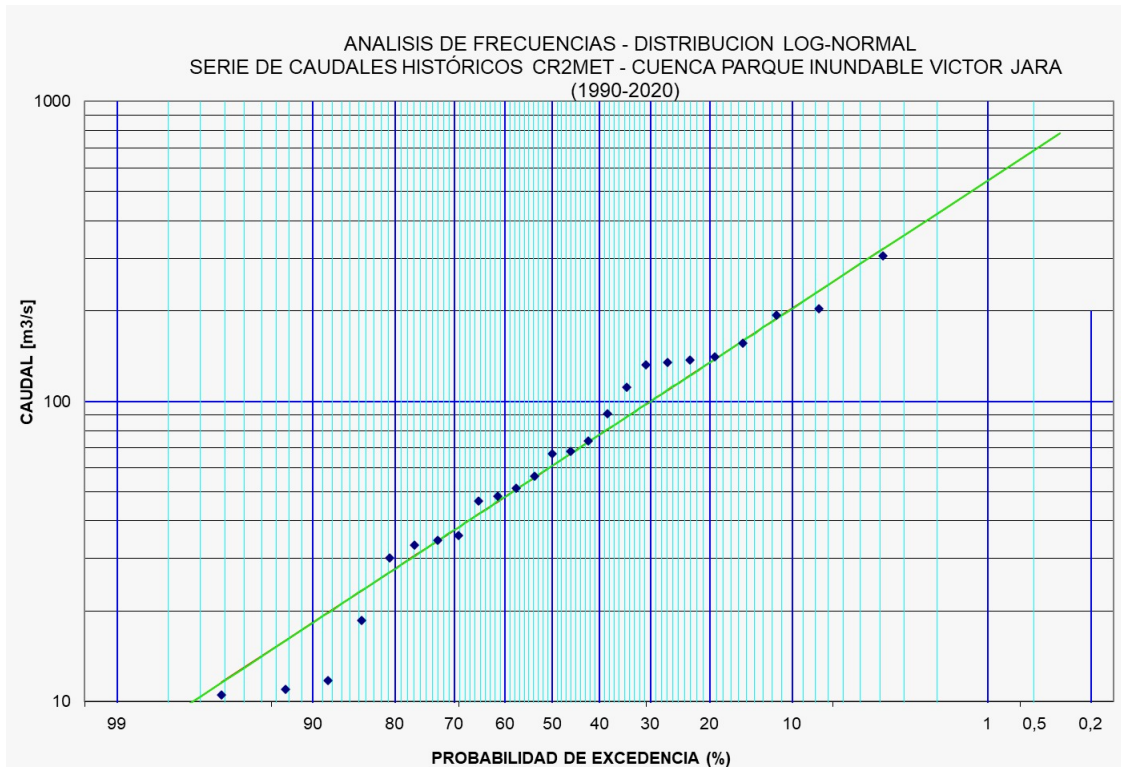


Figura A.1: Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CR2MET histórico.

Tabla A.3: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CCSM4.

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	5.41	2.36	1.98	20.33	2.73
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	1.44	3.31	3.03	0.29	2.87



Tabla A.4: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CCSM4

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	53.53	50.08	50.28	52.86	50.49
5	20	69.91	69.37	68.12	69.66	70.37
10	10	78.49	82.25	79.53	78.32	83.53
25	4	87.62	98.64	93.39	87.10	100.16
50	2	93.53	110.92	103.34	92.40	112.50
100	1	98.83	123.27	112.98	96.86	124.75
200	0.5	103.69	135.76	122.40	100.67	136.95

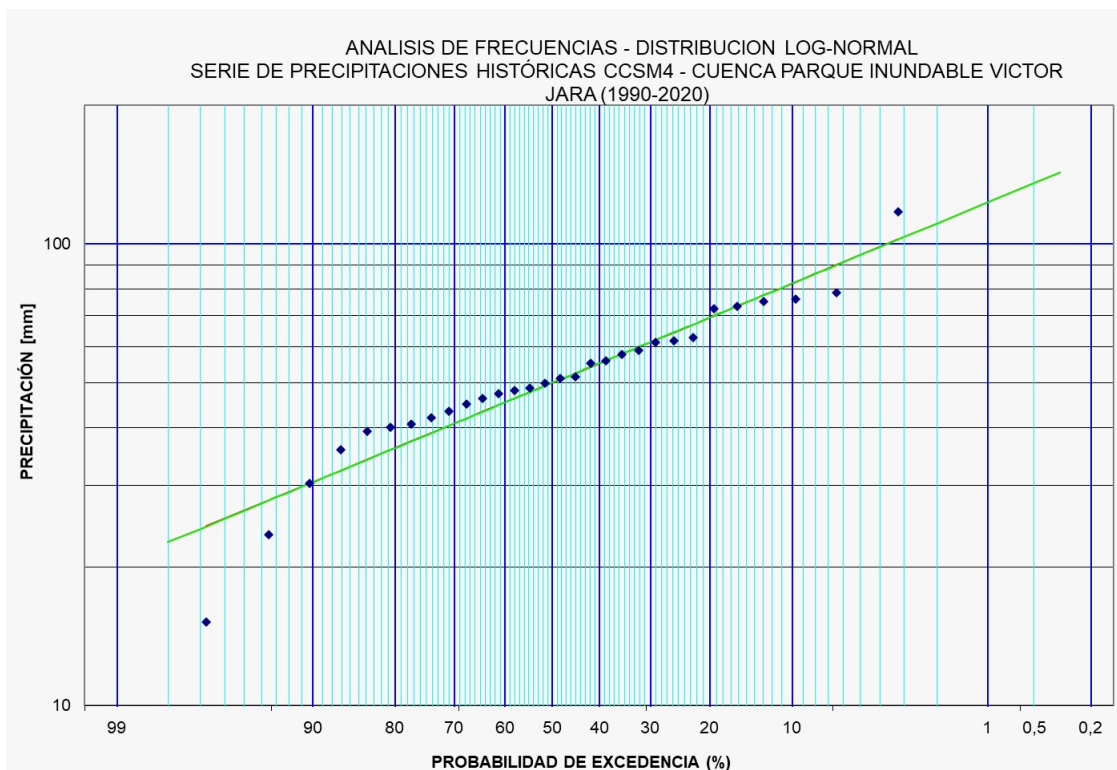


Figura A.2: Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CCSM4 histórico.

Tabla A.5: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CSIRO MK3.6.

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	7.97	3.46	3.92	3.01	3.64
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	0.98	2.26	1.53	1.99	2.14

Tabla A.6: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico CSIRO MK3.6.

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	66.37	61.09	60.36	62.82	62.02
5	20	89.90	87.21	86.07	87.68	90.47
10	10	102.21	105.07	103.50	102.84	109.30
25	4	115.34	128.15	125.44	120.58	133.10
50	2	123.81	145.69	141.60	132.85	150.76
100	1	131.43	163.50	157.53	144.41	168.28
200	0.5	138.41	181.70	173.33	155.38	185.75

Tabla A.7: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico IPSL-CM5A-LR

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	14.43	7.29	4.98	12.10	6.08
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	0.54	1.07	1.20	0.50	1.29

