










**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS**

**ACTUALIZACIÓN Y ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE
RECURSOS HÍDRICOS Y DE SEGURIDAD HÍDRICA EN CONTEXTO
DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL EMBALSE ZAPALLAR, REGIÓN
DE ÑUBLE, SEGUNDO LLAMADO**

INFORME FINAL

ENERO 2025



ESPECIALIDAD	NOMBRE	TÍTULO	FIRMA
JEFE DE PROYECTO	PAOLO ZÚÑIGA C.	INGENIERO CIVIL	
COORDINADOR	HUGO GLORIA V.	INGENIERO CIVIL	
PROFESIONAL SENIOR EN ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS Y SEGURIDAD HÍDRICA	ALFONSO UGARTE S.	INGENIERO CIVIL	
PROFESIONAL EN MODELACIÓN HIDROLÓGICA	PEDRO SANZANA C.	INGENIERO CIVIL	
PROFESIONAL EN SIG/ DATA SCIENCE	HERNÁN SCHEEL F.	INGENIERO CIVIL	
PROFESIONAL EN PLANES DE DIFUSIÓN	OSCAR LAZCANO V.	LICENCIADO EN COMUNICACIÓN SOCIAL	
PROFESIONAL DE APOYO EN CAMBIO CLIMÁTICO	XIMENA VARGAS M.	INGENIERO CIVIL	

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	2
2. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	4
2.1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.....	4
3. ETAPAS DE LA CONSULTORÍA.....	5
4. CONTEXTO GENERAL DE AREA DE ESTUDIO Y SISTEMA LAJA-DIGUILLIN	6
5. CONTEXTO HIDRO-CLIMÁTICO EN ZONA DE ESTUDIO	8
6. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDRO METEOROLOGICA	12
7. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES.....	18
7.1. MODELACIÓN Y EVALUACIÓN AGROECONÓMICA DEL EMBALSE ZAPALLAR, VII REGIÓN DEL BÍO-BÍO – INFORME FINAL, R&Q INGENIERÍA (2017)	19
7.1.1. Aspectos relacionados a la modelación hidrológica.....	19
7.1.2. Aspectos relacionados a las forzantes meteorológicas	52
7.2. ESTUDIOS ACTUALIZACIÓN Y COMPLEMENTACIÓN DISEÑO EMBALSE ZAPALLAR, REGIÓN DEL BÍO-BÍO – INFORME FINAL, MN INGENIEROS (2018).....	58
7.2.1. Aspectos relacionados a las forzantes meteorológicas	63
7.2.2. Aspectos relacionados a las crecidas	63
7.3. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO EMBALSE ZAPALLAR, GESTIÓN AMBIENTAL ESTRATÉGICA CONSULTORES (2020)	65
7.3.1. Aspectos relacionados a la modelación hidrológica.....	65
7.3.2. Aspectos relacionados a las forzantes meteorológicas	69
7.3.3. Aspectos relacionados a las crecidas	70
7.4. PLANILLAS DE RESULTADOS MODELO WEAP. “MODELACIÓN Y EVALUACIÓN AGROECONÓMICA DEL EMBALSE ZAPALLAR, VII REGIÓN DEL BÍO-BÍO – INFORME FINAL, R&Q INGENIERÍA (2017).	71
7.5. DETERMINACIÓN DE REGLA OPERACIONAL PARA EL EMBALSE ZAPALLAR REGIÓN DE ÑUBLE, UNIVERSIDAD DE CHILE, FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS (2021).	72
7.6. HOMOLOGACIÓN DEL CÁLCULO HIDROLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA OFERTA NATURAL DE AGUA HISTÓRICA Y FUTURA EN CHILE. SIT N°524, FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS (2021).	76
7.6.1. Aspectos relacionados a las forzantes meteorológicas	76
7.7. PRESENTACIÓN SOFTWARE PARA LA GESTIÓN DEL SISTEMA RÍO-LAGO LAJA PARA LA SEGURIDAD HÍDRICA BAJO LA ACTUAL Y FUTURA CRISIS CLIMÁTICA, UNIVERSIDAD DE	

CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN/CIBAS/UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN (2023)	79
7.8. PLAN ESTRATEGICO DE GESTIÓN HIDRICA RÍO BIO BIO (DGA-UC-UCSC 2021)	82
7.8.1. Aspectos relacionados a la modelación hidrológica	82
7.8.2. Aspectos relacionados a las forzantes meteorológicas	96
7.8.3. Aspectos relacionados a las crecidas	97
7.9. ACUERDO DE OPERACIÓN Y RECUPERACIÓN DEL LAGO LAJA COMPLEMENTA CONVENIO DE 1958.....	99
7.10. GUÍAS DE EVALUACIÓN SEA SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO Y PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HÍDRICA.....	103
7.10.1. Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico	103
7.10.2. Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA	109
7.11. OTROS ESTUDIOS RELEVANTES.....	114
8. DETERMINACIÓN DE FORZANTES HIDROMETEOROLÓGICAS EN PERIODOS HISTÓRICO Y FUTURO	116
8.1. VALIDACIÓN DE INFORMACIÓN DE CR2MET	116
8.1.1. Precipitación	117
8.1.2. Temperatura máxima	129
8.1.3. Temperatura mínima	132
8.1.4. Generación de series de forzantes meteorológicas históricas	136
8.2. SELECCIÓN DE GCM REPRESENTATIVOS	139
8.2.1. Análisis para selección de GCM	139
8.2.2. Escenarios de cambio climático utilizados	142
8.3. FORZANTES PROYECTADAS A NIVEL MEDIO MENSUAL.....	144
8.3.1. Metodología de escalamiento	144
8.3.2. Proceso de escalamiento	144
8.3.3. Análisis de las proyecciones escaladas	148
8.4. FORZANTES PROYECTADAS A NIVEL MEDIO DIARIO	157
9. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO EN PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO	161
9.1. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO WEAP.....	161
9.1.1. Unidades de respuesta hidrológicas de modelo semi-distribuido implementado para el proyecto embalse Zapallar	165
9.1.2. Descripción del modelo WEAP.....	166
9.2. CALIBRACIÓN MODELO HIDROLÓGICO EN PERIODO HISTÓRICO	167
9.2.1. Calibración en puntos de control fluviométrico	168
9.2.2. Estimación de caudal afluente R&Q (2017)	174
9.2.3. Estimación de caudal afluente DGA (2020)	179
9.3. CONSTRUCCIÓN ESCENARIOS DE SIMULACIÓN FUTURA	183

9.4. GENERACIÓN DE CAUDALES FUTUROS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO	183
10. ANÁLISIS DE SEGURIDAD HÍDRICA	195
10.1. APLICACIÓN HIDROLOGÍA ACTUALIZADA SOBRE REGLA DE OPERACIÓN	195
10.2. DIAGNÓSTICO REGLA DE OPERACIÓN	196
10.3. INSERCIÓN DE CAUDAL DE HOYA INTERMEDIA PARA DERECHOS PERMANENTES.....	198
10.4. SEGURIDAD DE RIEGO CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO	201
10.4.1. Área asociada al 85% de seguridad de riego	207
10.5. ANÁLISIS DE CRECIDAS EXTREMAS	210
10.5.1. Introducción	210
10.5.2. Estudios previos	211
10.5.3. Análisis PP máximas anuales	212
10.5.4. Caudales máximos instantáneos estaciones DGA	215
10.5.5. Análisis línea nieve	217
10.5.6. Metodología precipitación escorrentía (hidrograma unitario sintético)	220
10.5.7. Análisis crecidas máximas con cambio climático.....	228
11. PLAN DE DIFUSIÓN	234
12. CONCLUSIONES Y VISIÓN CRÍTICA DEL CONSULTOR	237
13. BIBLIOGRAFÍA	250

ANEXOS

- ANEXO 1 Antecedentes Recopilados y Revisados
- ANEXO 2 Información Hidrometeorológica Recopilada
- ANEXO 3 KMZ Figuras
- ANEXO 4 Registros De Extracciones Históricas JVRD
- ANEXO 5 Modelo WEAP Cambio Climático
- ANEXO 6 Modelo Operacional
- ANEXO 7 Análisis de Crecidas Extremas
- ANEXO 8 Plan de Difusión

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Mapa General del Proyecto.....	3
Figura 4-1: Diagrama Sistema Laja-Diguillín y Proyecto Embalse Zapallar	7
Figura 5-1: Precipitación, Temperatura, Caudal Anual y Curva de Variación Estacional de Río Diguillín en San Lorenzo	8
Figura 5-2: Diagrama Unifilar Hidrográfico de Principales Ríos y Esteros Afluentes a la Zona De Estudio.....	9
Figura 5-3: Precipitación, Temperatura, Caudal anual y mensual Estero Renegado	10
Figura 5-4: Precipitación, Temperatura, Caudal anual y mensual río Diguillín en Longitudinal ..	11
Figura 6-1: Área de Estudio y Ubicación de Estaciones Hidro-Meteorológicas	15
Figura 7-1: Área de Estudio y Área Aportante Laguna Endorreica.....	27
Figura 7-2: Subcuencas de Área de Estudio	27
Figura 7-3: Estaciones Disponibles, Punto de Confluencia y Zona de Embalse Proyectado	29
Figura 7-4: Delimitación Acuíferos Cuenca Río Itata. Línea Roja Corresponde a Área de Estudio	32
Figura 7-5: Curvas Isofreáticas y Sentido de Escurrimiento Aguas Subterráneas. Línea Morada Corresponde al Área de Estudio	33
Figura 7-6: Rangos de Profundidad Nivel Estático Cuenca Río Itata. Línea Morada Corresponde al Área de Estudio	34
Figura 7-7: Identificación Zonas de Afloramiento y Recuperación, Cuenca Río Itata	35
Figura 7-8: Afloramientos Incorporados a Modelo WEAP en Río Diguillín	36
Figura 7-9: Afloramientos Incorporados a Modelo WEAP en Río Diguillín	36
Figura 7-10: Afloramientos Incorporados a Modelo WEAP en Río Itata y Río Larqui	37
Figura 7-11: Comunas con Derechos de Subterráneos en las Comunas del Área de Estudio	38
Figura 7-12: Distritos Agroclimáticos. En Amarillo se Aprecia el Área de Estudio	39
Figura 7-13: Evapotranspiración de Referencia Eto	40
Figura 7-14: Plano de Usos de Suelos.....	41
Figura 7-15: Esquema Conceptual General del Funcionamiento Superficial Dentro del Área de Modelación.....	42
Figura 7-16: Diagrama de Flujo del Modelo	42
Figura 7-17: Serie de Caudales Medidos y Modelados para la Estación Río Larqui en Santa Cruz.....	46
Figura 7-18: Serie de Caudales Medidos y Modelados para la Estación Río Diguillín en Longitudinal	47
Figura 7-19: Serie de Caudales Medidos y Modelados para la Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea	47

Figura 7-20: Caudales Medios Mensuales Medidos y Modelados Para La Estación Río Larqui en Santa Cruz y Estación Río Diguillín en Longitudinal.....	48
Figura 7-21: Caudales Medios Mensuales Medidos y Modelados Para La Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea, y Caudales Medios Anuales Medidos y Modelos Para las 3 Estaciones.....	49
Figura 7-22: Curvas de Variación Estacional, Estación Río Larqui en San Cruz y Río Diguillín en Longitudinal. Línea Segmentada Representan Los Datos Modelados	50
Figura 7-23: Curvas de Variación Estacional, Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea. Línea Segmentada Representan Los Datos Modelados.....	51
Figura 7-24: Curvas de Duración Para Las Tres Estaciones	51
Figura 7-25: Ubicación Estaciones Pluviométricas	53
Figura 7-26: Precipitación Media Mensual Para el Periodo 1978-2015 de Estaciones Utilizadas	54
Figura 7-27: Balance Hídrico de Chile Junto a Curvas de Nivel y Estaciones. Línea de Isoyetas en Color Morado.....	55
Figura 7-28: Esquema General Sistema de Riego Embalse Zapallar	58
Figura 7-29: Esquema Obra de Derivación y Canales Secundarios	59
Figura 7-30: Flujos Bajo el Muro en Tramo 2, Medio Anisotrópico	62
Figura 7-31: Acumulación Anual de Precipitación Promedio Entre 1979 Y 2020, Obtenida de Estaciones Pluviométricas (Panel De La Izquierda) y del Producto CR2MET V2.5 (Derecha)	76
Figura 7-32: Temperatura Media Anual Para Producto de Referencia CR2MET del Periodo Histórico 1985-2015 y Cambios de Temperatura Media Anual Proyectados Para 4 GCM Hacia El Periodo 2030-2060 con Respecto al Periodo Histórico (1985-2015)	78
Figura 7-33: Cambios de Precipitación Anual Promedio Proyectados Para Cuatro GCM Hacia El Periodo 2030-2060 con Respecto al Periodo Histórico (1985-2015)	78
Figura 7-34: Software Para La Gestión del Sistema Río-Lago Laja Para La Seguridad Hídrica Bajo La Actual y Futura Crisis Climática	80
Figura 7-35: Resultados Actuales	81
Figura 7-36: Distribución Espacial por Subcuenca de la Demanda de APU	83
Figura 7-37: Zonas Hidrológicas Dentro de la Cuenca.....	85
Figura 7-38: SHAC Existentes en la Cuenca del Río Biobío	86
Figura 7-39: Dominio de Modelación Sistema de Aguas Subterráneas Cuenca Biobío	88
Figura 7-40: Curva Volumen-Elevación Lago Laja.....	90
Figura 7-41: Separación de Zonas Modelo Conceptual.....	92
Figura 7-42: Variabilidad Climática En La Zona En Estudio	96
Figura 7-43: Sectorización de Proyecciones de Precipitación	104
Figura 7-44: Proyección de cambio en la Temperatura ARClím.....	106

Figura 7-45: Principales Puntos Para Considerar Cambio Climático En Proyectos De Evaluación Impacto Ambiental	110
Figura 8-1: Comparación De Las Medias Anuales Del Producto Meteorológico CR2MET (Panel Derecho) Y De Estaciones Pluviométricas (Panel Izquierdo).....	117
Figura 8-2: Ubicación De Las Estaciones Meteorológicas Utilizadas Como Base De Validación	119
Figura 8-3: Comparación De Valores Medios Anuales De Precipitación Entre Los Valores Registrados En Las Estaciones Meteorológicas Y Lo Estimado Por El Producto CR2MET Considerando Solo Los Datos Válidos De Cada Estación.....	120
Figura 8-4: Función De Corrección De Sesgo Propuesta Para Los Valores De Precipitaciones Medias Anuales	121
Figura 8-5: Campos De Precipitación Media Anual Sin Y Con Corrección Aplicada En El Periodo 1985-2023 Y Diferencia Entre Ellos	122
Figura 8-6: Comparación De Valores De Precipitación En La Estación Las Trancas	123
Figura 8-7: Comparación De Valores Mensuales De Todas Las Estaciones Consideradas Para La Validación Del Producto CR2MET	125
Figura 8-8: Precipitaciones Medias Anuales Estimadas Por CR2MET Para El Periodo 1985-2023 En La Zona De Estudio	126
Figura 8-9: Comparación De Valores Extremos Registrados En Las Estaciones Para Eventos Extremos De 1d, 2d y 3d De Duración.....	128
Figura 8-10: Ubicación De Estaciones Meteorológicas Con Registros De Temperatura Máxima	130
Figura 8-11: Comparación De Valores Medios Mensuales De Temperatura Máxima Media Diaria Entre Registros Por Las Estaciones Meteorológicas Y Estimaciones De CR2MET	130
Figura 8-12: Funciones De Corrección De Sesgo De Temperatura Máxima A Nivel Mensual En Función De La Elevación	131
Figura 8-13: Campos De Corrección De Sesgo De Las Temperaturas Máximas Medias Mensuales, Sin Y Con Corrección De Sesgo.....	132
Figura 8-14: Ubicación De Las Estaciones Meteorológicas Utilizadas Para Validar Los Datos De Temperaturas Mínimas De CR2MET.....	133
Figura 8-15: Comparación De Los Valores Medios Mensuales De Temperatura Mínima Diaria Media Entre Las Mediciones Registradas Por Las Estaciones Meteorológicas Y Las Estimaciones Obtenidas Del Producto CR2MET.....	134
Figura 8-16: Gradiente De Corrección Identificado De Valores De Temperatura Mínima En Función De La Elevación	135
Figura 8-17: Campos De Temperatura Mínima Media Anual, Sin Y Con Corrección De Sesgo..	136
Figura 8-18: Ejemplo De Ponderación De Celdas De CR2MET En Función Del Traslape Con La Delimitación Geográfica De Una Cuenca.....	137

Figura 8-19: Rendimiento De Los GCM Según Teleconexión (Rombo Verde Pr y Tas; Triángulo Naranjo sólo Pr; Triángulo Naranjo Invertido, Solo Tas y Círculo Rojo Ninguna) y PPI En Macrozona Sur.....	140
Figura 8-20: Representación Gráfica De La Resolución Espacial De Los GCM Seleccionados ...	142
Figura 8-21: Series De Precipitación Media Anual Según Las Observaciones Y Lo Proyectado Por Los GCM Seleccionados En El Sector Cordillerano Durante El Periodo 1981-2024.....	145
Figura 8-22: Comparación De Las CVE De Precipitación Observadas, De Proyección Sin Escalar Y Con Escalamiento Para La Cuenca Cordillera	146
Figura 8-23: Comparación De Temperaturas Entre Días Con Y Sin Precipitación, Para CR2MET Y Las Proyecciones Escaladas	147
Figura 8-24: Comparación De Precipitación Media Anual Según Cada Modelo Y Escenario Para El Periodo 2031-2060 En Comparación Al Valor Del Periodo Base 1985-2014	148
Figura 8-25: Variación De Los Campos De Precipitación Medios Del Periodo 2031-2060 Con Respecto Al Periodo 1985-2014	149
Figura 8-26: Comparación De Curvas De Duración De Valores De Precipitación Media Anual De Proyecciones Con Respecto A Observaciones	150
Figura 8-27: Comparación De Las CVE De Precipitación Proyectadas Para 2031-2060 Por Cada GCM Respecto Al Periodo Histórico 1985-2014.....	151
Figura 8-28: Variaciones Proyectadas De La Temperatura Máxima Media Anual Respecto Al Valor Del Periodo 1985-2014	152
Figura 8-29: Variación De Los Campos De Temperatura Máxima Diaria Media Del Periodo 2031-2060 Con Respecto Al Periodo 1985-2014.....	153
Figura 8-30: Variación Proyectada De Las CVE De Temperatura Máxima Media Mensual	154
Figura 8-31: Variaciones Proyectadas De La Temperatura Mínima Media Anual Respecto Al Valor Del Periodo 1985-2014	155
Figura 8-32: Variación De Los Campos De Temperatura Mínima Diaria Media Del Periodo 2031-2060 Con Respecto Al Periodo 1985-2014.....	156
Figura 8-33: Variación Proyectada De Las CVE De Temperatura Mínima Media Mensual.....	157
Figura 8-34: Comparación De Precipitaciones Máximas De 1, 2 Y 3 Días En El Periodo 1985-2014 Entre Estimaciones De CR2MET Y Los Datos De Proyecciones Climáticas Escaladas En La Cuenca Cordillera.....	158
Figura 8-35: Comparación Entre Curvas De Duración De Eventos De Precipitaciones Extremas De 1d, 2d Y 3d.....	160
Figura 9-1: Diagrama De Flujo desde Zona I, Zona Alto Diguillín, Zona II, Embalse De Regulación, y Zona 3, Modelo Operacional.....	161
Figura 9-2: Principales Cuencas De Interés En La Zona De Estudio Y Sus Respetivos Cauces Principales.....	162
Figura 9-3: Curva Hipsográfica E Hipsométrica De La Cuenca Aportante Al Embalse Zapallar .	164

Figura 9-4 Curva Hipsográfica e Hipsométrica de la Cuenca Río Diguillín en San Lorenzo	164
Figura 9-5 Curva Hipsográfica e Hipsométrica de la cuenca Estero Renegado en Invernada ...	164
Figura 9-6: Unidades De Respuesta Hidrológica: Subcuencas Y Bandas De Elevación De Modelo Semi-Distribuido Para Estimar Disponibilidad En Embalse Zapallar	165
Figura 9-7: Método De Humedad Del Suelo	166
Figura 9-8: Vista Esquemática De Modelo De Simulación WEAP	167
Figura 9-9: Puntos de Control y Verificación Para Calibración	168
Figura 9-10: Serie Mensual Estación Río Renegado en Invernada	169
Figura 9-11: Caudal Observado Versus Simulado En Estación Río Renegado En Invernada	169
Figura 9-12: Caudal Medio Observado Calibrado En Estación Río Renegado En Invernada	170
Figura 9-13: Serie Mensual Estación Río Diguillín En Junta Con Canal Matriz, Diguillín-Coltón	170
Figura 9-14: Caudal Observado Versus Simulado En Estación Río Diguillín En Junta Con Canal Matriz, Diguillín-Coltón	171
Figura 9-15: Caudal Medio Observado Calibrado En Estación Río Diguillín En Junta Con Canal Matriz, Diguillín-Coltón	171
Figura 9-16: Serie Mensual Estación Río Diguillín En San Lorenzo	172
Figura 9-17: Caudal Observado Versus Simulado En Estación Río Diguillín En San Lorenzo	172
Figura 9-18: Caudal Medio Observado Calibrado En Estación Río Diguillín En San Lorenzo	173
Figura 9-19: Caudales Medios Mensuales Sector Embalse, Período 1978-2015	179
Figura 9-20: Caudales Medios Mensuales para GCM1 y Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585	183
Figura 9-21: Caudales Medios Mensuales para GCM2 y Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585	184
Figura 9-22: Caudales Medios Mensuales para GCM3 y escenarios SSP245, SSP370 y SSP585	184
Figura 9-23: Caudales Medios Mensuales Para Los Tres GCMs Considerados Y Los Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585	185
Figura 10-1: Diagrama de flujo desde Zona I, Zona Alto, Diguillín, Zona II, Embalse de Regulación, y Zona 3, Modelo Operacional	195
Figura 10-2: Aportes Hoya Intermedia, Con Caudal Medio 12,5 m ³ /s	200
Figura 10-3: Regla De Operación Temporada De Riego Sin Cambio Climático: Si Volumen Es Mayor A 60 Hm ³ Se Entrega El 91% De La Demanda, Mientras Que Si Volumen Es Menor A 60 Hm ³ Se Entrega El 100%.	203
Figura 10-4: Regla De Operación Temporada De Riego Con Cambio Climático: Si Volumen Es Mayor A 50 Hm ³ Se Entrega El 91% De La Demanda, Mientras Que Si Volumen Es Menor A 50 Hm ³ Se Entrega El 100%.	203
Figura 10-5: Seguridad de Riego y Cobertura de Demanda Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s	204
Figura 10-6: Seguridad de Riego y Cobertura de Demanda Segundo Escenario RCA 10,5 m ³ /s	205

Figura 10-7: Seguridad de Riego y Cobertura de Demanda Tercer Escenario DDPP 3,7 m ³ /s+ Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas.....	206
Figura 10-8: Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714,32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP.....	207
Figura 10-9: Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Segundo Escenario DDPP RCA 10500 l/s a Pie de Embalse más Caudal Ecológico.....	208
Figura 10-10: Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3700 l/s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas.....	209
Figura 10-11: Cuencas Aportantes A Embalse Zapallar.....	210
Figura 10-12: Ajuste Gráfico PP ₂₄ Río Diguillín.....	213
Figura 10-13: Ajuste Gráfico PP ₂₄ Río Renegado.....	214
Figura 10-14: Ajuste Gráfico PP ₂₄ Cuenca Intermedia.....	214
Figura 10-15: Ajuste Gráfico Caudales Máximos Instantáneos. Río Renegado en Invernada ...	216
Figura 10-16: Ajuste Gráfico Caudales Máximos Instantáneos. Río Diguillín en San Lorenzo ...	216
Figura 10-17: Cuencas Aportantes A Embalse Zapallar.....	218
Figura 10-18: Variación De Temperatura Por Banda De Elevación En Eventos De Precipitación Máxima Diaria.....	218
Figura 10-19: Análisis De Frecuencia De Cota De Elevación Para Línea De Nieve.....	219
Figura 10-20: Modelo De Cuencas Aportantes. HEC-HMS.....	223
Figura 10-21: Coeficiente De Duración. Estación Chillán.....	224
Figura 10-22: Distribución De Precipitaciones. Varas III (50%) y Benítez – D3.....	225
Figura 10-23: Resultados HEC-HMS para Distintas Duraciones De Precipitación.....	226
Figura 10-24: Resultados HEC-HMS Para 6 Hrs De Duración De Precipitación (T=100 años)....	228
Figura 10-25: Caudales De Crecida (m ³ /s) Para Escenarios de CC (2024-2074) En Embalse Zapallar.....	232
Figura 12-1: Componentes del Riesgo y Efecto de Mitigación del Riesgo.....	237
Figura 12-2: Caudales Medios Mensuales para los tres GCMs Considerados y Los Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585.....	246

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Etapas y Actividades del Estudio	5
Tabla 6-1: Información de Estaciones con Información de Temperatura Recopiladas	12
Tabla 6-2: Información de Estaciones con Información de Precipitación Recopiladas.....	12
Tabla 6-3: Información de Estaciones Fluviométricas Recopiladas.....	13
Tabla 6-4: Observaciones Sobre Información Fluviométrica Recopilada.....	16
Tabla 7-1: Estudios Considerados en la Revisión de Antecedentes	18
Tabla 7-2: Estudios Adicionales Considerados en la Revisión de Antecedentes.....	18
Tabla 7-3: Selección de Estaciones Fluviométricas	28
Tabla 7-4: Coeficientes de Escorrentía Mensual y Porcentaje de Agua Disponible.....	31
Tabla 7-5: Comparación Recarga Promedio en Cuencas Maule e Itata	37
Tabla 7-6: Caudales Totales Según Derechos de Aguas Otorgados por la DGA.....	37
Tabla 7-7: Parámetros Agroclimáticos	39
Tabla 7-8: Dotación de Acuerdo a Convenio DOH-Regantes Acciones Mejoradas, 2015.....	45
Tabla 7-9: Coeficientes R2 Obtenidos del Proceso de Calibración y Validación por Estación	45
Tabla 7-10: Estaciones Pluviométricas Actualizadas	53
Tabla 7-11: Meses Sin Registro de Precipitaciones	54
Tabla 7-12: Bandas de Precipitación Adoptadas Para el Área de Modelación	55
Tabla 7-13: Resumen Sector Sur Comuna de San Ignacio Proyectados.....	60
Tabla 7-14: Resumen Sector Norte Comuna de San Ignacio Proyectados.....	60
Tabla 7-15: Entregas a Ramales desde Canales Existentes	60
Tabla 7-16: Derechos de Aguas Subterráneas.....	61
Tabla 7-17: Resultados Modelo de Filtraciones en Puente Zapallar, Medio Anisotrópico	62
Tabla 7-18: Gradientes Hidráulicos Medio Anisotrópico	62
Tabla 7-19: Valores de Caudales Máximos Instantáneos (m ³ /s) Para Distintos Periodos de Retorno, Estimados Según Distintas Metodologías	64
Tabla 7-20: Hitos de Inicio y Término del Proyecto.....	66
Tabla 7-21: Planillas con Información del Estudio DOH-R&Q INGENIERÍA (2017).....	71
Tabla 7-22: Resultados de Seguridad de Riego según Estudio (DOH-DIC, 2021)	73
Tabla 7-23: Tasa de Riego Total a Nivel Predial Por Sector Beneficiado (m ³ /ha)	73
Tabla 7-24: Demanda Mensual Total de Riego a Nivel Predial (Hm ³).....	74
Tabla 7-25: Modelos Globales de Clima Seleccionados Para Representar Las Proyecciones de Cambio Climático en DGA (2022)	77
Tabla 7-26: Demanda de Agua Potable Urbana Año Base (2015).....	82
Tabla 7-27: Zonas de Riesgo Demanda Agrícola	83

Tabla 7-28: Distribución de la Demanda Bajo La Figura de DAA, Para Ejercicio del Derecho por Subcuenca.....	84
Tabla 7-29: Demanda Superficial y Subterránea	84
Tabla 7-30: SHAC Existentes en la Cuenca del Río Biobío	86
Tabla 7-31: Factores de Infiltración de Cada Unidad Geomorfológica	86
Tabla 7-32: Recargas en los SHACs Existentes en la Cuenca del Biobío.....	87
Tabla 7-33: Caudal Concedido (m ³ /s) Para Cada SHAC	87
Tabla 7-34: Parámetros Hidrogeológicos Considerados Para La Modelación	89
Tabla 7-35: Balance Hídrico Obtenido en Régimen Permanente.....	89
Tabla 7-36: Parámetro de Modelación Lago Laja.....	90
Tabla 7-37: Balance Hidrogeológico 1993-2019 Calibrado Para La Zona del Sistema Acoplado.	92
Tabla 7-38: Escenario de Cambio Climático Modelado.....	93
Tabla 7-39: E1 CC: Variación Recarga Superficial 2020-2050 c/r a 1993-2019	93
Tabla 7-40: Descripción Escenario 1, Caso Base.....	94
Tabla 7-41: Resumen de Diferencias Porcentuales de Los Escenarios E1-CC y Caso Base Respecto del Periodo de Simulación	95
Tabla 7-42: Valores de Cambio Porcentual Esperado de Precipitación Según Sectorización Con Respecto al Periodo Histórico	105
Tabla 7-43: Otros Estudios de Interés	114
Tabla 8-1: Información De Las Estaciones Meteorológicas De Precipitación Utilizadas Como Referencia. Coordenadas UTM Referidas Al Datum WGS1984, Huso 19.	118
Tabla 8-2: Comparación Entre Precipitaciones Medias Anuales Estimadas Para Las Cuencas De Cabecera Y La Escorrentía Media Anual Registrada En Las Estaciones Fluviométricas Que Las Definen	124
Tabla 8-3: Factores De Corrección Aplicada A Los Valores De Precipitación Máxima En 1, 2 Y 3 Días	127
Tabla 8-4: Evaluación De Similitud Entre Valores Extremos De Precipitación Observados Y Su Estimación Por CR2MET	127
Tabla 8-5: Información De Las Estaciones Meteorológicas Con Registros De Temperatura Máxima Diaria Utilizadas Como Referencia	129
Tabla 8-6: Información De Las Estaciones Meteorológicas Con Registros De Temperatura Mínima Utilizadas Como Referencia	133
Tabla 8-7: Cantidad De Elementos Para Los Cuales Se Requieren Forzantes	138
Tabla 9-1: Parámetros Geomorfológicos De Principales Cuencas De Estudio	162
Tabla 9-2: Coordenadas De Puntos De Calibración Y Validación De Modelo Oferta Natural Para Proyecto Embalse Zapallar	168

Tabla 9-3: Indicadores de Bondad de Ajuste Nash-Sutcliffe Para Periodos De Calibración (1985/86-2014/15), Validación (2015/16-2022/23) y Completo (1985/86-2022/23).....	173
Tabla 9-4: Selección de Estaciones Fluviométricas	174
Tabla 9-5: Áreas Aportantes Totales y Factor De Transposición.....	176
Tabla 9-6: Caudales Medios Mensuales Estación Río Diguillín En San Lorenzo	177
Tabla 9-7: Caudales Medios Mensuales En Punto De Embalse Zapallar Proyectado	178
Tabla 9-8: Puntos De Captación y Restitución.....	179
Tabla 9-9: Derechos Otorgados Aguas Arriba De La Captación	180
Tabla 9-10: Datos de la Estación De Control y De Los Puntos De Análisis De Disponibilidad	182
Tabla 9-11: Caudal Medio Para Ubicación De Embalse Zapallar	182
Tabla 9-12: Promedio Serie de Caudales Medios Escenarios Climáticos Futuros.....	185
Tabla 9-13: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 245 GCM1	186
Tabla 9-14: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 245 GCM1.....	186
Tabla 9-15: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 245 GCM2	187
Tabla 9-16: Estadígrafos de caudales medios mensuales Escenario SSP 245 GCM2	187
Tabla 9-17: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 245 GCM3	188
Tabla 9-18: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 245 GCM3.....	188
Tabla 9-19: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 370 GCM1	189
Tabla 9-20: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 370 GCM1.....	189
Tabla 9-21: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 370 GCM2	190
Tabla 9-22: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 370 GCM2.....	190
Tabla 9-23: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 370 GCM3	191
Tabla 9-24: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 370 GCM3.....	191
Tabla 9-25: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 585 GCM1	192
Tabla 9-26: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 585 GCM1.....	192
Tabla 9-27: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 585 GCM2	193
Tabla 9-28: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 585 GCM2.....	193
Tabla 9-29: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 585 GCM3	194
Tabla 9-30: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 585 GCM3.....	194
Tabla 10-1: Superficie Asociada A Distintas Áreas Del Proyecto Embalse Zapallar	197
Tabla 10-2: Planillas de Reparto Juzgado de Aguas del Río Diguillín y Afluentes	199
Tabla 10-3 Escenarios de Modelación para Estimar Seguridad de Riego en Embalse Zapallar .	201
Tabla 10-4 Tasas de Riego sin Cambio Climático.....	202
Tabla 10-5 Tasas de Riego con Cambio Climático	202

Tabla 10-6 Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714.32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP	204
Tabla 10-7 Segundo Escenario DDPP RCA 10,5 m ³ /s a Pie de Embalse Más Caudal Ecológico .	205
Tabla 10-8 Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3,7 m ³ /s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas	206
Tabla 10-9 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714,32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP	207
Tabla 10-10 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Segundo Escenario DDPP RCA 10500 l/s a Pie de Embalse más Caudal Ecológico	208
Tabla 10-11 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3700 l/s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas.....	209
Tabla 10-12: Datos Estaciones Fluviométricas DGA	211
Tabla 10-13: Caudales de Diseño Propuestos (m ³ /s)	212
Tabla 10-14: Precipitación En Estudio Según Cuenca Y Periodo De Retorno (mm).....	215
Tabla 10-15: Caudales Instantáneos Máximos Para Estaciones Fluviométricas DGA.....	217
Tabla 10-16: Cota Línea De Nieve Según Distribución De Probabilidades Y Periodo De Retorno	219
Tabla 10-17: Expresiones Para Tiempos De Concentración (En Minutos)	222
Tabla 10-18: Parámetros Geomorfológicos Por Cuenca	222
Tabla 10-19: Tiempos De Concentración Para Cuencas.....	223
Tabla 10-20: Coeficientes De Duración. Estación Chillán.....	224
Tabla 10-21: Distribución De Precipitaciones. Varas III (50%) y Benítez – D3	225
Tabla 10-22: Caudales Máximos En Embalse Zapallar	226
Tabla 10-23: Caudales De Crecida En Periodo Histórico (1960-2023)	227
Tabla 10-24: Precipitación Máxima En 24 Horas (mm) (Periodo 2024-2074). Cuenca Río Diguillín.....	229
Tabla 10-25: Precipitación Máxima En 24 Horas (mm) (Periodo 2024-2074). Cuenca Río Renegado.....	229
Tabla 10-26: Precipitación Máxima En 24 Horas (mm) (Periodo 2024-2074). Cuenca Intermedia	229
Tabla 10-27: Diferencia Porcentual De Precipitaciones Máximas En 24 Hrs. Según Cuenca Y Periodo De Retorno Para Escenario SSP2-4.5	230
Tabla 10-28: Diferencia Porcentual De Precipitaciones Máximas En 24 Hrs. Según Cuenca Y Periodo De Retorno Para Escenario SSP3-7.0	230

Tabla 10-29: Diferencia Porcentual De Precipitaciones Máximas En 24 Hrs. Según Cuenca Y Periodo De Retorno Para Escenario SSP5-8.5	230
Tabla 10-30: Caudales De Crecida (m ³ /s) Para Escenarios De CC (2024-2074) En Embalse Zapallar	231
Tabla 10-31: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico. Resultados Desagregados.....	232
Tabla 10-32: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico. Resultados Agregados Por Modelo	233
Tabla 10-33: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico. Resultados Agregados Por Escenario	233
Tabla 10-34: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico. Resultados Agregados De Manera General.....	233
Tabla 12-1 Escenarios De Modelación Para Estimar Seguridad De Riego En Embalse Zapallar	247

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO

1.1. INTRODUCCIÓN

La DOH ha realizado los estudios de ingeniería del embalse Zapallar, así como de disponibilidad de recursos hídricos, para satisfacer las demandas de riego, pero se hace necesario contar con la **hidrología actualizada** para la revisión del comportamiento ante el efecto del **cambio climático y evaluar el comportamiento de la regla de operación**.

Los modelos de reglas operacionales, existentes del embalse, consideran principalmente sólo el uso para riego, no así un uso multipropósito, razón por la cual se requiere la actualización de la hidrología considerando además el contexto de clima cambiante para el embalse. Esta actualización definirá la forma en que las aguas acumuladas en el embalse serán distribuidas a todos los beneficiarios, y así cumplir con la satisfacción de la demanda de usos.

En consecuencia, se requieren los **respaldos en materia de recursos hídricos** para avanzar en la materialización del Embalse Zapallar, y permita gestionar eficientemente la disponibilidad hídrica a lo largo del tiempo, con la necesidad de abastecer las demandas agrícolas con una seguridad de riego de 85%, con el óptimo aprovechamiento del agua.

En atención a la necesidad antes expuesta, mediante **Resolución N° 171** del 15 de mayo de 2024, la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP adjudicó a TYP SA S.A. Agencia en Chile la Consultoría denominada “Actualización y Estimación de Disponibilidad de Recursos Hídricos y de Seguridad Hídrica en Contexto de Cambio Climático para el Embalse Zapallar, región de Ñuble, Segundo Llamado”.

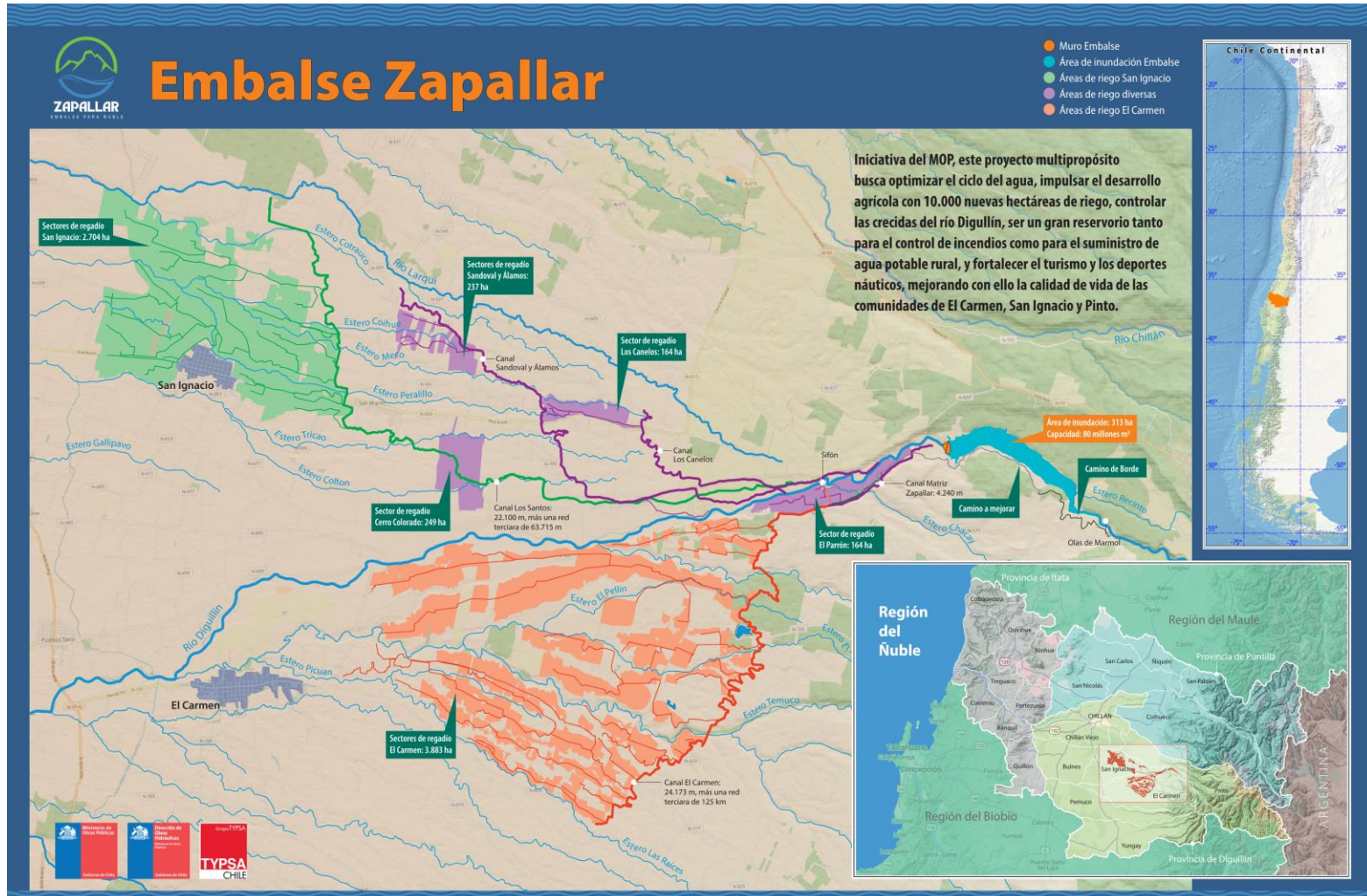
Junto con los aspectos técnicos, el **ámbito comunicacional y de difusión de la información** es fundamental para el éxito del proyecto, por lo que se llevó a cabo un **Plan de Difusión** de manera de garantizar una conexión eficiente entre los resultados que emanados del estudio de hidrología con la estrategia de comunicación y avance del proyecto.

1.2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El Embalse Zapallar tiene una capacidad de 80 (Hm³) para almacenamiento de derechos eventuales, que permitirá desarrollar una actividad agrícola en un área potencial de hasta 10.000 (ha) nuevas, con una seguridad de riego de 85%, y que entregará aguas para otros usos. El proyecto se ubica en las comunas del Carmen y Pinto, Provincia de Diguillín, Región del Ñuble.

La siguiente imagen muestra un mapa general del proyecto, incluyendo: i) la ubicación del embalse; ii) los canales matrices y secundarios; iii) sectores de beneficio de riego; iv) principales localidades.

Figura 1-1: Mapa General del Proyecto



Fuente: Elaboración propia TYP SA 2024

2. OBJETIVOS Y ALCANCES

2.1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Los objetivos generales y específicos del estudio se indican a continuación.

El Objetivo General

El propósito central del estudio es la Actualización y estimación de disponibilidad de recursos hídricos y de seguridad hídrica en contexto de clima cambiante para el embalse Zapallar emplazado en la Región de Ñuble.

Los Objetivos Específicos

Los alcances específicos del estudio son:

- Seleccionar modelos de cambio climático global (GCM) y proyectar las variables meteorológicas en las cuencas de interés.
- Implementación de un modelo hidrológico para simular la escorrentía en el período histórico y futuro en los puntos requeridos para el análisis.
- Analizar la seguridad hídrica del embalse Zapallar bajo condiciones de cambio climático.
- Implementar un Plan de Difusión de los avances y resultados del Estudio.

3. ETAPAS DE LA CONSULTORÍA

El plazo total de la consultoría es de 180 días corridos y se divide en 3 Etapas de acuerdo con lo indicado en la Tabla 3-1 , cuyas actividades son las siguientes:

Tabla 3-1: Etapas y Actividades del Estudio

ETAPA	Actividad	Plazo Máximo Total (días)
ETAPA 1: REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES		35
1.1	Revisión y análisis de antecedentes	
ETAPA 2: MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y ANÁLISIS DE SEGURIDAD HÍDRICA		110
2.1	Determinación de forzantes hidrometeorológicas en períodos histórico y futuro	
2.1.1	Validación de información de CR2Met	
2.1.2	Selección de CGS representativos	
2.1.3	Forzantes proyectadas a nivel medio mensual	
2.1.4	Forzantes proyectadas a nivel medio diario	
2.2	Construcción modelo hidrológico en período histórico y futuro	
2.2.1	Construcción modelo hidrológico WEAP	
2.2.2	Calibración modelo hidrológico en periodo histórico	
2.2.3	Construcción escenarios de simulación futura	
2.2.4	Generación de caudales futuros bajo cambio climático	
2.3	Análisis de seguridad hídrica	
2.3.1	Aplicación hidrología actualizada sobre Regla de Operación	
2.3.2	Diagnóstico regla de operación	
2.3.3	Análisis de crecidas extremas	
ETAPA 3: BORRADOR DE INFORME FINAL Y RESUMEN EJECUTIVO		35
3.1	Borrador de informe final y resumen ejecutivo	
PLAZO TOTAL CONSULTORÍA		180

Fuente: Elaboración propia en base a Términos de Referencia

En forma transversal al desarrollo del estudio, se implementó el Plan de Difusión del avance y resultados del estudio.

4. CONTEXTO GENERAL DE AREA DE ESTUDIO Y SISTEMA LAJA-DIGUILLÍN

En la Figura 4-1 se muestra la relación del proyecto Embalse Zapallar con el sistema Laja-Diguillín. En reunión con DOH-DR y DOH-Región Ñuble se recopiló información de gran relevancia para el desarrollo del proyecto. A continuación, se describen los principales aspectos. Cabe mencionar que las áreas mencionadas son aproximadas y que durante el desarrollo del proyecto se ira perfeccionando la información del sistema.

El convenio para regular la operación del Lago Laja, firmado en 1958 y modificado en 1962, no sufrió cambios hasta 2017. Este convenio autorizó a Endesa la construcción de la central hidroeléctrica El Toro, que incluía un túnel desde aguas abajo hacia aguas arriba del Lago Laja.

En la década de 1970, el vaciado del lago cesó, y se esperaba que la hidrología natural lo llenara nuevamente, lo que ocurrió solo en algunos años. Los derechos de aprovechamiento de agua en la cuenca del Laja fueron sobre otorgados debido a esta hidrología ficticia, resultado del vaciamiento no controlado por Endesa. En 2017, se implementó una operación de regulación para extraer agua controladamente del lago.

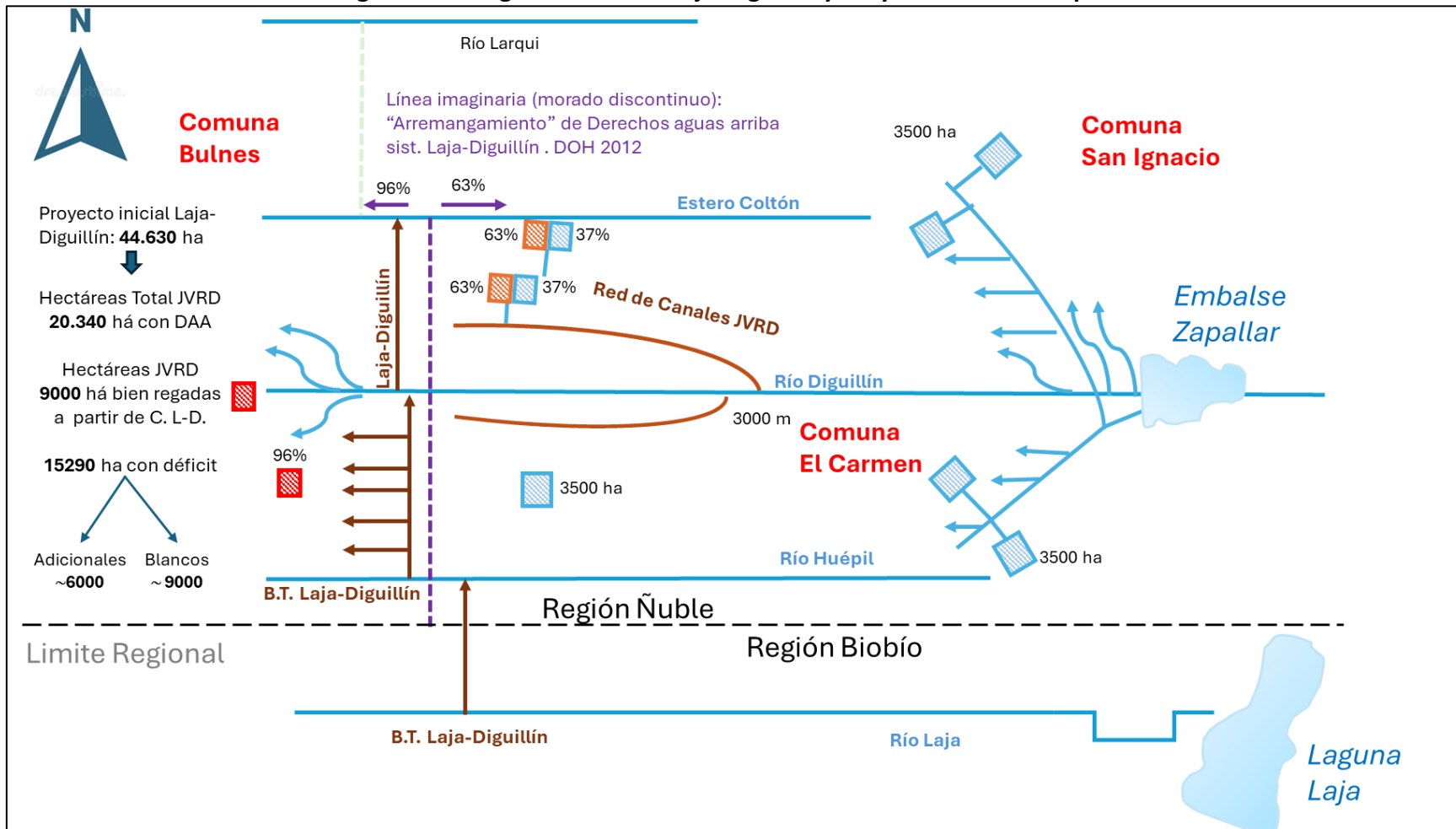
En los años 90, se construyó el canal Laja Diguillín en el río Laja, que inicialmente captaba agua y la descargaba al río Huepil. A 5 km aguas abajo, se captaba nuevamente para descargar al río Diguillín y luego, 200 m aguas abajo, se captaba otra vez para descargar al estero Coltón. El tramo hacia el río Larqui no fue construido por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

El canal Laja Diguillín se proyectó para regar 44.630 ha, de las cuales 20.340 ha corresponden a derechos de aprovechamiento de agua del río Diguillín, gestionados por la Junta de Vigilancia del Río Diguillín, que riegan la comuna de Bulnes. Otras 9.000 ha en la comuna del Carmen son regadas por los alimentadores del canal Laja Diguillín entre los ríos Huepil y Diguillín. Las 15.290 ha restantes corresponden a áreas adicionales (6.000 ha) y tierras sin derechos de agua (9.000 ha). La tasa de riego segura del Lago Laja es de 12.450 m³/temporada/año.

En 2012, DOH desarrolló un convenio con la Junta de Vigilancia del Río Diguillín. El canal Laja Diguillín se consideró como un límite físico: aguas abajo, el canal regaría el 96% de la superficie con agua del Lago Laja; aguas arriba, el río Diguillín abastecería el 63%, y el embalse Zapallar completaría el 37% restante. La tasa de riego es de 12.450 m³/temporada/año para el 63% y de 10.000 m³/temporada/año para el 37%.

El embalse Zapallar regará 10.000 ha adicionales, divididas en 3.500 ha en El Carmen, 3.500 ha en San Ignacio, y 3.000 ha de tierras sin derechos (37%). Actualmente, solo se han identificado los roles de las superficies a regar, sin delimitación geoespacial precisa de las hectáreas sin derechos (37%).

Figura 4-1: Diagrama Sistema Laja-Diguillín y Proyecto Embalse Zapallar



Fuente: Elaboración propia a partir de información recopilada con DOH-DR. *Se presentan valores aproximados de hectáreas

5. CONTEXTO HIDRO-CLIMÁTICO EN ZONA DE ESTUDIO

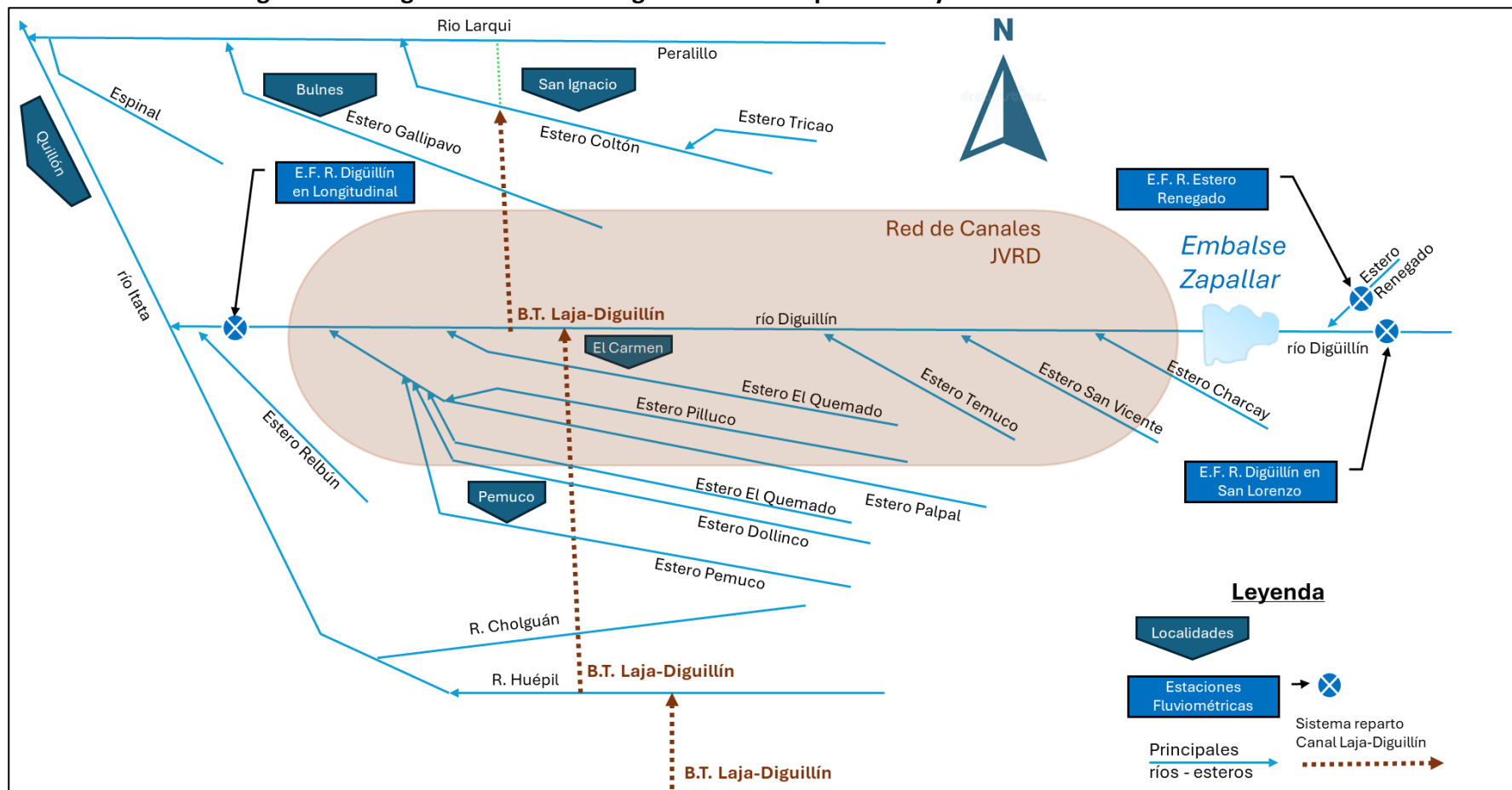
En la Figura 5-2 se muestra un diagrama unifilar hidrográfico de los principales ríos y esteros afluentes a la zona de estudio. Estos corresponden a zona alta y de valle: Estero Renegado (aguas arriba del proyecto Embalse Zapallar), Estero Chacay (aguas abajo del proyecto Embalse Zapallar), Estero San Vicente y Estero Temuco. Aguas abajo de la descarga del Canal Laja-Diguillín: Estero El Quemado, Estero Palpal y Estero Relbun. En dicho diagrama unifilar se observa como el río Diguillín, aguas arriba de la ubicación de Embalse Zapallar, cuenta con dos estaciones de control fluviométrica que son parte de la red de monitoreo DGA: Estero Renegado, río Diguillín en San Lorenzo y Diguillín en la Invernada. Dichas estaciones permitieron caracterizar desde un punto de vista hidro-meteorológico preliminar la zona de estudio, previo a la Etapa 2 del proyecto, en la que se realizarán correcciones de productos meteorológicos grillados y generación de caudales mediante simulación continua a nivel diario y mensual.

Figura 5-1: Precipitación, Temperatura, Caudal Anual y Curva de Variación Estacional de Río Diguillín en San Lorenzo



Fuente: Elaboración propia a partir de DGA-BNA y explorador camels.cr2.cl

Figura 5-2: Diagrama Unifilar Hidrográfico de Principales Ríos y Esteros Afluentes a la Zona De Estudio



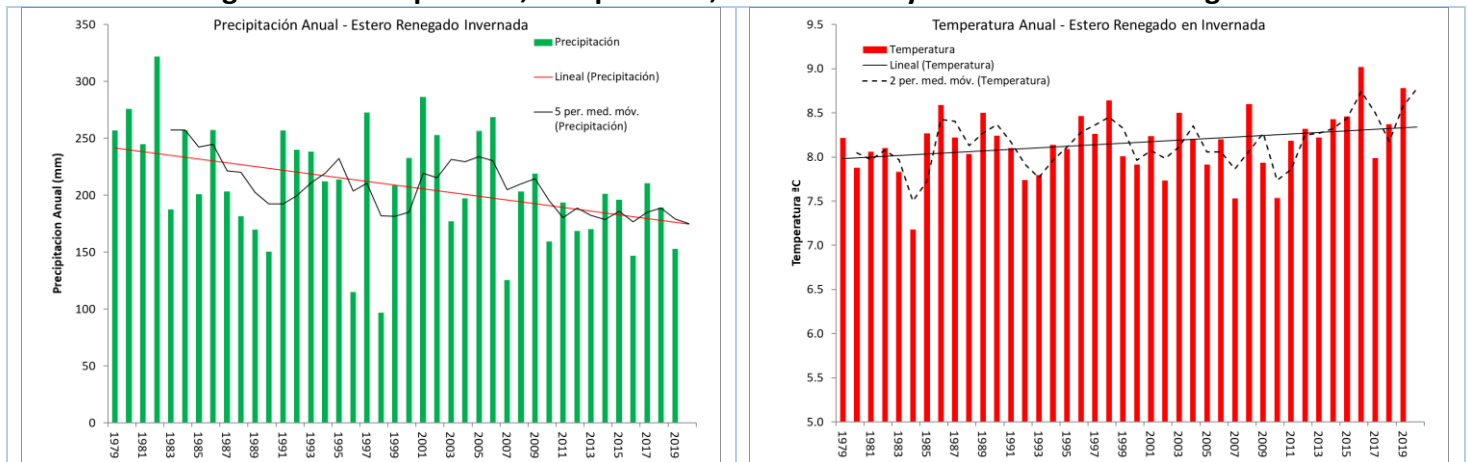
Fuente: Elaboración propia a partir de información recopilada con DOH-DR

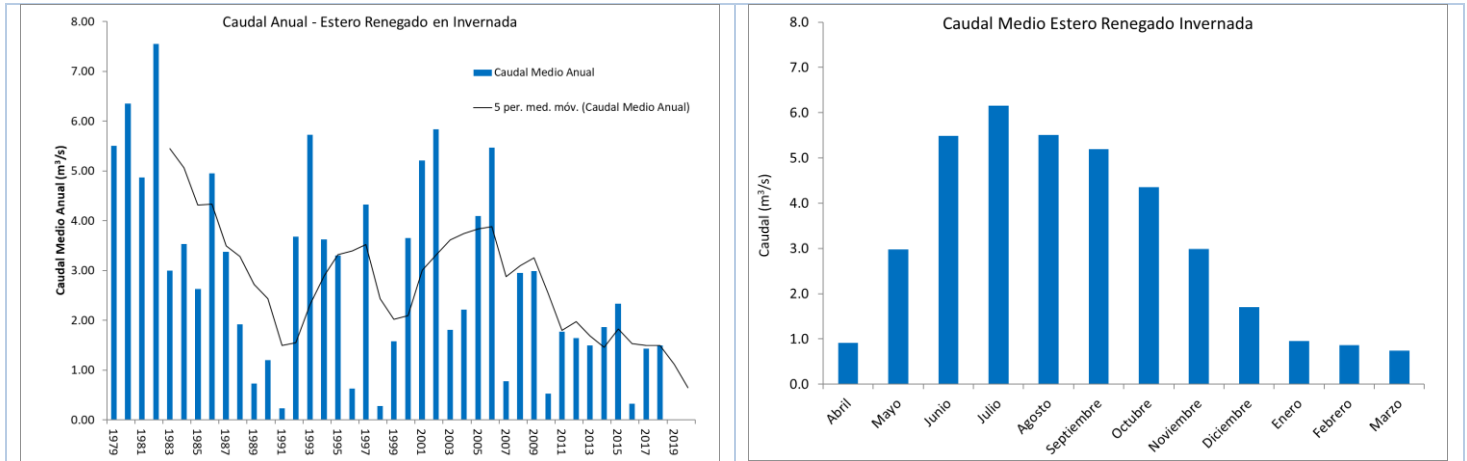
En las Figura 5-1, Figura 5-3 y Figura 5-4 se muestran las series temporales de precipitación, temperatura y caudal medio anual de las cuencas Estero río Diguillín en San Lorenzo, Estero Renegado y Estero Diguillín en Longitudinal.

En los tres gráficos de precipitación representativos de las cuencas se observa una tendencia sostenida de la precipitación durante las últimas tres décadas. En la misma línea el aumento sostenido de la precipitación también se observa en las tres cuencas. Como consecuencia de la disminución de la precipitación y del aumento en la temperatura han traído consigo la disminución sostenida de los caudales registradas por las tres estaciones de la Dirección General de Aguas: río Diguillín en San Lorenzo, Estero Renegado y río Diguillín en Longitudinal.

Considerando el paradigma de amenaza, exposición y vulnerabilidad se observa que la zona de estudio se encuentra bajo una alta amenaza. Por otro lado, servicios ambientales han reforzado la idea de alta vulnerabilidad a nivel país. En el caso de la cuenca de estudio no cuenta con infraestructura de embalses para riego, o contención de crecidas y eventos extremos, por lo que la vulnerabilidad del sector se considera alta.

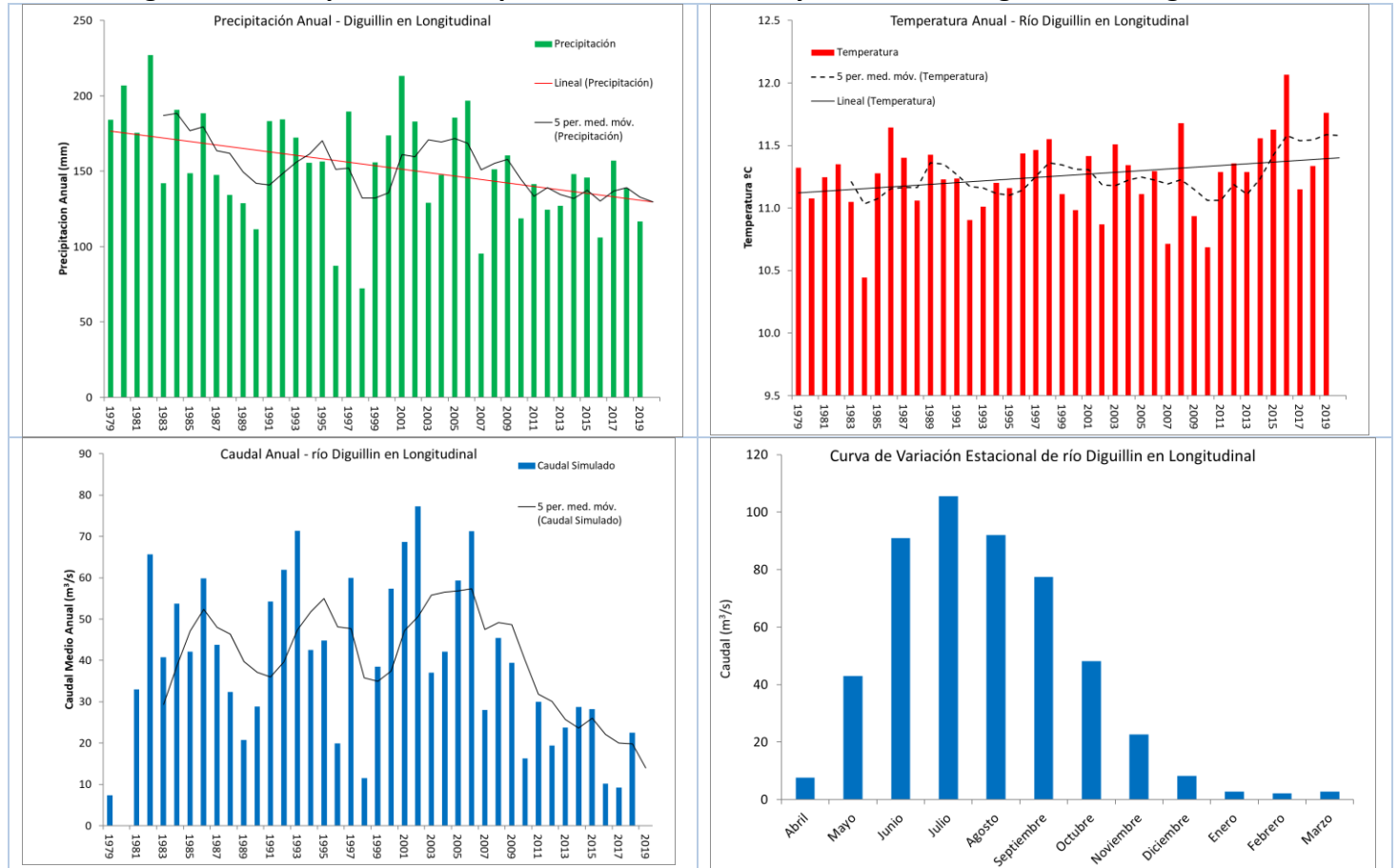
Figura 5-3: Precipitación, Temperatura, Caudal anual y mensual Estero Renegado





Fuente: Elaboración propia a partir de DGA-BNA y explorador camels.cr2.cl

Figura 5-4: Precipitación, Temperatura, Caudal anual y mensual río Diguillín en Longitudinal



Fuente: Elaboración propia a partir de DGA-BNA y explorador camels.cr2.cl

6. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDRO METEOROLOGICA

En la Tabla 6-1 se muestra la información recopilada con datos de temperatura provenientes de registros DGA. En la Tabla 6-2 se muestra la información de precipitación recopilada a nivel diario. La información recopilada a partir de los registros oficiales sirvió para el proceso de validación de productos grillados CR2met que se debe llevar a cabo para la generación de las forzantes del modelo hidrológico.

Tabla 6-1: Información de Estaciones con Información de Temperatura Recopiladas

BNA	ESTACION	Período Informado	
8105004	CARACOL	1987	2021
8113001	COIHUECO EMBALSE	1980	2012
7331002	DIGUA EMBALSE	1980	2017
8130006	DIGUILLIN	1980	2023
7345001	PARRAL	1980	2017
7350006	BULLILEO EMBALSE	2004	-

Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA

Tabla 6-2: Información de Estaciones con Información de Precipitación Recopiladas

BNA	ESTACION	Período Informado	
7350006	BULLILEO EMBALSE	1980	2023
7350007	BULLILEO EMBALSE (Lago)	2012	2023
8105005	CAMAN	1992	2023
8117009	CANAL DE LA LUZ EN CHILLAN	2008	2023
8135004	CANCHA LOS LITRES	1993	2023
8105004	CARACOL	1987	2023
8117002	CHILLAN VIEJO	1980	2023
8133003	CHILLANCITO	1980	2023
8123004	CHOLGUAN	1980	2023
8141002	COELEMU	1980	2023
8113001	COIHUECO EMBALSE	1980	2023
7331002	DIGUA EMBALSE	1980	2023
8130006	DIGUILLIN	1980	2023
8130003	FUNDO ATACALCO	1980	2022
8124004	LAS CRUCES	1993	2023
8130004	LAS TRANCAS	1980	2023
8142001	MANGARRAL	1992	2023
8124005	MAYULERMO	1992	2023
8118003	MILLAUQUEN	1992	2023

BNA	ESTACION	Período Informado	
8135003	NUEVA ALDEA	1980	2023
7345001	PARRAL	1980	2023
8132002	PEMUCO	1980	2023
8140005	PORTEZUELO	2011	2023
8117006	RIO CHILLAN EN ESPERANZA N 2	2009	2023
8130002	RIO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	2009	2023
8141001	RIO ITATA EN COELEMU	2009	2023
8381003	RIO LAJA AG.ARR. DEL SALTO (REC.R.LAJA)	2009	2021
7350001	RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	2001	2023
8106002	RIO ÑUBLE EN SAN FABIAN N 2	2001	2023
7330001	RIO PERQUILAUQUEN EN SAN MANUEL	2009	2023
8118004	SAN AGUSTIN DE PUÑUAL	1993	2023
8106003	SAN FABIAN	1980	2023
8320001	SAN LORENZO EN BIO-BIO	1992	2023
7332003	SAN MANUEL EN PERQUILAUQUEN	1980	2023
8122002	TRUPAN	1980	2023
8122003	TUCAPEL	1980	2023

Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA

En la Tabla 6-3 se muestra la información de estaciones fluviométricas, mientras que en la tabla Tabla 6-4 se muestran las principales observaciones de la estadística gestionada a través de DOH con DGA.

Tabla 6-3: Información de Estaciones Fluviométricas Recopiladas

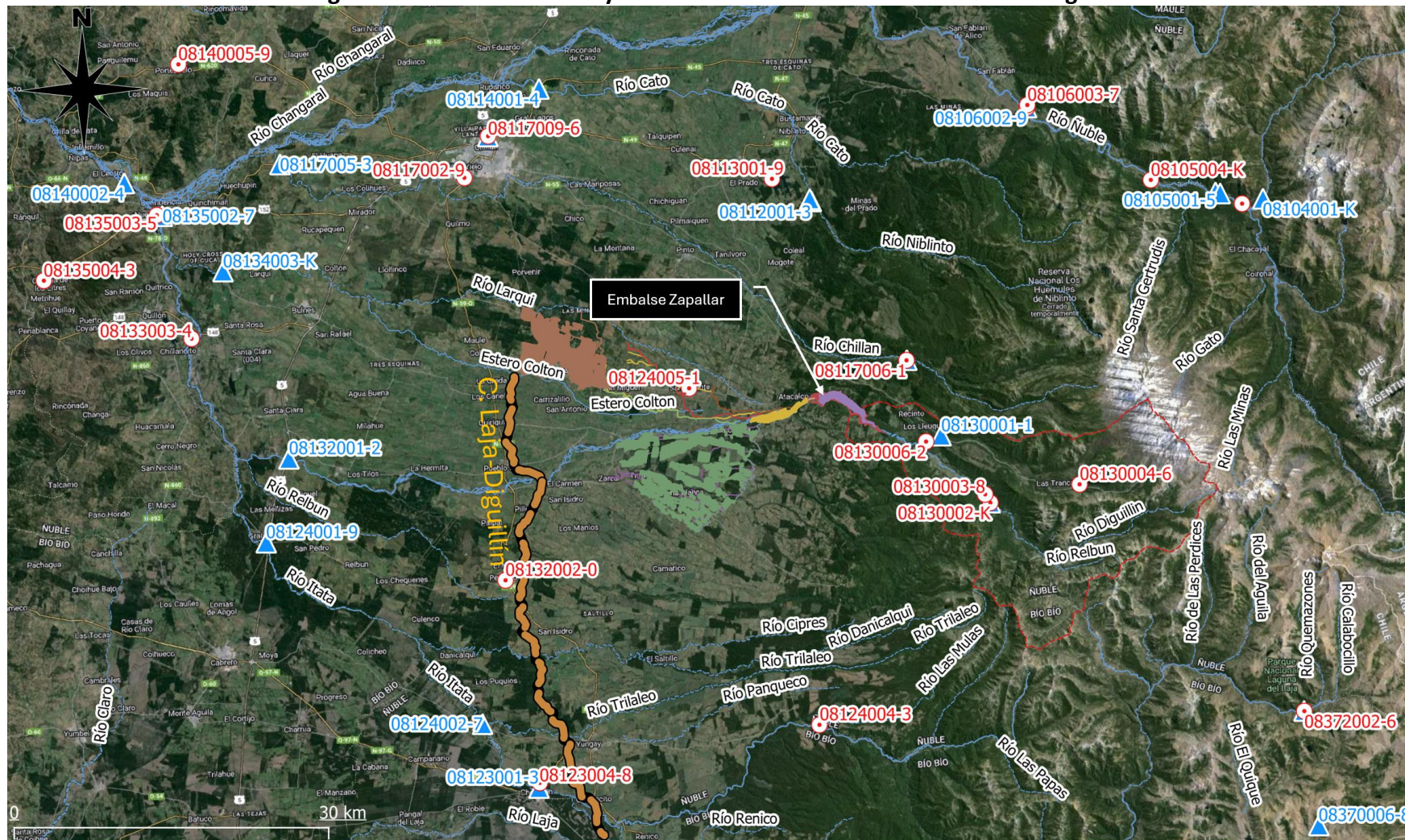
Código BNA	ESTACION	Período Informado	
7330001	RIO PERQUILAUQUEN EN SAN MANUEL	1980	2022
7331004	CANAL ALIMENTADOR DIGUA	2011	2022
7332001	RIO PERQUILAUQUEN EN GNIQUEN	1980	2022
7350001	RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	1980	2022
7350002	RIO BULLILEO EN SANTA FILOMENA	1980	2022
7350003	RIO LONGAVI EN EL CASTILLO	1980	2022
8104001	RIO SAUCES ANTES JUNTA CON ÑUBLE	1985	2023
8105001	RIO ÑUBLE EN LA PUNILLA	1980	2023
8105006	RIO ÑUBLE EN LA PUNILLA 2	2018	2022
8106001	NUBLE EN SAN FABIAN N°1	-	-
8106002	RIO ÑUBLE EN SAN FABIAN N 2	1999	2023
8112001	RIO NIBLINTO ANTES CANAL ALIMENTADOR EMB. COIHUECO	1980	2023
8112002	CANAL ALIMENTADOR EMBALSE COIHUECO EN BOCATOMA	1980	2023

Código BNA	ESTACION	Período Informado	
8114001	RIO CATO EN PUENTE CATO	1980	2023
8117006	RIO CHILLAN EN ESPERANZA N 2	2004	2023
8117009	CANAL DE LA LUZ EN CHILLAN	2008	2023
8122001	CANAL ZAÑARTU SALIDA LAGUNA TRUPAN	1981	2023
8123001	RIO ITATA EN CHOLGUAN	1980	2023
8124001	RIO ITATA EN GENERAL CRUZ	1980	2023
8124002	RIO ITATA EN TRILAEO	1982	2023
8130001	RIO RENEGADO EN INVERNADA	1980	2023
8130002	RIO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	1980	2023
8132001	RIO DIGUILLIN EN LONGITUDINAL	1981	2023
8134003	RIO LARQUI EN SANTA CRUZ DE CUCA	1987	2023
8135002	RIO ITATA EN BALSA NUEVA ALDEA	1980	2023
8141001	RIO ITATA EN COELEMU	1985	2023
8370006	CANAL ALTO POLCURA	2003	2021
8371001	CANAL DE DESCARGA CENTRAL ANTUCO	2003	2022
8372002	RIO POLCURA EN CUATRO JUNTA	2003	2021
8374002	CANAL DE DESCARGA CENTRAL EL TORO	2003	2022
8375001	RIO POLCURA A. DESC. CENTRAL EL TORO	2003	2021
8375002	CANAL ABANICO EN KM 049	2003	2021
8375004	CANAL ZAÑARTU DESPUES BOCATOMA RIO LAJA	2003	2023
8375005	CANAL COLLAO	2003	2021
8375006	CANAL MIRRIHUE	2003	2021
8376001	RIO RUCUE EN CAMINO A ANTUCO	1985	2023
8380001	RIO LAJA EN TUCAPEL	2000	2014
8380002	CANAL LAJA CAMINO A TUCAPEL	1980	2021
8380005	CANAL LAJA-DIGUILLÍN	2005	2021
8380006	RIO LAJA EN TUCAPEL 2	2015	2022
8381003	RIO LAJA AG.ARR. DEL SALTO (REC.R.LAJA)	2009	2022

Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA

En la Figura 6-1 se muestra la ubicación de estaciones con información hidro-meteorológica de interés para la zona de estudio. La información de caudal aparece con su respectivo código BNA en azul, mientras que la información de estaciones pluviométricas y de temperatura aparecen en rojo. En la Tabla 6-4 se muestra las principales observaciones de las estaciones fluviométricas con información en la zona. La información hidro-meteorológica recopilada se presenta en el Anexo 2.

Figura 6-1: Área de Estudio y Ubicación de Estaciones Hidro-Meteorológicas



Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA

Tabla 6-4: Observaciones Sobre Información Fluviométrica Recopilada

ESTACION	Observaciones
RIO PERQUILAUQUEN EN SAN MANUEL	Estadística incompleta año 2022. No hay estadística año 2023
CANAL ALIMENTADOR DIGUA	No hay estadística año 2023
RIO PERQUILAUQUEN EN GNIQUEN	No hay estadística año 2023
RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	No hay estadística año 2023
RIO BULLILEO EN SANTA FILOMENA	Existe un vacío de estadística entre los años 1985 y 2011. No hay estadística año 2023
RIO LONGAVI EN EL CASTILLO	No hay estadística año 2023
RIO SAUCES ANTES JUNTA CON ÑUBLE	Estadística incompleta año 2023
RIO ÑUBLE EN LA PUNILLA	Estadística incompleta año 2023
RIO ÑUBLE EN LA PUNILLA 2	No hay estadística año 2023
NUBLE EN SAN FABIAN N°1	-
RIO ÑUBLE EN SAN FABIAN N 2	Estadística incompleta año 2023
RIO NIBLINTO ANTES CANAL ALIMENTADOR EMB. COIHUECO	No hay estadística en años 1999, 2014 y 2015. Existe un vacío de estadística entre los años 2003 y 2012. Estadística incompleta año 2023
CANAL ALIMENTADOR EMBALSE COIHUECO EN BOCATOMA	Existe un vacío de estadística entre los años 1983 y 2012
RIO CATO EN PUENTE CATO	Estadística incompleta año 2023
RIO CHILLAN EN ESPERANZA N 2	Estadística incompleta año 2023
CANAL DE LA LUZ EN CHILLAN	Estadística incompleta año 2022 y 2023
CANAL ZAÑARTU SALIDA LAGUNA TRUPAN	Existe un vacío de estadística entre los años 2000 y 2012. Estadística incompleta año 2023
RIO ITATA EN CHOLGUAN	Estadística incompleta año 2023
RIO ITATA EN GENERAL CRUZ	Estadística incompleta año 2023
RIO ITATA EN TRILALEO	Estadística incompleta año 2023
RIO RENEGADO EN INVERNADA	Estadística incompleta año 2023
RIO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	Estadística incompleta año 2022 y 2023
RIO DIGUILLIN EN LONGITUDINAL	Estadística incompleta año 2022 y 2023
RIO LARQUI EN SANTA CRUZ DE CUCA	Existe un vacío de estadística entre los años 1999 y 2002, y entre los años 2006 y 2022. Estadística incompleta año 2023
RIO ITATA EN BALSA NUEVA ALDEA	Estadística incompleta año 2023
RIO ITATA EN COELEMU	Estadística incompleta año 2023
CANAL ALTO POLCURA	No hay estadística año 2022 y 2023
CANAL DE DESCARGA CENTRAL ANTUCO	Estadística incompleta año 2022. No hay estadística año 2023
RIO POLCURA EN CUATRO JUNTA	No hay estadística años 2012, 2014, 2022 y 2023. Estadística incompleta año 2021
CANAL DE DESCARGA CENTRAL EL TORO	Estadística incompleta año 2022. No hay estadística año 2023
RIO POLCURA A. DESC. CENTRAL EL TORO	Estadística incompleta año 2021. No hay estadística año 2022 y 2023
CANAL ABANICO EN KM 049	No hay estadística año 2022 y 2023

ESTACION	Observaciones
CANAL ZAÑARTU DESPUES BOCATOMA RIO LAJA	-
CANAL COLLAO	No hay estadística año 2022 y 2023
CANAL MIRRIHUE	No hay estadística año 2022 y 2023
RIO RUCUE EN CAMINO A ANTUCO	No hay estadística año 2011 y 2012. Estadística incompleta año 2022 y 2023
RIO LAJA EN TUCAPEL	-
CANAL LAJA CAMINO A TUCAPEL	Existe un vacío de estadística entre los años 1983 y 2002. No hay estadística año 2022 y 2023
CANAL LAJA-DIGUILLÍN	No hay estadística año 2022 y 2023
RIO LAJA EN TUCAPEL 2	Estadística incompleta año 2022. No hay estadística año 2023
RIO LAJA AG.ARR. DEL SALTO (REC.R.LAJA)	Estadística incompleta año 2009. No hay estadística año 2010, 2011, 2012 y 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA

7. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES

El presente capítulo corresponde a la recopilación y análisis crítico de antecedentes que consideró los estudios indicados en la Tabla 7-1, que de acuerdo a los Términos de Referencia corresponden a los estudios mínimos a revisar para el presente estudio, sin embargo, se complementó con información relativa a otros estudios y acuerdos vigentes de interés para la zona de estudio, presentados en la Tabla 7-2.

Tabla 7-1: Estudios Considerados en la Revisión de Antecedentes

#	Institución/ Empresa	Estudio
1	R&Q Ingeniería	Modelación y Evaluación Agroeconómica del Embalse Zapallar, VII Región del Bío-Bío – Informe Final (2017).
2	MN Ingenieros	Estudios Actualización y Complementación Diseño Embalse Zapallar, Región del Bío-Bío – Informe Final (2018).
3	Gestión Ambiental Estratégica Consultores	Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Embalse Zapallar (2020).
4	R&Q Ingeniería	Planillas de Resultados Modelo WEAP. “Modelación y Evaluación Agroeconómica del Embalse Zapallar, VII Región del Bío-Bío – Informe Final (2017).
5	Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas	Determinación de Regla Operacional para el Embalse Zapallar Región de Ñuble (2021).

Fuente: Recopilación Informes TYPASA 2024

Tabla 7-2: Estudios Adicionales Considerados en la Revisión de Antecedentes

#	Institución/ Empresa	Estudio
1	Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas	Homologación del Cálculo Hidrológico Para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile. SIT N°524 (2022).
2	Universidad de Católica de la Santísima Concepción/CIBAS/Universidad de Concepción	Presentación Software Para la Gestión del Sistema Río-Lago Laja Para la Seguridad Hídrica Bajo La Actual y Futura Crisis Climática (2023)
3	DGA-UC-UCSC	Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Biobío (2021)

#	Institución/ Empresa	Estudio
4	DOH-Enel	Acuerdo de Operación Y Recuperación del Lago Laja Complementa Convenio De 1958
5	SEA	Criterio de Evaluación en el SEIA: Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico
6	SEA	Guía Metodológica Para la Consideración del Cambio Climático en el SEIA

Fuente: Recopilación Informes TYP SA 2024

7.1. MODELACIÓN Y EVALUACIÓN AGROECONÓMICA DEL EMBALSE ZAPALLAR, VII REGIÓN DEL BÍO-BÍO – INFORME FINAL, R&Q INGENIERÍA (2017)

7.1.1. ASPECTOS RELACIONADOS A LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

7.1.1.1. CONTEXTO GENERAL

En la década de 1990, el Ministerio de Obras Públicas, mediante la Dirección de Obras Hidráulicas, inició el proyecto Laja-Diguillín que contemplaba la construcción de un canal matriz con capacidad de porteo de 65 m³/s para satisfacer el riego de la 63.300 ha de las comunas de Yungay, Pemuco, El Carmen, Bulnes y San Ignacio de la provincia del Ñuble, VIII Región (actualmente, estas comunas pertenecen a la Región del Ñuble). Durante el diseño, se redujo la capacidad del canal a 40 m³/s por razones técnicas y económicas, y se consideró la construcción de un embalse de cabecera con una capacidad de 80 Hm³. La construcción del proyecto comenzó en enero de 1996.

En los años 2001 – 2002 se llevó a cabo el estudio de Medio Término. Como resultado, se postergó la construcción el embalse Diguillín o Zapallar y se redujeron las hectáreas beneficiadas a 44.630, en las mismas comunas mencionadas anteriormente.

Los estudios de la DOH identificaron que el mejor sitio para el embalse estaría en una angostura del Sistema de riego Laja Diguillín, en el río Diguillín, llamada Zapallar, a 12 Km aguas abajo de su confluencia con el río Renegado, ambos pertenecientes a la cuenca del Río Itata, ubicado en la Región del Biobío, Provincia de Ñuble, en la comuna de Pinto (actualmente Región del Ñuble).

El proyecto Laja-Diguillín ha completado una estructura que beneficia el riego de 29.340 ha y está desarrollando la ingeniería de detalle para el riego de las 15.290 ha restantes.

El objetivo general del estudio era elaborar un modelo simplificado de oferta y demanda hídrica del embalse Zapallar para la DOH, asociado a este modelo se debió realizar el estudio agroeconómico de los sectores de riego del Sistema Laja-Diguillín, para finalmente llevar a cabo

las evaluaciones económicas de la obra acorde a las metodologías vigentes del Ministerio del Desarrollo Social.

El área de estudio se dividió en 7 áreas que se ubican aguas abajo y aguas arriba del canal Matriz Laja-Diguillín y se agrupan en 3 categorías:

- **Hectáreas Mejoradas:** son aquellas que se regaban de forma deficitaria con aguas pertenecientes al río Diguillín (20.340 ha) y su seguridad aumentó a un 85% con el proyecto Laja-Diguillín.
- **Hectáreas Adicionales:** son predios de agricultores que cuentan con derechos de aprovechamiento de aguas del río Diguillín y sus afluentes, pero que son insuficientes para regar la totalidad de sus predios. Los usuarios pertenecen a las comunidades de aguas que integran la junta de vigilancia del río Diguillín y sus afluentes.
- **Hectáreas Blancas:** son los predios no regados, no cuentan con derechos de aprovechamiento de aguas de tipo consuntivo de ejercicio permanente y continuo del río Diguillín y sus afluentes.

Las zonas que se beneficiarán directamente por el embalse denominadas áreas de nuevo riego se extienden desde el embalse Zapallar hasta el canal matriz Diguillín – Coltón. Las zonas denominadas “hectáreas blancas” y “hectáreas adicionales” se encuentran principalmente bajo el canal matriz Diguillín – Coltón hasta el río Itata, estas zonas complementarían y mejorarán su seguridad de riego. También se incluyen dos superficies menores en el costado sur del río Diguillín.

Para modelar la zona de estudio se utilizó el modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation And Planning System, <https://www.weap21.org/>). Este modelo se consideró adecuado porque cumple con los requisitos necesarios tanto para la modelación hidrológica como para la gestión de recursos hídricos. WEAP permite representar los caudales naturales afluentes y la administración de recursos, considerando la distribución espacial de los mismos, a través de una interfaz intuitiva y fácil de desarrollar. El uso de WEAP es particularmente relevante para este estudio, ya que facilita la evaluación de los potenciales impactos de la construcción del embalse Zapallar en las zonas agrícolas ubicadas aguas abajo. Este modelo no solo permite una simulación detallada de los caudales naturales, sino que también integra la gestión de recursos hídricos, lo que es crucial para comprender cómo la construcción del embalse podría afectar la disponibilidad de agua para la agricultura.

Este modelo es el primero de este tipo que se desarrolla para la zona, estableciendo una base sólida para la evaluación de los potenciales impactos económicos y la seguridad de riego. Permite identificar y cuantificar los posibles efectos de la construcción del embalse Zapallar,

proporcionando información esencial para la toma de decisiones y la planificación de estrategias de mitigación y adaptación en las zonas agrícolas afectadas.

7.1.1.2. INFORMACIÓN BASE

7.1.1.2.1 DEMANDAS AGRÍCOLAS

Localización geográfica, extensión y límites

El estudio incluye las comunas de Bulnes, San Ignacio y El Carmen, en las que se encuentran las áreas de riego que se beneficiarán por el proyecto del embalse Zapallar. Los límites están representados por características geográficas como esteros y ríos: sector norte Río Larqui, sector sur Estero Pal Pal en la comuna de El Carmen y el Río Diguillín en la comuna de Bulnes, sector oeste Río Itata y sector este la precordillera de los Andes y el río Diguillín en la comuna de Pinto.

Servicios y actividades agropecuarias

La principal actividad económica de la región es la agropecuaria, con presencia masiva de pequeños agricultores y gran diversidad agrícola. También se identificaron cultivos industriales, cereales y la implementación de negocios asociados a la exportación.

Situación Político – Administrativa Actual

Conforme con la Ley 21.033 en septiembre de 2018 entra en régimen la nueva Región de Ñuble, que comprende las provincias de Diguillín, Punilla e Itata. La región está formada por 21 comunas que componían la provincia del Ñuble, su capital regional es la comuna de Chillán.

En cuanto a la división del territorio, la región comprende un área de 13.178,5 km², que corresponde a un 35.6% de la antigua región del Biobío. Se subdivide en tres provincias: Diguillín con una superficie de 5.229,5 km² (39,7%); Punilla con 5.202,5 km² (39,5%) e Itata con 2.746,5 km² (20,8%).

- Provincia de Diguillín: Chillán, Bulnes, Chillán Viejo, El Carmen, Pemuco, Pinto, Quillón, San Ignacio y Yungay.
- Provincia Punilla: San Carlos, Coihueco, Ñiquén, San Fabián y San Nicolás.
- Provincia de Itata: Quirihue, Cobquecura, Coelemu, Ninhue, Portezuelo, Ránquil y Treguaco.

Trabajo de terreno

En este estudio se realizó un extensivo trabajo en terreno, a través de dos campañas de recolección de información. Estas campañas, en lo referente a modelación, son principalmente encuestas realizadas a todos los agricultores, las cuales posteriormente fueron sistematizadas y utilizadas como información base. La información obtenida tiene un alto nivel de detalles:

número de predios, superficie plantada en cada uno, tipos de cultivo y nivel tecnológico de procesos. Se realizaron dos campañas:

1ª Campaña

La primera campaña se orientó hacia el diagnóstico del área de estudio. Durante esta fase, se realizaron encuestas detalladas, se definió toda la zona de estudio y se estableció el alcance del proyecto. Además, se recolectó información base agrícola, incluyendo áreas cultivadas, tipos de cultivo y una primera estimación de precios.

Los resultados de la encuesta es que la agricultura está en proceso de transformación, de tradicional a moderna, tecnificada y rentable. El nivel tecnológico es bajo en los predios pequeños, medio en los medianos y grandes, excepto en agricultores de gran tamaño.

La actividad agropecuaria en los sectores con riego se baja en rubros como el trigo y la papa. Las plantaciones frutales tienen una marcada tendencia al crecimiento en los predios ubicados bajo cota del canal Laja – Diguillín, dado por la alta seguridad de riego. Las especies con mayor potencial son el avellano europeo y el arándano en los predios medianos y grandes; en los predios menores es la frambuesa y la frutilla. En los sectores secanos las especies relevantes son el trigo, la avena y los pastos naturales.

El desarrollo es incipiente, en los predios de gran tamaño con la incorporación de tecnología moderna (aspersión o aspersores gigantes), en los predios menores regados por goteo. La condicionante para que el proceso se desarrolle ha sido el incremento de la disponibilidad de agua por el aporte del canal Laja – Diguillín.