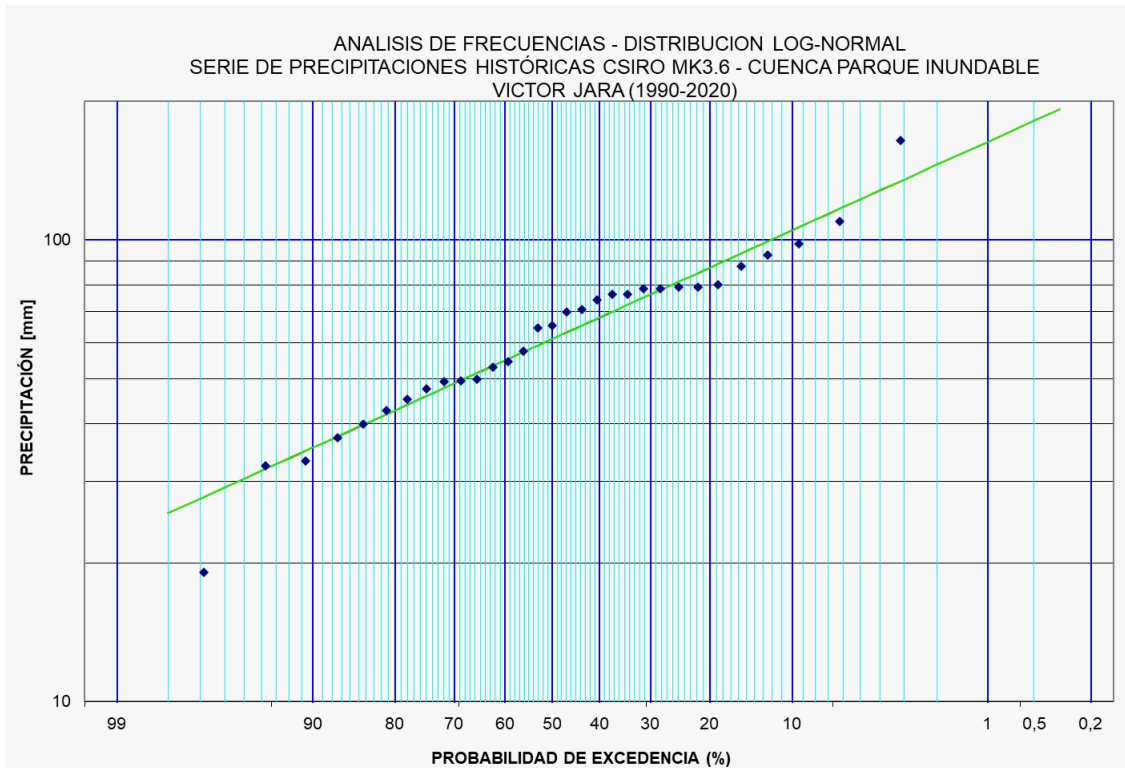


Figura A.3: Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CSIRO MK3.6 histórico.

Tabla A.8: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico IPSL-CM5A-LR

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	58.05	54.37	52.21	51.75	54.36
5	20	77.99	73.09	73.91	71.27	78.47
10	10	88.43	85.32	89.24	86.91	94.44
25	4	99.55	100.62	109.00	110.12	114.61
50	2	106.74	111.93	123.79	130.17	129.58
100	1	113.20	123.19	138.56	152.84	144.43
200	0.5	119.11	134.48	153.33	178.57	159.23

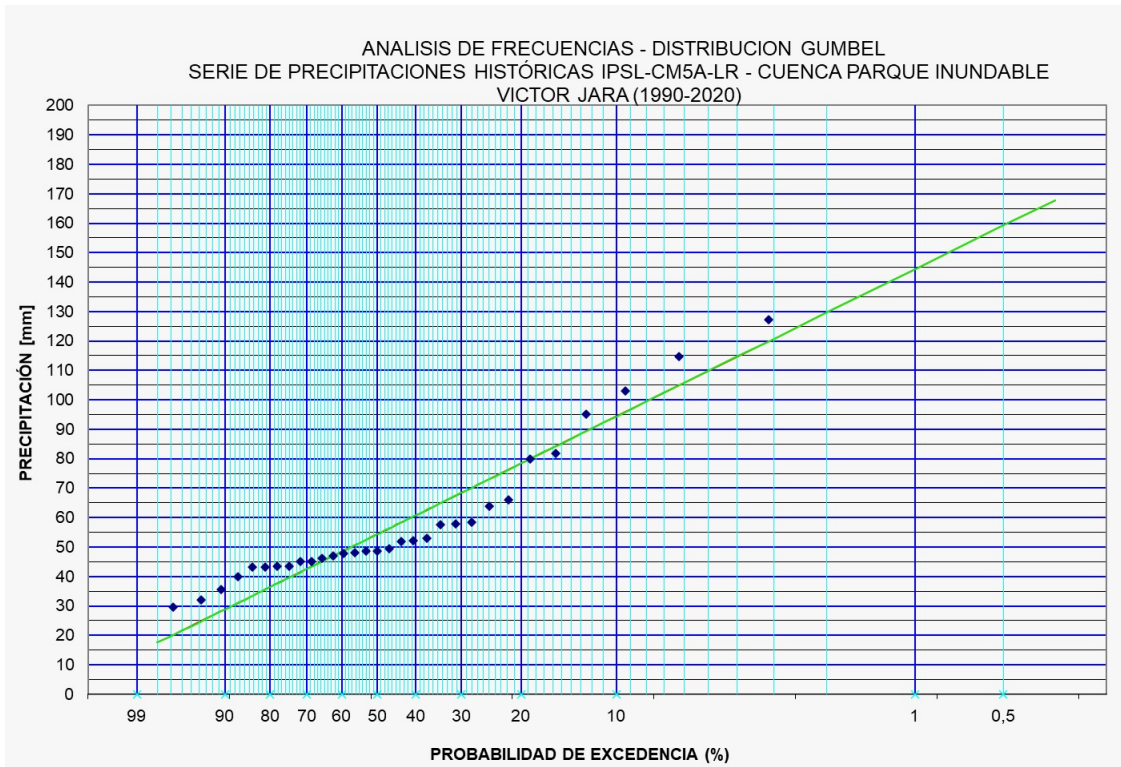


Figura A.4: Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con IPSL-CM5A-LR histórico.

Tabla A.9: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico MIROC-ESM

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	6.08	6.05	4.99	6.75	4.26
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	1.28	1.29	1.20	0.89	1.83

Tabla A.10: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período histórico MIROC-ESM

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	57.68	52.64	53.41	51.86	53.64
5	20	79.47	75.68	77.14	75.30	79.99
10	10	90.87	91.51	92.26	92.31	97.44
25	4	103.03	112.06	110.60	115.46	119.48
50	2	110.88	127.71	123.75	133.90	135.84
100	1	117.94	143.65	136.48	153.37	152.07
200	0.5	124.40	159.98	148.90	174.03	168.24