El sector más deprimido y limitado es el seco que se ubica bajo cota del futuro embalse Zapallar, en la ribera derecha, algunos agricultores riegan pequeñas áreas mediante pozos o bombas de algunos esteros, esto permite cultivos de pequeñas chacras de autoconsumo, los predios son de pequeño tamaño.

En el sector bajo cota canal del embalse Zapallar, ribera izquierda, las propiedades son de mayor tamaño y cuentan con más recursos hídricos. El estero San Vicente aporta agua para el cultivo de remolacha, espárragos, maíz, etc. Las extensiones sin riego se dedican al trigo y avena.

En cuanto a las aspiraciones futuras, dado que cuentan con agua de riego, los encuestados eligieron los mismos rubros que practican. Incliniéndose por cultivos anuales, papas y trigo. En tanto, los de seco optan por empastadas para tener más ovejas. Un pequeño porcentaje postula cambiar frutales con especies conocidas y unos pocos por las hortalizas.

El estudio concluye que la construcción del embalse Zapallar deberá ir acompañado de un Programa de Capacitación y Asistencia Técnica, que los capacite en técnicas de riego y en

tecnologías agrícolas modernas, para la reconversión de la agricultura tradicional por una moderna, tecnificada y orientada al mercado, nacional y de exportación.

También se diagnosticó la infraestructura relevante -canales, bocatomas, etc.- existente en la zona, así como también un estudio de mercado, relevante para posteriores evaluaciones económicas del impacto del embalse.

El objetivo del estudio de mercado fue identificar la estructura de cultivos, plantaciones y explotaciones ganaderas existentes en el área del proyecto. Esto se realizó con el propósito de evaluar los beneficios económicos que genera el agua del río Diguillín.

Descripción de la obra de regulación proyectada

La obra de regulación y la infraestructura de riego sobre el río Diguillín estará formada por un embalse de cabecera denominado Embalse Zapallar, tendrá una capacidad de 80 Hm³, con una red de bocatomas y canales de riego a lo largo del río Diguillín.

Existen estudios que definen, tanto la obra de regulación y la red de riego de la zona, destacan los siguientes como los más importantes:

- Estudio Diseño del Embalse Diguillín en Sitio 4, MN Ingenieros, 2001.
- Estudio Definición de alternativas de Ingeniería para áreas blancas y áreas adicionales, SIGA Ingenieros Consultores, 2012.
- Estudio de Ingeniería de las adecuaciones del sistema de riego del proyecto Laja Diguillín, REG Ingenieros Consultores, 2001.

Generalidades de la obra

El objetivo principal del proyecto es el mejoramiento del riego y con ello la producción agropecuaria de la zona agrícola del valle central de la provincia del Ñuble, mediante el aumento de la seguridad de riego de las zonas beneficiadas por el embalse.

El embalse de regulación busca ser un complemento al canal matriz Laja – Diguillín, aliviando la demanda hídrica sobre la cuenca del río Laja y mejorando las condiciones para los agricultores de las cuencas de los ríos Laja y Biobío.

2ª Campaña

La segunda campaña se enfocó en generar los insumos necesarios para la modelación. Esta campaña se dividió en tres partes principales: una campaña de terreno, una caracterización económica de la situación actual agropecuaria y el desarrollo de la hidrología, que incluyó la modelación.

A través de la sistematización de las encuestas se definieron predios promedio con superficies representativas de distintos cultivos según lo identificado en las encuestas. Se identificaron cinco tipos de secciones en función de su situación hídrica: adicionales, mejoradas, blancas, ribera derecha y ribera izquierda. Además, los predios se clasificaron por tamaño y por nivel tecnológico, definiendo estándares de producción y, como principal producto relevante para la modelación, las demandas de agua de riego.

De particular interés resulta la división que hace de las zonas: cuentan con derechos de agua y no requieren más (sin solicitud), predios que cuentan con derechos, pero requieren más (con solicitud), predios que no tienen derechos de agua, pero con compromisos de obtención (blancos) y dos zonas que presentan potencial de desarrollo y no cuentan con derechos (ribera derecha y ribera izquierda). Es importante señalar que la información de la cantidad de predios se obtuvo de los registros de la DOH, la Junta de Vigilancia del Río Diguillín, los registros REA del Servicio Impuestos Internos (SII) y Ortofotos de CIREN.

En cuanto a las demandas agrícolas de agua de riego a nivel predial, se determinaron mes a mes, considerando los cultivos de las cinco subpoblaciones en que se ha subdividido el área.

A continuación, se muestra para cada subpoblación en que se ha dividido el área de estudio, la demanda de riego, el mes máximo de demanda, el área regada, la tasa de riego promedio ponderada, la tasa de riego máximo mensual, la tasa promedio anual medida en (l/s-ha), la tasa de riego máxima mensual, el caudal medio anual y finalmente el caudal máximo según el mes correspondiente.

a) Predios Blancos

Demanda de agua de riego: 17,6 millones de m³ anuales

Mes máx. demanda: Diciembre con 5,1 millones de m³

Área regada: 1.703 ha

Tasa de riego promedio ponderada: 10.315 m³/ha

Tasa de riego máx. mensual: 3.000 m³/ha (diciembre)

Tasa de riego promedio anual expresada en (l/s-ha): 0,33 l/s

Tasa de riego máx. mensual expresada en (l/s-ha): 1,12 l/s

Caudal medio anual: 0,56 m³/s

Caudal máx. mes dic: 1,91 m³/s

b) Predios Sin Adicional

Demanda de agua de riego: 18,6 millones de m³ anuales

Mes máx. demanda: Diciembre con 5,4 millones de m³

Área regada: 1.668 ha

Tasa de riego promedio ponderada: 11.160 m³/ha

Tasa de riego máx. mensual: 3.230 m³/ha (diciembre)

Tasa de riego promedio anual expresada en (l/s-ha): 0,35 l/s

Tasa de riego máx. mensual expresada en (l/s-ha): 1,21 l/s

Caudal medio anual: 0,59 m³/s

Caudal máx. mes dic: 2,01 m³/s

c) Predios con Adicional

Demanda de agua de riego: 16,9 millones de m³ anuales

Mes máx. demanda: Enero con 4,5 millones de m³

Área regada: 1.342 ha

Tasa de riego promedio ponderada: 12.612 m³/ha

Tasa de riego máx. mensual: 3.389 m³/ha (Enero)

Tasa de riego promedio anual expresada en (l/s-ha): 0,40 l/s

Tasa de riego máx. mensual expresada en (l/s-ha): 1,27 l/s

Caudal medio anual: 0,54 m³/s

Caudal máx. mes Enero: 1,70 m³/s

d) Predios en Secano Ribera Derecha

Demanda de agua de riego: 3,8 millones de m³ anuales (El agua no proviene del Río Diguillín sino de otras fuentes)

Mes máx. demanda: Enero con 1,17 millones de m³

Área regada: 304 ha

Tasa de riego promedio ponderada: 12.547 m³/ha

Tasa de riego máx. mensual: 3.856 m³/ha (enero)

Tasa de riego promedio anual expresada en (l/s-ha): 0,40 l/s

Tasa de riego máx. mensual expresada en (l/s-ha): 1,44 l/s

Caudal medio anual: 0,12 m³/s

Caudal máx. mes ENERO: 0,44 m³/s

e) Predios en Secano Ribera Izquierda

Demanda de agua de riego: 14,3 millones de m³ anuales (El agua no proviene del Río Diguillín sino de otras fuentes)

Mes máx. demanda: Enero con 4,44 millones de m³

Área regada: 1.477 ha

Tasa de riego promedio ponderada: 9.703 m³/ha

Tasa de riego máx. mensual: 3.000 m³/ha (enero)

Tasa de riego promedio anual expresada en (l/s-ha): 0,31 l/s

Tasa de riego máx. mensual expresada en (l/s-ha): 1,12 l/s

Caudal medio anual: 0,45 m³/s

Caudal máx. mes Enero: 1,66 m³/s

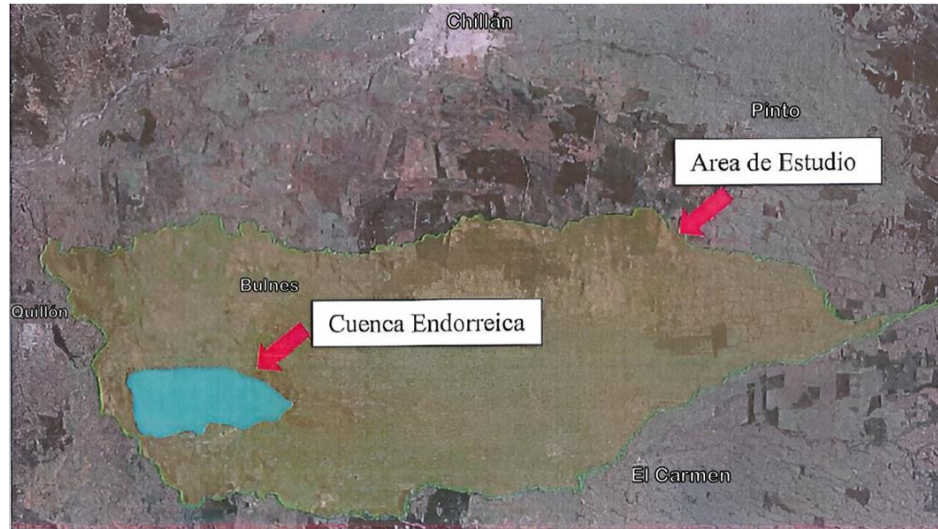
Además, se definieron otros insumos necesarios para la modelación los cuales se describen a continuación.

7.1.1.2.2 CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se define y caracteriza conforme a los términos de referencia, abarcando tanto la extensión del área de estudio propiamente dicha como la de las cuencas hidrográficas aportantes. Esta delimitación incluye zonas agrícolas y no agrícolas, así como el área correspondiente a cuatro cuencas hidrográficas.

Posee un área de 77.214 ha, de las cuales 35.516 ha corresponden a la superficie que se encuentra bajo riego. La diferencia que existe entre ambas áreas (41.698 ha) corresponde a otros usos de suelo, encontrándose que dentro de esta área existe la Laguna Santa Elena, el cual corresponde a una cuenca endorreica, cuya área (3.899 ha) se descontó del área 41.698 ha, debido a que su principal salida de este subsistema es la evaporación, evapotranspiración e infiltración, procesos que no participan en la escorrentía que llega a la red de drenaje.

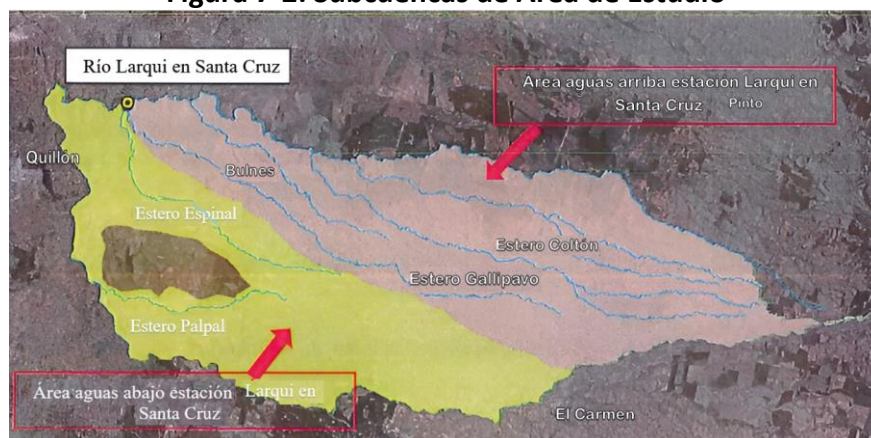
Figura 7-1: Área de Estudio y Área Aportante Laguna Endorreica



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

El área de estudio se determinó por la diferencia entre los 41.698 ha y los 3.899 ha, quedando un total de 37.799 ha. Esta superficie se incorporó al modelo como áreas que sólo generan escorrentía hacia la red de drenaje que existe dentro del área de estudio. Las cuencas de los esteros Gallipavo-Coltón y los esteros Espinal -Palpal, las cuales se localizan dentro del área de estudio, no consideraron para el área de riego. La estimación de las áreas aportantes de cada una de estas cuencas se estimó en función de una proporción de área de estudio que indica cuanta área se encuentra sobre la línea divisora de la estación fluviométricas Larqui en Santa Cruz y cuanta bajo esta misma.

Figura 7-2: Subcuencas de Área de Estudio



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Finalmente, las cuencas aportantes de caudales a la zona de estudio han sido adecuadamente caracterizadas. Las características topográficas de estas cuencas son similares, lo que facilita una evaluación coherente y uniforme del área de estudio en términos hidrológicos y geográficos.

7.1.1.2.3 FLUVIOMETRÍA

Se utilizó la información de los registros fluviométricos entregados por DGA. En la Tabla 7-3 se muestran las estaciones utilizadas con su información detallada.

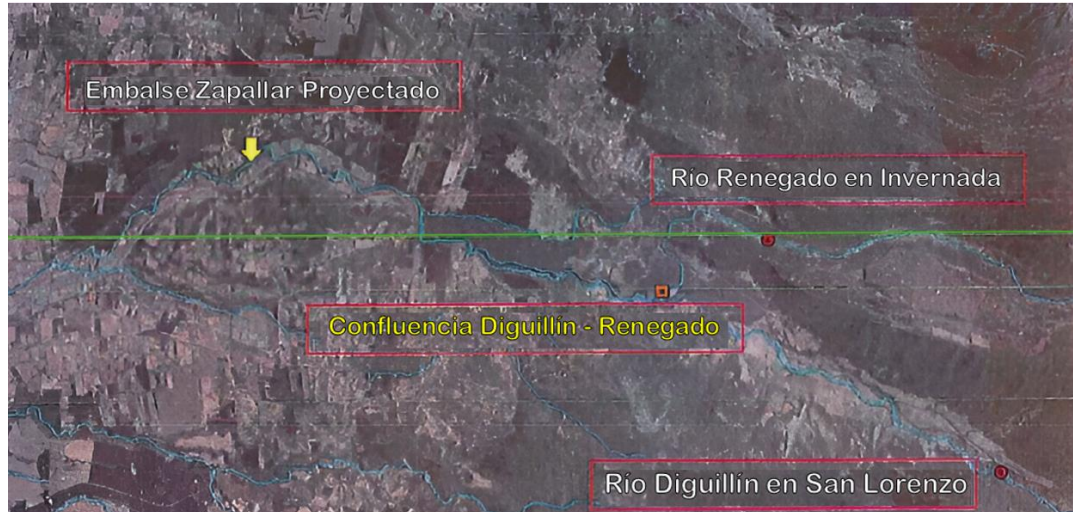
Tabla 7-3: Selección de Estaciones Fluviométricas

Código Cod. BNA	Nombre de la Estación	Región	Coordenadas				Altura m.n.s.m	Años de Registro	
			UTM Norte	UTM Este	Lat S	Long W		Inicio	Fin
083132001-2	Río Diguillín en Longitudinal	VIII	5916532	737722	36°52'00' ,	72°20'00''	80	1920	2015
08314003-K	Río Larqui en Santa Cruz de la Cuca	VIII	5935150	733769	36°42'00' ,	72°23'00''	25	1985	2015
08130002-K	Río Diguillín en San Lorenzo	VIII	5910343	270578	36°55'28' ,	71°34'32''	727	1946	2015
08130001-1	Río Rengado en Invernada	VIII	5917313	265957	31°51'38' ,	71°37'31''	710	1941	2015
08135002-7	Río Itata en Balsa Nueva Aldea	VIII	5937759	191585	-	-	29	1920	2015
08124001-9	Río Itata en General Cruz	VIII	5906906	201418	-	-	90	1956	2015

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Se identificaron seis estaciones relevantes para el análisis. Tras una evaluación detallada, se descartó una estación, debido a incoherencia en el rendimiento hídrico en comparación con las otras estaciones, y se completaron los datos faltantes en las restantes cuando fue necesario. Se identificaron dos estaciones clave para estimar los caudales afluentes al embalse proyectado (“Río Diguillín en San Lorenzo” Y “Río Renegado en Invernada”), aunque se observaron diferencias de rendimiento en uno de los ríos afluentes, específicamente en el río Renegado durante el invierno. Se definieron estaciones utilizadas para calibración (“Río Larqui en Santa Cruz de la Cuca”) y validación (“Río Itata en General Cruz” y “Río Itata en Balsa Nueva Aldea”), que son la base sobre la cual se realiza el ajuste del modelo para representar adecuadamente las condiciones bases de la cuenca. El estudio recomendó la actualización de los caudales con la información más reciente, así como la forma en que se utiliza en el modelo para definir periodos de calibración y validación.

Figura 7-3: Estaciones Disponibles, Punto de Confluencia y Zona de Embalse Proyectado



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

7.1.1.2.4 ALMACENAMIENTOS DENTRO DE LA CUENCA

Nival

Tras varios análisis se considera que la acumulación de recursos en las cuencas agrícolas es irrelevante al tener cotas significativamente inferiores a los 1900 msnm, siendo la estimación de la elevación de línea de nieve obtenida mediante múltiples métodos de cálculo expuestos por el “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométricas” DGA y el “Manual de Carreteras (MC) Volumen 3 punto 3.906.1”.

Superficial

El almacenamiento superficial corresponde al volumen de agua que se almacena temporalmente en la red de drenaje (ríos, esteros y canales) y todo aquel almacenamiento que se produce en lagos, lagunas, embalses y tranques que estén dentro del área de modelación.

Considerando lo anterior, se identificaron lagunas al poniente de la ruta 5, siendo una la laguna Santa Elena (160 ha) localizada en el sector de Santa Clara, comuna de Bulnes. Esta laguna no participa en la escorrentía que llega a la red de drenaje, por ende, el área aportante a esta laguna será descontada del área que genera escorrentía dentro del área de modelación.

El almacenamiento en los cauces de los ríos y canales para efectos de la modelación será considerado dentro de la variable “reúso” de las unidades hidrológicas.

Para el caso de pérdidas por conducción, se estimó que sería un coeficiente a calibrar dentro del modelo, junto a las pérdidas desde ríos y esteros.

Por otra parte, debido a que muchos parámetros no se encontraron disponibles, se realizó una estimación de la sección esperable para el caudal porteadado considerando una razón entre base y altura de 2:1, con una pendiente longitudinal típica de 0.2%, un coeficiente de Manning de 0.035 y un talud lateral de 1:1.

Además, se consideró como supuesto que el caudal de inicio se da en todo el trayecto y para el caso de tener un aporte intermedio se incluiría como el promedio de ambos.

Finalmente, se determina que el promedio de las pérdidas es 51% siendo este valor muy alto, por ende, se considera solo los valores bajo el 50%, generando un promedio de pérdidas del 31%. Para efectos de modelación se considera el valor anterior con un rango de variación entre 10% y 50%.

En el modelo WEAP la pérdida total de los canales fue incorporada en el primer tramo de cada canal. Para el caso de los ríos y esteros, la pérdida fue incorporada de manera continua a lo largo de su recorrido. Al existir una pérdida continua se establece que los predios ubicados aguas abajo del río, se encuentran con una mayor limitación de disponibilidad del recurso hídrico para riego, que los predios ubicados aguas arriba.

Subsuperficial

Entendiéndose que el almacenamiento subsuperficial corresponde al agua que se acumula en el suelo como humedad y se encuentra disponible para evapotranspiración. En este caso fue considerada como un porcentaje de la precipitación, es decir, que del 100% del agua caída en un mes, un cierto porcentaje queda disponible como humedad en el suelo para el uso de los cultivos.

Para la determinación del porcentaje de la lluvia, se utilizó la Tesis “Determinación del comportamiento del flujo base y su relación con variables de estado hidrológicas en la cuenca del río Diguillín, Región del Biobío, Chile” realizada por Carolina Morales quien optó al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola Mención en Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción (2014), sin embargo, debido a que en este estudio se realizó un balance mensual entre (1999-2008) y solo fueron determinados los coeficientes de escorrentía mes a mes y no como promedios mensuales que es lo que se requería. Se procedió a utilizar la información mencionada anteriormente y fueron estimados los coeficientes de promedios mensuales. Considerando que el agua disponible para evapotranspirar o para riego, corresponde a la diferencia entre el 100% y el porcentaje del coeficiente de escorrentía.

Tabla 7-4: Coeficientes de Escorrentía Mensual y Porcentaje de Agua Disponible

Año/Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1999	0.0%	1.0%	0.0%	0.0%	8.0%	25.0%	10.0%	18.0%	47.0%	16.0%	19.0%	0.0%
2000	0.0%	2.0%	0.0%	0.0%	11.0%	43.0%	29.0%	11.0%	28.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2001	3.0%	5.0%	6.0%	13.0%	46.0%	39.0%	65.0%	47.0%	2.0%	1.0%	3.0%	0.0%
2002	0.0%	6.0%	13.0%	6.0%	17.0%	48.0%	36.0%	53.0%	22.0%	39.0%	23.0%	6.0%
2003	9.0%	0.0%	2.0%	12.0%	5.0%	40.0%	37.0%	27.0%	18.0%	26.0%	7.0%	0.0%
2004	0.0%	0.0%	1.0%	12.0%	4.0%	25.0%	13.0%	12.0%	26.0%	18.0%	14.0%	8.0%
2005	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	16.0%	32.0%	44.0%	23.0%	25.0%	67.0%	28.0%	12.0%
2006	7.0%	0.0%	0.0%	8.0%	25.0%	36.0%	64.0%	41.0%	37.0%	17.0%	148.0%	0.0%
2007	0.0%	7.0%	13.0%	9.0%	17.0%	10.0%	9.0%	22.0%	24.0%	17.0%	6.0%	8.0%
2008	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	40.0%	19.0%	17.0%	16.0%	37.0%	4.0%	0.0%	0.0%
Promedio Coef. de escorrentía	1.9%	2.1%	3.5%	6.6%	18.9%	31.7%	32.4%	27.0%	26.6%	20.5%	24.8%	3.4%
Porcentaje de agua disponible para riego.	98.1%	97.9%	96.5%	93.4%	81.1%	68.3%	67.6%	73.0%	73.4%	79.5%	75.2%	96.6%

Fuente: R&Q Ingeniería (2017) a partir de Morales C. (2014)

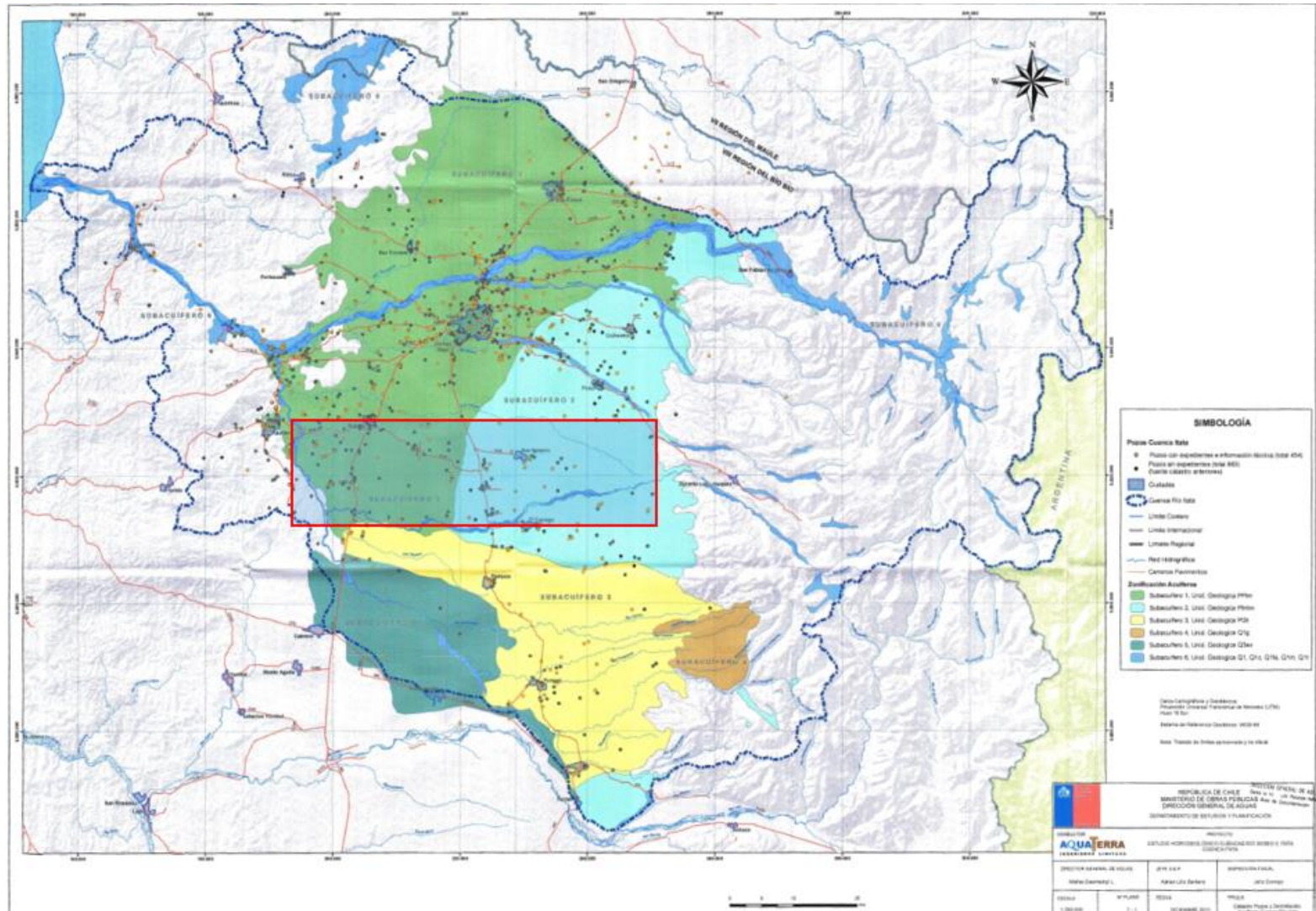
Subterráneo

Se identificó que las unidades geológicas de la zona son de alta impermeabilidad y no existe un acuífero definido. Sin embargo, los sectores por donde fluyen los ríos presentan depósitos fluvioaluvionales de permeabilidad media alta que, a efectos prácticos, configuran un macro acuífero dentro de la cuenca. Basándose en diversos antecedentes, se han identificado y cuantificado puntos de afloramiento de aguas subterráneas en ubicaciones específicas que pueden ser incorporadas al modelo hidrológico. Además, se han caracterizado los derechos de agua subterránea otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA) en la zona, organizándolos por sector.

En la Figura 7-5 y Figura 7-6 se muestran las delimitaciones de acuíferos, las curvas isofreáticas y el sentido de escurrimiento aguas subterráneas, y finalmente los rangos de profundidad del nivel estático para la cuenca río Itata.

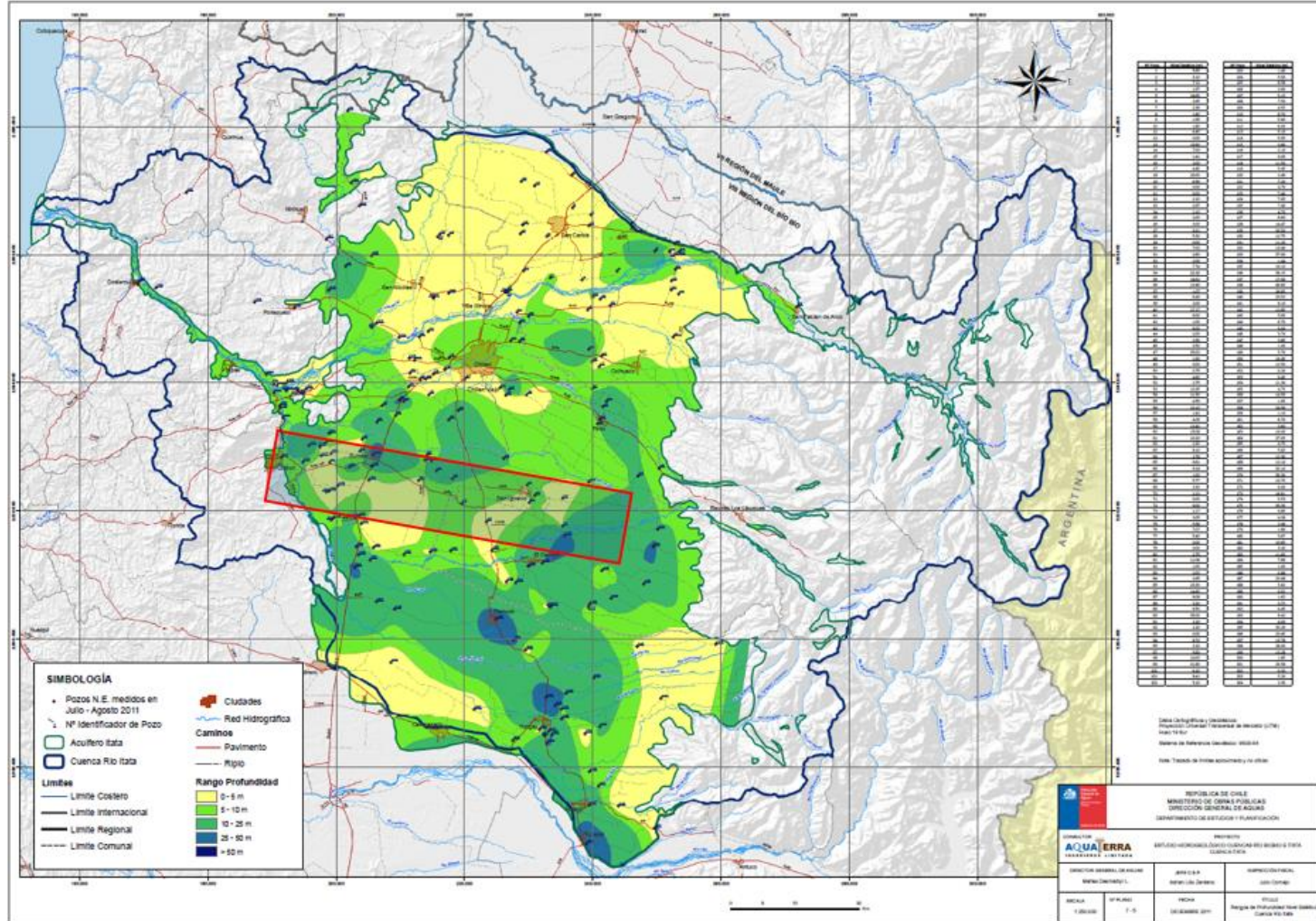
En el estudio de referencia (“Estudio Hidrogeológico Cuencas Biobío e Itata” realizado por Aquaterra Ingenieros Ltda-DGA,2011) se describen los sectores de recuperación (afloramiento), lo cual sumado a los caudales de recuperación presentados en el estudio de Proitata, 1992, permitió caracterizar estos sectores.

Figura 7-4: Delimitación Acuíferos Cuenca Río Itata. Línea Roja Corresponde a Área de Estudio



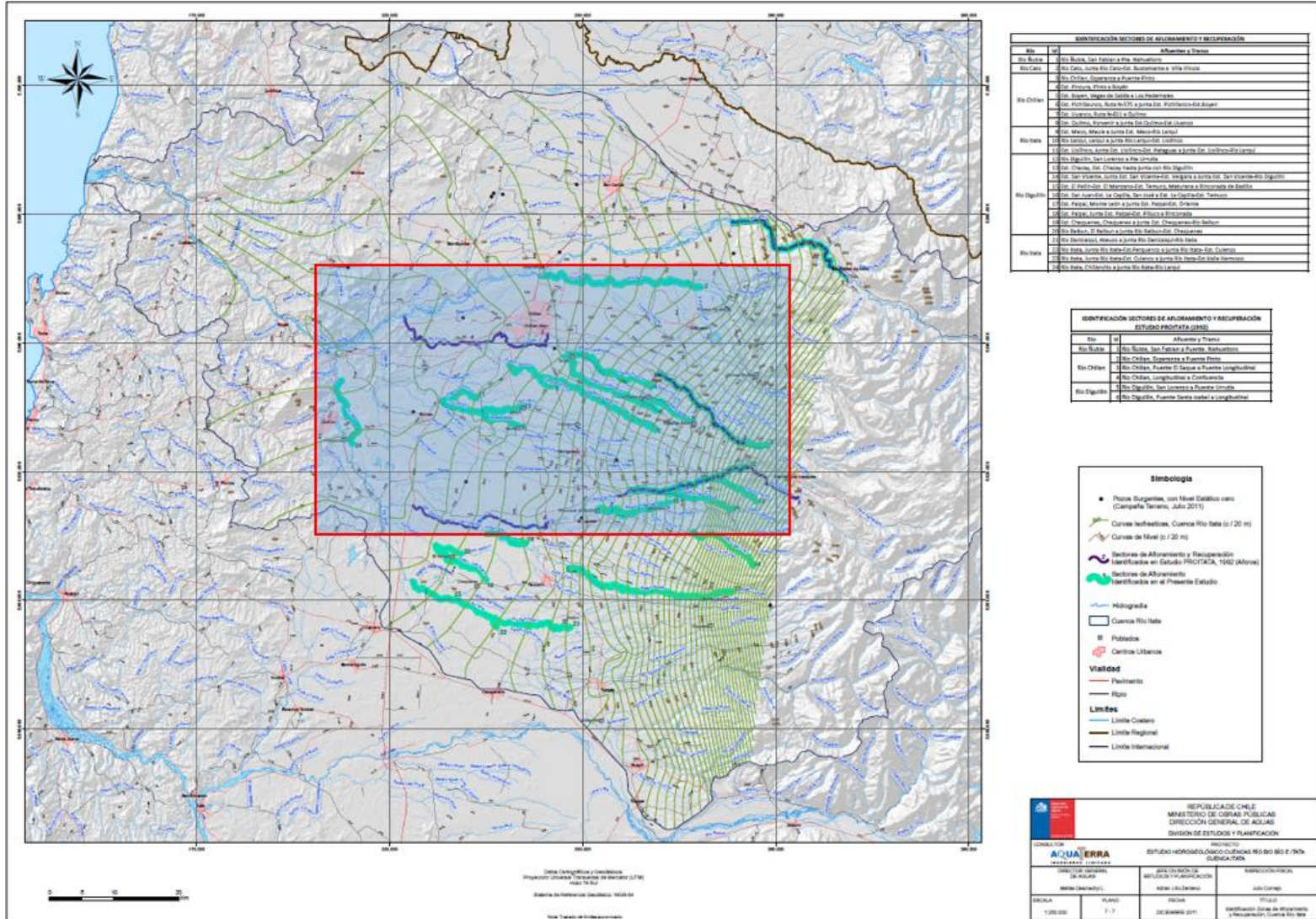
Fuente: Modificado de Estudio hidrogeológico cuencas Biobío e Itata (Aquaterra - 2011)

Figura 7-6: Rangos de Profundidad Nivel Estático Cuenca Río Itata. Línea Morada Corresponde al Área de Estudio



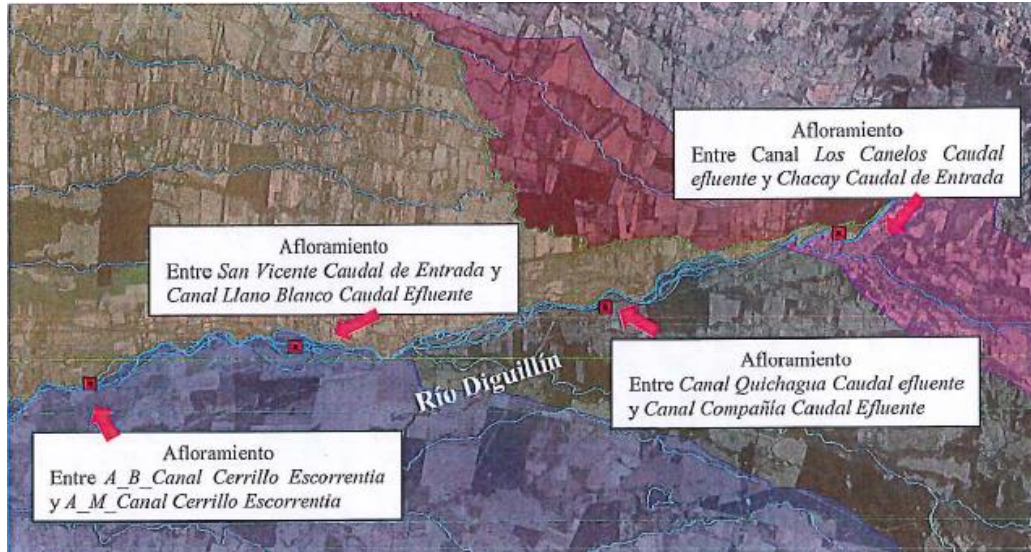
Fuente: Modificado de Estudio hidrogeológico cuencas Biobío e Itata (Aquaterra - 2011)

Figura 7-7: Identificación Zonas de Afloramiento y Recuperación, Cuenca Río Itata



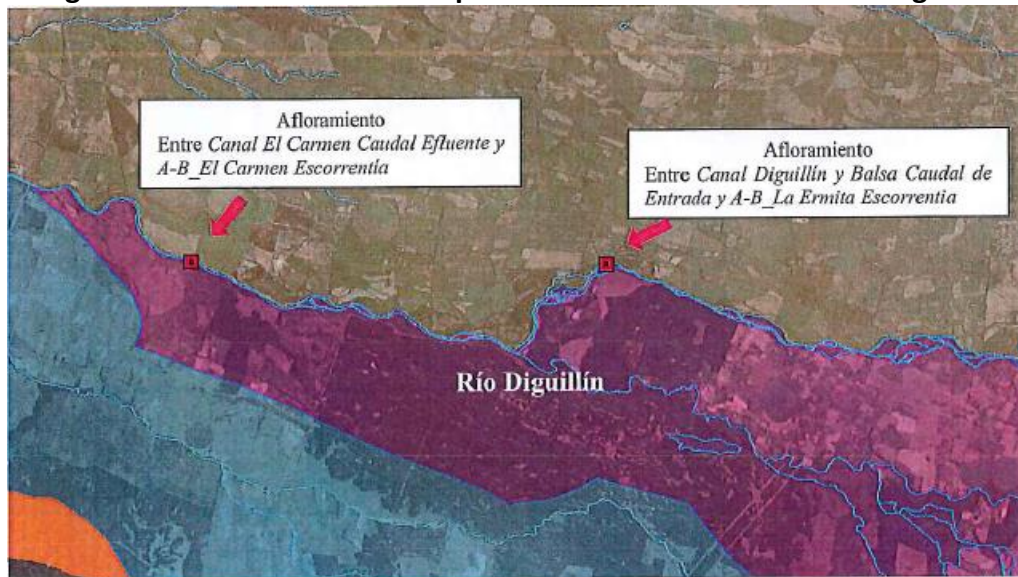
Fuente: Modificado de Estudio hidrogeológico cuencas Biobío e Itata (Aquaterra - 2011)

Figura 7-8: Afloramientos Incorporados a Modelo WEAP en Río Diguillín



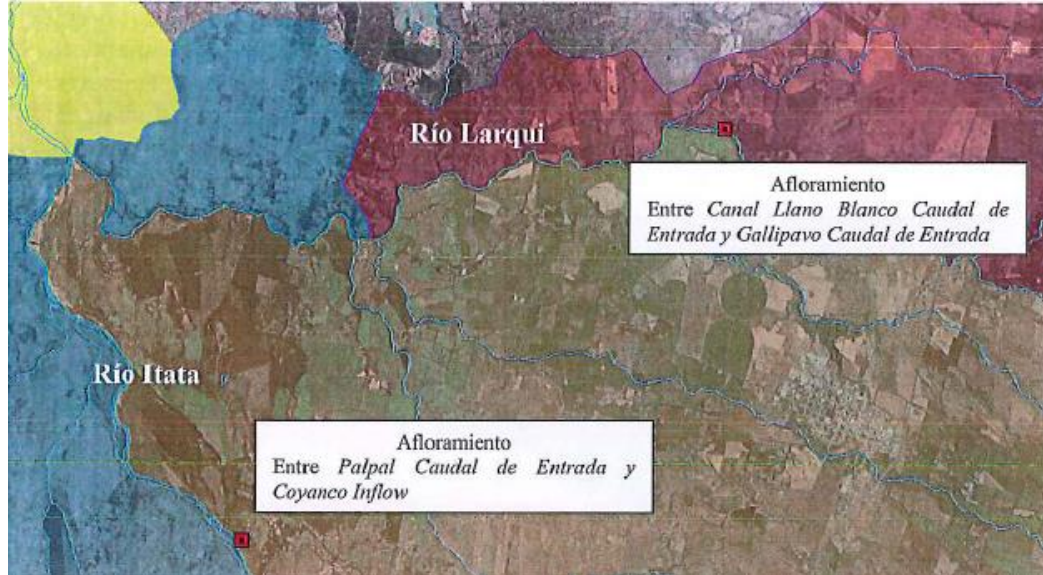
Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-9: Afloramientos Incorporados a Modelo WEAP en Río Diguillín



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-10: Afloramientos Incorporados a Modelo WEAP en Río Itata y Río Larquí



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Por otro lado, fue considerado un valor igual a 0,27 l/s-ha correspondiente a la recarga, obtenido del estudio “Estudio hidrogeológico Cuencas Biobío e Itata” Aquaterra Ingenieros Ltda-DGA,2011. Este valor fue tomado como referencia para calibrar el modelo. Este valor se verificó con los valores de la cuenca del Maule.

Tabla 7-5: Comparación Recarga Promedio en Cuencas Maule e Itata

Variable	Unidad	Acuífero Maule	Acuífero Itata
Superficie	Km ²	8091	5523,6
Recarga Promedio Anual	m ³ /s	285,3	152,09
Recarga por Unidad Superficie	l/s/ha	0,353	0,275

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Para el caso de la caracterización de la explotación de agua subterránea, se utilizó la información de los derechos concedidos entregados por DGA.

Tabla 7-6: Caudales Totales Según Derechos de Aguas Otorgados por la DGA

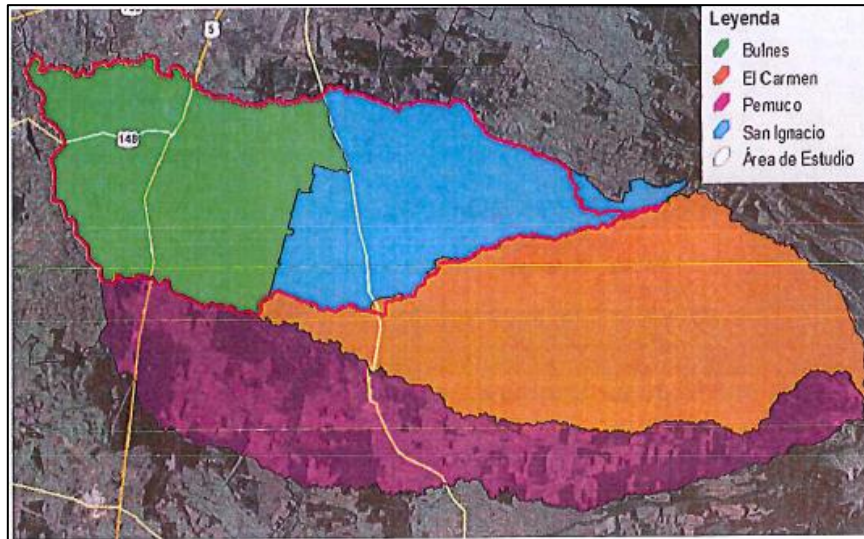
Comuna involucrada	Caudal Otorgado (l/s)
Bulnes	383,3
El Carmen	435,3
San Ignacio	568,6
Pemuco	162,7
Total	1549,9

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Se asume que todos los derechos asignados son extraídos dentro del acuífero modelado en WEAP. Esto se debe a que como se aprecia en la Figura siguiente, el área de estudio (Línea roja) es contenida casi íntegramente por las comunas de Bulnes y San Ignacio. Para el caso de las

cuencas aportantes se asumió que el caudal extraído del acuífero corresponde a los derechos otorgados en la comuna del El Carmen y Pemuco.

Figura 7-11: Comunas con Derechos de Subterráneos en las Comunas del Área de Estudio



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

7.1.1.3. MODELO HIDROLÓGICO

7.1.1.3.1 ESTRUCTURA DEL MODELO

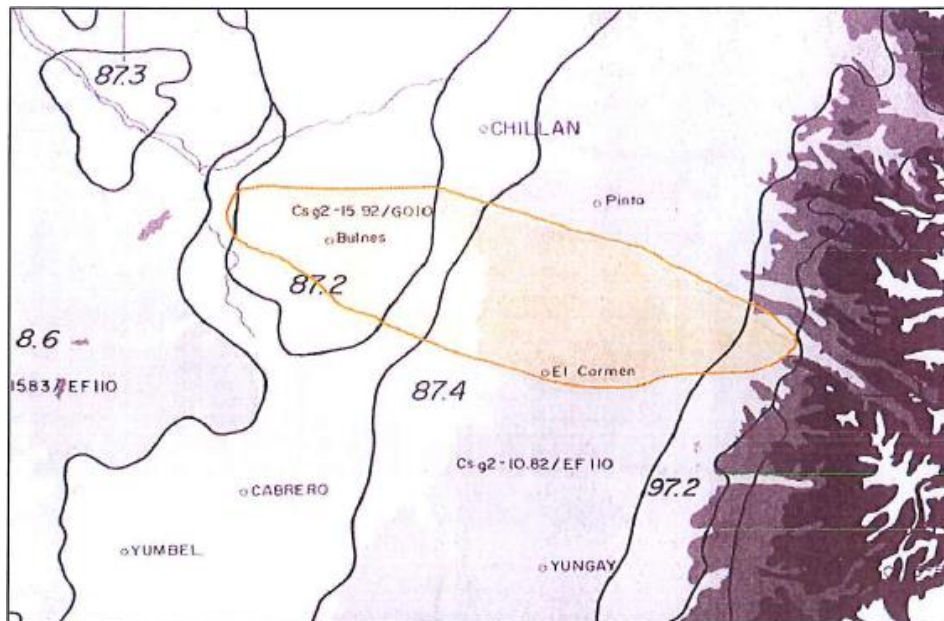
Concepto general

Se define el balance de agua de la cuenca en función del caudal de salida total de agua. Este valor se determina mediante la suma de la evapotranspiración directa de la precipitación, las pérdidas por riego tecnificado, la escorrentía subsuperficial, el caudal de los ríos no utilizado en riego, menos la evapotranspiración (ET), la percolación del acuífero, el bombeo y los afloramientos.

Para el sector de riego del valle se establecieron 3 distritos agroclimáticos: Bulnes (87.2), Chillan (87.3), El Carmen (87.4) y Precordillera (97.2).

Se puede apreciar la ubicación espacial de estos distritos agroclimáticos que tienen influencia sobre el área de estudio, en base al mapa desarrollado en el Atlas Agroclimático.

Figura 7-12: Distritos Agroclimáticos. En Amarillo se Aprecia el Área de Estudio



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

En las siguientes tablas se muestran las evapotranspiraciones potenciales o de referencia, obtenidas del Atlas Agroclimático de Chile según cada distrito agroclimático.

Tabla 7-7: Parámetros Agroclimáticos

Tabla N°4-97. Parámetros Agroclimáticos del Distrito 87.2 - Bulnes.

Parámetros		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Evap. Pot	mm	192.0	180.7	149.7	107.5	65.2	34.3	23.0	34.3	65.3	107.5	149.8	182.0	1291.3

Fuente: Atlas Agroclimático de Chile

Tabla N°4-98. Parámetros Agroclimáticos del Distrito 87.3 - Chillán

Parámetros		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Evap. Pot	mm	187.0	187.0	146.0	105.0	64.0	34.0	23.0	34.0	64.0	105.0	146.0	176.0	1260.0

Fuente: Atlas Agroclimático de Chile

Tabla N°4-99. Parámetros Agroclimáticos del Distrito 87.4 - El Carmen

Parámetros		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Evap. Pot	mm	165.0	155.0	128.0	92.0	55.5	28.8	19.0	28.8	55.5	92.0	128.5	155.2	1102.8

Fuente: Atlas Agroclimático de Chile

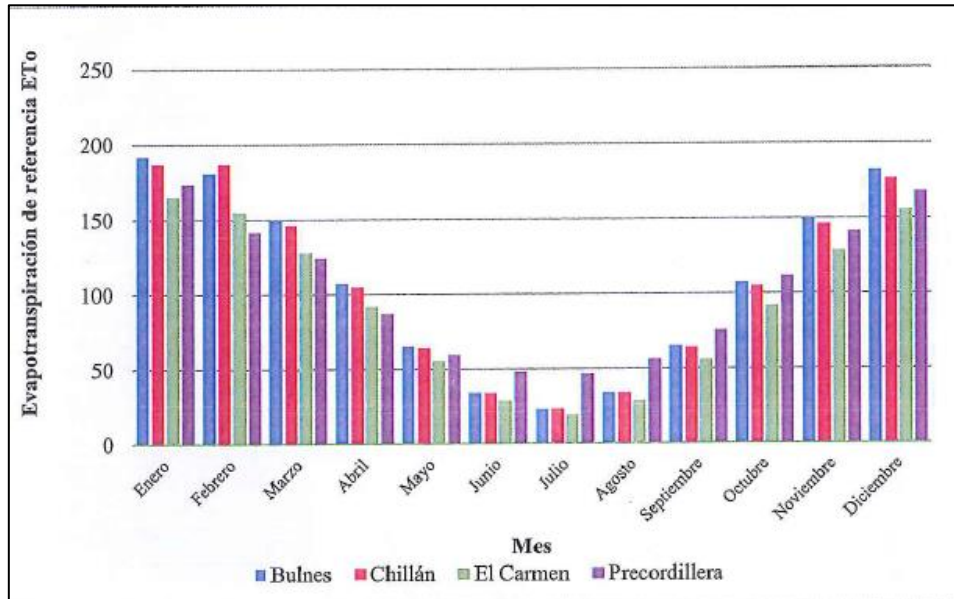
Tabla N°4-100. Parámetros Agroclimáticos del Distrito 97.2 - Precordillera

Parámetros		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Evap. Pot	mm	173.8	141.4	124.2	87.1	59.1	48.1	46.7	55.9	75.2	111.7	141.1	167.6	1231.9

Fuente: Atlas Agroclimático de Chile

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-13: Evapotranspiración de Referencia ETo



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

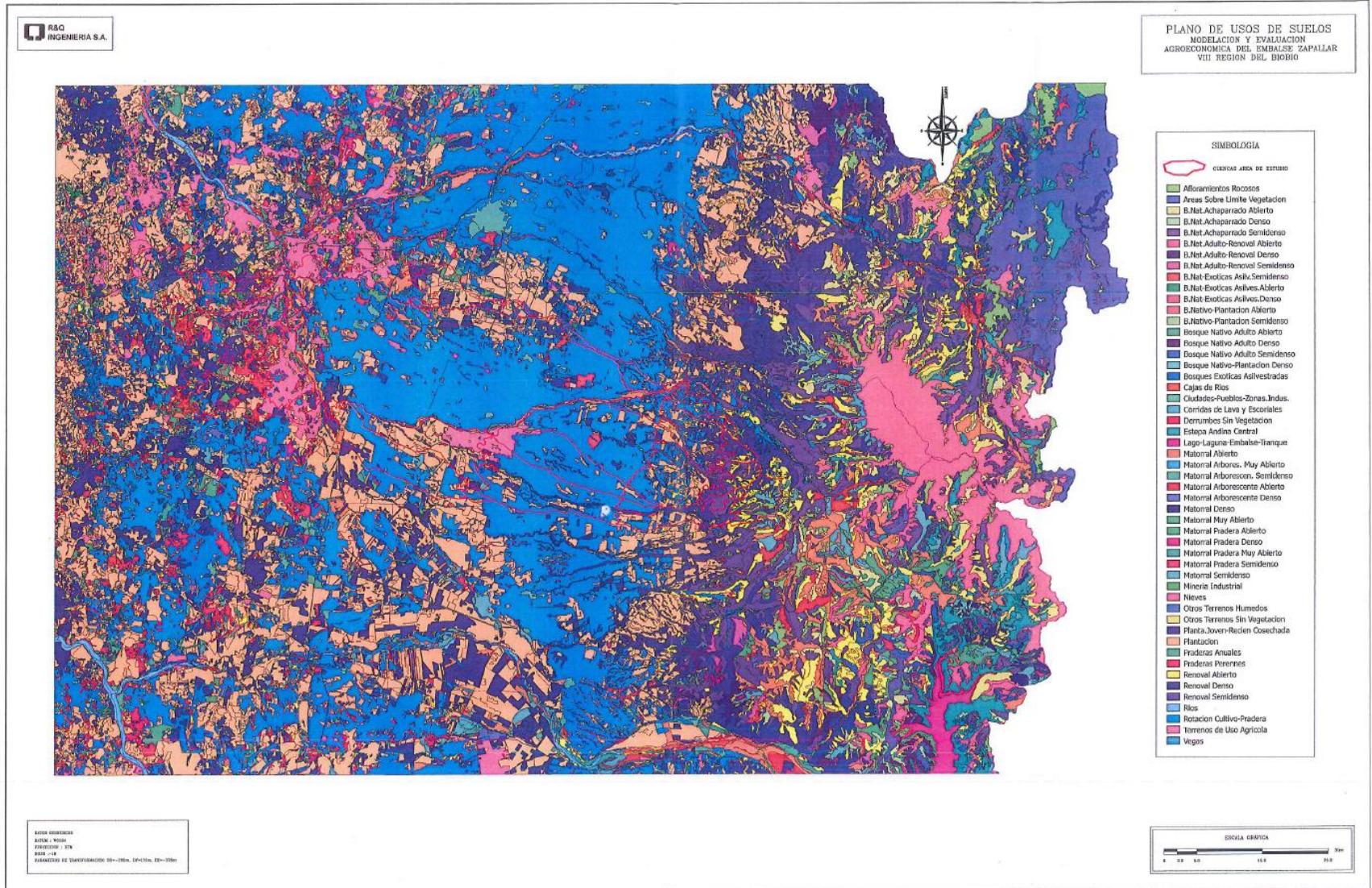
La distribución espacial de los distritos se utilizó en forma referencial para las áreas de riego y para el caso de las cuencas aportantes, la evapotranspiración de referencia fue asignada de acuerdo a la posición en donde se encontraba cada subcuenca de las cuencas aportantes.

Por otra parte, para el uso de suelo se consideró la información recabada de las encuestas realizadas por este estudio en las zonas de riego. Para el caso de las superficies no abarcadas por estas encuestas, pero que, si forman parte del área de modelación, los usos se determinaron a partir de la información obtenida del Sistema de Información Territorial SIT de CONAF (“Catastro de uso de suelo y Vegetación, junio 2011, Conaf”) que se encuentra actualizada al año 2008.

La zona de estudio se dividió en una serie de áreas (subcuencas), las que se definieron en base al área de estudio, las bandas de precipitación para estudiar el valle y los distintos cursos de agua que son afluentes al río Diguillín como los esteros Temuco, el río Larqui y el río Itata, entre otros.

A continuación, se presentan una figura correspondiente a la base SIG de CONAF empleada en el estudio (Figura 7-14).

Figura 7-14: Plano de Usos de Suelos



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

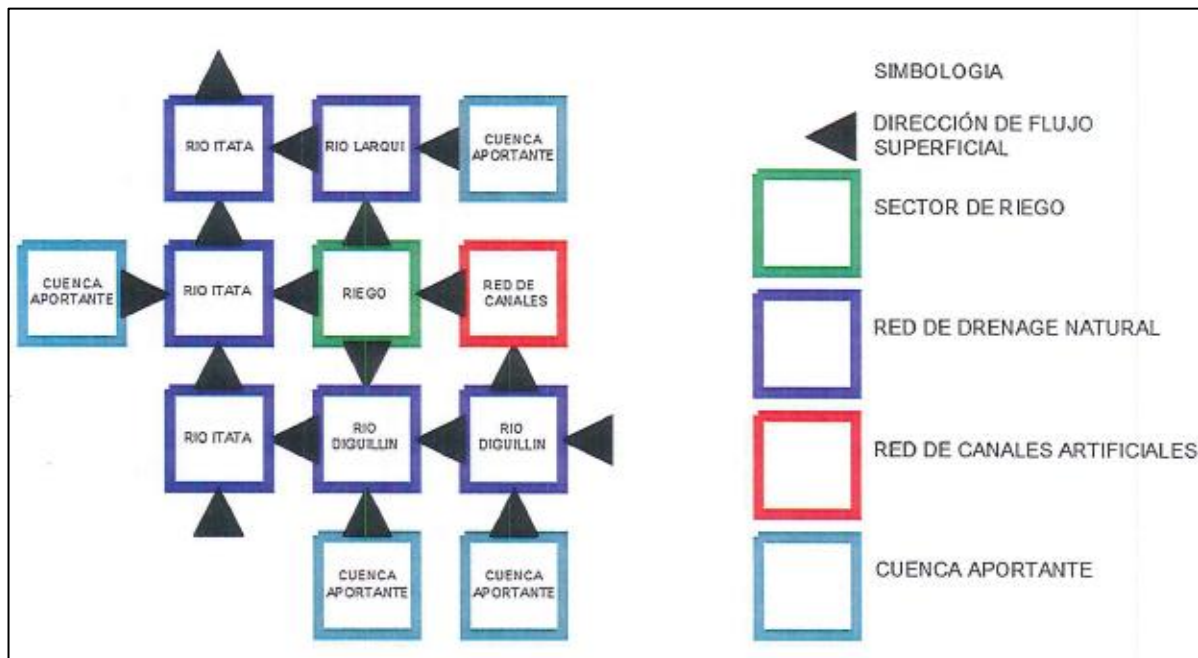
Se consideraron principalmente las demandas de agua para actividades agrícolas. Mientras que para la oferta se establecieron cuatro cuencas aportantes: Itata, Diguillín 1, Diguillín 2 y Larqui. La red de canales se estableció desde el río Diguillín.

Los requerimientos de agua se calcularon como la diferencia entre la evapotranspiración potencial (ETP) requerida y la precipitación efectiva que llega al suelo, considerando la eficiencia de riego.

Las asignaciones de agua se realizaron siguiendo un orden de prioridad basado en el requerimiento específico, el requerimiento total y la oferta de agua disponible. Para representar los flujos de escorrentía entre los distintos elementos, se empleó el método de lluvia-escorrentía, que permitió representar la interacción entre flujos superficiales y la infiltración hacia el acuífero.

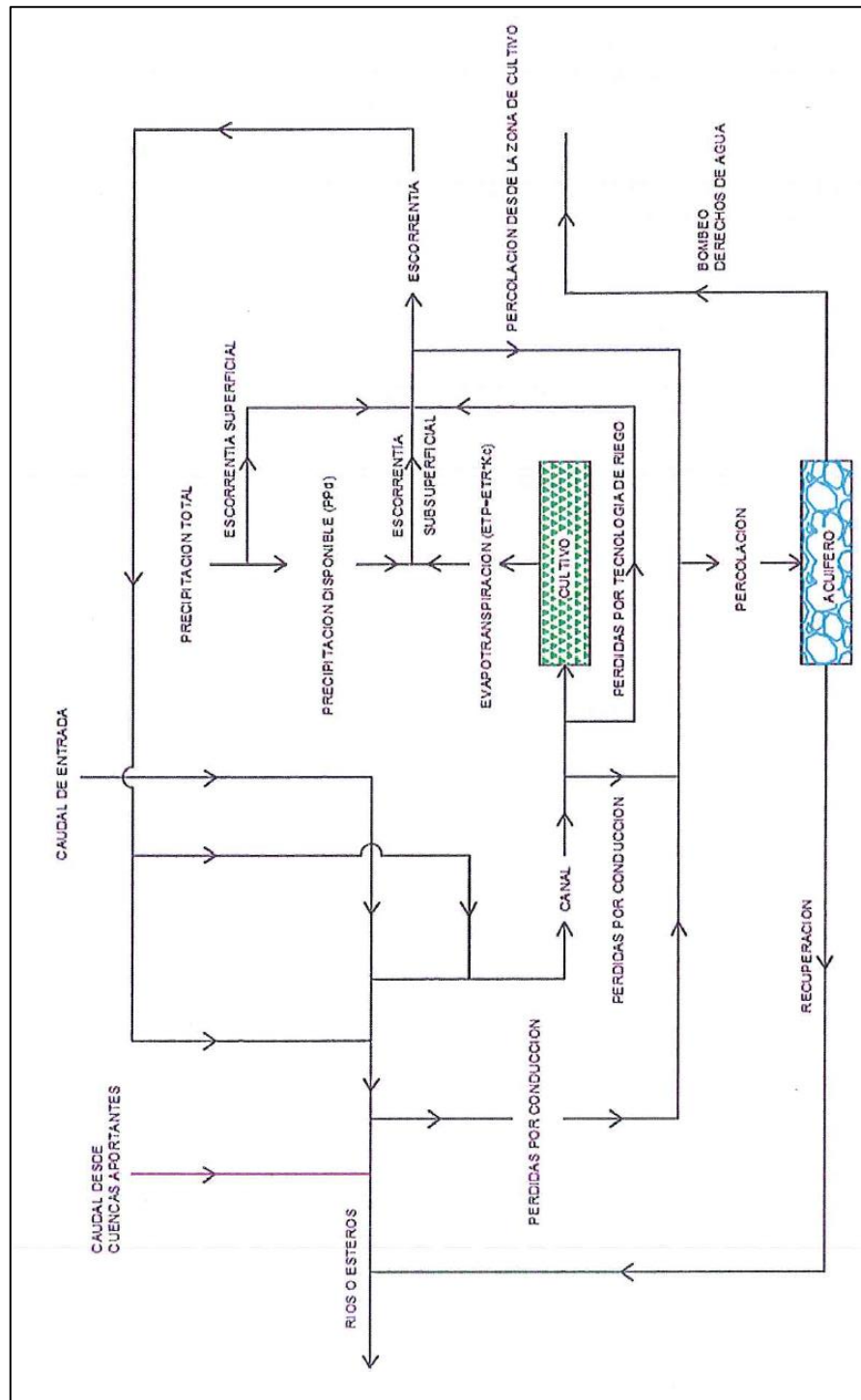
En la Figura 7-15 se muestra un esquema conceptual general del funcionamiento superficial dentro del área de modelación, además en la Figura 7-16 se presenta un diagrama de flujo del modelo.

Figura 7-15: Esquema Conceptual General del Funcionamiento Superficial Dentro del Área de Modelación



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-16: Diagrama de Flujo del Modelo



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Los parámetros calibrados en el modelo corresponden a:

- Reúso (Valor de referencia 5% con un rango entre 1% y 10%).
- Perdidas en Ríos (Valor de referencia 31% con un rango entre 10% y 50%).

- Perdidas en Esteros (Valor de referencia 31% con un rango entre 10 y 50%).
- Perdidas en Canales (Valor de referencia 31% con un rango entre 10% y 50%).
- Volumen Inicial del Acuífero (Se optó por el valor mínimo histórico que presenta el acuífero).

La información requerida por el modelo corresponde a:

- Precipitación mensual (Pp), para el periodo 1979-2015, correspondiente al año hidrológico, por unidad hidrológica.
- Porcentaje de precipitación efectiva.
- Serie de caudales del río Diguillín desde 1979 hasta 2015 (las otras cuencas son modeladas).
- Área de la unidad hidrológica.
- Evapotranspiración potencial de referencia (ETP ref) mensual, sin variación anual.
- Coeficiente de cultivo (Kc) promedio de predios por tipo de área (áreas blancas, mejoradas y adicionales)
- Fracción de riego: pérdidas por tecnología, ponderadas por tipo de predio.
- Afluente subterráneo: basado en datos, expresado como proporción del volumen del acuífero. La ubicación se deriva de esta información.
- Máxima derivación del canal de riego: asociada a las acciones y a las reglas de operación de la Junta de Vigilancia del río Diguillín (de octubre a abril), especificando los meses en los que se pueden realizar. En caso de usar la matriz Laja-Diguillín, se emplean los caudales convenidos por el Departamento de Obras Hidráulicas (DOH) con los regantes de Laja-Diguillín.

Tabla 7-8: Dotación de Acuerdo a Convenio DOH-Regantes Acciones Mejoradas, 2015

MES	m ³ /ha	Aporte Caudal m ³ /s
Octubre	1500	11.39
Noviembre	1814	14.24
Diciembre	2277	17.29
Enero	2812	21.36
Febrero	1935	16.27
Marzo	1205	9.15
Abril	907	7.12
Mayo	0	0.00
Junio	0	0.00
Julio	0	0.00
Agosto	0	0.00
Septiembre	0	0.00

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

7.1.1.3.2 PROCESO DE CALIBRACIÓN

Esquema de calibración

El proceso de calibración se realizó en dos etapas: la primera fue manual para hacer una estimación general de los valores de los parámetros y la segunda de forma automática mediante el algoritmo PEST, el cual refina los valores. La calibración se llevó a cabo separando en dos períodos: 1979-2005 para la calibración y 2006-2015 para la validación. Se sugiere que estos periodos sean revisados, considerando las condiciones hidrológicas más recientes y algunos problemas en la modelación que se presentan en secciones posteriores. Se utilizaron tres estaciones para este propósito:

- Río Larqui en Santa Cruz.
- Río Diguillín en Longitudinal.
- Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

Tabla 7-9: Coeficientes R2 Obtenidos del Proceso de Calibración y Validación por Estación

Estación	Calibración	Validación
Río Larqui en Santa Cruz	0.80	0.72
Río Diguillín en Longitudinal	0.88	0.89
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	0.93	0.91

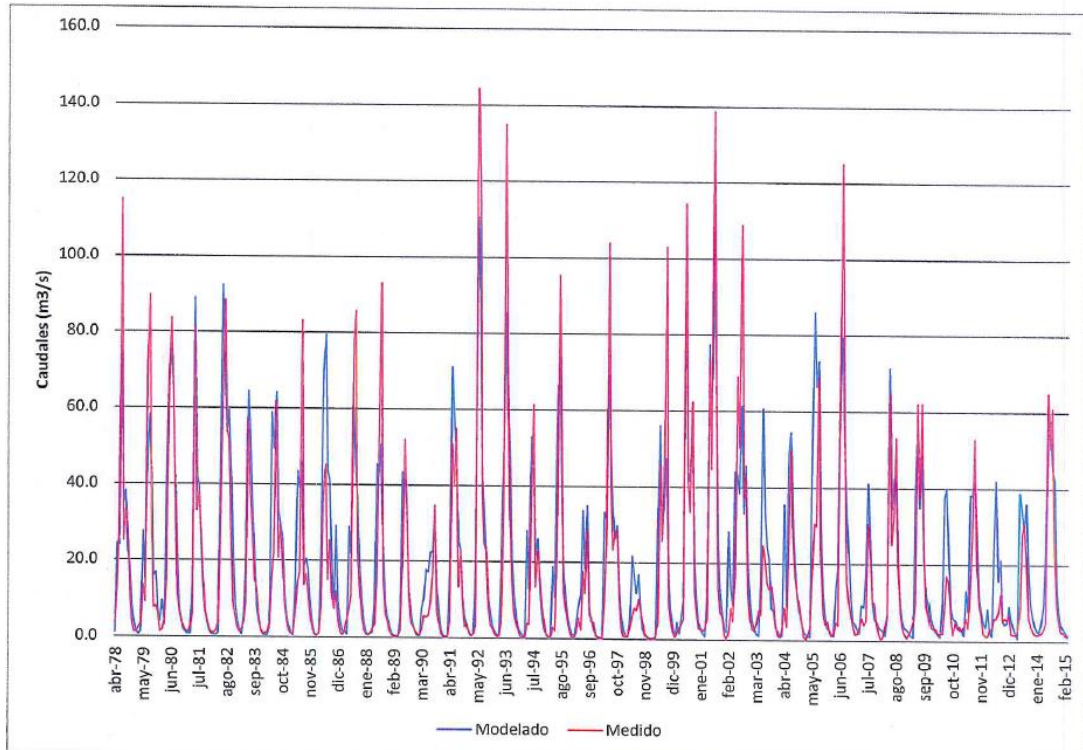
Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Resultados de calibración

El modelo muestra un desempeño aceptable en la situación histórica, aunque tiende a sobrestimar en años más secos, especialmente en los más recientes. Esto podría mejorarse cambiando los periodos de calibración y validación. Resulta un aspecto fundamental a mejorar

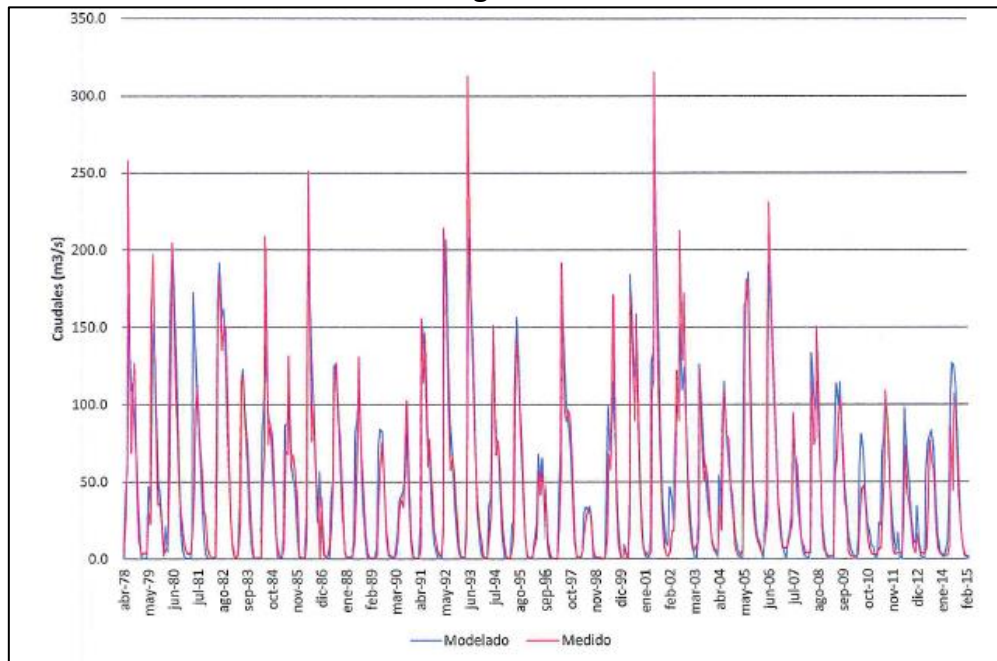
debido a que entre los años 2015 y 2023 las condiciones de sequía se han mantenido y todo apunta a que estas condiciones se mantengan. A nivel estacional, la tendencia a sobrestimación se observa principalmente en los meses de abril a junio, y de manera leve durante la temporada de riego. Los valores anuales funcionan bien durante el período de calibración, pero en la validación, se observa una tendencia a la sobrestimación.

Figura 7-17: Serie de Caudales Medidos y Modelados para la Estación Río Larqui en Santa Cruz



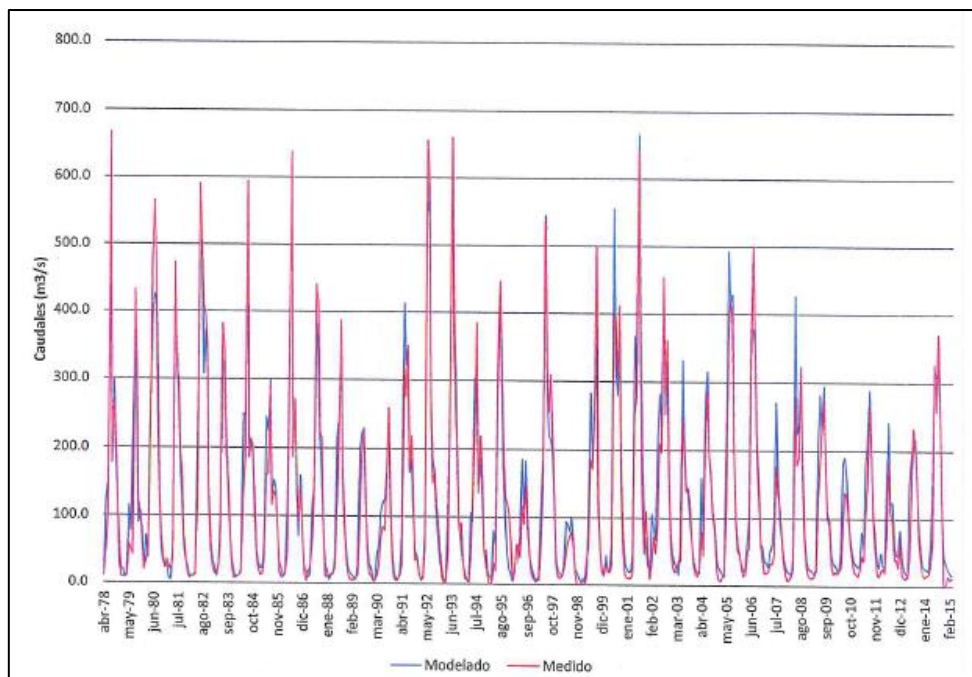
Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-18: Serie de Caudales Medidos y Modelados para la Estación Río Diguillín en Longitudinal



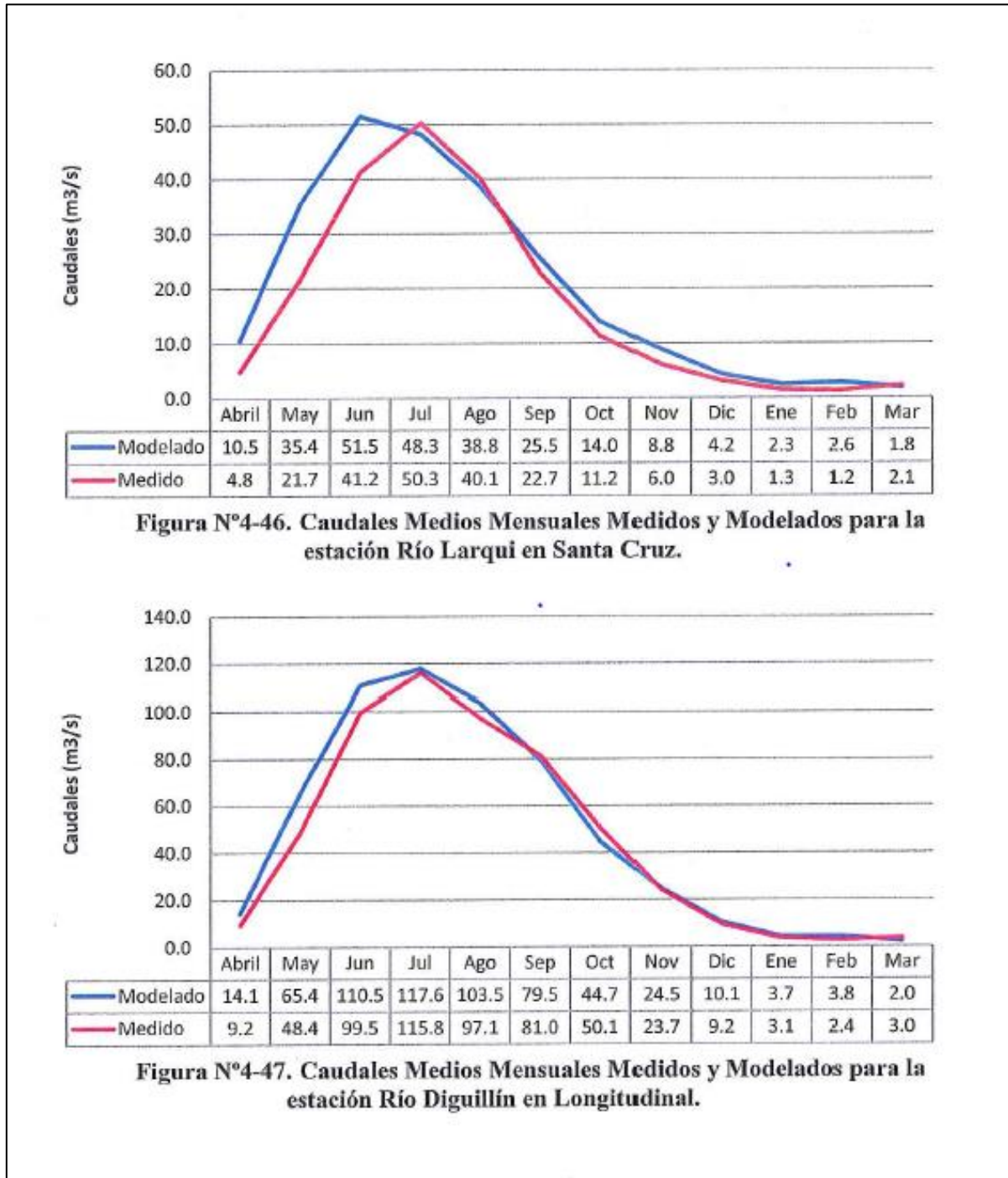
Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-19: Serie de Caudales Medidos y Modelados para la Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-20: Caudales Medios Mensuales Medidos y Modelados Para La Estación Río Larqui en Santa Cruz y Estación Río Diguillín en Longitudinal



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-21: Caudales Medios Mensuales Medidos y Modelados Para La Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea, y Caudales Medios Anuales Medidos y Modelos Para las 3 Estaciones

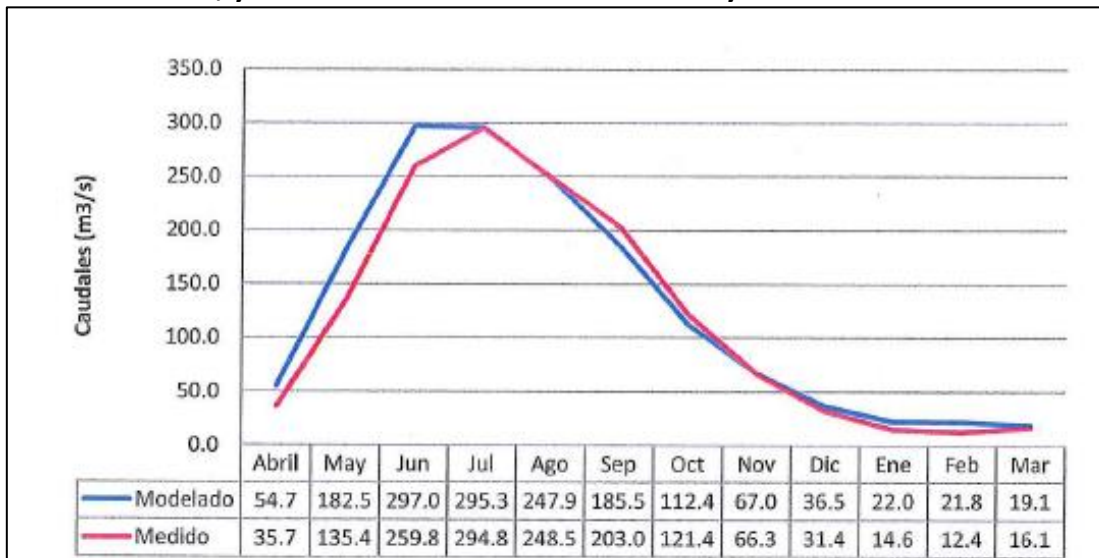


Figura N°4-48. Caudales Medios Mensuales Medidos y Modelados para la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

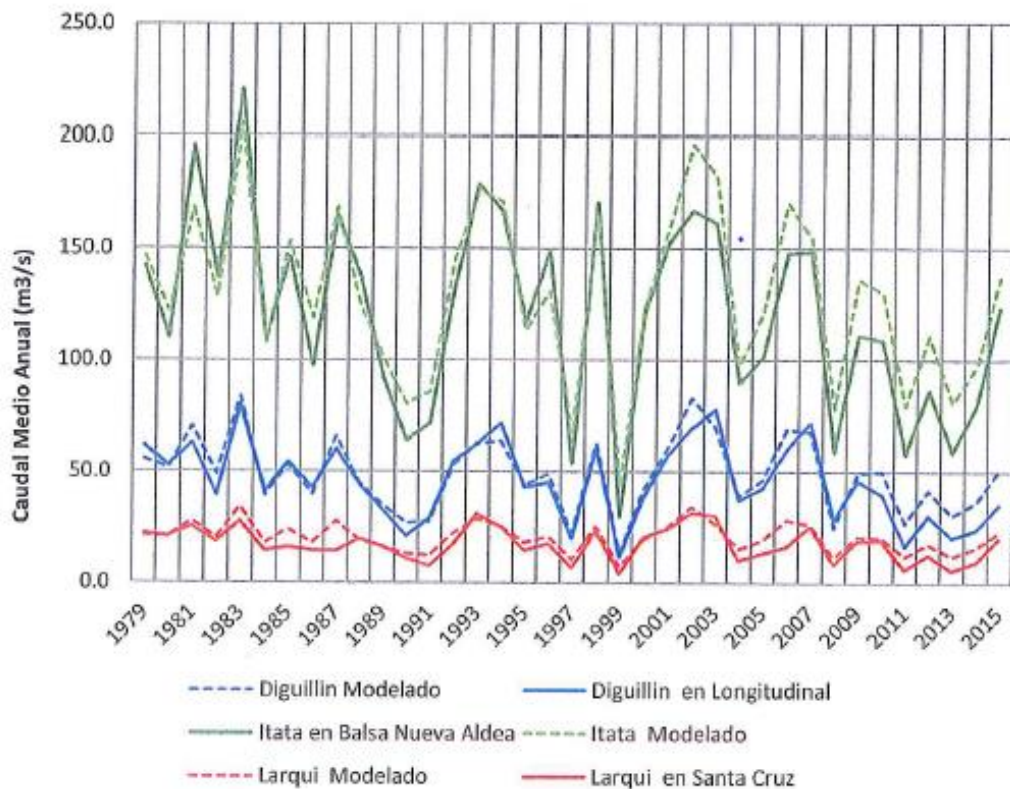


Figura N°4-49. Caudales Medios Anuales Medidos y Modelados para las 3 estaciones.

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-22: Curvas de Variación Estacional, Estación Río Larqui en San Cruz y Río Diguillín en Longitudinal. Línea Segmentada Representan Los Datos Modelados

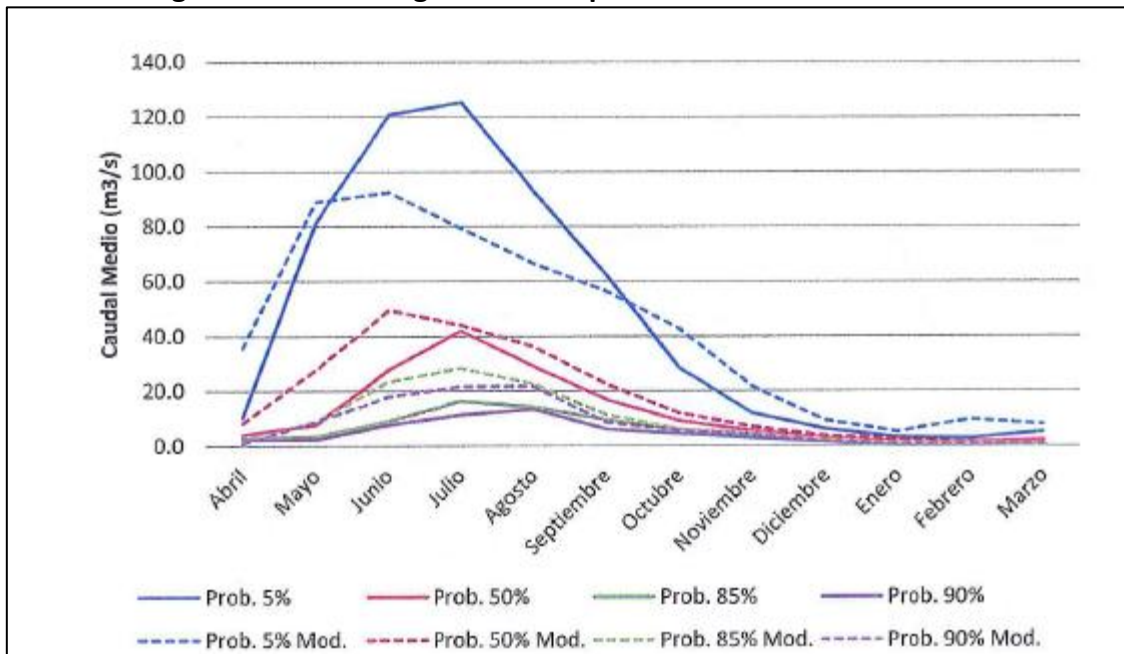


Figura N°4-50. Curvas de variación estacional, estación río Larqui en Santa Cruz. Línea segmentada representan los datos modelados.

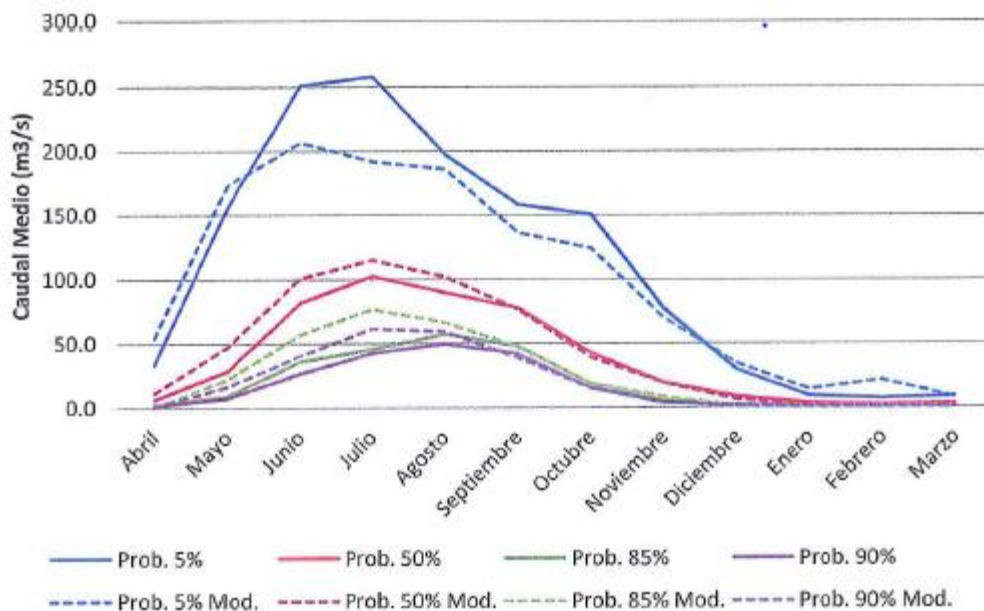
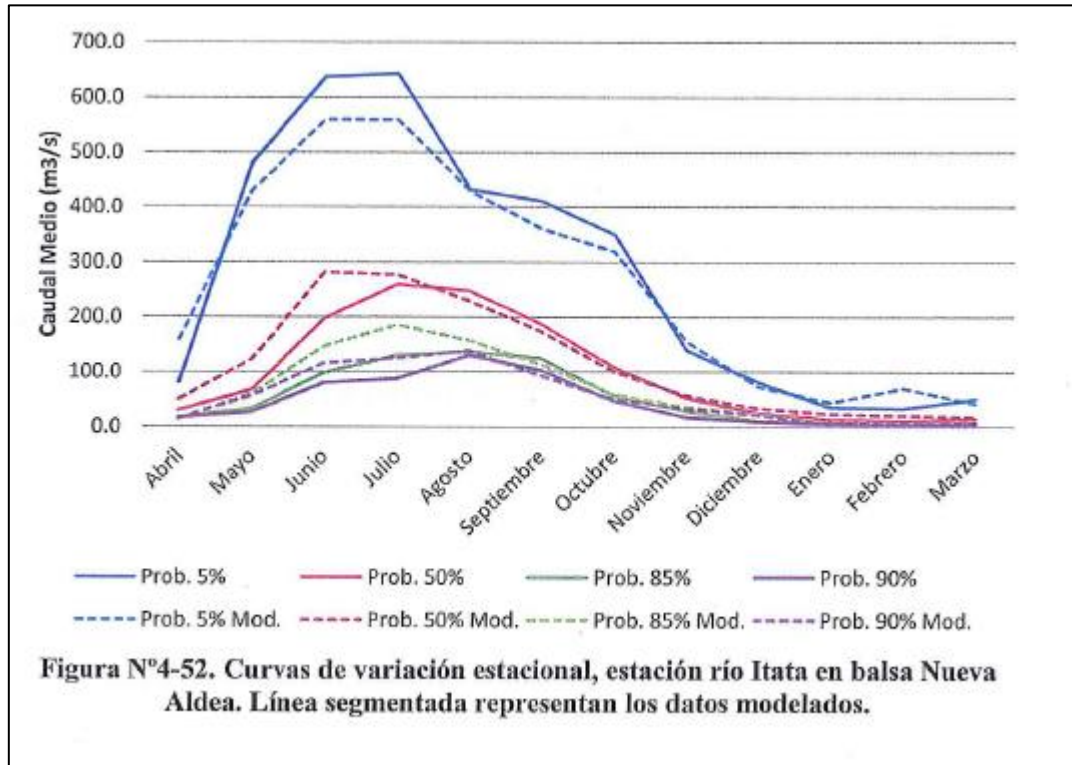


Figura N°4-51. Curvas de variación estacional, estación río Diguillín es Longitudinal. Línea segmentada representan los datos modelados.

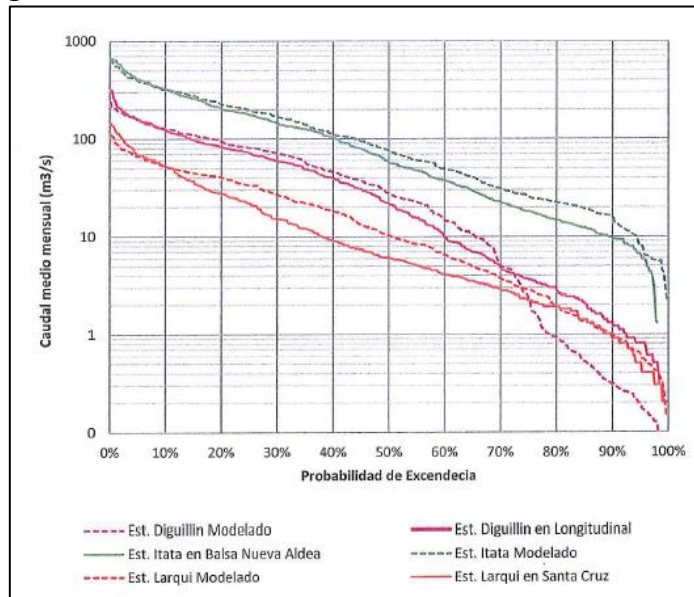
Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-23: Curvas de Variación Estacional, Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea. Línea Segmentada Representan Los Datos Modelados



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Figura 7-24: Curvas de Duración Para Las Tres Estaciones



Los gráficos muestran un buen ajuste en la serie de tiempo para rangos medios y altos de caudales, pero los valores muy bajos no se predicen completamente. Sin embargo, esto no es crítico para evaluar la disponibilidad de agua en embalses, donde no se esperan valores extremadamente bajos.

Calibración de cuencas:

Río Larqui en Santa Cruz:

Buen desempeño estadístico.

Tendencia a la sobreestimación, especialmente en años de bajos caudales, lo que representa una vulnerabilidad importante para condiciones futuras.

Río Diguillín en Longitudinal:

Desempeño general satisfactorio.

Buena representación de valores anuales en calibración, pero sobreestimación en validación, especialmente de abril a junio.

Río Itata en Balsa Nueva Aldea:

Comportamiento similar al Diguillín.

Adecuada representación histórica con tendencia a sobreestimación en abril-junio. Valores anuales ajustados en calibración, pero sobreestimados en validación.

Limitaciones del Modelo:

Limitaciones en la simulación de valores bajos debido a limitaciones del modelo.

Especialmente en el Río Larqui, las discrepancias se deben a una extracción de agua superior a la necesaria en canales agrícolas, fenómeno que el modelo no captura adecuadamente.

En resumen, el modelo calibrado representa adecuadamente la dinámica hidrológica de las cuencas y es utilizable para evaluar distintos escenarios, aunque identifica baja seguridad de riego, especialmente en la matriz Diguillín-Laja.

7.1.2. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS FORZANTES METEOROLÓGICAS

7.1.2.1. PRECIPITACIONES

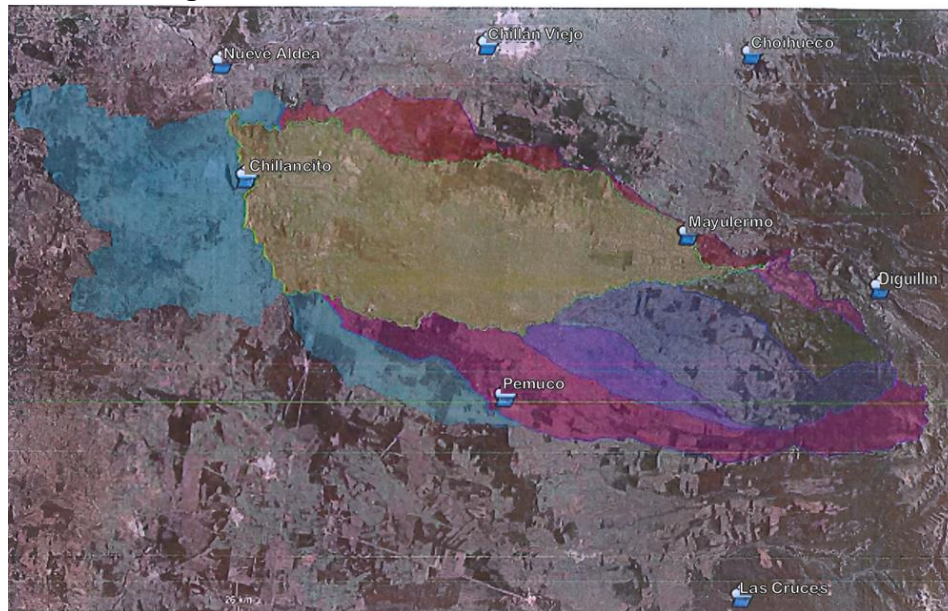
El estudio actualizó la hidrología existente en las estaciones indicadas en la Tabla 7-10 y presentadas en la Figura 7-25 (1978 a 2015), trasladando la información a los puntos exigidos por el modelo hidrológico. Se descartaron las estaciones Mayulermo y Las Cruces por no contar con información antes del año 1992.

Tabla 7-10: Estaciones Pluviométricas Actualizadas

Código BNA	Nombre Estación	Partida	Datum	UTM Este	UTM Norte	Altitud	Fuente	Código BNA
08135003-5	Nueva Aldea	31-08-56	WGS84	190.999	5.937.926	25	DGA	08135003-5
08117002-9	Chillán Viejo	31-12-76	WGS84	220.217	5.941.028	106	DGA	08117002-9
08133003-4	Chillancito	30-06-54	WGS84	194.149	5.925.661	40	DGA	08133003-4
08124005-1	Mayulermo	31-01-92	WGS84	243.269	5.921.170	385	DGA	08124005-1
08132002-0	Pemuco	30-08-71	WGS84	223.769	5.902.878	200	DGA	08132002-0
08113001-9	Coihueco Embalse	31-08-71	WGS84	249.537	5.940.945	314	DGA	08113001-9
08130006-2	Diguillín	30-04-59	WGS84	264.244	5.916.068	670	DGA	08130006-2
08124004-3	Las Cruces	31-12-92	WGS84	250.644	5.882.239	650	DGA	08124004-3

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

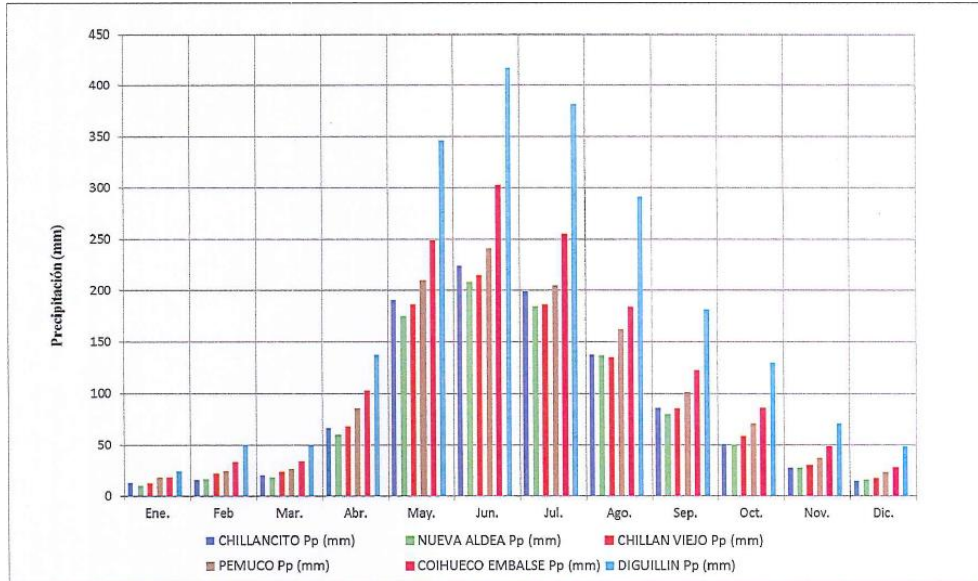
Figura 7-25: Ubicación Estaciones Pluviométricas



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

En el siguiente gráfico se muestra el resumen de las precipitaciones medias mensuales para el periodo de análisis de las estaciones seleccionadas.

Figura 7-26: Precipitación Media Mensual Para el Periodo 1978-2015 de Estaciones Utilizadas



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Debido a que no todas las estaciones seleccionadas contenían un registro continuo de sus mediciones, se procedió a realizar una extensión de los datos.

Tabla 7-11: Meses Sin Registro de Precipitaciones

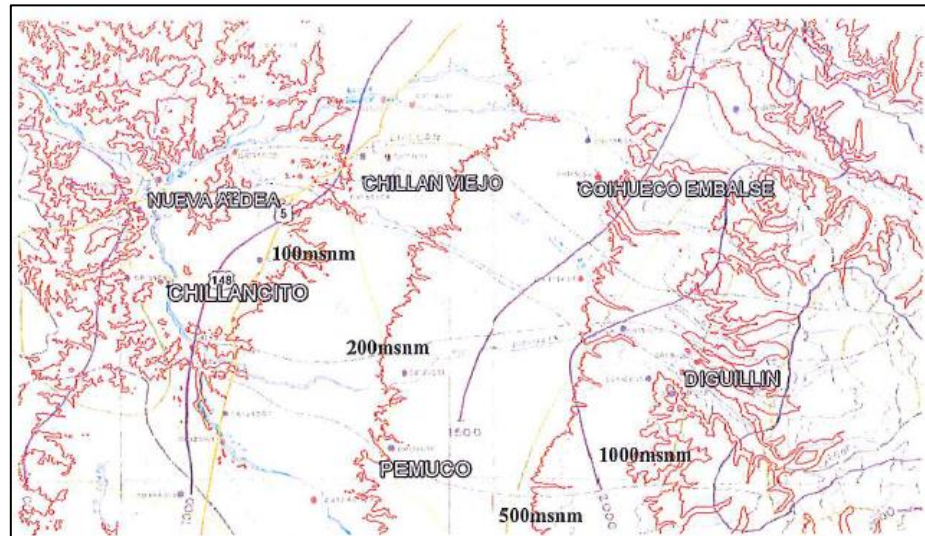
Nombre Estación	Promedio Precipitación Mensual (mm)												PP Anual Promedio (mm)	Total meses sin registro
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.		
Nueva Aldea	9.9	16.1	18.1	59.9	175.0	208.2	184.6	136.7	79.4	49.6	27.4	15.3	980.3	1
Chillán Viejo	12.2	21.6	23.2	67.8	186.4	215.1	186.0	135.3	85.1	58.4	30.2	17.5	1038.7	0
Chillancito	12.8	15.9	20.0	66.3	191.2	224.2	199.4	138.0	86.1	50.9	27.6	14.7	1047.2	2
Pemuco	17.8	23.8	26.0	85.2	210.0	241.0	204.9	161.9	100.7	70.6	37.3	22.3	1201.4	2
Coihueco Embalse	17.8	32.8	33.7	102.6	248.7	302.3	254.7	184.2	122.5	85.7	48.7	27.6	1461.4	0
Diguillín	23.8	50.3	49.7	137.6	346.4	417.1	381.6	291.8	182.1	130.5	71.3	48.5	2130.7	0

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Para el resto de las estaciones pluviométricas, se contó con un registro completo de precipitaciones mensuales para el periodo modelado señalado.

Los datos de las estaciones fueron combinados con las isoyetas del Balance Hídrico de 1987, validando los valores registrados mediante la comparación con las estaciones utilizando una función de elevación. Se definieron bandas de elevación con valores promedios de precipitación, y posteriormente se cruzaron estos datos con las cuencas aportantes. Como producto se obtuvo una serie de precipitación para cada una de las unidades de modelación.

Figura 7-27: Balance Hídrico de Chile Junto a Curvas de Nivel y Estaciones. Línea de Isoyetas en Color Morado



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

El resumen de las bandas adoptadas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7-12: Bandas de Precipitación Adoptadas Para el Área de Modelación

Bandas (N°)	Altitud (msnm)	Precipitación mensual adoptada	PP Media Anual (mm)
1	Menor a 100	Promedio estaciones Nueva Aldea, Chillancito y Chillán Viejo	1026
2	Entre 100 y 200	Promedio estaciones Pemuco y Chillán Viejo	1123
3	Entre 200 y 500	Estación Coihueco	1464
4	Entre 500 y 1000	Promedio estaciones Coihueco y Diguillín	1798
5	Mayor a 1000	Estación Diguillín	2131

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Cabe señalar que no se aprecia análisis de proyecciones de forzantes meteorológicas que afecten la disponibilidad y demanda del recurso hídrico. En particular, la evapotranspiración potencial se obtiene del Atlas Agroclimático de Chile.

7.1.2.2. COMENTARIOS CRÍTICOS

Diguillín es una estación que está ubicada a 670 msnm, mientras que las alturas máximas de la cuenca alcanzan valores de 3000 msnm. En el caso de las cuencas aportantes, fueron subdivididas según el número de bandas que recaen sobre su área, asignándoles las precipitaciones adoptadas de cada banda.

La información de entrada de esta variable resultó crítica para el modelo al ser la única entrada de agua al sistema. Si bien la metodología planteada es razonable, se basa en información

antigua, la cual representa meteorología que no es representativa de las condiciones más recientes. Se recomienda actualizar esta fuente de información con los datos más recientes de las estaciones y evaluar la forma en que distribuyen hacia las unidades de modelación. Se sugiere aprovechar la información de distintos productos climáticos que entregan información de precipitaciones de forma distribuida y con un extenso periodo de información, tales como CR2MET o el reanálisis ERA5-Land.

7.1.2.3. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS FUTUROS

Se plantearon escenarios futuros para realizar la evaluación económica a 30 años, utilizando para esto la herramienta de escenarios del modelo, suponiendo condiciones equivalentes para el futuro. Esto supone algunos cambios en la estructura del modelo, pero se mantuvieron los parámetros calibrados para representar la hidrología de la cuenca y evaluar solo los cambios asociados a la variación en el manejo de los recursos hídricos. Se utilizó la misma información pluviométrica y fluviométrica obtenida de la situación base, el periodo 1978-2015. Esto supone condiciones poco realistas, dado las tendencias a la disminución de caudales producto del cambio climático, ya que no representa el escenario de sequía más reciente.

Situación Futura sin Proyecto (SFSP)

En términos de modelación, se redujeron algunas áreas asociadas a zonas agrícolas y se modificaron valores de demanda por cambios en el factor de eficiencia de riego y algunos cambios en los cultivos. Las modificaciones se hicieron de forma gradual.

Situación Futura con Proyecto (SFCP):

En términos de modelación, en este escenario se mantuvieron los parámetros de calibración y se incorporaron nuevos elementos al modelo, además de modificaciones progresivas en las demandas de riego. Se añadió a la modelación el embalse, con una capacidad de diseño de 80 Hm³, el cual se inicia con un 50% de su capacidad, considerando evaporación y las infiltraciones. Se añadió un nodo para representar el caudal ecológico requerido del proyecto. Se añadieron nuevos elementos de canales, en función de los proyectos existentes ya diseñados. Se aplicaron cambios en la cantidad, distribución y de cultivos, así como también en los niveles tecnológicos. Se incluyeron dos zonas nuevas con superficie agrícola.

Utilización de las simulaciones

Los resultados de la simulación de la operación de la cuenca bajo los dos escenarios presentados anteriormente permitieron estimar el impacto del embalse en la seguridad de riego de las áreas cultivadas, así como también realizar una evaluación económica de su construcción.

Si bien estos planteamientos resultan razonables, se considera que los resultados presentados representan una condición demasiado optimista y poco probable, en base a dos factores:

- No se consideraron efectos de cambio climático: se espera una reducción de los caudales, asociados a la disminución proyectada de las precipitaciones en el sector cordillerano, lo que reduce la cantidad de agua disponible y aumento de temperaturas, las cuales aumentarían las demandas evapotranspirativas de todas las superficies agrícolas.
- Problemas en la calibración: se identificó que los años más secos son representados con tendencia a la sobrestimación, lo que resulta en tener una mayor cantidad de agua disponible que la real. Además, resulta necesario actualizar la calibración con datos de los años más recientes, que han mantenido las condiciones más secas. Esto se complementa con el punto anterior, al entregar al modelo mayor capacidad de representar condiciones de mayores temperaturas y menores precipitaciones.

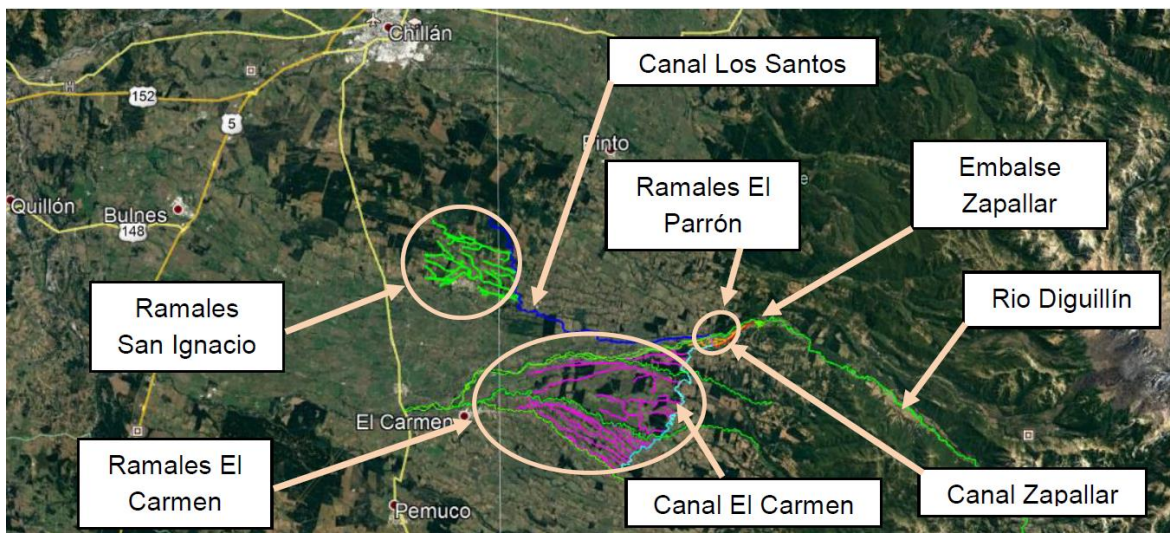
7.2. ESTUDIOS ACTUALIZACIÓN Y COMPLEMENTACIÓN DISEÑO EMBALSE ZAPALLAR, REGIÓN DEL BÍO-BÍO – INFORME FINAL, MN INGENIEROS (2018)

En el estudio de DOH-MN (2018) se llevó a cabo un catastro de usuarios en el área de influencia del proyecto ubicada la actual Región de Ñuble. La zona del embalse pertenece a las comunas de San Ignacio, El Carmen y Pinto, geográficamente se ubica sobre una angostura del valle del río Diguillín, denominado Zapallar, 12 km abajo de la confluencia con el río Renegado, ambos pertenecientes a la cuenca del río Itata. Los sectores de riego identificados son los siguientes:

- Sector El Parrón (Comuna El Carmen)
- Sector El Carmen (Comuna El Carmen)
- Sector San Ignacio (Comuna San Ignacio)

El sistema de riego del embalse Zapallar considerado proyecta sus obras aguas abajo de la entrega a riego del embalse homónimo, con un caudal de diseño de 8,5 m³/s. Su objetivo era regar las zonas de cultivo aguas abajo del embalse, aprovechando una seguridad de riego del 85%. Estas áreas incluían el sector de San Ignacio al norte del río Diguillín y los sectores del Parrón y El Carmen al sur.

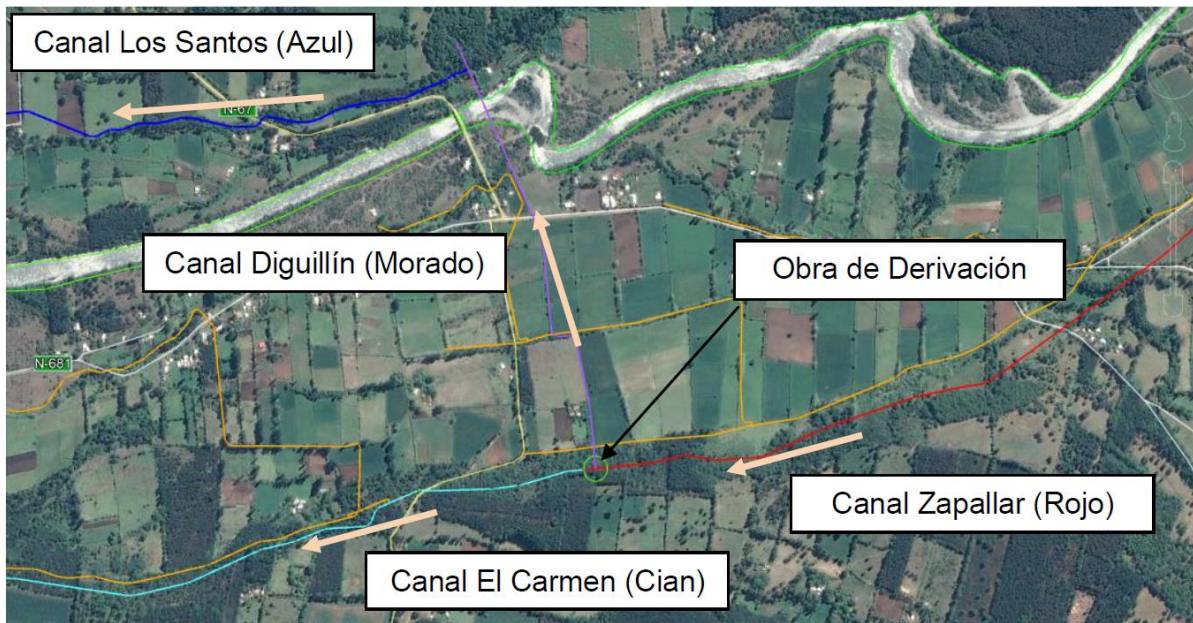
Figura 7-28: Esquema General Sistema de Riego Embalse Zapallar



Fuente: DOH-MN, 2018

El canal matriz proyectado, llamado canal Zapallar, comienza después de la entrega a riego y termina en la obra de derivación hacia el sector norte. Aguas abajo de esta obra, la red secundaria se desarrolla por la ribera sur del río Diguillín con el canal El Carmen y por la ribera norte con el canal Los Santos. El agua se transporta a la ribera norte mediante el canal Diguillín, que nace de unas compuertas laterales en la obra de derivación y cruza el río Diguillín a través de un sifón del mismo nombre, tras lo cual comienza el canal Los Santos (Figura 7-29).

Figura 7-29: Esquema Obra de Derivación y Canales Secundarios



Fuente: DOH-MN, 2018

A lo largo de los canales secundarios existen salidas laterales, dando origen a los ramales que conducen las aguas hasta los diferentes predios, estos ramales componen la red terciaria del sistema de riego del Embalse Zapallar.

A continuación, se indican los sectores en los que DOH-MN (2018) llevaron a cabo el catastro de hectáreas de riego:

Sector Sur Comuna el Carmen Entre Río Diguillín y Estero Temuco

Sector Sur Comuna el Carmen Entre Estero Temuco y Estero Las Raíces

Sector Sur Comuna El Carmen desde Canal El Parrón que se Alimenta por Canal Zapallar

Sector Comuna de San Ignacio desde Canal Los Santos Proyectado

Sector Comuna de San Ignacio Entrega desde Canales Existentes

Sector Comuna de San Ignacio desde Canal Los Santos Proyectado

Sector Comuna de San Ignacio Entrega desde Canales Existentes

En la Tabla 7-13 y Tabla 7-14 se muestra el resumen de las hectáreas de riego del Sector Sur y Sector Norte comuna de San Ignacio.

Tabla 7-13: Resumen Sector Sur Comuna de San Ignacio Proyectados

Ramal de Entrega	Total Área de Riego [ha]	Total N° de Roles
Sector Sur Comuna de El Carmen	3.883,2	438

Fuente: DOH-MN, 2018

Tabla 7-14: Resumen Sector Norte Comuna de San Ignacio Proyectados

Ramal de Entrega	Total Área de Riego [ha]	Total N° de Roles
Sector Sur Comuna de El Carmen	3.104,2	508

Fuente: DOH-MN, 2018

Finalmente, en la Tabla 7-15 se muestran las hectáreas de riego a ramales desde canales existentes.

Tabla 7-15: Entregas a Ramales desde Canales Existentes

Entregas a Ramales desde Canales Existentes				
Sector Norte Comuna de San Ignacio				
Ramal de Entrega	Área de Riego [ha]	Total Área de Riego Ramal	Numero de Roles	Total N° de Roles
Los Canelos LC-1	132,9	163,7	27	35
Los Canelos LC-1-1	17,2		5	
Los Canelos LC-1-2	13,6		3	
Sandoval y Álamos SYA-1	177,0	238,3	11	24
Sandoval y Álamos SYA-2	50,5		10	
Sandoval y Álamos SYA-1-1	10,8		3	
Entrega Cerro Colorado	248,2	248,2	1	1
Total	650,2	650,2	60	60

Fuente: DOH-MN, 2018

Información sobre Caracterización hidrogeológica:

Se realizó la caracterización hidrogeológica del área asociada al embalse Zapallar para generar la información base necesaria para construir un modelo de filtraciones bajo el muro del embalse. El objetivo fue calcular los caudales de filtración bajo la presa, determinando sus efectos sobre la napa y las fuentes de agua subterránea entre el muro y el puente Zapallar.

La caracterización geológica indicó que en la zona del muro y aguas abajo no existían depósitos sedimentarios que pudieran conformar acuíferos de interés, lo que explicaba la escasez de pozos profundos y la prevalencia de captaciones subsuperficiales relacionadas con el escurrimiento del río Diguillín.

Sin embargo, los antecedentes de más de 20 sondajes geotécnicos mostraron depósitos sedimentarios de bolones y gravas con espesores de 11 a 20 m, que disminuían lejos del cauce principal, alcanzando 3,3 a 3,8 m. En las terrazas del río Diguillín, aunque el relleno aumentaba su espesor, también contenía más limos y arcillas, haciéndolo menos permeable.

Hacia aguas abajo, los sondajes cerca del cauce principal presentaron un relleno más grueso (22,5 a 27,8 m) de gravas y bolones con más limos y arcillas. Ensayos Lugeon y Lefranc a distintas profundidades permitieron obtener valores de permeabilidad del relleno y la roca subyacente. Esta información permitió conocer el material del valle del río Diguillín en el sector del embalse.

Información sobre los derechos subterráneos:

Se revisó la información oficial de la DGA sobre los derechos de aguas subterráneas en las comunas de El Carmen, San Ignacio y Pinto. Se identificaron 510 derechos subterráneos, de los cuales 4 estaban dentro del área de estudio. La Tabla 7-16 registraba estos derechos y sus coordenadas.

Tabla 7-16: Derechos de Aguas Subterráneas

Código de Expediente	Nombre Solicitante	Fecha de Resolución/ Envío al Juez/ Inscripción C.B.R.	Tipo y Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom (l/s)	UTM Norte Captación (m)	UTM Este Captación (m)	Cota terreno (msnm)	Datum
ND-0801-8971	José Santos Guzmán Baeza	14/03/2017	C-P-C	1,10	5.917.953	251.106	494	1984
ND-0801-8981	Bernarda De Las Mercedes Ruiz Soliz	22/07/2016	C-P-C	0,14	5.917.600	249.537	458	1984
ND-0801-5946	María Gabriela Muñoz Contreras	15/12/2009	C-P-C	1,70	5.917.459	250.088	470	1984
ND-0801-6782	Pedro Ángel Inostroza Molina	02/09/2009	C-P-C	0,50	5.921.686	256.366	689	1984

Fuente: DOH-MN, 2018

El caudal total para estos 4 derechos es de 3,44 l/s y corresponde a captaciones someras, tipo noria o zanja. Debido a su elevación y ubicación, estas captaciones no se verían afectadas por las filtraciones bajo la presa del embalse Zapallar, ya que se ubican al menos 1.500 m del río y con un desnivel de 60 m.

Sin embargo, se indica que la situación era diferente para las norias y pozos cercanos al río, aunque estos no poseían derechos.

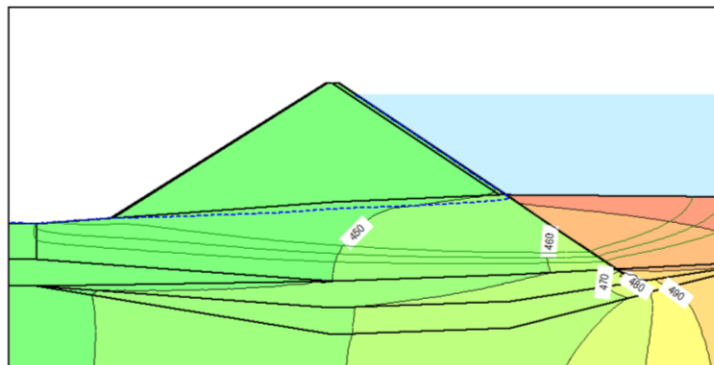
Información sobre análisis de flujo bajo la presa:

Se extendió el dominio del modelo de filtraciones para cubrir el Puente Zapallar, ubicado aproximadamente 5 km aguas abajo del muro del embalse, con el fin de conocer el caudal de filtración en el puente debido al embalse Zapallar. La Tabla 7-17 presenta los resultados de la modelación en el puente Zapallar, considerando la separación de estratos de los sondajes en la zona aguas abajo del muro del embalse.

La Tabla 7-18 presenta los resultados obtenidos, indicando que al suponer una menor anisotropía en el acuífero de estudio, los caudales filtrados aumentaban. Este aumento en el pie del muro fue del 12,7%. Sin embargo, el caudal pasante por filtraciones en el puente Zapallar se mantuvo en aproximadamente el 0,2% del caudal filtrado al pie del muro.

Finalmente, los valores del gradiente hidráulico no presentaron variaciones significativas con el cambio de anisotropía, manteniéndose ligeramente menores que para el caso de $K_h/K_v=10$, por lo que el riesgo de piping continuó siendo descartado.

Figura 7-30: Flujos Bajo el Muro en Tramo 2, Medio Anisotrópico



Fuente: DOH-MN, 2018

Tabla 7-17: Resultados Modelo de Filtraciones en Puente Zapallar, Medio Anisotrópico

Tramo	Ancho (m)	q unitario (m ³ /s/m)	Q filtración (l/s)
1	130	1,34*10 ⁻⁷	0,02
2	125	1,68*10 ⁻⁷	0,02
3	100	4,35*10 ⁻⁷	0,04
4	75	1,61*10 ⁻⁷	0,01
Total	430	-	0,09

Fuente: DOH-MN, 2018

Tabla 7-18: Gradientes Hidráulicos Medio Anisotrópico

Punto de Evaluación	Caudales Filtrados (l/s)	
	Anisotropía $K_h/K_v=10$	Anisotropía $K_h/K_v=5$
Pie del Muro	46,4	52,3
Puente Zapallar	0,09	0,12

Fuente: DOH-MN, 2018

7.2.1. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS FORZANTES METEOROLÓGICAS

Se analizaron las precipitaciones máximas diarias disponibles en las estaciones Atacalco Fundo, Diguillín, San Lorenzo Fundo y Las Trancas, con el fin de obtener las precipitaciones máximas anuales en las duraciones de 24, 48 y 72 horas. Se rellenaron datos faltantes en el periodo 1941 a 1996, con los obtenidos del estudio “Precipitaciones Máximas Anuales en 1, 2 y 3 días”, realizado por la DGA en 1991.

No se analizaron cambios futuros de las variables precipitación máxima diaria y temperatura durante los eventos de tormenta que pueden afectar los caudales máximos instantáneos durante crecidas.

7.2.2. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS CRECIDAS

El estudio desarrolló estimaciones de crecidas asociadas a distintos periodos de retorno, mediante métodos directos en base a datos observados e indirectos en base a precipitaciones, utilizando distintas metodologías de estimación indirecta.

La estimación directa de caudales para distintos periodos de retorno se hizo mediante análisis de frecuencia de las estaciones río Diguillín en San Lorenzo y río Renegado en Invernada, con una buena cantidad de datos (77 años) para caudales diarios y máximos instantáneos, separando en periodo pluvial, de deshielo y anual, de las cuales la anual es la que entrega los caudales más desfavorables. Los valores calculados de caudal en las estaciones son usados para realizar una estimación de las crecidas en la ubicación del embalse mediante técnicas de transposición.

Se utilizó además 3 métodos indirectos -Hidrograma unitario sintético, métodos de Seguel-Stowhas y Verni-King - para la estimación de caudales máximos instantáneos en función de precipitaciones, cuyos desarrollos son bajo formulaciones completamente distintas. Utilizó como base 4 estaciones meteorológicas de la zona, para las cuales actualizó la información histórica y realizó estimaciones de valores de precipitación para distintos periodos de retorno, tanto en 24h como 48h, así como también la Precipitación Máxima Probable en 24h mediante métodos estadísticos ajustados al contexto de la zona. Los valores calculados fueron usados con los métodos indirectos, obteniéndose valores relativamente coherentes entre estos, e incluso con la estimación directa mediante el análisis de las observaciones de caudal para los distintos periodos de retorno. El resultado de estos análisis se presenta en la Tabla 7-19. A pesar de algunas diferencias entre los valores, el coeficiente de variación de todos los valores estimados es bajo, lo que demuestra consistencia en los resultados.

Tabla 7-19: Valores de Caudales Máximos Instantáneos (m³/s) Para Distintos Periodos de Retorno, Estimados Según Distintas Metodologías

Período de retorno	H.U.S.		Seguel-Stowhas		Verni-King	Transposición información medida
	24h	48h	24h	48h		
10	1.049	1.192	840	836	893	903
25	1.272	1.382	1.025	965	1.070	1.109
50	1.439	1.514	1.100	1.060	1.206	1.262
100	1.608	1.641	1.350	1.192	1.345	1.414
200	1.776	1.763	1.505	1.297	1.486	1.565
500	2.003	1.923	1.745	1.430	1.680	1.764
1000	2.170	2.033	1.940	1.535	1.826	1.915
10000	2.764	2.420	2.540	1.850	2.364	2.416

Fuente: DOH-MN, 2018

Al comparar con valores previos, se observa un aumento en la estimación de los métodos indirectos, y una disminución con el método directo. El aumento de los métodos indirectos se justifica en la inclusión de nuevos datos que generan cambios significativos en la estadística. Además, una comparación con valores de caudal específico de cuencas cercanas muestra que las estimaciones de la cuenca están dentro de un rango razonable.

Considerando estos resultados, propone valores de caudales de diseño con un enfoque conservador, teniendo en cuenta un factor de incremento por tendencias de cambio climático que pudiesen aumentar el área pluvial aportante.

Para estimar la CMP, utilizó los valores de PMP con la metodología de hidrograma unitario sintético utilizado previamente en el cálculo de crecidas asociadas a periodos de retorno, con las mismas parametrizaciones de convolución, distribución horaria e infiltración, con el que obtiene un caudal máximo instantáneo superior, como era esperable, al estimado para el periodo de retorno de 10.000 años.

La metodología planteada se considera sólida y bien desarrollada. Sin embargo, se deben incluir los datos más recientes, en particular los asociados al año 2023 donde hubo eventos de precipitación que podrían alterar los resultados de forma significativa. Se destaca que, a pesar de haber sido de forma cualitativa y sin base numérica, consideró efectos de cambio climático.

7.3. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO EMBALSE ZAPALLAR, GESTIÓN AMBIENTAL ESTRATÉGICA CONSULTORES (2020)

7.3.1. ASPECTOS RELACIONADOS A LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

El proyecto tuvo como objetivo analizar el impacto ambiental de la construcción de un embalse que almacenará hasta 80 hm³ de agua destinada al riego. Esto beneficiará a los agricultores de la zona al proporcionar, junto con el Sistema de Riego Laja-Diguillín, una seguridad de riego del 85% para aproximadamente 54.630 ha aseguradas (44.630 ha actuales) y dotar de nuevo riego a 10.000 ha de las comunas de San Ignacio y El Carmen.

Tipología Principal del proyecto

Dentro de la tipología del proyecto, la principal es la siguiente: Artículo 10 de la Ley 19.300 a) acueductos, embalses, o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas. Cumple con esta categoría porque se trata de un embalse de riego e incluye un canal matriz con una capacidad 8,5 m³/s, tal como se especifica en el artículo 294 del Código de Aguas.

Artículo 3 del D.S. N°40/2013 del Ministerio de Medio Ambiente a) Presas, drenajes, desecación, dragado, defensa o alteración, significativos, de cuerpos o cursos naturales de aguas, incluyendo a los glaciares que se encuentren incorporados como tales en un Inventario Público a cargo de la Dirección General de Aguas. Se entenderá que estos proyectos o actividades son significativos cuando se trate de:

a.1 Presas cuyo muro tenga una altura superior a cinco metros (5 m) medidos desde el coronamiento hasta el nivel del terreno natural, en el plano vertical que pasa por el eje de éste y que soportará el embalse de las aguas, o que generen un embalse con una capacidad superior a cincuenta mil metros cúbicos (50.000 m³).

El proyecto cumple con esta tipología porque consiste en un embalse de riego con un muro de 100 metros de altura y una capacidad de almacenamiento de 80.000.000 m³.

Indicación del Desarrollo del Proyecto por Etapas

El proyecto se presentó en dos etapas debido a cuestiones de temporalidad en el diseño de las obras. La primera etapa corresponde al Estudio de Impacto Ambiental, que consiste en la construcción de un embalse con capacidad para almacenar hasta 80 hm³ de agua para riego, beneficiará a los agricultores de la zona. Incluye la construcción del Embalse, el canal primario o matriz Zapallar, mejoramiento del camino de acceso a rutas N-681, N-675 y N-721, la construcción de 4,248 km de nuevo camino y dos senderos peatonales. Las obras, localizadas en

las comunas de Pinto y El Carmen, aumentarán la productividad y rentabilidad agropecuaria de la zona, con una operación proyectada de aproximadamente 50 años.

La segunda etapa abarcó al sistema de distribución de las aguas mediante los canales secundarios, llamados Los Santos y El Carmen, con una capacidad será superior a 2 m³/s. Estos canales estarán ubicados en las comunas de San Ignacio y El Carmen. Los plazos para la construcción y el inicio de esta etapa aún no se han definido, pero se proyecta presentar a evaluación ambiental esta etapa del proyecto durante el 2021.

Vida útil

El proyecto considera una vida útil indefinida, ya que su diseño está proyectado para operar por más de 50 años. A continuación, se detallan los hitos y las fechas aproximadas de inicio y término de cada fase del proyecto:

Tabla 7-20: Hitos de Inicio y Término del Proyecto

Fase del Proyecto	Duración Estimada	Hito	Fecha Aproximada	Descripción Actividad
Construcción	60 meses	Inicio	30/6/2023	Adjudicación del contrato de la Concesión del Proyecto.
		Término	23/06/2028	Documento que dé cuenta de la puesta en Servicio Provisiones de las Obras.
Operación	Indefinido	Inicio	24/06/2028	Documento que dé cuenta de la puesta en Servicio Provisiones de las Obras.
		Término	Indefinida	Dado que esta fase es indefinida, no se considera fecha e hito de término de la operación.
Cierre	No Aplica	Inicio	-	No Aplica
		Término	-	

Fuente: Gestión Ambiental Estratégica Consultores, 2020

División Político – Administrativa a Nivel Regional, Provincial y Comunal

El proyecto se localiza administrativamente en la Región del Ñuble, Provincia de Diguillín. El embalse está localizado en las comunas de Pinto y El Carmen, mientras que el camino de acceso y el canal primario o matriz Zapallar se encuentran en la comuna de El Carmen.

Geográficamente, el proyecto se ubica en la angostura del valle del río Diguillín, denominada Zapallar, a 12 km aguas abajo de su confluencia con el río Renegado; ambos pertenecen a la cuenca del río Itata. Las obras del embalse están situadas entre las coordenadas UTM 250.153 – 260.153E y 5.917.142 – 5.921.166 N (Datum WGS84, Huso 19S), a una elevación media de 520 msnm y a una altura de 100 m sobre el lecho actual del río Diguillín.

En cuanto a su ubicación respecto a algunos centros poblados, el área de inundación se encuentra a unos 48 km al sureste de la ciudad de Chillán y a 10 km al noroeste de la localidad de Recinto.

Determinación del área de influencia del Proyecto

- **Calidad del Aire:** El AI estará determinada en función de los receptores sensibles que podrían ser afectados por las emisiones atmosféricas del Proyecto. Se considera un buffer de 3 km alrededor del proyecto, se estima en 10.334 ha.
- **Niveles de Ruido y Vibraciones:** Se establecen en función de la presencia de asentamientos humanos o ecosistemas importantes susceptibles de ser afectados por un aumento en los niveles de presión sonora y vibraciones. El AI abarca 1,778 km alrededor del proyecto, se estima en 7.166 ha.
- **Geología y Geomorfología:** Está determinada por el entorno geográfico inmediato del área de emplazamiento del Proyecto, que incluye los empréstitos, botaderos y las obras del Proyecto. Se estima en 134,22 ha.
- **Áreas de Riesgos Geológicos y Geomorfológicos:** Están determinadas por las áreas intervenidas por el Proyecto, que considera el entorno geográfico inmediato de su emplazamiento, definidas por las obras del Proyecto que tienen un potencial de generación de impactos ambientales concretos y directos. Se estima en 17,09 ha.
- **Hidrología:** Se considera como la superficie real de emplazamiento y afectación del medio hídrico por las obras asociadas al embalse, y su área de inundación, referida a la cota 513 msnm con un buffer de 500 m desde el Proyecto. Se estima en 1.577,94 ha.
- **Hidrogeología:** El AI se ha definido comparando la piezometría estimada para la situación base, aproximadamente 1 km aguas abajo del muro. Se estima en 112,9 ha.
- **Suelo:** El AI corresponde a las partes, obras y acciones del proyecto en la etapa de construcción y operación, además de un buffer de 10 m. Se estima en 445,6 ha.
- **Flora y Vegetación Terrestre:** El AI terrestre corresponde a todos aquellos sectores donde las obras y actividades asociadas al Proyecto podrían generar algún tipo de efecto sobre este componente. Aunque las obras físicas se emplazan en una superficie determinada, los efectos sobre este componente pueden extenderse más allá de este límite. Se estima en 1.191,89 ha.
- **Hongos:** El AI corresponde a las partes, obras y acciones del proyecto en la etapa de construcción y operación, además de un buffer de 100 m. Se estima en 859,43 ha.
- **Fauna Terrestre:** El AI comprende un área de forma variable que puede proyectarse desde los 10 hasta los 200 metros más allá de las obras del proyecto. La superficie total del AI es de 914.5 ha, de las cuales 125.9 ha corresponden a la superficie que ocupa el río Diguillín.
- **Flora y Fauna Acuática, Calidad de Agua y Sedimentos:** El AI corresponde al tramo del río Diguillín comprendido entre 500 metros aguas arriba de la cola del área de inundación del embalse y su intersección con el canal Laja-Diguillín. Se estima en 365,70 ha.

- Patrimonio Cultural y Arqueológico: El AI corresponde a todas las obras contempladas para la construcción del Embalse Zapallar. Se estima en 385,5 ha.
- Paisaje: Para identificar el AI, se determinan los puntos de observación desde lugares de tránsito común de transeúntes, desde donde se logra una visual hacia el Proyecto. Se estima en 2.885,89 ha.
- Áreas Protegidas y Sitios Prioritarios para la Conservación: El AI corresponde a todas las obras contempladas para la construcción del Embalse Zapallar. Se estima en 385,5 ha.
- Atractivos Naturales o Culturales y sus Interrelaciones (Turismo): El AI se considera a partir del espacio geográfico donde se ubicarán las obras del Proyecto y la relación directa entre la oferta turística existente de las principales localidades y el Proyecto. Se estima en 6.577,6 ha.
- Uso del Territorio y su Relación con la Planificación Territorial: El AI se definió a partir de los antecedentes operativos y espaciales de la construcción del Embalse Zapallar, con un radio de 500 m en torno al área de inundación y 100 m en torno a caminos y el canal matriz. Se estima en 784,2 ha.
- Medio Humano: El AI se define según las obras, partes y/o actividades del proyecto que podrían afectar tanto los asentamientos como los grupos humanos que habitan. Por lo tanto, corresponde a 3.089 ha para la comuna de Pinto y 6.176 ha para la comuna de El Carmen (AI total 9,265 ha).
- Proyecto o Actividades con Resolución de Calificación Ambiental vigente: El AI corresponde a todas las obras contempladas para la construcción del Embalse Zapallar, con un buffer de 20 km. Se estima en 130.703,30 ha.

Clima y Meteorología

En la zona de estudio se presenta un clima perhúmedo de eficacia mesotérmica, caracterizado por una moderada escasez de agua en verano. Este tipo de clima prevalece en el área longitudinal centro oriental de la depresión central, con altitudes que oscilan entre 180 y 600 metros. Durante este período, que abarca desde enero hasta marzo, se registra un período seco de tres meses sin precipitaciones, salvo en casos excepcionales que pueden alcanzar los 318.9 mm.

Geología

El proyecto estará ubicado en las laderas de los cerros de la Precordillera Andina. La geología del área se caracteriza por la presencia de rocas basales Terciarias de la Formación Cura-Mallín y unidades cuaternarias. En el área del embalse, la Formación Cura-Mallín se divide en dos unidades:

- La Unidad Inferior Sedimentaria Tcm (b) aflora aproximadamente a unos 600 metros al sureste aguas arriba de la cola del embalse, por aproximadamente 3 kilómetros.

- La Unidad Superior de Ignimbritas Tcm (a) consta de dos unidades de flujos piroclásticos petrográficamente similares, que se reconocen principalmente en el sector izquierdo de la zona de inundación del embalse.

Geomorfología

El área del Proyecto se sitúa en la unidad morfológica de la precordillera andina, específicamente en el valle fluvial del río Diguillín, entre las laderas de los cerros. Las principales formas están determinadas por la presencia de los valles del río Diguillín y del estero Recinto, creando anchas terrazas fluviales formadas durante la época Cuaternaria.

Hidrogeología

Corresponde a los depósitos fluvio aluviales del río Diguillín aguas abajo del embalse. En este tramo, el río se considera ganador, constituyendo el drenaje principal, tanto a nivel local como regional. De manera conceptual, se estima que el orden de magnitud de los flujos de entrada es de aproximadamente 500 l/s, correspondientes principalmente a la recarga lateral del sistema.

7.3.2. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS FORZANTES METEOROLÓGICAS

Se analizaron las precipitaciones en las estaciones pluviométricas Diguillín y Mayulermo. En Diguillín se detecta una tendencia a la disminución de las precipitaciones anuales en el período 1961 a 2018. En la estación Mayulermo se detectó también una tendencia a la reducción de las precipitaciones anuales entre 1992 y 2018. En ambas estaciones se realizó un análisis de los valores máximos anuales para una duración de 24 horas sin señalar la forma en que dicho valor se obtiene, por lo que, si fuera de interés para el estudio es necesario validar esta información, pues puede referirse a valores diarios.

Se describen en este informe los valores mensuales de la temperatura media, máxima y mínima registrados en la estación Diguillín en el período 1979 a 2016.

Adicionalmente, se caracterizaron los vientos usando la información del Explorador Eólico (Ministerio de Energía, 2010), valores obtenidos a base del modelo WRF (Weather Research and Forecasting) desarrollado por NCAR (National Center for Atmospheric Research) en Estados Unidos y aplicado para el año 2010 con una resolución espacial de 1 kilómetro y 12 niveles verticales entre 0 y 200 metros de altura.

No se analizaron cambios futuros de las variables precipitación y temperatura a nivel mensual, estacional o anual que puedan modificar las disponibilidades o demandas futuras del recurso hídrico; tampoco se observan análisis de cambios de las forzantes meteorológicas durante los eventos de tormenta que pueden afectar los caudales máximos instantáneos durante crecidas.

7.3.3. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS CRECIDAS

Si bien los aspectos relacionados a crecidas no son destacables, se rescatan los siguientes puntos:

- En el capítulo 2, en la Tabla 2-14 se utilizaron los caudales de diseño de periodos de retorno de 1.000 y 10.000 años estimados por el método del hidrograma unitario sintético desarrollado en el estudio “Estudios Actualización y Complementación Diseño Embalse Zapallar”.
- En el capítulo 4, en la sección VI.3.4 se mencionan riesgos asociados a crecidas fluviales, pero se abordan de forma cualitativa y enfocado en los potenciales que están podrían generar.
- En el capítulo 4, en la sección VII.2 – Metodología del capítulo de hidrología – se señala que se tomaron como antecedente el estudio “Atkei (2012) Estudio Hidrológico de Caudales Medios Diarios, Caudales Medios Mensuales y Crecidas Río Diguillín VIII Región del Biobío, Proyecto EIA Pequeña Central Hidroeléctrica de Pasada Halcones (julio 2012)”. Se tomaron como referencia los valores estimados en este estudio, en el cual se señala estimó los valores de caudales máximos diarios y caudales instantáneos máximos diarios a través de métodos directos (análisis de frecuencia de datos observados) y métodos indirectos (hidrograma unitario sintético, método Verni & King, entre otros).
- En el capítulo 6, en la sección 6.5 se menciona que el embalse tendrá un vertedero capaz de evacuar la crecida de periodo de retorno de 10.000 años.

7.4. PLANILLAS DE RESULTADOS MODELO WEAP. “MODELACIÓN Y EVALUACIÓN AGROECONÓMICA DEL EMBALSE ZAPALLAR, VII REGIÓN DEL BÍO-BÍO – INFORME FINAL, R&Q INGENIERÍA (2017).

El estudio INFORME FINAL, R&Q INGENIERÍA (2017) contiene un set de planillas con información de seguridad de riego en canales matrices, coeficientes de cultivo y tasas de riego. Dicha información será clave para la estructura del modelo que se elaborará. En la Tabla 7-21 se desglosan las planillas disponibles, se debe verificar con la Inspección Fiscal si existen otras planillas adicionales que sean de relevancia para el proyecto.

Tabla 7-21: Planillas con Información del Estudio DOH-R&Q INGENIERÍA (2017)

Planillas Modelo en Situación Actual	Planillas Modelo en Situación Actual
1. Resultados Calibración, Validación y var. estacional_v4.xlsm	Calculo Kc y Ef - Sit Futura
Cobertura Agua Abajo Diguillín Colton 2006-2015 SP_v4.xlsx	Determinación Evap Embalse
Seguridad de riego_ Sobre matriz DC_ SP_v5.xlsx	Determinación Qeco
Seguridad de riego_ Bajo matriz DC_ SP 1979-2006_v5.xlsx	1 Escenario Referencia Vol = 80Hm3
Seguridad de riego_ Bajo matriz DC_ SP 2006-2015_v5.xlsx	2 Escenarios Volumen Embalse
Tasa de Riego Potencial_ Sobre matriz DC_Actual.xlsx	3 Escenarios Nodos Adicionales
Tasa de Riego real_ Sobre matriz DC_Actual.xlsx	4 Escenario Vol = 70Hm3, 10000ha_ok
Caudal Medio Anual_ SP_v4.xlsx	5 Escenario Vol = 80Hm3, 12000ha_ok
Curvas de duración_ SP_v4.xlsx	6 Escenario Vol = 90Hm3, 14200ha_ok
Balance Zona de riego_ SP_v4.xlsx	7 Escenario Vol = 100Hm3, 15800ha_ok
Balance Zona sin riego_ SP_v4.xlsx	
Acuíferos SP_v4.xlsx	
Flujo desde acuíferos hacia ríos SP_v4.xlsx	
Cobertura Agua arriba Diguillín Colton SP_v4.xlsx	
Cobertura Agua Abajo Diguillín Colton 1979-2006 SP_v4.xlsx	

Fuente: Planillas recopiladas estudio DOH-RQ 2017

7.5. DETERMINACIÓN DE REGLA OPERACIONAL PARA EL EMBALSE ZAPALLAR REGIÓN DE ÑUBLE, UNIVERSIDAD DE CHILE, FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS (2021).

El informe contiene la formulación del modelo operacional y los resultados de la simulación de operación del embalse Zapallar utilizando una regla de operación estándar. Se analizó la utilización de una regla de operación con “hedging”, la cual apuntaba a almacenar agua de un año a otro, a costa de las entregas de la temporada en curso. Sin embargo, se determinó que esta consideración carecía de sentido, debido a que el embalse se llenaba en una gran proporción de los años, específicamente entre los meses de junio a septiembre, y el volumen afluente almacenable en la temporada de riego era nulo. Por lo tanto, inducir déficits adicionales en la temporada actual y almacenar agua para futuras temporadas no mejoraba el desempeño del embalse, el cual, como se explicó, estaba más bien determinado por la relación entre la demanda de riego y la capacidad de almacenamiento.

En relación con la modelación se consideraron tres parámetros relevantes que condicionan fuertemente el funcionamiento del embalse y sus resultados:

- a. Naturaleza del derecho permanente que debe respetarse y que da lugar a su vez al ejercicio del derecho eventual.
- b. Demanda de riego, directamente asociada a la superficie regada.
- c. Porcentaje de pérdidas en las conducciones.

En el modelo operacional se simuló un periodo de 37 años hidrológicos, 1978/79 – 2014/15.

Respecto a la seguridad de riego, se evalúan **cinco escenarios** definidos como sigue:

Escenario 1: Demanda de Riego con entrega de Derechos Permanentes (33,39 m³/s) más entrega del caudal ecológico.

Escenario 2.1: Demanda de Riego con entrega de Derechos Permanentes (21,36 m³/s) más entrega del caudal ecológico. El valor de derecho permanente considerado se basa en el ajuste señalado por la DOH a la cantidad de regadores.

Este escenario se divide en dos:

Escenario 2.1.1: Considera el número de hectáreas base

Escenario 2.1.2: Considera el cálculo de las hectáreas para obtener una seguridad de riego del 85%.

Escenario 2.2: Demanda de Riego con entrega de Derechos Permanentes según Convenio DOH más entrega del caudal ecológico.

Este escenario se divide en dos:

Escenario 2.2.1: Considera el número de hectáreas base.

Escenario 2.2.2: Considera el cálculo de las hectáreas para obtener una seguridad de riego del 85%.

En la Tabla 7-22 se muestran los resultados de los distintos escenarios:

Tabla 7-22: Resultados de Seguridad de Riego según Estudio (DOH-DIC, 2021)

Escenario	Seguridad Riego [%]*	Hectáreas Regadas [ha]	Demanda Máxima [Hm ³]	Promedio Cumplimiento Demanda [%]	Modalidad Entrega Der. Permanentes	Número de Años Falla	Número de Años Embalse Lleno
Escenario 1	0,0	10000	86	78,4	33,385	37	30
Escenario 2.1.1	0,0	10000	86	85,6	21,358	37	34
Escenario 2.1.2	86,5	9882	85	86,6	21,358	5	34
Escenario 2.2.1	0	10000	86	88,9	Convenio	37	37
Escenario 2.2.2	100,0	9882	85	90,0	Convenio	0	37

Años Analizados = 37

Capacidad/Demanda Máxima = 0,92

* La seguridad de riego asociada a un 100% indica que no es posible definir una superficie de riego para una seguridad de 85%. Si la superficie es reducida el valor de la seguridad de riego disminuye a un 0%.

Fuente: Estudio DOH-DIC, 2021

Un aspecto relevante de este estudio corresponde a las tasas de riego optimizadas que se utilizaron, ya que deberían ser las tasas que se consideren para el presente estudio realizado por TYP. De acuerdo al informe, las tasas de riego fueron proporcionadas por la DOH, y se presentan en la Tabla 7-23 y Tabla 7-24.

Tabla 7-23: Tasa de Riego Total a Nivel Predial Por Sector Beneficiado (m³/ha)

Mes	Blancos	Con Adicional	Secano ribera derecha	Secano ribera izquierda
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	201.10	30.80	0.00	0.00
11	951.20	566.60	447.50	447.50
12	2,228.00	2,003.30	1,955.00	1,955.00
1	1,922.90	2,340.50	2,481.40	2,481.40
2	1,652.70	2,139.60	2,247.80	2,247.80
3	566.40	892.00	737.20	737.20
Total	7,522.30	7,972.80	7,868.90	7,868.90

Fuente: Estudio DOH-DIC, 2021

Tabla 7-24: Demanda Mensual Total de Riego a Nivel Predial (Hm³)

Mes	Volumen
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	0,00
10	0,36
11	5,35
12	19,81
1	23,49
2	21,14
3	7,1
Total	77,25

Fuente: Estudio DOH-DIC, 2021

Según el estudio existen tres parámetros relevantes que condicionan fuertemente el funcionamiento del embalse y sus resultados:

- Derecho Eventual de la DOH solo en los meses de junio a septiembre.
- Demanda de riego.
- Porcentaje de pérdidas en las conducciones.

También se indica que:

- La demanda neta a pie de embalse, considerando las pérdidas en las conducciones de un 10%, es mayor a la capacidad del embalse, lo que implica que no se tiene la capacidad para suministrar al 100% la demanda de riego, incluso con embalse lleno.
- El embalse en ambos casos se vacía completamente al final de la temporada de riego.

La principal recomendación del estudio corresponde a que “la capacidad de embalse no es suficiente para satisfacer la totalidad de la demanda de riego. Esto indica preliminarmente que una mayor capacidad del embalse, que permitiera una utilización más cabal del derecho eventual disponible, posiblemente se vería reflejado en años de llenado incompleto del embalse, pero con una mayor superficie regada con 85% de seguridad.”

El estudio indica que el modelo utiliza la información hidrológica, superficies agrícolas, demandas de agua de riego, derechos de agua, características del proyecto de embalse y otras, de los antecedentes e informes disponibles de la DOH. Los escenarios referidos a regar las hectáreas base o aquellas que cumplen con la seguridad del 85% consideran las condiciones registradas históricamente para dichos efectos.

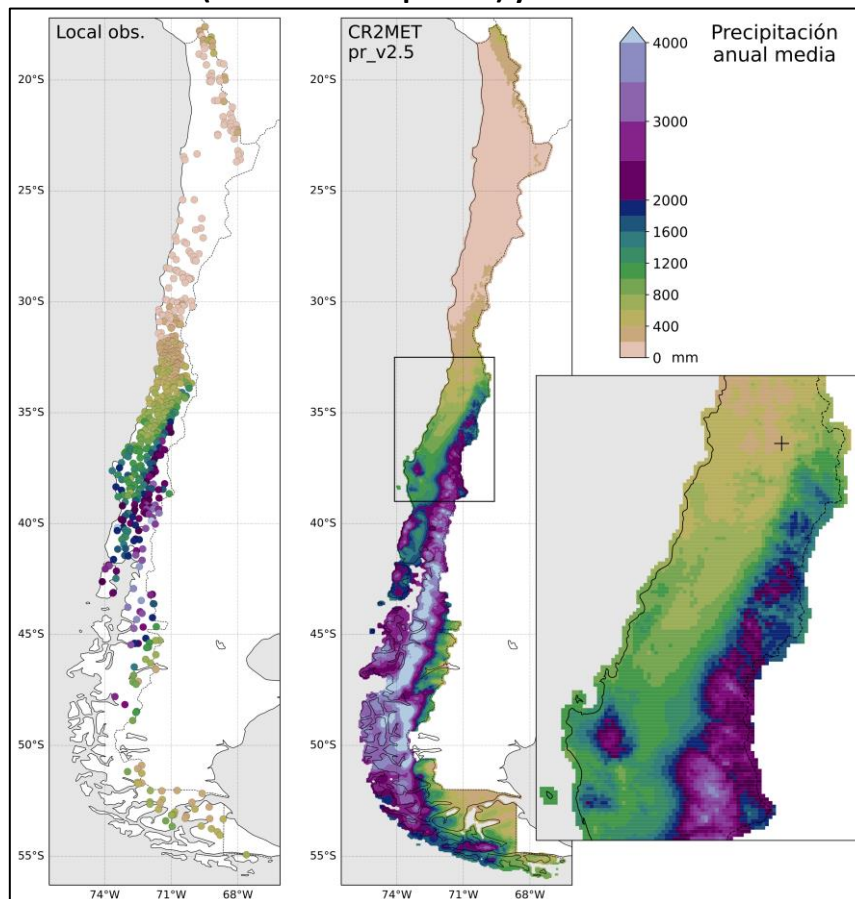
La simulación de la regla operacional consideró sólo la hidrología y demandas históricas de los cultivos para realizar el balance en el embalse, sin considerar cambios futuros de la disponibilidad y demanda hídrica por efecto del cambio climático.

7.6. HOMOLOGACIÓN DEL CÁLCULO HIDROLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA OFERTA NATURAL DE AGUA HISTÓRICA Y FUTURA EN CHILE. SIT N°524, FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS (2021).

7.6.1. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS FORZANTES METEOROLÓGICAS

En el marco del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional se desarrolló un producto grillado a escala de 0,05°x 0,05° de latitud y longitud denominado CR2Met, que determinó las forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura máxima, mínima y media) a nivel diario para todo el territorio continental chileno. A través de los años 2016 a 2021 se consideraron diferentes versiones del producto debido a la aparición del reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020, citado en DGA, 2022) con mejor resolución espacial que su predecesor (ERAInterim) y, a la vez, se usaron cambios metodológicos que buscaban perfeccionar el producto grillado nacional. La versión 5 del producto fue presentada en el año 2022 y validada a nivel anual, para el período 1979-2020, tal como se muestra en la Figura 7-31 para la precipitación.

Figura 7-31: Acumulación Anual de Precipitación Promedio Entre 1979 Y 2020, Obtenida de Estaciones Pluviométricas (Panel De La Izquierda) y del Producto CR2MET V2.5 (Derecha)



Fuente: Universidad de Chile, 2021

Para proyectar las forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura) se seleccionaron, en los inicios del proyecto de actualización del balance hídrico nacional en 2017, los modelos climáticos globales (GCM, por sus siglas en inglés) que se detallan en la Tabla 7-25. Estos modelos fueron seleccionados por su sensibilidad climática, entre aquellos que representaban adecuadamente la influencia del fenómeno del Niño, ENSO y la Oscilación Antártica, SAM.

Tabla 7-25: Modelos Globales de Clima Seleccionados Para Representar Las Proyecciones de Cambio Climático en DGA (2022)

Modelo	Institucion	Sensibilidad climática
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research. Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia.	Baja Extrema
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA.	Baja moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France.	Alta extrema

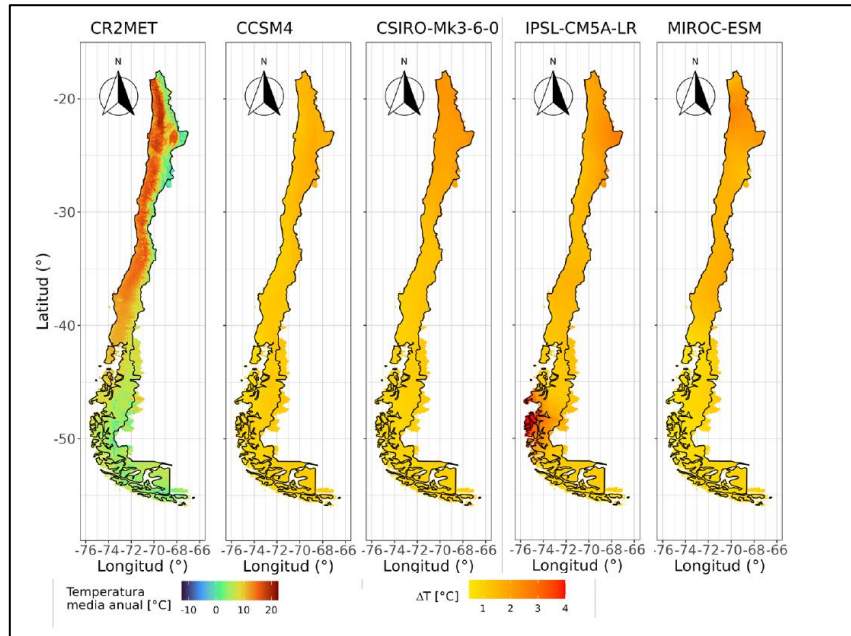
Fuente: Universidad de Chile, 2021

En el proceso de escalamiento, realizado a nivel diario, se utilizó el método multivariado MBCn que logra mejorar la representación de las temperaturas para eventos de precipitación mayores a 0,1 mm/d.

Los resultados que se obtuvieron en este estudio para los cambios de las forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura) futuras en el periodo 2030 a 2060, respecto a las del período 1985 a 2015, pueden apreciarse en la Figura 7-32 para la temperatura media anual y en la Figura 7-33 para la precipitación media anual.

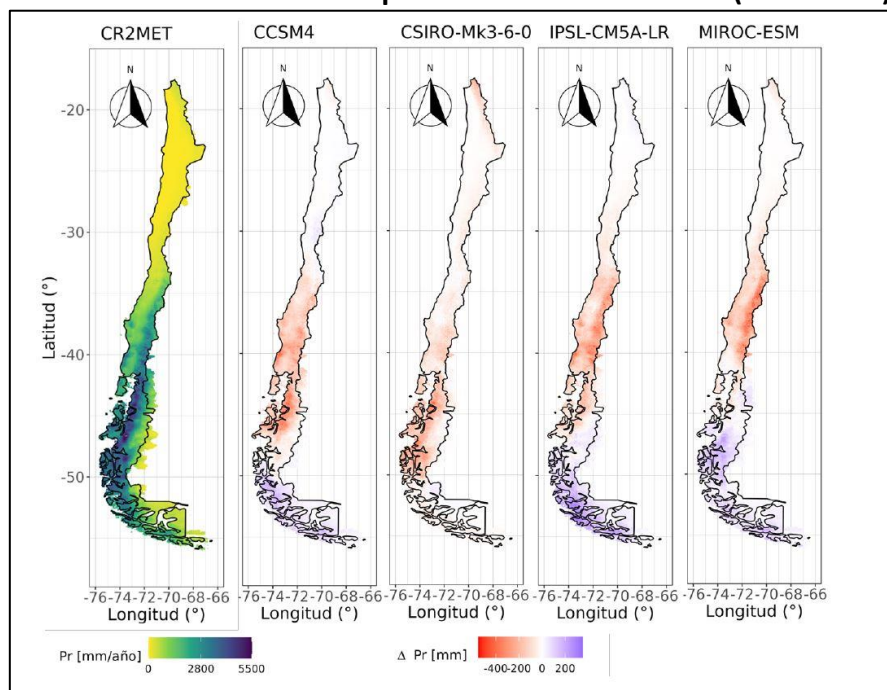
Para la zona de interés del presente estudio se observan aumentos similares de la temperatura media anual del orden de 1,5°C para el periodo 2030 a 2060 mientras que las variaciones de precipitación anual promedio muestran diferencias cuya intensidad de los cambios tiene concordancia con la sensibilidad asociada a los modelos, donde CSIRO-Mk3-6-0 (menor sensibilidad) presenta menores reducciones (hasta 5%) mientras que IPSL-CM5A-LR (mayor sensibilidad) muestra las reducciones más significativas (hasta 15%).

Figura 7-32: Temperatura Media Anual Para Producto de Referencia CR2MET del Periodo Histórico 1985-2015 y Cambios de Temperatura Media Anual Proyectados Para 4 GCM Hacia El Periodo 2030-2060 con Respecto al Periodo Histórico (1985-2015)



Fuente: Universidad de Chile, 2021

Figura 7-33: Cambios de Precipitación Anual Promedio Proyectados Para Cuatro GCM Hacia El Periodo 2030-2060 con Respecto al Periodo Histórico (1985-2015)



Fuente: Universidad de Chile, 2021

7.7. PRESENTACIÓN SOFTWARE PARA LA GESTIÓN DEL SISTEMA RÍO-LAGO LAJA PARA LA SEGURIDAD HÍDRICA BAJO LA ACTUAL Y FUTURA CRISIS CLIMÁTICA, UNIVERSIDAD DE CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN/CIBAS/UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN (2023)

Este proyecto corresponde a una iniciativa asociada al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef) IDeA I+D 2023 en el marco de un proyecto financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). Dicho proyecto es liderado por el Dr. Enrique Muñoz, académico de la Facultad de Ingeniería, dirige el proyecto “Software para la gestión del sistema Río-Lago Laja para la seguridad hídrica bajo la actual y futura crisis climática”. Cabe destacar que el Dr. Enrique Muñoz fue el especialista de modelación del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del río Bio Bio (2021).

Se aclara que el rol de DOH-Región del Ñuble corresponde a una institución interesada en el producto, y que en ningún caso corresponde a un mandante o realiza labores de inspección fiscal del producto. Por lo que los resultados son de carácter de “Investigación Aplicada” del producto financiada por ANID.

Según la nota publicada por ucsc.cl/medios-ucsc la falta de agua originó realizar este proyecto, sobre todo porque se habla de una megasequía desde el 2010, la cual ha llevado a una baja en los volúmenes de agua en el lago y en los caudales de los ríos, lo que se ha traducido en una restricción en su uso respecto a lo que tradicionalmente estaban acostumbrados los actores de la cuenca. El Dr. Enrique Muñoz indica que “Hay un uso que no es formal dentro del Código de Aguas, que tiene relación con el turismo y el Salto del Laja es un lugar muy atractivo, pero no tiene derechos de agua o un caudal asegurado bajo esa normativa. Eso, sumado a la actual megasequía junto con los usos de hidroelectricidad y agricultura, ha traído como consecuencia que surjan conflictos entre usuarios”.

En el 2017 se firmó un convenio para una nueva forma de operación del lago, donde colaboraron junto a la Dirección de Obras Hidráulicas y organizaciones de usuarios, quienes no cuentan con una herramienta que les permita operar de manera eficiente el recurso.

El proyecto busca instalar una herramienta (software) para apoyar de manera objetiva y con mayor información a quienes toman las decisiones de consumo. También se busca simular distintos escenarios que se presenten en el año, como pronósticos de caudales, deshielos o la cantidad de agua que se proporcione en algunos meses. Se espera que el proyecto finalice y tenga operativo sus resultados en el año 2025.

En esta iniciativa están involucrados los Canalistas del Laja, Canal Zañartu, Canal Laja-Diguillín, Colbún, la Dirección de Obras Hidráulicas y la Dirección General de Aguas también está interesada en tomar parte. El equipo, que es dirigido por el Dr. Enrique Muñoz, lo integran el Dr. José Luis

Arumí, académico de la Universidad de Concepción, y los ex estudiantes Robert Clasing, Yelena Medina y Andrés Soto (información extraída desde ucsc.cl/medios-ucsc).

Al final del periodo se espera que el proyecto, la herramienta desarrollada por Muñoz et al. debería entregar múltiples resultados de interés, entre ellos los caudales de trasvase del canal Laja-Diguillín.

Figura 7-34: Software Para La Gestión del Sistema Río-Lago Laja Para La Seguridad Hídrica Bajo La Actual y Futura Crisis Climática

Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo
Ministerio de Ciencia, Tecnología, Innovación y Desarrollo
Gobierno de Chile

SOFTWARE PARA LA GESTIÓN DEL SISTEMA RÍO-LAGO LAJA PARA LA SEGURIDAD HÍDRICA BAJO LA ACTUAL Y FUTURA CRISIS CLIMÁTICA

Concurso IDeA I+D 2023

UCSC

Centro de Investigación en
CIBAS
Biodiversidad y Ambientes Sostenibles

Dirección de Obras Hidráulicas
Ministerio de Obras Públicas
Gobierno de Chile

Objetivos

Objetivo general: Desarrollar un software de **acceso público** para la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del **Lago Laja y Río Laja** el cual sea **flexible** para analizar diversas alternativas de gestión/operación, y que incorpore tendencias de cambio climático, así como **incertidumbre** climática para apoyar la **toma de decisiones**.

Objetivos específicos:

O.E.1. Desarrollar y validar un modelo hidrológico a escala temporal mensual de la cuenca del Lago Laja y Río Laja que incluya todas las actividades antrópicas, así como las tendencias climáticas e incertidumbre climática junto con permitir la evaluación de diversas alternativas de operación.

O.E.2. Mejorar la representación del derretimiento de nieve en la modelación mediante mapeo de profundidad de nieve.

O.E.3. Desarrollar una interfaz gráfica de usuario accesible para utilizar el modelo hidrológico desarrollado.

O.E.4. Capacitar en el uso del software a usuarios de la cuenca, participantes del proyecto, organizaciones de usuarios del agua y entidades relacionadas con los recursos hídricos de la cuenca.

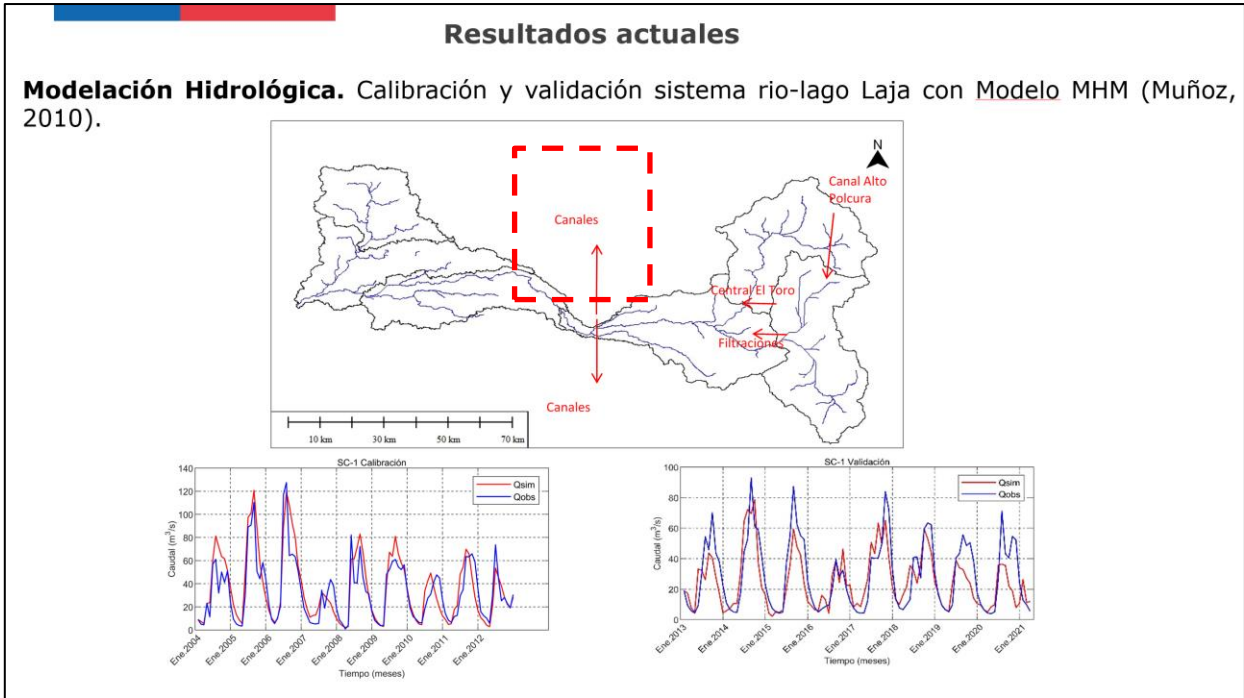
Inputs

Estaciones meteorológicas con información de Precipitación.

Fuente: Material del proyecto IDeA I+D 2023

Según la información recopilada del proyecto IDEA, en el cual participa la DOH, da a entender que entregaría caudales de trasvase, por lo que es relevante coordinar una reunión entre DOH Nivel Central, DOH regional y el equipo de Muñoz et al.

Figura 7-35: Resultados Actuales



Fuente: Material del proyecto IDeA I+D 2023

7.8. PLAN ESTRATEGICO DE GESTIÓN HIDRICA RÍO BIO BIO (DGA-UC-UCSC 2021)

7.8.1. ASPECTOS RELACIONADOS A LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Contexto

La Dirección General de Aguas, dispuso desarrollar una serie de planes estratégicos de gestión hídrica para distintas cuencas a nivel país. Entre los años 2019-2020 se ejecutaron los planes para varias cuencas, luego entre los años 2020-2021 se sumaron otras 10 cuencas más donde entre ellas se encuentra los resultados del plan estratégico de la cuenca del río Biobío, buscando conocer la oferta de los recursos hídricos, la demanda actual y la proyectada del agua, mediante una caracterización, diagnóstico y modelación hídrica de cada cuenca.

Sistema Laja Diguillín PEGH Biobío

La cuenca del río Biobío destina sus aguas para uso humano, industrial, agrícola y energético, siendo estos dos últimos los predominantes. La alta actividad agrícola genera una gran demanda de recursos hídricos en el sector. Entre las obras hidráulicas asociadas a la explotación de las aguas se encuentra el proyecto del canal Laja-Diguillín, construido por el Estado, se encuentra en operación desde el año 2001 y extrae 40 m³/s para ser transferidos a la cuenca del río Itata.

En la comuna de Tucapel, el canal capta su caudal inicial en la ribera norte del río Laja y lo conduce hasta el río Diguillín, en la cuenca del río Itata. El recorrido se divide en dos tramos: el primero, "Laja-Huepil", comienza en la bocatoma Tucapel y lleva el caudal hasta el río Huepil; el segundo tramo es "Cholguán-Diguillín".

Demanda de agua

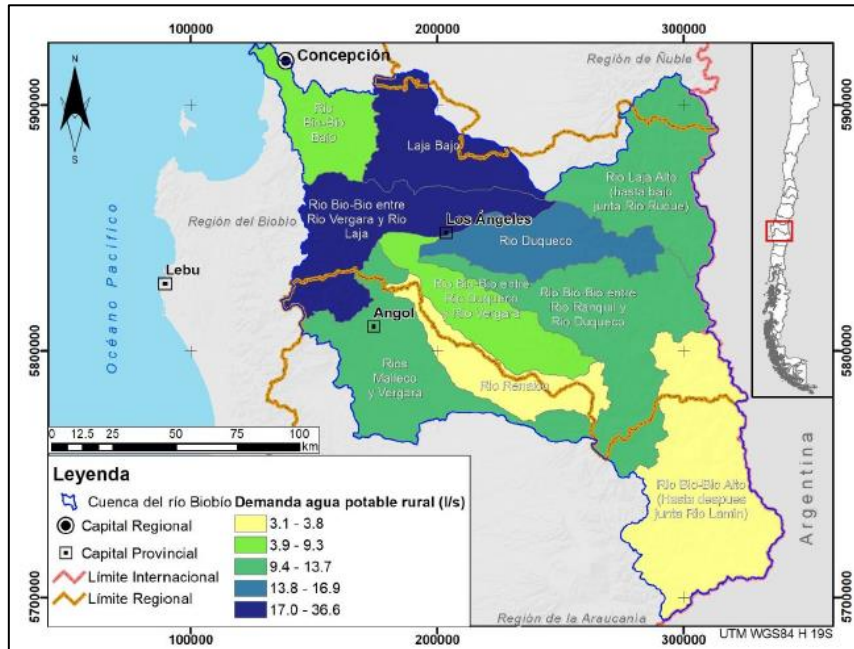
La Demanda de agua potable Urbana en la cuenca del Biobío con año base 2015, según DGA (2017), fue estimada en 1,159 m³/s expresado en caudal medio anual y un volumen anual demandado de 36.543,3 Mm³/año en la región del Biobío y en la Araucanía de 0,16 m³/s (caudal medio anual) y 5.202 Mm³/año.

Tabla 7-26: Demanda de Agua Potable Urbana Año Base (2015)

Código subcuenca	Subcuenca	Mm ³ /año	m ³ /s	l/s
0830	Río Biobío Alto (Hasta después junta Río Lamin)	244	0,01	7,7
0831	Río Biobío entre Río Ránquil y Río Duqueco	549	0,017	17,4
0832	Río Duqueco	2.953	0,094	93,6
0833	Río Biobío entre Río Duqueco y Río Verqara	1.510	0,048	47,9
0834	Río Renaico	450	0,01	14,3
0835	Ríos Malleco y Verqara	4.508	0,14	143
0836	Río Biobío entre Río Verqara y Río Laja	7.582	0,240	240,4
0838	Laja Bajo	2.250	0,071	71,4
0839	Río Biobío Bajo	21.698	0,688	688,0

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Figura 7-36: Distribución Espacial por Subcuenca de la Demanda de APU



Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

En cuanto a los derechos de aprovechamiento de agua de la cuenca del río Biobío fueron considerados los registros públicos de DAA de Ñuble, Biobío y Araucanía, teniendo como base un total de 5.798 DAA, donde solo 5.342 DAA poseían coordenadas.

Para el caso de la demanda agrícola, fueron consideradas 9 zonas de riego cuyas superficies se indican en la siguiente tabla. Además, fueron determinados los distintos parámetros de entrada, los cuales incluyen coeficientes de cultivo, evapotranspiración de referencia, precipitación y eficiencia de riego.

Tabla 7-27: Zonas de Riesgo Demanda Agrícola

Zona de riego	Superficie (km ²)
Alto Biobío	52,2
Biobío Superior	115,7
Biobío Medio	1563,4
Lago Laja	32,8
Río Laja	490,9
Río Vergara	616,0
Río Renegado	235,3
Río Tavoleo	68,1
Río Inferior	144,4

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Luego del análisis realizado para el uso de riego, se determinó que la cuenca posee una demanda bajo la figura de DAA promedio anual de 370 m³/s. Se puede observar que en la subcuenca Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucue) es la que posee mayor demanda comprometida con un caudal de 123,5 m³/s, valor que se encuentra sobre las otras demandas.

Tabla 7-28: Distribución de la Demanda Bajo La Figura de DAA, Para Ejercicio del Derecho por Subcuenca

Subcuenca	Ejercicio del derecho					Total
	CEC	CED	CPA	CPC	CPD	
Laja Bajo	13,1	0,1	0,0	7,8	0,2	21,2
Río Biobío (hasta después junta Río Lomin)	1,3	0,2		3,7	0,1	5,3
Río Biobío Bajo	0,1	25,8		0,5	41,0	67,4
Río Biobío entre Río Duqueco y Río Vergara	1,5	0,1		10,2	0,3	12,1
Río Biobío entre Río Ranquil y Río Duqueco	2,5	0,3	0,0	22,8	0,1	25,7
Río Biobío entre Río Vergara y Río Laja	0,3	0,7		7,9	44,0	53,0
Río Duqueco	5,1	4,2	0,0	23,6	1,2	34,2
Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucue)	3,2	0,1		119,7	0,5	123,5
Río Renaico	0,6	1,0		7,3	1,8	10,7
Ríos Malleco y Vergara	1,1	0,6		14,0	1,4	17,0
Total	28,7	33,1	0,0	217,5	90,6	370,0

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

En cuanto a las demandas comprometidas tanto superficial como subterránea, se puede decir que en la parte superficial representa cerca del 98% de la demanda total, con un caudal de 367,4 m³/s y para la demanda subterránea se observa un caudal de 2,0 m³/s.

Tabla 7-29: Demanda Superficial y Subterránea

Subcuenca	Naturaleza (m ³ /s)	
	Superficial	Subterránea
Laja Bajo	19,6	1,6
Río Biobío (hasta después junta Río Lomin)	5,2	0,1
Río Biobío Bajo	67,2	0,2
Río Biobío entre Río Duqueco y Río Vergara	11,6	0,5
Río Biobío entre Río Ranquil y Río Duqueco	24,6	1,1
Río Biobío entre Río Vergara y Río Laja	51,6	1,3
Río Duqueco	32,2	2,0
Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucue)	128,7	0,0
Río Renaico	10,4	0,2
Ríos Malleco y Vergara	16,3	0,7
Total	367,4	7,9

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Oferta hídrica

En la cuenca del Biobío se ha registrado un déficit de precipitaciones. Presentando desde el año 2010 una secuencia ininterrumpida de años secos, con déficits anuales de lluvia que varían entre 25 y 45%. De acuerdo a los antecedentes disponibles, la única subcuenca que se ha visto afectada por problemas de disponibilidad de agua es la cuenca del río Laja (Díaz Arellano et al., 2018).

El régimen pluvial de la subcuenca Río Laja en Tucapel se encuentra afectada por la regulación natural y operación del Lago Laja, presentando caudales con tendencia decreciente, esto se puede asociar a las intervenciones de extracciones para regadío y la tendencia de las precipitaciones.

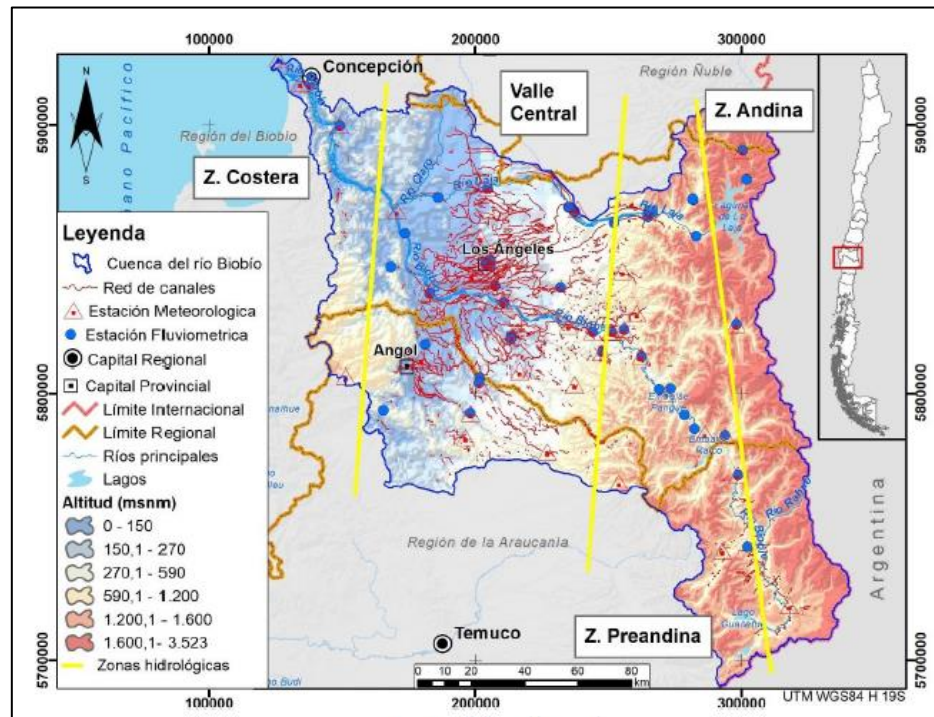
El régimen hidrológico de la subcuenca Río Laja Aguas arriba del Salto se ubica aguas abajo de las bocatomas de los canales Laja-Diguillín, Laja Sur y Zañartu, por lo que los registros de caudales muestran una influencia antropogénica asociada a dichas alteraciones.

Para efectos de modelación hidrológica y en particular, para desarrollar el proceso de calibración y validación de un modelo semi-distribuido, es necesario evaluar la disponibilidad y calidad de información fluviométrica disponible en la cuenca. Fueron considerados para los años 1985 a 2016 los registros de caudales medios mensuales en 37 estaciones fluviométricas de la cuenca del río Biobío, sin embargo, debido a la falta de registro y continuidad al menos por 5 años, solo fueron consideradas 24 estaciones que cumplen con lo anterior.

Régimen hidrológico

El comportamiento hidrológico que presenta el río Biobío y sus tributarios es diferente a lo largo de la cuenca. Con el propósito de caracterizar las variaciones de caudal, se identifican 4 zonas hidrológicas: Zona Andina, Zona Pre-andina, Valle Central y Zona Costera.

Figura 7-37: Zonas Hidrológicas Dentro de la Cuenca



Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC)

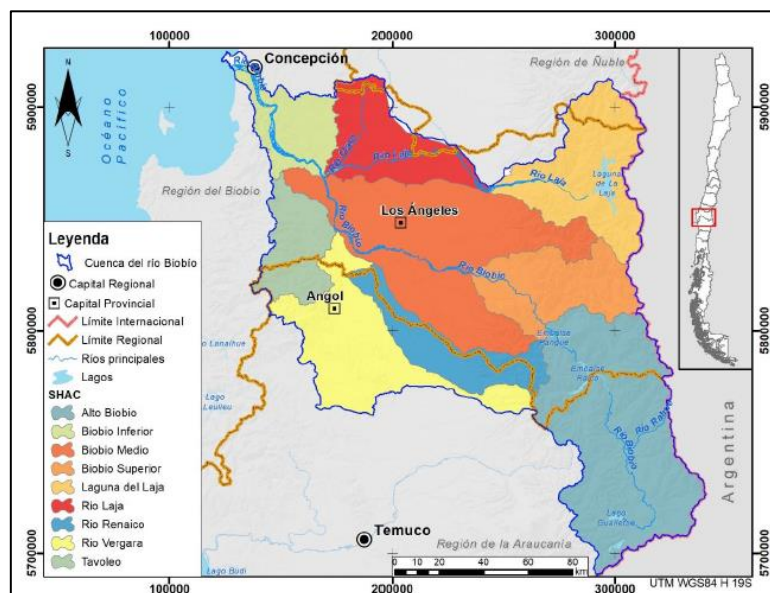
La Dirección General de Aguas identificó 9 sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) dentro de la cuenca del río Biobío. De los cuales, para efecto de este estudio, nos enfocaremos en aquellos SHAC que se encuentran en la parte alta de la cuenca del Biobío, es decir, el Acuífero del Biobío Superior, Acuífero del Alto Biobío y por último el acuífero de la Laguna del Laja.

Tabla 7-30: SHAC Existentes en la Cuenca del Río Biobío

Sector Acuífero	Área km ²	Estado	Unidad geomorfológica predominante
Biobío Inferior	1.305	Abierto	Cordillera de la Costa
Biobío Medio	5.101	Abierto	Valle Central
Biobío Superior	2.014	Abierto	Cordillera de los Andes
Alto Biobío	5.595	Abierto	Cordillera de los Andes
Laguna del Laja	2.756	Abierto	Cordillera de los Andes
Río Laja	1.838	Abierto	Valle Central
Tavoleo	1.306	Abierto	Cordillera de la Costa
Río Renaico	1.532	Abierto	Valle Central
Río Vergara	2.818	Abierto	Valle Central

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Figura 7-38: SHAC Existentes en la Cuenca del Río Biobío



Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Para el caso de la modelación de las aguas subterráneas, se mantuvo el criterio definido por los estudios previos realizados por la DGA (2012 y 2014) los cuales consideraron distribuir uniformemente en el modelo la recarga producida por la infiltración de lluvias sobre la Depresión Intermedia y asignar en la forma de flujos laterales la recarga proveniente de la Cordillera de la Costa y de los Andes.

Tabla 7-31: Factores de Infiltración de Cada Unidad Geomorfológica

Unidad geomorfológica	Factor de infiltración
Cordillera de los Andes	0,01
Depresión intermedia	0,05
Cordillera de la Costa	0,02

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

En la siguiente tabla se muestra de forma preliminar las recargas en los SHACs existentes en la cuenca del Biobío (DGA,2014).

Tabla 7-32: Recargas en los SHACs Existentes en la Cuenca del Biobío

Sector Acuífero	Área km ²	Recarga (Mm ³ /año)	Recarga (l/s)
Biobío Inferior	1.305	28,3	896
Biobío Medio	5.101	453,0	14.364
Biobío Superior	2.014	310,0	9.826
Alto Biobío	5.595	132,1	4.190
Laguna del Laja	2.756	68,2	2.164
Río Laja	1.838	101,2	3.207
Tavoleo	1.306	30,8	976
Río Renaico	1.532	156,4	4.960
Río Vergara	2.818	185,4	5.879

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Por otra parte, el caudal concedido expresado en m³/s para cada SHAC de acuerdo a los derechos subterráneos concedidos, se puede observar en la siguiente tabla, siendo el SHAC del Río Laja el que posee mayor caudal asociado a los derechos otorgados, mientras que el SHAC menos explotado es el de la Laguna del Laja.

Tabla 7-33: Caudal Concedido (m³/s) Para Cada SHAC

Sector Acuífero	DAA m ³ /s
Biobío Inferior	0,676
Biobío Medio	7,475
Biobío Superior	0,727
Alto Biobío	0,070
Laguna del Laja	0,065
Río Laja	3,647
Tavoleo	0,013
Río Renaico	0,370
Río Vergara	1,402

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Modelo de Simulación (WEAP)

Modelo Subterráneo

Se realizaron modelaciones a régimen permanente y a régimen transitorio, donde fue considerado un periodo inicial (1988-1992) y un período de modelación de 27 años entre enero de 1993 y diciembre de 2019.

A continuación, se presentan las principales componentes de la elaboración del modelo hidrogeológico.

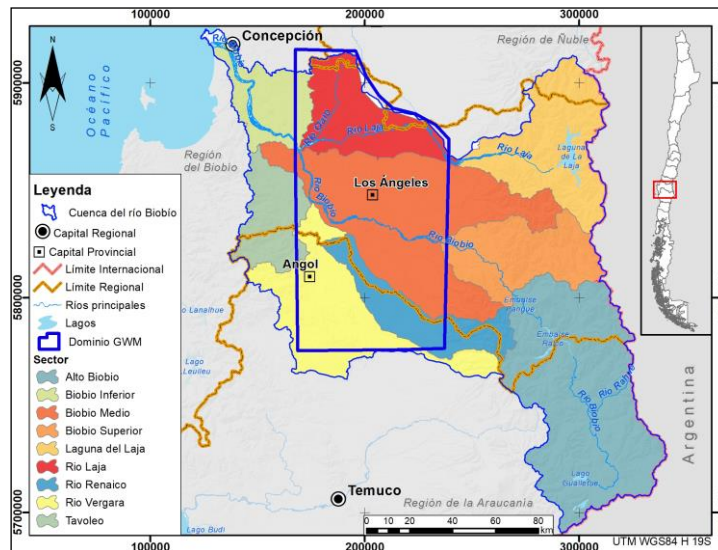
- Plataforma, Motor y Solver Implementado

Para la representación subterránea de la cuenca del río Biobío se utilizó MODFLOW-2005, usando la interfaz gráfica ModelMuse.

- Límites y Geometría

El dominio de modelación para el sistema de aguas subterráneas de la cuenca del Biobío fue definido en un acuerdo con el Mandante y considera solo los rellenos sedimentarios que componen los acuíferos existentes en el valle central de la Cuenca del Biobío.