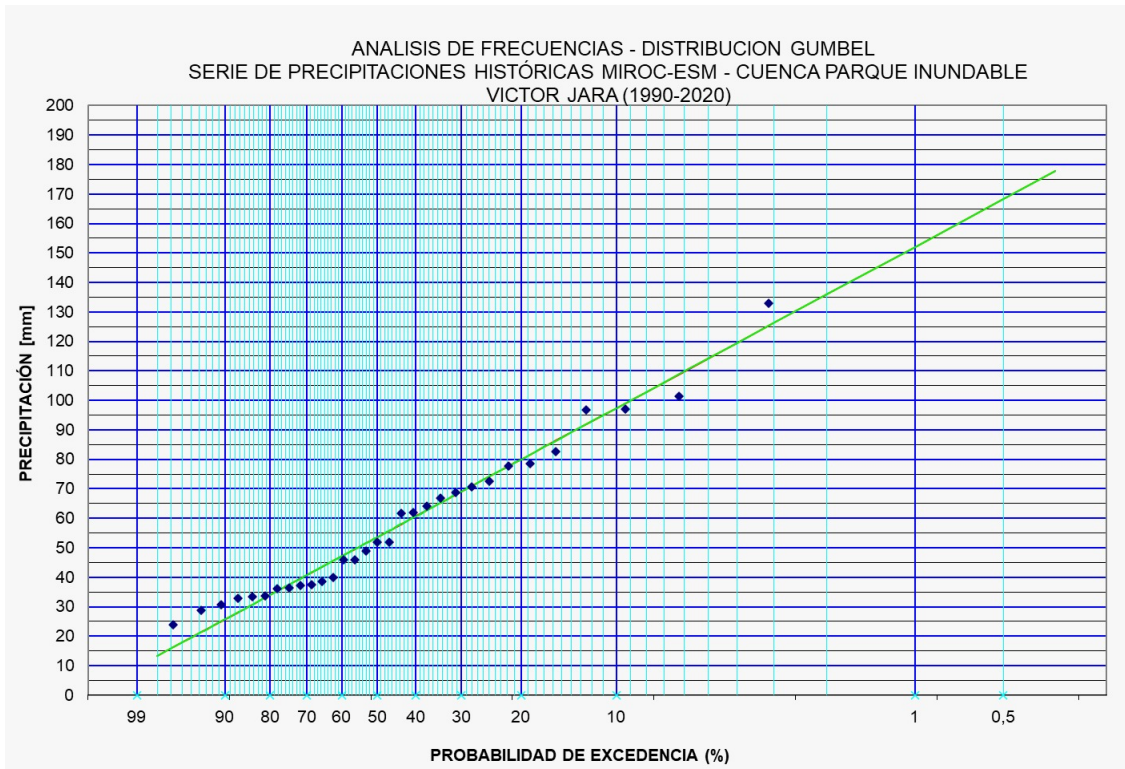


Figura A.5: Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con MIROC-ESM histórico.

# Anexo B

## Precipitaciones Período futuro

Tabla B.1: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CCSM4

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	7.09	2.13	2.27	4.60	2.41
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	1.10	3.67	2.64	1.30	3.25

Tabla B.2: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CCSM4

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	62.83	55.65	56.03	54.93	57.66
5	20	90.78	84.53	86.58	84.17	91.45
10	10	105.40	105.20	107.01	106.02	113.82
25	4	120.98	132.84	132.55	136.37	142.09
50	2	131.05	154.43	151.25	160.96	163.06
100	1	140.10	176.83	169.62	187.23	183.87
200	0.5	148.39	200.16	187.79	215.41	204.61

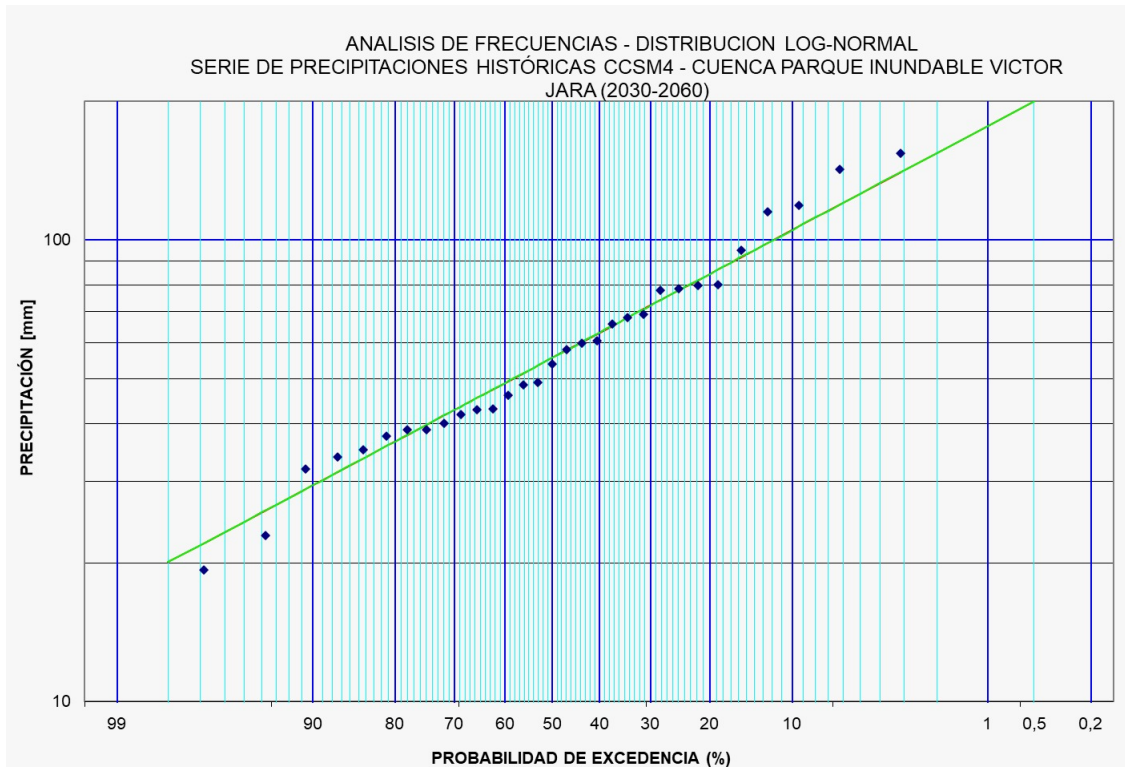


Figura B.1: Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CCSM4 período futuro.

Tabla B.3: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CSIRO MK3.6

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	23.38	2.76	3.59	3.46	4.08
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	0.33	2.83	1.67	1.73	1.92

Tabla B.4: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro CSIRO MK3.6

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	64.03	57.85	54.65	56.78	59.02
5	20	91.07	84.46	83.53	83.91	91.72
10	10	105.22	102.96	105.34	104.05	113.37
25	4	120.31	127.16	134.53	131.98	140.73
50	2	130.05	145.73	156.97	154.60	161.03
100	1	138.81	164.74	179.73	178.81	181.17
200	0.5	146.83	184.29	202.84	204.81	201.24

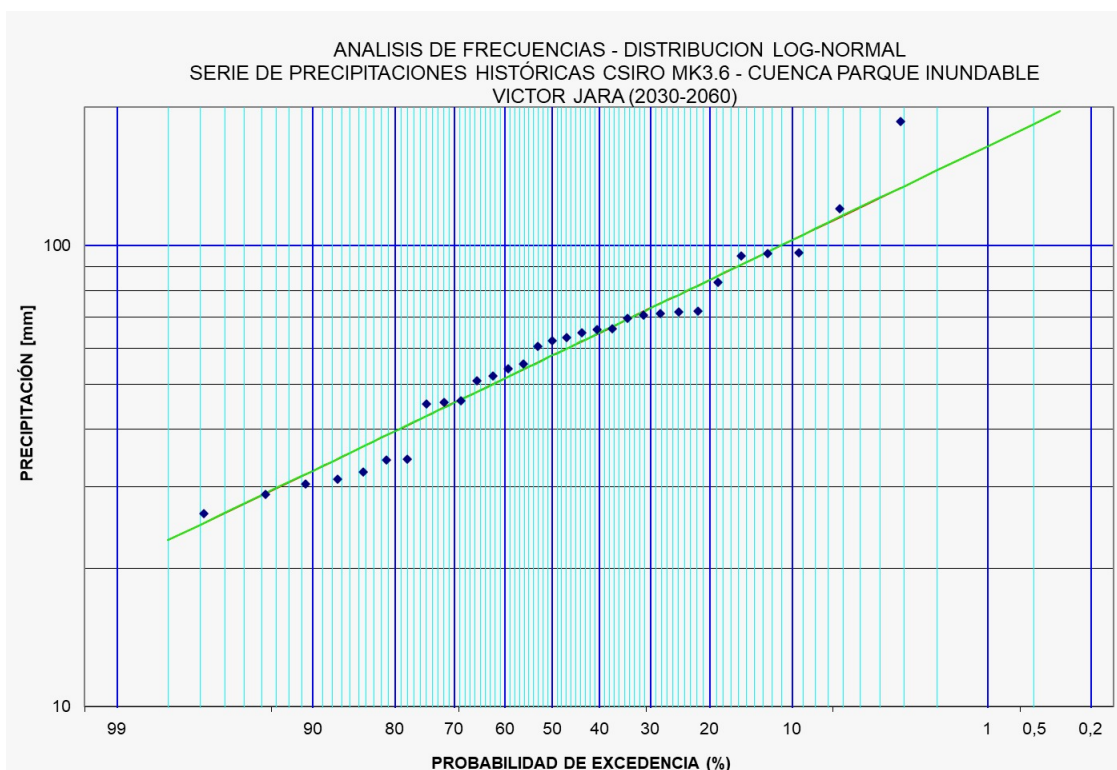


Figura B.2: Ajuste gráfico distribución de probabilidad LOG-NORMAL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con CSIRO MK3.6 período futuro.



Tabla B.5: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro IPSL-CM5A-LR

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	5.55	6.28	4.89	6.51	4.29
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	1.41	1.25	1.23	0.92	1.82

Tabla B.6: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro IPSL-CM5A-LR

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	59.20	53.74	55.20	52.56	54.93
5	20	82.23	77.94	80.17	77.30	82.78
10	10	94.28	94.67	95.73	95.84	101.22
25	4	107.13	116.48	114.36	121.74	124.52
50	2	115.42	133.17	127.57	142.89	141.80
100	1	122.89	150.21	140.27	165.67	158.96
200	0.5	129.71	167.71	152.59	190.30	176.05

Tabla B.7: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro MIROC-ESM

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	8.63	2.16	1.49	3.21	1.62
$\chi^2(0,05)=$	7.81	7.81	5.99	5.99	7.81
<b>Test</b>	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	0.91	3.62	4.02	1.86	4.81

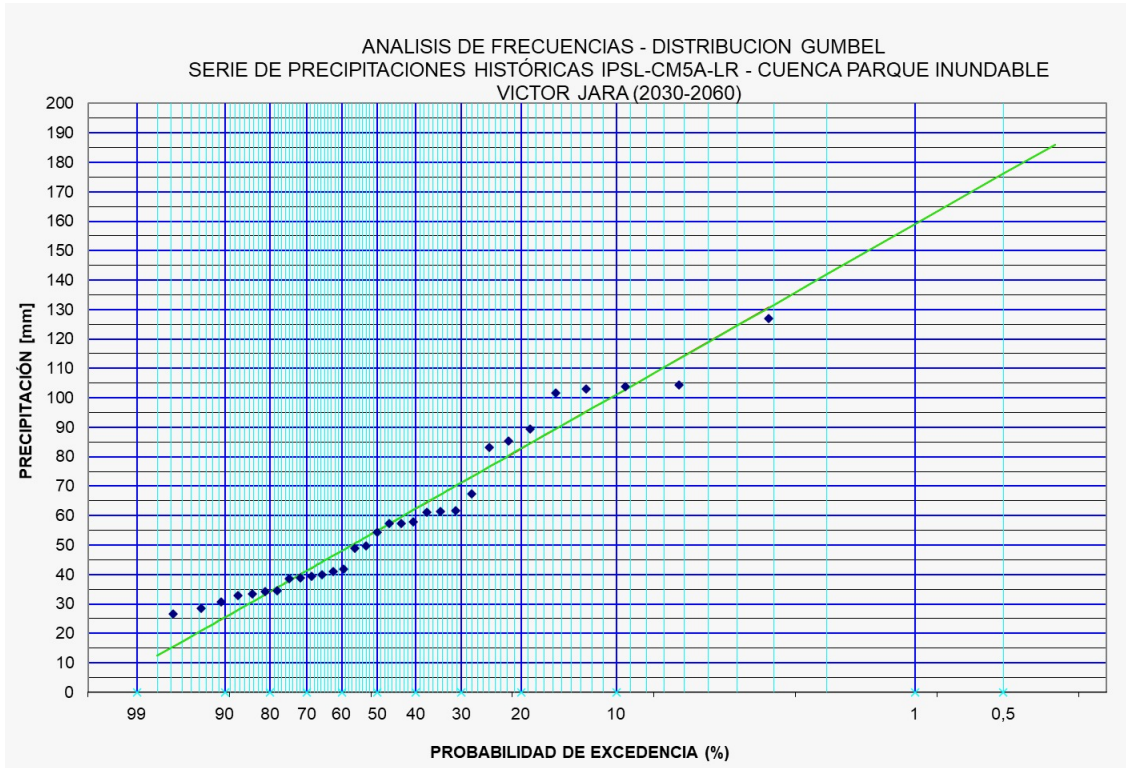


Figura B.3: Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con IPSL-CM5A-LR período futuro.

Tabla B.8: Tabla resumen análisis de frecuencias de precipitaciones período futuro MIROC-ESM

Tabla resumen						
TR	P_exc	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
2	50	57.31	52.26	50.39	50.48	53.05
5	20	80.38	74.68	75.45	73.62	80.94
10	10	92.45	90.02	93.30	91.55	99.41
25	4	105.32	109.85	116.43	117.41	122.74
50	2	113.63	124.93	133.81	139.15	140.05
100	1	121.10	140.25	151.19	163.14	157.23
200	0.5	127.94	155.91	168.62	189.72	174.35

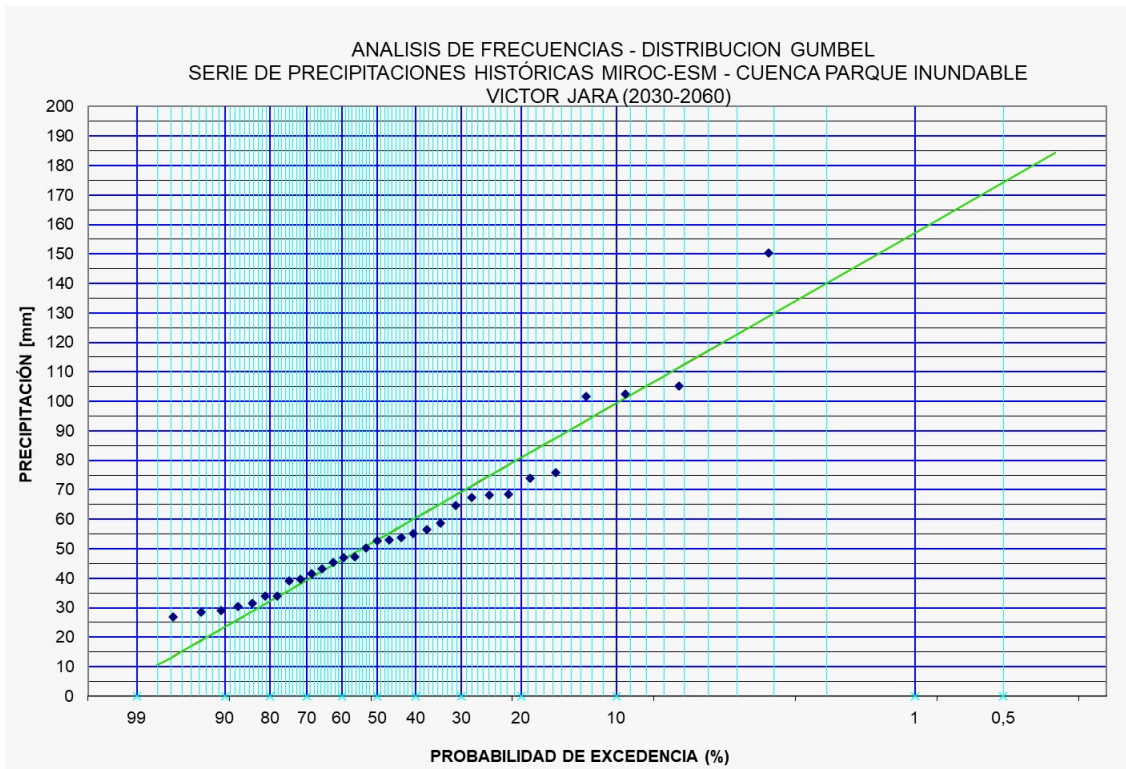


Figura B.4: Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Precipitaciones estimadas con MIROC-ESM período futuro.