Figura 7-39: Dominio de Modelación Sistema de Aguas Subterráneas Cuenca Biobío



Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Dentro del dominio se definió la discretización horizontal de tamaño uniforme de 250 m x 250 m, totalizando 560 filas y 288 columnas.

En cuanto a la Discretización Vertical, solo se discretizó en una sola estrata, debido a la limitación de la información geológica disponible y al tamaño del dominio a modelar.

La conductancia de cada tramo se estimó como un valor único para variarlo durante el proceso de calibración.

- Parámetros Hidrogeológicos

Debido a la extensión y complejidad de la cuenca del Biobío y a la limitada información hidrogeológica disponible, se consideraron valores de parámetros hidrogeológicos considerando las características geológicas del territorio. Estos valores fueron obtenidos a partir de la modelación realizada para la DGA (2012) por Aquaterra. Para el caso de la conductividad hidráulica vertical, se utilizó el supuesto simplificador de que es un orden de magnitud inferior al valor horizontal. Los valores adoptados fueron calibrados, y presentan variabilidad espacial tanto en la componente vertical como en la componente horizontal. Para la estimación del Coeficiente de Almacenamiento, se definió un rango de valores posibles de acuerdo a los antecedentes de literatura entre 0.05 y 0.25 (Todd and Mays,

2004). Posteriormente, en la etapa de modelación a régimen transiente se obtuvo el valor de este parámetro, con el que se minimizan las diferencias entre los valores de nivel piezométrico observados en los pozos de monitoreo DGA y los valores simulados.

Tabla 7-34: Parámetros Hidrogeológicos Considerados Para La Modelación

Unidad geológica	Cordillera de Nahuelbuta	Valle Central Norte	Precordillera andina	Valle Central sur
Conductividad Hidráulica (m/día)	0.1	8.6	4.3	8.6
Coefficiente de Almacenamiento	0.10	0.17	0.10	0.17

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

- Resultados de Calibración y Balance Hídrico en Régimen transiente

De acuerdo a los resultados de la calibración, en la Tabla 7-35 se presentan los caudales medios representativos para las diferentes componentes de flujo del modelo. El error de balance máximo se mantiene por debajo del 0,01%, lo que también da cuentas del buen funcionamiento del modelo.

Tabla 7-35: Balance Hídrico Obtenido en Régimen Permanente

Entradas (m³/s)	Entrada desde carga constante	0.915
	Recarga desde río	1.753
	Recarga superficial	38.222
	Total IN	40.891
Salidas (m³/s)	Descarga hacia carga constante	1.299
	Afloramiento río	27.057
	Pozos de bombeo	12.531
	Total OUT	40.887
Error Balance (m ³ /s)		0.004
Discrepancia (%)		0.01

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Modelo Superficial

La componente superficial se modeló inicialmente en el modelo WEAP para luego realizar un acople con MODFLOW. El rango de años de simulación del modelo de base abarca desde 1988 a 2019.

Para el proceso de acople entre los modelos WEAP y MODFLOW se consideró la metodología propuesta por DGA, DICTUC y SEI (2019a), DGA y PUC (2019b) y Sanzana et al. (2021).

a) Unidades Hidrológicas/Catchments

Las unidades hidrológicas definidas en el modelo de base corresponden a 23 elementos para representar la escorrentía e infiltración de cada subcuenca y 22 elementos para representar las zonas de riego y la demanda que éstas implican, alcanzando un total de 45 elementos.

b) Agua subterránea/Groundwater

Los elementos acuíferos que contiene el modelo WEAP WSP, alcanzan un total de 11 sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHACs) ubicados en el valle de la cuenca, sin presencia en la parte alta.

Dentro del modelo se detalla como dato de entrada la capacidad de almacenamiento, el almacenamiento inicial y se ingresan datos de recarga natural.

c) Embalse/Reservoir

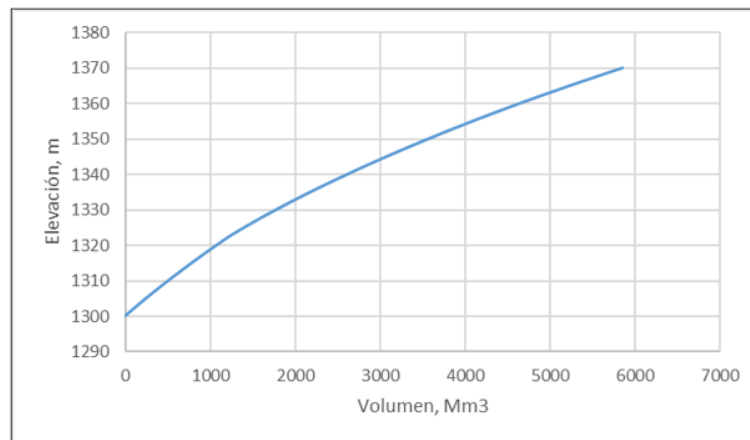
El modelo cuenta con un embalse que representa el funcionamiento del Lago Laja. Este elemento en WEAP se ubica en la cabecera del río Laja.

Tabla 7-36: Parámetro de Modelación Lago Laja

Parámetro	Valor	Unidad
Almacenamiento inicial	4000	Mm ³
Capacidad de almacenamiento	5849.8	Mm ³

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Figura 7-40: Curva Volumen-Elevación Lago Laja



Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

d) Sitios de Demanda/Demand Sites

En el modelo hidrológico se tienen 73 sitios de demanda. Cada sitio de demanda define un comportamiento topológico que permite extraer agua del sistema, con el fin de suplir las demandas establecidas, que son de carácter artificial como la captación para bocatomas o bombeo desde los acuíferos.

Para el caso de la demanda de riego que, a pesar de estar estimada según los Derechos de Aprovechamiento de Aguas, esta se conecta directamente hacia la zona de riego (Unidad Hidrológica) cubriendo así la demanda agrícola modelada y el exceso o agua no consumida es devuelta al sistema mediante un flujo de retorno.

e) Ríos/River

Los principales ríos que se incluyeron en la modelación son 15. Adicionalmente, se modelaron como elemento *river* los tramos de aportes naturales de cuencas intermedias, alcanzando un total de 19 elementos de este tipo.

f) Conducciones/Transmission Links

En el modelo se tiene un total de 104 Transmission Links. Este elemento no fue actualizado ni modificado para el proceso de acople con MODFLOW.

g) Flujos de retorno/Return Flows

Se determinaron 126 Return Flows y fueron empleados para llevar el agua extraída por un nodo de demanda, desde un río o acuífero, hasta canales o bocatomas receptoras. Este elemento no se ve modificado frente a la preparación del modelo para el acople con MODFLOW.

h) Escorrentía e Infiltración/ Runoff – Infiltration

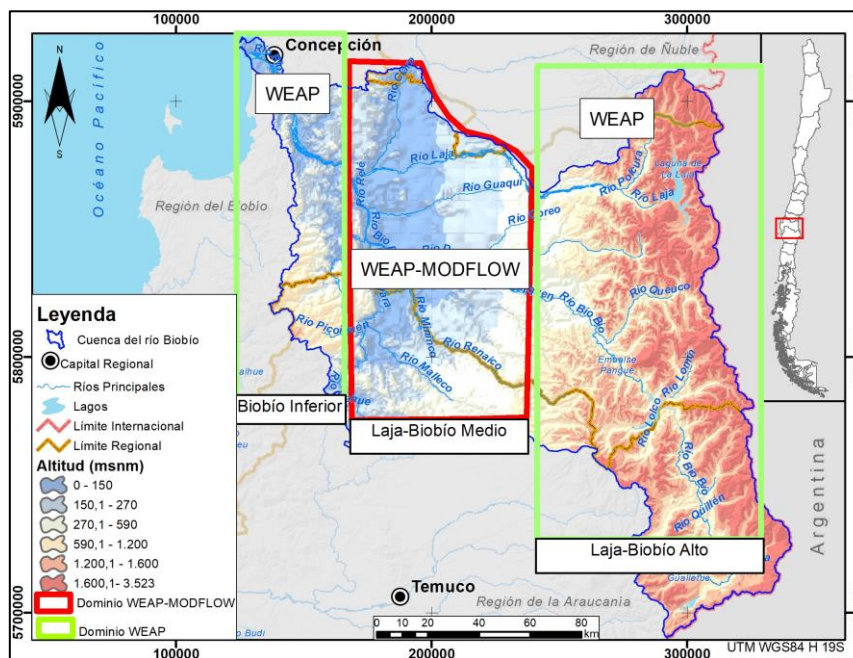
En esta conexión se puede definir la fracción de escorrentía/infiltración que puede derivarse al río o acuífero en cuestión. En el modelo base, esta fracción, representa un parámetro de calibración. Se presentan en el WEAP de base 97 uniones de este tipo.

Modelo acoplado

Dada la gran extensión de la cuenca del río Biobío, la variabilidad y complejidad topográfica, para efectos de construcción de un modelo acoplado, se decidió simplificar parcialmente aquella zona, realizando la interacción WEAP-MODFLOW, priorizando la modelación subterránea con MODFLOW en aquellas zonas (SHACs) que concentran la mayor demanda de aguas subterráneas.

El modelo conceptual se separó en tres grandes zonas: i) Laja-Biobío Alto, ii) Laja-Biobío Intermedio y iii) Biobío Bajo (cuadros verde, rojo y verde en Figura 7-41 respectivamente). En las zonas (i) y (iii) se utilizó el modelo WEAP, modelando la componente superficial de manera interna mediante el método Precipitación-escorrentía – Humedad del Suelo.

Figura 7-41: Separación de Zonas Modelo Conceptual



Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Resultados de Modelación Acoplado

Los resultados del modelo acoplado para las aguas subterráneas se obtuvieron mediante herramientas de Python desarrolladas por Sanzana et al. (2020) y facilitadas por DGA.

En la Tabla 7-37 se presenta el balance hidrogeológico global y para cada SHAC en promedio durante el período de modelación.

Tabla 7-37: Balance Hidrogeológico 1993-2019 Calibrado Para La Zona del Sistema Acoplado

	Laja	BB Medio	Renaico	Vergara	BB Superior	Total
Entradas (m³/s)						
Flujo subterráneo	15.605	31.139	6.279	7.330	2.130	62.483
Entrada desde carga constante	0.110	0.912	0.000	0.000	0.000	1.023
Recarga desde río	5.445	14.681	0.009	0.078	1.572	21.784
Recarga superficial	10.920	40.000	7.108	14.935	0.444	73.407
Total	32.080	86.732	13.396	22.343	4.146	158.697
Salidas (m³/s)						
Flujo subterráneo	12.132	41.228	8.049	9.493	2.655	73.558
Afloramiento río	16.488	35.159	4.971	11.465	1.378	69.460
Pozos de bombeo	3.462	7.188	0.376	1.386	0.113	12.524
Descarga hacia carga constante	0.000	3.153	0.000	0.000	0.000	3.153
Total	32.082	86.728	13.396	22.343	4.146	158.695
Variación de Almacenamiento (m³/s)	1.215	-4.530	-3.964	-2.777	-0.019	-2.015
Error de Balance	-0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.002
Error de Balance (%)	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Para el caso del modelo subterráneo, este no pudo ser calibrado en régimen transiente debido a que existe limitada información histórica, pues se dispone de sólo 10 pozos de observación con datos desde el año 2015 para una cuenca que supera los 20.000 km².

Escenarios

Con el objetivo de hacer una primera evaluación del modelo y resultados. Se realizó la simulación para el escenario de cambio climático y se analizaron los resultados obtenidos, considerando las demandas de 2019 replicadas a 2050.

La Tabla 7-38 resume las componentes consideradas en el escenario de cambio climático modelado.

Tabla 7-38: Escenario de Cambio Climático Modelado

Escenarios	Periodo	OBS
E1 CC	Abril 2020 - Mar 2050	
Forzantes	Abril 2020 - Mar 2050	MCG CCSM4
Demandas	Abril 2020 - Mar 2050	Replicadas desde 2019 para analizar variación de oferta hídrica y cómo responde el sistema para garantizar funcionamiento.

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Cambio Climático (E1-CC): MCG CCSM4

En lo que respecta a niveles subterráneos, los hidrogramas muestran un descenso de éstos en el periodo 2019-2050, en relación con el periodo base.

En lo que respecta al balance subterráneo, en la Tabla 7-39 se puede observar que en el total el modelo con cambio climático recibe 38% menos de recarga superficial, siendo este comportamiento variable en cada SHAC.

Tabla 7-39: E1 CC: Variación Recarga Superficial 2020-2050 c/r a 1993-2019

SHAC	Laja	BB Medio	Renaico	Vergara	BB Superior	Total
Recarga superficial	-43%	-43%	-14%	-33%	-44%	-38%

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

En lo que respecta a caudales superficiales, se observa, en la mayoría de las cuencas, una disminución de estos en el escenario E1-CC respecto del periodo de calibración.

Escenario 1: Caso Base

El escenario 1: Caso Base, se modela con el objetivo de evaluar la evolución de los flujos, niveles y balances hídricos, de manera de identificar brechas en el desbalance hídrico en el horizonte de evaluación 2020-2050. Esta simulación futura de la cuenca del río Biobío corresponde a la situación en la cual la oferta natural de la cuenca está dada por la implementación de las forzantes meteorológicas obtenidas del MCG CCSM4 y la demanda proyectada. Para efectos de evaluación y modelación, en este proyecto se consideró la tasa de crecimiento global de la demanda para la región.

Tabla 7-40: Descripción Escenario 1, Caso Base

Escenarios	Periodo	OBS
E1	Abril 2020 - Mar 2050	
Forzantes	Abril 2020 - Mar 2050	MCG CCSM4
Demandas	Abril 2020 - Mar 2050	Proyección de demandas a 2050

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

Resultados de Escenario Caso Base (Cambio Climático Seleccionado)

Los modelos fueron comparados en ventanas de tiempo equivalentes; puesto que el modelo calibrado comprende el período 1990-2019, la ventana de comparación futura utilizada fue 2020-2050.

En lo que respecta a la componente superficial, a partir de las capacidades de modelación del software WEAP con las forzantes meteorológicas del MCG CCSM4, la escorrentía generada por el modelo acoplado en el escenario de Caso Base fue comparada con la escorrentía generada en el modelo calibrado.

La Tabla 7-41 muestra una comparativa del caudal de 50% de probabilidad de excedencia para cada escenario. Se observa que producto del crecimiento de las demandas, se tiene una ligera reducción de la mediana de los caudales en cada sub-cuenca del proyecto. En promedio, para el E1-CC se tiene una diferencia porcentual de -16.5% en los caudales con respecto al periodo de calibración, mientras que, al considerar el crecimiento de las demandas, esta diferencia cambia a -16.8% indicando una disminución en los caudales de cada subcuenca.

**Tabla 7-41: Resumen de Diferencias Porcentuales de Los Escenarios E1-CC y Caso Base
Respecto del Periodo de Simulación**

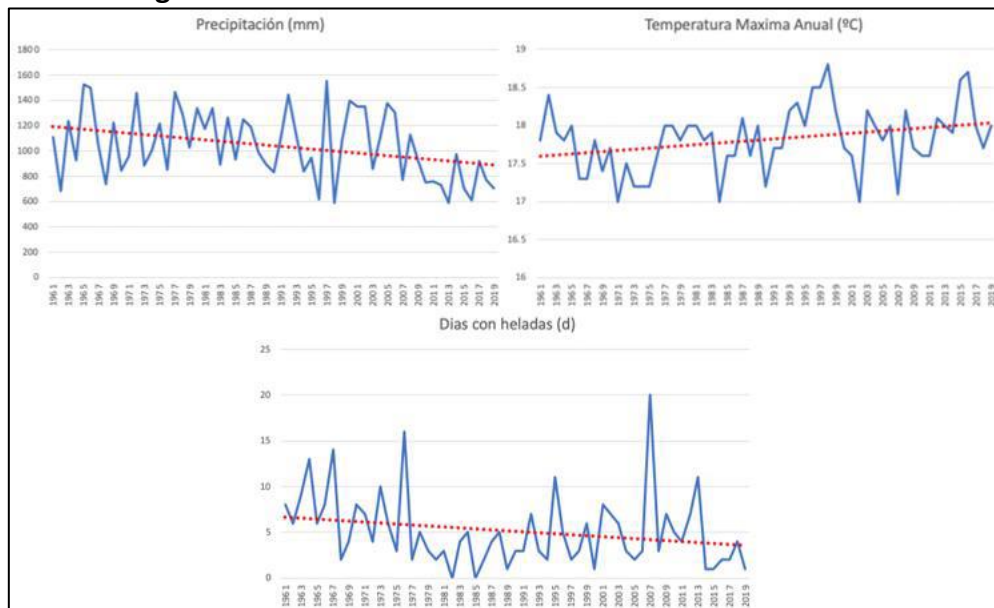
Cuenca	Reducción $Q_{50\%Pex}$ resp Caso Base	
	E1-CC: CC + dem 2019 replicadas	Caso Base: CC + crecimiento demandas
Rio Biobio en Desembocadura	-33.9%	-34.2%
Rio Lonquimay ante junta Biobio	-11.8%	-11.7%
Rio Biobio en Llanquen	-29.1%	-29.1%
Rio Biobio ante junta Huirí Huirí	-18.7%	-18.6%
Rio Biobio ante junta Pangue	-29.4%	-29.4%
Rio Pangue en Captacion	-10.9%	-10.9%
Rio Biobio en Rucalhue	-23.1%	-23.1%
Rio Duqueco en Villucura	-18.1%	-18.1%
Rio Duqueco en Cerrillos	-28.8%	-28.6%
Rio Biobio en Coihue	-29.9%	-30.0%
Rio Bureo en Mulchen	11.8%	11.7%
Rio Mulchen en Mulchen	8.4%	8.5%
Rio Renaico en Longitudinal	32.5%	32.5%
Rio Mininco en Longitudinal	3.4%	3.4%
Rio Malleco en Collipulli	-15.0%	-15.0%
Rio Vergara en Tijeral	-29.1%	-28.7%
Rio Rehue en Quebrada Culen	-22.6%	-22.6%
Rio Nicodahue en Pichun	-23.8%	-23.7%
Rio Laja en Tucapel	-30.3%	-34.7%
Rio Laja en Puente Perales	-34.4%	-37.4%
Rio Claro en Camino Yumbel-Estacion	-13.4%	-12.9%
Promedio	-16.5%	-16.8%

Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

7.8.2. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS FORZANTES METEOROLÓGICAS

El estudio hace un extenso análisis sobre la caracterización climática de la zona de interés, mostrando las distribuciones espaciales de la precipitación, temperatura mínima y evapotranspiración anual en los distritos agroclimáticos obtenidos a base de la información del Atlas Agroclimático de Chile. En términos de eventos extremos se analizaron los periodos cálidos, períodos secos, días con heladas y horas frío variabilidad climática de los últimos años de la cuenca y se recopiló información de la estación Carriel Sur con registros entre 1961-2019 para el análisis de la variabilidad histórica en precipitación anual, temperatura máxima anual y días con heladas. La Figura 7-42 muestra los resultados de dicho análisis donde se aprecia una tendencia a disminución de la precipitación anual y de los días con heladas, como a un aumento de la temperatura máxima anual.

Figura 7-42: Variabilidad Climática En La Zona En Estudio



Fuente: DGA-UC-UCSC, 2021

El documento señala que, bajo el escenario RCP8.5 y de acuerdo a lo indicado en la plataforma de Simulaciones Climáticas del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, la zona donde se ejecuta esta iniciativa tendría un aumento de la temperatura entre 0,5 -0,6°C en el futuro cercano (2020-2035), de 0,6 - 1,05 °C en el futuro intermedio (2035-2050) alcanzando incluso un aumento de 2°C para finales de siglo. Para las precipitaciones se indica una clara tendencia a disminuir los valores totales anuales con valores promedios en torno al 96% en el futuro cercano (2020-2035) y 92% en el futuro intermedio (2035-2050). Se señala, además, que resultados similares fueron encontrados en el estudio Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral (DGA, 2019).

En el estudio se efectuaron proyecciones de demanda, utilizando como referencia el estudio “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile” elaborado por DGA (2017). No se especifican las consideraciones de cambio climático tomadas en cuenta para determinar las proyecciones de la demanda evapotranspirativa.

Teniendo como base los GCMs definidos en el proyecto de actualización del Balance Hídrico (DGA, 2018) y considerando que el modelo CCSM4 presentaba un mejor ajuste en las curvas de variación estacional de precipitación y temperatura en el período histórico, se seleccionaron las forzantes meteorológicas de dicho modelo para los análisis de escenarios con cambio climático en el periodo 2020 a 2050.

Es conveniente hacer notar que la clasificación de la sensibilidad climática del modelo CCSM4 es baja moderada por lo que no representa necesariamente una condición muy desfavorable desde el punto de vista de disponibilidad hídrica futura.

7.8.3. ASPECTOS RELACIONADOS A LAS CRECIDAS

El documento aborda las crecidas hidrológicas desde un punto de vista primordialmente social, planteándolas como un riesgo para la población que debe ser abordado. Describe que existen distintas formas de estimar eventos extremos de distintas complejidades y, como punto destacable, plantea necesario comprender el efecto que puede tener el cambio climático sobre estas. A pesar del potencial peligro que suponen para la población, reconoce que existe incerteza del efecto potencial de posibles aumentos de frecuencia o severidad. Plantea que, con el fin de mitigar sus impactos sobre la población, es necesario diseñar obras o medidas de contingencia, pero que estas requieren el desarrollo de análisis previos, para reducir la incertidumbre existente sobre la ocurrencia y magnitud de las crecidas bajo un contexto de cambio climático, sugiriendo el desarrollo de estudios de proyecciones de las variaciones esperables en estos eventos.

En función de esto, se proponen dos iniciativas para abordar los riesgos asociados a las crecidas: el análisis de eventos extremos asociados al cambio climático, de los cuales se destaca el estudio de proyecciones de las precipitaciones máximas, y analizar la vulnerabilidad de áreas críticas respecto a inundaciones. Si bien estos puntos se abordan por separado, existe una estrecha relación entre ambos, al considerar que variaciones en las precipitaciones máximas (y temperaturas) podrían generar variaciones en las magnitudes de las crecidas. Se plantea que el manejo de crecidas debe ser mediante un sistema integrado, del cual se rescata el planteamiento de establecer relaciones entre las tormentas y las crecidas con el fin de generar alertas.

En función de estos antecedentes, dentro del documento se plantean dos líneas de acción, asociadas a cada objetivo. En el caso de los eventos extremos asociados al cambio climático, se plantea determinar los efectos que el cambio climático ejercerá sobre estos, ya que actualmente

no se cuenta con proyecciones y/o simulaciones de este aspecto. Sin embargo, dentro del mismo informe se muestra que esta línea de acción fue evaluada con muy baja prioridad, ocupando el penúltimo lugar de interés. Se destaca de este informe que, si bien no corresponde a un documento técnico y no se realiza ningún tipo de cálculo, es el único de los antecedentes revisados que plantea evaluar seriamente los potenciales efectos del cambio climático sobre futuras crecidas.

7.9. ACUERDO DE OPERACIÓN Y RECUPERACIÓN DEL LAGO LAJA COMPLEMENTA CONVENIO DE 1958

Resumen Acuerdo de Operación y recuperación del Lago Laja complementa convenio de 1958

En 2017 entre el director de DOH y el representante de ENEL celebraron el siguiente acuerdo:

Dado que la cuenca del Laja ha experimentado una disminución de la pluviometría, la DOH realizó un estudio en 2014 que concluyó que los caudales estadísticos medios afluentes al lago Laja resultaron inferiores a los considerados en el tiempo que se suscribió el Convenio de 1958. Además, la cláusula 10° establece la facultad de las partes para revisar el convenio. Basados en estudios, a partir del año 2014, se formó la mesa de trabajo que cuenta con la participación de la Asociación de Canalistas del Laja, Asociación de Canalistas Zañartu, Junta de Vigilancia del Río Diguillín, Enel, DOH y DGA, con el apoyo de los ministerios de Agricultura, Energía y CNR.

Este acuerdo permitirá otorgar mayor seguridad de riego para los primeros regantes. Se ha considerado la demanda de estos regantes en los nuevos volúmenes de riego, garantizándoles agua del lago de manera oportuna y segura durante la temporada de riego. Además, se asegura a los primeros regantes un volumen de emergencia en situaciones de escasez hídrica, definido por la DOH, independientemente del colchón del lago y del régimen del Convenio.

Con el fin de asegurar las necesidades de riego, tanto para el proyecto Laja – Diguillín como para el riego de la cuenca del río Laja, así como las necesidades de generación en forma sustentable, acordaron lo siguiente:

Primero: Régimen Permanente

Para la explotación del lago Laja, la capacidad del lago se dividirá en cuatro colchones:

Colchón Inferior: corresponde a la capacidad del lago de los primeros 1.200 hm³ que se dispondrá principalmente para atender las demandas de riego. El volumen máximo por extraer será de 600 hm³.

Colchón de transición: su finalidad es acelerar la recuperación del lago Laja y corresponde a la capacidad del lago de los siguientes 170 hm³. El volumen máximo por extraer para riego será el 40% del volumen existente en el colchón.

Colchón intermedio: corresponde a la capacidad del lago de un volumen hasta 530 hm³, por sobre los 1.370 hm³. El volumen máximo por extraer para riego será el 40% del volumen existente en el colchón.

Colchón superior: corresponde a la capacidad del lago de un volumen sobre los 1.900 hm³, pudiendo alcanzar los 3.682 hm³.

Segundo: Régimen Transitorio

Las partes convienen un régimen transitorio para las temporadas 2017 – 2018 a 2020 – 2021 (4 temporadas en total), las que aplicarán mientras el lago Laja no supere el colchón de transición de 1.370 hm³. Este régimen finalizará al término de la cuarta temporada o antes si el nivel del lago supera los 1.370 hm³, comenzando la vigencia del régimen permanente.

En el régimen transitorio el volumen máximo a extraer para riego desde el lago Laja será de 600 hm³ máximo.

Tercero

En este punto se detallan las reglas comunes respecto del régimen permanente, transición y colchones o volúmenes. Además, indica que para permitir una mejor recuperación del lago Laja, mientras los requerimientos de terceros se encuentren satisfechos, se podrá establecer en el lago todos los afluentes que las obras hidráulicas lo permitan, siempre que no afecte a terceros.

Las organizaciones de regantes, la DOH y Enel coordinarán el uso eficiente del agua durante una temporada seca. La DOH velará por una buena coordinación de la infraestructura de los ríos de la cuenca, como las bocatomas Tucapel, Laja, Huepil y Diguillín.

Para garantizar el éxito del modelo de operación del lago Laja, se requiere de una programación anual de la demanda por parte de las organizaciones de regantes, por lo que deben informar a la DOH, a comienzos de cada temporada, la programación de demanda e intercambiar mensualmente información acerca de sus proyecciones de uso. En cuanto a Enel deberá enviar la mejor estimación de su programa de generación anual, que podrá ajustarse conforme a la situación hidrológica. Para estos fines se mantendrá una mesa de análisis y discusión técnica compuesta por Enel, Regantes y MOP – DOH – DGA, lo que permitirá facilitar el intercambio de información, programación y coordinación de las medidas orientadas a una operación sustentable de esta cuenca y su principal fuente, el lago Laja.

Para asegurar mayor probabilidad de seguridad, un uso eficiente y sustentable de los recursos hídricos, las disponibilidades de riego establecidas en este convenio se consideran un máximo. Las demandas de riego deben basarse en las capacidades de las obras, derechos existentes, condiciones hidrológicas y comportamiento histórico. Dado que el lago Laja no es una fuente artificial y tiene múltiples usos, el MOP-DOH resolverá cualquier discrepancia sobre las demandas de riego y definirá el volumen a entregar.

Cuarto

Se establece un volumen de emergencia, a favor de los primeros regantes por un máximo de 10 m³/s, para abordar situaciones de escasez hídrica, independiente del colchón en que se

encuentre el lago e independiente del régimen (transitorio o permanente). Este volumen no podrá ser entregado al 100% por más de 2 meses durante la temporada de riego.

Quinto

El modelo de operación del Lago Laja busca un uso más eficiente de los recursos hídricos al aprovechar las aguas excedentes de primavera hasta el canal Siberia, priorizando las necesidades de riego establecidas en el Convenio de 1958. Una vez satisfechas las necesidades de los primeros regantes, los excedentes de primavera del río Laja pueden destinarse al riego de los segundos regantes, funcionando el convenio como un Sistema de Gestión Integrada de la Cuenca para postergar, tanto como sea posible, las extracciones del lago Laja.

Sexto

Dentro del volumen para riego de 600 hm³ que se refieren en las cláusulas Primera y Segunda, y mientras no se trate de una situación de escasez hídrica (art. 314 cód. Aguas), el modelo de operación ha considerado un caudal mínimo de 7 m³/s para los Saltos del Laja, medido en la última estación antes de los Saltos. Este caudal se utilizará, en caso necesario, para complementar el flujo de agua a los usuarios de los Saltos del Laja, durante un período acotado de 2,5 meses.

Séptimo

El MOP frente a una situación de escasez hídrica (art. 314 cód. Aguas) o de otra emergencia, podrá destinar parte de los recursos hídricos del lago, para el consumo humano o para atender emergencias.

Octavo

Atendido el carácter definitivo de este convenio y sus objetivos, no se considerarán las economías por los volúmenes no utilizados a los que se refiere el convenio de 1958.

Noveno

Enel deberá tomar las medidas necesarias para evitar que los golpes de agua puedan producir perjuicios en las bocatomas de los canales o predios ribereños al río Laja. En la época de riego Enel deberá considerar la solicitud de forma y plazo de las entregas para riego desde las centrales El Toro y Antuco.

Décimo

El 1 de diciembre de cada año, comenzará a regir la temporada y programación de explotación definida para los siguientes 12 meses, la que concluirá el 30 de noviembre del año siguiente. Se podrá disponer de información quincenalmente, disponible para los usuarios cuando lo soliciten.

Cualquier cambio en esta programación se comunicará preferentemente con 24 horas de anticipación, aunque en caso de imprevistos o emergencias, se coordinará de inmediato utilizando el método más eficiente disponible.

Décimo Primero

El acuerdo tiene su fundamento en lo dispuesto en la cláusula 10° del Convenio 1958, donde se establece que un mayor conocimiento sobre la explotación del lago permitirá su revisión para lograr un aprovechamiento más eficiente de los recursos hídricos en un uso combinado.

En este sentido, el convenio tiene por finalidad asegurar los derechos de primeros y segundos regantes, usuarios de los Saltos del Laja, al igual que el ecosistema que representa al lago Laja, de modo que su operación no afecte a terceros, asegurando a los usuarios de la cuenca una mejor redistribución del recurso frente a situaciones de escasez hídrica.

El convenio en ningún caso afecta la existencia de los derechos de aprovechamiento de aguas de las partes, solo constituye una modalidad de operación de estos.

Décimo Segundo

Se entiende por temporada de riego 2017 – 2018, el período comprendido entre el 1 de octubre de 2017 y el 30 de abril 2018.

Décimo Tercero

El acuerdo tiene vigencia indefinida desde su firma y sólo podrá ser modificado por el acuerdo de ambas partes. Las partes revisarán el funcionamiento del convenio cada 10 años.

Décimo Cuarto

El convenio es Ad – Referéndum, su validez queda condicionada a la ratificación de la autoridad competente.

Décimo Quinto

El convenio es el resultado de esfuerzo, participación y acuerdo de los miembros de la mesa de trabajo compuesta por la Asociación de Canalistas del Laja, Asociación de Canalistas Zañartu, Junta de Vigilancia río Diguillín, Enel, DOH, DGA y el apoyo de los ministerios de Agricultura, Energía y CNR.

Décimo Sexto

El representante de la DOH consta en Decreto Supremo MOP N° 202 de fecha 19 de marzo de 2014. La representación de ENEL consta en escritura pública otorgada el 21 de noviembre de 2016 otorgada ante notario.

Décimo Séptimo

El acuerdo se firma en cuatro ejemplares, quedando cada parte con dos copias.

7.10. GUÍAS DE EVALUACIÓN SEA SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO Y PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HÍDRICA

7.10.1. CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO

Esta guía, llamada “Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso hídrico” fue creada de manera complementaria a la “Guía Metodológica Para la Consideración del Cambio Climático en SEIA”, la cual expresa la metodología general para la incorporación del cambio climático (CC) en la evaluación ambiental (SEA, 2023a). La guía que se alude en este resumen fue creada principalmente por la necesidad de que exista una evaluación más estandarizada de las proyecciones futuras de las precipitaciones y temperaturas. Esto, puesto que históricamente se realizaban diferentes criterios para la evaluación ambiental hídrica futura, por lo que resultaban en un uso dispar de las proyecciones.

El objetivo principal que presenta esta guía corresponde a: “entregar una metodología para el cálculo de la variación en precipitación y temperatura en Chile, valores que deben ser usados para la predicción de impactos sobre el componente hídrico en aquellos casos donde se identifiquen sinergias negativas entre un proyecto y el CC.” (SEA, 2023b).

7.10.1.1. VARIACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL SEIA

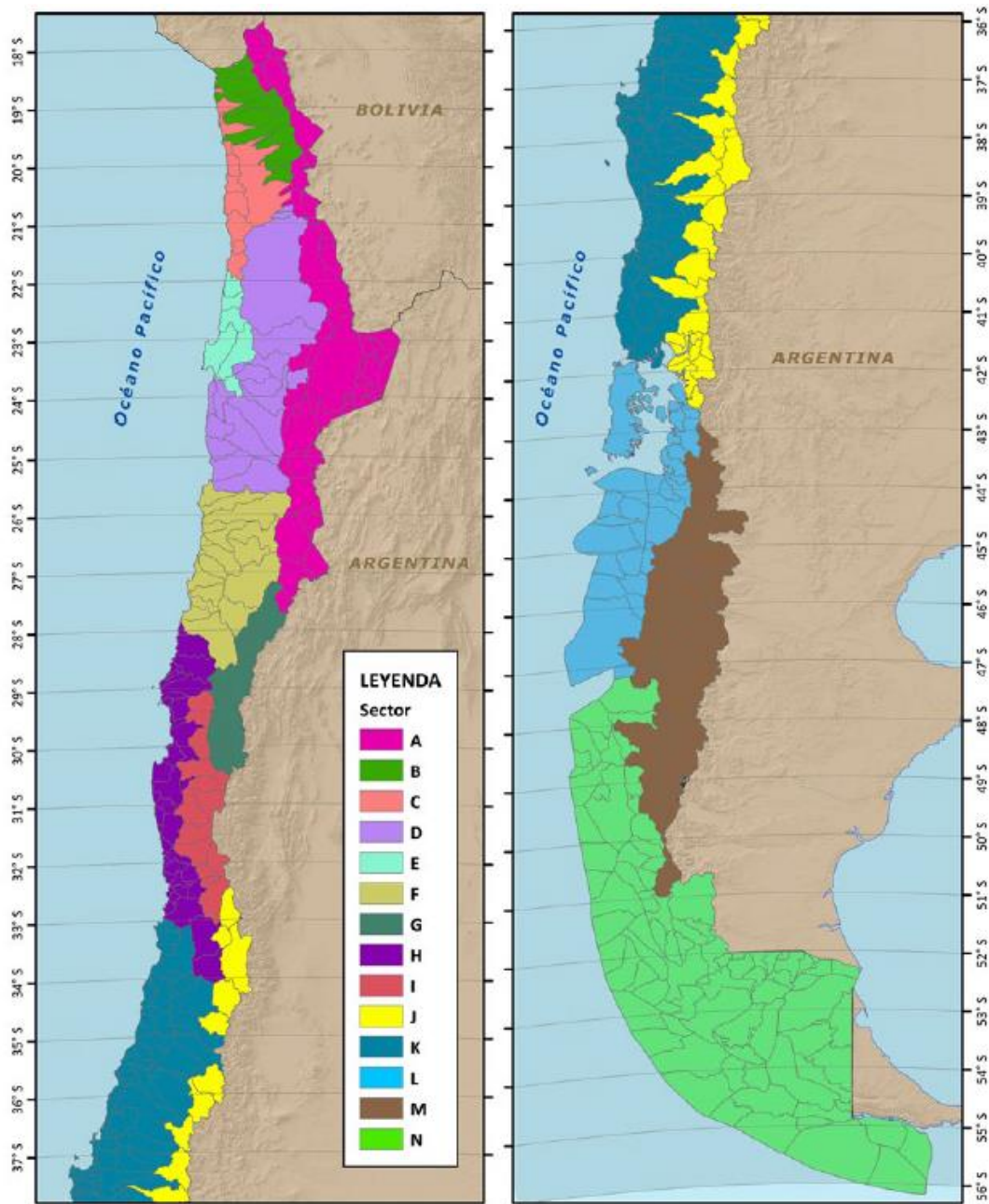
En esta sección se presenta el resumen del criterio para determinar las variaciones de precipitación y temperatura por el efecto del cambio climático, y así determinar cambios en variables del ciclo hidrológico, como caudales, evapotranspiración, recarga, etc., para la predicción de impactos sobre el componente hídrico.

La metodología contempla tres pasos: Sectorización de proyecciones de precipitación, Establecimiento del cambio proyectado porcentual y aplicación de porcentajes de cambio a la estadística histórica.

7.10.1.2. SECTORIZACIÓN DE PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN

Se agrupó y se sectorizó el país en subcuencas, puesto que ciertas zonas presentan comportamiento similar en términos de proyecciones de precipitación. El resultado de esta sectorización se presenta en la Figura 7-43, la cual muestra al país agrupado en 14 sectores distintos.

Figura 7-43: Sectorización de Proyecciones de Precipitación



Fuente: SEA, 2023c

Esta agrupación se realizó a partir del *software* ArcGIS, en donde la agrupación fue realizada a partir de las siguientes consideraciones: uso de subcuencas como unidad espacial, cercanía entre las subcuencas, agrupación de subcuencas según valores similares de los percentiles 25 y 75 de

las variaciones proyectadas de precipitación en las ventanas de tiempo (2015-2045, 2025-2055 y 2035-2065, respecto a 1980-2010), y elevación de las subcuencas.

7.10.1.3. ESTABLECIMIENTO DEL CAMBIO PROYECTADO PORCENTUAL

Luego de la definición de la sectorización se estableció el cambio proyectado porcentual entre el periodo Histórico y el periodo Futuro para cada sector definido. Este cambio porcentual es respecto a los percentiles 25 y 75 de la precipitación futura respecto a la histórica. Un valor positivo significa un cambio positivo en la precipitación futura y viceversa. En la Tabla 7-42 se muestra el cambio porcentual de precipitación que tiene calculado la guía SEA.

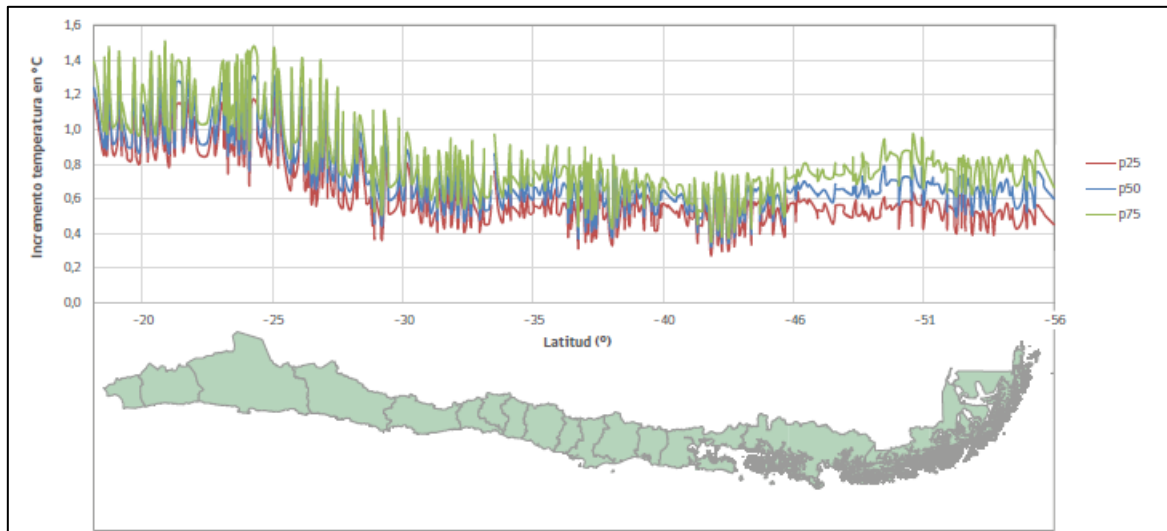
Tabla 7-42: Valores de Cambio Porcentual Esperado de Precipitación Según Sectorización Con Respecto al Periodo Histórico

SECTOR	ELEVACIÓN MEDIA [MSNM]	CAMBIO EN LA PRECIPITACIÓN (%)	
		P25	P75
A	4.140	-11,6	15,8
B	2.491	-17,6	13,5
C	960	33,7	165,6
D	1.948	-5,5	35,9
E	1.122	2,9	99,0
F	1.160	-24,1	19,8
G	3.459	-23,8	10,0
H	512	-30,5	0,2
I	1.992	-28,5	0,0
J	1.283	-18,8	-8,3
K	292	-20,1	-9,5
L	317	-8,8	-3,3
M	857	-6,8	-1,4
N	312	1,2	6,1

Fuente: SEA, 2023c

Con respecto a la Temperatura, los pasos 1 y 2 no son necesarios, puesto que según lo determinado en ARClím a lo largo del país se observa un aumento de temperatura futura de entre 0,4 °C (escenario favorable) y 1,4 °C (escenario desfavorable). La envolvente (percentil 25 y percentil 75) de la temperatura presenta una variación de tan solo 0,2 °C para todos los Modelos de Circulación Global (GCM) utilizados. La Figura 7-44 muestra dicho cambio de temperatura por ARClím.

Figura 7-44: Proyección de cambio en la Temperatura ARClím



Fuente: SEA, 2023b

7.10.1.4. APLICACIÓN DE PORCENTAJES DE CAMBIO A LA ESTADÍSTICA HISTÓRICA

A partir de los resultados obtenidos en el paso 2 se debe aplicar los porcentajes de cambio de precipitación sobre los datos estadísticos históricos para obtener la proyección futura. El escenario más desfavorable corresponde al percentil 25 o al 75, dependiendo de con cual se produce una mayor magnitud o duración del impacto identificado que se pretende predecir (escoger entre menor caudal o mayor caudal para mayo impacto, por ejemplo).

Las actualizaciones de modelos numéricos que son comprometidas en la RCA deberán actualizarse según las proyecciones de cambio de precipitación y temperatura.

En consideración de que los valores corresponden a efectos del CC sobre la magnitud a escala temporal, entonces se podrá, si se justifica, utilizar supuestos para determinar variaciones en la magnitud a escala temporales menores, frecuencia de eventos o estacionalidad.

Si la zona de estudio se encuentra entre 2 sectores, se debe considerar que el porcentaje de cambio es el promedio ponderado según porcentaje de área de la zona perteneciente a cada sector.

En el norte se debe implementar con criterio los resultados de precipitación. En estos sectores se debe presentar la estadística del periodo histórico de referencia (1980 – 2010) para corroborar que la variación porcentual elevada no genere un valor muy distinto de proyección futura.

El periodo Histórico no considera los últimos años de sequía, por lo que estos valores obtenidos son muy conservadores.

El RCP8.5, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero se puede considerar como el escenario más desfavorable (aunque no se demuestre en la proyección de precipitación).

7.10.1.5. PROYECCIONES PROPIAS

En caso de necesitar de cálculo de proyecciones propias se debe realizar la siguiente metodología.

7.10.1.6. ESCENARIOS Y GCM

Proyecciones con GCM del CMIP-6 (o posterior), 1850 – 2014 histórico y 2015 – 2100 futuro. Se deben utilizar al menos 2 escenarios: desfavorable (SSP5-8.5) y menos desfavorable (SSP2-4.5).

La elección de GCM debe hacerse a partir de un análisis previo, lo que justifique la elección. Siempre se debe evaluar el escenario desfavorable para las proyecciones con GCM. Para determinar los valores para la evaluación ambiental se debe utilizar algún criterio estadístico, similar a ARclim.

7.10.1.7. ESCALAMIENTO TEMPORAL

Se recomienda utilizar MBCn, UQM, QDM, SDM, DQM o QM.

7.10.1.8. CORRECCIÓN DE SESGO

Corrección de sesgo se debe realizar con información histórica solo para el periodo histórico de los modelos (hasta 2014). Se puede usar como base para información histórica los productos grillados CR2Met 1.4, 2.0 y 2.5. También se puede realizar un producto grillado propio con información local observada.

7.10.1.9. TEMPORALIDAD

Se debe definir la escala temporal adecuada para el análisis del proyecto (uso de información diaria no es necesaria, puesto que genera un trabajo mayor al necesario. Se puede usar semanal o mensual). Las ventanas de tiempo histórico y futuro deben tener la misma longitud, de al menos 30 años.

7.10.1.10. METODOLOGÍA A SEGUIR SEGÚN LO DETERMINADO EN LA GUÍA

1. Determinar la localización del proyecto en los sectores definidos en el paso 1 de la guía. Si la localización está presente en más de un sector, determinar el porcentaje de área del proyecto que represente cada sector. (Ejemplo: proyecto está en un 90% en sector H y 10% sector I).
2. Determinar la estadística histórica de precipitación para cada cuenca presente en cada sector de la localización del proyecto. (Ejemplo: últimos 30 años se obtiene una precipitación media de 310 mm en parte de la cuenca del sector H y 330 mm en parte de la cuenca en sector I).
3. Definir cual escenario es el más desfavorable percentil 25 o percentil 75 (percentil 25 en caso de que el mayor impacto esté relacionado a una disminución de la precipitación o percentil 75 en caso contrario). (Ejemplo: se escoge percentil 25, puesto que el impacto se da para una menor precipitación en análisis de recarga).
4. Determinar el cambio porcentual asociado al escenario más desfavorable para los sectores presentes en el proyecto. (Ejemplo: -30,5% para sector H y -28,5% para sector I).
5. Aplicar cambio de porcentaje a los estadísticos históricos. (Ejemplo: $310 * (100 - 30,5)\% = 215,5$ mm para sector H y $330 * (100 - 28,5)\% = 236$ mm para sector I).
6. Calcular el promedio ponderado de las precipitaciones obtenidas en cada sector. (Ejemplo $90\% * 215,5$ mm + $10\% * 236$ mm = 217,5 mm).
7. Respecto a Temperatura aplicar el cambio de temperatura (+1,4 °C) a la estimación histórica. (Ejemplo: 6 °C es Temperatura histórica, entonces 7,4 °C es temperatura con cambio climático).
8. Para la predicción de impacto hay que analizar el modelo hidrológico y hacer la correlación para la estimación. Se puede hacer un análisis del comportamiento, o aplicar como input en modelo las precipitaciones y temperaturas proyectadas en el futuro. (Ejemplo: de información histórica se estima que el 7% de precipitación anual genera recarga, por lo que, si se mantienen esas condiciones en el cambio climático y se mantiene esa proporción, se obtiene $7\% * 217,5$ mm = 15,2 mm de recarga en el futuro y al implementar en modelo Turc se obtiene que la recarga es de 10 mm con la precipitación de 217,5 mm y temperatura de 7,4 °C, lo que demuestra que este cálculo es el más desfavorable y entrega el mejor resultado para el análisis).

7.10.2. GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CONSIDERACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SEIA

7.10.2.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile (ECLP 2050) indica que el país cumple con la mayoría de los criterios de vulnerabilidad al cambio climático según el artículo 4° número 8° de la CMNUCC. Estos criterios incluyen áreas costeras de baja altura, zonas áridas y semiáridas, zonas forestales y propensas al deterioro forestal, áreas propensas a desastres naturales, zonas afectadas por sequía y desertificación, áreas urbanas con contaminación atmosférica y ecosistemas frágiles, incluyendo los montañosos. Esta situación evidencia la alta vulnerabilidad del territorio chileno a los efectos del cambio climático, implicando nuevas tendencias en la evolución ambiental del país.

Aunque Chile tiene un bajo nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con el nivel mundial, ha adoptado un cambio de paradigma hacia una respuesta global ante el cambio climático, desde el Protocolo de Kioto (1998) hasta el Acuerdo de París (2015), enfocado en la mitigación y adaptación bajo el principio de equidad y responsabilidades comunes pero diferenciadas. Chile ratificó el Acuerdo de París el 20 de septiembre de 2016, comprometiéndose a reforzar la respuesta mundial ante la amenaza del cambio climático en el contexto del desarrollo sostenible.

El 13 de junio de 2022, se promulgó en Chile la Ley N°21.455 o Ley Marco de Cambio Climático, cuyo objetivo es enfrentar los desafíos del cambio climático, transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de GEI, adaptarse al cambio climático, reducir vulnerabilidad y aumentar la resiliencia a sus efectos adversos. Esta ley establece la institucionalidad y los instrumentos de gestión necesarios, y requiere la consideración de la variable de cambio climático en los componentes ambientales pertinentes dentro del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

En este contexto, SEA elaboró la “Guía Metodológica para la consideración del Cambio Climático en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental SEIA” (2023). En ella menciona que “el cambio climático es un hecho indiscutible que debe ser abordado de manera urgente”, incorporando el cambio climático en la evaluación de proyectos.

Figura 7-45: Principales Puntos Para Considerar Cambio Climático En Proyectos De Evaluación Impacto Ambiental

¿Cuál es la importancia de la guía en el SEIA?

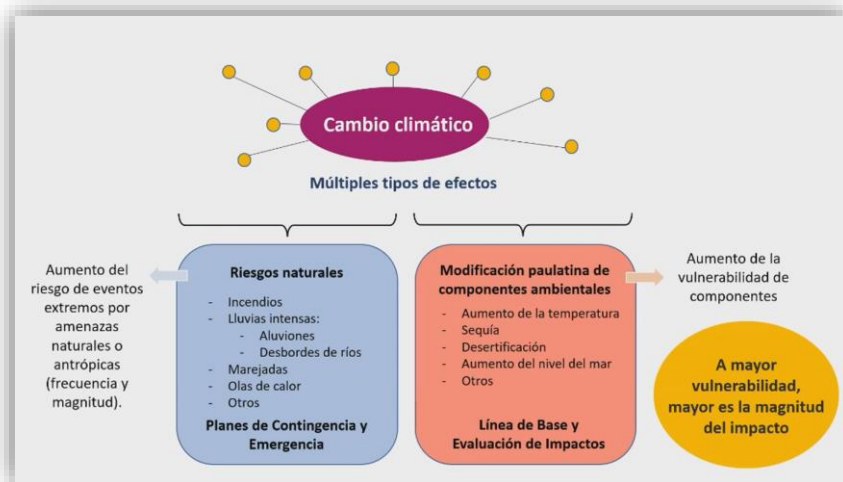
- Triple crisis ambiental: **cambio climático**, contaminación y pérdida de biodiversidad.
- **Chile presenta la mayoría de los criterios de vulnerabilidad** establecidos por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático:
 - áreas costeras de baja altura
 - zonas áridas y semiáridas
 - zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal
 - zonas propensas a los desastres naturales
 - zonas expuestas a la sequía y la desertificación
 - zonas urbanas con contaminación atmosférica
 - zonas de ecosistemas frágiles, incluidos los ecosistemas montañosos
- **Urgencia climática**

Gobierno de Chile | Servicio de Evaluación Ambiental

Fuente: SEA

7.10.2.2. OBJETIVO DE LA GUÍA

La guía tiene como objetivo entregar una metodología para analizar los efectos adversos del cambio climático sobre los componentes ambientales que son objeto de protección del SEIA, integrar la variable en el análisis de los impactos ambientales y riesgos, además, responde a la inclusión general y transversal de la variable cambio climático en la evaluación de proyectos SEIA.



Fuente: SEA

Por último, el rol del SEA es considerar el estado y tendencias de los componentes ambientales que se ven afectados por el cambio climático.

.....

Si la evaluación ambiental de proyectos no considerase los efectos del cambio climático sobre los componentes ambientales, podría **subvalorar la magnitud, extensión y duración y, por lo tanto, la significancia de los impactos** y, en consecuencia, generar **planes de medidas y de seguimiento insuficientes**.

.....

Fuente: SEA

7.10.2.3. COMENTARIOS

En este ítem se revisaron los lineamientos principales requerimientos de las Guías SEA. Dichos requerimientos están alineados con los requisitos de modelación de los Planes Hídricos del MOP, ya sean los antiguos PEGHs, como los actuales PERHs o bien los Planes de Infraestructura Hídrica, en el que deberían estar todos alienados con los requerimientos del Actual Código de Aguas. En la misma línea, cualquier infraestructura que se diseñe y modelo, ya sea para riego, industrial o minero, que posteriormente deba ser presentada en el Servicio de Evaluación Ambiental debería adicionalmente cumplir con los requerimientos expuestos en la Guía Metodológica para la consideración del Cambio Climático en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental SEIA (2023). Esto genera que finalmente lo que hasta hace unos años se realizaba como práctica habitual, repetir las forzantes hidrológicas del pasado como válidas para evaluar impactos a futuro ya no sea posible llevar a cabo. Al menos si se requiere estar a alineado con el Nuevo Código y las guías del SEA.

Por último, se presenta el “Artículo 13. Caracterización Física en Términos Climáticos, Ambientales, Hidrológicos e Hidrogeológicos” extraído del “Reglamento que establece el Procedimiento para la Elaboración, Revisión y Actualización, Así como el Monitoreo y Reporte de los Planes Estratégicos de Recursos Hídricos en Cuencas” publicado en enero 2024.

La caracterización física debe considerar los siguientes aspectos mínimos, en los términos que se señalan a continuación:

a) *En términos climáticos, incluir una caracterización del clima regional informando las condiciones meteorológicas a escala de cuenca y a escala local, y con la temporalidad adecuada según la hidrología de la cuenca (anual, estacional, horaria, diaria). Considerar las estadísticas a largo plazo de temperatura atmosférica; presión atmosférica; direcciones y velocidades de viento principales; la humedad absoluta y relativa; evaporación y evapotranspiración potencial y real y; la precipitación diferenciando entre sólida, líquida y, su estacionalidad. La determinación de proyecciones de cambio climático a escala de cuenca debe considerar, a lo menos, Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, en adelante "RCP" por sus siglas en inglés) o Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, en adelante "SSP" por sus siglas en inglés) adoptadas por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas ("IPCC", por sus siglas en inglés), Modelos de Circulación General, reanálisis climáticos y técnicas de escalamiento. Esta determinación deberá considerar la reducción de la incertidumbre frente a las proyecciones de cambio climático.*

b) *En términos ambientales, se requiere de una caracterización de los ecosistemas terrestres y acuáticos existentes, donde se debe considerar los pisos vegetacionales, especies protegidas, humedales, vegas, bofedales y pajonales, y otros componentes de relevancia según cada cuenca; además de las principales funciones y servicios ecosistémicos que existen en la cuenca.*

Asimismo, se deben identificar las áreas bajo protección oficial y cualquier otra singularidad ambiental del territorio que requiera una consideración desde el punto de vista de preservación del medio ambiente, la conservación de la naturaleza y/o la sustentabilidad de los acuíferos. Igualmente, se debe incluir una identificación y análisis de suelos, tanto de sus características físicas, como de sus coberturas y usos.

c) *En términos geomorfológicos, se debe informar las características principales que componen el paisaje de la cuenca, destacando los rasgos geomorfológicos singulares, así como los procesos geológicos principales que han generado la morfología. Además, se debe identificar la existencia de glaciares y su eventual rol en el balance hídrico de la cuenca hidrográfica de la que se trate.*

d) *En términos hidrológicos, se debe realizar una caracterización de flujos hidrológicos superficiales usando estadísticas de largo plazo y/o productos hidrológicos disponibles; para establecer la distribución natural en el territorio de los flujos superficiales, así como sus atributos según épocas del año. Con la información compilada, se deberán construir índices hidrológicos pertinentes a la cuenca y sociabilizados en ella. Además, se debe identificar la o las funciones de frecuencia que explican la distribución espacial y temporal, explicitando los estadísticos principales.*

e) En términos hidrogeológicos, se deben identificar los distintos tipos de acuíferos presentes en la cuenca, y caracterizarlos de acuerdo a su geología, condición libre, confinado, semiconfinado, fracturado en roca, profundo, unidades impermeables, basamento rocoso, geometría en plano y en profundidad, unidades hidrogeológicas permeables, características de parámetros hidráulicos y de almacenamiento, zonas de recarga y descarga con sus mecanismos, fenómenos de ocurrencia, y tasas de flujo, tales como evaporación, surgencias, afloramientos, interacciones río-acuífero, bombeos, recargas por precipitación, entre otras.

Se deben caracterizar los niveles de agua subterránea con la información de datos y estadísticas de mayor duración posible disponibles, identificando variaciones temporales y espaciales en los niveles estáticos y dinámicos del agua subterránea. Igualmente, se debe caracterizar el balance hídrico hidrogeológico de la cuenca y sus Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), para lapsos históricos, actuales, y proyectados.

f) En términos de la calidad del agua, se deben identificar sus principales características ya sea para agua superficial o subterránea, los procesos que condicionan su calidad y las problemáticas de calidad de agua de público conocimiento.

Además, se deben considerar los planes de manejo a los que hace referencia el artículo 42 de la ley N°19.300, en el caso que se hayan dictado.

g) En términos hidráulicos, se debe caracterizar, en función de la información disponible, el arrastre de sólidos, la sedimentación y la extracción de áridos en los cauces de la cuenca.

En base a la información de la caracterización física, se deberá identificar los usos de protección y conservación del agua.

7.11. OTROS ESTUDIOS RELEVANTES

En la Tabla 7-43 se presenta el listado de otros estudios relevantes a tener en consideración durante el desarrollo del presente proyecto.

Tabla 7-43: Otros Estudios de Interés

ESTUDIO	AÑO	RESUMEN	PRINCIPALES RESULTADOS
"Evaluación de Medio Término Proyecto Laja Diguillín Depto. De Planificación DOH 2002"	2002	El estudio evalúa la conveniencia económica para el país de continuar con la construcción del proyecto "Sistema de Regadío Canal Laja-Diguillín"	Entrega la evaluación económica del sistema de riego Canal Laja-Diguillín
"Definición de Alternativas de Ingeniería para Áreas Blancas y Áreas Adicionales Proyecto Laja Diguillín, Región del Biobío SIGA-DOH 2012"	2012	Entrega una visión amplia y detallada del valle, específicamente de las comunas de San Ignacio y Bulnes. Entrega información detallada de la red de riego que es abastecida por el río Diguillín a través de las distintas bocatomas. Se incorpora una caracterización detallada de la situación actual de la red de riego y proporción los anteproyectos para el mejoramiento de los canales que la componen. Se entregan las monografías de los distintos canales. Se entrega un listado de regantes de la zona actualizado al año 2012. Para cada canal del sistema se presenta su diagrama unifilar que contiene los roles y cantidad de agua requerida por cada uno. Se considera la restitución aerofotogrametría en escala 1:5,00 desarrollada en el estudio de SIGA como base cartográfica. Entrega información sobre las áreas blancas y adicionales, permitiendo un análisis del abastecimiento del recurso de agua para estas áreas con la incorporación del Embalse	Identificación y agrupación de las áreas Blancas y Adicionales, susceptibles a ser regadas el canal Matriz Diguillín - Coltón. Realización de un estudio Hidrológico en el río Diguillín con el objetivo de determinar el caudal en régimen natural aguas arriba de la bocatoma Diguillín y aguas abajo de la bocatoma. Con una seguridad del 85%

ESTUDIO	AÑO	RESUMEN	PRINCIPALES RESULTADOS
		<p>Zapallar o Diguillín. Se entrega información sobre la cantidad de hectáreas que beneficia cada canal, para los regantes actuales, las áreas adicionales y blancas.</p>	
<p>"Ingeniería de las Adecuaciones del Sistema de Riego del Proyecto Laja-Diguillín REG-DOH 2001"</p>	<p>2001</p>	<p>En esta consultoría se realiza una Ingeniería de Detalle de las variantes necesarias para incorporar el total de las áreas de riego por sectores en este estudio. (Se mencionan el sector y área de riego)</p>	<p>Se entrega información de las obras de riego proyectadas que abastecen de agua proveniente del río Diguillín, desde el Embalse Zapallar o Diguillín y que permitirá surtir del recurso a la zona alta de las comunas de San Ignacio y El Carmen (sobre el canal Laja - Diguillín). Se considera la información entregada de los sectores definidos como Sector 3, 8 y el sector 2, permitiendo obtener la red de canales principales proyectados en cada una de las áreas de riego, destacándose el canal Zapallar que nace desde el embalse Zapallar y que alimenta las áreas de El Carmen Alto y San Ignacio a través de los canales proyectados. Se consideran una serie de obras adicionales, generando una nueva red para abastecer la totalidad de las áreas de riego. Dicha red proyectada permite tener información de las áreas de riego nuevas que serán abastecidas por el Embalse Zapallar.</p>

8. DETERMINACIÓN DE FORZANTES HIDROMETEOROLÓGICAS EN PERIODOS HISTÓRICO Y FUTURO

En este capítulo se presentan las series empleadas como forzantes de precipitación y temperaturas extremas, y como se obtienen dichas series. La generación de estas forzantes se basa en el uso del producto meteorológico CR2MET (Boisier et al, 2018) y la información entregada por distintos modelos de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés) en el marco de la iniciativa CMIP6 (O'Neill et al, 2016), que proveen de proyecciones de cambio climático en toda la superficie y atmósfera del planeta.

8.1. VALIDACIÓN DE INFORMACIÓN DE CR2MET

Para la caracterización histórica de la zona, se utilizó el producto CR2MET en su versión v2.5, correspondiente a la versión más reciente y que contiene información de precipitación y temperatura de manera diaria hasta el año 2024 en formato de grilla de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ para todo Chile. CR2MET (Boisier et al, 2018) es un producto meteorológico que entrega información dividida espacialmente (grillada) de precipitación y temperaturas máximas y mínimas, para todo el territorio nacional. Tiene información disponible desde principios de 1960 hasta marzo de 2024.

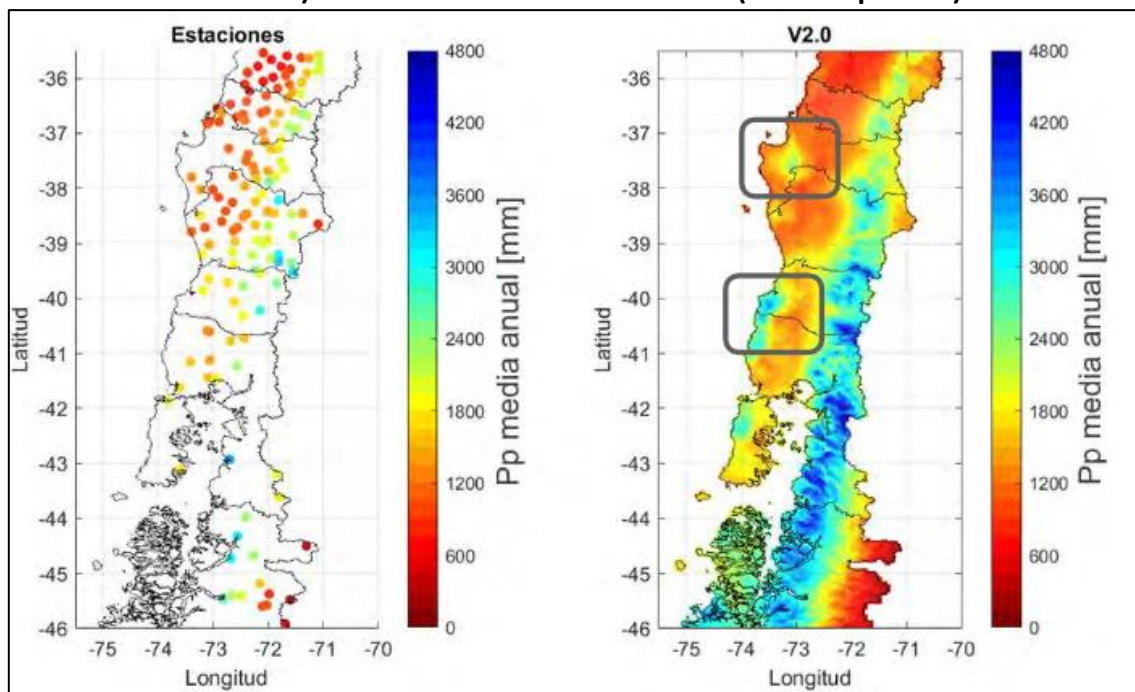
Este producto representa el estado del arte en lo referente a información meteorológica grillada a nivel nacional y fue utilizado como base en el desarrollo de la actualización de las distintas etapas del Balance Hídrico Nacional, en todas sus etapas (DGA, 2018, DGA, 2019a; DGA, 2019b). Este producto se desarrolló mediante un escalamiento estadístico de información de distintos campos meteorológicos del reanálisis ERA5, tanto en superficie como en ciertos niveles de presión de la atmósfera. El escalamiento realizado utiliza como base registros de estaciones meteorológicas e información topográfica para establecer relaciones entre dicha información y los datos del reanálisis ERA5. Una vez establecidas estas relaciones, se utilizaron para inferir de forma distribuida los campos ajustados para todo el territorio nacional. La Figura 8-1 muestra una comparación entre los valores de precipitación media anual de las estaciones de la zona centro-sur y los campos de precipitación estimados por CR2MET.

Se destaca en la figura un par de características del producto CR2MET: logra replicar de forma exitosa máximos locales de precipitación asociados a eventos geográficos como la Cordillera de Nahuelbuta y el bosque Valdiviano. Cabe señalar que el desarrollo de este producto utiliza en sus procesos de cálculo la información de todas las estaciones DGA de la zona y que, por tanto, la información que estas puedan proveer se encuentra incorporada de forma indirecta.

CR2MET provee una base de datos de precipitación y temperaturas continua temporal y espacialmente para todo el territorio nacional, lo cual representa información particularmente

relevante para zonas donde no se cuenta con información de estaciones meteorológicas, como por ejemplo las cuencas hidrográficas de cabecera que son las fuentes del agua que serán reguladas por el embalse.

Figura 8-1: Comparación De Las Medias Anuales Del Producto Meteorológico CR2MET (Panel Derecho) Y De Estaciones Pluviométricas (Panel Izquierdo)



Fuente: Referencia [7], Correspondiente al Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a)

Para asegurar que el producto tiene una correcta representación en la zona de estudio, se realizó una validación de los datos con respecto a estaciones meteorológicas de la zona, para cada variable por separado, lo cual se presenta en las subsecciones a continuación.

8.1.1. PRECIPITACIÓN

8.1.1.1. VALIDACIÓN DE VALORES MEDIOS MENSUALES

La precipitación representa el flujo de entrada de agua a la cuenca, en especial en las zonas cordilleranas. En función de esto, resulta fundamental realizar un proceso de validación que confirme que los valores estimados por el CR2MET son correctos en particular para el área de estudio, ya que al haber sido generado como un producto a nivel nacional puede presentar ciertas diferencias respecto a los datos de una región específica.

La Tabla 8-1 presenta las estaciones que se usaron para la validación de dicha información, y en la Figura 8-2 se muestra la distribución de dichas estaciones. Todas las estaciones que se utilizaron son gestionadas por la Dirección General de Aguas.

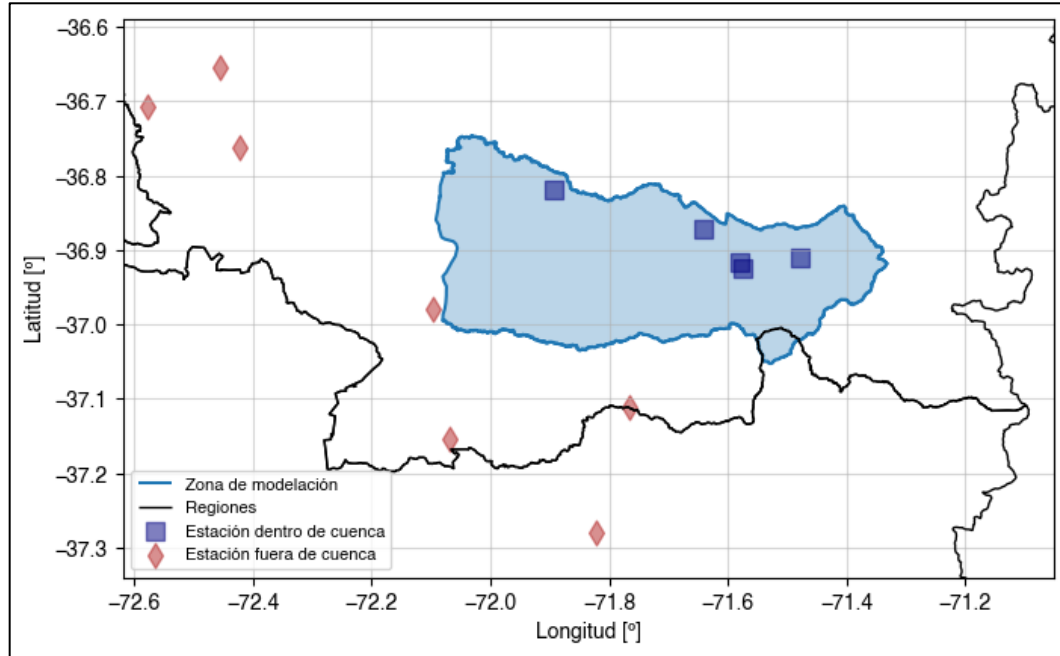
Tabla 8-1: Información De Las Estaciones Meteorológicas De Precipitación Utilizadas Como Referencia. Coordenadas UTM Referidas Al Datum WGS1984, Huso 19.

Código	Nombre	Longitud	Latitud	Elev.	UTM E	UTM N	Inicio registro	Fin registro	N° datos diarios	En zona de estudio
		(°)	(°)	(msnm)						
8135003	Nueva Aldea	-72.456	-36.655	32	191.061	5.937.832	01-01-1980	31-12-2023	15787	No
8133003	Chillancito	-72.424	-36.762	56	194.347	5.926.059	01-01-1980	31-12-2023	15993	No
8132002	Pemuco	-72.097	-36.979	200	224.328	5.902.973	01-01-1980	31-12-2023	15507	No
8135004	Cancha Los Litres	-72.579	-36.708	200	180.281	5.931.546	01-01-1993	31-12-2023	10768	No
8123004	Cholguán	-72.068	-37.154	230	227.537	5.883.636	01-01-1980	18-12-2023	15472	No
8124005	Mayulermo	-71.894	-36.819	371	241.863	5.921.297	01-02-1992	27-12-2023	11248	Sí
8124004	Las Cruces	-71.765	-37.111	467	254.313	5.889.235	01-01-1993	31-12-2023	11238	No
8122002	Trupán	-71.823	-37.280	474	249.717	5.870.329	01-01-1980	31-12-2023	15705	No
8130006	Diguillín	-71.642	-36.871	670	264.505	5.916.179	01-01-1980	31-12-2023	16050	Sí
8130002	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	-71.576	-36.924	727	270.548	5.9104.59	01-05-2009	31-12-2023	5254	Sí
8130003	Fundo Atacalco	-71.581	-36.917	740	270.082	5.911.223	01-01-1980	31-03-2022	15405	Sí
8130004	Las Trancas	-71.479	-36.911	1242	279.152	5.912.130	01-01-1980	31-12-2023	15627	Sí

Fuente: Elaboración Propia

La utilización de estaciones meteorológicas ubicadas fuera de la cuenca de estudio se debe a la limitada disponibilidad de estaciones dentro de la misma, y a la necesidad de validar la totalidad de la zona. Cabe mencionar que existe un sesgo en la distribución de las estaciones, ya que la mayoría de ellas se encuentran a bajas elevaciones, con solo una estación, Las Trancas, ubicada por encima de los 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm), aproximadamente a 1500 msnm. Este aspecto es particularmente relevante, dado que es crucial validar las estimaciones en zonas de elevación más alta, donde las condiciones climáticas pueden variar significativamente.

Figura 8-2: Ubicación De Las Estaciones Meteorológicas Utilizadas Como Base De Validación

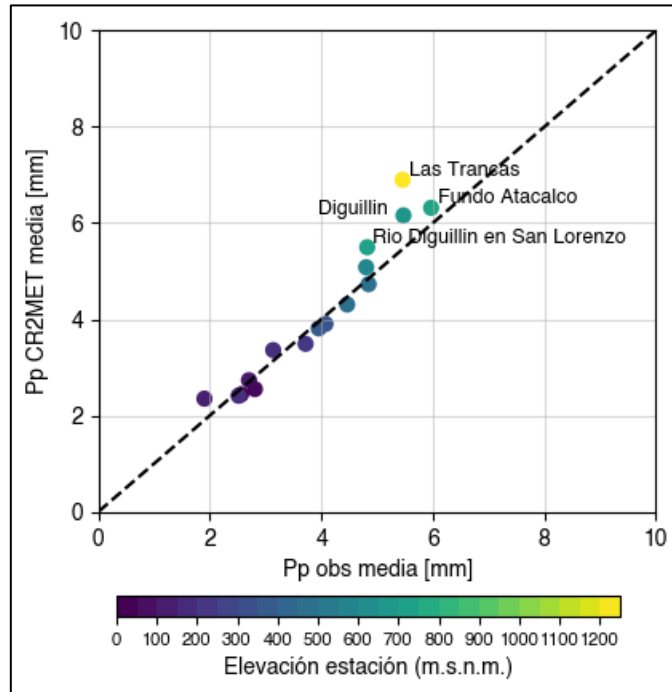


Fuente: Elaboración Propia

Como primera aproximación para la validación, se procedió a comparar los valores medios anuales de precipitación registrados en cada estación meteorológica con los estimados por el producto CR2MET para las mismas ubicaciones, considerando para ello solamente los días donde las estaciones cuentan con registros. Para asegurar la coherencia en los resultados, se utilizaron únicamente los datos correspondientes a días en los que se dispone de información válida tanto de las estaciones como de CR2MET. Esta comparación inicial permite evaluar la precisión del modelo en la estimación de precipitaciones en diferentes puntos dentro y fuera de la cuenca de estudio. La Figura 8-3 muestra los resultados de esta comparación, indicándose adicionalmente en el color de cada punto del diagrama de dispersión la elevación a la que se encuentra dicha estación.

En la Figura 8-3 se muestra, mediante una línea negra punteada, la recta de identidad. En un escenario ideal, todos los valores se situarían sobre esta línea, lo que indicaría una perfecta concordancia entre las estimaciones del producto CR2MET y las observaciones in situ. Sin embargo, en las estaciones ubicadas a mayores altitudes, se observa una tendencia a que los valores estimados por CR2MET sean superiores a los valores registrados. Esta discrepancia es especialmente notable en la estación Las Trancas, que se encuentra a más de 1000 metros sobre el nivel del mar (única referencia para las zonas de mayor elevación de la zona de estudio), así como en otras estaciones situadas alrededor de los 600 metros en la precordillera.

Figura 8-3: Comparación De Valores Medios Anuales De Precipitación Entre Los Valores Registrados En Las Estaciones Meteorológicas Y Lo Estimado Por El Producto CR2MET Considerando Solo Los Datos Válidos De Cada Estación



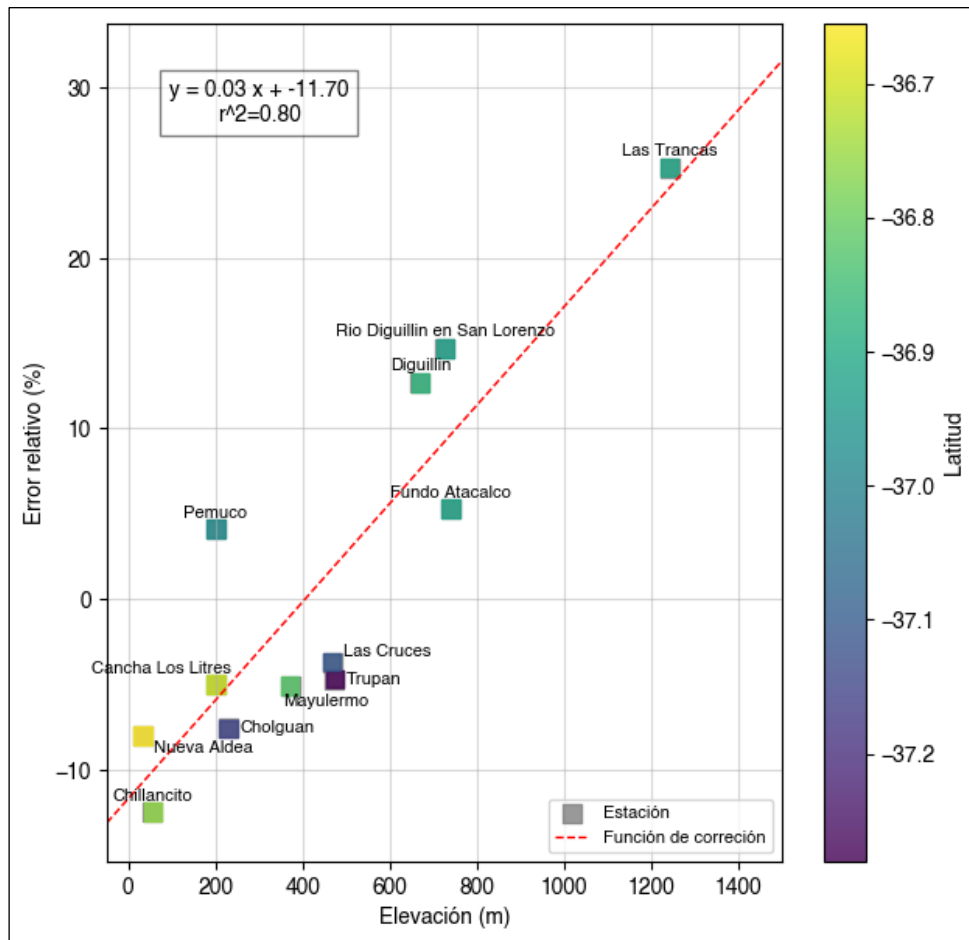
Fuente: Elaboración Propia

Para garantizar la confiabilidad de los datos, fue necesario investigar esta tendencia y corregirla si es preciso. Existen dos hipótesis que podrían explicar esta discrepancia: la primera es que CR2MET podría estar sobreestimando los valores en zonas de alta elevación, lo que requeriría una corrección del sesgo. La segunda posibilidad es que exista alguna irregularidad en las observaciones de las estaciones meteorológicas. A continuación, se exploraron ambas posibilidades con el fin de identificar la causa correcta y determinar las acciones necesarias para garantizar la precisión del análisis.

8.1.1.1.1 SOBREENESTIMACIÓN DE VALORES POR PARTE DE CR2MET

Se realizó una evaluación del sesgo porcentual de las estimaciones de CR2MET en función de la elevación, comparando estos valores con las observaciones obtenidas en estaciones meteorológicas. Se identificó que CR2MET tiende a sobreestimar las observaciones, particularmente a mayores altitudes. Para corregir esta discrepancia, se generó una función de corrección que ajusta los valores anuales de CR2MET en función de la elevación, buscando alinearlos con los datos observados en las estaciones. La estimación de esta función de corrección se llevó a cabo utilizando un gradiente que varía con la altura, el cual se presenta detalladamente en la Figura 8-4. Este ajuste, en caso de ser correcto, resultaría fundamental para asegurar la coherencia y precisión de las estimaciones de precipitación a diferentes elevaciones.

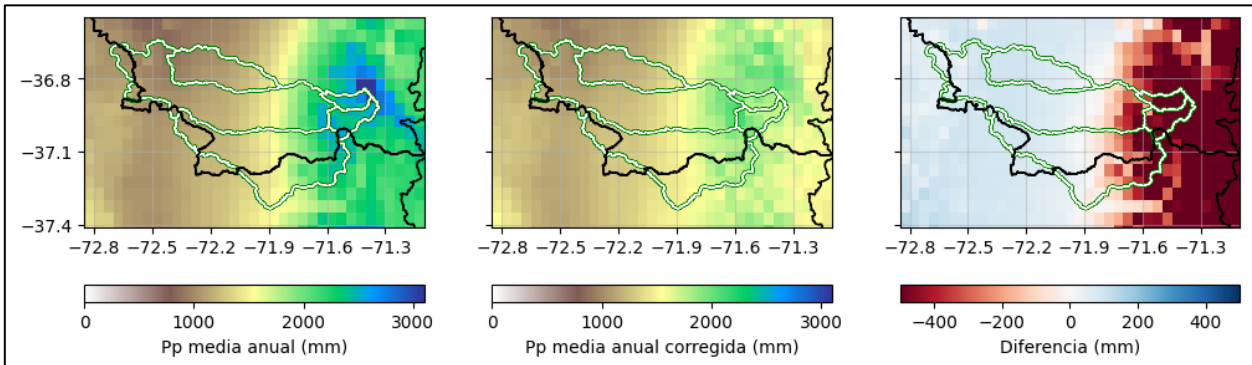
Figura 8-4: Función De Corrección De Sesgo Propuesta Para Los Valores De Precipitaciones Medias Anuales



Fuente: Elaboración Propia

La función de corrección desarrollada se aplicó a todo el dominio de CR2MET considerado en el estudio. Los resultados obtenidos tras esta corrección se presentan en la Figura 8-5, donde se muestran los campos medios antes y después de la corrección, así como la diferencia entre ambos. Se observa que la corrección induce una disminución en las estimaciones para las zonas de mayor elevación, mientras que en las zonas de menor elevación se produce un aumento en los valores. Estos ajustes reflejan la necesidad de corregir las sobreestimaciones en altitudes elevadas y subestimaciones en áreas más bajas, asegurando así una mayor coherencia en los datos estimados.

Figura 8-5: Campos De Precipitación Media Anual Sin Y Con Corrección Aplicada En El Periodo 1985-2023 Y Diferencia Entre Ellos



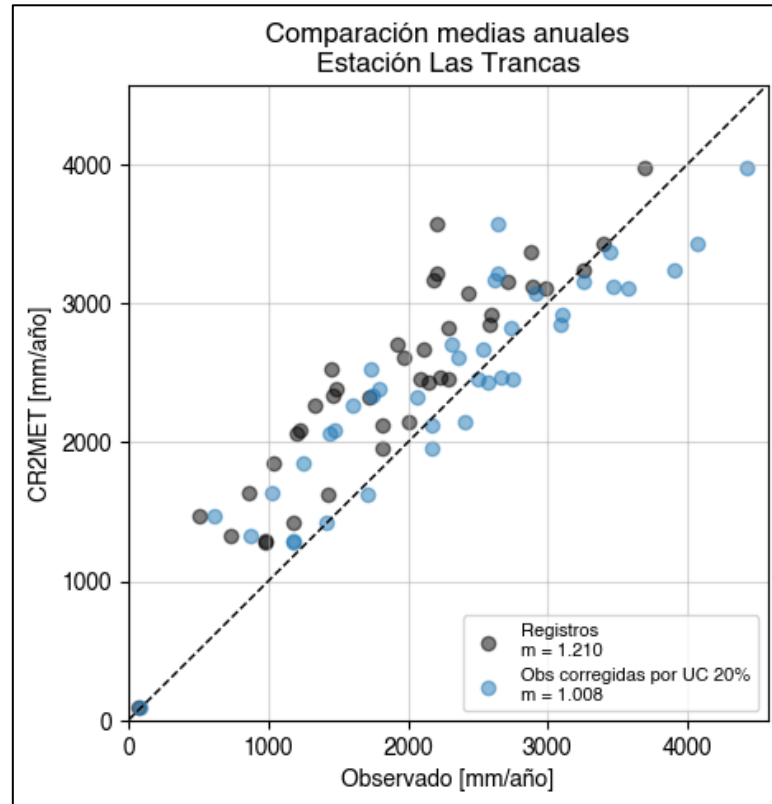
Fuente: Elaboración Propia

8.1.1.1.2 IRREGULARIDADES EN LOS VALORES REGISTRADOS POR LAS ESTACIONES

Las estaciones ubicadas a menor elevación son, en general, bien representadas por las estimaciones del producto CR2MET, a pesar de la amplia cobertura espacial que abarcan. Esto podría sugerir la existencia de problemas con las observaciones registradas en estaciones situadas a mayor elevación. Una posible causa de estas discrepancias es el fenómeno conocido como *under catchment* (submedición), el cual consiste en un registro de precipitación inferior al ocurrido realmente, debido a condiciones meteorológicas adversas asociadas a las tormentas. Dichas condiciones pueden afectar las mediciones por diversos factores, tales como la velocidad del viento, que puede alterar la trayectoria de los hidrometeoros, dificultando su captura por los instrumentos de medición. Asimismo, el uso de equipos de medición inadecuados para las condiciones locales, como pluviómetros tradicionales en zonas con precipitaciones sólidas (nieve, graupel, etc.), puede contribuir a una medición incorrecta.

Este fenómeno ha sido identificado particularmente en áreas montañosas, y se estima que puede causar una subestimación de la precipitación registrada de entre un 20% y un 30% (Pollock et al, 2018) en zonas con precipitaciones líquidas. Este efecto puede ser aún mayor, alcanzando diferencias de hasta un 100% (Kochendorfer et al, 2016) utilizando equipos de medición apropiados respecto a equipos que no consideran este efecto en áreas de alta elevación donde predominan las nevadas en lugar de las lluvias. Para evaluar el posible impacto de este fenómeno en las mediciones de las estaciones situadas a mayores altitudes, se realizó una comparación entre los valores de precipitación media anual registrados en la estación Las Trancas, tanto sin corrección como aplicando un ajuste del 25% asociado al *under catchment*. Los resultados de este proceso se presentan en la Figura 8-6, donde se muestran en los puntos negros los valores previos a la corrección y en celeste los valores con la corrección aplicada.

Figura 8-6: Comparación De Valores De Precipitación En La Estación Las Trancas



Fuente: Elaboración Propia

Para evaluar la exactitud de las estimaciones de precipitación, se realizaron regresiones lineales entre los valores observados y los estimados por CR2MET que se muestran en la Figura 8-6. En condiciones ideales, la pendiente de la recta resultante de esta regresión debería ser 1, lo que indicaría una relación de identidad entre ambos conjuntos de datos. Sin embargo, al analizar los valores sin corrección, se obtuvo una pendiente de 1,19, lo que sugiere una sobreestimación por parte de CR2MET. Al aplicar una corrección del 25%, un valor considerado razonable según la literatura especializada, la pendiente se ajustó a un valor prácticamente igual a 1. Esto sugiere que, al considerar el fenómeno de *under catchment*, los valores corregidos estarían alineados con las observaciones reales.

Para validar esta teoría, mediante comunicación directa con el autor del producto CR2MET, se confirmó que durante la generación de la versión 2.5 de CR2MET se aplicó un ajuste de *under catchment* a las observaciones utilizadas como base para generar las funciones de escalamiento. Esta corrección se implementó para corregir sesgos sistemáticos identificados entre las observaciones y los valores estimados por ERA5, especialmente al comparar los registros de estaciones a nivel nacional en escenarios de lluvia y nieve. Este ajuste sugiere que las estimaciones realizadas por CR2MET para toda la zona de estudio deberían considerarse

correctas, ya que incorporan las correcciones necesarias para minimizar el impacto del *under catchment* en las mediciones de precipitación.

8.1.1.1.3 VALIDACIÓN Y DESCARTE DE ALGUNO DE ESTOS PLANTEAMIENTOS

Ambas teorías son válidas. Se debe validar de alguna forma. Se puede estimar mediante el coeficiente de escorrentía que teoría cumple con que la cuenca reciba más agua de la que fluye por sus cauces. Se tienen los valores de escorrentía media anual de las cuencas de cabecera de CAMELS-CL. Los resultados se presentan en la Tabla 8-2.

Tabla 8-2: Comparación Entre Precipitaciones Medias Anuales Estimadas Para Las Cuencas De Cabecera Y La Escorrentía Media Anual Registrada En Las Estaciones Fluviométricas Que Las Definen

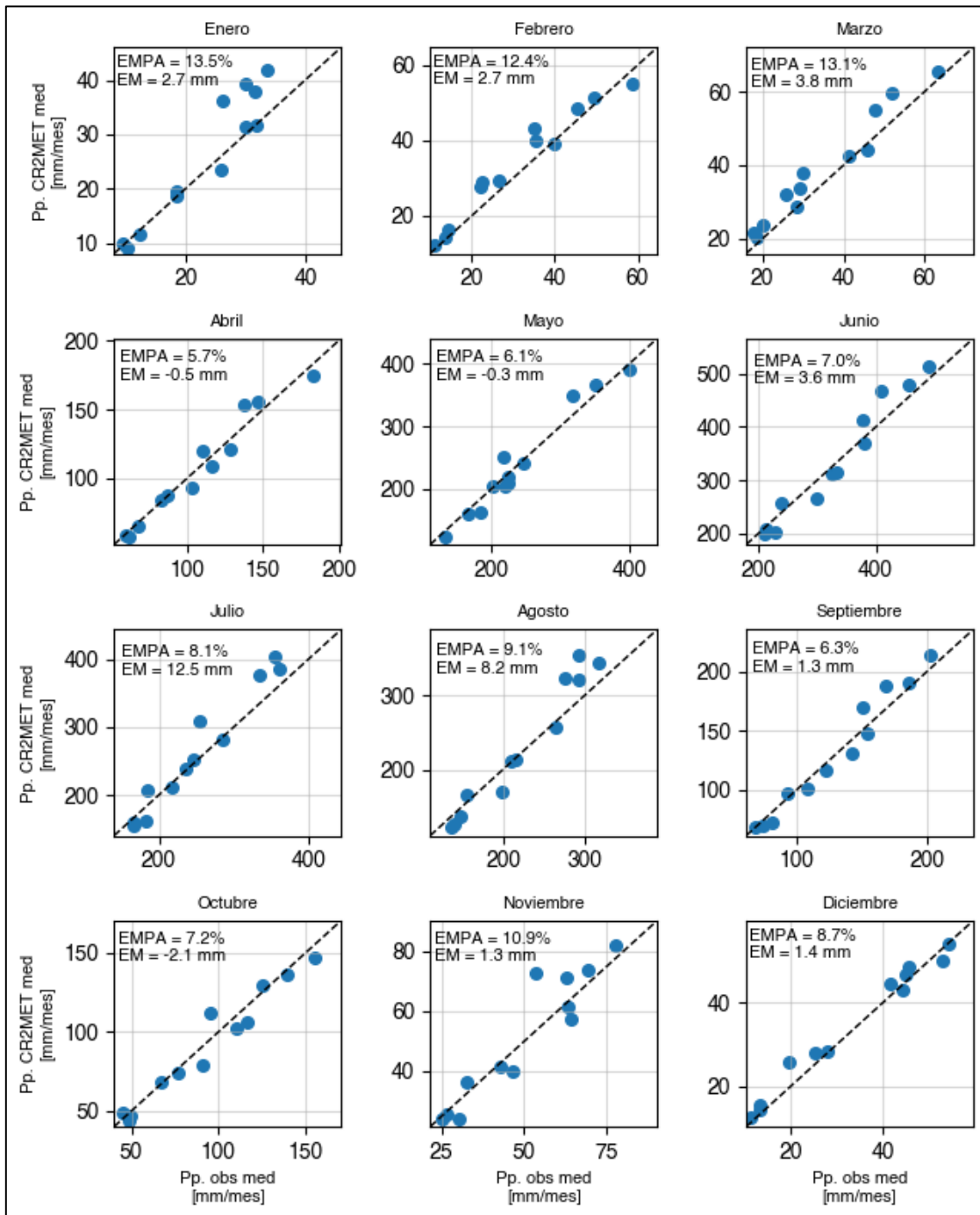
Cuenca	Pp med. corregida [mm/año]	Pp sin corrección [mm/año]	Escorrentía media anual [mm/año]	Coef. escorrentía con corrección [-]	Coefficiente escorrentía sin corrección [-]
Renegado Invernada	1950	2718	968	0,49	0,36
Diguillín San Lorenzo	1920	2659	2557	1,33	0,96

Fuente: Elaboración Propia

Aunque en el caso de la cuenca del río Renegado en Invernada el balance hídrico se mantiene dentro de los límites esperados, con un coeficiente de escorrentía inferior a 1, esta situación no se repite en la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo. Dado que un coeficiente de escorrentía mayor a 1 no es físicamente posible, se concluye que la hipótesis más plausible es que el producto CR2MET representa adecuadamente las precipitaciones de la zona sin necesidad de aplicar correcciones adicionales. Esta conclusión refuerza la validez del producto CR2MET en la estimación de precipitaciones medias, particularmente en las áreas de estudio analizadas.