# Anexo C

## Caudales Período Histórico

Tabla C.1: Escorrentía generada por los tres eventos de máxima precipitación anual. Período Histórico. Se incluye columna de humedad antecedente para determinar situación AMC.

Fecha	Precipitación [mm]	Humedad Antecedente	AMC	Q_PEAK [m <sup>3</sup> /s]
31-08-1990	49.0	0.5	I	11.8
11-10-1990	26.5	12.4	I	3.2
17-07-1990	33.9	3.6	I	3.0
20-07-1991	67.6	32.0	III	156.0
20-06-1991	45.1	78.8	III	114.3
09-07-1991	37.2	3.6	I	4.2
06-06-1992	37.9	18.9	II	34.5
17-09-1992	34.3	0.0	I	4.6
29-04-1992	34.8	0.0	I	3.4
02-07-1993	30.4	15.6	II	11.6
30-08-1993	39.5	2.8	I	5.8
04-05-1993	37.4	6.2	I	4.5
21-07-1994	42.2	24.6	II	90.9
27-04-1994	26.3	0.0	I	4.7
30-06-1994	27.6	0.0	I	3.7

Fecha	Precipitación [mm]	Humedad Antecedente	AMC	Q_PEAK [m3/s]
14-08-1995	51.7	6.1	I	18.6
24-06-1995	38.5	0.0	I	4.7
06-06-1995	24.1	0.0	I	4.1
25-08-1996	26.3	23.6	II	48.3
14-06-1996	32.2	1.5	I	3.5
03-04-1996	29.2	0.0	I	3.3
21-06-1997	62.3	78.5	III	203.2
17-08-1997	63.8	10.7	I	52.7
30-05-1997	54.1	21.4	II	47.6
10-04-1998	10.5	1.1	I	4.4
26-09-1998	14.1	3.5	I	3.7
06-06-1998	21.5	0.0	I	3.5
31-08-1999	35.8	12.1	I	10.5
29-06-1999	31.3	17.2	II	4.0
21-08-1999	32.9	0.5	I	3.7
14-06-2000	68.9	39.0	III	193.6
01-07-2000	49.6	80.1	III	147.6
10-09-2000	52.2	2.6	I	3.1
19-07-2001	73.0	19.6	II	73.7
26-08-2001	45.2	0.0	I	4.3
30-07-2001	38.2	1.0	I	4.2
04-06-2002	103.9	52.0	III	306.1
27-05-2002	47.1	41.0	III	58.1
26-05-2002	40.1	1.0	I	4.9
08-07-2003	55.3	18.2	II	46.7
21-05-2003	49.7	0.7	I	3.6
17-11-2003	25.3	2.5	I	3.5
04-08-2004	30.6	29.2	III	56.5
13-11-2004	47.9	4.8	I	16.2
14-07-2004	29.7	8.7	I	5.1
29-08-2005	41.8	75.3	III	135.0

Fecha	Precipitación [mm]	Humedad Antecedente	AMC	Q_PEAK [m3/s]
28-06-2005	48.5	5.1	I	16.7
27-08-2005	37.5	12.9	II	4.2
12-07-2006	43.2	54.7	III	132.5
14-10-2006	49.6	14.3	II	31.9
08-06-2006	45.6	10.1	I	4.4
14-06-2007	46.2	16.9	II	30.2
09-08-2007	22.0	2.4	I	4.4
06-07-2007	17.5	4.4	I	3.1
23-05-2008	51.5	51.2	III	141.2
28-05-2008	40.9	86.5	III	117.2
16-08-2008	75.0	11.9	I	65.5
16-08-2009	30.3	29.4	III	66.9
06-09-2009	55.7	14.2	II	50.5
20-06-2009	47.6	16.4	II	17.0
08-11-2010	46.4	1.5	I	11.0
24-06-2010	38.5	22.8	II	4.7
07-07-2010	27.0	1.0	I	3.0
30-06-2011	30.5	0.0	I	4.6
19-06-2011	25.9	2.5	I	3.8
15-07-2011	24.4	0.2	I	3.7
27-05-2012	38.1	3.8	I	4.8
23-08-2012	27.1	5.5	I	4.2
20-12-2012	29.3	1.5	I	3.1
29-05-2013	34.3	34.9	III	68.3
28-05-2013	34.9	0.0	I	4.9
08-08-2013	32.1	11.4	I	4.7
12-06-2014	33.1	44.7	III	33.2
04-06-2014	35.9	1.3	I	4.8
24-08-2014	28.8	6.6	I	4.5
07-08-2015	38.3	36.6	III	111.5
13-07-2015	26.7	29.6	III	49.1

Fecha	Precipitación [mm]	Humedad Antecedente	AMC	Q_PEAK [m3/s]
14-10-2015	18.3	1.4	I	3.9
17-04-2016	54.2	37.9	III	137.2
24-04-2016	31.8	8.6	I	4.3
16-04-2016	29.2	8.7	I	3.9
12-05-2017	34.6	23.8	II	51.4
05-10-2017	32.7	30.7	III	31.9
17-06-2017	34.0	2.1	I	4.5
11-06-2018	22.0	23.2	II	35.7
06-07-2018	28.8	10.6	I	4.1
10-06-2018	22.7	0.5	I	3.1
13-06-2019	14.2	0.6	I	4.3
25-06-2019	16.7	0.1	I	3.7
22-07-2019	22.9	1.5	I	3.4

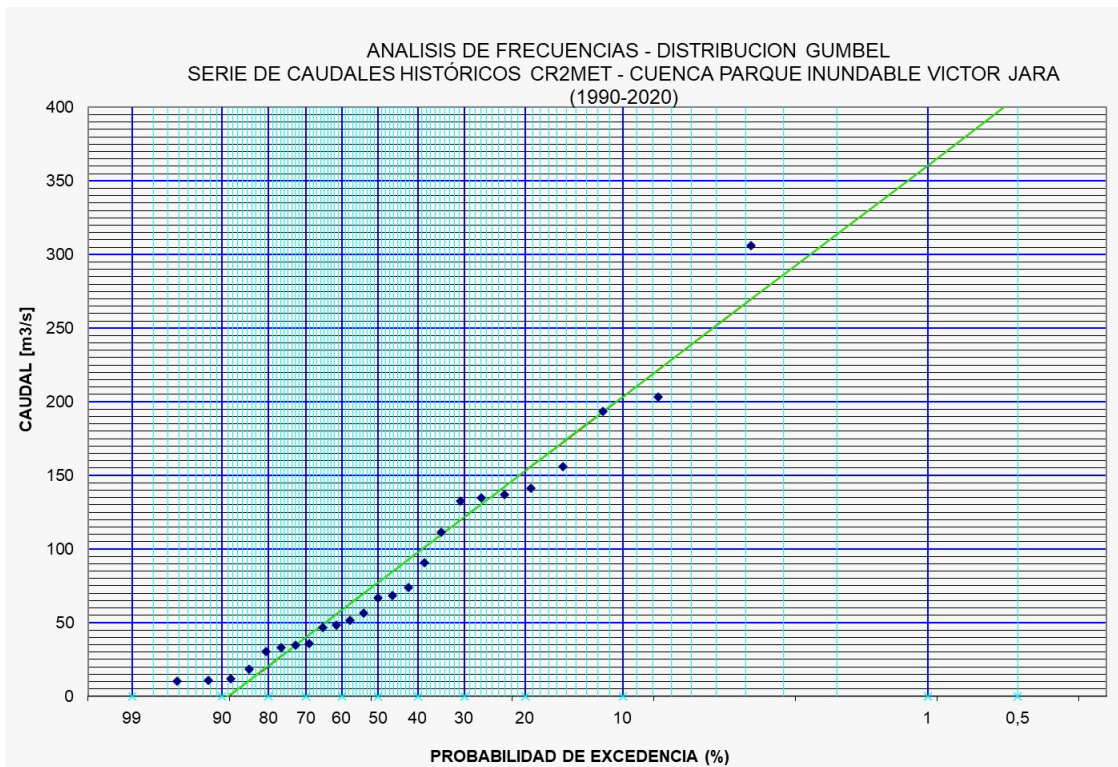


Figura C.1: Ajuste gráfico distribución de probabilidad GUMBEL seleccionada para el estudio. Caudales modelados período histórico.

Tabla C.2: Caudal máximo anual período histórico según CR2MET.

Año	Caudal máximo [m3/s]	Fecha
1990	11.8	31-ago
1991	156.0	20-jul
1992	34.5	06-jun
1993	11.6	02-jul
1994	90.9	21-jul
1995	18.6	14-ago
1996	48.3	25-ago
1997	203.2	21-jun
1998	4.4	10-abr
1999	10.5	31-ago
2000	193.6	14-jun
2001	73.7	19-jul
2002	306.1	04-jun
2003	46.7	08-jul
2004	56.5	04-ago
2005	135.0	29-ago
2006	132.5	12-jul
2007	30.2	14-jun
2008	141.2	23-may
2009	66.9	16-ago
2010	11.0	08-nov
2011	4.6	30-jun
2012	4.8	27-may
2013	68.3	29-may
2014	33.2	12-jun
2015	111.5	07-ago
2016	137.2	17-abr
2017	51.4	12-may
2018	35.7	11-jun
2019	4.3	13-jun

Tabla C.3: Resultados test  $\chi^2$  análisis de frecuencias de caudales modelados en el período histórico.

	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
$\chi^2(\text{calculado})=$	5.66	4.85	3.43	4.52	3.06
$\chi^2(0,05)=$	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
<b>Test</b>	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
<b>Si &gt;1: Ok</b>	1.06	1.24	1.12	0.85	1.96



Tabla C.4: Tabla resumen análisis de frecuencias de caudales modelados período histórico.

<b>Tabla resumen</b>						
<b>TR</b>	<b>P_exc</b>	<b>Normal</b>	<b>Log-Normal</b>	<b>Pearson</b>	<b>Log-Pearson</b>	<b>Gumbel</b>
2	50	88.18	61.14	73.05	64.89	77.24
5	20	149.57	134.88	140.16	136.47	153.11
10	10	181.70	204.04	185.21	195.01	203.34
25	4	215.94	317.22	241.61	278.76	266.81
50	2	238.06	421.82	282.95	346.77	313.89
100	1	257.95	545.06	323.62	418.59	360.63
200	0.5	276.15	689.13	363.86	494.00	407.19

# Anexo D

## Caudales Período Futuro

Tabla D.1: Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo CCSM4 asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200.

<b>GCM</b>	<b>CCSM4</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>49.8</b>	<b>73.6</b>	<b>90.3</b>	<b>112.2</b>	<b>129.2</b>	<b>146.6</b>	<b>164.6</b>
02-06-2045 0:00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
02-06-2045 3:00	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
02-06-2045 6:00	0,04	0,06	0,07	0,08	0,1	0,11	0,12
02-06-2045 9:00	0,06	0,09	0,11	0,14	0,16	0,18	0,2
02-06-2045 12:00	0,08	0,12	0,15	0,19	0,22	0,24	0,27
02-06-2045 15:00	0,1	0,15	0,19	0,23	0,27	0,3	0,34
02-06-2045 18:00	0,15	0,22	0,27	0,33	0,38	0,44	0,49
02-06-2045 21:00	0,21	0,32	0,39	0,48	0,55	0,63	0,7
03-06-2045 0:00	0,08	0,12	0,14	0,18	0,21	0,23	0,26
03-06-2045 3:00	0,32	0,47	0,58	0,72	0,83	0,94	1,06
03-06-2045 6:00	0,7	1,03	1,27	1,57	1,81	2,06	2,31
03-06-2045 9:00	3,28	4,84	5,94	7,38	8,5	9,64	10,82
03-06-2045 12:00	4,08	6,02	7,39	9,19	10,57	12,0	13,47
03-06-2045 15:00	4,92	7,27	8,92	11,09	12,76	14,49	16,26
03-06-2045 18:00	5,77	8,53	10,47	13,01	14,98	16,99	19,08

<b>GCM</b>	<b>CCSM4</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>49.8</b>	<b>73.6</b>	<b>90.3</b>	<b>112.2</b>	<b>129.2</b>	<b>146.6</b>	<b>164.6</b>
03-06-2045 21:00	6,85	10,12	12,42	15,44	17,77	20,16	22,64
04-06-2045 0:00	0,73	1,08	1,33	1,65	1,9	2,15	2,42
04-06-2045 3:00	1,84	2,72	3,34	4,15	4,78	5,43	6,09
04-06-2045 6:00	2,88	4,25	5,22	6,49	7,47	8,47	9,51
04-06-2045 9:00	5,67	8,37	10,27	12,77	14,7	16,68	18,72
04-06-2045 12:00	7,47	11,04	13,55	16,84	19,38	22,0	24,69
04-06-2045 15:00	9,19	13,58	16,65	20,7	23,83	27,04	30,36
04-06-2045 18:00	10,55	15,59	19,12	23,77	27,36	31,05	34,86
04-06-2045 21:00	11,48	16,96	20,8	25,86	29,76	33,78	37,92
05-06-2045 0:00	0,35	0,51	0,63	0,78	0,9	1,02	1,15
05-06-2045 3:00	0,64	0,95	1,16	1,44	1,66	1,89	2,12
05-06-2045 6:00	0,9	1,33	1,63	2,02	2,33	2,64	2,97
05-06-2045 9:00	4,66	6,88	8,44	10,49	12,07	13,7	15,38
05-06-2045 12:00	5,05	7,46	9,15	11,37	13,09	14,85	16,68
05-06-2045 15:00	5,22	7,71	9,45	11,75	13,53	15,35	17,23
05-06-2045 18:00	5,42	8,0	9,82	12,2	14,05	15,94	17,9
05-06-2045 21:00	5,91	8,73	10,7	13,31	15,32	17,38	19,51
06-06-2045 0:00	0,47	0,7	0,86	1,07	1,23	1,39	1,57
06-06-2045 3:00	1,18	1,74	2,13	2,65	3,05	3,46	3,88
06-06-2045 6:00	1,92	2,83	3,47	4,32	4,97	5,64	6,33
06-06-2045 9:00	1,04	1,54	1,88	2,34	2,7	3,06	3,44
06-06-2045 12:00	1,28	1,89	2,32	2,89	3,32	3,77	4,23
06-06-2045 15:00	1,46	2,16	2,65	3,3	3,79	4,3	4,83
06-06-2045 18:00	1,68	2,48	3,05	3,79	4,36	4,95	5,55
06-06-2045 21:00	2,08	3,07	3,77	4,69	5,39	6,12	6,87
07-06-2045 0:00	0,04	0,06	0,07	0,09	0,1	0,12	0,13
07-06-2045 3:00	0,07	0,1	0,12	0,15	0,18	0,2	0,23
07-06-2045 6:00	0,09	0,13	0,16	0,2	0,24	0,27	0,3
07-06-2045 9:00	0,69	1,02	1,25	1,55	1,79	2,03	2,28

<b>GCM</b>	<b>CCSM4</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>49.8</b>	<b>73.6</b>	<b>90.3</b>	<b>112.2</b>	<b>129.2</b>	<b>146.6</b>	<b>164.6</b>
07-06-2045 12:00	0,71	1,04	1,28	1,59	1,83	2,08	2,33
07-06-2045 15:00	0,72	1,06	1,31	1,62	1,87	2,12	2,38
07-06-2045 18:00	0,77	1,14	1,39	1,73	2,0	2,26	2,54
07-06-2045 21:00	0,79	1,17	1,43	1,78	2,05	2,32	2,61
08-06-2045 0:00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03

Tabla D.2: Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo CSIRO MK3.6 asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200.