La Figura 8-7 muestra una comparación de valores mensuales de todas las estaciones, considerando para la estación Las Trancas la corrección por *under catchment*. Algunas estaciones presentan un sesgo a la sobreestimación. Sin embargo, el error promedio es relativamente bajo y las diferencias porcentuales se mantienen bajo 10% en los meses más importantes. Esto se considera aceptable dentro de la incertidumbre esperable dentro de este tipo de estimaciones. En función de esto, se generan las series de precipitación media diaria para todos los elementos de interés, utilizando la metodología de ponderación presentada en el acápite 8.1.4.

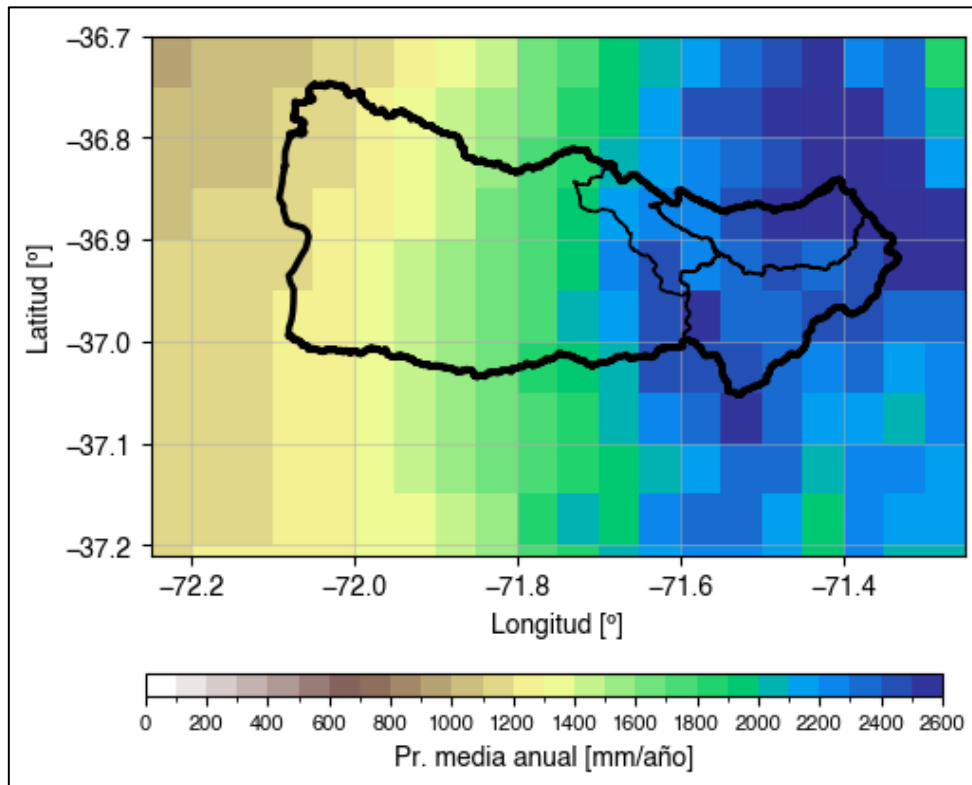
Figura 8-7: Comparación De Valores Mensuales De Todas Las Estaciones Consideradas Para La Validación Del Producto CR2MET



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 8-8 se presenta de forma referencial el campo de precipitaciones medias anuales para el periodo 1985-2023 estimadas por CR2MET.

Figura 8-8: Precipitaciones Medias Anuales Estimadas Por CR2MET Para El Periodo 1985-2023 En La Zona De Estudio



Fuente: Elaboración Propia

8.1.1.2. VALIDACIÓN DE VALORES EXTREMOS

Es necesario validar el producto CR2MET para eventos de precipitaciones máximas de periodos de 1, 2 y 3 días. Para esto se comparó la serie de precipitaciones máximas anuales del periodo 1985-2023 en las estaciones Diguillín, Fundo Atacalco y Las Trancas para las duraciones de 1d, 2d y 3 días. El resultado de esta comparación se presenta en la Figura 8-9. Dado que este insumo es utilizado en el estudio de crecidas afluentes en el embalse, se presentan los resultados de estas tres estaciones, que al ser de las que se encuentran a mayor elevación, resultan más relevantes de evaluar. Los resultados presentan una cierta variabilidad entre observaciones y estimaciones de CR2MET, las cuales disminuyen a medida que se incrementa el periodo de agregación. Sin embargo, se observa un sesgo sistemático que, al igual que el error, disminuye a mayor nivel de agregación. En función de esto, se aplicaron factores de corrección para minimizar la diferencia del error entre ambas fuentes. Los factores de corrección aplicados se presentan en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3: Factores De Corrección Aplicada A Los Valores De Precipitación Máxima En 1, 2 Y 3 Días

Duración	Factor de corrección
1 día	1,15
2 días	1,10
3 días	1,05

Fuente: Elaboración Propia

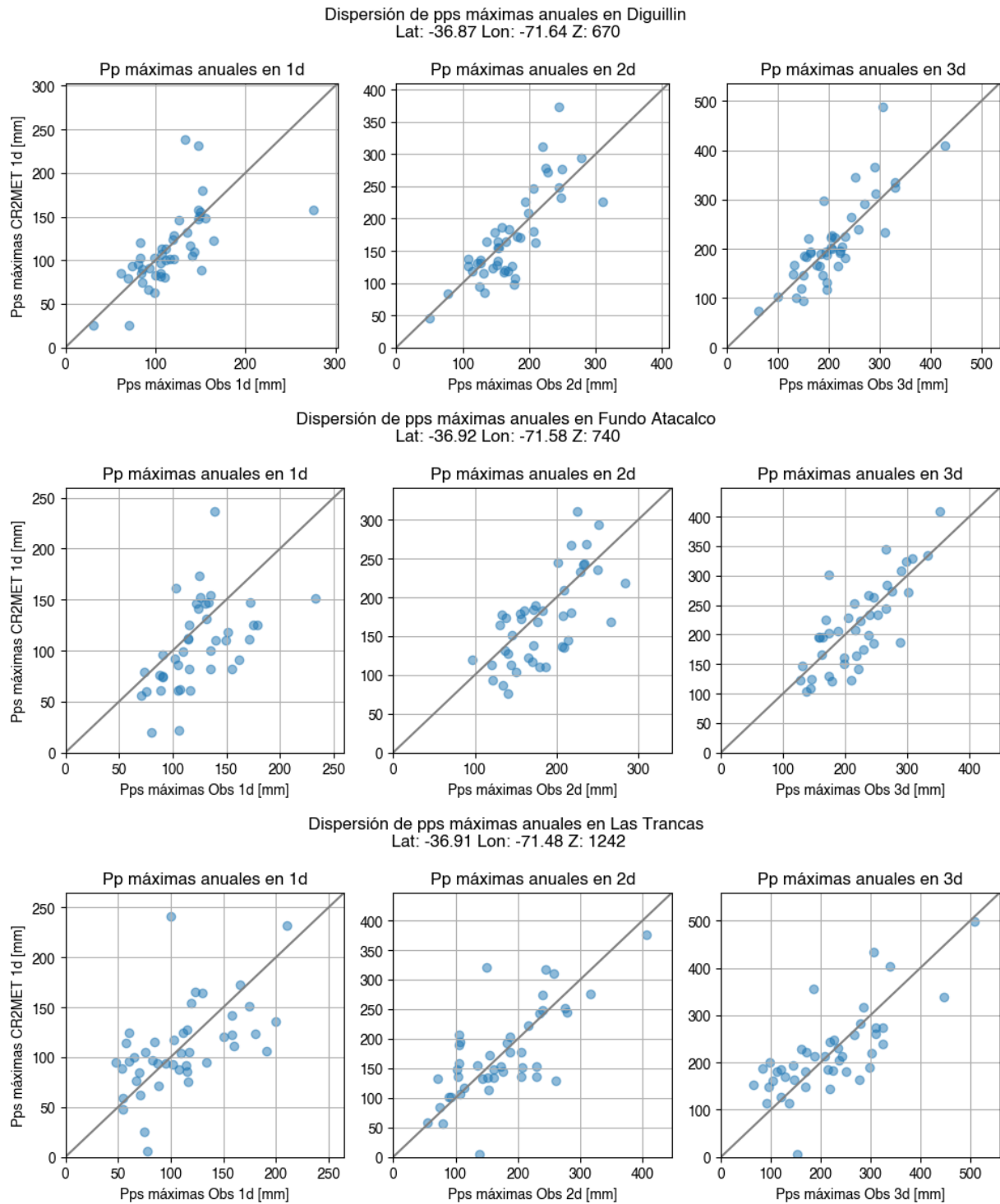
Estos diagramas de dispersión pueden ser evaluados mediante el error medio y el error medio porcentual. El resultado de esta comparación se presenta en la Tabla 8-4, donde se muestra el resultado considerando los valores corregidos.

Tabla 8-4: Evaluación De Similitud Entre Valores Extremos De Precipitación Observados Y Su Estimación Por CR2MET

Estación	Z msnm	1 día		2 días		3 días	
		Error medio [°C]	Error relativo [%]	Error medio [°C]	Error relativo [%]	Error medio [°C]	Error relativo [%]
Diguillín	670	-4,4	-2,5	-1,4	-1,3	4,5	2,2
Rio Diguillín En San Lorenzo	727	-12,6	-9	1,2	3,5	3,9	4,7
Fundo Atacalco	740	-17,4	-13,5	-11,4	-5,9	-3,8	-1,6
Las Trancas	1242	3	7,6	0,3	6,3	3,8	12,2

Fuente: Elaboración Propia

Figura 8-9: Comparación De Valores Extremos Registrados En Las Estaciones Para Eventos Extremos De 1d, 2d y 3d De Duración



Fuente: Elaboración Propia

8.1.2. TEMPERATURA MÁXIMA

Dado que los registros de temperaturas medias diarias son escasos a lo largo de todo el territorio nacional y, por tanto, difíciles de validar, dicha variable se estimó mediante el promedio de las temperaturas extremas. Así, es posible validar la capacidad de CR2MET de replicar el comportamiento de las temperaturas de la zona de estudio. Se presenta en la Tabla 8-5 y Figura 8-10 la información de las estaciones meteorológicas. Dada la escasez de estaciones operadas por la DGA en la zona, se incorporaron registros de otras fuentes, tales como la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y el Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria (INIA). Esta última fuente, aunque de registros cortos, entrega información de temperaturas al interior de la zona de estudio. Sin considerar estas estaciones, existe solo 1 estación en la zona.

En la Figura 8-11 se presentan los sesgos de la temperatura máxima media por mes, los cuales varían según la época del año. Durante el verano, se observa una sobrestimación de la temperatura, mientras que en invierno se produce una subestimación. Este patrón sugiere la necesidad de aplicar una corrección de sesgo diferenciada para cada mes, a fin de mejorar la precisión de las estimaciones.

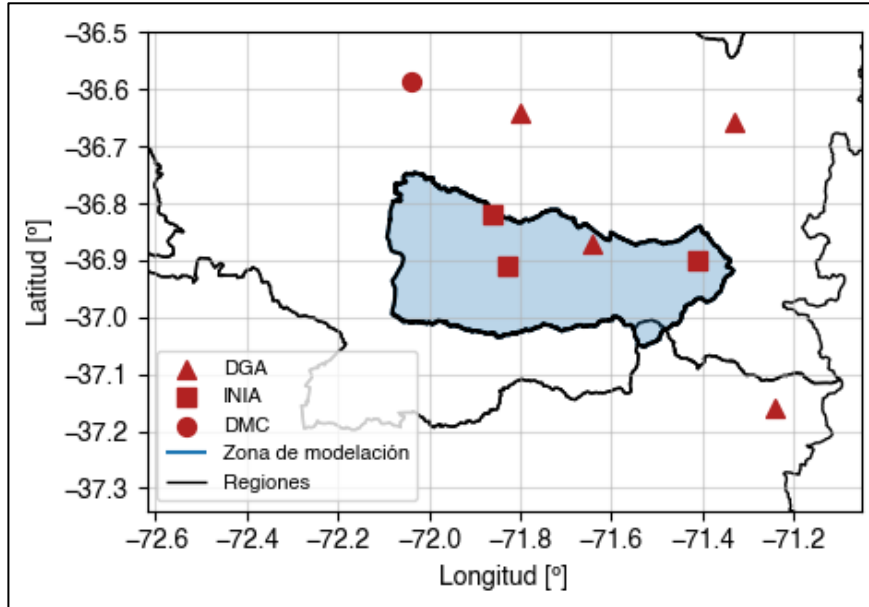
La Figura 8-12 muestra los gradientes de corrección estimados para cada mes. Se observa una variabilidad estacional en la distribución de los sesgos entre las estaciones. En verano, las estaciones muestran una mayor dispersión en sus sesgos, mientras que en invierno tienden a ser más homogéneas. Este comportamiento refleja la influencia de las condiciones climáticas estacionales sobre la variabilidad del sesgo.

Tabla 8-5: Información De Las Estaciones Meteorológicas Con Registros De Temperatura Máxima Diaria Utilizadas Como Referencia

Código	Nombre	Lon	Lat	UTM E	UTM N	Elev.	Inicio registro	Fin registro	N° datos diarios	Fuente
		(°)	(°)			(msnm)				
360011	Bernardo O'Higgins	-72.040	-36.587	228.020	5.946.616	151	01-01-80	31-12-23	15986	DMC
8113001	Coihueco Embalse	-71.799	-36.641	249.746	5.941.320	314	02-01-80	07-12-12	11864	DGA
8105003	Punilla	-71.328	-36.658	291.942	5.940.508	840	01-01-80	10-12-86	2383	DGA
100003	Chillan Mayulermo	-71.860	-36.820	244.900	5.921.278	396	06-01-11	31-12-23	4597	INIA
8130006	Diguillín	-71.643	-36.871	264.459	5.916.227	670	01-01-80	10-12-16	13256	DGA
100005	Termas de Chillán	-71.410	-36.900	285.269	5.913.508	1708	12-10-18	31-12-23	1347	INIA
100004	Navidad	-71.830	-36.910	247.872	5.911.370	314	12-11-18	31-12-23	1768	INIA
8372001	Alto Mallines	-71.243	-37.159	300.873	5.885.146	1770	04-01-02	03-12-20	4761	DGA

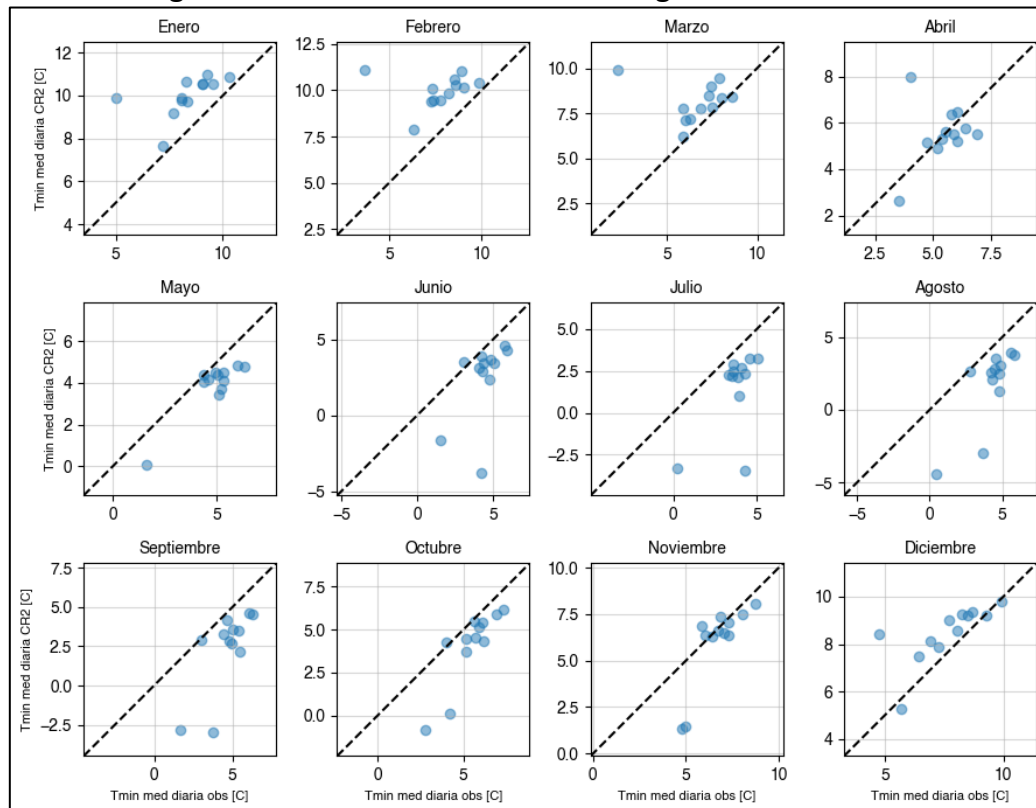
Fuente: Elaboración Propia

Figura 8-10: Ubicación De Estaciones Meteorológicas Con Registros De Temperatura Máxima



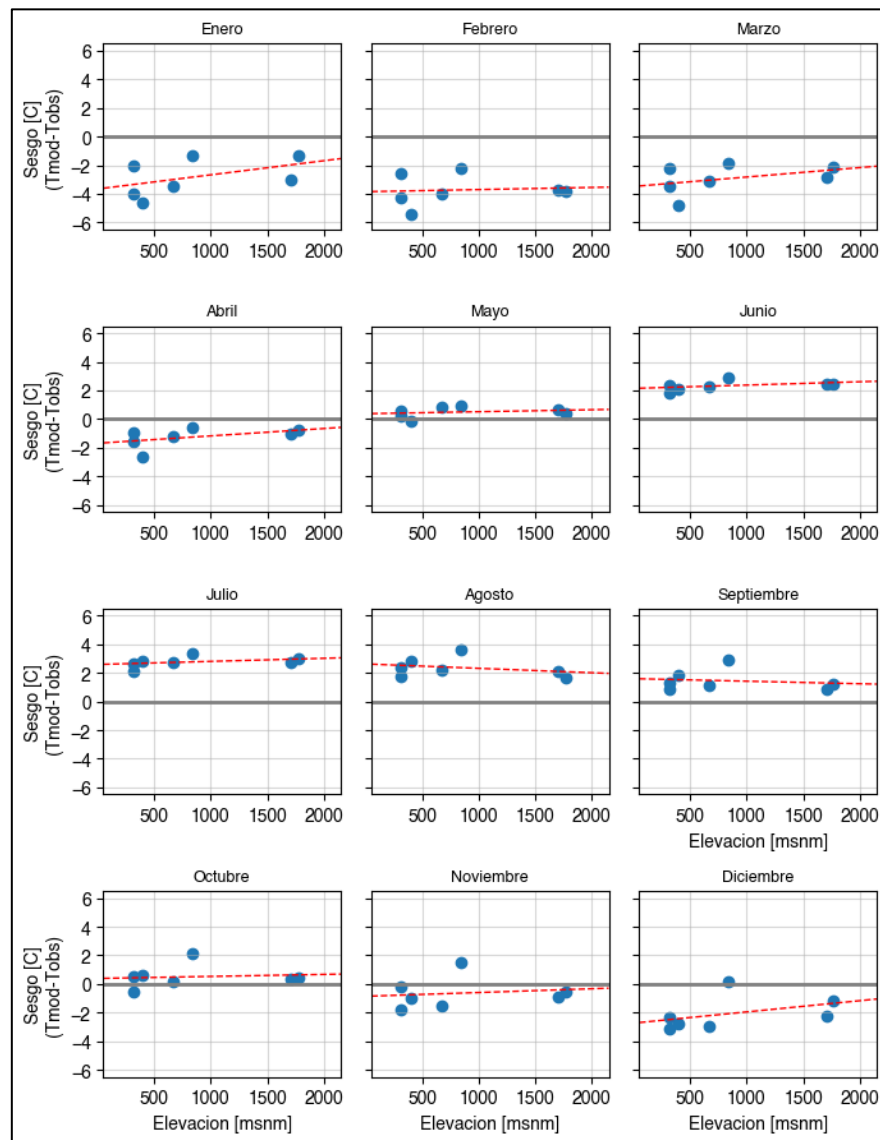
Fuente: Elaboración Propia

Figura 8-11: Comparación De Valores Medios Mensuales De Temperatura Máxima Media Diaria Entre Registros Por Las Estaciones Meteorológicas Y Estimaciones De CR2MET



Fuente: Elaboración Propia

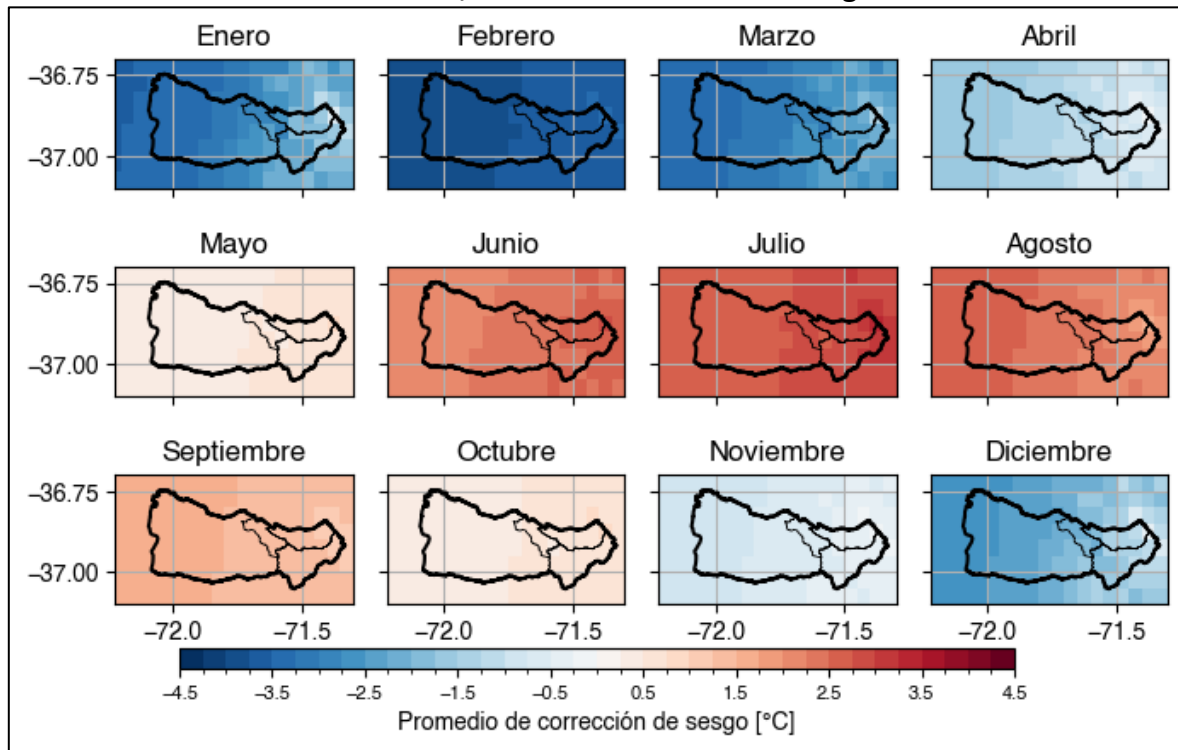
Figura 8-12: Funciones De Corrección De Sesgo De Temperatura Máxima A Nivel Mensual En Función De La Elevación



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 8-13 muestra los campos de corrección mensuales aplicados a las series de temperatura máxima de CR2MET. A pesar de que las magnitudes de los cambios pueden variar significativamente, la transición entre meses ocurre con un paso de variación suave, lo que asegura que las series estimadas no presenten cambios bruscos.

Figura 8-13: Campos De Corrección De Sesgo De Las Temperaturas Máximas Medias Mensuales, Sin Y Con Corrección De Sesgo



Fuente: Elaboración Propia

8.1.3. TEMPERATURA MÍNIMA

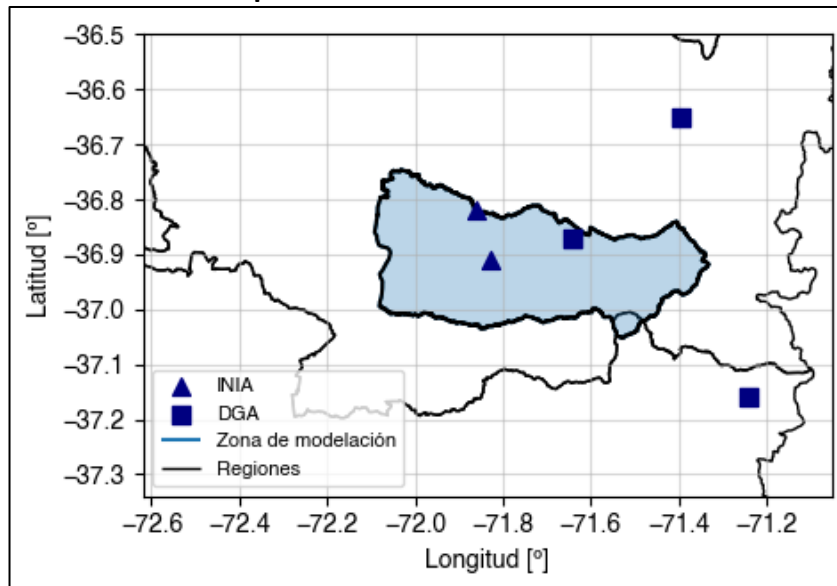
Dado que los registros de temperaturas medias son limitados en el territorio nacional, la estimación de la serie de valores de temperatura media se realizó mediante el cálculo del promedio simple de las temperaturas extremas. Esta metodología permitió evaluar la capacidad del modelo CR2MET para replicar el comportamiento térmico específico de la zona de estudio. En esta sección del informe se pretende validar y, en caso de ser necesario, corregir los valores de las temperaturas mínimas en el área de estudio. La disponibilidad de estaciones meteorológicas que registran temperaturas mínimas es menor en comparación con otras variables climáticas, lo que ha llevado a complementar las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) con datos de estaciones del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Aunque estos registros adicionales son de corta duración, se consideran valiosos debido a la información que proporcionan sobre la cuenca estudiada, al encontrarse dentro de su perímetro. Los detalles sobre las estaciones de medición se presentan en la Tabla 8-6, y su distribución espacial se ilustra en la Figura 8-14.

Tabla 8-6: Información De Las Estaciones Meteorológicas Con Registros De Temperatura Mínima Utilizadas Como Referencia

Código	Nombre	Lon	Lat	UTM E	UTM N	Elev.	Inicio registro	Fin registro	N° datos diarios	Fuente
		(°)	(°)			(msnm)				
100004	Navidad	-71.830	-36.910	247872	5911370	314	12-11-18	31-12-23	1768	INIA
8372001	Alto Mallines	-71.243	-37.159	300873	5885146	1770	04-01-02	11-12-12	2372	DGA
100003	Chillán Mayulermo	-71.860	-36.820	244900	5921278	396	06-01-11	31-12-23	4597	INIA
8105004	Caracol	-71.395	-36.651	285914	5941189	610	07-01-87	11-12-12	9195	DGA
8130006	Diguillín	-71.643	-36.871	264459	5916227	670	01-01-80	31-12-23	15581	DGA

Fuente: Elaboración Propia

Figura 8-14: Ubicación De Las Estaciones Meteorológicas Utilizadas Para Validar Los Datos De Temperaturas Mínimas De CR2MET

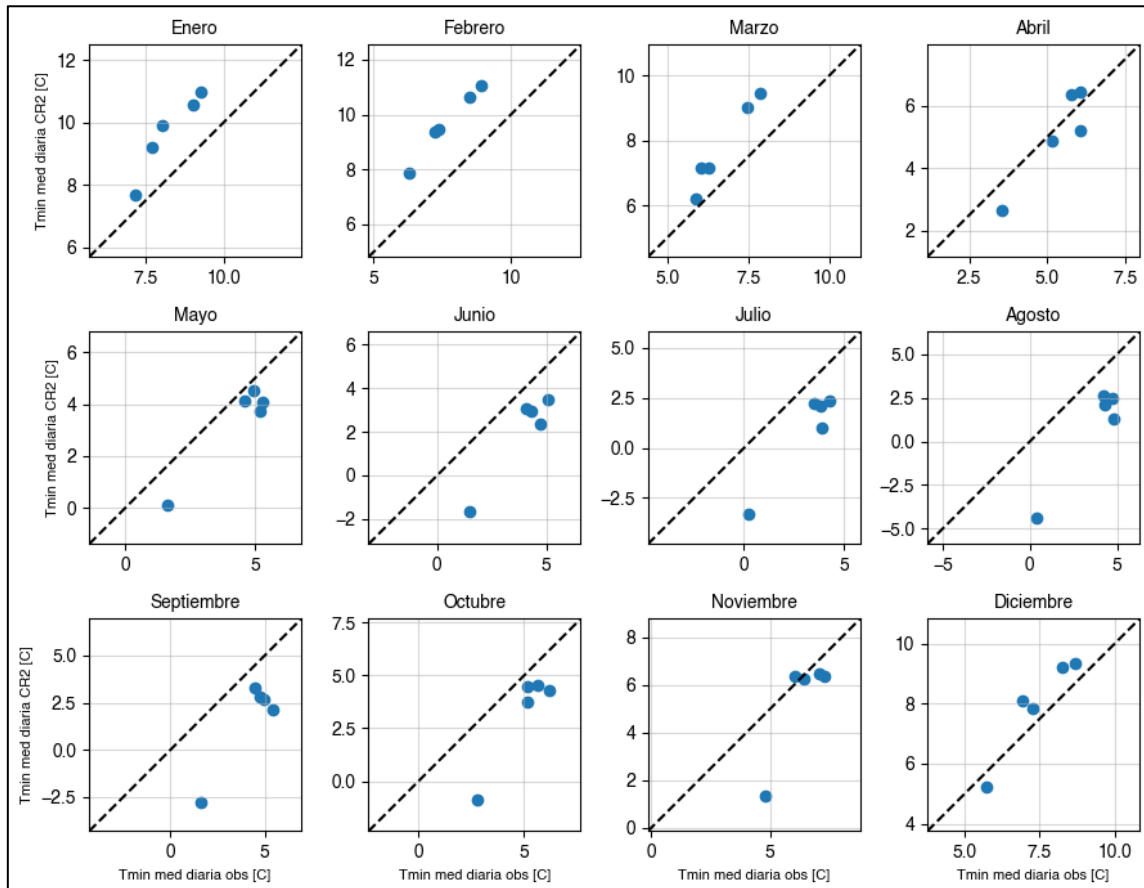


Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 8-15 se ilustran los sesgos en la temperatura mínima media mensual, evidenciando que la magnitud del sesgo varía considerablemente según el mes del año. Específicamente, se observa que durante los meses de verano el modelo tiende a sobrestimar las temperaturas máximas, mientras que en invierno, se presenta una tendencia a la subestimación. Estos patrones sugieren la necesidad de implementar una corrección de sesgo a nivel mensual para ajustar adecuadamente las estimaciones de temperatura mínima. Adicionalmente, se ha identificado una variabilidad significativa entre las estaciones meteorológicas en función del periodo del año. En los meses estivales, las estaciones muestran una mayor dispersión en los rangos de temperatura mínima, lo cual contrasta con una mayor uniformidad en los meses invernales, donde las estimaciones tienden a agruparse en rangos más estrechos. Este comportamiento

estacional debe tenerse en cuenta al desarrollar métodos de corrección para garantizar la precisión y la consistencia de las estimaciones térmicas a lo largo del año.

Figura 8-15: Comparación De Los Valores Medios Mensuales De Temperatura Mínima Diaria Media Entre Las Mediciones Registradas Por Las Estaciones Meteorológicas Y Las Estimaciones Obtenidas Del Producto CR2MET



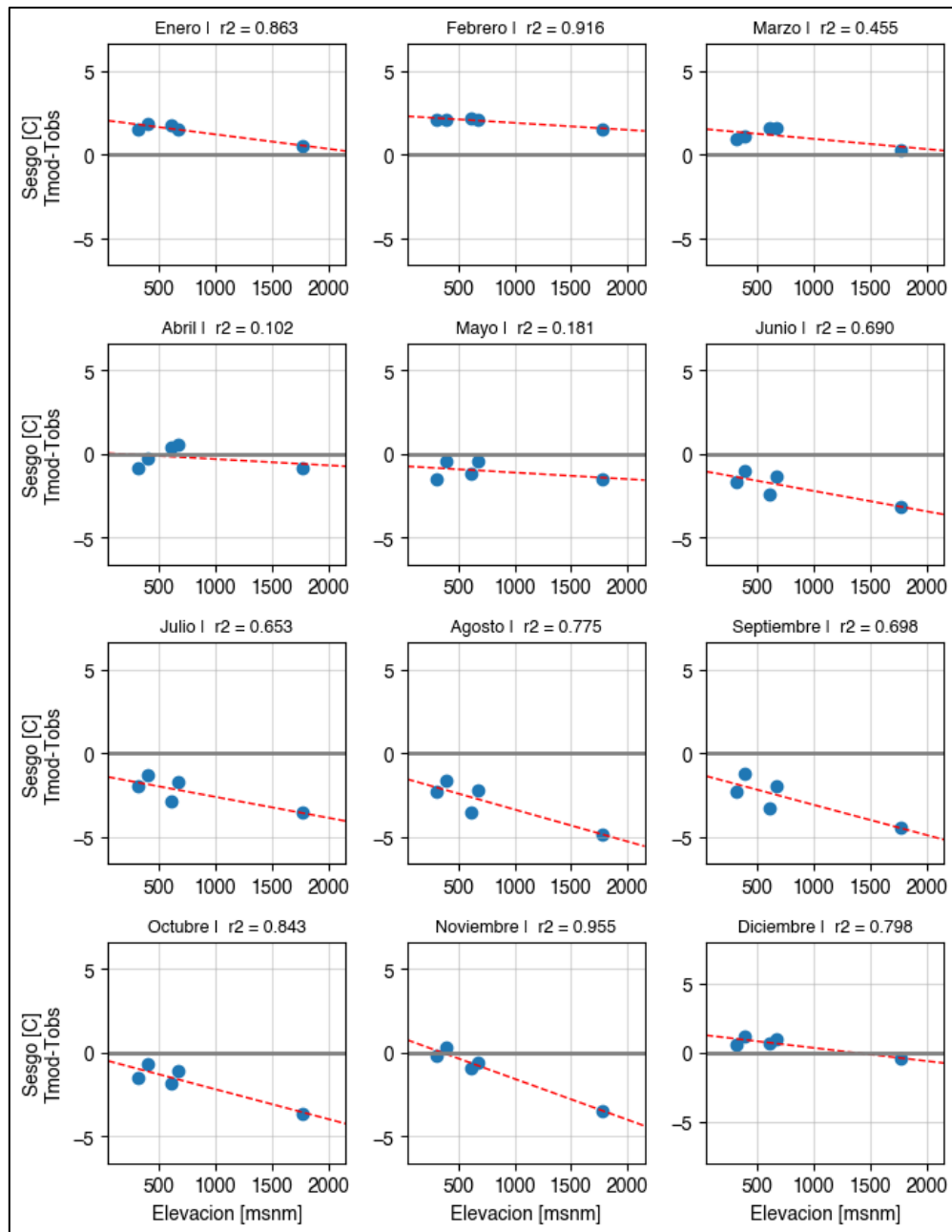
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con lo anterior, se implementaron correcciones a nivel mensual para ajustar los sesgos de temperatura mínima. Cabe destacar que la estación Alto Mallines proporcionó información valiosa sobre temperaturas a elevaciones mayores, lo que permitió evaluar la validez de las estimaciones en las regiones más altas de la cuenca. La Figura 8-16 ilustra el sesgo medio de cada estación en función de su elevación, y se ha realizado una regresión lineal para determinar la función de corrección adecuada. Esta función se aplica en la zona de estudio utilizando la topografía proporcionada por el modelo CR2MET para ajustar el sesgo identificado.

Es importante destacar que el sesgo es relativamente pequeño en algunos meses, como abril y diciembre; sin embargo, en otros meses, especialmente durante el invierno, el sesgo es más pronunciado. Este aspecto es crítico, ya que durante el periodo invernal es posible que se

acumule nieve, lo que debe ser representado con precisión en el modelo. Por lo tanto, los datos de temperatura mínima son fundamentales para estimar adecuadamente el área que experimenta acumulación de nieve y asegurar una modelación precisa de estos eventos, así como también es un insumo importante para el estudio de crecidas al condicionar el área aportante pluvial durante un evento de crecida hidrológica.

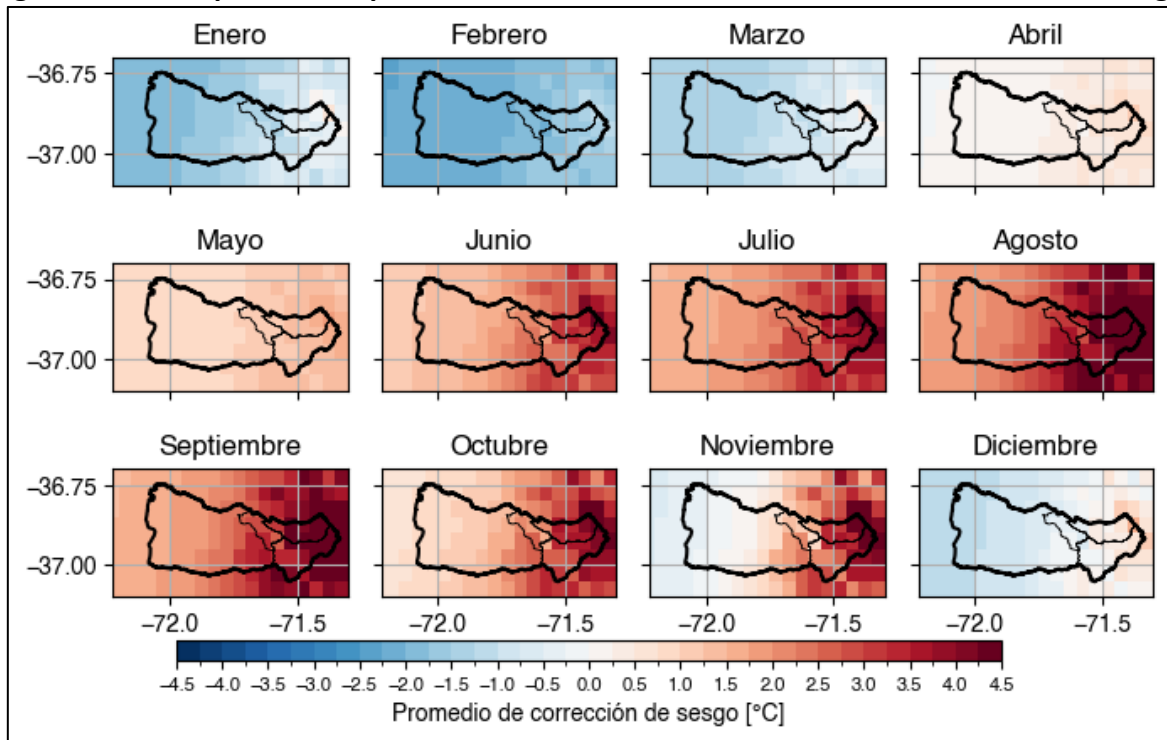
Figura 8-16: Gradiente De Corrección Identificado De Valores De Temperatura Mínima En Función De La Elevación



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 8-17 muestra los campos de corrección mensuales aplicados a las series de temperatura mínima de CR2MET. A pesar de que las magnitudes de los cambios pueden variar significativamente, la transición entre meses ocurre con un paso de variación suave, lo que asegura que las series estimadas no presenten cambios bruscos.

Figura 8-17: Campos De Temperatura Mínima Media Anual, Sin Y Con Corrección De Sesgo



Fuente: Elaboración Propia

8.1.4. GENERACIÓN DE SERIES DE FORZANTES METEOROLÓGICAS HISTÓRICAS

El producto CR2MET está disponible en una resolución espacial regular de 0.05 x 0.05°. Sin embargo, los requisitos específicos del proyecto requieren información en unidades espaciales irregulares, tales como cuencas hidrográficas, unidades de respuesta hidrológica para la modelación (URH), o bandas de elevación. Esto se aborda mediante procesos geoespaciales que estiman la fracción de cada celda de la grilla CR2MET involucrada en cada unidad de interés.

Mediante la ponderación en base al área de todas las celdas involucradas, se generó una serie representativa para cada unidad geográfica específica, de las tres variables. Es importante destacar que el número de celdas CR2MET involucradas varía según cada elemento. Por ejemplo, la cuenca completa de la zona de estudio está conformada por 81 celdas, mientras que la cuenca del río Renegado en Invernada incluye 13 celdas, y la cuenca definida por la estación Diguillín en San Lorenzo involucra 18 celdas. Estos cálculos aseguran que cada serie temporal refleje la variabilidad espacial dentro de cada unidad geográfica de interés. Así, por medio de esta

agregación, se estimó el valor representativo de cada variable a escala del elemento requerido, ya sea a nivel de cuenca, banda de elevación o URH. La ecuación representa los cálculos de este proceso, para obtener el valor asociado a un determinado tiempo.

Ecuación 8-1: Ecuación De Ponderación Espacial Para Obtener Las Series Meteorológicas De Cada Elemento De Interés

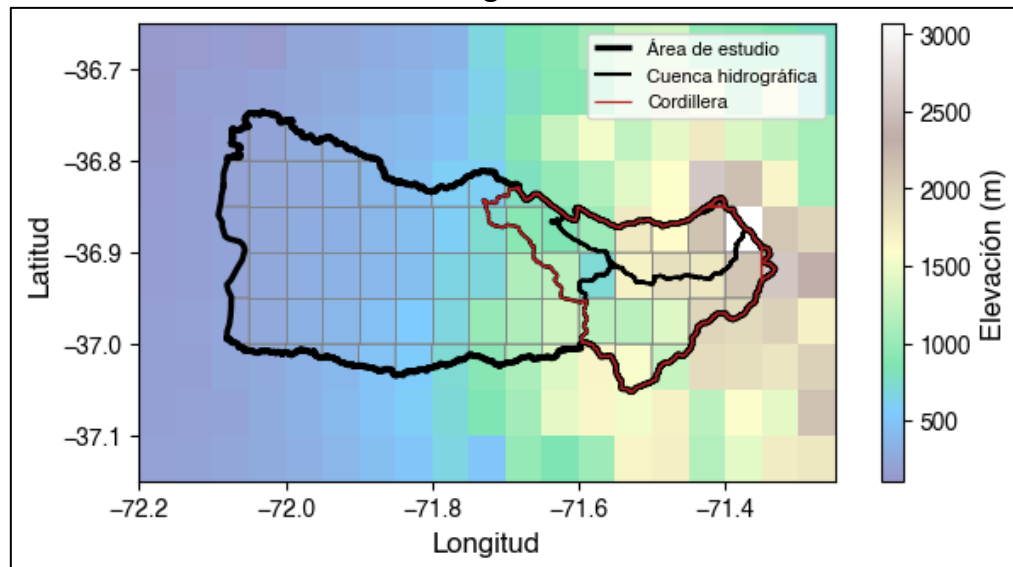
$$Var_{elemento_t} = \sum_{Celda=1}^N \frac{A_{celda} * Var_{celda_t}}{A_t}$$

Dónde:

- Var_t : Representa el valor de una variable en un instante t.
- A_{celda} : Corresponde al área de cada celda involucrada.
- Var_{celda t} : Es el valor de la variable en el instante t, según lo estimado por CR2MET.
- A_t : Suma de las áreas de todas las celdas que intersectan el elemento de interés.

Un ejemplo del cruce entre la cuenca completa y las cuencas definidas por la estaciones fluviométricas anteriores se presenta en la Figura 8-18.

Figura 8-18: Ejemplo De Ponderación De Celdas De CR2MET En Función Del Traslaje Con La Delimitación Geográfica De Una Cuenca



Fuente: Elaboración Propia

Las series de forzantes fueron generadas para tres conjuntos de elementos distintos, en función de los requerimientos del proyecto, los que se describen a continuación.

8.1.4.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE CABECERA E INTERMEDIAS

Se definieron cuencas de interés en función de las estaciones fluviométricas: río San Lorenzo en Diguillín y río Renegado en Invernada. Adicionalmente, se incorporó una cuenca intermedia que corresponde a la diferencia entre la cuenca definida por la ubicación del embalse y el área cubierta por las dos cuencas mencionadas. Además, se estableció una cuenca adicional, denominada "Cordillera", que agrupa las tres áreas anteriores y se utiliza como referencia en este capítulo para ilustrar los resultados de la generación de forzantes. La definición de estas cuencas se presenta en la Figura 8-18, destacándose en rojo la cuenca Cordillera.

8.1.4.2. UNIDADES DE MODELACIÓN

En el trabajo de modelación, se definieron unidades específicas relacionadas con la distribución de los predios agrícolas, sectores y otros elementos. Estas unidades no están asociadas a cuencas hidrográficas, sino que fueron establecidas en función de los requerimientos específicos para el desarrollo del modelo.

8.1.4.3. BANDAS DE ELEVACIÓN

Se requiere estimar forzantes específicas para diferentes bandas de elevación en los sectores de las cuencas de cabecera, donde la topografía presenta grandes variaciones. Cada banda de elevación, definida con un rango de 250 metros, permite capturar mejor las variaciones topográficas, facilitando un análisis más preciso y detallado de los forzantes en función de la altitud.

Tabla 8-7: Cantidad De Elementos Para Los Cuales Se Requieren Forzantes

Conjunto	Cantidad de elementos
Cuencas hidrográficas	3
Unidades de modelación hidrológica	54
Bandas de elevación	35

Fuente: Elaboración Propia

8.2. SELECCIÓN DE GCM REPRESENTATIVOS

8.2.1. ANÁLISIS PARA SELECCIÓN DE GCM

Actualmente existe una gran variedad de modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) que proyectan a gran escala, para los escenarios definidos por el IPCC, las variables meteorológicas requeridas para la modelación hidrológica. Dada la gran cantidad de GCM disponibles resulta conveniente realizar una selección de estos que represente el comportamiento de las variables históricas en el lugar en estudio y, a la vez, permita disminuir la dispersión de las proyecciones climáticas.

En Chile, se ha abordado este tema en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional (DGA,2017) donde se seleccionan cuatro GCM (CCSM4; CSIRO-MK3-6-0; IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM) del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados CMIP5, que poseen distinta sensibilidad climática y exhiben correlación con los fenómenos de El Niño y el modo anular del sur u oscilación Antártica, SAM.

Posteriormente Gateño et al. (2023) presenta un esquema metodológico para evaluar las simulaciones mensuales de precipitación y temperatura de GCM destinada a disminuir la dispersión en las proyecciones climáticas anuales y estacionales. Específicamente, se propone el *Past Performance Index (PPI)* evaluando cinco aspectos de la climatología histórica de los modelos: (i) medias climatológicas; (ii) variabilidad interanual; (iii) ciclo estacional; (iv) distribución probabilística mensual; y (v) los patrones espaciales de las medias climatológicas. Para dichos efectos considera 27 modelos de la Sexta Fase de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6), evalúa el PPI utilizando el producto grillado CR2MET v2.0, utilizando un miembro del conjunto (r1i1p1f1) de cada modelo, considerando enero/1979-dic/2014. Dadas las distintas resoluciones de los GCM y del producto CR2MET, considera una cuadrícula común de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ para estandarizar la resolución horizontal y facilitar su comparación en términos de rendimiento histórico. El indicador $PPI_{variable,k}$ para la variable (precipitación o temperatura) del modelo k se evalúa según la ecuación 4-2.

Ecuación 4-2: Ecuación Para El Cálculo Del Past Performance Index

$$PPI_{variable,k} = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^{N=5} S_i (1 - M_i)^2}$$

Donde M_i se refiere a la métrica i-ésima obtenida para dicho modelo, y S_i es el peso que tiene dicha métrica. Para la evaluación del PPI global se consideran ambas variables (Precipitación, Pr, y Temperatura media diaria, Tas) y su distancia al óptimo a través de la distancia euclidiana ED

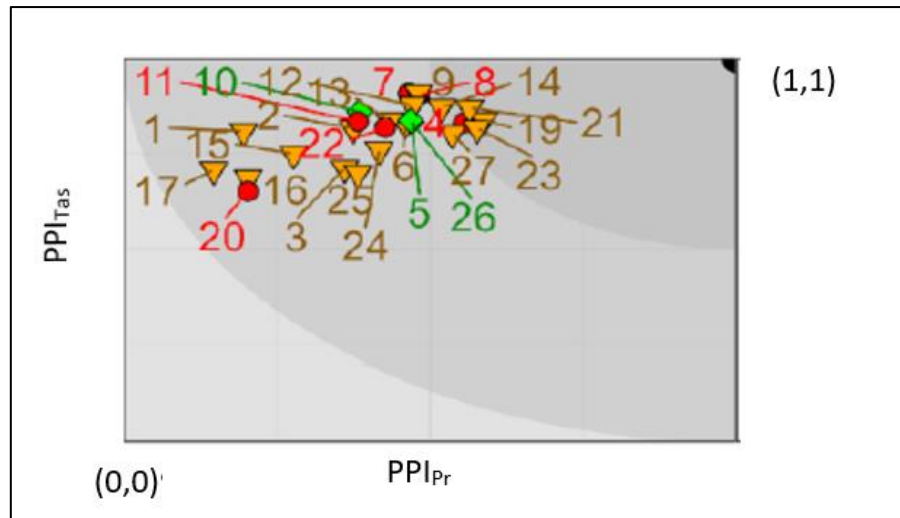
evaluada según la ecuación 4-3. $ED < 0.5$ se considera satisfactorio; $0.5 < ED < 1.0$ como moderado y $ED > 1.0$ como insatisfactorio.

Ecuación 8-3. Ecuación para el cálculo Distancia Euclidiana

$$ED = \sqrt{(1 - PPI_{Pr})^2 + (1 - PPI_{Tas})^2}$$

El país se divide en macrozonas y se evalúan las teleconexiones en cada una de éstas. Así en la macrozona sur (desde Ñuble hasta Los Lagos) se obtiene en el periodo histórico para una agregación de año hidrológico un coeficiente correlación de Pearson de 0,58 entre la precipitación y el Niño-3.4, mientras que para la temperatura media en la misma agregación temporal el coeficiente de correlación es 0,36 con el Niño1+2. Los modelos GCM bajo escenario SSP5-8.5 que cumplen para ambas variables con las teleconexiones anteriores en la macrozona sur son tres (EC-Earth3-Veg-LR (10); NorESM2-MM-gn (26) y CMCC-CM2-SR5-gn (5)), los que corresponden a los rombos verdes de la Figura 8-19, y que se clasifican en la zona de rendimiento de los GCMs moderados en la Figura 8-19 cuando no se pondera ($S_k=0$) la razón de promedios anuales y de la variabilidad interanual de las variables Pr y Tas, en el cálculo de PPI, valores que se supone son corregidos por la corrección de sesgo.

Figura 8-19: Rendimiento De Los GCM Según Teleconexión (Rombo Verde Pr y Tas; Triángulo Naranja sólo Pr; Triángulo Naranja Invertido, Solo Tas y Círculo Rojo Ninguna) y PPI En Macrozona Sur



Fuente: Adaptado de Gateño et al (2023)

En esta figura se aprecia que el grado de correspondencia entre el conjunto de modelos clasificados como "satisfactorios" en base al PPI (zona sombreada más oscura) y la capacidad de los MCGs para reproducir las respuestas a teleconexiones, no se corresponden necesariamente con los que reproducen las teleconexiones históricamente observadas.

Se destaca en la Figura 8-19 que el modelo MRI-ESM2-0-gn (23, triángulo naranja invertido) se encuentra en la zona de ED satisfactoria, mientras el modelo MPI-ESM1-2-LR-gn (22, círculo rojo) lo hace en la zona clasificada como moderada.

Por otra parte, Ortega et al. (2021) basándose en el método conocido como diagrama de Taylor concluyen que entre los mejores modelos para representar la precipitación en Chile se encuentran los GCM: E3SM-1-0, MPI-ESM1-2-LR, NorESM2-LM, MPI-ESM1-2-HR.

Finalmente, Gateño et al. (2024) agregan una clasificación de los GCM basada en la Genealogía del código del modelo para obtener un subconjunto de estructuras de modelo independientes para el 60% superior de los GCM que poseen los más altos valores de PPI. Como resultado de este análisis en la macrozona sur se sugieren los siguientes modelos: CMCC-CM2-SR5, MRI-ESM2-0, NorESM2-MM and TaiESM1 con $ED > 0.6$.

Teniendo en consideración lo expuesto en los párrafos anteriores y la disponibilidad de información para los tres escenarios climáticos considerados en este estudio (SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) se han considerado los siguientes modelos:

1. MPI-ESM1-2-LR
2. MRI-ESM2-0
3. NorESM2-MM

Se presenta a continuación una breve descripción de cada modelo:

A. MPI-ESM1-2-LR

Desarrollador: Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Alemania.

Resolución: Baja resolución (LR), con una grilla de aproximadamente 100 km.

Descripción: Es parte de la familia MPI Earth System Model y simula la interacción entre la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera. MPI-ESM1-2-LR es utilizado para evaluar cambios climáticos a largo plazo, integrando dinámicas avanzadas de los ciclos de carbono.

B. MRI-ESM2-0

Desarrollador: Meteorological Research Institute (MRI), Japón.

Resolución: Aproximadamente 60 km horizontalmente.

Descripción: Es un modelo acoplado de la atmósfera-océano que incluye componentes como la criósfera, la biosfera terrestre y oceánica. Este modelo es conocido por su alta resolución y detallada simulación de fenómenos climáticos regionales, como los monzones y tifones, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para estudios de impacto regional.

C. NorESM2-MM

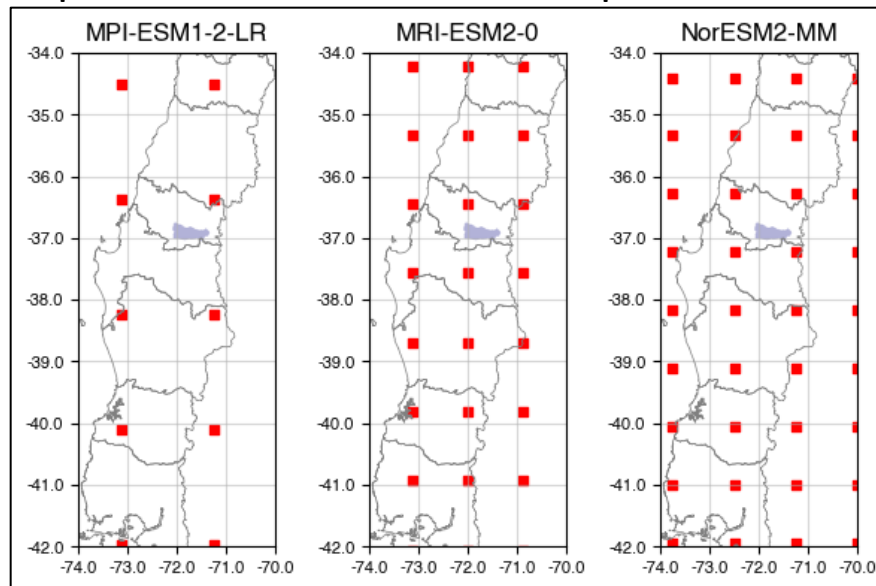
Desarrollador: Norwegian Climate Centre (NCC), Noruega.

Resolución: Media resolución (MM), con una grilla de aproximadamente 100 km.

Descripción: NorESM2-MM es la segunda versión del modelo NorESM, que incluye mejoras en la simulación del ciclo del carbono y aerosoles. Este modelo se distingue por su capacidad de representar procesos clave en el Ártico y su enfoque en la variabilidad climática en las latitudes altas. Es utilizado principalmente para estudios de cambio climático, con énfasis en las regiones polares.

Se presenta en la Figura 8-20 una representación espacial de la resolución espacial de los GCM considerados en este estudio.

Figura 8-20: Representación Gráfica De La Resolución Espacial De Los GCM Seleccionados



Fuente: Elaboración Propia

8.2.2. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO UTILIZADOS

Según las consideraciones estipuladas por el Servicio de Impacto Ambiental (SEIA), todo tipo de evaluación de cambio climático debe considerar al menos los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. El SSP2-4.5 ofrece un marco intermedio que permite evaluar el impacto de acciones de mitigación moderadas, proporcionando información valiosa sobre cómo un desarrollo equilibrado puede influir en la reducción de riesgos climáticos. Por otro lado, el SSP5-8.5 refleja un futuro en el que la dependencia de los combustibles fósiles se intensifica, permitiendo examinar los efectos de una inacción prolongada en políticas climáticas y la posibilidad de eventos extremos.

En el marco de este estudio, se ha considerado además la inclusión del escenario SSP3-7.0, lo que resulta beneficioso porque amplía la evaluación del rango de incertidumbre en los resultados. Este escenario representa un contexto de "nacionalismo regional" con un crecimiento desigual y una limitada cooperación internacional, lo que permite explorar cómo la falta de colaboración global puede exacerbar los impactos climáticos. Al integrar SSP3-7.0 con los otros escenarios, se proporciona una visión más completa de las posibles trayectorias climáticas y sus implicaciones, lo que mejora la capacidad de planificación y adaptación frente a un futuro incierto. Se presenta a continuación una breve descripción de que representa cada escenario:

A. SSP2-4.5

Representa un escenario intermedio o de "desarrollo gradual". Se asocia con un mundo en el que las tendencias sociales, económicas y tecnológicas siguen una trayectoria media, sin cambios significativos hacia la sostenibilidad ni hacia un desarrollo insostenible. En este escenario, las emisiones globales de gases de efecto invernadero alcanzan su punto máximo a mediados de siglo y luego disminuyen, lo que conduce a un forzamiento radiativo de 4.5 W/m² para el año 2100. Este escenario está alineado con un aumento de temperatura global de aproximadamente 2.7 °C para el final del siglo.

B. SSP3-7.0

Es un escenario de "nacionalismo regional" o "camino de rivalidad". En este escenario, el mundo experimenta un crecimiento económico desigual, un aumento del proteccionismo, y una cooperación internacional limitada. Esto conduce a un aumento sostenido de las emisiones de gases de efecto invernadero, resultando en un forzamiento radiativo de 7.0 W/m² para el año 2100. El escenario SSP3-7.0 se asocia con un calentamiento global significativo, estimado en alrededor de 3.6 °C para el final del siglo.

C. SSP5-8.5

Es un escenario de "desarrollo impulsado por combustibles fósiles". Se caracteriza por un rápido crecimiento económico, una alta dependencia de los combustibles fósiles y un aumento acelerado en las emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia de esto. Este escenario lleva a un forzamiento radiativo de 8.5 W/m² para el año 2100, lo que implica un calentamiento global extremo, estimado en aproximadamente 4.3 °C hacia finales del siglo. Este escenario es el de mayor aumento de emisiones, y es utilizado comúnmente para representar un futuro sin esfuerzos significativos de mitigación ni adaptación.

La utilización de estos tres escenarios en conjunto permite abarcar un gran abanico de posibles proyecciones de desarrollo, lo que significa que los escenarios evaluados abarcan un rango de posibilidades bajo distintas condiciones.

8.3. FORZANTES PROYECTADAS A NIVEL MEDIO MENSUAL

8.3.1. METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO

Se utilizó la metodología MBCn para corregir las series de precipitación y temperaturas de forma conjunta. El método MBCn propuesto por Cannon et al. en 2018 (*Multivariate Bias Correction using N-dimensional probability density functions*, por sus siglas en inglés), es un método de escalamiento estadístico diseñado para corregir sesgos en simulaciones climáticas, el cual es particularmente útil cuando se trabaja con múltiples variables interdependientes, como temperatura y precipitación.

A diferencia de los métodos tradicionales de escalamiento univariado, que corrigen cada variable de manera independiente, MBCn corrige conjuntamente múltiples variables, preservando sus dependencias. Este método utiliza transformaciones basadas en cópulas para modelar la distribución conjunta de las variables, asegurando que se mantengan las relaciones después de la corrección de sesgos. Por ejemplo, en días de lluvia, las temperaturas mínimas suelen ser más altas y las máximas más bajas que en días sin precipitación.

El escalamiento se llevó a cabo a nivel diario, aunque la evaluación se realizó a nivel mensual. Esta metodología es necesaria para generar forzantes diarias de temperaturas, que son cruciales para el análisis de crecidas y para la determinación precisa del área pluvial aportante. El enfoque diario permite representar adecuadamente las temperaturas durante eventos de precipitación, lo cual es fundamental para distinguir correctamente entre precipitaciones sólidas (nieve) y precipitaciones líquidas (lluvia). Realizar un escalamiento apropiado de la precipitación tiene implicaciones significativas, ya que condiciona el comportamiento del área que recibe cada tipo de precipitación y, por ende, impacta en la precisión del análisis de crecidas.

8.3.2. PROCESO DE ESCALAMIENTO

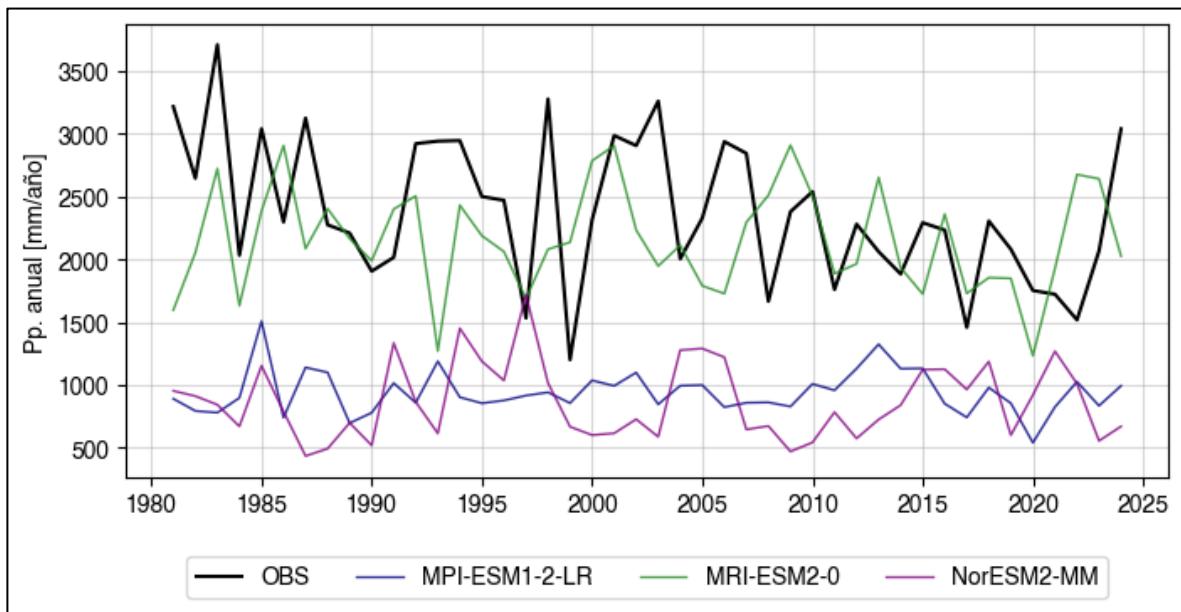
La Figura 8-21 presenta una comparación entre las precipitaciones medias anuales observadas y simuladas por los 3 GCM seleccionados para la cuenca "Cordillera". Se observa que es necesario realizar correcciones tanto en los valores medios como en la variabilidad de las precipitaciones en la zona de estudio. Este hallazgo confirma la necesidad de realizar un escalamiento de los datos para asegurar que la información proporcionada por los GCM pueda ser usada como un insumo en el proceso de modelación y evaluación del proyecto.

El método de escalamiento requiere definir un periodo histórico de referencia donde se tengan tanto observaciones como simulaciones de un GCM. El periodo seleccionado para representar

esto corresponde a 1985-2014. Este intervalo se definió en función de que los GCM consideran hasta 2014 como el período histórico, y desde ese año en adelante las simulaciones están basadas en los distintos escenarios SSP. Habiendo definido el periodo de referencia, el escalamiento se realiza procesando cuatro periodos de 30 años consecutivos, utilizando para esto la metodología de escalamiento presentada en el punto anterior.

Cabe destacar que el escalamiento se aplica individualmente sobre cada una de las celdas de CR2MET, lo que resulta en una base de datos del mismo formato de CR2MET, con una resolución temporal diaria y espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Para obtener la información relevante para la zona de interés, se generaron las series de las forzantes meteorológicas mediante el mismo proceso de ponderación geoespacial utilizado en la creación de las series históricas.

Figura 8-21: Series De Precipitación Media Anual Según Las Observaciones Y Lo Proyectado Por Los GCM Seleccionados En El Sector Cordillerano Durante El Periodo 1981-2024



Fuente: Elaboración Propia

Para asegurar que el escalamiento se ha realizado de manera exitosa, se deben llevar a cabo ciertas verificaciones:

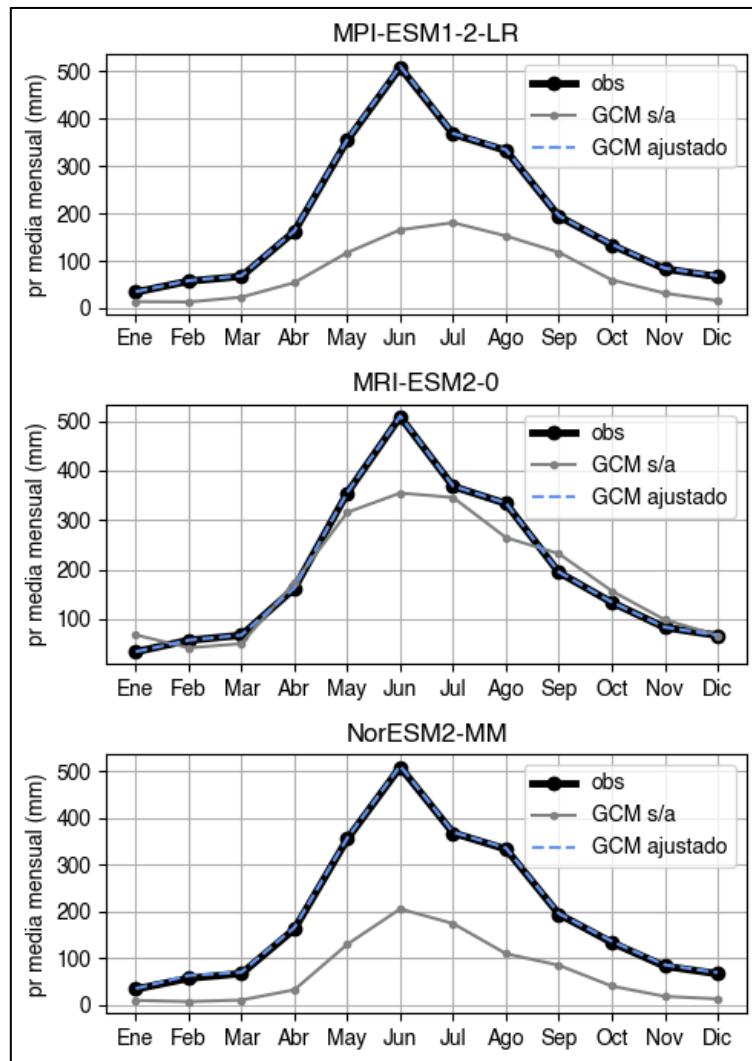
A. Coincidencia de las curvas de variación estacional:

Este aspecto se validó mediante análisis univariados, siendo crucial en el caso de la precipitación. Es fundamental que las curvas de variación estacional obtenidas tras el escalamiento coincidan con las observadas en el período de referencia.

La Figura 8-22 muestra los resultados del escalamiento de cada modelo en el periodo de referencia, representativos de la cuenca Cordillera, habiéndose ya procesado la información para representar las series resultantes para esta unidad. Se observa, como es esperable, que las CVE

ajustadas de los GCM (línea azul punteada) se superponen a la CVE de las observaciones (línea negra). Como referencia, se agrega la CVE del GCM previo al proceso de escalamiento. Si bien dicha curva no tiene los valores medios correctos, la forma de la CVE coincide con lo esperable con la zona, lo cual representa una confirmación adicional del buen comportamiento de las proyecciones de cada GCM en la zona.

Figura 8-22: Comparación De Las CVE De Precipitación Observadas, De Proyección Sin Escalar Y Con Escalamiento Para La Cuenca Cordillera



Fuente: Elaboración Propia

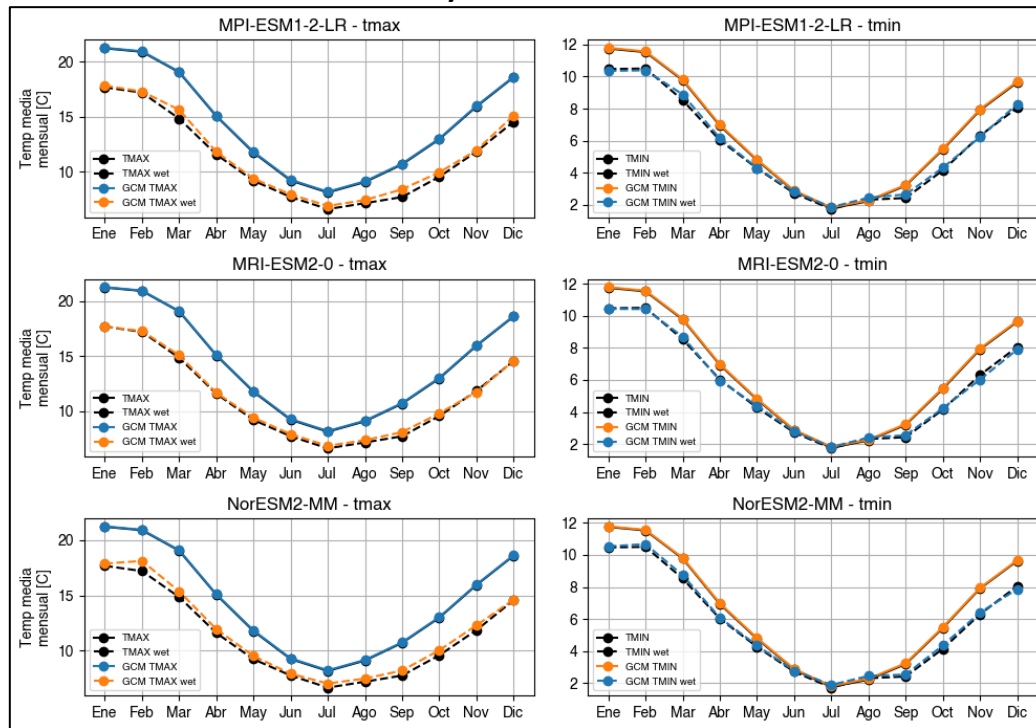
B. Respeto de la correlación entre variables

Se debe verificar que las relaciones entre las variables se mantienen consistentes. Para este propósito, se elaboraron curvas de variación estacional de las temperaturas, diferenciando si ha habido o no precipitación, para asegurar que las correlaciones observadas en los datos originales se preserven en el escalamiento.

En la Figura 8-23 se presentan los resultados del escalamiento de las temperaturas extremas, diferenciando entre temperatura máxima y mínima, y entre días con y sin precipitación. Los resultados reflejan exitosamente la representación de cada variable, con una variabilidad esperable debido a la naturaleza iterativa del método empleado. En particular, las temperaturas máximas muestran diferencias significativas entre días con y sin lluvia, lo que ha sido capturado con precisión. Las diferencias en temperatura mínima, por su parte, son más notorias fuera de los meses invernales, alineándose con la variabilidad estacional esperada.

En conclusión, el escalamiento se realizó de manera efectiva para cada modelo considerado. Los resultados son consistentes con las expectativas teóricas y confirman la capacidad del método para ajustar y representar adecuadamente las proyecciones bajo las distintas condiciones analizadas. Los resultados del escalamiento cumplen con los requisitos para ser usados como base de evaluación del efecto del cambio climático en la modelación.

Figura 8-23: Comparación De Temperaturas Entre Días Con Y Sin Precipitación, Para CR2MET Y Las Proyecciones Escaladas



Fuente: Elaboración Propia

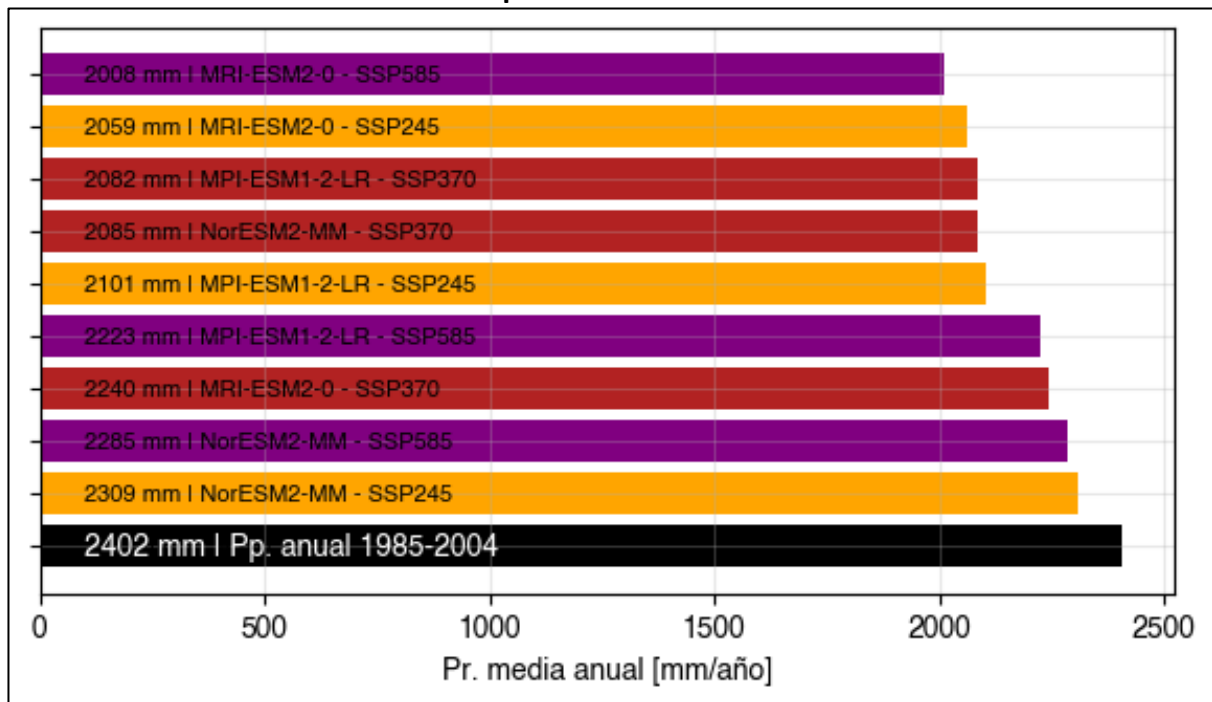
8.3.3. ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES ESCALADAS

8.3.3.1. PRECIPITACIONES

La Figura 8-24 muestra una comparación del valor de precipitación media anual en la cuenca Cordillera para el período 1985-2014, en contraste con las proyecciones para el período 2031-2060. Todos los escenarios evaluados indican una disminución en la precipitación, con reducciones que oscilan entre 100 y 400 mm. Sin embargo, no se identifica una tendencia clara entre los diferentes escenarios proyectados.

Esta falta de diferenciación se debe a la alta incertidumbre inherente en el mediano plazo, ya que los escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) presentan características similares durante este período. Esto sugiere que, aunque la tendencia general es de disminución de precipitación, las proyecciones específicas para cada escenario deben interpretarse con cautela.

Figura 8-24: Comparación De Precipitación Media Anual Según Cada Modelo Y Escenario Para El Periodo 2031-2060 En Comparación Al Valor Del Periodo Base 1985-2014

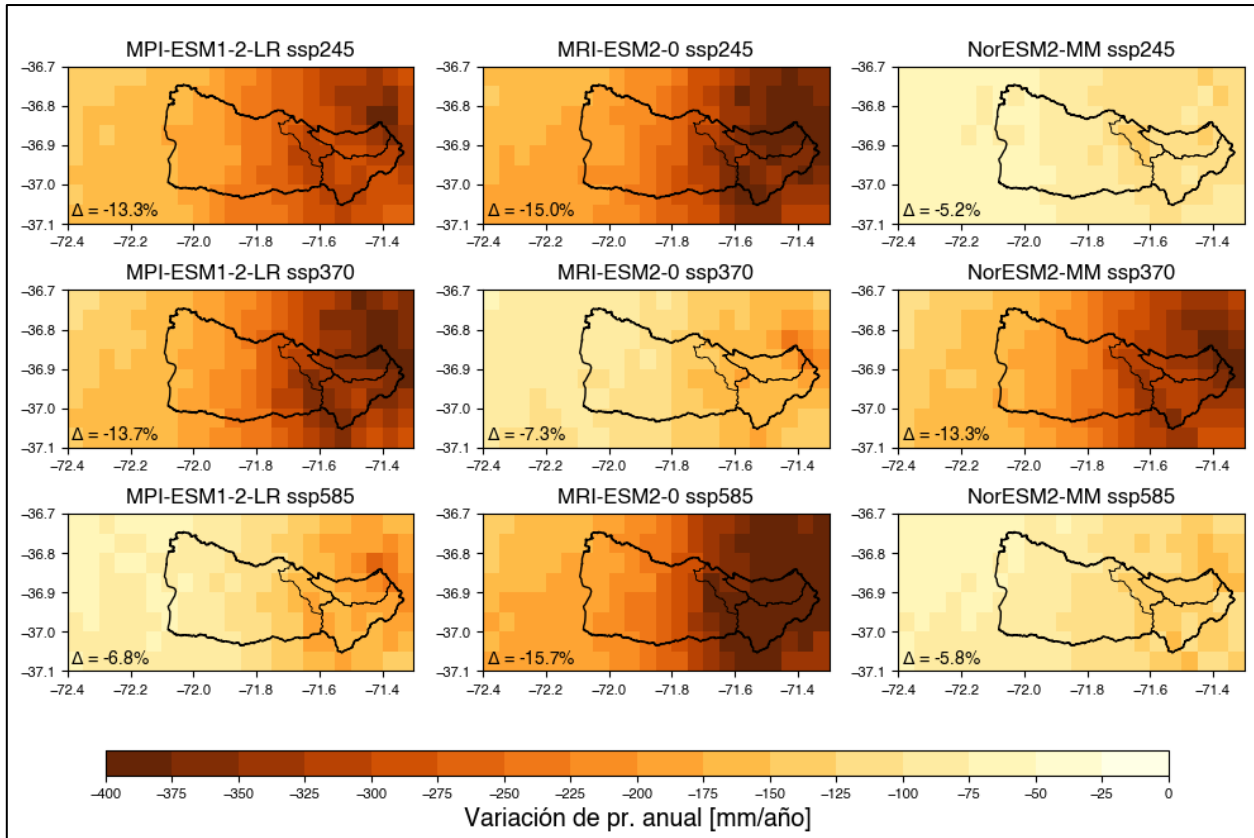


Fuente: Elaboración Propia

La Figura 8-25 ilustra las variaciones espaciales de la precipitación proyectada en la zona de estudio. Las disminuciones más significativas se concentran en la región de la cordillera, lo cual es coherente con la mayor cantidad de precipitación que esta área típicamente recibe. Esta concentración de reducciones es esperable dado el alto volumen de precipitación en la cordillera.

Sin embargo, al examinar las disminuciones porcentuales, se observa que estas son similares en toda la zona de estudio, lo cual se destaca en la esquina inferior de la figura. Esto indica que, aunque la magnitud absoluta de la disminución varía según la región, el impacto relativo de la reducción de la precipitación es uniforme en toda el área analizada.

Figura 8-25: Variación De Los Campos De Precipitación Medios Del Periodo 2031-2060 Con Respecto Al Periodo 1985-2014



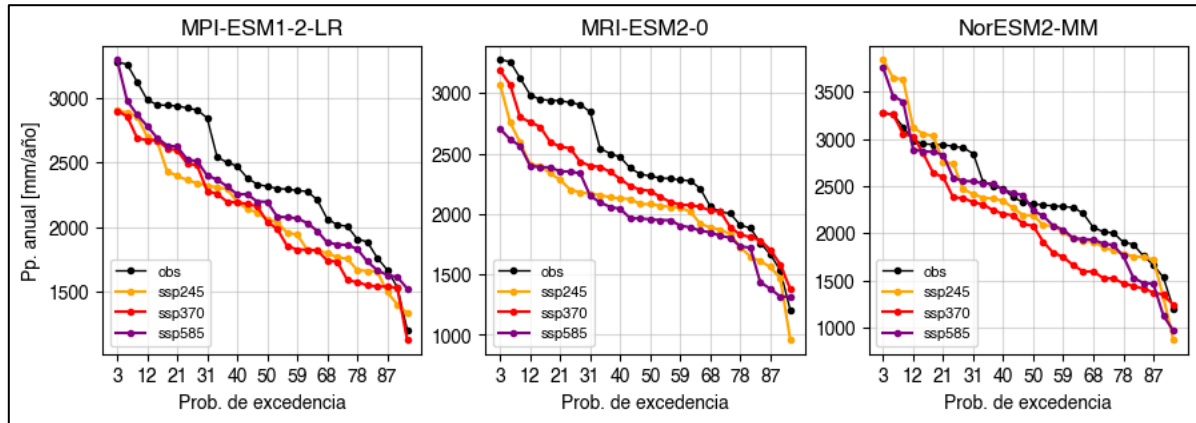
Fuente: Elaboración Propia

La Figura 8-26 proporciona un análisis detallado de la variabilidad interanual de la precipitación media anual, revelando diferencias en el comportamiento según el modelo climático. El modelo MPI-ESM1-2-LR muestra una disminución relativamente uniforme en todos los escenarios y a lo largo de todo el rango de probabilidades de excedencia. Por otro lado, el modelo MRI-ESM2-0 proyecta disminuciones más pronunciadas en los años más húmedos y menos intensas en los años más secos.

El modelo NorESM2-MM, en cambio, anticipa mayores reducciones en los años más secos, mientras que los años normales y húmedos presentan disminuciones menos marcadas. No se observa una tendencia clara entre los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 en ninguno de los

modelos evaluados, lo que subraya la incertidumbre en las proyecciones climáticas bajo estos escenarios.

Figura 8-26: Comparación De Curvas De Duración De Valores De Precipitación Media Anual De Proyecciones Con Respecto A Observaciones

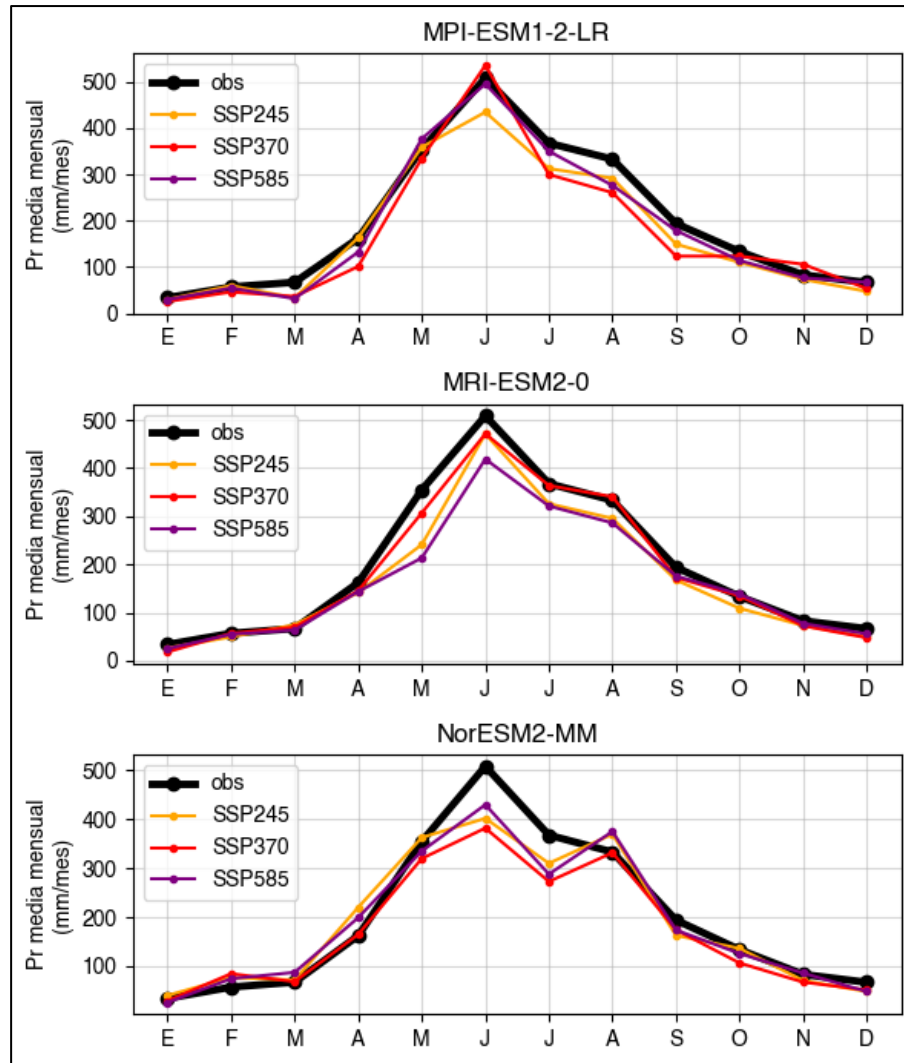


Fuente: Elaboración Propia

La Figura 8-27 ofrece información sobre los cambios a nivel estacional, por medio de las CVE de la precipitación. Las proyecciones de los modelos climáticos muestran diferencias notables. El modelo MPI-ESM1-2-LR conserva la forma general de la CVE, pero proyecta una disminución en los valores durante el período de junio a septiembre, siendo esta reducción más severa bajo el escenario SSP2-4.5. En contraste, el modelo MRI-ESM2-0 también anticipa disminuciones, pero estas se extienden a los primeros meses del año y a lo largo de toda la temporada de precipitaciones, de abril a agosto, mientras mantiene la forma de la curva.

Por su parte, el modelo NorESM2-MM proyecta cambios drásticos en la forma de la CVE, sugiriendo una alteración en la distribución de la precipitación mensual. Aunque algunos meses presentan leves aumentos, las disminuciones son más pronunciadas en junio y julio, que son críticos por ser los meses de mayor precipitación. En este caso, los tres escenarios SSP muestran resultados similares.

Figura 8-27: Comparación De Las CVE De Precipitación Proyectadas Para 2031-2060 Por Cada GCM Respecto Al Periodo Histórico 1985-2014



Fuente: Elaboración Propia

8.3.3.2. TEMPERATURAS MÁXIMAS

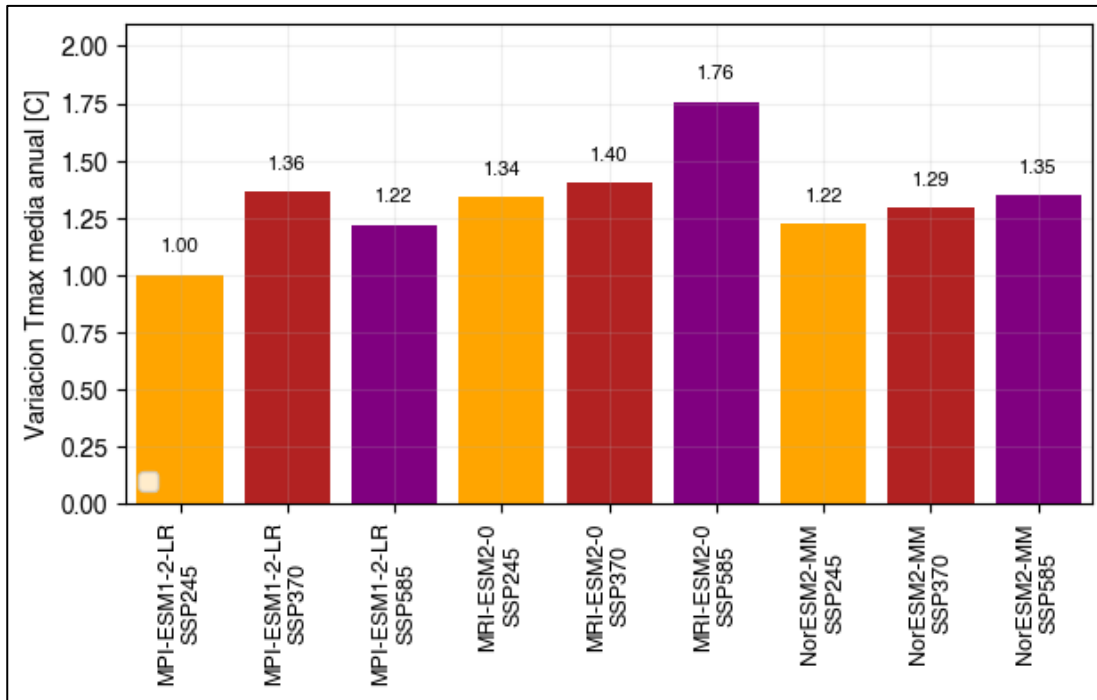
Las Figura 8-28, Figura 8-29 y Figura 8-30, muestran los cambios proyectados por los modelos escalados para la temperatura máxima.

En la Figura 8-28 se observa que dos de los tres modelos climáticos cumplen con la tendencia esperada: a mayor severidad del escenario, mayor es el aumento de la temperatura proyectada. En el caso del modelo NorESM2-MM, el rango de variación entre los escenarios es muy limitado, mostrando proyecciones relativamente consistentes entre ellos. La excepción es el modelo MPI-

ESM1-2-LR, el que proyecta un mayor aumento de temperatura en el escenario SSP3-7.0 que en el escenario SSP5-8.5.

El mayor aumento de temperatura proyectado corresponde al escenario SSP5-8.5 del modelo MRI-ESM2-0, mientras que el menor aumento se asocia con el modelo MPI-ESM1-2-LR. Esto indica que, aunque la mayoría de los modelos siguen la tendencia esperada, las proyecciones específicas pueden variar considerablemente entre los diferentes modelos y escenarios.