<b>GCM</b>	<b>CSIRO</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>42.5</b>	<b>58.5</b>	<b>69.2</b>	<b>82.7</b>	<b>92.8</b>	<b>103.0</b>	<b>113.2</b>
02-06-2045 0:00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
02-06-2045 3:00	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
02-06-2045 6:00	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
02-06-2045 9:00	0,05	0,07	0,08	0,1	0,11	0,13	0,14
02-06-2045 12:00	0,07	0,1	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19
02-06-2045 15:00	0,09	0,12	0,14	0,17	0,19	0,21	0,23
02-06-2045 18:00	0,13	0,17	0,21	0,25	0,28	0,31	0,34
02-06-2045 21:00	0,18	0,25	0,3	0,35	0,4	0,44	0,48
03-06-2045 0:00	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,16	0,18
03-06-2045 3:00	0,27	0,38	0,44	0,53	0,6	0,66	0,73
03-06-2045 6:00	0,6	0,82	0,97	1,16	1,3	1,44	1,59
03-06-2045 9:00	2,79	3,85	4,55	5,44	6,1	6,77	7,45
03-06-2045 12:00	3,48	4,79	5,66	6,77	7,6	8,43	9,27
03-06-2045 15:00	4,2	5,78	6,83	8,17	9,17	10,17	11,19
03-06-2045 18:00	4,92	6,78	8,02	9,59	10,76	11,94	13,13
03-06-2045 21:00	5,84	8,04	9,51	11,37	12,77	14,16	15,57

<b>GCM</b>	<b>CSIRO</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>42.5</b>	<b>58.5</b>	<b>69.2</b>	<b>82.7</b>	<b>92.8</b>	<b>103.0</b>	<b>113.2</b>
04-06-2045 0:00	0,62	0,86	1,02	1,22	1,36	1,51	1,66
04-06-2045 3:00	1,57	2,17	2,56	3,06	3,44	3,81	4,19
04-06-2045 6:00	2,45	3,38	4,0	4,78	5,37	5,95	6,55
04-06-2045 9:00	4,83	6,65	7,87	9,41	10,56	11,71	12,88
04-06-2045 12:00	6,37	8,78	10,38	12,41	13,93	15,45	16,99
04-06-2045 15:00	7,83	10,79	12,76	15,26	17,12	18,99	20,89
04-06-2045 18:00	8,99	12,39	14,65	17,52	19,66	21,81	23,98
04-06-2045 21:00	9,78	13,48	15,94	19,05	21,39	23,72	26,09
05-06-2045 0:00	0,3	0,41	0,48	0,58	0,65	0,72	0,79
05-06-2045 3:00	0,55	0,75	0,89	1,06	1,19	1,32	1,46
05-06-2045 6:00	0,77	1,06	1,25	1,49	1,67	1,86	2,04
05-06-2045 9:00	3,97	5,47	6,46	7,73	8,67	9,62	10,58
05-06-2045 12:00	4,3	5,93	7,01	8,38	9,4	10,43	11,47
05-06-2045 15:00	4,45	6,12	7,24	8,66	9,72	10,78	11,86
05-06-2045 18:00	4,62	6,36	7,52	8,99	10,09	11,2	12,31
05-06-2045 21:00	5,03	6,93	8,2	9,81	11,0	12,21	13,42
06-06-2045 0:00	0,4	0,56	0,66	0,79	0,88	0,98	1,08
06-06-2045 3:00	1,0	1,38	1,63	1,95	2,19	2,43	2,67
06-06-2045 6:00	1,63	2,25	2,66	3,18	3,57	3,96	4,35
06-06-2045 9:00	0,89	1,22	1,44	1,73	1,94	2,15	2,36
06-06-2045 12:00	1,09	1,5	1,78	2,13	2,39	2,65	2,91
06-06-2045 15:00	1,25	1,72	2,03	2,43	2,73	3,02	3,32
06-06-2045 18:00	1,43	1,97	2,33	2,79	3,13	3,47	3,82
06-06-2045 21:00	1,77	2,44	2,89	3,45	3,88	4,3	4,73
07-06-2045 0:00	0,03	0,05	0,05	0,07	0,07	0,08	0,09
07-06-2045 3:00	0,06	0,08	0,1	0,11	0,13	0,14	0,16
07-06-2045 6:00	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21
07-06-2045 9:00	0,59	0,81	0,96	1,14	1,28	1,42	1,57
07-06-2045 12:00	0,6	0,83	0,98	1,17	1,32	1,46	1,6

<b>GCM</b>	<b>CSIRO</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>42.5</b>	<b>58.5</b>	<b>69.2</b>	<b>82.7</b>	<b>92.8</b>	<b>103.0</b>	<b>113.2</b>
07-06-2045 15:00	0,61	0,85	1,0	1,2	1,34	1,49	1,64
07-06-2045 18:00	0,66	0,9	1,07	1,28	1,43	1,59	1,75
07-06-2045 21:00	0,67	0,93	1,1	1,31	1,47	1,63	1,79
08-06-2045 0:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabla D.3: Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo IPSL-CM5A-LR asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200.

<b>GCM</b>	<b>IPSL</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>45.3</b>	<b>63.7</b>	<b>75.7</b>	<b>90.6</b>	<b>101.5</b>	<b>112.5</b>	<b>123.4</b>
02-06-2045 0:00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04
02-06-2045 3:00	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06
02-06-2045 6:00	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09
02-06-2045 9:00	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14	0,15
02-06-2045 12:00	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21
02-06-2045 15:00	0,09	0,13	0,16	0,19	0,21	0,23	0,26
02-06-2045 18:00	0,13	0,19	0,22	0,27	0,3	0,33	0,37
02-06-2045 21:00	0,19	0,27	0,32	0,39	0,43	0,48	0,53
03-06-2045 0:00	0,07	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
03-06-2045 3:00	0,29	0,41	0,49	0,58	0,65	0,72	0,79
03-06-2045 6:00	0,64	0,89	1,06	1,27	1,42	1,58	1,73
03-06-2045 9:00	2,98	4,19	4,98	5,96	6,68	7,4	8,12
03-06-2045 12:00	3,71	5,21	6,19	7,41	8,31	9,21	10,1
03-06-2045 15:00	4,48	6,3	7,48	8,95	10,03	11,11	12,2
03-06-2045 18:00	5,25	7,39	8,77	10,5	11,77	13,04	14,31
03-06-2045 21:00	6,23	8,76	10,41	12,45	13,97	15,47	16,98
04-06-2045 0:00	0,67	0,94	1,11	1,33	1,49	1,65	1,81
04-06-2045 3:00	1,68	2,36	2,8	3,35	3,76	4,16	4,57