Figura 8-28: Variaciones Proyectadas De La Temperatura Máxima Media Anual Respecto Al Valor Del Periodo 1985-2014



Fuente: Elaboración Propia

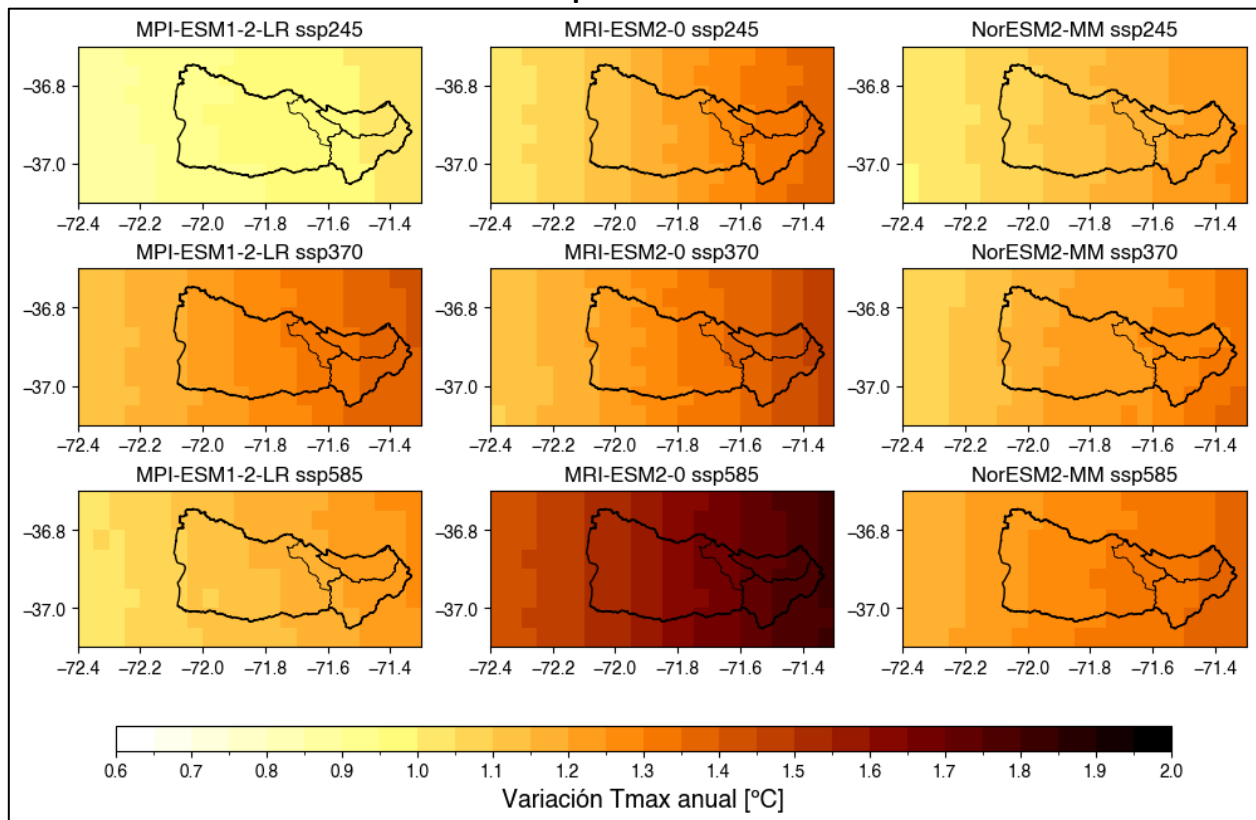
Respecto a los resultados del modelo MPI-ESM1-2-LR, que en un principio parecen contraintuitivos, existen algunas características de los GCM y del marco en que se desarrollan que podría generar esto. Aunque el escenario SSP3-7.0 está diseñado para reflejar un futuro con menores emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, un aumento de temperatura más bajo en comparación con SSP5-8.5, existen diversos factores que podrían generar lo proyectado por el modelo MPI-ESM1-2-LR. Entre estos factores está la sensibilidad del modelo, las retroalimentaciones climáticas dentro de una simulación y la variabilidad natural, los cuales pueden generar que las proyecciones del escenario SSP3-7.0 proyecten un mayor aumento de temperatura. Además de esto, los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 durante la primera mitad del periodo de estudio no difieren mucho en términos de los GEI estimados, teniendo una diferencia más marcada durante la segunda mitad del periodo de análisis. Bajo este contexto y considerando los factores anteriormente mencionados, puede darse que los aumentos

proyectados de una variable en el escenario SSP3-7.0 sean mayores que las del escenario SSP5-8.5.

La Figura 8-29 muestra los cambios proyectados por los modelos a nivel espacial. Exceptuando el modelo MPI-ESM1-2-LR en el escenario SSP2-4.5, se observa un gradiente de aumento de temperatura que sigue una dirección oeste-este, con mayores incrementos en las zonas cordilleranas. Este patrón es consistente en la mayoría de los modelos evaluados.

En las áreas más elevadas, los aumentos de temperatura proyectados alcanzan hasta 2°C, lo cual es especialmente preocupante, ya que podría incrementar la extensión de las zonas pluviales y el riesgo de crecidas.

Figura 8-29: Variación De Los Campos De Temperatura Máxima Diaria Media Del Periodo 2031-2060 Con Respecto Al Periodo 1985-2014

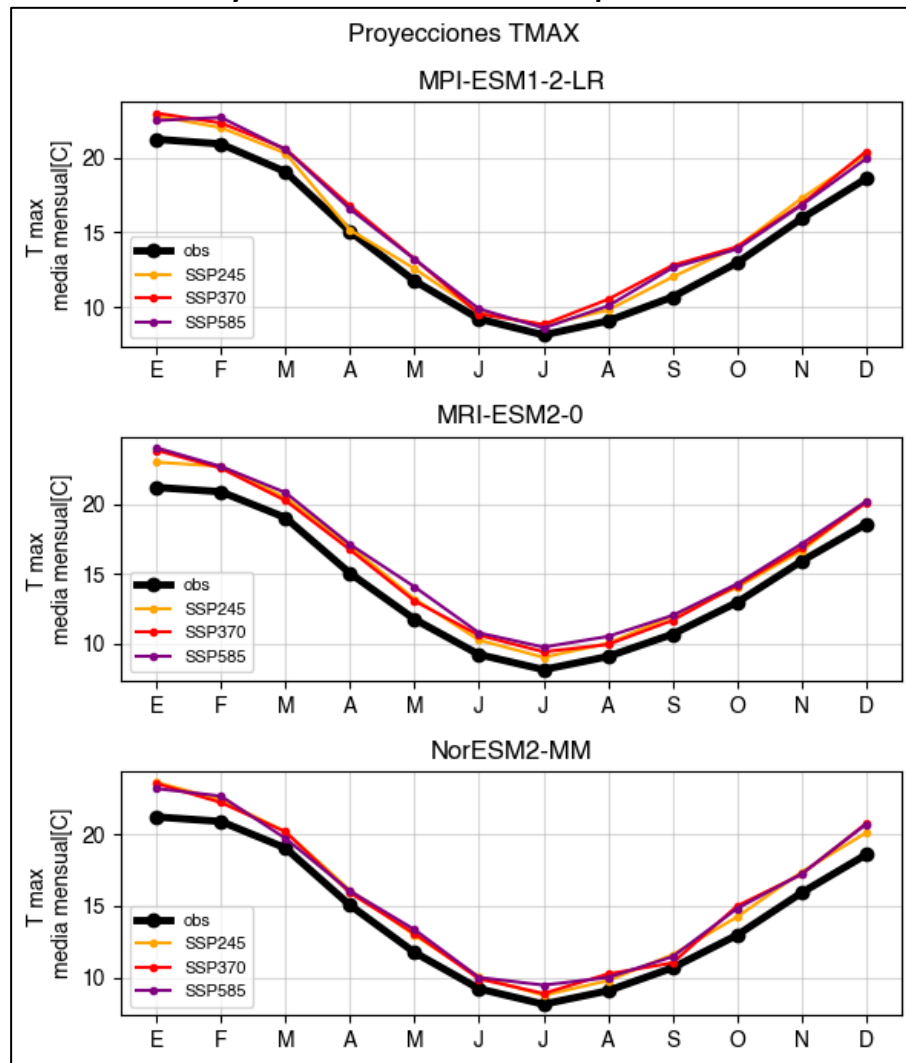


Fuente: Elaboración Propia

La Figura 8-30 presenta los cambios proyectados por los modelos a nivel estacional utilizando la Curva de Valor Esperado (CVE). En el caso del modelo MPI-ESM1-2-LR, el escenario SSP2-4.5 muestra menores aumentos en ciertos meses específicos, lo que resulta en una proyección de temperatura media anual ligeramente inferior en comparación con los otros dos escenarios, aunque no se observan grandes diferencias en los otros meses.

En cuanto al modelo MRI-ESM2-0, una situación similar se da con el escenario SSP5-8.5, que proyecta un mayor aumento de temperaturas en meses puntuales, justificando el mayor incremento en la temperatura media anual de la cuenca. Por otro lado, las proyecciones del modelo NorESM2-MM son prácticamente idénticas entre escenarios, sin cambios de temperatura significativamente distintos, lo que se refleja en las proyecciones de media anual tan similares.

Figura 8-30: Variación Proyectada De Las CVE De Temperatura Máxima Media Mensual



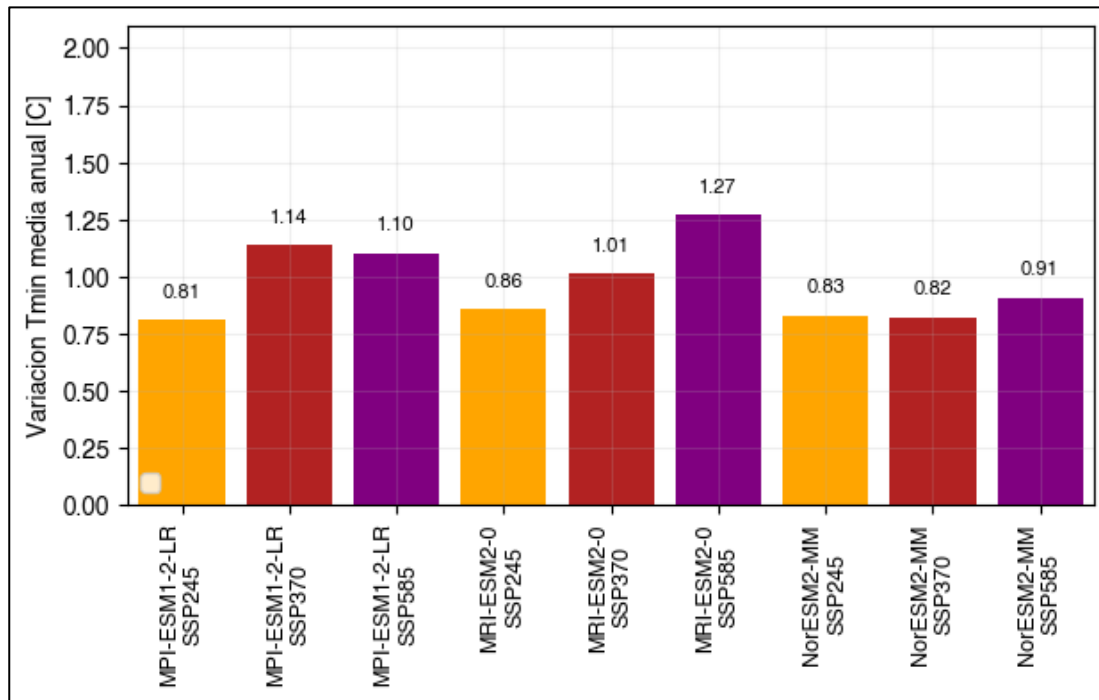
Fuente: Elaboración Propia

8.3.3.3. TEMPERATURAS MÍNIMAS

Se presentan en esta sección algunos comentarios referentes a los resultados de las proyecciones de la temperatura mínima.

En la Figura 8-31 se muestran los aumentos proyectados en la temperatura mínima media. Las magnitudes de estos aumentos son menores en comparación con las proyecciones de temperatura máxima, con un promedio de 0,4°C. El comportamiento de los modelos sigue una tendencia similar a la observada para las temperaturas máximas: los modelos MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM muestran una correlación directa entre la severidad del escenario y el aumento de temperatura, mientras que el modelo MPI-ESM1-2-LR no sigue esta tendencia. El rango de variabilidad entre los distintos escenarios es porcentualmente equivalente al estimado para las temperaturas máximas, lo que sugiere una consistencia en la forma en que los modelos responden a los diferentes escenarios climáticos, tanto para las temperaturas mínimas como máximas.

Figura 8-31: Variaciones Proyectadas De La Temperatura Mínima Media Anual Respecto Al Valor Del Periodo 1985-2014

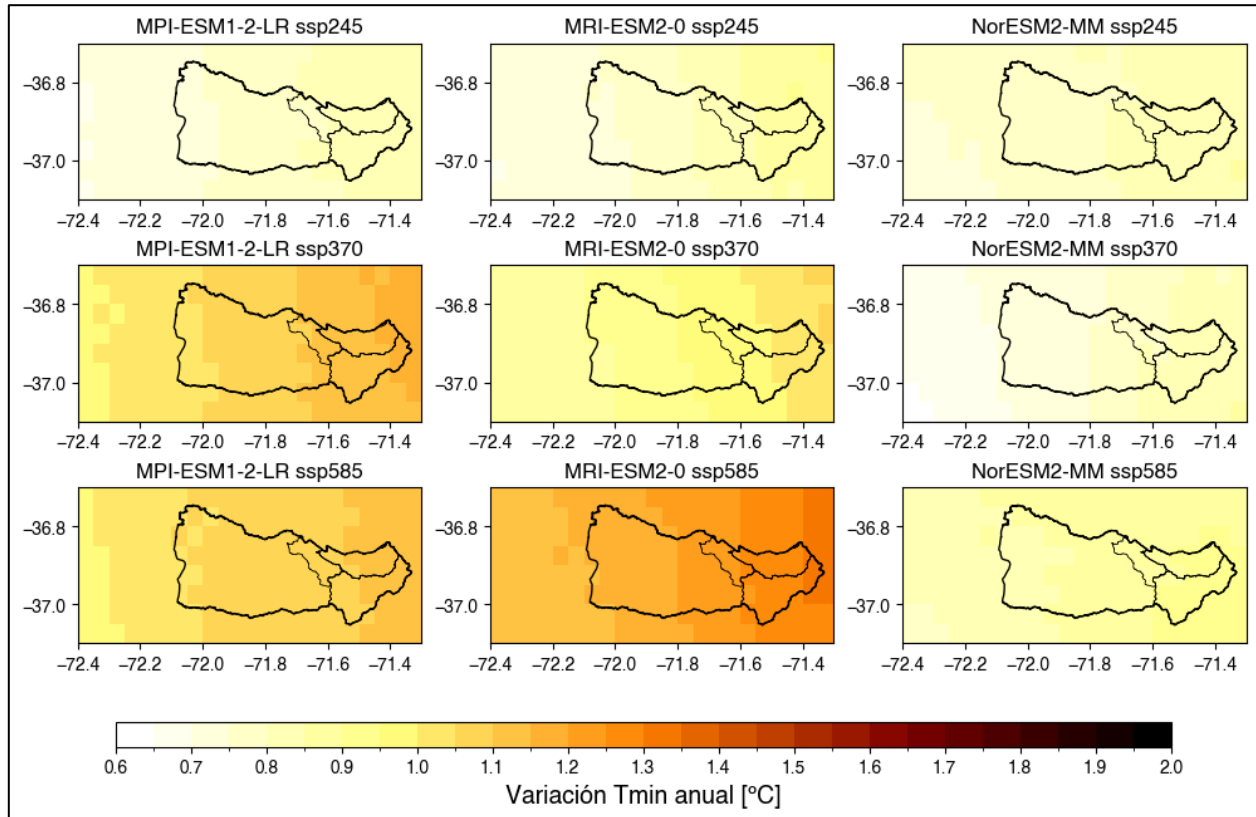


Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 8-32 se ilustra la distribución espacial de la temperatura mínima en toda la zona de estudio, donde se observa un patrón general de aumento de oeste a este. Sin embargo, en ciertos sectores, este incremento es sutil y difícil de identificar. El análisis cuantitativo indica que el

promedio de aumento de la temperatura mínima, considerando todos los modelos y escenarios evaluados, es inferior a 1 °C a lo largo de la zona de estudio.

Figura 8-32: Variación De Los Campos De Temperatura Mínima Diaria Media Del Periodo 2031-2060 Con Respecto Al Periodo 1985-2014



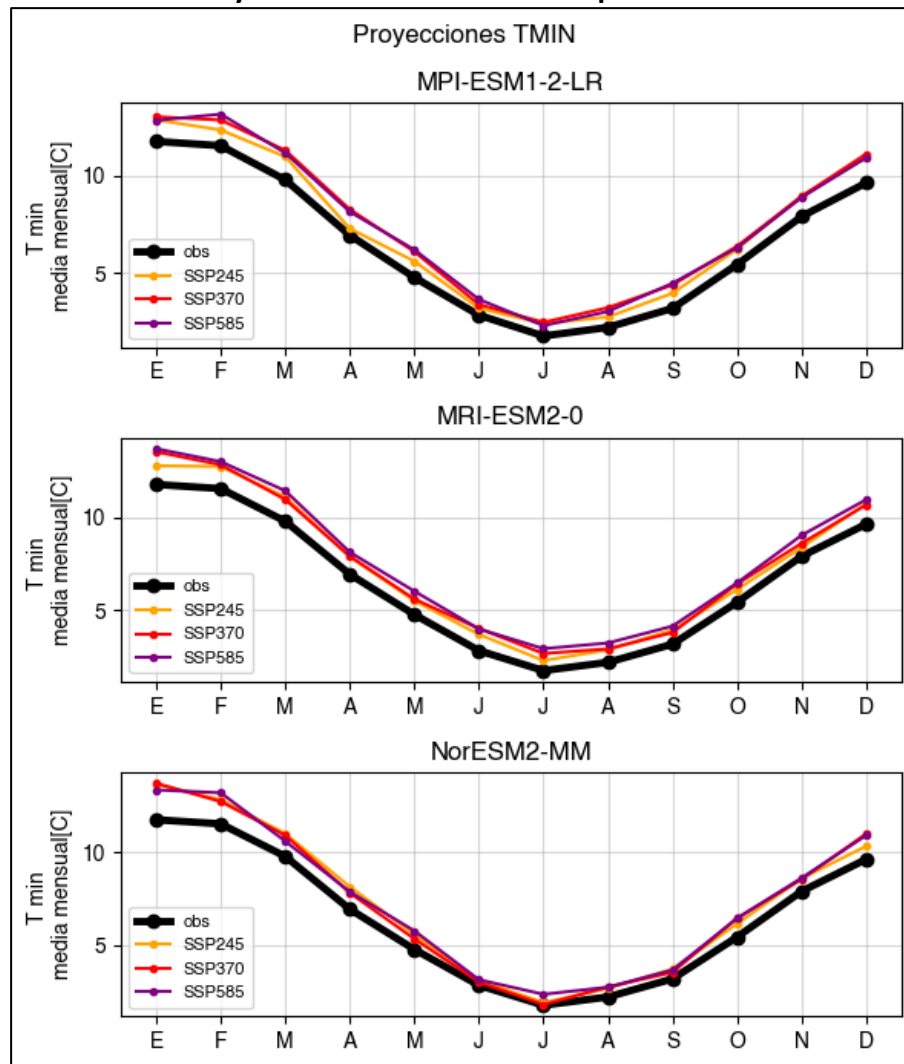
Fuente: Elaboración Propia

La Figura 8-33 presenta los cambios proyectados a nivel intraestacional para las variables analizadas. Aunque se observan similitudes en algunos casos, también se identifican diferencias en el comportamiento según el modelo utilizado. El modelo MPI-ESM1-2-LR muestra disminuciones puntuales en varios meses, lo que justifica su menor valor promedio y una alteración en la forma de la Curva de Variabilidad Estacional (CVE) respecto al período histórico. En contraste, el modelo MRI-ESM2-0, bajo el escenario SSP585, proyecta un aumento uniforme a lo largo de todos los meses, mientras que los otros dos escenarios (SSP245 y SSP370) son relativamente similares, con la principal diferencia en enero y julio, donde SSP245 presenta valores menores que SSP370.

Por otro lado, el modelo NorESM2-MM muestra la mayor diferencia en su proyección respecto a las proyecciones de temperatura máxima. Los meses de invierno se mantienen prácticamente iguales al período base, excepto en el escenario SSP585, donde se observan incrementos. Los

mayores aumentos se registran en los meses de verano, con incrementos significativos entre octubre y abril.

Figura 8-33: Variación Proyectada De Las CVE De Temperatura Mínima Media Mensual



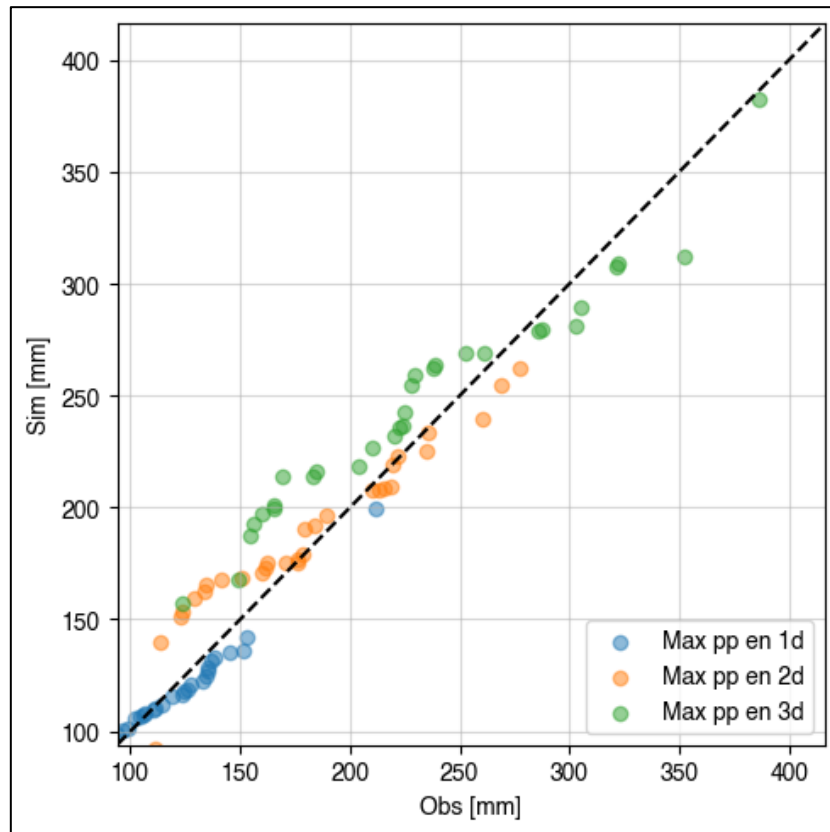
Fuente: Elaboración Propia

8.4. FORZANTES PROYECTADAS A NIVEL MEDIO DIARIO

Se generaron series de valores diarios de temperatura y precipitación como insumo para el estudio de crecidas. Aunque estas series ya fueron generadas en el paso anterior, las precipitaciones extremas no están adecuadamente representadas por el método MBCn. Este método tiende a subestimar los valores extremos debido al ajuste de distribución conjunta, lo que hace que los valores de precipitaciones extremas no cumplan con los estándares requeridos para su uso en estudios de crecidas. Sin embargo, las temperaturas no presentan este problema, ya que sus valores durante eventos de lluvia no corresponden a rangos extremos. La

subestimación de las precipitaciones extremas, en particular en los valores más altos, ilustrada en la Figura 8-34, podría llevar consecuentemente a una subestimación en los valores estimados para las crecidas, lo cual es inaceptable para los fines del estudio.

Figura 8-34: Comparación De Precipitaciones Máximas De 1, 2 Y 3 Días En El Periodo 1985-2014 Entre Estimaciones De CR2MET Y Los Datos De Proyecciones Climáticas Escaladas En La Cuenca Cordillera



Fuente: Elaboración Propia

En respuesta a la debilidad identificada en el método MBCn para representar adecuadamente las precipitaciones extremas, se opta por utilizar el método Quantile Delta Mapping (QDM) (Cannon et al., 2016). El QDM es un enfoque de corrección de sesgo que ajusta la distribución de una variable climática proyectada, preservando los cambios proyectados en los cuantiles de la distribución original. Este método consiste en aplicar una transformación a los cuantiles de las series de datos proyectadas, de manera que se mantengan las diferencias entre el clima futuro y el clima de referencia, mientras se corrigen las discrepancias en los valores extremos. Al preservar las relaciones cuantílicas entre los periodos histórico y proyectado, el QDM ofrece una representación más precisa de los eventos extremos, lo que lo convierte en una opción más adecuada para estudios de eventos extremos.

Este tipo de escalamiento ha demostrado ser eficaz en la corrección de datos climáticos, tal como se documenta en Xavier et al. (2022). Su aplicación en el presente análisis se centra en la corrección específica de las series de valores de precipitaciones máximas anuales de 1, 2 y 3 días. El método se implementó utilizando conjuntos de datos de 30 años, los cuales se agruparon en las mismas ventanas temporales empleadas para el escalamiento con el método MBCn. Esta limitación a las precipitaciones extremas garantiza que el ajuste sea preciso y específico para los eventos de mayor relevancia hidrológica, optimizando la fiabilidad de los resultados en contextos de análisis de riesgo de crecidas y otros fenómenos asociados a precipitaciones extremas.

Además, al igual que con MBCn, la metodología se aplicó a cada celda de CR2MET de forma independiente, procesando los datos para generar series para cada elemento de interés.

Al aplicar esta metodología, se obtuvo que el conjunto del periodo histórico se ajusta, como es esperable por definición del método, de forma totalmente coincidente, lo que valida el método. Habiéndose validado este punto, se obtienen las proyecciones de eventos de precipitación máxima en el periodo 2031-2060. Los resultados de este escalamiento se presentan en la Figura 8-35 donde se comparan los conjuntos de valores de las proyecciones con respecto a los valores históricos en un gráfico de dispersión.

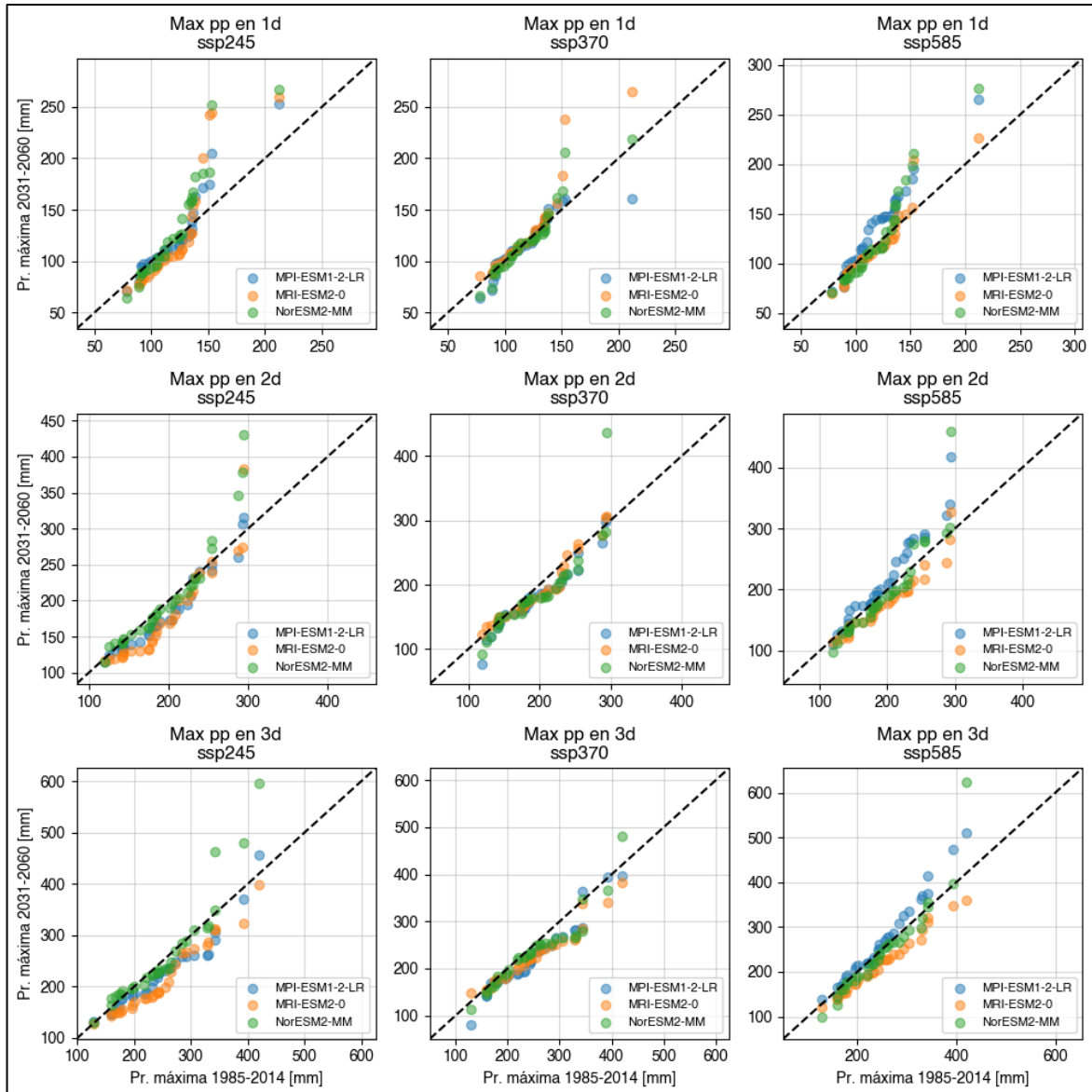
Esta figura proporciona una visión detallada sobre el comportamiento proyectado de las precipitaciones máximas esperadas. Para los eventos de 1 día de duración, se observa que, en general, los eventos extremos más intensos aumentan en magnitud, con solo una excepción. A medida que los escenarios se vuelven más severos, la intensidad de los valores extremos tiende a aumentar en un mayor rango de años. El modelo MPI-ESM1-2-LR es el que presenta las mayores proyecciones de incremento, mientras que el MRI-ESM2-0 incluso proyecta disminuciones en los valores para el escenario menos severo.

En cuanto a los eventos de 2 días de duración, dos de los modelos proyectan disminuciones generalizadas en la intensidad de los eventos en casi todo el rango de probabilidades de ocurrencia. Nuevamente, el modelo MRI-ESM2-0 muestra las mayores disminuciones, pero en este caso, el modelo NorESM2-MM también proyecta disminuciones. Solo el modelo MPI-ESM1-2-LR, en el escenario SSP5-8.5, indica aumentos en la intensidad de los eventos extremos esperados en un amplio rango de valores. En los otros escenarios, este mismo modelo también proyecta disminuciones generalizadas para la mayoría de los valores proyectados. Solo en casos esporádicos y en los eventos más intensos se proyectan algunos valores que superan los registros históricos, generalmente asociados a los modelos MPI-ESM1-2-LR y NorESM2-MM.

Para los eventos de 3 días de duración, se repiten las tendencias observadas en los eventos de 2 días, acentuándose aún más las diferencias entre escenarios. En el caso de los eventos en el escenario SSP2-4.5, se proyectan disminuciones en casi todo el rango de valores, salvo en los

eventos de mayor intensidad, donde solo los modelos MPI-ESM1-2-LR y NorESM2-MM proyectan aumentos. El escenario SSP3-7.0 presenta un comportamiento similar. Solo en el escenario SSP5-8.5, el modelo MPI-ESM1-2-LR muestra incrementos significativos en la magnitud de los eventos extremos esperados para esta duración.

Figura 8-35: Comparación Entre Curvas De Duración De Eventos De Precipitaciones Extremas De 1d, 2d Y 3d



Fuente: Elaboración Propia

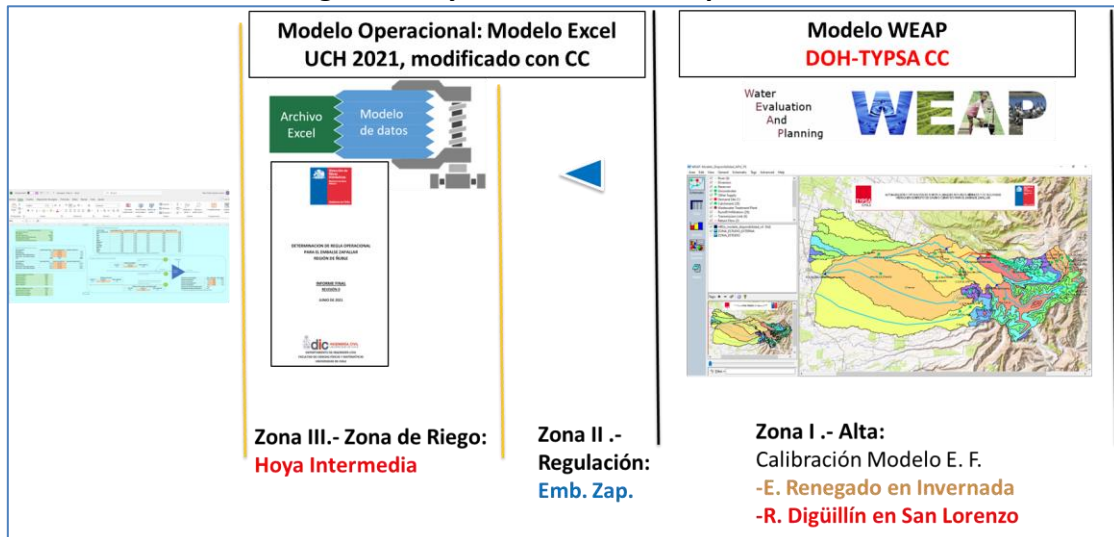
9. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO EN PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO

9.1. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO WEAP

El modelo hidrológico descrito en el presente ítem corresponde al modelo de simulación encargado de estimar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Diguillín.

En la Figura 9-1 se muestra el diagrama de flujo implementado en el presente estudio para llevar a cabo la estimación de la disponibilidad y la cobertura de las demandas de riego. El presente capítulo se centra en la estimación de la disponibilidad de las cuencas afluentes al Embalse Zapallar (Zona I Alta) y la hoya aportante intermedia de la zona de estudio (Zona III, Hoya Intermedia).

Figura 9-1: Diagrama De Flujo desde Zona I, Zona Alto Diguillín, Zona II, Embalse De Regulación, y Zona 3, Modelo Operacional



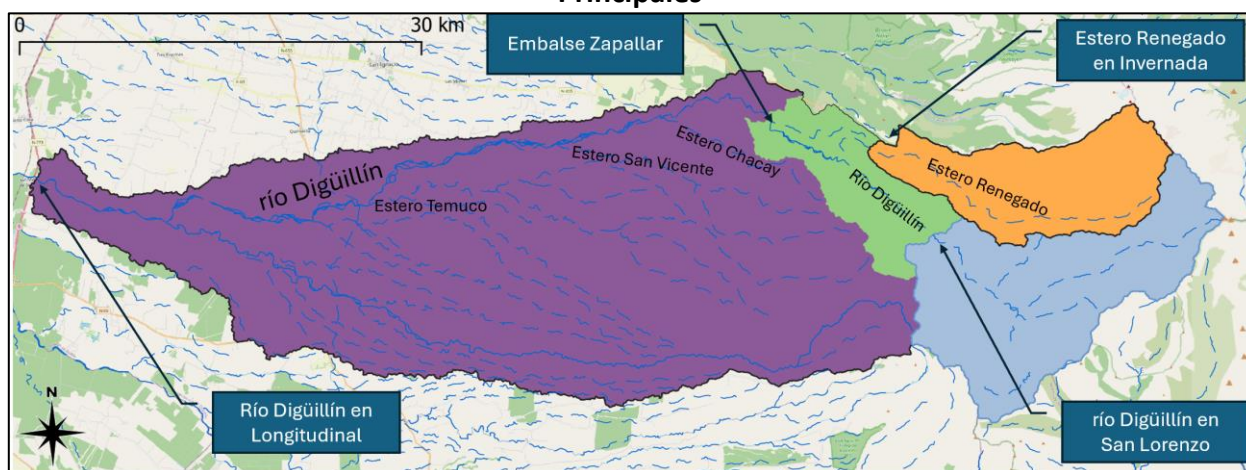
Fuente: Elaboración Propia

En el área de estudio se pueden describir tres sub-cuencas principales que quedan definidas por los siguientes puntos:

- Estación Fluviométrica Estero Renegado en Invernada
- Estación Fluviométrica Río Diguillín en San Lorenzo
- Ubicación de Embalse Zapallar

Además, aguas abajo se ubica la estación río Diguillín en Longitudinal que controla el cierre de la cuenca. Dicha cuenca se encuentra en régimen no natural por lo que se recopilaron las extracciones históricas realizadas por la Junta de Vigilancia de río Diguillín y sus afluentes. En el Anexo 4 "Registros de Extracciones Históricas JVRD" se adjuntan los registros históricos recopilados en la presente consultoría.

Figura 9-2: Principales Cuencas De Interés En La Zona De Estudio Y Sus Respetivos Cauces Principales



Fuente: Elaboración Propia

La estimación de los parámetros geomorfológicos de las cuencas aportantes se obtuvieron a partir de la información del Modelo de Elevación Digital (DEM) satelital denominado ASTER-GDEM (generado por el instrumento radiométrico ASTER de Japón, a bordo del satélite TERRA de la NASA, se puede descargar libremente del sitio <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>). En la Tabla 9-1 se muestran los parámetros de las principales cuencas.

Tabla 9-1: Parámetros Geomorfológicos De Principales Cuencas De Estudio

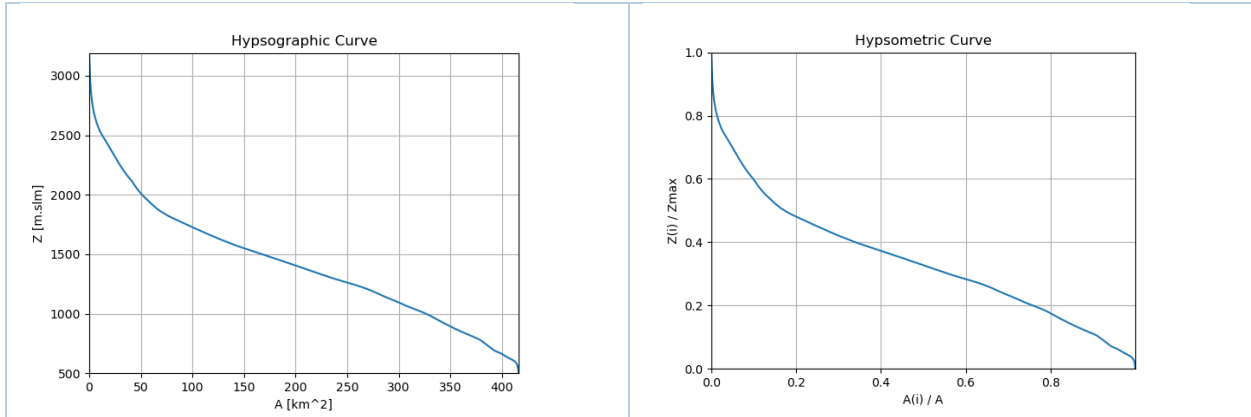
Parámetros	ZE1 Embalse Zapallar	ZE2 Diguillín en San Lorenzo	ZE3 Renegado en Invernada	ZE16 Diguillín en Longitudinal
Centroide (Este UTM)	278468,8	279168,8	277668,8	249818,8
Centroide (Norte UTM)	5911006,3	5906581,3	5914568,8	5909631,3
Área [km ²]	416,2	205,1	128,7	1369,0
Perímetro [km]	140,1	99,5	74,7	303,3
Altura máxima [m s.n.m.]	3191,0	3191,0	3186,0	3191,0
Altura mínima [m s.n.m.]	500,0	711,0	826,0	87,0
Desnivel máximo [m]	2691,0	2480,0	2360,0	3104,0
Elevación media	1418,8	1513,4	1620,0	768,7
Pendiente media	21,0	24,5	18,0	11,4
Longitud de vector dirección [km]	21,9	9,3	11,9	46,4
Orientación predominante [grados desde el norte, sentido contrario del reloj]	0,4	0,4	0,2	0,1
Coefficiente de compacidad	6,1	6,2	5,8	7,3
Radio circular	0,3	0,3	0,3	0,2
Diámetro topológico	282,0	152,0	322,0	1250,0
Relación de perímetro circular	0,5	0,5	2,3	3,5
Factor de forma	8,4	6,8	23,2	113,5
Tiempo de concentración (Giandotti, 1934) [hr]	3,8	2,6	1,4	3,7
Longitud del cauce principal [km]	49,8	30,3	5,5	12,1
Pendiente media del cauce principal [percent]	4,8	6,3	5,2	2,6

Parámetros	ZE1 Embalse Zapallar	ZE2 Diguillín en San Lorenzo	ZE3 Renegado en Invernada	ZE16 Diguillín en Longitudinal
Largo de cauce en ladera [m]	2893,5	2385,3	1898,2	9510,8
Numero de cauces de orden 1 (considerando el orden de Strahler)	811,0	243,0	420,0	3001,0
Orden máximo (Strahler)	5,0	5,0	4,0	6,0
Numero de cauces	1041,0	326,0	526,0	3920,0
Longitud total de cauces [km]	459,1	187,5	172,1	1794,7
frecuencia de cauces con primer orden	1,9	1,2	3,3	2,2
Densidad de drenaje [km/km ²]	1,1	0,9	1,3	1,3
Radio de bifurcación (Horton)	5,5	4,1	7,6	5,1
Relación de largo (Horton)	3,4	2,4	5,1	2,8
Relación de área (Horton)	6,3	4,7	9,1	5,7
Relación de pendiente (Horton)	1,3	1,4	1,3	1,3

Fuente: Elaboración Propia; para mayor información de parámetros se puede consultar el siguiente enlace grasswiki.osgeo.org/wiki/R.basin

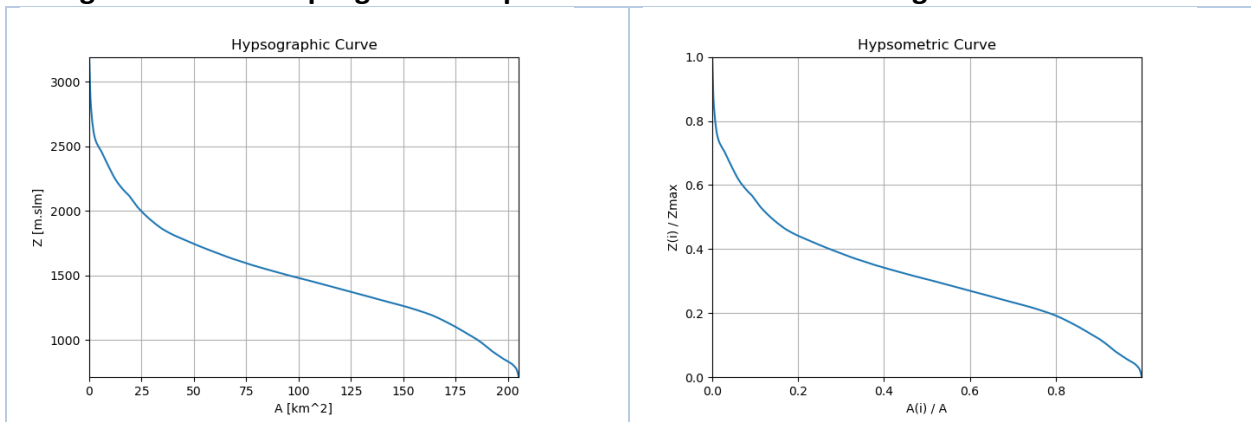
En las Figura 9-3, Figura 9-4 y Figura 9-5 se muestran las curvas hipsométricas e hipsográficas de la cuenca aportante al Embalse Zapallar, río Diguillín en San Lorenzo y estero Renegado en Invernada.

Figura 9-3: Curva Hipsográfica E Hipsométrica De La Cuenca Aportante Al Embalse Zapallar



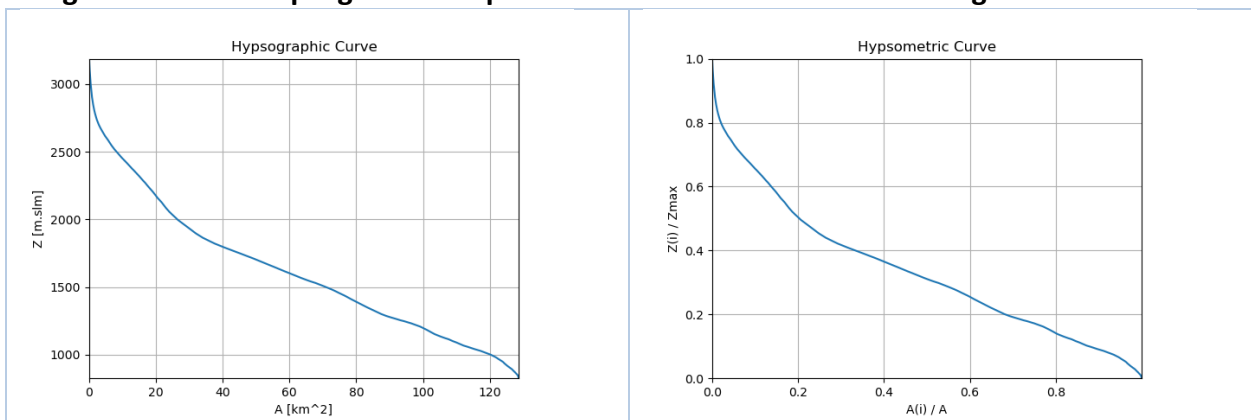
Fuente: Elaboración Propia

Figura 9-4 Curva Hipsográfica e Hipsométrica de la Cuenca Río Diguillín en San Lorenzo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 9-5 Curva Hipsográfica e Hipsométrica de la cuenca Estero Renegado en Invernada

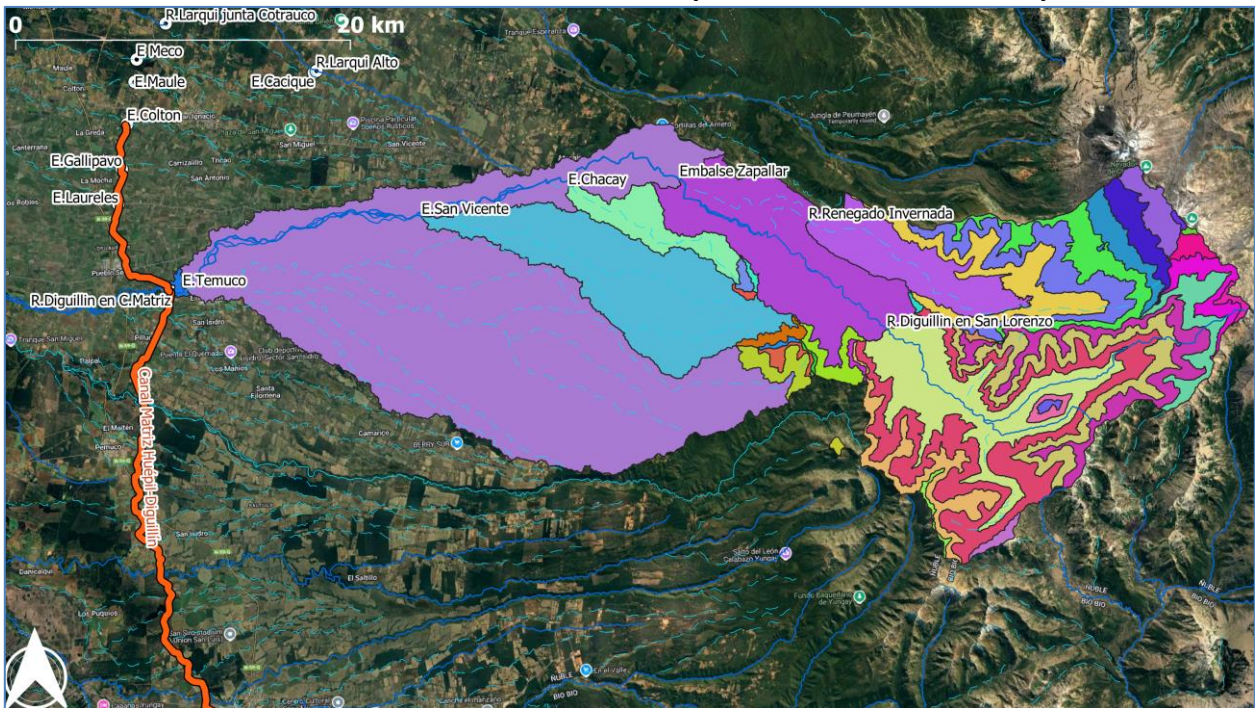


Fuente: Elaboración Propia

9.1.1. UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICAS DE MODELO SEMI-DISTRIBUIDO IMPLEMENTADO PARA EL PROYECTO EMBALSE ZAPALLAR

Los elementos del modelo hidrológico implementado corresponden a Unidades de Respuesta Hidrológica que utiliza el concepto de subcuencas para la zona de valle y bandas de elevación para la zona mayor a 1500 msnm. En la Figura 9-6 se muestran las zonas modeladas en las que se consideraron los afluentes al Embalse Zapallar y los afluentes que aportan en forma intermedia: Estero Chacay, San Vicente y Temuco.

Figura 9-6: Unidades De Respuesta Hidrológica: Subcuencas Y Bandas De Elevación De Modelo Semi-Distribuido Para Estimar Disponibilidad En Embalse Zapallar



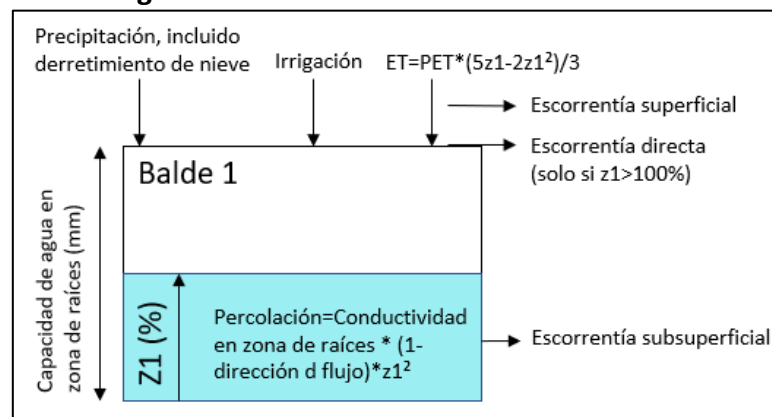
Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se segmentó el área de estudio se procedió a la simulación de aportes mediante un modelo hidrológico implementado en WEAP que se describe con más detalle en los siguientes acápite.

9.1.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO WEAP

El modelo hidrológico WEAP (*Water Evaluation And Planning system*) fue desarrollado por el SEI (*Stockholm Environment Institute*) en 1989 y ha sido aplicado con bastante popularidad y buenos resultados, tanto en estudios de disponibilidad como de planificación del recurso hídrico. Este modelo posee una interfaz amigable y provee un enfoque integral, que permite su aplicación con diferentes objetivos. En la Figura 9-7 se muestra un esquema simplificado del Modelo WEAP, básicamente consiste en un modelo de balance de dos estanques, donde el estanque superior se asocia al flujo superficial y sub-superficial, mientras que el estanque inferior corresponde al almacenamiento subterráneo que está directamente relacionado con el flujo base.

Figura 9-7: Método De Humedad Del Suelo



Fuente: Guía Metodológica, Centro de Cambio Global UC, 2009 y adaptado Caneo y López 2021

Por otro lado, la modelación del derretimiento nival se realizó con el método de grado día, considerando temperaturas límites de derretimiento y congelamiento, para la estimación de porcentaje de precipitación y nieve caída. CCG-UC (2009) realiza una descripción detallada en la “Guía Metodológica Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con El Modelo WEAP”. También se puede acceder a los documentos oficiales de la página www.weap21.org.

El modelo implementado se compone de dos baldes, con un total de nueve parámetros. La ecuación de balance para el primer estanque se describe a continuación:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z^{RRF}_{1,j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Donde:

$z_{1,j}$: almacenamiento relativo o nivel de humedad en la zona de raíces [1,0].

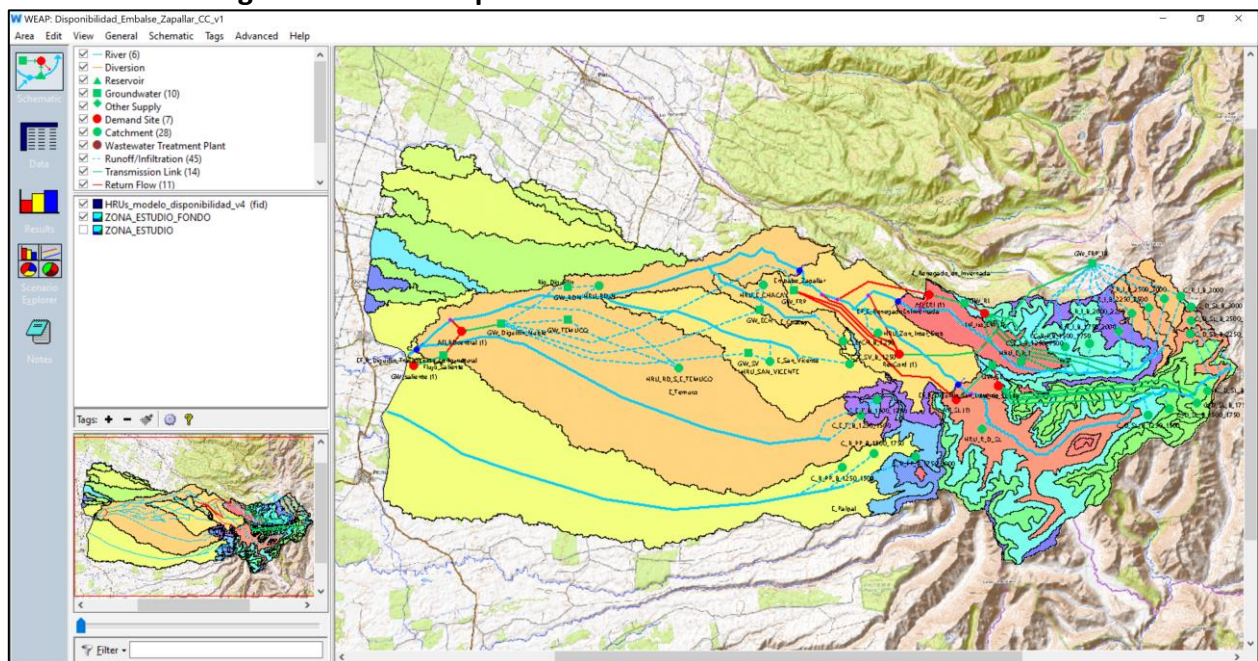
P_e : precipitación total, incluye el deshielo de nieve acumulada y el riego [mm].

PET : evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia [mm].

$k_{c,j}$: coeficiente de cultivo asociado a una porción de cobertura de suelo.

En la Figura 9-8 se muestra la vista esquemática del modelo implementado. En el Anexo 5 “Modelo WEAP Cambio Climático” se adjunta el modelo en copia digital.

Figura 9-8: Vista Esquemática De Modelo De Simulación WEAP



Fuente: Elaboración Propia

En los siguientes acápite se presentan los resultados del proceso de calibración y validación, así como la simulación de caudales considerando la componente de cambio climático futuro.

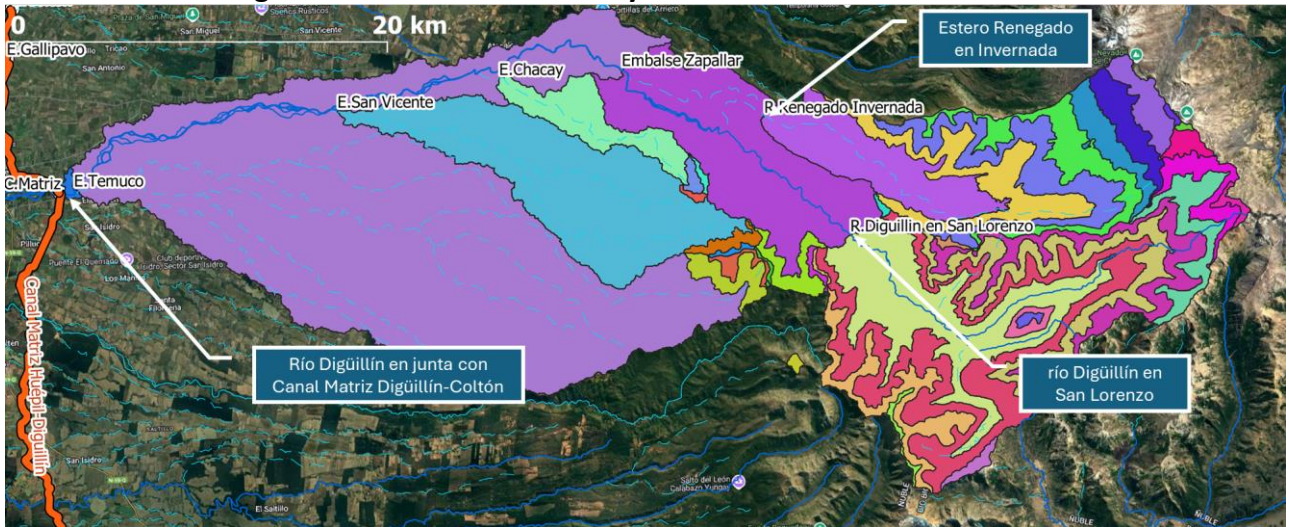
9.2. CALIBRACIÓN MODELO HIDROLÓGICO EN PERIODO HISTÓRICO

Para calibrar el modelo en la zona alta de la cuenca se consideraron las dos estaciones en régimen natural: río Diguillín en San Lorenzo y estero Renegado en Invernada. La estación de río Diguillín en Longitudinal se naturalizó considerando las extracciones históricas realizadas y registradas por la Junta de Vigilancia río Diguillín y sus afluentes.

9.2.1. CALIBRACIÓN EN PUNTOS DE CONTROL FLUVIOMÉTRICO

Para el proceso de calibración a nivel superficial, se consideró la información de las estaciones fluviométricas río Diguillín en San Lorenzo, río Diguillín en Longitudinal y río Renegado en Invernada. Los puntos considerados para el proceso de calibración se muestran en la Figura 9-9. En la Tabla 9-2 se muestran las coordenadas de los puntos de calibración: 2 estaciones fluviométricas DGA (Estero Renegado en Invernada y Diguillín en San Lorenzo) y 1 punto con estadística naturalizada reconstruida a partir de Estación Diguillín en Longitudinal.

Figura 9-9: Puntos de Control y Verificación Para Calibración



Fuente: Elaboración Propia

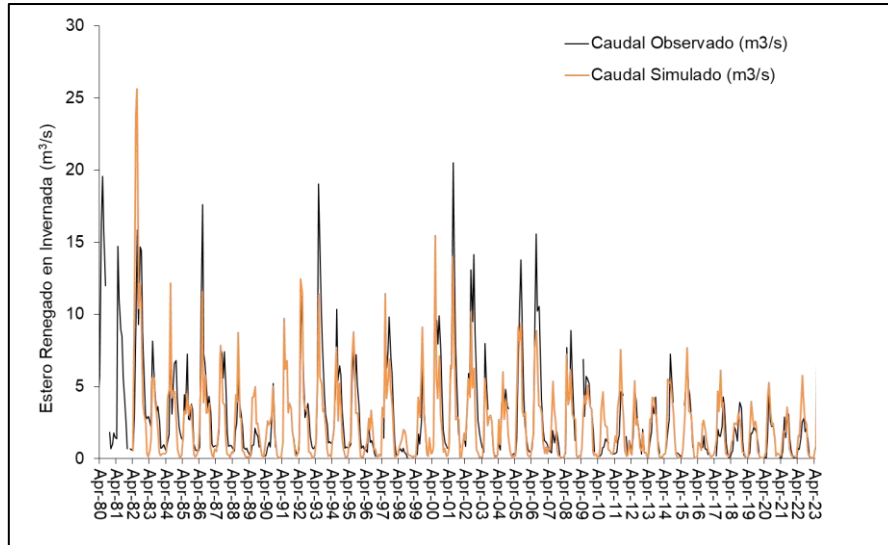
Tabla 9-2: Coordenadas De Puntos De Calibración Y Validación De Modelo Oferta Natural Para Proyecto Embalse Zapallar

Estación	UTM Este WGS84-18S	UTM Norte WGS84-18S
Estación DGA Estero Renegado en Invernada	800820	5914604
Estación DGA Río Diguillín en San Lorenzo	805071	5907859
Punto pseudo-natural, a partir de Estación DGA río Diguillín en Longitudinal ($0.66 * Q_{\text{pseudo-natural Diguillín en Longitudinal}}$)	762462	5912878

9.2.1.1. RESULTADOS DE INDICADORES DE BONDAD DE AJUSTE EN CAUDALES SUPERFICIALES

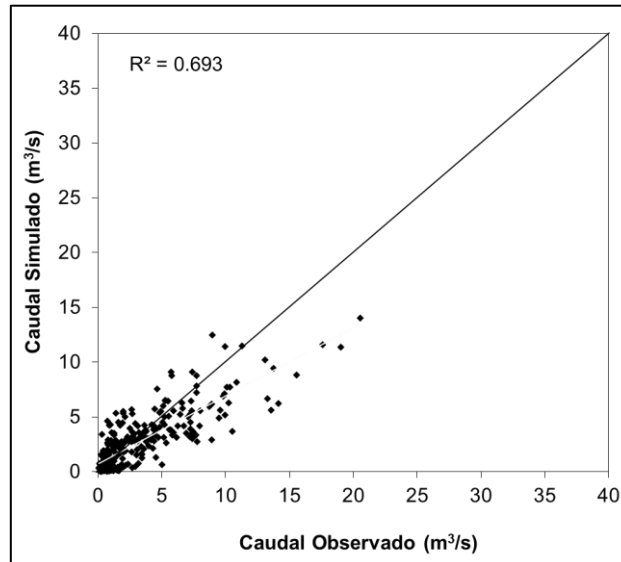
En la Figura 9-10 se muestran los caudales medios mensuales simulados y observados en la estación río Renegado en Invernada. En la Figura 9-11 se muestra la correlación de caudales simulados y observados, y en la Figura 9-12 se muestra la curva de variación estacional.

Figura 9-10: Serie Mensual Estación Río Renegado en Invernada



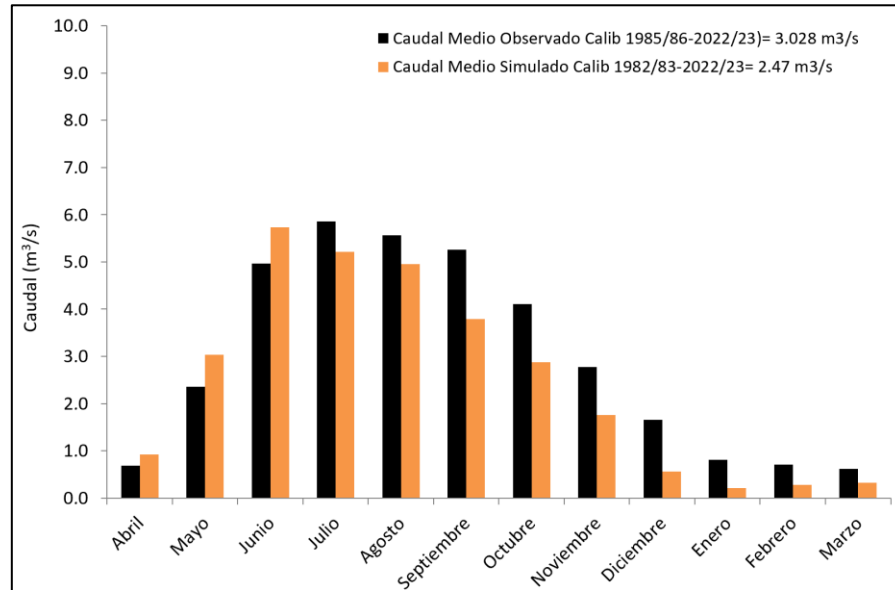
Fuente: Elaboración Propia

Figura 9-11: Caudal Observado Versus Simulado En Estación Río Renegado En Invernada



Fuente: Elaboración Propia

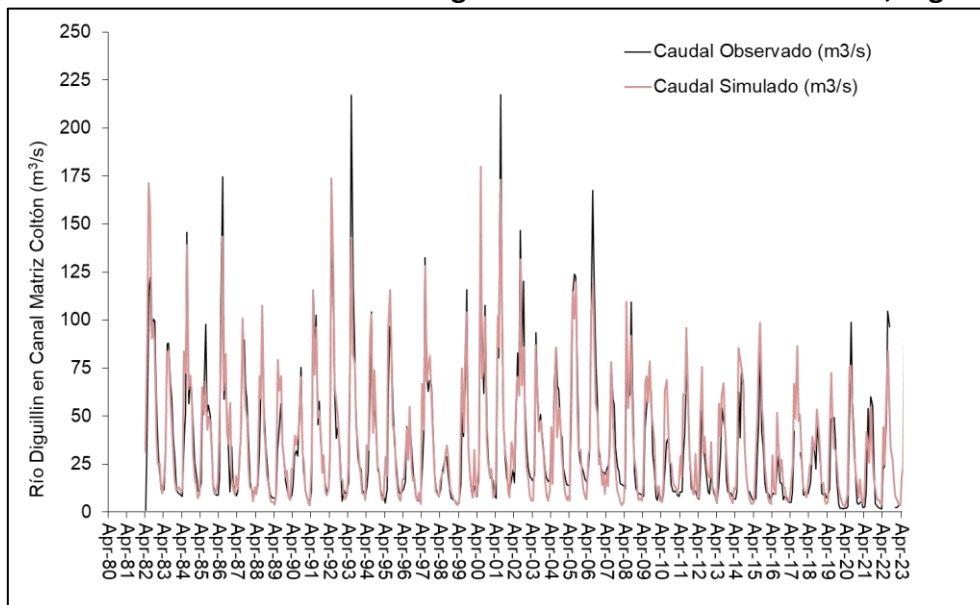
Figura 9-12: Caudal Medio Observado Calibrado En Estación Río Renegado En Invernada



Fuente: Elaboración Propia

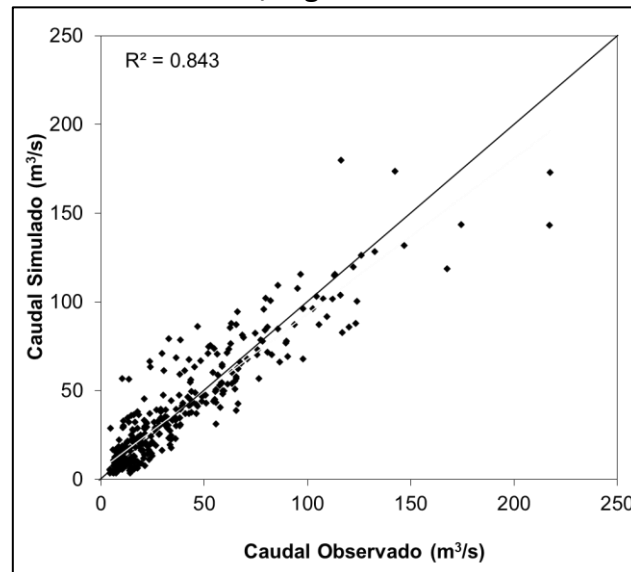
En la Figura 9-13 se muestran los caudales medios mensuales simulados y observados en la estación río Diguillín en junta con Canal Matriz Diguillín-Coltón. En la Figura 9-14 se muestra la correlación de caudales simulados y observados, y en la Figura 9-15 se muestra la curva de variación estacional.

Figura 9-13: Serie Mensual Estación Río Diguillín En Junta Con Canal Matriz, Diguillín-Coltón



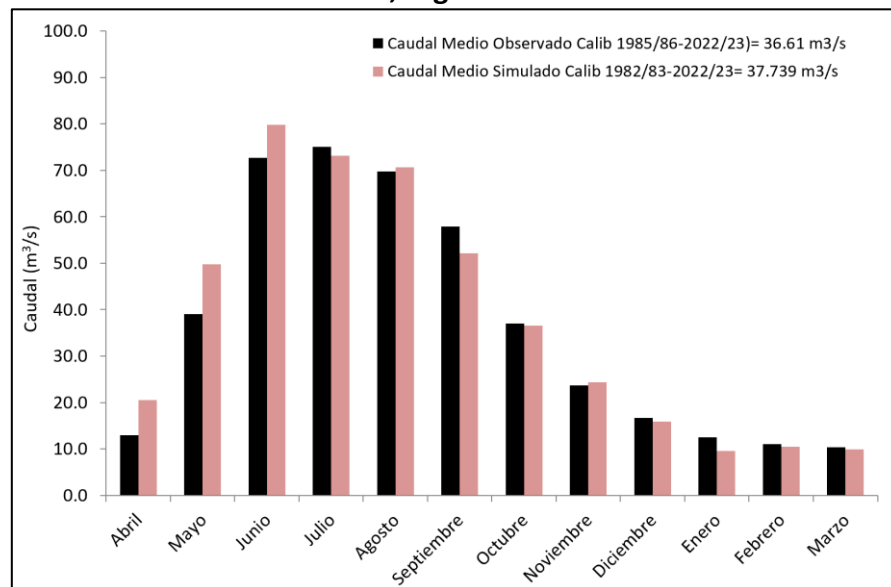
Fuente: Elaboración Propia

Figura 9-14: Caudal Observado Versus Simulado En Estación Río Diguillín En Junta Con Canal Matriz, Diguillín-Coltón



Fuente: Elaboración Propia

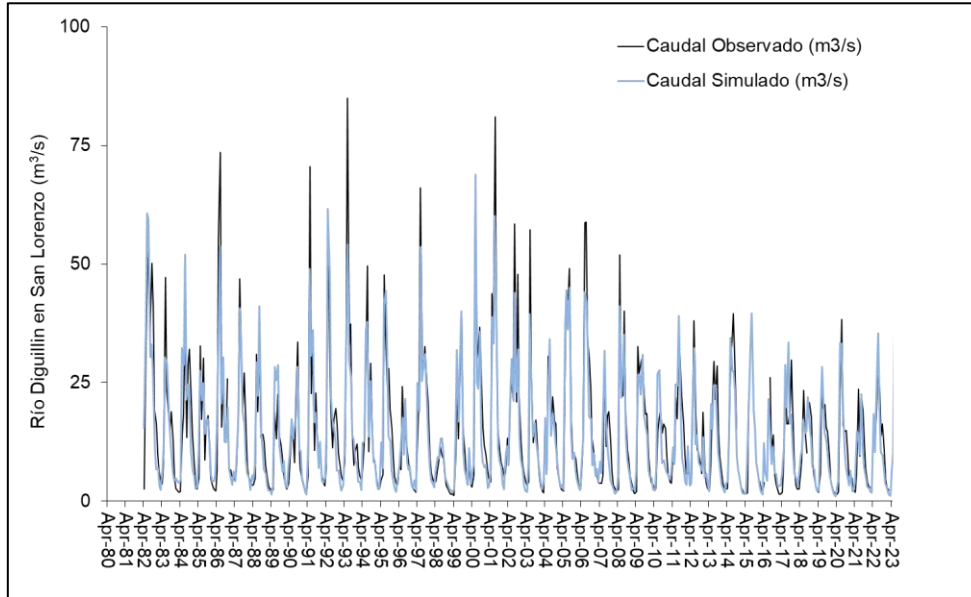
Figura 9-15: Caudal Medio Observado Calibrado En Estación Río Diguillín En Junta Con Canal Matriz, Diguillín-Coltón



Fuente: Elaboración Propia

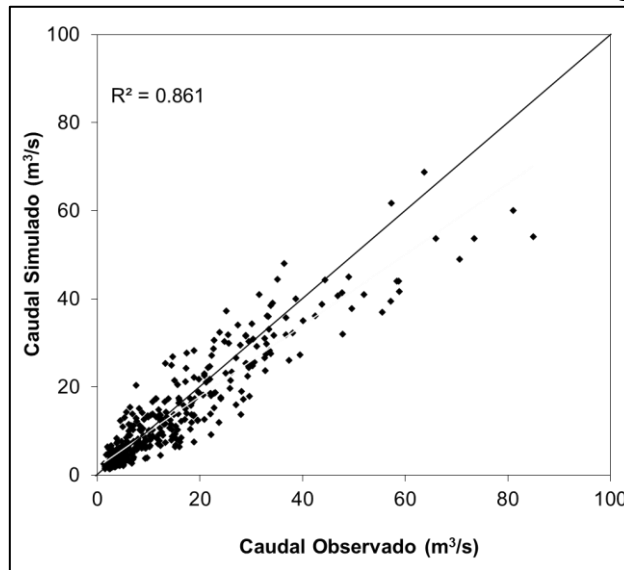
En la Figura 9-16 se muestran los caudales medios mensuales simulados y observados en la estación río Diguillín en San Lorenzo. En la Figura 9-17 se muestra la correlación de caudales simulados y observados, y en la Figura 9-18 se muestra la curva de variación estacional.

Figura 9-16: Serie Mensual Estación Río Diguillín En San Lorenzo



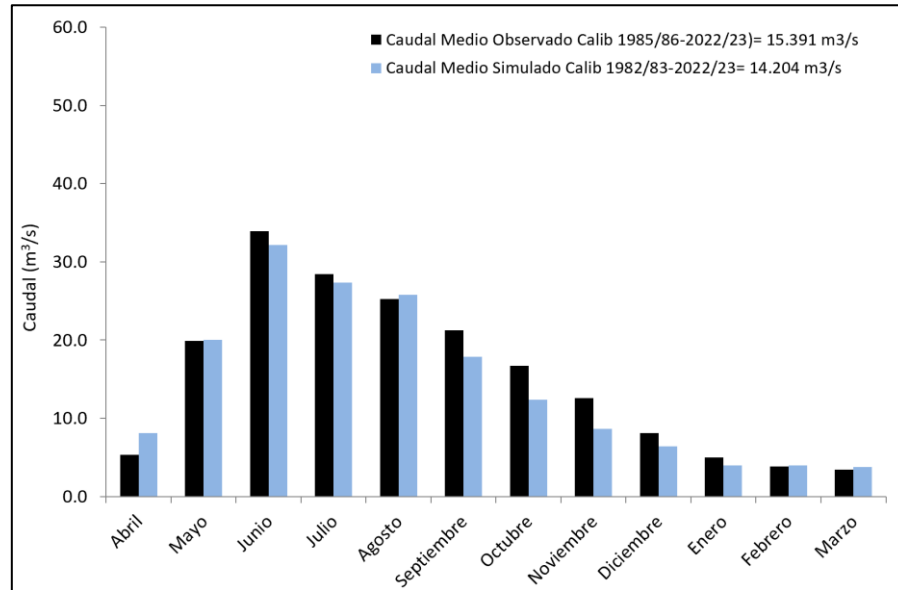
Fuente: Elaboración Propia

Figura 9-17: Caudal Observado Versus Simulado En Estación Río Diguillín En San Lorenzo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 9-18: Caudal Medio Observado Calibrado En Estación Río Diguillín En San Lorenzo



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 9-3 se muestran los indicadores de bondad de ajuste para los tres puntos de control en los que se calibró el modelo con información de registros fluviométricos (río Diguillín en San Lorenzo y Estero Renegado en Invernada), así como para el punto con estadística reconstruida en régimen natural (río Diguillín en junta con Canal Matriz Diguillín- Coltón).

Tabla 9-3: Indicadores de Bondad de Ajuste Nash-Sutcliffe Para Periodos De Calibración (1985/86-2014/15), Validación (2015/16-2022/23) y Completo (1985/86-2022/23)

Estación	Nash-Sutcliffe 1985/86-2014/15	Nash-Sutcliffe 2015/16-2022/23	Nash-Sutcliffe 1985/86-2022/23
Estero Renegado en Invernada	0,516	0,809	0,516
Río Diguillín en San Lorenzo	0,852	0,834	0,843
Río Diguillín en junta con Matriz Diguillín Coltón (extrapolada a partir de río Diguillín en Longitudinal en régimen pseudo-natural)	0,841	0,946	0,830

Fuente: Elaboración Propia

Se debe tener en cuenta que las estaciones de Renegado en Invernada y Diguillín en San Lorenzo son de mucha utilidad para la estimación de caudales en la zona alta de la cuenca. Sin embargo, la tercera estación considerada, río Diguillín en Longitudinal, se extrapoló al punto de río Diguillín en junta con Canal Matriz Diguillín-Coltón con el fin de reconstruir una serie pseudo-natural en dicho punto para poder validar los caudales de la zona intermedia. De esta manera se cuenta con un modelo que reproduce de forma satisfactoria los caudales tanto en la zona alta como media del valle para el periodo histórico, por lo que se considera válido para llevar a cabo las simulaciones de caudal futuro.

A continuación, se compara la estadística generada en la zona de presa con la información de otros estudios relevantes desarrollados en la zona de ubicación del muro.

9.2.2. ESTIMACIÓN DE CAUDAL AFLUENTE R&Q (2017)

9.2.2.1. CAUDALES APORTANTES Y DE CONTROL

La siguiente información corresponde a un resumen del estudio de factibilidad del embalse Zapallar realizado por R&Q (2017). La información para la obtención de registros fluviométricos es de la Dirección General de Aguas (DGA). Las estaciones fluviométricas utilizadas para la modelación son las siguientes:

Tabla 9-4: Selección de Estaciones Fluviométricas

Código Cod. BNA	Nombre de la Estación	Región	Coordenadas				Altura m.s.n.m	Años de Registro	
			UTM Norte	UTM Este	Lat S	Long W		Inicio	Fin
08132001-2	Río Diguillín en Longitudinal	VIII	5916532	737722	36°52'00"	72°20'00"	80	1920	2015
08134003-K	Río Larqui en Santa Cruz de la Cuca	VIII	5935150	733769	36°42'00"	72°23'00"	25	1985	2015
08130002-K	Río Diguillín en San Lorenzo	VIII	5910343	270578	36°55'28"	71°34'32"	727	1946	2015
08130001-1	Río Renegado en Invernada	VIII	5917313	265957	36°51'38"	71°37'31"	710	1941	2015

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Las estaciones río Diguillín en San Lorenzo y río Renegado en Invernada se encuentran cercanas a la zona de emplazamiento del embalse proyectado, que está ubicado 10 kilómetros aguas abajo de la confluencia de ambos ríos, por lo que son estaciones de control importantes para la determinación de los recursos afluentes al embalse Diguillín.

Tal como se informa en R&Q (2017) la estación río Renegado en Invernada tiene características particulares en cuanto a su régimen del caudal, presentando rendimiento por área específica más bajo que el resto de sus cuencas vecinas. Esto llevó a tomar algunas consideraciones especiales para la obtención de caudales en el punto del embalse proyectado.

Los registros de la estación río Diguillín en Longitudinal se utilizaron para efectuar la calibración de los parámetros de las cuencas que se encuentran al sur del río Diguillín.

9.2.2.2. CAUDALES MEDIOS MENSUALES AFLUENTES AL EMBALSE PROYECTADO

Respecto de la estadística disponible aguas arriba del punto del embalse proyectado, en el estudio se contó con los registros de caudales medios mensuales del río Diguillín en San Lorenzo y río Renegado en Invernada.

Según la metodología aplicada por R&Q (2017) un enfoque tradicional “sugiere transponer los registros fluviométricos de ambas estaciones hacia su confluencia, y posteriormente, desde su confluencia hacia el punto del embalse. Sin embargo, se procedió a realizar una transposición

directa desde la estación Diguillín en San Lorenzo hacia el punto del embalse proyectado, lo que lleva a descartar los registros del río Renegado en Invernada. La razón de descartar sus mediciones se atribuye al hecho de que esa estación presenta un régimen de caudales distinto al de las cuencas vecinas, observando un rendimiento por área inferior al resto”.

La causa se fundamenta en las características hidrogeológicas de esta cuenca, provocando que gran parte del caudal se infiltre, produciéndose su recuperación aguas abajo de la confluencia del río Diguillín. Si se efectúa una transposición de caudales por área hasta la confluencia, se está asumiendo que ambas cuencas presentan regímenes similares, por ende, los caudales que se generarán serán menores al transponer en la zona del embalse proyectado.

Finalmente, R&Q (2017) realizó la transposición directa desde el río Diguillín en San Lorenzo al embalse proyectado, los caudales generados son mayores debido a que se asume que la cuenca aportante del embalse presenta un régimen similar al de la estación fluviométrica.

Los caudales de la cuenca en estudio quedan determinados por la relación:

$$Q_1 = \frac{A_1 P_1}{A_2 P_2} Q_2$$

Donde:

Q₁: Caudal de la cuenca en punto de embalse proyectado

Q₂: Caudal de la cuenca en estación fluviométrica

A₁: Área total de la cuenca aportante en punto de embalse proyectado

A₂: Área total de la cuenca aportante a estación fluviométrica

P₁: Precipitación media anual de la cuenca en punto de embalse proyectado

P₂: Precipitación media anual de la cuenca aportante a estación fluviométrica

Las precipitaciones medias anuales obtenidas presentan una tendencia similar a las precipitaciones observadas en el Balance Hídrico Nacional de la DGA. Por ello, se utilizó a modo referencial el mapa de Isoyetas del balance, lo que permitió determinar las precipitaciones medias ponderadas sobre las cuencas a transponer, obteniendo los factores de transposición.

Tabla 9-5: Áreas Aportantes Totales y Factor De Transposición

	Río Diguillín
Área aportante a embalse (km ²)	430,5
Área estación fluviométrica (km ²)	208,2
Precipitación media anual en embalse (mm)	2410
Precipitación media anual estación fluviométrica (mm)	2475
Factor de Transposición	2,01

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

Los caudales medios mensuales en el punto de embalse se muestran en la Tabla 9-6.

Tabla 9-6: Caudales Medios Mensuales Estación Río Diguillín En San Lorenzo

Año Hidrológico	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)
1978 - 1979	3,09	11,03	22,79	69,82	16,23	32,37	43,15	26,18	10	5,35	4,86	4,40
1979 - 1980	1,9	12,17	7,59	43,56	57,8	29,26	11,86	19,18	19,29	5,45	9,75	9,32
1980 - 1981	33,64	63,04	68,91	40,05	26,11	10,93	10,17	8,43	6,88	5,75	5,59	4,40
1981 - 1982	9,85	74,08	27,26	22,95	18,65	16,35	10,64	9,17	5,3	3,81	3,67	2,93
1982 - 1983	2,63	25,06	48,48	53,7	35,22	50,18	41,5	19,06	16,31	10,0	6,3	3,95
1983 - 1984	3,62	8,05	47,09	23,15	18,12	14,86	18,8	12,48	5,04	2,71	2,23	1,94
1984 - 1985	2,05	13,96	18,25	37,53	13,36	28,58	32,07	21,03	13,51	7,19	3,5	2,64
1985 - 1986	4,92	32,83	17,17	30,21	8,7	15,96	18,1	13,01	4,92	3,21	2,56	2,22
1986 - 1987	6,31	55,48	73,55	15,62	24,76	12,56	12,26	25,75	16,07	6,57	5,34	4,96
1987 - 1988	4,21	6,87	18,24	46,9	28,91	19,68	27,01	14,65	7,06	5,14	3,99	3,43
1988 - 1989	3,37	4,68	31	18,75	31,52	13,44	14,15	12,31	7,73	4,73	3,12	2,61
1989 - 1990	2,45	2,45	18,83	13,2	22,6	14,34	11,95	9,48	5,72	3,4	2,59	3,7
1990 - 1991	8,55	13,81	13,54	8,13	20,57	33,61	12,21	6,65	4,26	3,21	2,58	2,28
1991 - 1992	5,29	70,59	22,67	33,31	10,69	22,77	14,24	8,97	9,09	5,67	3,82	3,23
1992 - 1993	6,77	57,27	36,36	19,76	11,26	17,19	19,55	16,02	10,13	6,93	5	4,29
1993 - 1994	8,27	33,75	85,01	32,93	37,32	15,69	7,56	10,55	12,04	7,07	5,36	4,35
1994 - 1995	7,74	12,35	33,09	49,57	10,45	28,98	17,43	9,36	7,9	4,7	3,29	2,69
1995 - 1996	4,46	5,65	47,74	35,14	23,85	27,98	19,54	15,09	9,3	5,1	3,47	3,58
1996 - 1997	7,55	6,57	24,12	12,55	14,96	11,59	7,69	6,04	3,7	2,47	2,34	1,91
1997 - 1998	14,44	23,04	65,99	28,85	27,85	32,6	25,04	20,88	9,11	5,91	4,68	3,94
1998 - 1999	4,22	6,11	8,97	11,49	9,91	8,79	5,2	3,35	2,53	1,86	1,42	1,48
1999 - 2000	1,25	9,81	25,53	13,11	29,52	38,56	15,61	10,32	5,33	3,32	7,08	3,51
2000 - 2001	2,86	5,61	63,7	30,15	32,66	36,69	23,68	15,41	11,75	9,41	6,74	4,8
2001 - 2002	4,13	43,82	33,39	81,05	36,74	15,32	10,72	8,2	6,76	5,04	6,12	13,33
2002 - 2003	7,73	20,92	25,64	21,17	58,42	20,93	47,77	21,98	12,85	8,35	5,63	4,26
2003 - 2004	3,34	3,97	57,25	26,01	12,27	15,76	17,13	10,65	6	3,39	2,2	1,72
2004 - 2005	15,8	6,3	30,62	27,39	14,85	22,03	16,77	16,34	7,09	4,41	2,88	2,43
2005 - 2006	2,21	25,09	44,36	42,43	49,03	17,09	10,19	10	8,91	5,99	3,83	2,4
2006 - 2007	6,29	12,22	58,74	58,83	34,4	29,59	24,06	13,17	10,17	6,95	4,94	3,92
2007 - 2008	3,75	3,71	5,63	28,89	11,51	18,13	18,77	12,28	6,1	3,43	2,53	2,05
2008 - 2009	2,4	51,87	21,86	22,34	40,09	18,78	10,76	8,57	5,24	3,46	2,15	1,64
2009 - 2010	1,99	32,6	26,97	29,35	30,26	22,07	18,26	18,38	9,22	5,49	3,87	3,31
2010 - 2011	2,68	2,67	14,75	17,43	19,01	14,37	16,34	15,26	9,25	5,52	4,05	3,78
2011 - 2012	8,3	8,03	21,94	17,27	34,1	28,11	22,07	16,1	9,67	5,65	6,11	5,52
2012 - 2013	3,69	19,76	38,12	18,42	10,76	10,33	7,94	5,84	18,71	6,75	3,74	2,7
2013 - 2014	2,29	7,59	22,67	29,51	21,48	28,5	14,46	9,45	6	3,65	2,78	2,6
2014 - 2015	2,67	11,86	30,11	33,8	39,5	26,23	15,24	11,54	7,65	3,03	2,07	1,65

Nota: Los datos en rojo, corresponden a los datos rellenados de la estación a través de una correlación lineal (del mes de marzo) con la estación Renegado en Invernada.

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

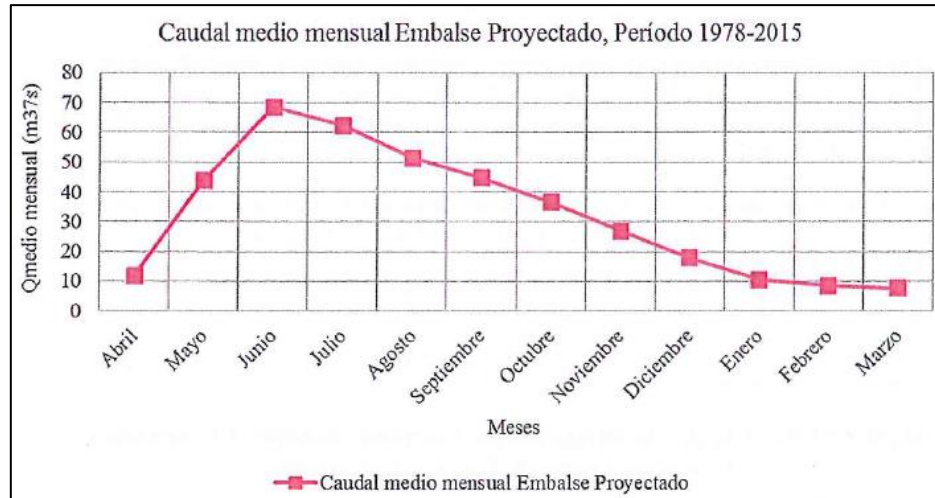
Tabla 9-7: Caudales Medios Mensuales En Punto De Embalse Zapallar Proyectado

Año Hidrológico	Abril Q (m³/s)	Mayo Q (m³/s)	Junio Q (m³/s)	Julio Q (m³/s)	Agosto Q (m³/s)	Septiembre Q (m³/s)	Octubre Q (m³/s)	Noviembre Q (m³/s)	Diciembre Q (m³/s)	Enero Q (m³/s)	Febrero Q (m³/s)	Marzo Q (m³/s)
1978 - 1979	6,22	22,21	45,89	140,58	32,68	65,17	86,88	52,71	20,13	10,77	9,7	8,86
1979 - 1980	3,83	24,5	15,28	87,7	116,38	58,91	23,88	38,62	38,84	10,97	19,6	18,77
1980 - 1981	67,73	126,93	138,74	80,64	52,57	22,01	20,48	16,97	13,85	11,58	11,2	8,86
1981 - 1982	19,83	149,15	54,89	46,21	37,55	32,92	21,42	18,46	10,67	7,67	7,3	5,9
1982 - 1983	5,3	50,46	97,61	108,12	70,91	101,03	83,56	38,38	32,84	20,15	12,6	7,95
1983 - 1984	7,29	16,21	94,81	46,61	36,48	29,92	37,85	25,13	10,15	5,46	4,49	3,91
1984 - 1985	4,13	28,11	36,74	75,56	26,9	57,54	64,57	42,34	27,2	14,48	7,0	5,32
1985 - 1986	9,91	66,1	34,57	60,83	17,52	32,13	36,44	26,19	9,91	6,46	5,15	4,47
1986 - 1987	12,7	111,7	148,09	31,45	49,85	25,29	24,68	51,85	32,36	13,23	10,7	9,99
1987 - 1988	8,43	13,83	36,72	94,43	58,21	39,62	54,38	29,5	14,21	10,35	8,03	6,91
1988 - 1989	6,79	9,42	62,42	37,75	63,46	27,06	28,49	24,79	15,56	9,52	6,28	5,26
1989 - 1990	4,93	4,93	37,91	26,58	45,5	28,87	24,06	19,09	11,52	6,85	5,21	7,45
1990 - 1991	17,21	27,81	27,26	16,37	41,42	67,67	24,58	13,39	8,58	6,46	5,19	4,59
1991 - 1992	10,65	142,13	45,64	67,07	21,52	45,85	28,67	18,06	18,3	11,42	7,69	6,5
1992 - 1993	13,63	115,31	73,21	39,79	22,67	34,61	39,36	32,25	20,4	13,95	10,0	8,64
1993 - 1994	16,65	67,95	171,16	66,3	75,14	31,59	15,22	21,24	24,24	14,23	10,7	8,76
1994 - 1995	15,58	24,87	66,62	99,81	21,04	58,35	35,09	18,85	15,91	9,46	6,62	5,42
1995 - 1996	8,98	11,38	96,12	70,75	48,02	56,34	39,34	30,38	18,72	10,27	6,99	7,21
1996 - 1997	15,2	13,23	48,56	25,27	30,12	23,34	15,48	12,16	7,45	4,97	4,7	3,85
1997 - 1998	29,07	46,39	132,87	58,09	56,07	65,64	50,42	42,04	18,34	11,9	9,42	7,93
1998 - 1999	3,5	12,3	18,06	23,13	19,95	17,7	10,47	6,74	5,09	3,74	2,86	2,98
1999 - 2000	2,52	1975	51,4	26,4	59,44	77,64	31,43	20,78	10,73	6,68	14,2	7,07
2000 - 2001	5,76	11,3	128,25	60,7	65,76	73,87	47,68	31,03	23,66	18,95	13,5	9,66
2001 - 2002	8,32	88,23	67,23	163,19	73,97	30,85	21,58	16,51	13,61	10,15	12,3	26,84
2002 - 2003	15,56	42,12	51,62	42,62	117,62	42,14	96,18	44,25	25,87	16,81	11,3	8,58
2003 - 2004	6,72	7,99	115,27	52,37	24,7	31,73	34,49	21,44	12,08	6,83	4,43	3,46
2004 - 2005	31,81	12,68	61,65	55,15	29,9	44,36	33,77	32,9	14,28	8,88	5,8	4,89
2005 - 2006	4,45	50,52	89,32	85,43	98,72	34,41	20,52	20,13	17,94	12,06	7,71	4,83
2006 - 2007	12,66	24,6	118,27	118,45	69,26	59,58	48,44	26,52	20,48	13,99	9,95	7,89
2007 - 2008	7,55	7,47	11,34	158,17	23,17	36,5	37,79	24,72	12,28	6,91	5,09	4,13
2008 - 2009	4,83	104,44	44,01	44,98	80,72	37,81	21,66	17,26	10,55	6,97	4,33	3,3
2009 - 2010	4,01	65,64	54,3	59,09	60,93	44,44	36,77	37,01	18,56	11,05	7,79	6,66
2010 - 2011	5,4	5,38	29,7	35,09	38,28	28,93	32,9	30,72	18,62	11,11	8,15	7,61
2011 - 2012	16,71	16,17	44,17	34,77	68,66	56,6	44,44	33,42	19,47	11,38	12,3	11,11
2012 - 2013	7,43	39,79	76,75	37,09	2,166	20,8	15,99	11,76	37,67	13,59	7,53	5,44
2013 - 2014	4,61	15,28	45,64	59,42	43,25	57,38	29,11	19,03	12,08	7,35	5,6	5,23
2014 - 2015	5,38	23,88	60,62	68,05	79,53	52,81	30,68	23,23	15,4	6,1	4,17	3,32

Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

La Figura 9-19 muestra los caudales medios mensuales obtenidos en el sector del embalse proyectado, para el período 1978-2015:

Figura 9-19: Caudales Medios Mensuales Sector Embalse, Período 1978-2015



Fuente: R&Q Ingeniería (2017)

9.2.3. ESTIMACIÓN DE CAUDAL AFLUENTE DGA (2020)

De acuerdo con la Minuta DGA Ñuble N°247 Informe Técnico, la Dirección de Obras Hidráulicas solicitó derecho de aprovechamiento no consuntivo de ejercicio permanente y continuo, sobre aguas superficiales y corrientes en el cauce río Diguillín (expediente ND-0801-10347). El caudal solicitado fue de 80 Mm³/año, modo de extracción gravitacional. Los puntos de captación y restitución están definidos por las siguientes coordenadas UTM (m), referidas al Datum WGS 1984, Huso 19.

Tabla 9-8: Puntos De Captación y Restitución

Captación		Restitución		Distancia (m)	Desnivel (m)
Norte	Este	Norte	Este		
5.917.248	260.065	5.920.533	253.788	7.100 m	83,5 m

Fuente: DGA (2020)

En los aspectos formales indican que la fecha de ingreso fue el 10 de julio de 2018, se realizó publicación en diarios, difusión radial y no se presentaron oposiciones en el plazo legal.

En los antecedentes técnicos la DOH solicitó la constitución de un derecho de aprovechamiento no consuntivo, de aguas superficiales y corrientes a extraer desde el río Diguillín por un caudal de 80 Mm³/año, en la comuna de Pinto, provincia de Diguillín, región de Ñuble.

El río Diguillín nace en la vertiente suroccidental de los Nevados de Chillán, a una altitud de 2.200 m.s.n.m. Su régimen es principalmente de carácter pluvial, con un aumento del caudal en primavera debido al derretimiento de las nieves, disminuyendo considerablemente hacia el final

de la temporada de riego. Cuenta con la estación fluviométrica San Lorenzo, que posee más de 30 años de registro de caudales, permitiendo generar estadísticas asociadas a probabilidades de excedencia del 5, 10, 20, 50, 85 y 95%.

En cuanto a los derechos otorgado en la cuenca, se revisaron los antecedentes disponibles en el Servicio Regional, y de acuerdo con el Catastro Público de Aguas (CPA), se encontraron los siguientes:

Aguas arriba de la captación del punto del derecho solicitado existen los siguientes derechos otorgados y tramitados:

Tabla 9-9: Derechos Otorgados Aguas Arriba De La Captación

Expediente	Propietario
ND-0801-1890	Eduardo Serrano Gallegos
ND-0801-2326	Compañía Eléctrica Montegrande Limitada
ND-0801-6268	Exploraciones, Inversiones y Asesorías HUTURI S.A.
ND-0801-6269	Exploraciones, Inversiones y Asesorías HUTURI S.A.
ND-0801-6589_C1	Claudette Bordagorry Vallerant
ND-0801-6589_C3	Claudette Bordagorry Vallerant
ND-0801-6589_C4	Claudette Bordagorry Vallerant
ND-0801-7643	Sociedad de Inversiones Emilux Limitada

Fuente: DGA (2020)

Todos estos derechos tienen puntos de captación y restitución aguas arriba del punto en estudio, por lo que no se ven afectados.

Por otro lado, aguas arriba del punto de captación en estudio existe un derecho de aprovechamiento no consuntivo a nombre de Manuel Enrique Madrid Aris, tramitado bajo el expediente ND-0801-6707 y constituido por la Resolución DGA Ñuble N°12 del 25 de enero de 2019. Este derecho se debe considerar como derecho a respetar al momento de determinar la disponibilidad en el punto de captación en estudio.

Otros derechos aguas arriba también deben ser considerados en el análisis de disponibilidad, que son los siguientes:

Constituidos:

- ND-0801-7420: Ronald Alfredo Sanhueza Castillo.
- NR-0801-2012: Club Deportivo y Social Funcionarios Contraloría General de la República.
- ND-0801-152: Sociedad Hotelera de La Cascada Ltda.
- NR-0801-1785: Cooperativa de Agua Potable Rural Los Lleuques Ltda.
- ND-0801-1817: Alberto Antonio Almeida Seguel.
- ND-0801-2045: Comité Pro Aguas Los Leones.

- ND-0801-885: Claudio Bustamante Blu.
- NR-0801-71: Club Andino Chillan.
- NR-0801-3031: Club Deportivo Adm. Industrial de Huachipato.
- ND-0801-778: Dirección de Obras Hidráulicas.

Caudal comprometido usos regularizados o susceptibles de regularizar en afluentes del R. Diguillín (E. Renegado): Canal Quintana o Porvenir, Canal Fundo El Hoyo, Canal Riquelme o Aqueveque y Canal Villalobos.

En la memoria explicativa se indica que el recurso será utilizado en la generación de electricidad. Analizada la solicitud está corresponde a un derecho no consuntivo de embalse, dado que el derecho solicitado corresponde a un volumen anual de 80 millones de metros cúbicos (80.000.000 m³/año), este está sujeto a restricción por distribución mensual y condicionado a no sobrepasar lo solicitado en volumen anual. Dicha distribución se debe realizar con el 85% de probabilidad de excedencia. Se determinó que el caudal necesario en el punto solicitado no excede lo justificado, por lo tanto, no debe ser restringido (mes junio caudal máx. 4,616 m³/s).

9.2.3.1. DISPONIBILIDAD DEL RECURSO

La metodología utilizada fue la Transposición de Caudales, que supone que los gastos por unidad de área y precipitación entre cuencas vecinas con características similares, son aproximadamente iguales para un para un período de tiempo considerado. Dado que los puntos de captación solicitados (1 y 3) están ubicados sobre el río Diguillín, se tomó como patrón la suma de las estaciones controladas por la DGA, río Diguillín en San Lorenzo y río Renegado en Invernada. Para el punto de captación 2, se tomó como referencia la estación río Renegado en Invernada.

Dado que ambas estaciones están ubicadas muy próximas, donde la producción específica es 107 l/s/km² para el río Diguillín en la parte alta y 34 l/s/km² para el Renegado, utilizando una u otra para generar caudales en el punto de interés se generan caudales excesivos (San Lorenzo) o subdimensionados (Invernada). Se concluyó que lo más representativo es utilizar como patrón la suma de los registros que tiene lugar en la confluencia de ambos ríos.

Los caudales medios de la cuenca en estudio quedan determinados por la relación:

$$Q_1 = \frac{A_1 P_1}{A_2 P_2} Q_2$$

Donde:

Q₁: Caudal medio de la cuenca en estudio

Q₂: Caudal medio de la cuenca base

A₁: Área de la cuenca en estudio

A₂: Área de la cuenca base

P_1 = precipitación de la cuenca en estudio

P_2 = precipitación de la cuenca base

Los caudales medios mensuales para las probabilidades de excedencia del 5, 10, 20, 50, 85 y 95 %, se obtienen multiplicando los coeficientes adimensionales de distribución por mes para distintas probabilidades de excedencia de la Estadística Fluviométrica de los ríos Diguillín en estación San Lorenzo y estación Renegado en Invernada, por el caudal medio anual respectivo, calculado mediante la fórmula anteriormente señalada. La estadística de las estaciones fluviométricas utilizadas cumple con los requerimientos físicos para ser utilizadas en el análisis de disponibilidad.

Tabla 9-10: Datos de la Estación De Control y De Los Puntos De Análisis De Disponibilidad

Expedientes	Fuente	Área de drenaje (km ²)	Precipitación (mm/año)	Factor de Conversión
Área estación San Lorenzo	Río Diguillín	162	2.545,79	-
Área estación Invernada	Río Renegado	111	2.500,25	-
ND-0810-10347	Río Diguillín	427,28	2.497,84	1,536

Fuente: DGA (2020)

Para calcular los caudales del punto solicitado en el expediente ND-0801-10347, se verifica la Memoria Explicativa y el Croquis, que indican que se trata de una central hidroeléctrica de tipo "Embalse". El proyecto consiste en la construcción de una central hidroeléctrica de embalse dentro del cauce indicado. Por ello se construirá un muro aguas arriba del punto de restitución. Las aguas serán ingresadas por una bocatoma a un costado del muro y serán llevadas por un túnel hacia las turbinas hidráulicas para generar energía eléctrica y luego devueltas en el punto de coordenadas indicadas como restitución. Según la información el punto del muro se ubica relativamente cercano al punto de restitución.

9.2.3.2. CAUDALES MEDIOS ESTIMADOS EN UBICACIÓN DEL EMBALSE

En la Tabla 9-11 se muestra el caudal medio estimado para la ubicación del embalse. El caudal 50% probabilidad de excedencia estimado por DGA según IT 247 es de 24,56 m³/s.

Tabla 9-11: Caudal Medio Para Ubicación De Embalse Zapallar

Caudales	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Caudal 50% probabilidad de excedencia (m ³ /s)	7,54	22,47	50,27	46,25	43,98	39,89	28,85	21,16	13,58	8,39	6,56	5,80

Fuente: DGA (2020)

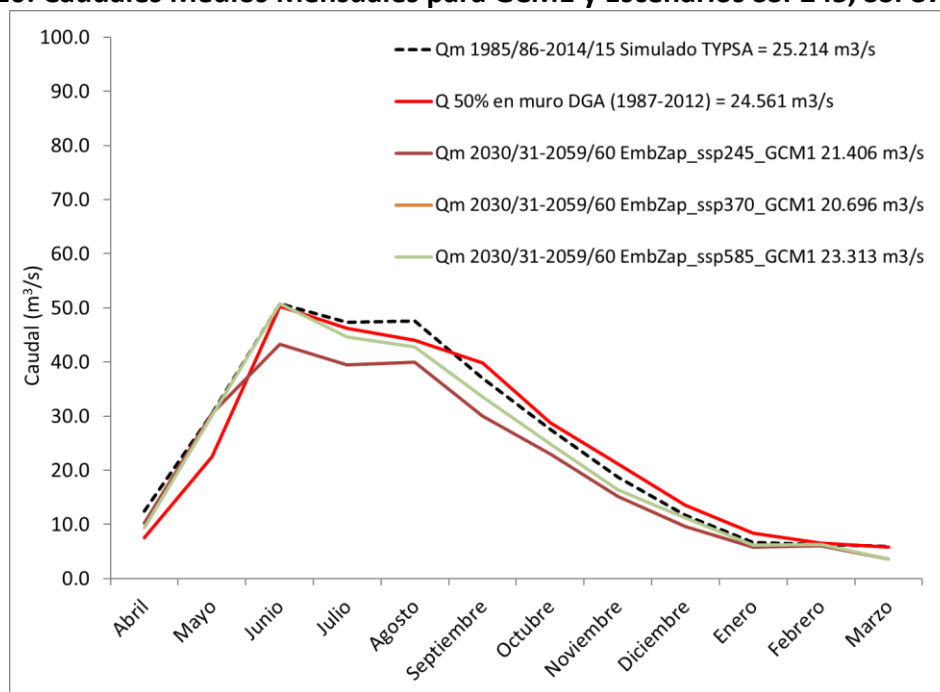
9.3. CONSTRUCCIÓN ESCENARIOS DE SIMULACIÓN FUTURA

Para la construcción de escenarios futuros se determinaron las forzantes climáticas y el modelo hidrológico calibrado y validado para situación histórica. Se procedió a simular los caudales futuros tanto para la ubicación de embalse Zapallar como para la hoyía intermedia afluente a la zona de estudio. Se debe tener en cuenta que el modelo se calibró en periodo histórico con información observada y también se corrió en periodo histórico con la precipitación y temperatura de los GCMs considerados en el estudio. Finalmente se estimaron para los tres escenarios con cambio climático, SSP245, SSP370 y SSP585, los caudales respectivos.

9.4. GENERACIÓN DE CAUDALES FUTUROS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO

En la Figura 9-20 se muestran los caudales medios mensuales simulados para el GCM1: MPI-ESM1-2-LR en los tres escenarios de cambio climático: SSP245, SSP370 y SSP585.

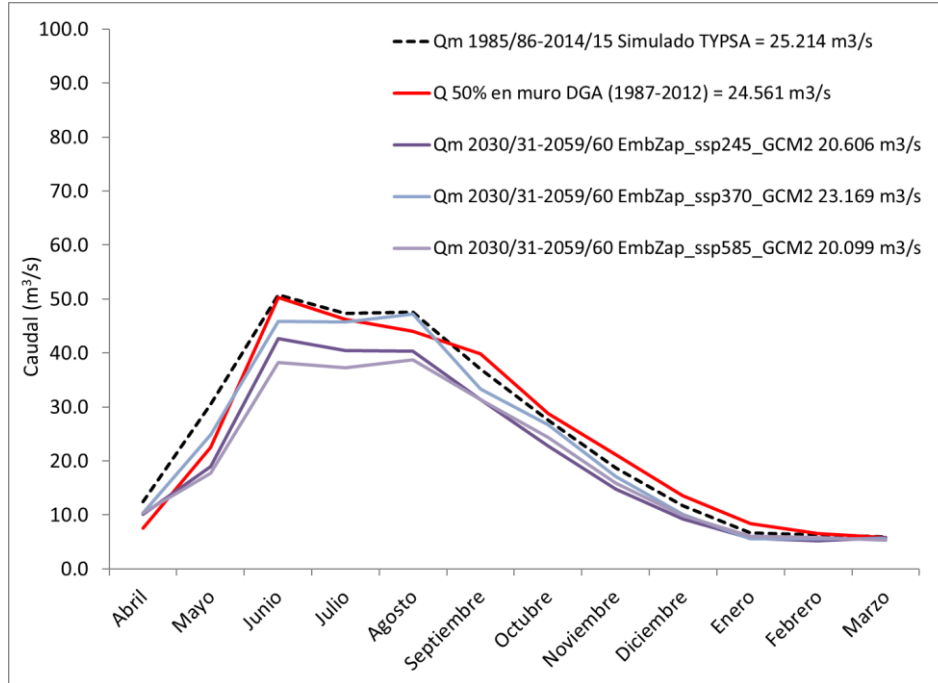
Figura 9-20: Caudales Medios Mensuales para GCM1 y Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 9-21 se muestran los caudales medios mensuales simulados para el GCM2: MRI-ESM2-0 en los tres escenarios de cambio climático: SSP245, SSP370 y SSP585.

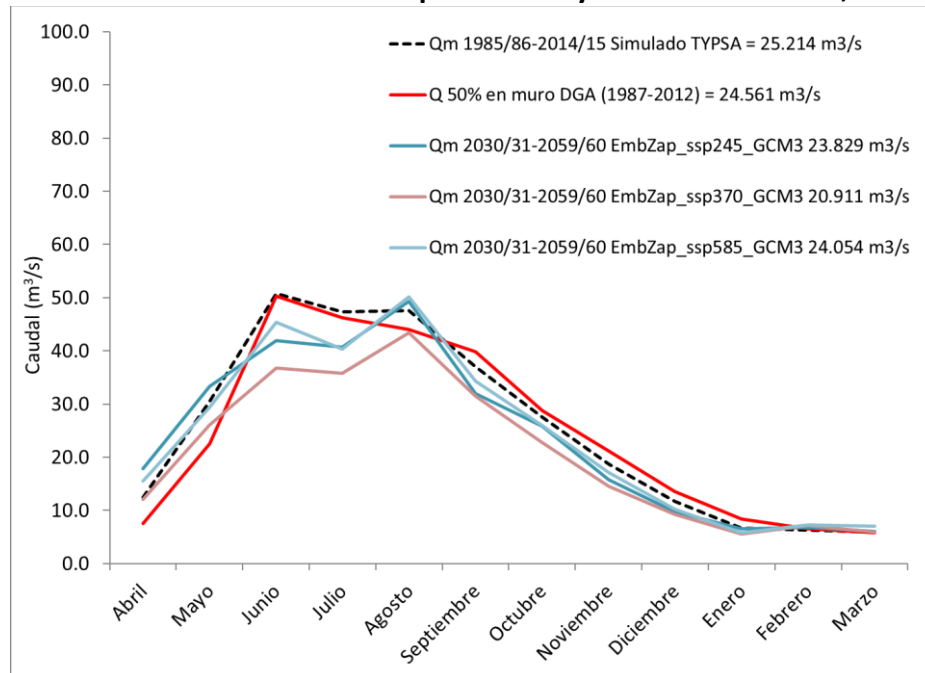
Figura 9-21: Caudales Medios Mensuales para GCM2 y Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 9-22 se muestran los caudales medios mensuales simulados para el GCM3: NorESM2-MM en los tres escenarios de cambio climático: SSP245, SSP370 y SSP585.

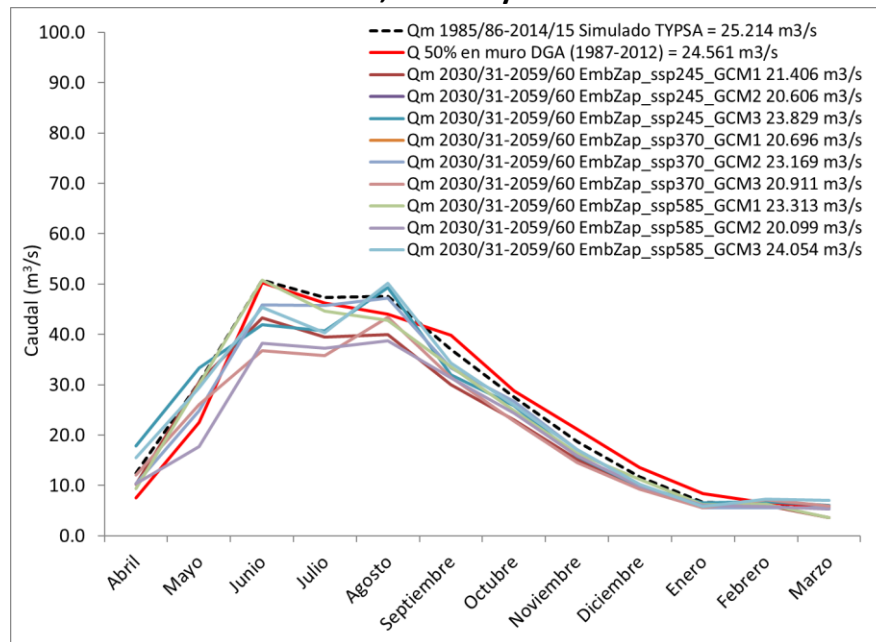
Figura 9-22: Caudales Medios Mensuales para GCM3 y escenarios SSP245, SSP370 y SSP585



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 9-23 se muestran los caudales medios mensuales con cambio climático para los tres GCMs y los tres escenarios, en total las nueve simulaciones que fueron consideradas en el análisis de forzantes climáticas.

Figura 9-23: Caudales Medios Mensuales Para Los Tres GCMs Considerados Y Los Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 9-12 se muestra el resumen de caudales medios mensuales para todos los GCMs y los escenarios evaluados en el presente estudio.

Tabla 9-12: Promedio Serie de Caudales Medios Escenarios Climáticos Futuros

Escenario climático futuro	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Anual
SSP 245 GCM1	10,28	30,52	43,34	39,47	39,92	30,02	23,04	15,19	9,58	5,86	6,08	3,56	21,41
SSP 245 GCM2	10,12	18,97	42,63	40,49	40,36	31,34	22,71	14,77	9,27	5,65	5,17	5,80	20,61
SSP 245 GCM3	17,88	33,37	41,95	40,70	49,36	31,94	25,82	15,82	9,73	6,51	6,78	6,09	23,83
SSP 370 GCM1	7,22	25,41	49,50	39,96	36,98	26,66	23,15	15,83	9,31	5,66	5,17	3,49	20,70
SSP 370 GCM2	10,30	24,84	45,92	45,69	47,17	33,39	26,67	17,14	10,13	5,58	5,60	5,58	23,17
SSP 370 GCM3	12,11	26,12	36,73	35,74	43,46	31,55	22,75	14,59	9,30	5,53	7,18	5,89	20,91
SSP 585 GCM1	9,42	30,09	50,74	44,61	42,76	33,63	24,81	16,39	11,20	6,17	6,32	3,61	23,31
SSP 585 GCM2	10,41	17,73	38,29	37,30	38,80	31,41	24,36	15,94	9,84	6,02	5,79	5,31	20,10
SSP 585 GCM3	15,55	29,43	45,33	40,34	50,22	34,27	25,95	17,10	10,24	5,83	7,29	7,11	24,05

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-13: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 245 GCM1

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Annual
2030	-2031	2,90	48,25	55,78	37,61	33,62	30,94	28,06	20,08	15,61	6,87	6,37	4,02	24,18
2031	-2032	6,56	32,22	78,59	72,06	47,42	32,38	27,05	30,77	12,79	10,68	7,07	3,99	30,13
2032	-2033	7,76	49,86	36,42	27,72	59,94	44,89	24,22	13,97	9,17	5,08	2,55	1,85	23,62
2033	-2034	11,64	9,53	49,90	25,56	33,26	29,15	21,46	13,28	10,75	6,19	4,16	3,10	18,16
2034	-2035	9,01	27,20	49,43	48,04	50,14	37,36	25,70	13,55	8,78	5,18	16,14	6,17	24,73
2035	-2036	5,88	42,24	31,59	30,27	23,55	25,55	30,41	13,32	15,26	6,42	7,54	6,07	19,84
2036	-2037	17,40	25,28	63,99	53,49	55,92	33,61	25,38	11,83	7,48	8,82	6,84	4,63	26,22
2037	-2038	12,49	22,92	20,33	25,98	35,28	25,72	22,59	14,75	8,25	4,92	2,54	2,51	16,53
2038	-2039	5,13	28,27	25,47	44,83	58,32	31,90	21,11	11,85	6,22	3,31	5,55	3,45	20,45
2039	-2040	5,14	30,77	49,08	32,62	23,27	25,79	14,86	8,45	10,89	4,74	3,04	3,33	17,67
2040	-2041	12,78	11,08	38,88	36,23	31,51	21,46	20,36	13,41	7,73	4,71	4,70	2,54	17,12
2041	-2042	13,18	59,55	54,70	45,15	56,18	33,68	27,31	19,42	7,80	4,56	2,81	5,54	27,49
2042	-2043	4,38	34,43	22,37	34,32	26,93	24,58	14,85	23,42	7,47	5,30	7,38	2,23	17,30
2043	-2044	10,30	6,75	14,61	17,97	24,46	13,27	29,46	12,90	7,78	5,33	2,58	1,79	12,27
2044	-2045	14,63	57,28	41,80	64,94	36,58	28,00	23,82	10,57	10,22	4,67	2,89	2,23	24,80
2045	-2046	20,07	19,81	85,20	78,56	46,91	33,40	31,53	17,39	8,20	4,93	2,51	4,22	29,40
2046	-2047	6,44	13,47	34,79	21,60	37,32	18,47	18,58	11,45	11,98	5,86	3,75	2,92	15,55
2047	-2048	14,50	33,34	21,48	21,12	15,20	14,96	9,70	7,05	7,08	5,68	4,57	5,71	13,37
2048	-2049	24,62	25,21	63,26	72,49	50,92	44,05	27,89	15,38	19,16	6,83	24,05	6,93	31,73
2049	-2050	9,28	19,35	40,80	29,37	31,23	34,49	24,96	28,40	11,01	9,51	5,15	3,61	20,60
2050	-2051	8,65	54,75	38,52	32,86	70,74	29,42	25,09	14,03	7,77	3,75	2,08	1,46	24,09
2051	-2052	6,29	11,26	57,90	47,00	39,26	33,24	25,53	13,81	7,49	3,77	2,67	2,19	20,87
2052	-2053	2,74	31,00	28,30	26,27	56,43	45,68	25,88	19,58	9,94	7,58	4,09	2,85	21,69
2053	-2054	8,34	18,14	38,39	27,56	43,79	36,86	25,34	12,48	9,64	9,07	3,57	2,96	19,68
2054	-2055	23,68	77,35	84,63	58,98	38,75	30,56	23,27	12,40	7,78	7,64	3,36	2,50	30,91
2055	-2056	5,77	13,54	27,54	33,91	37,33	27,95	21,50	14,09	7,07	4,08	6,89	2,92	16,88
2056	-2057	7,04	55,99	58,67	52,46	43,16	40,11	23,20	14,80	6,26	2,99	4,34	2,27	25,94
2057	-2058	3,95	13,06	29,27	22,24	34,22	27,11	16,35	20,37	12,75	5,88	5,51	3,08	16,15
2058	-2059	17,90	36,67	42,96	32,90	31,48	28,20	21,31	10,65	9,35	7,33	25,20	6,80	22,56
2059	-2060	9,92	7,16	15,59	30,06	24,49	17,80	14,41	12,17	5,74	4,20	2,61	3,03	12,26

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-14: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 245 GCM1

Qm	10,28	30,52	43,34	39,47	39,92	30,02	23,04	15,19	9,58	5,86	6,08	3,56	21,41
2030/31-2059/60													
Desv.	5,86	18,18	19,24	16,60	13,16	8,13	5,13	5,31	3,08	1,90	5,73	1,54	5,47
Max	24,62	77,35	85,20	78,56	70,74	45,68	31,53	30,77	19,16	10,68	25,20	6,93	31,73
Min	2,74	6,75	14,61	17,97	15,20	13,27	9,70	7,05	5,74	2,99	2,08	1,46	12,26

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-15: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 245 GCM2

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Annual
2030	-2031	9,17	15,61	48,00	57,99	53,95	26,32	26,22	12,59	6,18	3,58	18,29	4,13	23,50
2031	-2032	8,28	15,82	39,95	36,69	52,94	29,10	20,05	14,50	8,43	4,41	2,86	2,55	19,63
2032	-2033	3,18	10,71	49,99	41,53	25,86	35,43	36,43	19,41	9,97	5,96	12,73	12,11	21,94
2033	-2034	16,21	20,21	63,06	25,15	37,19	31,06	23,13	17,87	12,22	6,40	3,91	2,96	21,61
2034	-2035	7,29	4,60	28,11	44,33	29,98	18,67	21,11	11,43	8,84	6,38	5,74	3,82	15,86
2035	-2036	6,40	11,53	43,96	28,57	47,48	34,18	21,94	11,50	6,14	3,98	4,28	5,76	18,81
2036	-2037	6,95	14,95	34,48	37,92	45,23	69,49	30,98	20,13	12,04	5,47	2,87	3,16	23,64
2037	-2038	17,65	28,90	43,99	56,80	39,54	30,18	21,25	15,30	7,01	4,28	2,89	5,11	22,74
2038	-2039	3,77	10,84	11,47	10,70	29,68	24,11	12,61	22,68	9,55	5,10	4,61	3,07	12,35
2039	-2040	40,15	23,72	23,77	50,70	48,90	28,79	27,65	12,42	9,21	4,39	6,87	2,16	23,23
2040	-2041	5,15	12,07	53,64	19,07	26,67	19,91	15,08	11,34	6,01	4,17	2,74	2,60	14,87
2041	-2042	4,82	15,44	67,16	29,85	28,58	22,05	15,69	9,83	8,71	3,79	3,96	4,02	17,83
2042	-2043	2,24	21,89	16,20	38,47	20,94	27,58	19,55	17,83	8,98	6,78	5,47	2,50	15,70
2043	-2044	12,39	14,35	62,29	32,55	48,25	35,85	21,94	12,69	7,79	4,98	2,79	2,00	21,49
2044	-2045	3,73	28,12	23,58	48,46	54,74	31,69	24,45	14,66	8,02	4,65	8,91	5,41	21,37
2045	-2046	8,04	13,61	30,21	49,48	28,68	24,32	16,93	9,82	6,93	4,78	5,32	10,08	17,35
2046	-2047	4,48	22,50	53,24	30,13	33,44	22,61	16,34	9,03	6,88	9,75	2,85	13,34	18,71
2047	-2048	4,58	46,57	36,44	32,72	46,17	26,54	21,52	17,40	7,59	4,65	8,66	2,26	21,26
2048	-2049	20,56	19,14	33,54	43,99	30,90	29,38	23,06	11,77	14,43	7,16	4,25	6,46	20,39
2049	-2050	17,42	26,76	46,91	47,32	50,26	35,02	23,99	14,02	7,35	9,41	3,10	3,11	23,72
2050	-2051	2,19	9,82	34,20	49,86	31,53	31,41	31,06	18,54	17,72	9,91	5,31	17,42	21,58
2051	-2052	5,98	35,54	113,61	63,08	48,78	34,39	29,74	20,65	8,93	5,72	3,37	3,10	31,07
2052	-2053	5,56	14,03	24,30	29,19	54,25	35,04	25,05	18,99	8,57	8,10	4,58	4,12	19,32
2053	-2054	15,20	20,95	61,33	56,54	76,11	35,35	30,03	16,73	17,81	6,66	9,40	4,43	29,21
2054	-2055	27,21	20,88	41,19	44,51	40,90	27,54	16,36	12,07	7,24	4,42	2,92	1,93	20,60
2055	-2056	11,19	20,39	52,82	60,69	48,68	29,05	19,10	9,43	5,56	3,18	2,81	19,32	23,52
2056	-2057	15,29	31,47	46,30	24,82	31,74	29,16	21,79	15,29	11,19	5,33	4,45	4,77	20,13
2057	-2058	2,59	4,72	17,00	21,99	18,73	12,00	11,22	7,68	3,89	2,57	2,05	2,75	8,93
2058	-2059	12,32	12,17	19,46	44,71	37,51	39,03	26,04	16,48	13,48	7,73	3,93	7,06	19,99
2059	-2060	3,70	21,74	58,62	56,83	43,11	65,00	31,04	21,05	11,33	5,82	3,08	12,52	27,82

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-16: Estadígrafos de caudales medios mensuales Escenario SSP 245 GCM2

Qm 2030/31- 2059/60	10,12	18,97	42,63	40,49	40,36	31,34	22,71	14,77	9,27	5,65	5,17	5,80	20,61
Desv.	8,43	9,10	20,39	13,48	12,54	11,41	6,02	4,06	3,32	1,89	3,47	4,66	4,55
Max	40,15	46,57	113,61	63,08	76,11	69,49	36,43	22,68	17,81	9,91	18,29	19,32	31,07
Min	2,19	4,60	11,47	10,70	18,73	12,00	11,22	7,68	3,89	2,57	2,05	1,93	8,93

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-17: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 245 GCM3

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Annual
2030	-2031	25,88	42,85	64,20	48,08	51,51	32,82	31,35	17,85	12,02	6,48	7,76	3,20	28,67
2031	-2032	12,05	64,49	41,89	67,70	51,98	39,97	33,55	19,61	9,27	6,18	3,70	3,96	29,53
2032	-2033	22,41	30,51	46,28	26,75	25,83	20,82	11,37	9,11	8,26	3,98	12,73	3,98	18,50
2033	-2034	15,21	19,01	30,58	41,82	43,56	36,83	23,04	13,64	13,36	5,11	4,38	6,17	21,06
2034	-2035	9,11	18,18	51,89	34,10	27,02	21,96	21,93	11,59	7,26	11,59	4,27	7,66	18,88
2035	-2036	24,33	24,88	44,33	49,31	22,35	18,33	22,16	11,09	8,88	5,29	7,93	3,78	20,22
2036	-2037	27,74	23,78	46,62	49,53	75,02	53,60	43,64	25,31	14,83	6,86	11,89	14,40	32,77
2037	-2038	34,69	77,93	58,84	46,79	67,72	62,48	40,27	29,64	16,51	9,10	18,21	20,72	40,24
2038	-2039	20,96	26,77	80,96	32,21	41,71	26,21	15,19	9,02	5,02	4,03	7,91	7,27	23,11
2039	-2040	9,98	12,35	20,07	13,38	24,32	13,33	12,40	12,46	6,49	4,13	13,97	20,77	13,64
2040	-2041	5,63	10,59	36,98	24,51	16,01	18,77	29,86	10,97	8,09	4,67	3,14	3,92	14,43
2041	-2042	5,16	7,26	64,48	38,94	33,38	45,73	44,99	27,84	15,85	9,64	5,48	7,41	25,51
2042	-2043	17,78	19,73	22,59	38,04	26,43	30,48	15,40	10,99	7,85	4,01	3,29	3,78	16,70
2043	-2044	10,30	17,18	29,66	33,97	42,89	50,35	27,80	16,13	12,09	5,72	4,21	7,78	21,51
2044	-2045	3,45	31,96	37,55	24,18	39,37	21,96	17,27	10,38	6,53	3,92	6,19	4,82	17,30
2045	-2046	4,87	17,08	24,56	46,23	44,70	24,34	43,41	20,51	11,75	16,04	12,71	12,14	23,19
2046	-2047	47,05	40,65	60,55	94,21	75,82	52,37	30,34	19,17	9,90	5,35	3,38	3,89	36,89
2047	-2048	20,72	97,40	38,87	38,48	56,70	25,74	36,74	15,03	7,86	5,11	2,76	2,64	29,00
2048	-2049	16,71	100,64	24,89	47,03	45,17	27,37	23,34	13,22	8,40	6,53	9,88	3,68	27,24
2049	-2050	30,89	33,09	34,22	38,90	48,85	26,73	19,14	20,72	10,17	5,66	3,67	4,20	23,02
2050	-2051	26,72	31,93	24,14	27,29	18,79	16,27	9,51	14,61	9,05	5,02	4,48	2,90	15,89
2051	-2052	18,34	33,37	32,15	31,04	45,04	30,32	18,12	13,18	7,01	4,46	4,59	3,20	20,07
2052	-2053	21,11	49,33	74,53	77,52	154,00	49,45	37,65	25,46	16,95	6,01	4,69	4,21	43,41
2053	-2054	9,14	11,94	30,98	33,74	43,80	34,91	29,91	14,14	8,17	4,04	2,14	1,96	18,74
2054	-2055	12,05	28,91	28,51	32,65	76,16	37,15	27,86	16,18	11,07	5,05	12,19	4,46	24,35
2055	-2056	7,48	11,24	51,26	20,80	73,47	30,70	25,26	14,12	9,33	4,74	2,91	1,79	21,09
2056	-2057	18,25	46,61	35,65	37,31	32,97	26,67	19,30	10,34	5,87	3,37	1,91	2,13	20,03
2057	-2058	1,77	4,21	25,16	13,14	12,82	15,88	7,89	6,98	4,21	22,67	15,19	6,52	11,37
2058	-2059	42,24	26,64	32,02	52,08	79,43	33,30	22,51	15,82	10,47	5,79	3,56	5,43	27,44
2059	-2060	14,27	40,68	63,99	61,15	84,04	33,37	33,49	19,50	9,39	4,69	4,40	3,84	31,07

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-18: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 245 GCM3

Qm 2030/31-2059/60	17,88	33,37	41,95	40,70	49,36	31,94	25,82	15,82	9,73	6,51	6,78	6,09	23,83
Desv.	11,21	24,27	16,51	17,64	28,33	12,49	10,41	5,76	3,28	4,02	4,46	4,86	7,68
Max	47,05	100,64	80,96	94,21	154,00	62,48	44,99	29,64	16,95	22,67	18,21	20,77	43,41
Min	1,77	4,21	20,07	13,14	12,82	13,33	7,89	6,98	4,21	3,37	1,91	1,79	11,37

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-19: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 370 GCM1

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Anual
2030	-2031	13,19	35,53	27,84	55,11	32,05	23,06	20,50	9,54	9,01	4,91	4,02	4,85	19,97
2031	-2032	12,03	17,21	37,06	52,15	38,29	24,09	34,29	16,60	8,50	6,15	3,99	3,70	21,17
2032	-2033	3,72	9,92	96,12	69,97	42,02	37,41	28,77	23,05	10,10	8,08	4,31	3,65	28,09
2033	-2034	4,76	34,00	82,99	55,76	40,45	27,68	21,44	17,86	7,95	4,32	3,42	3,09	25,31
2034	-2035	5,67	36,59	36,94	24,24	31,57	37,02	23,33	12,31	8,89	4,27	2,92	2,03	18,81
2035	-2036	5,03	41,98	58,84	45,57	35,18	24,81	21,36	16,73	13,48	5,81	4,24	4,80	23,15
2036	-2037	1,77	6,83	27,10	13,36	41,22	23,55	30,94	13,95	11,56	5,67	2,92	7,70	15,55
2037	-2038	17,33	43,42	60,16	35,16	32,65	34,88	29,98	23,22	16,01	7,83	6,07	3,92	25,89
2038	-2039	13,07	19,45	38,36	50,56	61,58	26,36	29,28	17,23	9,01	5,59	3,48	2,87	23,07
2039	-2040	19,09	29,00	107,88	66,00	61,11	37,35	25,35	17,20	7,62	3,33	9,85	8,90	32,72
2040	-2041	9,87	7,51	105,34	75,12	38,09	30,09	25,45	17,29	8,12	5,76	3,31	2,09	27,34
2041	-2042	1,53	4,17	17,29	12,56	16,29	13,36	11,24	15,62	6,41	9,54	11,05	6,50	10,46
2042	-2043	15,55	27,43	20,93	18,10	23,71	12,67	13,23	8,98	4,30	3,24	1,92	1,84	12,66
2043	-2044	1,78	15,75	18,42	27,82	22,86	25,81	15,18	11,51	11,59	5,05	3,53	2,48	13,48
2044	-2045	3,23	32,29	33,50	19,20	27,63	28,44	27,97	14,76	9,97	5,63	8,01	2,69	17,78
2045	-2046	21,07	89,43	59,78	75,25	38,85	29,85	22,16	13,44	14,03	4,49	3,45	2,60	31,20
2046	-2047	3,52	6,46	34,52	21,71	41,89	22,86	35,10	31,37	11,04	10,31	4,48	3,23	18,87
2047	-2048	5,06	59,77	82,31	46,12	31,30	23,61	17,69	7,84	3,93	2,42	1,45	1,09	23,55
2048	-2049	3,94	12,24	39,98	27,26	25,20	25,87	17,85	11,57	6,37	3,78	2,50	2,08	14,89
2049	-2050	11,42	23,69	84,49	39,25	66,54	29,48	22,20	13,08	9,67	4,33	3,08	2,60	25,82
2050	-2051	2,97	46,34	41,32	45,40	40,75	26,11	18,65	20,06	6,81	4,28	2,82	1,72	21,44
2051	-2052	3,34	16,34	37,79	17,71	22,89	19,69	16,03	12,49	10,47	10,90	4,70	3,60	14,66
2052	-2053	2,89	14,53	34,87	35,55	29,23	25,61	18,37	15,87	6,72	4,13	24,01	5,22	18,08
2053	-2054	5,03	16,64	14,47	17,51	28,07	20,74	21,83	13,28	7,73	4,55	6,16	2,20	13,18
2054	-2055	3,87	16,21	35,38	31,59	61,11	25,34	23,96	11,80	12,01	4,75	3,04	2,75	19,32
2055	-2056	2,64	18,32	45,96	41,74	47,84	31,86	26,93	20,41	11,71	6,39	4,64	2,61	21,75
2056	-2057	10,05	23,39	64,08	65,59	28,30	35,23	34,27	26,17	14,53	8,04	4,57	2,73	26,41
2057	-2058	5,10	16,40	47,86	41,59	32,03	22,33	16,50	14,85	5,34	5,13	3,84	5,79	18,06
2058	-2059	3,77	28,57	44,75	23,76	25,86	28,14	22,57	10,95	7,34	5,19	9,51	2,78	17,77
2059	-2060	4,26	12,82	48,60	48,19	44,91	26,49	22,12	15,97	9,20	5,97	3,75	2,61	20,41

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-20: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 370 GCM1

Qm 2030/31-2059/60	7,22	25,41	49,50	39,96	36,98	26,66	23,15	15,83	9,31	5,66	5,17	3,49	20,70
Desv.	5,59	18,04	25,81	18,81	12,63	6,10	6,25	5,19	2,96	2,04	4,24	1,81	5,56
Max	21,07	89,43	107,88	75,25	66,54	37,41	35,10	31,37	16,01	10,90	24,01	8,90	32,72
Min	1,53	4,17	14,47	12,56	16,29	12,67	11,24	7,84	3,93	2,42	1,45	1,09	10,46

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-21: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 370 GCM2

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Annual
2030	-2031	1,81	9,47	61,45	32,56	67,90	30,99	29,80	31,94	14,87	7,20	6,30	8,29	25,22
2031	-2032	6,90	35,31	38,94	48,41	29,44	32,10	17,32	14,31	12,58	6,26	3,59	3,39	20,71
2032	-2033	21,83	32,02	41,52	34,56	38,15	24,79	21,42	12,37	6,74	4,29	5,03	8,67	20,95
2033	-2034	7,40	6,92	21,64	27,39	17,55	17,05	9,28	12,67	8,17	3,87	8,87	9,34	12,51
2034	-2035	10,12	48,30	50,91	66,83	49,15	61,03	25,71	18,86	9,86	4,53	4,46	2,19	29,33
2035	-2036	26,21	23,78	98,99	40,29	35,47	31,20	25,02	14,57	13,07	6,32	9,52	3,52	27,33
2036	-2037	9,65	36,82	87,26	41,60	66,07	32,64	49,14	29,36	15,05	7,79	4,18	3,38	31,91
2037	-2038	21,02	28,24	23,34	20,79	35,16	24,67	19,47	11,66	7,48	4,28	4,31	17,38	18,15
2038	-2039	13,51	36,30	83,23	64,12	34,95	30,42	22,49	20,21	8,67	5,53	4,04	2,85	27,19
2039	-2040	24,80	29,48	74,44	34,45	30,56	35,38	32,40	14,88	10,28	6,14	5,42	4,48	25,23
2040	-2041	7,50	27,19	26,09	62,29	78,21	51,65	42,44	24,75	13,52	6,24	4,03	4,23	29,01
2041	-2042	6,54	29,71	54,17	57,63	55,79	36,90	26,00	18,34	8,71	6,19	7,29	3,54	25,90
2042	-2043	12,16	7,50	30,01	29,06	67,78	48,92	31,49	19,82	14,76	6,77	5,09	4,19	23,13
2043	-2044	2,49	12,80	23,98	35,70	33,40	30,93	22,23	12,54	7,32	4,06	2,28	2,44	15,85
2044	-2045	7,61	38,93	22,88	59,08	45,47	25,96	23,30	11,67	6,90	4,12	2,43	6,29	21,22
2045	-2046	3,94	10,72	19,80	86,90	34,84	33,84	36,51	14,41	8,79	4,71	2,22	4,16	21,74
2046	-2047	15,84	14,30	40,97	51,39	72,12	43,94	30,54	22,18	10,66	7,45	6,37	9,59	27,11
2047	-2048	4,27	13,81	22,33	37,12	55,54	30,58	29,46	15,94	11,54	6,73	6,60	3,41	19,78
2048	-2049	5,32	19,88	88,57	36,16	32,18	35,56	21,86	19,65	8,50	6,61	6,57	4,73	23,80
2049	-2050	16,04	28,29	102,86	46,68	38,41	30,79	20,71	10,21	5,78	3,14	2,96	4,97	25,90
2050	-2051	5,55	21,13	20,50	39,96	43,35	30,33	21,47	21,61	10,64	6,51	4,16	5,69	19,24
2051	-2052	6,25	33,21	56,31	43,58	63,52	35,99	26,05	13,89	14,80	6,99	14,02	4,44	26,59
2052	-2053	20,07	33,77	33,13	37,57	31,31	25,64	26,87	17,77	13,89	6,78	8,64	3,18	21,55
2053	-2054	12,06	12,51	41,09	42,43	43,04	31,33	18,78	11,83	5,54	2,99	2,55	6,14	19,19
2054	-2055	3,50	20,01	54,76	82,36	39,36	35,72	27,89	23,37	10,34	7,20	5,31	3,08	26,08
2055	-2056	8,02	25,72	23,88	35,94	56,49	38,90	43,14	18,26	10,42	5,45	5,05	8,80	23,34
2056	-2057	4,89	18,30	37,54	19,23	73,94	28,94	23,42	11,65	10,62	4,53	4,75	12,36	20,85
2057	-2058	5,90	63,50	44,44	61,97	89,32	38,21	37,43	22,92	10,53	6,27	13,49	3,74	33,14
2058	-2059	9,79	13,52	18,94	38,29	25,31	22,99	22,37	11,55	8,48	5,03	6,61	3,06	15,49
2059	-2060	8,14	13,64	33,74	56,48	31,36	24,45	16,11	10,93	5,53	3,27	1,94	5,89	17,62

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-22: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 370 GCM2

Qm 2030/31- 2059/60	10,30	24,84	45,92	45,69	47,17	33,39	26,67	17,14	10,13	5,58	5,60	5,58	23,17
Desv.	6,73	12,93	25,37	16,38	18,09	8,97	8,59	5,61	2,92	1,39	2,97	3,35	4,88
Max	26,21	63,50	102,86	86,90	89,32	61,03	49,14	31,94	15,05	7,79	14,02	17,38	33,14
Min	1,81	6,92	18,94	19,23	17,55	17,05	9,28	10,21	5,53	2,99	1,94	2,19	12,51

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-23: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 370 GCM3

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Annual
2030	-2031	10,22	19,98	25,09	38,35	31,96	44,72	17,18	11,89	9,01	3,95	14,98	10,14	19,79
2031	-2032	7,12	18,08	24,73	24,49	25,77	31,70	15,76	12,22	8,93	4,44	2,99	7,92	15,34
2032	-2033	11,95	31,64	77,70	64,46	98,60	43,40	27,94	20,22	8,60	6,10	6,92	5,84	33,61
2033	-2034	11,33	9,99	24,03	19,24	22,85	12,87	12,72	8,96	7,66	3,83	3,16	7,81	12,04
2034	-2035	20,10	35,56	53,65	28,76	38,88	38,17	19,06	13,75	11,28	10,58	4,08	17,75	24,30
2035	-2036	9,97	7,97	22,10	12,91	22,07	13,91	15,10	8,34	5,73	5,79	2,54	4,27	10,89
2036	-2037	11,08	24,39	73,10	69,97	58,00	48,18	34,28	20,57	12,91	5,98	8,00	4,51	30,91
2037	-2038	16,96	21,97	34,02	42,49	24,01	21,65	33,43	12,76	12,68	6,40	4,28	2,35	19,42
2038	-2039	3,08	13,20	17,04	39,09	16,30	25,26	11,78	9,62	5,39	3,12	7,82	6,73	13,20
2039	-2040	14,21	17,46	26,34	16,43	26,83	16,82	10,79	8,51	4,66	2,76	3,21	2,38	12,53
2040	-2041	8,79	21,65	27,84	18,36	35,97	23,16	17,90	10,20	6,53	3,60	2,20	1,99	14,85
2041	-2042	2,29	74,01	35,53	42,56	49,10	26,18	19,64	17,44	7,89	3,69	2,57	2,57	23,62
2042	-2043	1,45	34,49	35,74	35,42	23,79	32,37	20,65	11,46	7,43	4,47	2,36	3,01	17,72
2043	-2044	8,54	29,07	30,70	22,78	22,92	22,77	15,51	9,87	11,81	4,48	2,80	2,38	15,30
2044	-2045	12,93	13,62	25,14	42,20	28,04	21,79	13,22	9,15	9,75	4,90	2,95	3,65	15,61
2045	-2046	3,34	16,58	16,43	23,06	26,46	21,11	10,91	7,77	10,79	7,68	5,29	3,82	12,77
2046	-2047	9,19	9,09	39,61	42,82	96,31	46,51	78,36	37,98	20,15	12,93	5,41	8,81	33,93
2047	-2048	7,30	36,66	50,06	69,12	135,73	38,46	32,96	29,82	10,63	6,16	5,26	6,98	35,76
2048	-2049	12,69	51,52	30,23	22,24	36,58	35,57	15,59	9,84	5,86	3,02	3,95	1,73	19,07
2049	-2050	30,69	15,17	19,84	32,01	81,37	46,37	25,03	18,47	9,13	4,55	17,46	12,00	26,01
2050	-2051	13,32	38,05	39,50	48,83	37,97	37,69	17,84	13,90	7,50	4,13	6,39	11,71	23,07
2051	-2052	8,19	23,99	63,21	33,30	33,44	41,36	37,02	21,98	11,07	9,52	6,10	3,33	24,38
2052	-2053	4,75	27,19	21,26	36,00	57,78	57,94	25,19	17,07	10,52	5,48	6,80	3,71	22,81
2053	-2054	20,88	56,32	31,71	56,05	37,56	29,81	29,16	12,77	12,87	6,57	13,43	7,66	26,23
2054	-2055	13,71	16,00	25,93	27,74	25,14	16,24	15,12	8,42	4,99	2,67	4,55	4,01	13,71
2055	-2056	17,40	19,80	30,58	25,49	21,62	15,13	25,20	10,22	7,50	5,02	3,02	1,88	15,24
2056	-2057	19,66	16,45	33,01	52,52	62,38	54,10	34,89	22,51	16,78	10,54	7,38	7,95	28,18
2057	-2058	19,31	22,82	24,09	27,33	74,52	27,70	23,02	16,00	10,17	5,34	9,10	4,01	21,95
2058	-2059	11,36	17,72	34,17	25,21	21,72	15,86	10,05	6,17	3,80	2,48	47,48	13,40	17,45
2059	-2060	21,45	43,10	109,41	33,02	29,98	39,78	17,10	19,68	7,05	5,59	2,83	2,48	27,62

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-24: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 370 GCM3

Qm 2030/31- 2059/60	12,11	26,12	36,73	35,74	43,46	31,55	22,75	14,59	9,30	5,53	7,18	5,89	20,91
Desv.	6,62	15,02	20,52	15,21	28,39	12,75	13,19	7,08	3,57	2,53	8,50	3,99	7,09
Max	30,69	74,01	109,41	69,97	135,73	57,94	78,36	37,98	20,15	12,93	47,48	17,75	35,76
Min	1,45	7,97	16,43	12,91	16,30	12,87	10,05	6,17	3,80	2,48	2,20	1,73	10,89

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-25: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 585 GCM1

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Anual
2030	-2031	6,66	29,23	133,61	59,35	87,32	48,58	33,64	21,76	19,24	6,16	3,71	2,96	37,69
2031	-2032	4,87	13,32	36,25	72,19	61,51	33,24	30,88	18,79	18,97	9,47	5,10	4,05	25,72
2032	-2033	23,74	7,68	37,80	37,17	25,76	21,68	17,91	29,35	15,60	8,83	6,00	3,71	19,60
2033	-2034	9,82	58,79	38,96	28,11	28,74	22,99	14,30	7,23	5,69	2,77	2,77	1,94	18,51
2034	-2035	13,79	65,96	133,90	54,42	47,49	41,53	33,58	21,08	11,29	5,49	2,96	2,10	36,13
2035	-2036	6,07	20,78	42,56	48,56	43,64	27,20	20,05	13,22	7,51	3,47	2,36	2,75	19,85
2036	-2037	2,22	26,69	48,66	30,09	23,60	22,85	21,22	8,87	6,78	5,01	3,26	1,99	16,77
2037	-2038	2,59	39,29	91,13	61,21	40,22	57,22	29,09	21,05	14,25	4,98	2,74	2,95	30,56
2038	-2039	7,06	5,99	34,66	19,80	46,56	23,53	21,61	16,16	7,52	8,96	13,21	4,38	17,45
2039	-2040	6,27	30,94	30,70	44,08	41,07	52,30	31,63	32,40	14,74	10,89	5,58	6,50	25,59
2040	-2041	2,73	20,89	29,34	62,87	54,55	35,79	28,44	17,95	10,62	8,64	4,15	2,81	23,23
2041	-2042	7,31	42,18	39,85	51,18	36,76	29,78	23,08	14,88	12,34	4,85	3,33	4,60	22,51
2042	-2043	4,19	25,83	23,03	30,97	47,71	39,33	31,68	18,53	11,24	6,29	4,15	2,86	20,49
2043	-2044	3,13	10,76	57,82	19,44	62,01	34,16	38,19	22,87	14,86	6,40	3,45	2,70	22,98
2044	-2045	23,25	21,06	56,02	34,84	33,93	25,44	16,28	12,39	5,57	3,88	2,35	1,47	19,71
2045	-2046	14,40	59,81	30,82	34,59	39,95	25,20	23,33	10,46	7,54	5,78	44,62	8,14	25,39
2046	-2047	34,61	41,80	51,26	57,62	51,13	26,36	25,51	12,17	11,19	4,94	3,06	1,98	26,80
2047	-2048	4,03	10,92	64,62	38,39	33,99	36,49	26,37	19,80	9,86	8,52	5,37	3,33	21,81
2048	-2049	5,02	17,90	30,02	23,25	45,76	23,43	21,92	11,14	7,26	4,94	8,54	4,52	16,97
2049	-2050	8,11	25,65	29,47	64,03	39,92	74,38	49,59	29,87	16,32	9,11	5,80	3,11	29,61
2050	-2051	9,20	87,95	30,86	50,41	53,24	50,57	24,96	19,38	14,05	5,45	4,05	2,51	29,39
2051	-2052	13,49	12,13	29,60	24,60	47,89	31,62	23,87	12,95	9,56	4,42	2,38	1,70	17,85
2052	-2053	9,50	24,55	42,47	39,65	39,02	31,06	20,38	10,36	9,43	6,05	2,82	3,49	19,90
2053	-2054	15,51	13,91	71,10	76,14	48,78	34,63	25,88	20,28	9,64	5,39	3,61	3,04	27,33
2054	-2055	6,93	43,97	61,99	60,75	40,76	33,74	21,30	13,36	15,88	4,93	5,50	3,69	26,07
2055	-2056	5,97	7,60	38,68	21,79	38,49	28,19	17,67	12,62	14,46	6,96	3,90	5,78	16,84
2056	-2057	11,73	27,72	50,86	41,25	40,26	27,24	22,20	15,31	8,29	5,02	7,41	2,84	21,68
2057	-2058	10,39	16,11	94,75	71,99	29,89	28,45	18,53	8,45	12,36	4,15	13,93	4,99	26,17
2058	-2059	4,00	20,94	24,66	38,12	17,64	16,41	14,98	8,58	6,77	8,21	10,82	9,07	15,02
2059	-2060	6,02	72,34	36,82	41,55	35,10	25,64	16,13	10,34	7,24	5,25	2,66	2,19	21,77

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-26: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 585 GCM1

Qm 2030/31- 2059/60	9,42	30,09	50,74	44,61	42,76	33,63	24,81	16,39	11,20	6,17	6,32	3,61	23,31
Desv.	7,23	20,89	28,75	16,61	13,30	12,43	7,67	6,57	3,90	2,01	7,84	1,81	5,59
Max	34,61	87,95	133,90	76,14	87,32	74,38	49,59	32,40	19,24	10,89	44,62	9,07	37,69
Min	2,22	5,99	23,03	19,44	17,64	16,41	14,30	7,23	5,57	2,77	2,35	1,47	15,02

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-27: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 585 GCM2

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Annual
2030	-2031	7,29	27,45	16,68	26,29	42,22	33,35	15,57	20,80	9,39	8,39	11,79	4,52	18,65
2031	-2032	7,39	28,24	40,86	45,33	50,01	26,35	32,21	30,35	12,58	8,44	19,93	13,57	26,27
2032	-2033	17,17	40,88	56,49	59,73	34,89	41,43	29,63	14,71	12,11	5,74	3,77	3,78	26,69
2033	-2034	8,80	16,22	85,49	54,26	42,34	30,34	28,26	17,62	11,56	5,76	4,95	4,49	25,84
2034	-2035	2,47	7,53	15,00	34,22	21,65	17,95	19,04	8,65	6,33	3,22	2,62	1,92	11,72
2035	-2036	36,00	19,70	21,76	29,49	30,61	30,83	23,12	12,23	10,35	5,01	3,10	7,59	19,15
2036	-2037	6,24	23,66	27,29	48,02	31,75	35,00	20,67	15,68	10,76	5,25	3,83	2,81	19,25
2037	-2038	8,19	19,55	59,27	26,58	56,32	27,40	26,69	17,03	9,41	5,63	5,67	10,00	22,65
2038	-2039	7,26	8,94	61,61	38,84	34,12	27,11	16,96	14,13	6,75	5,02	2,71	5,35	19,07
2039	-2040	4,00	10,77	29,15	29,04	58,46	33,45	28,07	16,40	9,22	5,34	3,73	2,56	19,18
2040	-2041	13,13	19,05	75,57	39,93	45,09	37,35	27,41	18,86	13,24	10,32	5,17	7,54	26,05
2041	-2042	5,62	6,78	37,05	49,77	53,93	41,09	31,38	24,38	10,54	6,15	4,41	10,13	23,43
2042	-2043	14,32	15,69	49,44	24,56	34,69	27,90	16,45	10,26	9,70	4,70	4,52	3,42	17,97
2043	-2044	4,24	30,64	39,23	26,49	59,39	38,33	35,12	24,68	12,63	7,50	4,79	2,97	23,84
2044	-2045	2,42	11,69	17,57	8,62	39,88	29,37	13,92	13,07	7,63	3,91	3,77	4,68	13,04
2045	-2046	2,49	10,02	48,81	43,65	45,33	28,42	27,15	16,94	8,42	5,38	4,48	2,23	20,28
2046	-2047	3,67	9,45	24,43	47,43	22,20	22,34	36,20	13,05	12,72	7,30	5,70	3,36	17,32
2047	-2048	2,40	5,58	17,03	40,66	26,74	31,59	18,37	11,05	6,15	3,27	4,73	3,12	14,22
2048	-2049	5,30	16,70	16,23	39,33	24,30	21,06	17,89	8,65	5,76	3,01	2,06	1,73	13,50
2049	-2050	23,16	46,25	85,52	29,47	38,91	26,59	21,15	10,92	7,14	8,04	3,24	5,66	25,50
2050	-2051	11,10	19,85	31,49	40,79	28,54	31,41	16,72	14,57	6,88	8,03	8,25	7,97	18,80
2051	-2052	15,78	14,17	31,61	26,66	41,84	20,27	13,56	8,41	5,70	7,75	8,22	2,96	16,41
2052	-2053	2,91	28,68	20,40	53,90	55,34	48,15	37,42	24,25	11,41	7,29	4,32	11,11	25,43
2053	-2054	26,22	21,69	56,00	42,52	39,17	49,27	24,96	15,29	10,48	4,77	2,90	2,13	24,62
2054	-2055	3,56	4,72	26,42	37,45	21,43	33,59	30,89	23,82	11,35	7,29	5,45	3,26	17,44
2055	-2056	14,63	11,42	62,40	40,53	29,93	24,98	21,18	10,34	8,77	4,14	7,61	4,13	20,00
2056	-2057	31,11	17,83	20,41	30,70	49,08	19,42	23,06	13,01	14,49	6,50	15,44	8,38	20,79
2057	-2058	9,75	27,88	41,78	40,81	29,25	20,68	18,19	13,58	7,42	5,07	5,17	2,54	18,51
2058	-2059	4,14	2,80	21,14	29,42	38,00	44,68	23,28	14,90	12,39	5,00	3,13	2,66	16,80
2059	-2060	11,67	7,91	12,52	34,59	38,45	42,55	36,23	20,65	13,93	7,39	8,13	12,66	20,56

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-28: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 585 GCM2

Qm 2030/31-2059/60	10.41	17.73	38.29	37.30	38.80	31.41	24.36	15.94	9.84	6.02	5.79	5.31	20.10
Desv.	8,78	10,54	21,33	10,82	11,21	8,52	7,10	5,49	2,59	1,78	3,89	3,39	4,20
Max	36,00	46,25	85,52	59,73	59,39	49,27	37,42	30,35	14,49	10,32	19,93	13,57	26,69
Min	2,40	2,80	12,52	8,62	21,43	17,95	13,56	8,41	5,70	3,01	2,06	1,73	11,72

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-29: Serie De Caudales Medios Simulados Para Escenario SSP 585 GCM3

Año		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Anual
2030	-2031	9,79	34,82	70,56	91,24	55,10	50,02	40,15	26,35	25,87	10,01	6,67	9,43	35,84
2031	-2032	9,24	23,21	52,76	53,01	57,06	31,05	30,34	15,04	9,15	6,07	7,63	2,79	24,78
2032	-2033	7,79	24,24	59,38	38,44	43,80	29,17	23,56	12,01	6,89	4,37	2,32	3,61	21,30
2033	-2034	17,20	36,50	90,49	41,44	30,62	35,22	31,93	18,14	10,16	6,46	13,25	3,47	27,91
2034	-2035	6,04	54,56	47,75	43,80	91,36	65,69	47,47	31,20	17,78	10,43	6,09	14,20	36,36
2035	-2036	30,47	16,84	81,91	35,82	36,43	28,05	17,11	10,09	8,99	5,02	3,05	2,95	23,06
2036	-2037	1,92	9,12	9,45	9,68	11,95	9,87	10,65	7,13	11,89	4,49	3,78	4,74	7,89
2037	-2038	19,90	28,94	18,99	27,76	25,82	16,82	10,83	10,65	7,63	3,34	5,81	6,27	15,23
2038	-2039	47,52	43,44	54,03	43,29	78,56	36,98	24,77	15,24	6,87	3,57	2,73	22,05	31,59
2039	-2040	12,33	17,90	46,64	29,97	19,79	14,94	12,65	30,90	8,73	6,64	8,49	7,40	18,03
2040	-2041	11,17	40,75	29,35	39,38	101,56	35,21	34,32	29,04	11,68	7,76	7,42	9,81	29,79
2041	-2042	24,57	43,58	63,91	38,77	45,50	34,51	20,67	14,43	8,16	4,18	8,71	5,13	26,01
2042	-2043	8,71	37,00	30,91	21,92	23,50	14,35	9,11	6,84	3,89	2,52	52,75	10,11	18,47
2043	-2044	17,57	14,17	61,95	46,25	58,58	30,42	22,94	11,60	6,09	3,26	1,83	1,80	23,04
2044	-2045	11,37	53,72	36,64	25,28	22,65	20,11	16,88	15,31	5,75	3,78	5,37	4,24	18,43
2045	-2046	16,15	19,54	28,59	37,34	51,21	25,93	55,35	22,26	12,41	10,44	7,24	4,12	24,21
2046	-2047	16,40	77,93	48,16	64,97	98,83	75,35	45,75	25,36	12,96	8,04	16,91	6,35	41,42
2047	-2048	19,87	15,65	30,96	78,93	48,84	51,72	36,50	17,74	17,38	7,04	6,22	9,95	28,40
2048	-2049	11,41	14,84	37,93	67,05	38,91	44,49	35,18	28,12	15,06	9,92	6,55	40,98	29,20
2049	-2050	35,97	48,27	58,10	71,35	64,53	55,77	32,22	16,43	9,11	4,59	3,09	2,46	33,49
2050	-2051	7,01	5,66	26,34	11,43	24,78	16,59	10,02	12,05	5,87	3,51	5,47	2,39	10,93
2051	-2052	15,64	29,89	36,47	31,34	76,90	29,39	21,04	17,55	8,19	5,30	3,81	3,06	23,22
2052	-2053	20,60	21,70	56,98	25,66	68,01	71,83	39,92	26,55	15,49	8,07	4,84	4,49	30,34
2053	-2054	33,91	31,36	39,08	43,84	64,79	34,13	24,67	13,11	9,01	4,79	2,47	11,26	26,04
2054	-2055	5,84	15,98	31,48	25,61	36,37	21,70	14,85	14,63	10,06	5,70	3,38	2,18	15,65
2055	-2056	16,60	32,65	49,00	42,94	36,62	32,47	18,89	9,49	7,44	3,52	9,24	2,48	21,78
2056	-2057	3,55	35,22	26,57	31,64	44,20	25,24	23,01	13,95	7,73	6,20	3,64	5,80	18,90
2057	-2058	19,66	25,73	18,20	23,89	45,64	18,93	17,78	11,35	6,63	5,42	3,76	3,42	16,70
2058	-2059	6,26	19,04	59,83	32,16	67,02	45,40	31,16	19,00	10,23	5,23	3,33	4,40	25,26
2059	-2060	2,05	10,54	57,37	35,85	37,63	26,71	18,93	11,38	10,22	5,26	2,83	1,87	18,39

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9-30: Estadígrafos De Caudales Medios Mensuales Escenario SSP 585 GCM3

Qm 2030/31- 2059/60	15,55	29,43	45,33	40,34	50,22	34,27	25,95	17,10	10,24	5,83	7,29	7,11	24,05
Desv.	10,62	16,00	19,00	18,74	23,36	16,86	12,05	7,14	4,51	2,26	9,20	7,76	7,63
Max	47,52	77,93	90,49	91,24	101,56	75,35	55,35	31,20	25,87	10,44	52,75	40,98	41,42
Min	1,92	5,66	9,45	9,68	11,95	9,87	9,11	6,84	3,89	2,52	1,83	1,80	7,89

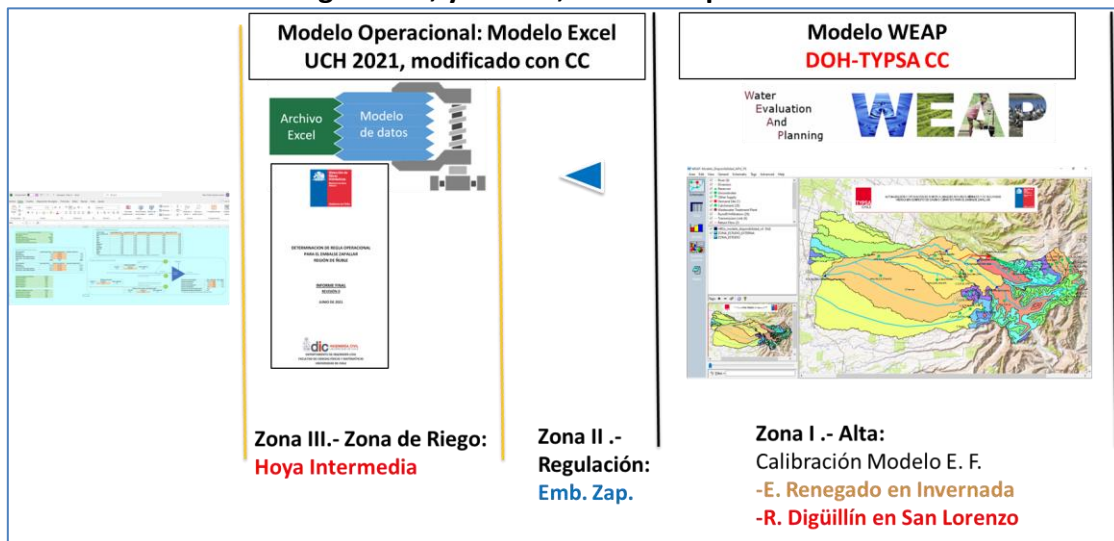
Fuente: Elaboración Propia

10. ANÁLISIS DE SEGURIDAD HÍDRICA

10.1. APLICACIÓN HIDROLOGÍA ACTUALIZADA SOBRE REGLA DE OPERACIÓN

En el Capítulo 9 se llevó a cabo la estimación disponibilidad histórica y futura, tanto de la zona afluente al Embalse Zapallar, como la hoya intermedia. Estos insumos permitieron implementar el modelo operacional considerando componente de cambio climático. En la Figura 10-1 se muestra el diagrama de flujo implementado en el presente estudio para llevar a cabo las satisfacciones de riego. En el presente acápite se llevó a cabo la evaluación de la Regla Operacional.

Figura 10-1: Diagrama de flujo desde Zona I, Zona Alto, Diguillín, Zona II, Embalse de Regulación, y Zona 3, Modelo Operacional



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, los siguientes acápite llevan a cabo la descripción de las componentes del Modelo Operacional del embalse Zapallar modificado y actualizado con la componente de cambio climático. En el Anexo 6 “Modelo Operacional” se adjuntan las simulaciones del modelo operacional bajo cambio climático.

10.2. DIAGNÓSTICO REGLA DE OPERACIÓN

El presente acápite se llevó a cabo una revisión exhaustiva del funcionamiento de la Regla de Operación del Embalse Zapallar con el fin de poder implementar modificaciones y mejoras en el modelo operacional multidisciplinario del embalse Zapallar, Región de Ñuble.

En el Anexo 6 “Modelo Operacional” se encuentran las planillas utilizadas en el presente estudio, que corresponden a una actualización y modificación del modelo desarrollado por DOH-UCH-DIC (2021). Adicionalmente se adjunta al interior del Anexo 6 un archivo explicativo de las tablas que conforman las distintas pestañas y hojas de cálculo del modelo operacional.

Los principales cambios y mejoras que se realizaron en el modelo operacional correspondieron a:

- Actualización de estadística considerando 30 años de simulación:
- Serie Caudales Histórico abr/1985-mar/2015 25.2 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP245 GCM1 21.406 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 245 GCM2 20.606 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 245 GCM3 23.829 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 370 GCM1 20.696 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 370 GCM2 23.169 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 370 GCM3 20.911 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 585 GCM1 23.313 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 585 GCM2 20.099 m³/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 585 GCM3 24.054 m³/s
- Inclusión de aportes de hoya intermedia aguas abajo del embalse

Se consideró las siguientes áreas en el proyecto:

Hectáreas Nuevas (HN): Corresponden a la superficie que será beneficiada directamente por el Embalse Zapallar. Éstas se ubican entre el Embalse y el canal matriz Diguillín-Coltón.

Secano ribera derecha - San Ignacio (HN)

Secano ribera izquierda - El Carmen (HN)

Hectáreas Blancas (HB): Corresponden a la superficie de riego de agricultores que no cuentan con Derechos de Aprovechamiento de Aguas de tipo Consuntivo de ejercicio Permanente y Continuo sobre el río Diguillín.

En la Tabla 10-1 se presenta la superficie de cada tipo de área considerada en el proyecto Embalse Zapallar.

Tabla 10-1: Superficie Asociada A Distintas Áreas Del Proyecto Embalse Zapallar

Tipo de Superficie	Superficie (ha)
Áreas Blancas	2.476
Áreas Adicionales	0
Áreas Nuevas – Secano Ribera Derecha San Ignacio	2.255
Áreas Nuevas – Secano Ribera Izquierda El Carmen	5.269
Total	10.000

Fuente: DOH

Cabe señalar que de acuerdo a lo indicado por DOH en reunión del 26 de noviembre de 2024, en que entregó información actualizada en relación con las áreas del proyecto Embalse Zapallar, la superficie de áreas adicionales es cero.

Para el modelo operacional se adoptaron los volúmenes de APR e incendio de acuerdo a lo indicado en la Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26:

“Como se desprende de la explicación anterior, las mediciones de los caudales entrante y saliente al embalse comparadas con el caudal de los derechos más el ecológico permite el control del cumplimiento de las obligaciones legales asociadas al embalse Zapallar. Este control se implementará en la norma de operación del embalse, quedando su bitácora de registro, además de la comparación que pueda efectuar la autoridad con los datos en línea.

Por otro lado, dentro de los recursos que se almacenarán, se considera destinar un volumen de 100.000 m³ de emergencia de la capacidad del embalse para apoyos temporales a los sistemas de APR de las comunas de Pinto, El Carmen y San Ignacio, esto mientras se establecen soluciones a problemas asociados a sus fuentes de abastecimientos, producto de situaciones de escasez hídrica u otros motivos.

De la misma manera, se destinará un volumen de 100.000 m³ de la capacidad del embalse para su uso ante situaciones de emergencia por incendios forestales.”

10.3. INSERCIÓN DE CAUDAL DE HOYA INTERMEDIA PARA DERECHOS PERMANENTES

En la constitución de los derechos permanentes se consideraron todas las fuentes aportantes al punto de captación, tales como aportes del río principal, aportes de cauces afluentes y aportes de afloramientos netos (descontando las pérdidas por infiltración) que dan origen al derecho otorgado. Según la simulación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) de la hoya intermedia (cuenca ubicada entre el embalse y el río Digüillín en junta con el Canal Matriz Digüillín-Coltón) las pérdidas por infiltración son del orden de 25% para las cuencas de la zona de valle (sin embargo cabe mencionar que parte de dicha infiltración es capaz de aflorar nuevamente aguas abajo según se ha descrito la dinámica rio-acuífero de la zona, dicha información fue descrita en forma cualitativa por DGA-Aquaterra (2011)). Cabe mencionar que la producción específica de la hoya intermedia simulada por el presente estudio fue del orden de 26 l/s/km², dicha cuenca fue validada con los valores naturalizados de la porción de cuenca definida por la estación río Digüillín en Longitudinal (dado que no existe una estación fluviométrica de control en la junta con el canal matriz Digüillín Coltón). Adicionalmente se corroboró el orden de magnitud con otra estación cercana perteneciente a la red DGA-BNA, río Larqui En Camino Yungay, que presenta valores del orden de 27 l/s/km². Considerando ambas producciones específicas se concluye que el valor estimado a nivel superficial y subterráneo se considera verificado con la información disponible hasta la fecha del presente estudio.

Esta hoya juega un rol clave en la disponibilidad hídrica de la zona. Es por ello que para la evaluación de los recursos hídricos del proyecto Embalse Zapallar se procedió a integrar los aportes de la hoya intermedia. De esta manera se emuló la manera en la que la JVRD ha hecho reparto de las aguas de la cuenca del río Digüillín. En la Tabla 10-2 se muestra ejemplo de las planillas de reparto históricas.

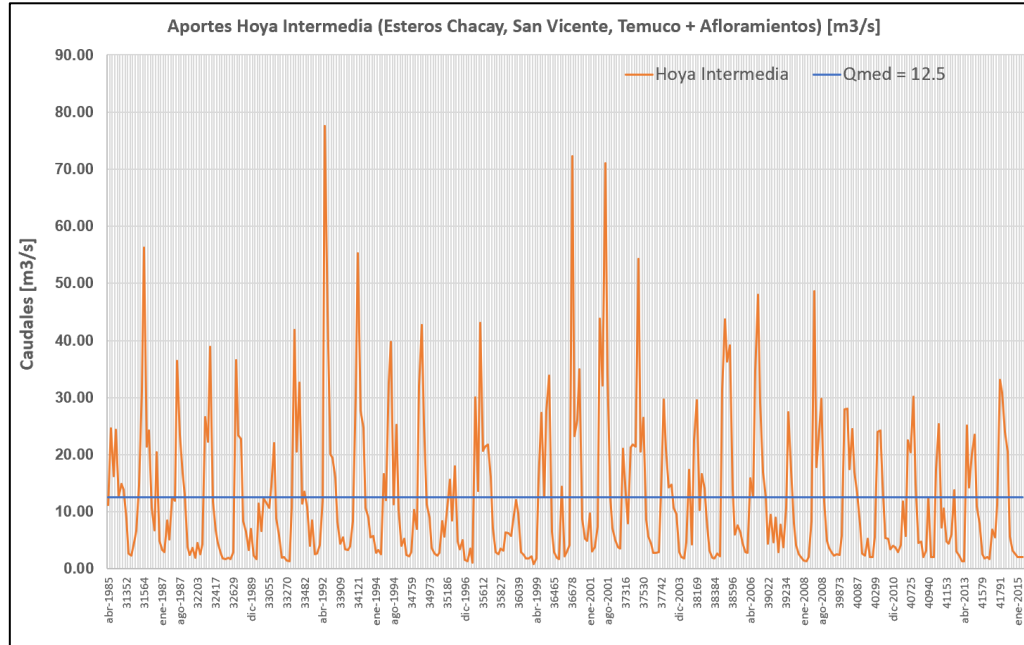
Tabla 10-2: Planillas de Reparto Juzgado de Aguas del Río Diguillín y Afluentes

Planilla de Reparto												Comentarios																																																																																																																																																																					
<p>JUZGADO DE AGUAS DEL RIO DIGUILLIN Y AFLUENTES</p> <p>AFORO FECHA 11 DE OCTUBRE DE 1983 N° 01</p> <p>CAUDAL DEL RIO EN ZAPALLAR 37,31 M3/SEG. EXTRAIDO POR CANALES 10,57 M3/SEG. CAUDAL DE LOS AFLUENTES 19,12 M3/SEG. PERDIDA CARMEN ABAJO 0,00 M3/SEG. CAUDAL TOTAL AFORADO 56,43 M3/SEG. CAUDAL TOTAL REAL 56,43 M3/SEG.</p> <p>RECUPERACION DEL RIO 0,00 % PERDIDA CARMEN 0,00 % AFLUENTES 33,88 % EFECTIVIDAD CAPTACION 19,94 % N° DE REGADORES DEL RIO: 2.203,8 N° DE REGADORES ACTIVOS 2.168,86</p> <p>DOTACION POR REGADOR 26,02 LTS./SEG.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">N° Orden del Canal</th> <th rowspan="2">NOMBRE DEL CANAL</th> <th colspan="2">N° Regadores del Canal</th> <th colspan="4">AFORO EN LA CANOA</th> <th rowspan="2">Por Regador en Canoa</th> <th rowspan="2">Altura Asignada en Canoa</th> <th colspan="2">Regadores Pagados</th> </tr> <tr> <th>Oficial</th> <th>Activo</th> <th>Ancho Mts.</th> <th>Altura Mts.</th> <th>Veloc. Mts./Seg.</th> <th>Caudal Total Lts./Seg.</th> <th>N°</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Los Canelos</td> <td>28</td> <td>28</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Sandoval y Alamos</td> <td>59</td> <td>59</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Coltón</td> <td>47,5</td> <td>47,5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Goldenberg</td> <td>74</td> <td>74</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Larqui</td> <td>107,55</td> <td>107,55</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Cerro Colorado</td> <td>28</td> <td>28</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Sandoval y Chávez</td> <td>43</td> <td>43</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Cerrillos</td> <td>5</td> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Quichagua</td> <td>47</td> <td>47</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>Compañía</td> <td>56,78</td> <td>56,78</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>San Antonio</td> <td>30</td> <td>30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>Llanos Blanco</td> <td>182</td> <td>177,98</td> <td>2,132</td> <td>0,34</td> <td>1,270</td> <td>1,231</td> <td>7,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>												N° Orden del Canal	NOMBRE DEL CANAL	N° Regadores del Canal		AFORO EN LA CANOA				Por Regador en Canoa	Altura Asignada en Canoa	Regadores Pagados		Oficial	Activo	Ancho Mts.	Altura Mts.	Veloc. Mts./Seg.	Caudal Total Lts./Seg.	N°	%	1	Los Canelos	28	28									2	Sandoval y Alamos	59	59									3	Coltón	47,5	47,5									4	Goldenberg	74	74									5	Larqui	107,55	107,55									6	Cerro Colorado	28	28									7	Sandoval y Chávez	43	43									8	Cerrillos	5	5									9	Quichagua	47	47									10	Compañía	56,78	56,78									11	San Antonio	30	30									12	Llanos Blanco	182	177,98	2,132	0,34	1,270	1,231	7,0				<p>11-Octubre-1983 Caudal del río Zapallar: 37.31 m³/s Caudal de los Afluentes: 19.12 m³/s</p>	
N° Orden del Canal	NOMBRE DEL CANAL	N° Regadores del Canal		AFORO EN LA CANOA				Por Regador en Canoa	Altura Asignada en Canoa	Regadores Pagados																																																																																																																																																																							
		Oficial	Activo	Ancho Mts.	Altura Mts.	Veloc. Mts./Seg.	Caudal Total Lts./Seg.			N°	%																																																																																																																																																																						
1	Los Canelos	28	28																																																																																																																																																																														
2	Sandoval y Alamos	59	59																																																																																																																																																																														
3	Coltón	47,5	47,5																																																																																																																																																																														
4	Goldenberg	74	74																																																																																																																																																																														
5	Larqui	107,55	107,55																																																																																																																																																																														
6	Cerro Colorado	28	28																																																																																																																																																																														
7	Sandoval y Chávez	43	43																																																																																																																																																																														
8	Cerrillos	5	5																																																																																																																																																																														
9	Quichagua	47	47																																																																																																																																																																														
10	Compañía	56,78	56,78																																																																																																																																																																														
11	San Antonio	30	30																																																																																																																																																																														
12	Llanos Blanco	182	177,98	2,132	0,34	1,270	1,231	7,0																																																																																																																																																																									
<p>JUZGADO DE AGUAS DEL RIO DIGUILLIN Y AFLUENTES</p> <p>AFORO FECHA 2 DE enero DE 1987 N° 01</p> <p>CAUDAL DEL RIO EN ZAPALLAR 15,69 M3/SEG. EXTRAIDO POR CANALES 20,71 M3/SEG. CAUDAL DE LOS AFLUENTES 4,69 M3/SEG. PERDIDA CARMEN ABAJO 5,46 M3/SEG. CAUDAL TOTAL AFORADO 20,38 M3/SEG. CAUDAL TOTAL REAL 26,17 M3/SEG.</p> <p>PRECIPITACIONES 28,4 % RECUPERACION DEL RIO 5,79 M3/SEG. 28,4 % PERDIDA CARMEN 28,4 % AFLUENTES 29,9 % EFECTIVIDAD CAPTACION 79,1 % N° DE REGADORES DEL RIO: 2.203,8 N° DE REGADORES ACTIVOS 2.194,66</p> <p>DOTACION POR REGADOR 11,9 LTS./SEG.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">N°</th> <th rowspan="2">NOMBRE DEL CANAL</th> <th colspan="2">N° Regadores del Canal</th> <th colspan="4">AFORO EN LA CANOA</th> <th rowspan="2">Por Regador en Canoa</th> <th rowspan="2">Altura Asignada en Canoa</th> <th colspan="2">Regadores Pagados</th> </tr> <tr> <th>Oficial</th> <th>Activo</th> <th>Ancho Mts.</th> <th>Altura Cm.</th> <th>Veloc. Mts./Seg.</th> <th>Caudal Total Lts./Seg.</th> <th>N°</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Los Canelos</td> <td>28</td> <td>28</td> <td>1,18</td> <td>19</td> <td>1,04</td> <td>233</td> <td>8,3</td> <td></td> <td>28,00</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Sandoval y Alamos</td> <td>66,42</td> <td>66,42</td> <td>1,60</td> <td>9</td> <td>1,80</td> <td>240</td> <td>4,3</td> <td></td> <td>66,86</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Coltón</td> <td>47,5</td> <td>47,5</td> <td>1,50</td> <td>15</td> <td>1,60</td> <td>270</td> <td>5,7</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Goldenberg</td> <td>34</td> <td>34</td> <td>1,50</td> <td>15</td> <td>1,58</td> <td>348</td> <td>10,2</td> <td></td> <td>34,00</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Larqui</td> <td>250,55</td> <td>207,55</td> <td>3,46</td> <td>28</td> <td>2,35</td> <td>2171</td> <td>9,0</td> <td></td> <td>174,344</td> <td>84,00</td> </tr> </tbody> </table>												N°	NOMBRE DEL CANAL	N° Regadores del Canal		AFORO EN LA CANOA				Por Regador en Canoa	Altura Asignada en Canoa	Regadores Pagados		Oficial	Activo	Ancho Mts.	Altura Cm.	Veloc. Mts./Seg.	Caudal Total Lts./Seg.	N°	%	1	Los Canelos	28	28	1,18	19	1,04	233	8,3		28,00	100	2	Sandoval y Alamos	66,42	66,42	1,60	9	1,80	240	4,3		66,86	100	3	Coltón	47,5	47,5	1,50	15	1,60	270	5,7				4	Goldenberg	34	34	1,50	15	1,58	348	10,2		34,00	100	5	Larqui	250,55	207,55	3,46	28	2,35	2171	9,0		174,344	84,00	<p>02-Enero-1987 Caudal del río Zapallar: 15.69 m³/s Caudal de los Afluentes: 4.69 m³/s Recuperaciones del río: 5.79 m³/s</p>																																																																																					
N°	NOMBRE DEL CANAL	N° Regadores del Canal		AFORO EN LA CANOA				Por Regador en Canoa	Altura Asignada en Canoa	Regadores Pagados																																																																																																																																																																							
		Oficial	Activo	Ancho Mts.	Altura Cm.	Veloc. Mts./Seg.	Caudal Total Lts./Seg.			N°	%																																																																																																																																																																						
1	Los Canelos	28	28	1,18	19	1,04	233	8,3		28,00	100																																																																																																																																																																						
2	Sandoval y Alamos	66,42	66,42	1,60	9	1,80	240	4,3		66,86	100																																																																																																																																																																						
3	Coltón	47,5	47,5	1,50	15	1,60	270	5,7																																																																																																																																																																									
4	Goldenberg	34	34	1,50	15	1,58	348	10,2		34,00	100																																																																																																																																																																						
5	Larqui	250,55	207,55	3,46	28	2,35	2171	9,0		174,344	84,00																																																																																																																																																																						

Fuente: Antecedentes Recopilados JVRD

Considerando que la Hoya Intermedia cumple un rol en la satisfacción de los derechos permanentes se procedió a incorporar dicha estadística en el modelo de reparto. Se debe tener en cuenta que los valores de la Hoya Intermedia, compuesta por Esteros Chacay, San Vicente, Temuco y los afloramientos propios en el río corresponden a cauces sin control fluviométrico, ya que las estaciones DGA de la zona son río Diguillín en San Lorenzo y Diguillín en Longitudinal. Se recomienda que en el futuro puedan implementarse puntos de control en cauces naturales para llevar a cabo un reparto ajustado a caudales pasantes estimados y medidos en terreno, más que a caudales estimados mediante simulaciones indirectas. Cabe mencionar la Hoya Intermedia no participa en la satisfacción de las 10.000 ha.

Figura 10-2: Aportes Hoya Intermedia, Con Caudal Medio 12,5 m³/s



Fuente: Elaboración Propia

10.4. SEGURIDAD DE RIEGO CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO

En la Tabla 10-3 se muestran los escenarios de simulación para estimar la seguridad de riego en el proyecto Embalse Zapallar. Se indican los principales documentos considerados y la manera en la que se satisfacen los derechos, así como el caudal ecológico. Además, se incluyen las consideraciones adicionales asociadas a volumen de agua disponible para Agua Potable Rural y Volumen de Incendio. Para cada Escenario de Simulación se consideró la componente de cambio climático en los escenarios SSP y GCMs respectivos (descritos en el acápite SELECCIÓN DE GCM REPRESENTATIVOS).

Tabla 10-3 Escenarios de Modelación para Estimar Seguridad de Riego en Embalse Zapallar

Escenario de Modelación	Satisfacción de Derechos	Consideraciones adicionales	Escenario Cambio Climático a simular
<p>Primer escenario: considerando DDPP de 21357,7 l/s (aguas arriba CM D-C: 3643,38 l/s aguas abajo CM D-C: 17714,32 l/s) Estimados a partir de Convenio Marzo 1998 DOH-JVRD y Convenio Marzo DOH-JVRD Marzo 2023) Nota 1: los cálculos se hicieron considerando 1 ha 1 acción y un factor 1,05 l/s/acción.</p>	<p>Para satisfacer los DDPP (21357,7 l/s) se consideran: los caudales de toda la cuenca que generan los DDPP del río Diguillín, es decir hoya intermedia, afloramientos y zona afluente al embalse. Se embalsan sólo derechos eventuales 100 Hm³/mes durante los meses junio-julio-agosto-septiembre Se deja pasar caudal ecológico 5,59 m³/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm³ y un volumen para Incendio de 0,1 Hm³, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>
<p>Segundo escenario: Según RCA (05-02-2024) "a través de la descarga al río Diguillín el embalse deberá entregar los caudales de los DDPP de riego, aguas arriba y aguas abajo del canal matriz del Diguillín Coltón, los cuales suman un caudal máximo de 10,5 m³/s (3,7+7,0). A ello debe agregarse el caudal ecológico de 5,59 m³/s".</p>	<p>Este escenario dejaría pasar 10,5 m³/s, correspondientes a DDPP de aguas arriba y aguas abajo del canal matriz Diguillín Coltón. Se embalsan sólo derechos eventuales 100 Hm³/mes durante los meses junio-julio-agosto-septiembre. Se deja pasar caudal ecológico 5,59 m³/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm³ y un volumen para Incendio de 0,1 Hm³, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>
<p>Tercer escenario: considera actual gestión integrada de trasvase del sistema Laja-Diguillín en el que los DDPP del río Diguillín ubicados aguas abajo del CM D-C son satisfechos mediante el cumplimiento de trasvase de aguas del Lago Laja (según acuerdos vigentes a la fecha entre DOH-JVRD 16-12-2013).</p>	<p>Se deja pasar DDPP aguas arriba de CM D-C: 3,7 m³/s + caudal Ha Blancas y Adicionales entre Oct-Mar, resto del año DDPP (21,4 m³/s). Se embalsan sólo DDEE entre jun-sept. Caudal ecológico 5,59 m³/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm³ y un volumen para Incendio de 0,1 Hm³, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>

Fuente: Elaboración conjunta DOH-TYP

Para los tres escenarios también se actualizaron las demandas de riego, en las que se consideraron las tasas proporcionadas por DOH (Tabla 10-4 y Tabla 10-5).