<b>GCM</b>	<b>IPSL</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>45.3</b>	<b>63.7</b>	<b>75.7</b>	<b>90.6</b>	<b>101.5</b>	<b>112.5</b>	<b>123.4</b>
04-06-2045 6:00	2,62	3,68	4,37	5,23	5,87	6,5	7,13
04-06-2045 9:00	5,15	7,25	8,61	10,3	11,55	12,8	14,04
04-06-2045 12:00	6,8	9,56	11,35	13,59	15,24	16,88	18,52
04-06-2045 15:00	8,36	11,75	13,96	16,7	18,73	20,75	22,77
04-06-2045 18:00	9,6	13,49	16,02	19,18	21,51	23,82	26,14
04-06-2045 21:00	10,44	14,68	17,43	20,86	23,4	25,91	28,44
05-06-2045 0:00	0,32	0,44	0,53	0,63	0,71	0,78	0,86
05-06-2045 3:00	0,58	0,82	0,97	1,16	1,31	1,45	1,59
05-06-2045 6:00	0,82	1,15	1,36	1,63	1,83	2,03	2,23
05-06-2045 9:00	4,23	5,95	7,07	8,46	9,49	10,51	11,53
05-06-2045 12:00	4,59	6,46	7,67	9,17	10,29	11,4	12,51
05-06-2045 15:00	4,74	6,67	7,92	9,48	10,63	11,78	12,92
05-06-2045 18:00	4,93	6,93	8,23	9,85	11,04	12,23	13,42
05-06-2045 21:00	5,37	7,55	8,97	10,74	12,04	13,34	14,63
06-06-2045 0:00	0,43	0,61	0,72	0,86	0,97	1,07	1,17
06-06-2045 3:00	1,07	1,5	1,79	2,14	2,4	2,65	2,91
06-06-2045 6:00	1,74	2,45	2,91	3,48	3,9	4,33	4,75
06-06-2045 9:00	0,95	1,33	1,58	1,89	2,12	2,35	2,58
06-06-2045 12:00	1,17	1,64	1,95	2,33	2,61	2,89	3,18
06-06-2045 15:00	1,33	1,87	2,22	2,66	2,98	3,3	3,62
06-06-2045 18:00	1,53	2,15	2,55	3,05	3,43	3,79	4,16
06-06-2045 21:00	1,89	2,66	3,16	3,78	4,24	4,7	5,15
07-06-2045 0:00	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
07-06-2045 3:00	0,06	0,09	0,1	0,12	0,14	0,16	0,17
07-06-2045 6:00	0,08	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22
07-06-2045 9:00	0,63	0,88	1,05	1,25	1,4	1,56	1,71
07-06-2045 12:00	0,64	0,9	1,07	1,28	1,44	1,59	1,75
07-06-2045 15:00	0,66	0,92	1,09	1,31	1,47	1,63	1,78
07-06-2045 18:00	0,7	0,98	1,17	1,4	1,57	1,74	1,91
07-06-2045 21:00	0,72	1,01	1,2	1,43	1,61	1,78	1,95
08-06-2045 0:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabla D.4: Serie generada de escorrentía futura modelada para el modelo MIROC-ESM asociada a cada período de retorno, desde TR2 hasta TR200.

<b>GCM</b>	<b>MIROC</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>44.3</b>	<b>61.1</b>	<b>72.0</b>	<b>85.6</b>	<b>95.7</b>	<b>105.7</b>	<b>115.7</b>
02-06-2045 0:00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
02-06-2045 3:00	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06
02-06-2045 6:00	0,03	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
02-06-2045 9:00	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,13	0,14
02-06-2045 12:00	0,07	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,19
02-06-2045 15:00	0,09	0,13	0,15	0,18	0,2	0,22	0,24
02-06-2045 18:00	0,13	0,18	0,21	0,25	0,28	0,31	0,34
02-06-2045 21:00	0,19	0,26	0,31	0,37	0,41	0,45	0,5
03-06-2045 0:00	0,07	0,1	0,11	0,14	0,15	0,17	0,18
03-06-2045 3:00	0,28	0,39	0,46	0,55	0,61	0,68	0,74
03-06-2045 6:00	0,62	0,86	1,01	1,2	1,34	1,48	1,62
03-06-2045 9:00	2,92	4,02	4,74	5,63	6,29	6,95	7,61
03-06-2045 12:00	3,63	5,0	5,89	7,01	7,83	8,65	9,47
03-06-2045 15:00	4,38	6,04	7,12	8,46	9,45	10,44	11,43
03-06-2045 18:00	5,14	7,08	8,35	9,93	11,09	12,25	13,41
03-06-2045 21:00	6,1	8,4	9,9	11,78	13,16	14,53	15,91
04-06-2045 0:00	0,65	0,9	1,06	1,26	1,41	1,55	1,7
04-06-2045 3:00	1,64	2,26	2,67	3,17	3,54	3,91	4,28
04-06-2045 6:00	2,56	3,53	4,16	4,95	5,53	6,11	6,69
04-06-2045 9:00	5,04	6,95	8,19	9,74	10,88	12,02	13,16
04-06-2045 12:00	6,65	9,17	10,8	12,85	14,35	15,85	17,36
04-06-2045 15:00	8,18	11,27	13,28	15,79	17,65	19,49	21,34
04-06-2045 18:00	9,39	12,94	15,25	18,13	20,26	22,38	24,5
04-06-2045 21:00	10,21	14,08	16,59	19,73	22,04	24,35	26,66
05-06-2045 0:00	0,31	0,43	0,5	0,6	0,67	0,74	0,81
05-06-2045 3:00	0,57	0,79	0,93	1,1	1,23	1,36	1,49
05-06-2045 6:00	0,8	1,1	1,3	1,54	1,73	1,91	2,09
05-06-2045 9:00	4,14	5,71	6,73	8,0	8,94	9,87	10,81



<b>GCM</b>	<b>MIROC</b>						
<b>FUTURO</b>	<b>TR2</b>	<b>TR5</b>	<b>TR10</b>	<b>TR25</b>	<b>TR50</b>	<b>TR100</b>	<b>TR200</b>
<b>PP entrada</b>	<b>44.3</b>	<b>61.1</b>	<b>72.0</b>	<b>85.6</b>	<b>95.7</b>	<b>105.7</b>	<b>115.7</b>
05-06-2045 12:00	4,49	6,19	7,3	8,67	9,69	10,71	11,72
05-06-2045 15:00	4,64	6,4	7,54	8,96	10,02	11,06	12,11
05-06-2045 18:00	4,82	6,64	7,83	9,31	10,4	11,49	12,58
05-06-2045 21:00	5,26	7,25	8,54	10,15	11,34	12,53	13,72
06-06-2045 0:00	0,42	0,58	0,68	0,81	0,91	1,0	1,1
06-06-2045 3:00	1,05	1,44	1,7	2,02	2,26	2,49	2,73
06-06-2045 6:00	1,7	2,35	2,77	3,29	3,68	4,06	4,45
06-06-2045 9:00	0,93	1,28	1,5	1,79	2,0	2,21	2,42
06-06-2045 12:00	1,14	1,57	1,85	2,2	2,46	2,72	2,98
06-06-2045 15:00	1,3	1,79	2,11	2,51	2,81	3,1	3,4
06-06-2045 18:00	1,5	2,06	2,43	2,89	3,23	3,56	3,9
06-06-2045 21:00	1,85	2,55	3,01	3,57	3,99	4,41	4,83
07-06-2045 0:00	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09
07-06-2045 3:00	0,06	0,08	0,1	0,12	0,13	0,15	0,16
07-06-2045 6:00	0,08	0,11	0,13	0,16	0,17	0,19	0,21
07-06-2045 9:00	0,61	0,84	1,0	1,18	1,32	1,46	1,6
07-06-2045 12:00	0,63	0,87	1,02	1,21	1,36	1,5	1,64
07-06-2045 15:00	0,64	0,88	1,04	1,24	1,38	1,53	1,67
07-06-2045 18:00	0,68	0,94	1,11	1,32	1,48	1,63	1,79
07-06-2045 21:00	0,7	0,97	1,14	1,36	1,52	1,67	1,83
08-06-2045 0:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02