Tabla 10-4 Tasas de Riego sin Cambio Climático

Mes	m ³ /m ³ s/ha			
	Blancos Cord	El Carmen	San Ignacio	Promedio Ponderado
Sep	0	0	0	0
Oct	193	146	246	106
Nov	768	661	918	710
Dic	1.526	1.452	1.669	1.519
Ene	1.745	1.788	1.919	1.807
Feb	1.500	1.548	1.637	1.557
Mar	905	902	1.018	925
Abr	279	236	309	213
Total	6.916	6.732	7.715	6.836

Nota: ETo(1280 mm) y Eficiencia intra predial (82.53%)

Fuente: DOH

Tabla 10-5 Tasas de Riego con Cambio Climático

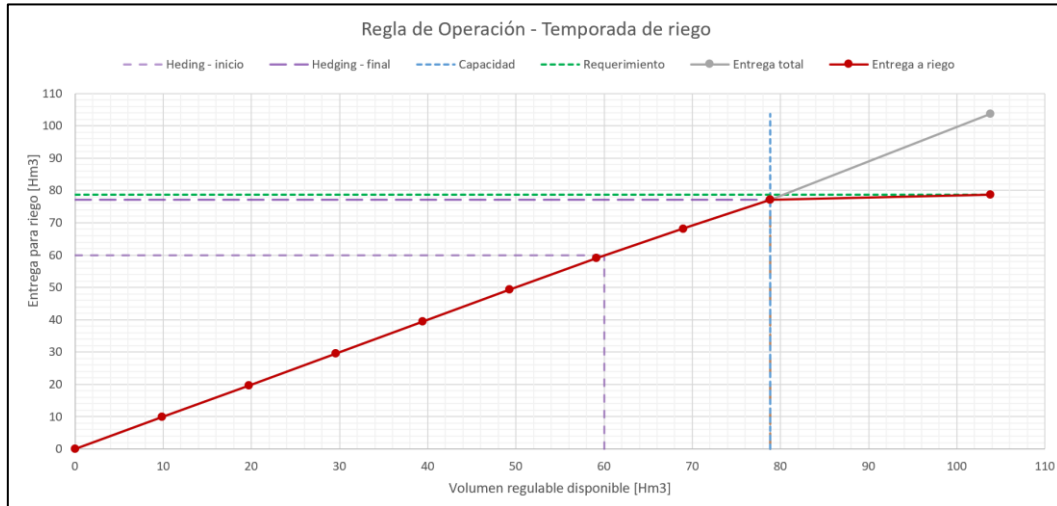
Mes	m ³ /m ³ s/ha			
	Blancos Cord	El Carmen	San Ignacio	Promedio Ponderado
Sep	0	0	0	0
Oct	261	112	344	201
Nov	815	678	912	746
Dic	1.508	1.482	1.643	1.525
Ene	1.707	1.792	1.855	1.786
Feb	1.497	1.562	1.625	1.561
Mar	926	941	1.036	956
Abr	379	283	420	300
Total	7.093	6.851	7.834	7.075

Nota: se consideró una ETo más alta (del orden de 1327 mm/año) y además una eficiencia de riego intrapredial más alta (86.6%)

Fuente: DOH

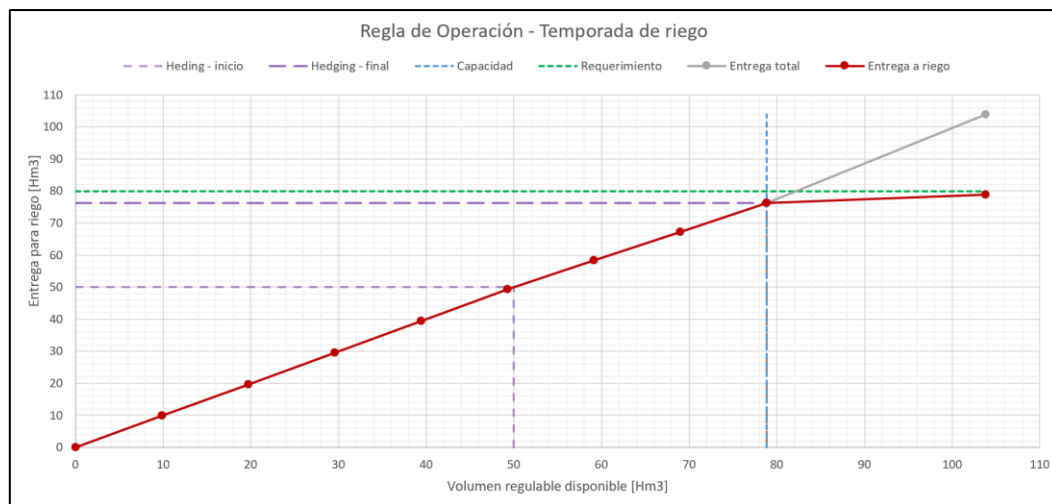
La regla de operación implementada por un lado considera las restricciones de caudal asociados a derechos permanentes y ecológico descritos anteriormente. Adicionalmente también se llevó a cabo una optimización de la regla de reparto con tal de obtener una seguridad de riego superior al 85% para todos los escenarios analizados. En las Figura 10-3 y Figura 10-4 se muestran las reglas optimizadas para Escenarios Base (sin Cambio Climático) y Escenarios con Cambio Climático.

Figura 10-3: Regla De Operación Temporada De Riego Sin Cambio Climático: Si Volumen Es Mayor A 60 Hm³ Se Entrega El 91% De La Demanda, Mientras Que Si Volumen Es Menor A 60 Hm³ Se Entrega El 100%.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 10-4: Regla De Operación Temporada De Riego Con Cambio Climático: Si Volumen Es Mayor A 50 Hm³ Se Entrega El 91% De La Demanda, Mientras Que Si Volumen Es Menor A 50 Hm³ Se Entrega El 100%.



Fuente: Elaboración Propia

Esta implementación permite retener una porción de volumen de los meses de inicio de primavera para los meses de fines de verano y principio de otoño (marzo, abril). Con una pequeña reducción de entrega durante los meses de mayor demanda se permite contar con una seguridad de riego sobre el 85% para todos los escenarios de la Tabla 10-3.

En la Tabla 10-6 se muestra el resultado del cumplimiento de demanda para el Primer Escenario de Tabla 10-3. Se observa que para todas las simulaciones (con y sin cambio climático) se cumple la seguridad de riego sobre el 85% debido a que la optimización de la regla de operación permite retener volumen almacenado de inicio de la temporada de riego para los meses más tardíos (marzo-abril).

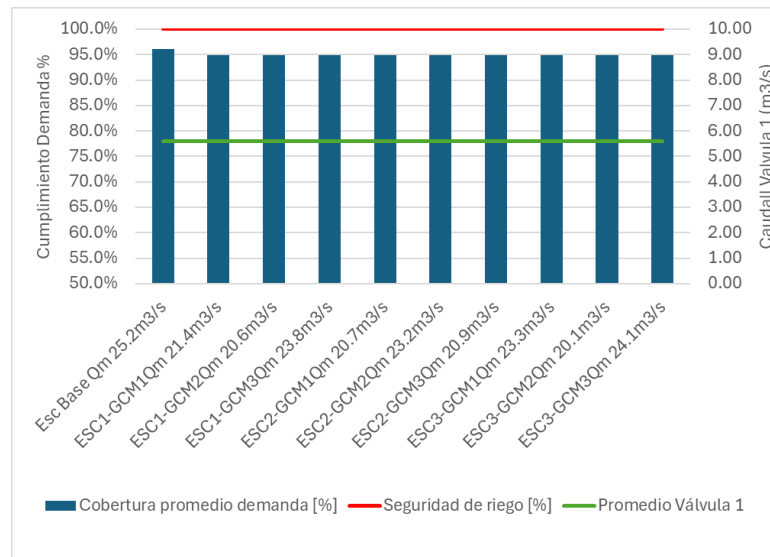
Tabla 10-6 Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714.32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie regada [ha]	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Demanda máxima [Hm ³ /temporada]	76.77	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22
Capacidad/Demanda [%]	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Cobertura promedio demanda [%]	96.1%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59
Promedio Válvula 1	4.12	4.25	4.19	4.10	4.20	4.16	4.11	4.19	4.27	4.11
Máximo Válvula 1	14.29	11.79	11.73	13.49	11.75	12.36	13.93	13.26	11.85	13.07
Promedio Válvula 2	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Máximo Válvula 2	1.07	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Promedio Válvula 3	2.03	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
Máximo Válvula 3	6.33	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06

Caudales Entregados por Sector	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Promedio Sector El Carmen	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Máximo Sector El Carmen	3.91	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Promedio Sector San Ignacio	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
Máximo Sector San Ignacio	1.79	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
Caudal Afuente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	12.57	9.78	9.39	11.47	9.51	11.23	9.93	11.51	9.32	11.54

Fuente: Elaboración Propia

Figura 10-5: Seguridad de Riego y Cobertura de Demanda Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 10-7 se muestra el resultado del cumplimiento de demanda para el Segundo Escenario de Tabla 10-3. Se observa que para todas las simulaciones (con y sin cambio climático) se cumple la seguridad de riego sobre el 85% debido a que la optimización de la regla de operación permite retener volumen almacenado de inicio de la temporada de riego para los meses más tardíos (marzo-abril). A lo más la seguridad de riego disminuye a un 93% en los GCM más desfavorables.

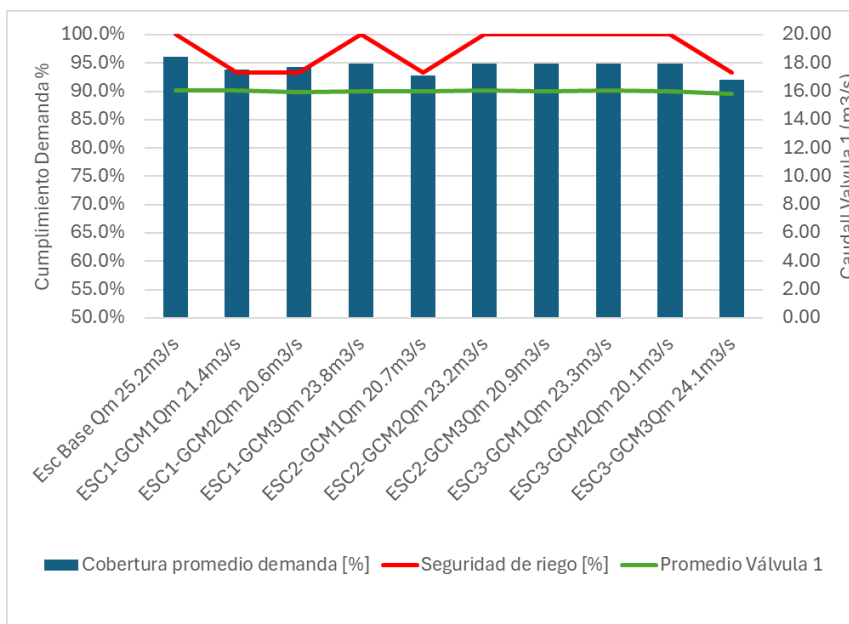
Tabla 10-7 Segundo Escenario DDPP RCA 10,5 m³/s a Pie de Embalse Más Caudal Ecológico

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	93%	93%	100%	93%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	2	2	0	2	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Demanda máxima [Hm ³ /temporada]	76.77	78.22	78.22	78.22	78.22	78.2	78.22	78.22	78.22	78.22
Capacidad/Demanda [%]	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Cobertura promedio demanda [%]	96.1%	93.9%	94.3%	94.9%	92.8%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	92.0%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	16.08	16.03	15.97	15.99	15.97	16.09	16.01	16.09	15.99	15.83
Promedio Válvula 1	10.89	10.52	10.48	10.82	10.25	10.72	10.69	10.53	10.57	10.74
Máximo Válvula 1	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09
Promedio Válvula 2	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34
Máximo Válvula 2	1.07	1.04	1.04	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Promedio Válvula 3	2.03	2.01	2.02	2.02	1.96	2.02	2.02	2.02	2.02	1.95
Máximo Válvula 3	6.33	6.27	6.27	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06

Caudales Entregados por Sector	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Promedio Sector El Carmen	1.22	1.21	1.21	1.22	1.18	1.22	1.22	1.22	1.22	1.18
Máximo Sector El Carmen	3.91	3.92	3.92	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Promedio Sector San Ignacio	0.60	0.59	0.59	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59	0.59	0.57
Máximo Sector San Ignacio	1.79	1.74	1.74	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración Propia

Figura 10-6: Seguridad de Riego y Cobertura de Demanda Segundo Escenario RCA 10,5 m³/s



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 10-8 se muestra el resultado del cumplimiento de demanda para el Tercer Escenario. Se observa que para todas las simulaciones (con y sin cambio climático) se cumple la seguridad de riego sobre el 85% debido a que la optimización de la regla de operación permite retener volumen almacenado de inicio de la temporada de riego para los meses más tardíos (marzo-abril). El escenario 3- GCM3 sería el más desfavorable con un 93% de satisfacción de riego.

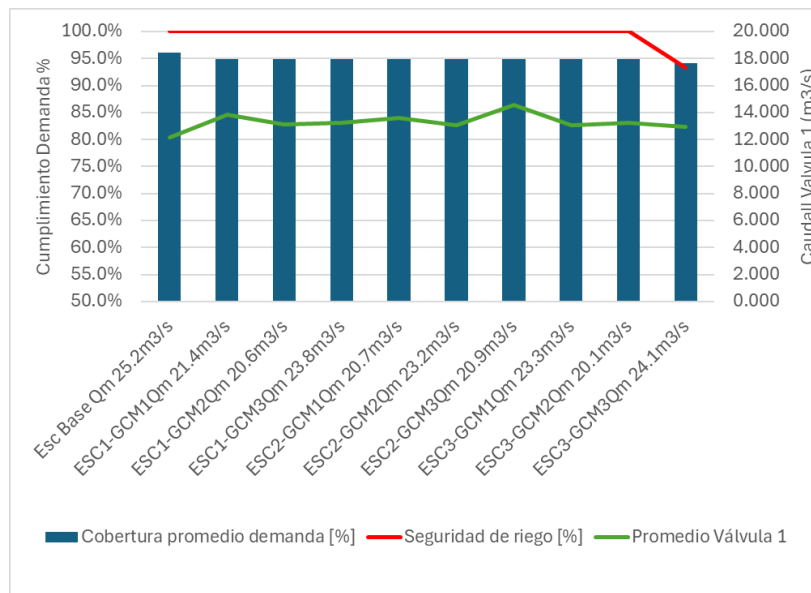
Tabla 10-8 Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3,7 m³/s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Demanda máxima [Hm ³ /temporada]	76.77	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22
Capacidad/Demanda [%]	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Cobertura promedio demanda [%]	96.1%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.2%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	12.138	13.826	13.137	13.268	13.619	13.083	14.566	13.086	13.242	12.950
Promedio Válvula 1	9.109	9.351	9.180	9.445	9.071	9.240	9.699	9.069	9.289	9.361
Máximo Válvula 1	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947
Promedio Válvula 2	0.351	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.350
Máximo Válvula 2	1.066	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.043
Promedio Válvula 3	2.031	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.013
Máximo Válvula 3	6.335	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.270

Caudales Entregados por Sector	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Promedio Sector El Carmen	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.21
Máximo Sector El Carmen	3.91	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.92
Promedio Sector San Ignacio	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
Máximo Sector San Ignacio	1.79	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.74
Caudal Afuente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	8.84	7.06	6.55	8.20	6.99	7.94	6.71	8.31	6.35	7.93

Fuente: Elaboración Propia

Figura 10-7: Seguridad de Riego y Cobertura de Demanda Tercer Escenario DDPP 3,7 m³/s+ Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas



Fuente: Elaboración Propia

10.4.1. ÁREA ASOCIADA AL 85% DE SEGURIDAD DE RIEGO

Para cada escenario descrito en la Tabla 10-3 se llevó a cabo una iteración del área máxima de riego que permite cubrir el sistema sin bajar el rango de 85% de Seguridad de Riego según criterio CNR. En las Tabla 10-9, Tabla 10-10 y Tabla 10-11 se muestran los resultados de las iteraciones para los distintos escenarios.

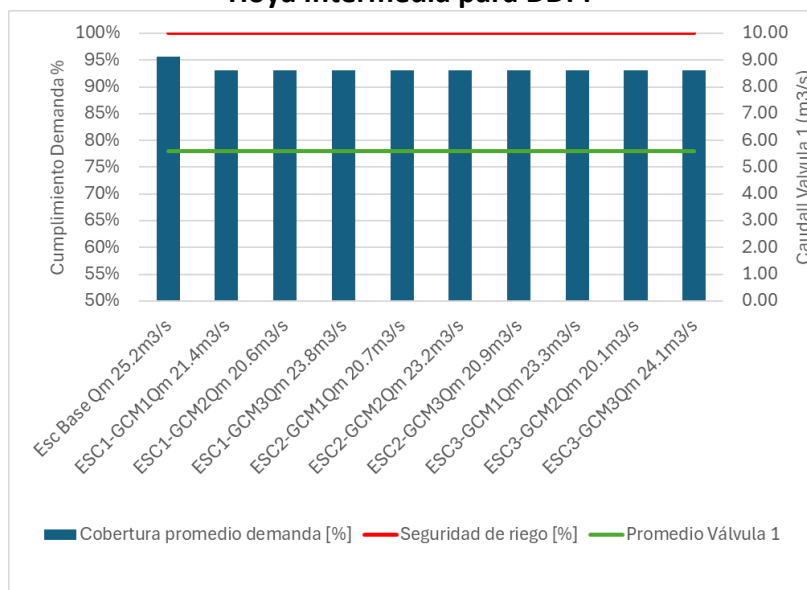
Tabla 10-9 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714,32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie regada [ha]	10200	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300
Demanda máxima [Hm3/temporada]	78.30	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55
Capacidad/ Demanda [%]	101%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Cobertura promedio demanda [%]	96%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59
Promedio Válvula 1	4.12	4.25	4.19	4.10	4.20	4.16	4.11	4.19	4.27	4.11
Máximo Válvula 1	14.29	11.79	11.73	13.49	11.75	12.36	13.93	13.26	11.85	13.07
Promedio Válvula 2	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
Máximo Válvula 2	1.10	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
Promedio Válvula 3	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06
Máximo Válvula 3	6.45	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23

Caudales Entregados por Sector	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
Promedio Sector El Carmen	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Máximo Sector El Carmen	3.99	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89
Promedio Sector San Ignacio	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
Máximo Sector San Ignacio	1.83	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
Caudal Afluyente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	12.57	9.78	9.39	11.47	9.51	11.23	9.93	11.51	9.32	11.54

Fuente: Elaboración Propia

Figura 10-8: Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714,32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP



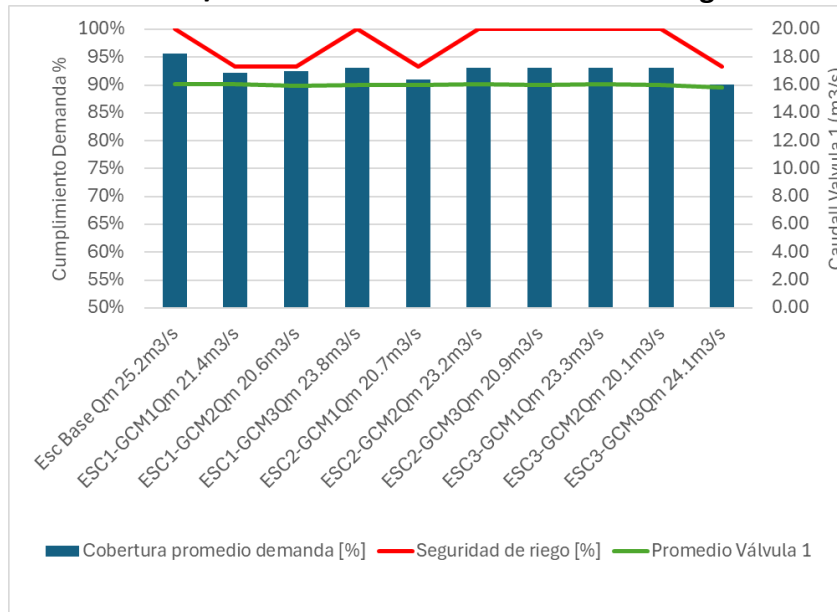
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 10-10 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Segundo Escenario DDPP RCA
10500 l/s a Pie de Embalse más Caudal Ecológico**

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	93%	93%	100%	93%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	2	2	0	2	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10200	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300
Demanda máxima [Hm ³ /temporada]	78.30	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55
Capacidad/Demanda [%]	101%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Cobertura promedio demanda [%]	96%	92%	92%	93%	91%	93%	93%	93%	93%	90%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	16.08	16.03	15.97	15.99	15.97	16.09	16.01	16.09	15.99	15.83
Promedio Válvula 1	10.89	10.52	10.48	10.82	10.25	10.72	10.69	10.53	10.57	10.74
Máximo Válvula 1	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09
Promedio Válvula 2	0.36	0.36	0.36	0.37	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.35
Máximo Válvula 2	1.10	1.09	1.09	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
Promedio Válvula 3	2.06	2.04	2.05	2.06	2.00	2.06	2.06	2.06	2.06	1.99
Máximo Válvula 3	6.45	6.44	6.44	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23
Caudales Entregados por Sector	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
Promedio Sector El Carmen	1.25	1.24	1.24	1.25	1.21	1.25	1.25	1.25	1.25	1.21
Máximo Sector El Carmen	3.99	4.03	4.03	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89
Promedio Sector San Ignacio	0.61	0.60	0.61	0.61	0.59	0.61	0.61	0.61	0.61	0.59
Máximo Sector San Ignacio	1.83	1.79	1.79	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 10-9: Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Segundo Escenario DDPP RCA
10500 l/s a Pie de Embalse más Caudal Ecológico**



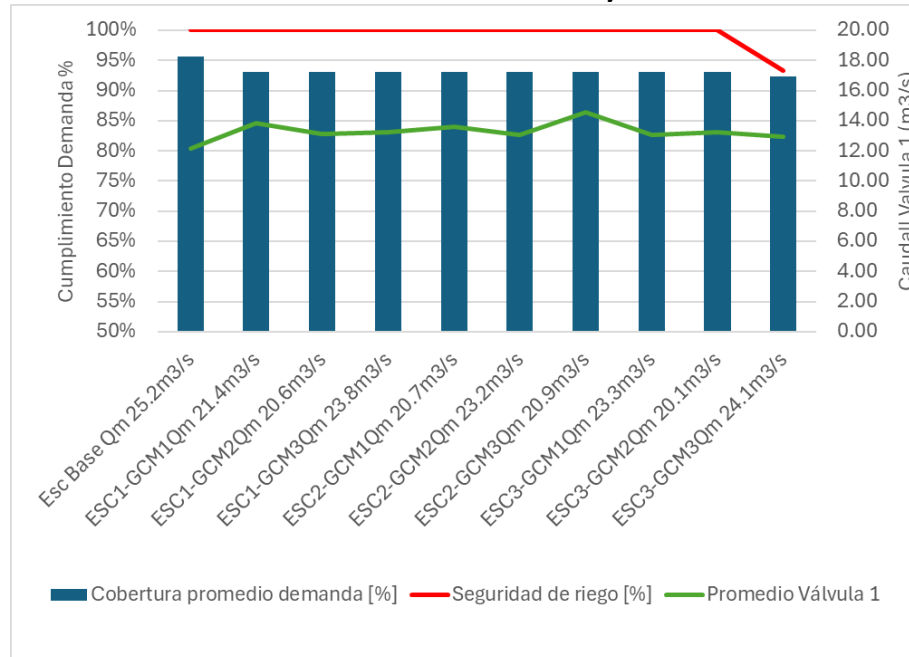
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-11 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3700 l/s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10200	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300
Demanda máxima [Hm ³ /temporada]	78.30	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55
Capacidad/Demanda [%]	101%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Cobertura promedio demanda [%]	96%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	92%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	12.14	13.83	13.14	13.27	13.62	13.08	14.57	13.09	13.24	12.95
Promedio Válvula 1	9.11	9.35	9.18	9.45	9.07	9.24	9.70	9.07	9.29	9.36
Máximo Válvula 1	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95
Promedio Válvula 2	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36
Máximo Válvula 2	1.10	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.09
Promedio Válvula 3	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.05
Máximo Válvula 3	6.45	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.44
Caudales Entregados por Sector	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Promedio Sector El Carmen	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.24
Máximo Sector El Carmen	3.99	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	4.03
Promedio Sector San Ignacio	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60
Máximo Sector San Ignacio	1.83	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.79
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	8.84	7.06	6.55	8.20	6.99	7.94	6.71	8.31	6.35	7.93

Fuente: Elaboración Propia

Figura 10-10: Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3700 l/s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas



Fuente: Elaboración Propia

A modo general es bueno recordar que existen dos reglas de operación implementadas en las simulaciones: una para escenario base, con volumen menor a 60 Hm³ entrega 100% de la demanda, mientras que, para escenarios con cambio climático, con volumen menor a 50 Hm³ se

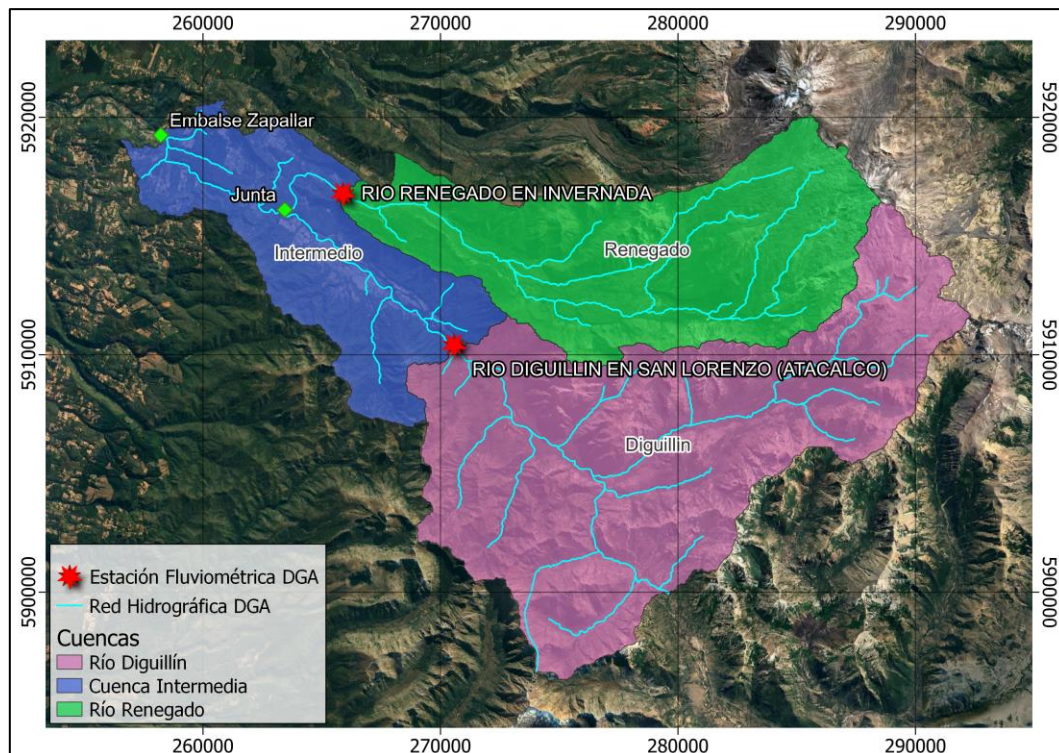
entrega el 100% de la demanda. Dicha regla se implementó para lograr retener flujo en el periodo de estiaje. Esto implica que, a pesar de tener seguridad de riego 100%, las coberturas de riego son levemente menor con cambio climático (96% en escenario base versus 93% en escenarios con cambio climático).

10.5. ANÁLISIS DE CRECIDAS EXTREMAS

10.5.1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la evaluación del embalse Zapallar bajo las consideraciones de cambio climático, se realizó un estudio para estimar las crecidas extremas que puedan llegar al muro del embalse. Para esto, se analizaron las cuencas aportantes al lugar de interés y se realizó una modelación destinada a estimar los caudales asociados a los eventos de precipitación máximas. Se consideró el uso de los registros de las estaciones fluviométricas del río Diguillín en San Lorenzo y río Renegado en Invernada, ubicadas aguas arriba del embalse Zapallar. Estas estaciones DGA se muestran en la Figura 10-11 y detalladas en la Tabla 10-12. Además, se utilizó como un antecedente importante, el estudio realizado por MN Ingenieros (2018), esto con el fin de realizar una comparación entre los caudales estimados en ambos estudios, teniendo en consideración tanto la condición histórica como las proyectadas con cambio climático.

Figura 10-11: Cuencas Aportantes A Embalse Zapallar



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Tabla 10-12: Datos Estaciones Fluviométricas DGA

Datos	Río Renegado en Invernada	Río Diguillín en San Lorenzo
Código BNA	08130001-1	08130002-K
Estado	Vigente	Vigente
UTM Norte WGS84	265.901	270.575
UTM Este WGS84	5.916.793	5.910.410

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA)

Para el análisis de crecidas extremas, se utilizaron los registros de caudales máximos de las dos estaciones DGA ya citadas, en conjunto con un método indirecto, basado en la estimación caudales máximos usando relaciones precipitación – escorrentía, para periodos de retorno de 100, 1000, 10000 años y también para determinar la precipitación máxima probable (PMP) para la cuenca aportante al embalse Zapallar. Para la estimación de crecidas máximas asociadas a cada uno de estos eventos de precipitación se utilizó el Hidrograma Unitario Sintético SCS, implementado en el *software* HEC-HMS.

La estimación de las precipitaciones máximas se ha basado en los registros de precipitaciones máximas diarias, considerando dos períodos de análisis. El primero corresponde al periodo histórico, el cual comprende los años 1960-2023. Mientras que el segundo corresponde a proyecciones para tres escenarios y tres modelos de cambio climático para el intervalo 2024-2074. Para ambas ventanas temporales se consideró el uso de datos sintéticos provenientes de los productos grillados CR2MET y los modelos de circulación global (GCM) MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM.

10.5.2. ESTUDIOS PREVIOS

Como antecedente para el análisis de crecidas extremas se tiene el estudio realizado por MN Ingenieros el año 2018, denominado “Estudios Actualización y Complementación Diseño Embalse Zapallar Región del Biobío”. En ese estudio se realizaron diversas estimaciones directas e indirectas de caudales de crecidas para las estaciones fluviométricas del río Diguillín en San Lorenzo y río Renegado en Invernada. Según se indica en ese estudio, y mediante el uso de diversos métodos de transformación precipitación - escorrentía, se obtuvieron los caudales máximos instantáneos que se muestran en la Tabla 10-13. En la Figura 10-11 se muestra la ubicación de las cuencas aportantes a las estaciones fluviométricas y la ubicación del Embalse.

Tabla 10-13: Caudales de Diseño Propuestos (m³/s)

Periodo de Retorno (años)	Caudal Máximo Instantáneo (m ³ /s)
100	1600
1.000	2200
10.000	2750
CMP	3938

Fuente: Estudios Actualización y Complementación Diseño Embalse Zapallar Región del Biobío. MN Ingenieros (2018)

Cabe señalar que estos caudales máximos instantáneos fueron obtenidos como resultado de una serie de estimaciones, tanto desde hidrogramas unitarios sintéticos como análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos diarios para las estaciones fluviométricas de los ríos Diguillín y Renegado. Además, es importante mencionar que para las metodologías indirectas se asumió que toda la cuenca afluyente al embalse Zapallar aporta, situando la línea de nieves por sobre la cota máxima da la cuenca.

10.5.3. ANÁLISIS PP MÁXIMAS ANUALES

Como ya se mencionó, se utilizaron dos ventanas temporales para la estimación de precipitaciones máximas diarias. En primer lugar, se utilizaron datos históricos u observados sintéticos para el periodo 1960-2023 provenientes del modelo CR2MET. Para el periodo futuro (2024-2074), se evaluaron los modelos de circulación global MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM en los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. El análisis de las precipitaciones y caudales generados con cambio climático son presentados en la sección 10.5.7.

10.5.3.1. RESULTADOS DESDE CR2MET

Las precipitaciones diarias para el intervalo temporal 1960-2023 se obtuvieron a nivel agregado desde CR2MET, para las tres cuencas en estudio, denominadas: cuenca Diguillín, cuenca Renegado y cuenca Intermedia, como se observa en la Figura 10-11.

10.5.3.2. FACTOR DE CORRECCIÓN PARA PP₂₄

Los resultados que se obtuvieron desde CR2MET son precipitaciones a escala diaria, por lo que, para realizar la conversión a precipitaciones en 24 horas, se hizo necesario utilizar un coeficiente de corrección para así obtener lluvia máxima en 24 horas. Según el Manual de Carreteras, la relación entre lluvia máxima en 24 horas y lluvia máxima diaria para la estación meteorológica de Chillán, cercana a la zona de estudio, es de 1,04, es decir $P_{max\ 24h} = 1,04 \cdot P_{max\ diaria}$.

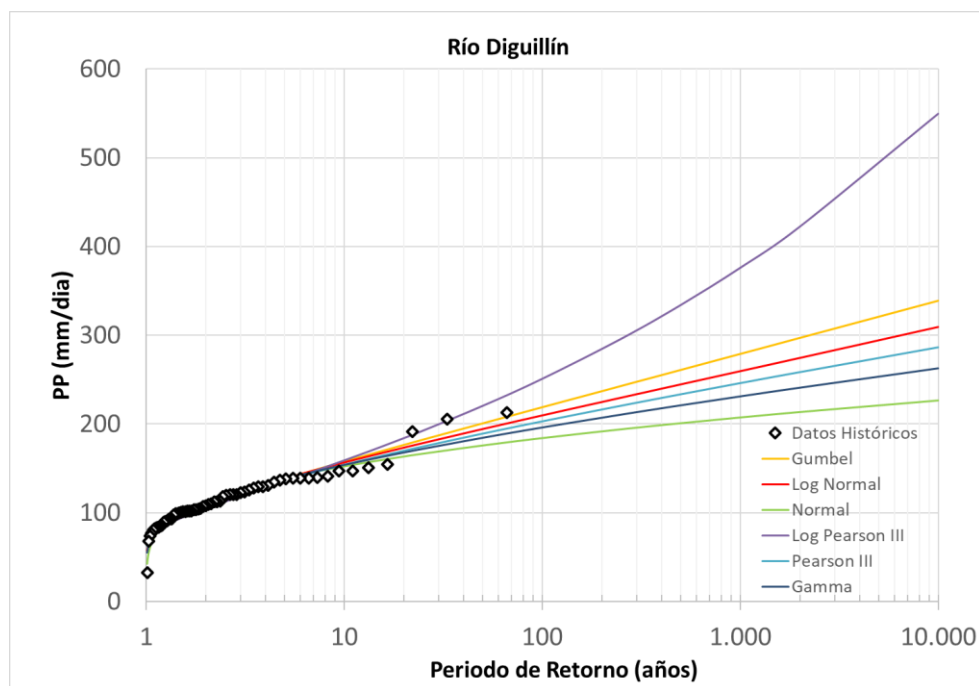
Una vez determinado el factor de corrección para las precipitaciones máximas diarias, se determinó el vector de precipitaciones sobre el cual se ha realizado el análisis de frecuencia para el periodo de estudio de 1960-2023.

10.5.3.3. ANÁLISIS DE FRECUENCIA Y PMP

Análisis de frecuencia

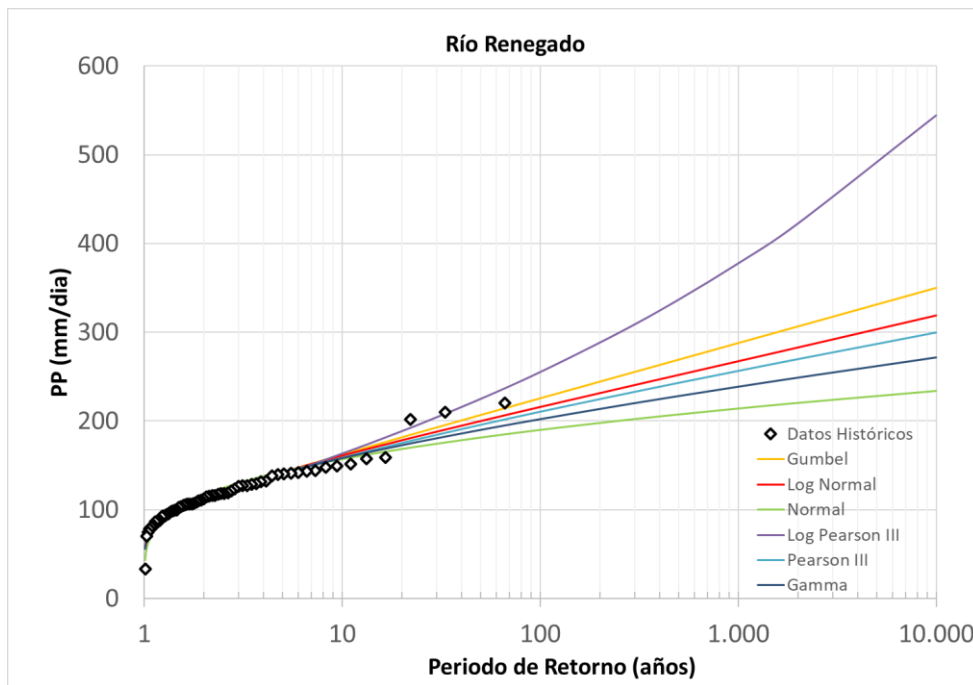
Se realizó un análisis de frecuencia para las precipitaciones máximas anuales en 24 horas para las tres cuencas en estudio. De los resultados se desprende que prácticamente la totalidad de eventos de precipitaciones máximas ocurren durante el periodo de invierno. Dada la extensión de datos, estos son presentados en el Anexo 7 “Análisis de Crecidas Extremas”. En la Figura 10-12, Figura 10-13 y Figura 10-14 se muestran los gráficos de ajuste para los datos históricos y distintas distribuciones de probabilidad.

Figura 10-12: Ajuste Gráfico PP₂₄ Río Diguillín



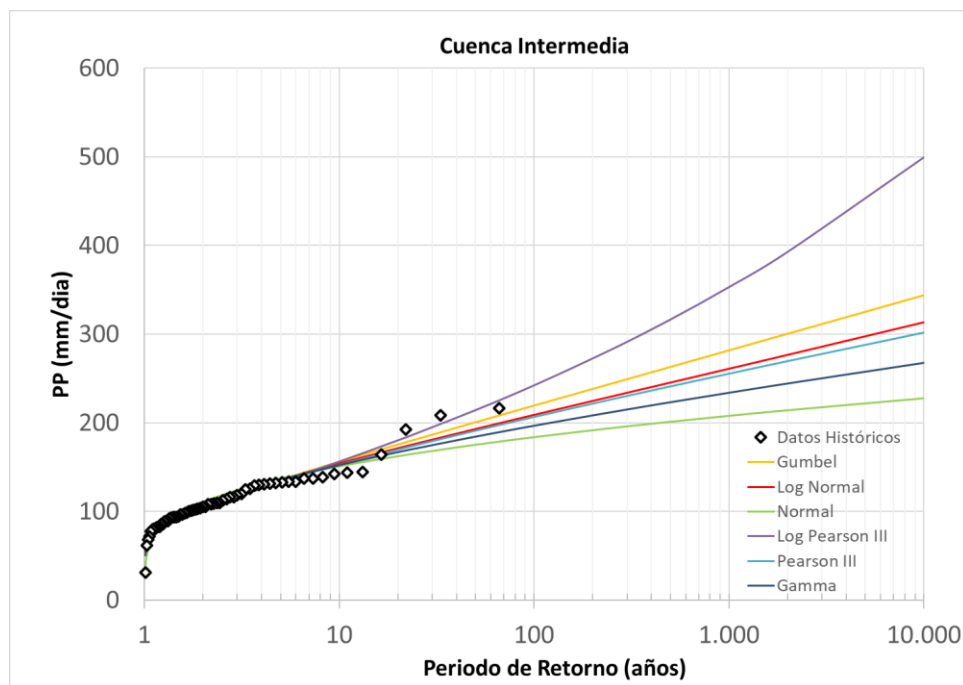
Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Figura 10-13: Ajuste Gráfico PP₂₄ Río Renegado



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Figura 10-14: Ajuste Gráfico PP₂₄ Cuenca Intermedia



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Para las tres cuencas aportantes se tomó como ajuste la distribución Gumbel, con las cuales se determinaron las precipitaciones para los periodos de retorno de 100, 1000 y 10000 años.

Precipitación máxima probable (PMP)

Según Ven te Chow (1994) la PMP corresponde al valor límite estimado de precipitación. Esto quiere decir que es posible definirla como “la mayor profundidad de precipitación estimada analíticamente para una duración dada que sea físicamente posible”. En el estudio “Precipitaciones Máximas Diarias en Chile” presentado por Stowhas en 1983, se propone el siguiente método estadístico para la estimación de la PMP:

$$PMP = P_{prom} + K \cdot S$$

Donde:

- PMP : Precipitación Máxima Probable (mm)
- P_{prom} : Promedio de la serie de precipitaciones máximas anuales (mm)
- K : Coeficiente de frecuencia maximizado. Se asume el valor de 11 (Stowhas, 1983)
- S : Desviación estándar de la serie de precipitaciones máximas anuales

En la Tabla 10-14 se muestran las precipitaciones máximas en 24 horas para las tres cuencas en estudio para los periodos de retorno en estudio junto con la PMP.

Tabla 10-14: Precipitación En Estudio Según Cuenca Y Periodo De Retorno (mm)

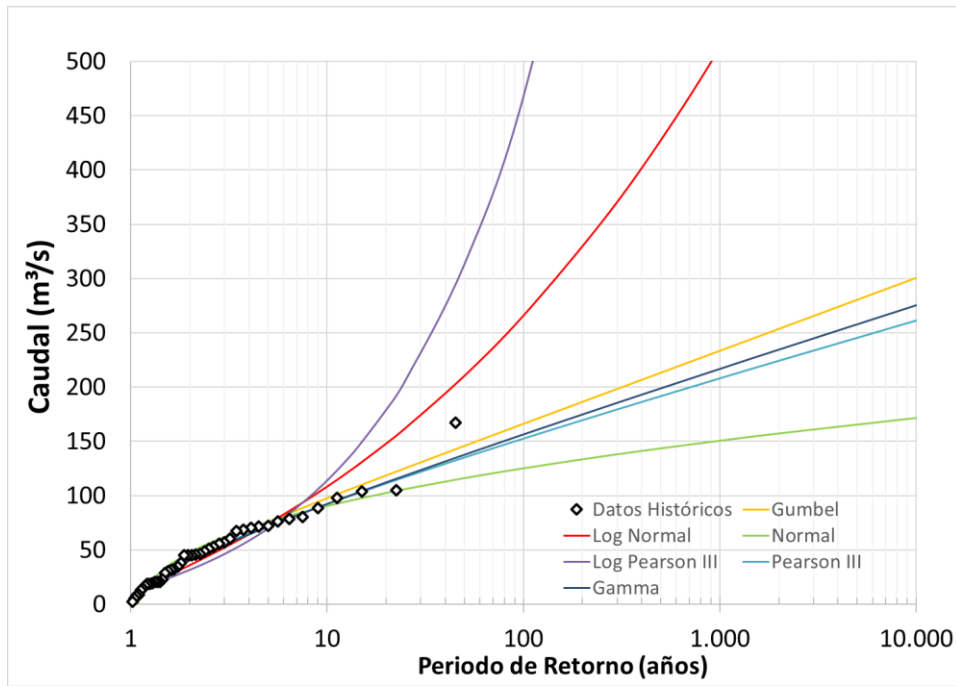
Periodo de retorno (años)	Diguillín	Renegado	Intermedia
100	219,0	225,8	219,7
1.000	279,0	288,1	281,9
10.000	338,9	350,3	344,1
PMP	448,5	464,0	457,6

Fuente: Elaboración Propia

10.5.4. CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS ESTACIONES DGA

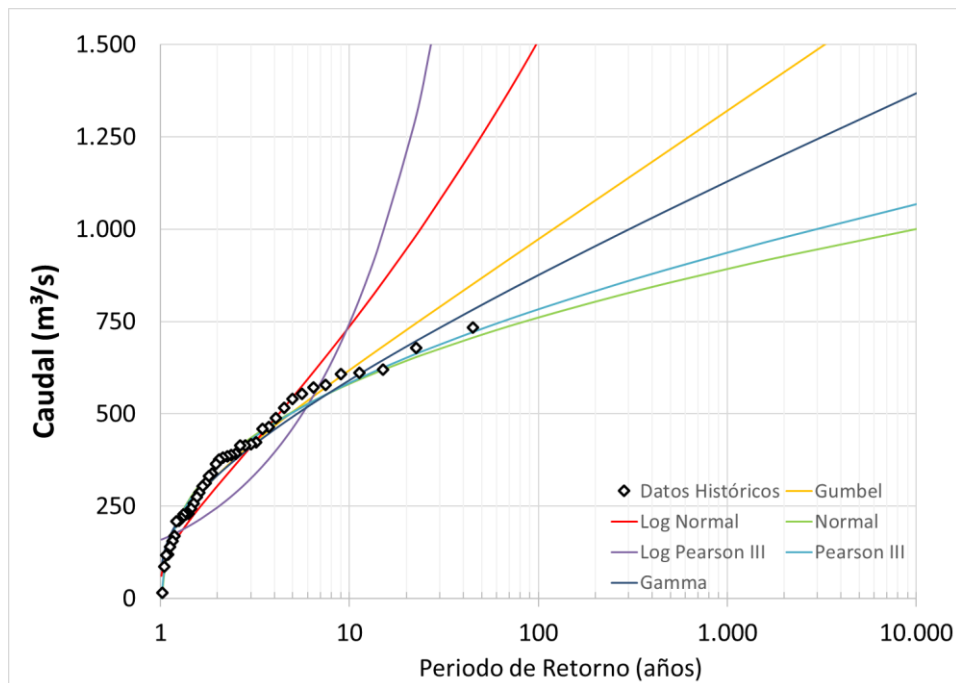
Dentro de los antecedentes con los que se cuenta, se analizaron los caudales máximos instantáneos registrados en las estaciones fluviométricas DGA indicadas previamente en la Tabla 10-12. Se realizó un análisis de frecuencia con el fin de estimar los caudales máximos para los periodos de retorno. Los resultados gráficos de este análisis se muestran en la Figura 10-15 y Figura 10-16, mientras que en la Tabla 10-15 se indican los caudales que se obtienen de dicho análisis de frecuencia para los periodos de retorno para 100, 1.000 y 10.000 años.

Figura 10-15: Ajuste Gráfico Caudales Máximos Instantáneos. Río Renegado en Invernada



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Figura 10-16: Ajuste Gráfico Caudales Máximos Instantáneos. Río Diguillín en San Lorenzo



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Tabla 10-15: Caudales Instantáneos Máximos Para Estaciones Fluviométricas DGA

Periodo de retorno (años)	Río Diguillín en San Lorenzo	Río Renegado en Invernada
Distribución	Pearson III	Gumbel
100	783,7	166,4
1.000	937,4	233,7
10.000	1068,8	300,9

Fuente: Elaboración Propia

10.5.5. ANÁLISIS LÍNEA NIEVE

Para la determinación de caudales máximos instantáneos, fue necesario determinar el área aportante por evento de precipitación. Para ello se determinó la línea de nieve de la cuenca aportante, la cual separa la precipitación líquida de la sólida.

Según Garreaud (1992), en su publicación “Estimación de la Línea de Nieve en Cuencas Andinas de Chile Central”, es posible estimar la altura de la línea de nieve para eventos de precipitación como:

$$H_{LN} = H_{0,min} - 550 (m)$$

Donde:

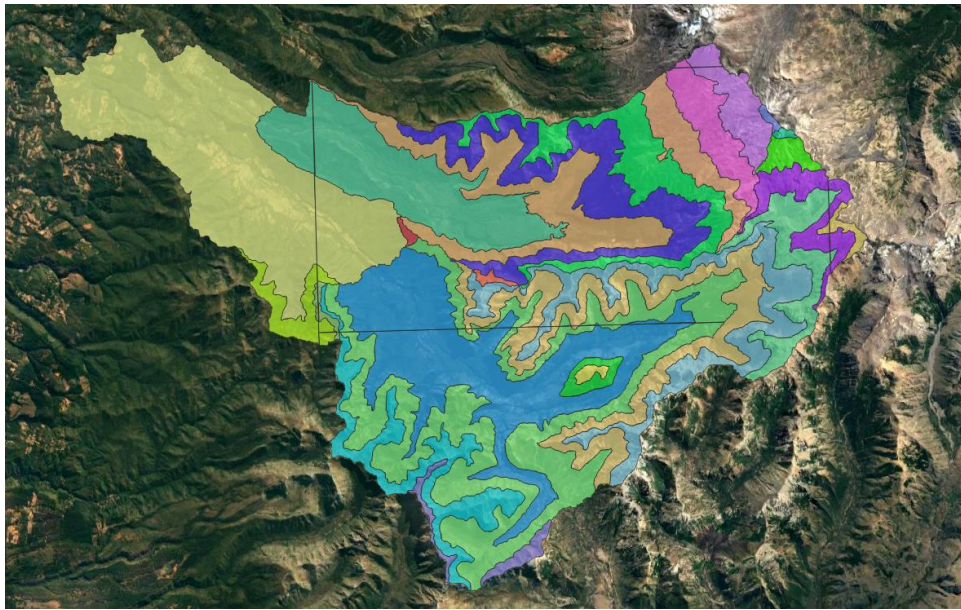
H_{LN} : Altura línea de nieve (m)

$H_{0,min}$: Altura isoterma 0°C para la temperatura mínima

Por lo tanto, para estimar la altura de la línea de nieve para un evento determinado, fue necesario conocer la cota de la isoterma 0°C de dicho evento. Es por esto, que se trabajó las temperaturas mínimas diarias para el periodo 1980-2024 por bandas de elevación para la cuenca en estudio provenientes del modelo CR2MET, de tal manera de construir una relación entre altura y temperatura.

Dicha relación se construyó considerando los eventos de máxima precipitación diaria anual, y su fecha para luego extraer la información de temperatura mínima por banda de elevación para dicho día. Se realizó la división de la cuenca en 27 bandas de elevación, como se muestra en la Figura 10-17.

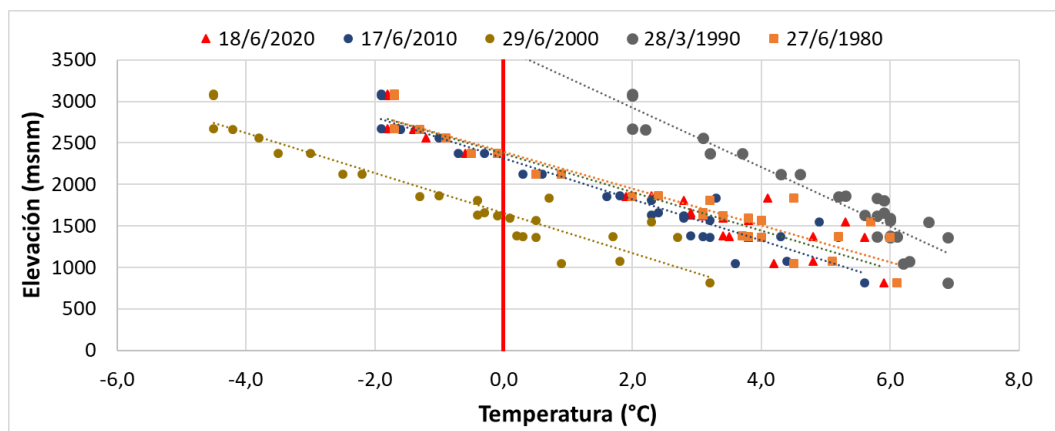
Figura 10-17: Cuencas Aportantes A Embalse Zapallar



Fuente: Elaboración Propia TYP 2024

En la Figura 10-18 se muestran los datos de temperatura y cota de elevación por banda para algunos eventos de precipitación máxima anual. A su vez, se muestran sus respectivos ajustes lineales para la determinación de la cota de elevación para la isoterma 0°C. Dichas relaciones se realizaron para todos los eventos de precipitación máxima diaria por año, para luego determinar la cota de nieve por evento.

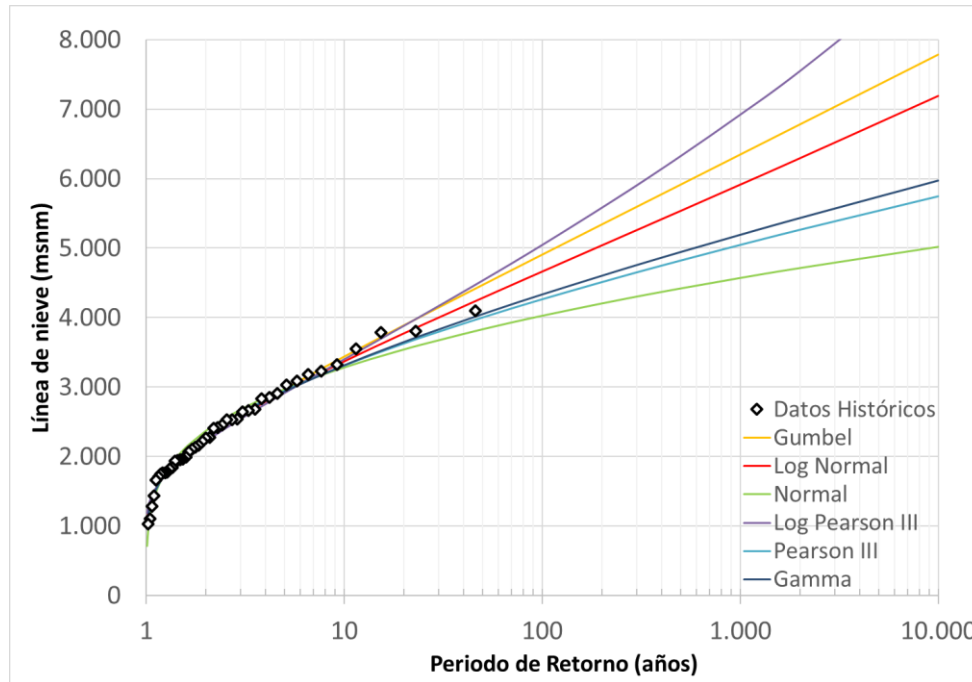
Figura 10-18: Variación De Temperatura Por Banda De Elevación En Eventos De Precipitación Máxima Diaria



Fuente: Elaboración Propia TYP 2024

Una vez determinada la cota de la línea de nieve por evento de precipitación máxima anual, se realizó un análisis de frecuencia a dichos datos, para así obtener la cota de línea de nieve según periodo de retorno, lo que se muestra en la Figura 10-19 y Tabla 10-16.

Figura 10-19: Análisis De Frecuencia De Cota De Elevación Para Línea De Nieve



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Tabla 10-16: Cota Línea De Nieve Según Distribución De Probabilidades Y Periodo De Retorno

Distribución	Cota (msnm)		
	T = 100	T = 1000	T = 10000
Gumbel	4679	6123	7563
Log Normal	4467	5719	6991
Normal	3927	4492	4952
Pearson III	4131	4938	5656
Log Pearson III	4168	4973	5661
Gamma	4187	5061	5850

Fuente: Elaboración Propia

Para determinar el porcentaje de cuenca que estaría aportando por evento según periodo de retorno, se realizó un análisis de la hipsografía de la cuenca, la cual muestra que el punto más alto de dicha cuenca se encuentra en la cota 3184 msnm. Al comparar este valor con los resultados de la Tabla 10-16, se observa que para los periodos de retorno en estudio se tendría una línea de nieve por sobre la cota máxima de la cuenca aportante, por lo que se concluyó que para todas las crecidas máximas se tendrá toda la cuenca aportando, definiendo así que las crecidas son completamente pluviales, con escaso aporte nival.

10.5.6. MÉTODOLÓGÍA PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA (HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO)

Para la estimación de caudales de crecida para los periodos de retorno de 100, 1.000, 10.000 años y para la precipitación máxima probable (PMP) se utilizó el programa HEC-HMS, mediante la implementación del HUS del SCS (*Soil Conservation Service*). Aquí se consideró un modelo de la cuenca aportante según lo definido en la Figura 10-11, con tres subcuencas aportantes.

10.5.6.1. MÉTODO DE LA CURVA NÚMERO (CN)

Para la utilización del HUS SCS, es necesario definir un método de pérdida de precipitación, de tal manera de definir la precipitación efectiva. Para ello, se utiliza el método de la Curva Número (CN), también desarrollado por el SCS. Aquí la precipitación efectiva se determina como:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Donde:

- P_e : Precipitación efectiva (mm)
- I_a : Abstracción inicial (mm)
- S : Retención potencial máxima

A su vez, la abstracción inicial y la retención potencial máxima se definen como:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad S = \frac{25.400}{CN(II)} - 254$$

De aquí, es posible ver que la precipitación efectiva queda definida exclusivamente por la variable CN, la cual se calcula dependiendo de las condiciones de humedad y tipo de suelo de cada cuenca. De acuerdo al estudio realizado por MN Ingenieros (2018), se le asignaron valores de CN de 85, 50 y 75 para las subcuencas aportantes a río Diguillín en San Lorenzo, río Renegado en Invernada y cuenca Intermedia, respectivamente. En este caso, se hizo una revisión de estos valores, los que se consideraron adecuados y representativos de las condiciones existentes en las tres cuencas.

Dado el contexto del estudio, en donde se realizó una estimación para crecidas máximas, es de esperar que el escenario más conservador corresponda a que las cuencas aportantes se encuentra con suelo saturado, de tal manera de maximizar la precipitación efectiva. Para ello, es necesario realizar la conversión de $CN(II)$ a $CN(III)$, la cual considera una condición de lluvia antecedente de al menos 28,00 mm en los 5 días anteriores. La conversión sigue como:

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0,13 \cdot CN(II)}$$

Al realizar esta modificación a los valores de CN para las tres cuencas aportantes, se tienen valores de 93, 70 y 87 para las subcuencas aportantes a río Diguillín en San Lorenzo, río Renegado en Invernada y cuenca Intermedia, respectivamente.

10.5.6.2. RASTREO DE CRECIDA. MÉTODO DE MUSKINGUM

Para la estimación de caudal afluente a un punto de control, en este caso, el embalse Zapallar, es necesario realizar un rastreo de hidrogramas. En la utilización del *software* HEC-HMS se decide utilizar el método de Muskingum, el cual plantea el cálculo de caudal efluente de un tramo en el intervalo de tiempo $t + \Delta t$ por medio de las siguientes ecuaciones:

$$O_{j+1} = C_1 \cdot I_{j+1} + C_2 \cdot I_j + C_3 \cdot O_j$$

Donde:

O_j : Caudal de salida del tramo en evaluación en el tiempo j

I_j : Caudal de entrada del tramo en evaluación en el tiempo j

Además, las variables C_1 , C_2 y C_3 se definen como:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2Kx}{2K \cdot (1 - x) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2Kx}{2K \cdot (1 - x) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2K \cdot (1 - x) - \Delta t}{2K \cdot (1 - x) + \Delta t}$$

En donde las constantes K y x corresponde a parámetros de calibración del modelo. El término K se define como 0,6 veces el tiempo de concentración de la cuenca y refleja fundamentalmente el tiempo de viaje de una partícula de agua en el cauce. A su vez, el parámetro x toma valores entre 0,0 y 0,5 e indica el valor de atenuación entre los caudales de entrada y salida para el tramo de estudio. Para este caso, se asume un valor medio de 0,25 en cada una de las subcuencas en estudio.

Para la definición del parámetro K es necesario identificar el tiempo de concentración de cada una de las subcuencas en estudio. Se utilizan las ecuaciones presentadas en el Manual de Carreteras según las Normas Españolas, California Culverts Practice, Giandotti y SCS, estas siguen como se indica en la Tabla 10-17.

Tabla 10-17: Expresiones Para Tiempos De Concentración (En Minutos)

Autor	Expresión
Normas Españolas	$t_c = 18 \cdot L^{0,78} / S^{0,19}$
California Culvert Practice	$t_c = 57 \cdot (L^3 / H)^{0,385}$
Giandotti	$t_c = 60 \cdot \left(\frac{4A^{0,5} \cdot + 1,5L}{0,8H_m^{0,5}} \right)$
SCS	$t_c = 3,42 \cdot \frac{L^{0,8}}{S^{0,5}} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}$

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

- t_c : Tiempo de concentración de la cuenca en minutos
 L : Longitud del cauce principal (km)
 S : Pendiente del cauce principal (%)
 A : Área de la cuenca (km²)
 H_m : Diferencia de nivel en metros entre la cota media de la cuenca y la salida
 H : Diferencia de nivel en metros entre la cota máxima de la cuenca y la salida
 CN : Curva Número adoptada en cada cuenca

Los valores para el ingreso a cada una de estas ecuaciones se muestran en la Tabla 10-18, mientras que en la Tabla 10-19 se indican los resultados de tiempo de concentración de cada cuenca y el valor del parámetro K utilizado en el método de Muskingum.

Tabla 10-18: Parámetros Geomorfológicos Por Cuenca

Parámetro	Unidad	Cuenca río Diguillín en san Lorenzo	Cuenca río Renegado en Invernada	Cuenca Intermedia
L	Km	31,4	31,8	22,0
S	%	7,7	6,4	4,5
A	Km ²	205,0	128,6	82,4
H_m	m	555,7	562,1	232,2
H	m	2429,0	1985,0	984,0
CN	-	93	70	87

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-19: Tiempos De Concentración Para Cuencas

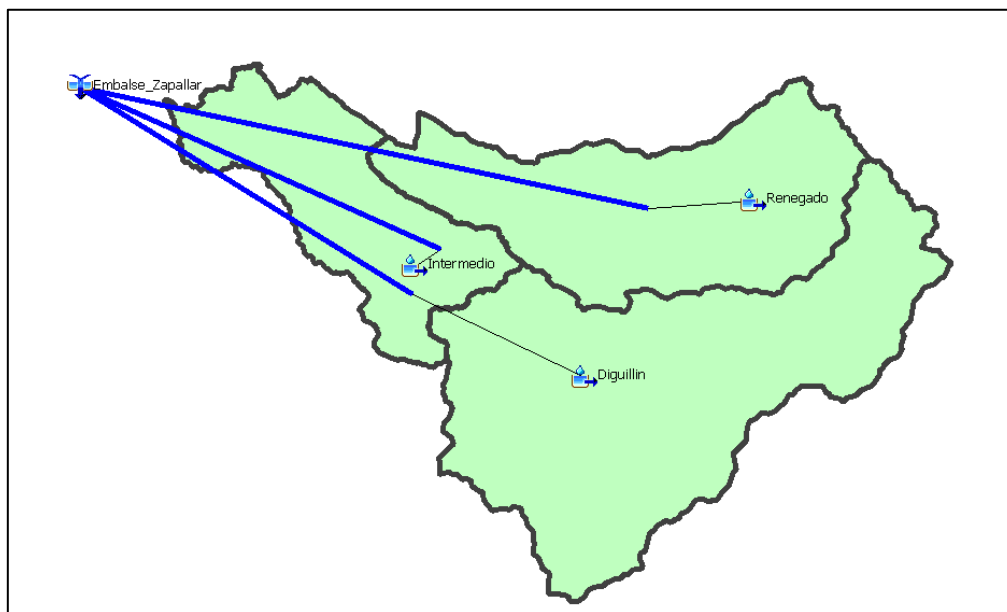
Autor	Unidad	Cuenca río Diguillín en san Lorenzo	Cuenca río Renegado en Invernada	Cuenca Intermedia
Normas Españolas	min	167,4	175,3	141,6
California Culvert Practice	min	151,7	166,7	142,2
Giandotti	min	331,9	294,5	340,7
SCS	min	28,8	69,5	35,8
Promedio	hra	2,8	2,9	2,8
<i>K</i>	hra	1,70	1,77	1,65

Fuente: Elaboración Propia

10.5.6.3. SOFTWARE HEC-HMS

Para la generación de caudales de crecida en el embalse Zapallar se implementó un modelo de 3 subcuencas aportantes, cuyo esquema es posible ver en la Figura 10-20. Como resultado de la implementación del modelo, se obtuvieron los hidrogramas aportantes de cada subcuenca y el resultante en la ubicación del embalse Zapallar.

Figura 10-20: Modelo De Cuencas Aportantes. HEC-HMS



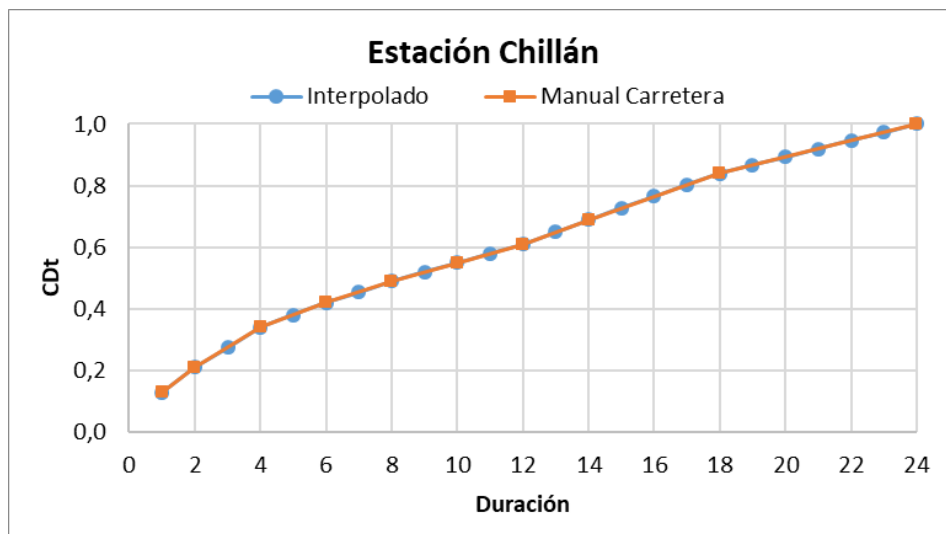
Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

10.5.6.4. DURACIÓN PRECIPITACIÓN PARA MAXIMIZACIÓN DE CAUDALES

Dado que el objetivo del estudio es determinar las crecidas máximas para los distintos periodos de retorno y PMP, se requiere en un primer momento determinar cuál es la duración de la lluvia que maximiza el caudal resultante en el punto de control del embalse Zapallar.

Para determinar la duración de la precipitación que maximiza el caudal máximo en el punto de control se utilizó como referencia, la precipitación de 100 años de periodo de retorno en 24 horas, la cual se indicó en la Tabla 10-14. A su vez, para determinar la precipitación según distintas duraciones de lluvia, se utilizaron los coeficientes de duración que se indican en el Manual de Carreteras, correspondientes a la estación Chillán, los que se muestran en la Figura 10-21 y Tabla 10-20.

Figura 10-21: Coeficiente De Duración. Estación Chillán



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Tabla 10-20: Coeficientes De Duración. Estación Chillán

Duración (hra)	CD _t	Duración (hra)	CD _t	Duración (hra)	CD _t	Duración (hra)	CD _t
1	0,13	7	0,46	13	0,65	19	0,87
2	0,21	8	0,49	14	0,69	20	0,89
3	0,28	9	0,52	15	0,73	21	0,92
4	0,34	10	0,55	16	0,77	22	0,95
5	0,38	11	0,58	17	0,80	23	0,97
6	0,42	12	0,61	18	0,84	24	1,00

Fuente: Elaboración Propia

Junto con los valores de precipitación para cada duración de lluvia de hasta 24 horas, se estimaron los hietogramas tipo para cada duración, utilizando las distribuciones propuestas por E. Varas, del grupo III y 50% de probabilidad, para las duraciones menores a 12 horas y las de A.

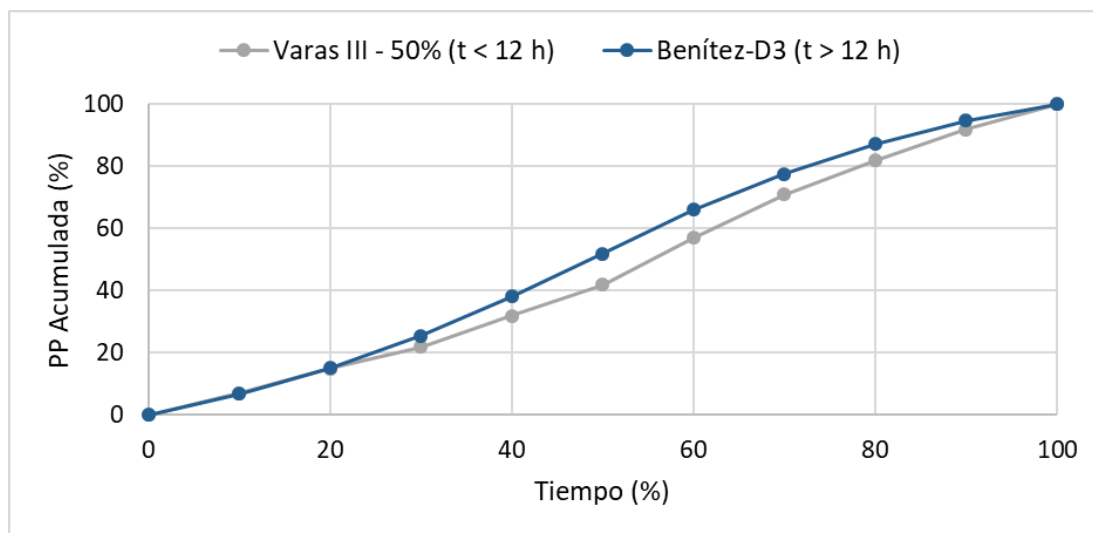
Benítez, con la distribución D3, para precipitaciones de 12 horas o más. En la Tabla 10-21 y Figura 10-22 se muestran los valores de precipitación acumulada según el tiempo transcurrido de lluvia.

Tabla 10-21: Distribución De Precipitaciones. Varas III (50%) y Benítez – D3

Tiempo (%)	Varas III – 50% (t<12 h)	Benítez- D3(t>12 h)
0	0,0	0,0
10	7,0	6,9
20	15,0	15,2
30	22,0	25,6
40	32,0	38,2
50	42,0	51,9
60	57,0	66,1
70	71,0	77,7
80	82,0	87,2
90	92,0	94,7
100	100,0	100,0

Fuente: Elaboración propia

Figura 10-22: Distribución De Precipitaciones. Varas III (50%) y Benítez – D3

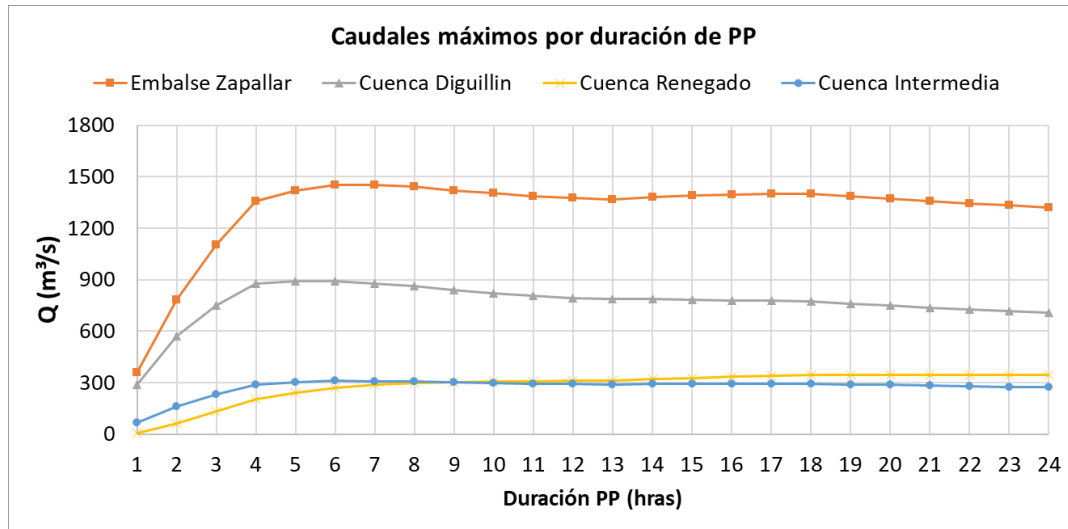


Fuente: Elaboración propia TYP SA 2024

En definitiva, para determinar la duración de la precipitación que maximiza el caudal de crecida en el embalse Zapallar se hizo correr un total de 24 modelos, en los que cada uno tiene una precipitación representativa por cada cuenca. En la Figura 10-23 se muestran los caudales máximos por cada cuenca aportante y el resultante en el punto del embalse Zapallar, mientras que en la Tabla 10-22 se indican los valores de caudal para la salida del embalse Zapallar en los 24 modelos evaluados. De estos resultados se obtiene que, para una precipitación de 6 horas de duración, se maximiza la respuesta de las cuencas aportantes, por lo que es esta duración la que se consideró para determinar los caudales máximos correspondientes a los distintos periodos de

retorno y también la CMP, tanto en el periodo histórico como en el que se ha evaluado el efecto del cambio climático. El modelo y resultados se encuentran en Anexo 7 “Análisis de Crecidas Extremas”.

Figura 10-23: Resultados HEC-HMS para Distintas Duraciones De Precipitación



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Tabla 10-22: Caudales Máximos En Embalse Zapallar

Duración PP (hra)	Q (m³/s)	Duración PP (hra)	Q (m³/s)	Duración PP (hra)	Q (m³/s)	Duración PP (hra)	Q (m³/s)
1	360	7	1451	13	1369	19	1388
2	785	8	1444	14	1383	20	1374
3	1102	9	1421	15	1391	21	1358
4	1357	10	1405	16	1395	22	1345
5	1421	11	1387	17	1399	23	1333
6	1454	12	1378	18	1403	24	1322

Fuente: Elaboración Propia

10.5.6.5. CRECIDAS DE PERIODO HISTÓRICO

Una vez determinada la precipitación que maximiza el caudal resultante en el embalse Zapallar, se realizaron los cálculos de caudal de crecida considerando las precipitaciones para los periodos de retorno de 100, 1.000, 10.000 y PMP, según el análisis de frecuencia realizado para el periodo histórico 1960-2023. En la Tabla 10-23 se muestran los resultados para el embalse Zapallar, así como para las cuencas aportantes obtenidos desde HEC-HMS. Se muestra también la comparación con el análisis de frecuencia realizado para las estaciones fluviométricas DGA.

Tabla 10-23: Caudales De Crecida En Periodo Histórico (1960-2023)

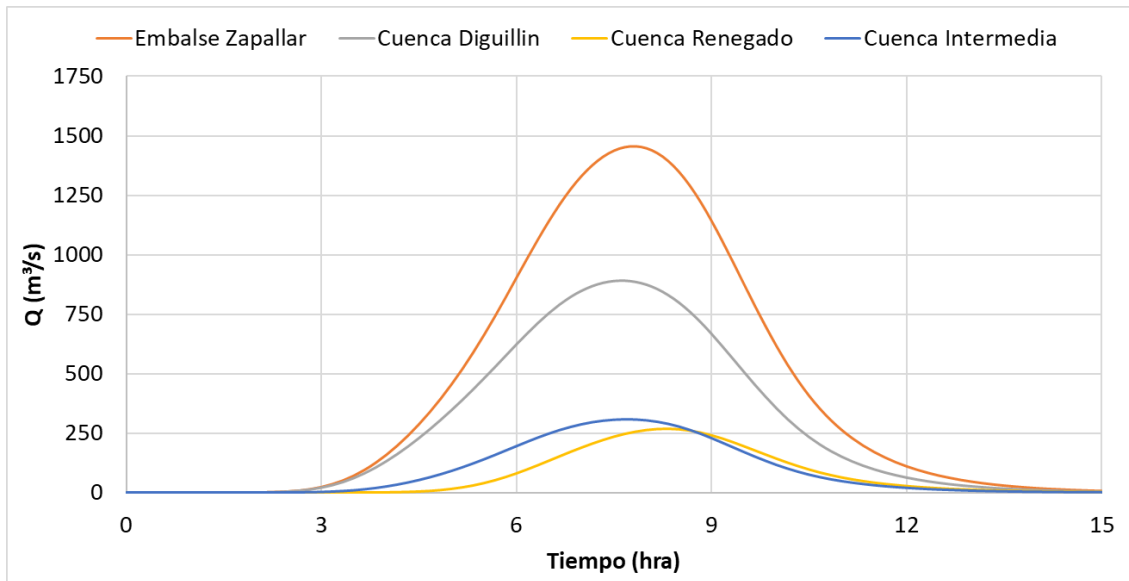
Caudal - Análisis Histórico (1960-2023) (m ³ /s)				
Punto Control	T 100	T 1000	T 10000	PMP
Resultados MN Ingenieros (2018)	1600	2200	2750	3938
Embalse Zapallar (HEC-HMS)	1454	1998	2556	3590
Cuenca río Diguillín (AF DGA)	784	937	1069	-
Cuenca río Diguillín (HEC-HMS)	892	1174	1454	1965
Cuenca río Renegado (AF DGA)	166	234	301	-
Cuenca río Renegado (HEC-HMS)	270	420	581	891
Cuenca Intermedia (HEC-HMS)	310	427	545	762

Fuente: Elaboración propia

Se observa de los resultados en HEC-HMS que si se compara con los obtenidos desde el análisis de frecuencia, se tienen valores de entre un 14% a un 93% mayores. Esto se debe principalmente a que los resultados obtenidos desde HEC-HMS son estimados desde la respuesta de la cuenca a precipitaciones máximas en 24 hrs, las cuales tienen una distribución de probabilidades distintas. Esto provoca que los caudales estimados mediante el HUS sean considerablemente mayores a los observados en las estaciones fluviométricas.

Además, de los resultados de la Tabla 10-23 se observa que si se suman los caudales máximos aportantes por cada cuenca, se tiene una leve diferencia con el caudal máximo que llega al embalse Zapallar. Esto ocurre dado que el método de rastreo de hidrograma utilizado modela el retardo correspondiente al tránsito de las crecidas por los cauces afluentes; esto genera un tiempo al peak distinto para cada cuenca, por lo que la suma de los caudales máximos no es el caudal máximo que se registra en el embalse. En la Figura 10-24 se muestra el hidrograma de crecida para el periodo de retorno de 100 años para la precipitación de 6 horas de duración.

Figura 10-24: Resultados HEC-HMS Para 6 Hrs De Duración De Precipitación (T=100 años)



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Si comparamos los resultados obtenidos en la Tabla 10-23 con los resultados de caudal máximo instantáneo obtenido en el estudio previo de MN Ingenieros (2018) y señalados en la Tabla 10-13, se puede apreciar una buena correlación, con una disminución promedio del 9% para los caudales máximos de crecida estimados.

10.5.7. ANÁLISIS CRECIDAS MÁXIMAS CON CAMBIO CLIMÁTICO

Para el análisis de las crecidas máximas instantáneas con cambio climático, se recurrió al mismo procedimiento que el usado para estimar las crecidas en el período histórico. En primer lugar, se realizó un análisis de frecuencia para los tres modelos y tres escenarios en evaluación, para cada una de las cuencas, resultando así un total de 27 análisis de frecuencia para la obtención de las precipitaciones de diseño.

Posteriormente, se hizo la estimación de caudal máximo mediante la propagación del hidrograma en HEC-HMS para el embalse Zapallar, considerando la precipitación de duración de 6 horas en cada caso, usando el mismo procedimiento ya descrito.

10.5.7.1. RESULTADOS DE PRECIPITACIONES PARA GCM'S EN ANÁLISIS

Considerando que se han utilizado los modelos de circulación global MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM en los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, es posible generar una matriz de resultados para las precipitaciones máximas obtenidas desde el análisis de frecuencia para cada cuenca. Este análisis se realizó para el periodo futuro 2024-2074. Los resultados en detalle de estos análisis de frecuencia se presentan en el anexo de este capítulo, mientras que los

resultados de precipitación máxima en 24 horas por cuenca, periodo de retorno, modelo y escenario se presentan en la Tabla 10-24, Tabla 10-25 y Tabla 10-26.

Tabla 10-24: Precipitación Máxima En 24 Horas (mm) (Periodo 2024-2074). Cuenca Río Diguillín

Modelo	Escenario	Distribución	T 100	T 1000	T 10000	PMP
MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	Log Normal	212,9	267,9	323,6	503,4
	SSP3-7.0	Log Normal	198,7	245,3	291,8	465,3
	SSP5-8.5	Gumbel	308,3	412,2	516,0	700,7
MRI-ESM2-0	SSP2-4.5	Gumbel	212,6	267,4	322,2	419,7
	SSP3-7.0	Pearson III	223,4	277,2	330,5	454,0
	SSP5-8.5	Gumbel	216,1	268,4	320,6	413,5
NorESM2-MM	SSP2-4.5	Gumbel	211,7	268,3	324,9	425,7
	SSP3-7.0	Gumbel	207,1	260,4	313,7	408,5
	SSP5-8.5	Gumbel	205,9	256,5	307,1	397,1

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-25: Precipitación Máxima En 24 Horas (mm) (Periodo 2024-2074). Cuenca Río Renegado

Modelo	Escenario	Distribución	T 100	T 1000	T 10000	PMP
MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	Log Normal	218,3	275,4	333,3	521,6
	SSP3-7.0	Gumbel	227,3	293,4	359,4	476,9
	SSP5-8.5	Gumbel	318,0	425,7	533,2	724,6
MRI-ESM2-0	SSP2-4.5	Gumbel	218,9	275,6	332,1	432,8
	SSP3-7.0	Gumbel	240,1	302,3	364,3	474,8
	SSP5-8.5	Gumbel	223,2	277,9	332,6	429,8
NorESM2-MM	SSP2-4.5	Gumbel	217,2	276,0	334,7	439,1
	SSP3-7.0	Gumbel	215,6	272,4	329,1	430,0
	SSP5-8.5	Log Normal	193,6	228,5	261,8	417,8

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-26: Precipitación Máxima En 24 Horas (mm) (Periodo 2024-2074). Cuenca Intermedia

Modelo	Escenario	Distribución	T 100	T 1000	T 10000	PMP
MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	Gumbel	234,5	305,9	377,2	504,1
	SSP3-7.0	Gumbel	226,6	294,5	362,2	482,8
	SSP5-8.5	Gumbel	312,4	419,4	526,1	716,2
MRI-ESM2-0	SSP2-4.5	Log Normal	194,0	232,9	270,7	423,1
	SSP3-7.0	Gumbel	232,0	293,1	354,1	462,8
	SSP5-8.5	Gumbel	209,3	260,1	310,8	401,1
NorESM2-MM	SSP2-4.5	Gumbel	216,2	276,4	336,5	443,6
	SSP3-7.0	Gumbel	210,5	267,1	323,6	424,2
	SSP5-8.5	Normal	178,7	199,7	217,0	417,0

Fuente: Elaboración Propia

Ahora bien, si comparamos estos resultados agregados a escala de cuenca, con los obtenidos del análisis de frecuencia de los datos históricos extraídos desde el modelo CR2MET, se tienen los

resultados que se muestran en la Tabla 10-27, Tabla 10-28 y Tabla 10-29. De aquí se observa que en general para el escenario SSP2-4.5 las precipitaciones tienden a aumentar en torno al 4%. Por su parte, para el escenario SSP3-7.0, las precipitaciones aumentan en torno al 6% solamente en la cuenca del río Diguillín, teniendo una leve disminución porcentual para las cuencas del río Diguillín e intermedia. Por último, el escenario SSP5-8.5 el cual es el de mayor riesgo en cuanto a emisiones de gases invernaderos presenta resultados de variación significativa a la baja para precipitaciones máximas en 24 horas.

Tabla 10-27: Diferencia Porcentual De Precipitaciones Máximas En 24 Hrs. Según Cuenca Y Período De Retorno Para Escenario SSP2-4.5

Período de retorno (años)	Diguillín	Renegado	Intermedia	Promedio
100	3,0%	3,4%	2,2%	2,9%
1.000	4,0%	4,3%	3,6%	4,0%
10.000	4,5%	4,8%	4,6%	4,7%
PMP	-0,2%	-0,1%	0,1%	-0,1%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-28: Diferencia Porcentual De Precipitaciones Máximas En 24 Hrs. Según Cuenca Y Período De Retorno Para Escenario SSP3-7.0

Período de retorno (años)	Diguillín	Renegado	Intermedia	Promedio
100	4,2%	-0,8%	-1,5%	0,6%
1.000	6,5%	-0,4%	-1,1%	1,7%
10.000	7,9%	-0,2%	-0,7%	2,3%
PMP	1,3%	0,7%	0,2%	0,8%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-29: Diferencia Porcentual De Precipitaciones Máximas En 24 Hrs. Según Cuenca Y Período De Retorno Para Escenario SSP5-8.5

Período de retorno (años)	Diguillín	Renegado	Intermedia	Promedio
100	-11,2%	-8,5%	-6,3%	-8,6%
1.000	-12,0%	-7,8%	-4,0%	-7,9%
10.000	-12,5%	-7,3%	-2,1%	-7,3%
PMP	-12,3%	-13,0%	-11,8%	-12,3%

Fuente: Elaboración Propia

10.5.7.2. MODIFICACIÓN LÍNEA NIEVE

Para el análisis de la variación de la línea de nieve fue necesario evaluar los resultados de cambio de la variable de temperatura mínima. Según los resultados obtenidos para el periodo 2031-2060, se tienen aumentos de temperatura entre 0,6°C y 1,5°C en la zona de estudio. Este aumento de temperatura hará que la isoterma 0°C aumente su cota lo que, a su vez, provocará que la línea de nieve también aumente.

Dados los resultados mostrados en la sección 10.5.5. y en conjunto con estos resultados a mediano plazo, es posible concluir que la línea de nieve para los eventos en evaluación seguirá estando por sobre la cota más alta de la cuenca aportante, teniendo así toda el área aportando durante los eventos de crecidas pluviales.

10.5.7.3. RESULTADOS CAUDALES DE CRECIDA BAJO CC

Una vez determinadas las precipitaciones máximas en 24 horas, la duración de la tormenta y el área aportante para cada cuenca, se realizó la estimación de caudales de crecida para el embalse Zapallar. Los resultados de los tres modelos y tres escenarios son contrastados con los presentados por MN Ingenieros (2018), junto con la estimación propia para el periodo histórico de 1960 a 2023. Estos resultados se muestran tabulados en la Tabla 10-30 y gráficamente en la Figura 10-25.

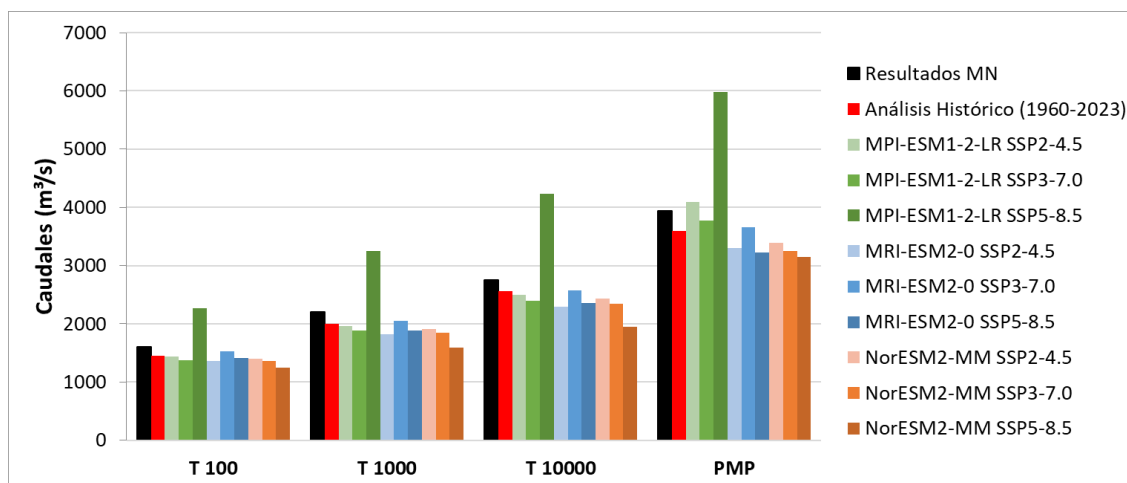
Al observar estos resultados, y al comparar con los caudales entregados por MN Ingenieros (2018) o bien con los caudales estimados del análisis histórico, se tiene que prácticamente la totalidad de los resultados presentan una disminución de los caudales máximos para todos los periodos de retorno, a excepción del modelo MPI-ESM1-2-LLR en el escenario SSP5-8.5, el cual muestra caudales considerablemente mayores para todos los periodos de retorno.

Tabla 10-30: Caudales De Crecida (m³/s) Para Escenarios De CC (2024-2074) En Embalse Zapallar

Modelo	Escenario	T 100	T 1000	T 10000	PMP
Resultados MN Ingenieros (2018)		1600	2200	2750	3938
Análisis histórico (1960-2023)		1454	1998	2556	3590
MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	1436	1960	2502	4094
	SSP3-7.0	1376	1880	2396	3768
	SSP5-8.5	2269	3243	4226	5984
MRI-ESM2-0	SSP2-4.5	1361	1822	2292	3305
	SSP3-7.0	1531	2047	2574	3655
	SSP5-8.5	1415	1883	2361	3226
NorESM2-MM	SSP2-4.5	1394	1908	2435	3388
	SSP3-7.0	1359	1846	2344	3247
	SSP5-8.5	1246	1597	1942	3147

Fuente: Elaboración Propia

Figura 10-25: Caudales De Crecida (m³/s) Para Escenarios de CC (2024-2074) En Embalse Zapallar



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Al realizar una comparación porcentual entre los caudales resultantes con los modelos de cambio climático y los resultados obtenidos del análisis histórico, se tiene que en promedio hay una disminución de un 5% de los caudales máximos, esto excluyendo el modelo MPI-ESM1-2-LLR en el escenario SSP5-8.5, que entrega valores muy discordantes con el resto de las estimaciones. En la Tabla 10-31 se muestran los resultados de variación respecto al análisis histórico para cada modelo y escenario según periodo de retorno. Mientras que en la Tabla 10-32 se muestran los resultados agregados por cada modelo y en la Tabla 10-33 agregado por cada escenario. Por último, en la Tabla 10-34 se muestran los valores agregados en su totalidad, pero haciendo la excepción del modelo MPI-ESM1-2-LLR en el escenario SSP5-8.5.

Tabla 10-31: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico. Resultados Desagregados

Modelo	Escenario	T 100	T 1000	T 10000	PMP	Promedio
MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	-1%	-2%	-2%	14%	2%
	SSP3-7.0	-5%	-6%	-6%	5%	-3%
	SSP5-8.5	56%	62%	65%	67%	63%
MRI-ESM2-0	SSP2-4.5	-6%	-9%	-10%	-8%	-8%
	SSP3-7.0	5%	2%	1%	2%	3%
	SSP5-8.5	-3%	-6%	-8%	-10%	-7%
NorESM2-MM	SSP2-4.5	-4%	-5%	-5%	-6%	-5%
	SSP3-7.0	-7%	-8%	-8%	-10%	-8%
	SSP5-8.5	-14%	-20%	-24%	-12%	-18%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-32: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico.

Resultados Agregados Por Modelo

Modelo	T 100	T 1000	T 10000	PMP	Promedio
MPI-ESM1-2-LR	16%	18%	19%	29%	21%
MRI-ESM2-0	-1%	-4%	-6%	-5%	-4%
NorESM2-MM	-8%	-11%	-12%	-9%	-10%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-33: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico.

Resultados Agregados Por Escenario

Escenario	T 100	T 1000	T 10000	PMP	Promedio
SSP2-4.5	-4%	-5%	-6%	0%	-4%
SSP3-7.0	-2%	-4%	-5%	-1%	-3%
SSP5-8.5	13%	12%	11%	15%	13%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10-34: Variación (%) De Caudales De Crecida Con CC Respecto A Análisis Histórico.

Resultados Agregados De Manera General

Escenario	T 100	T 1000	T 10000	PMP	Promedio
Agregado	2%	1%	0%	5%	2%
Agregado (sin MPI-ESM1-2-LLR SSP5-8.5)	-4%	-7%	-8%	-3%	-5%

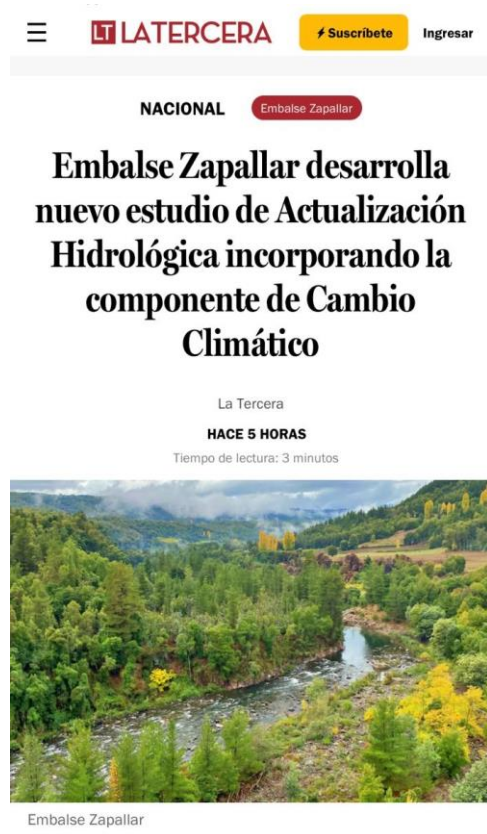
Fuente: Elaboración Propia

11. PLAN DE DIFUSIÓN

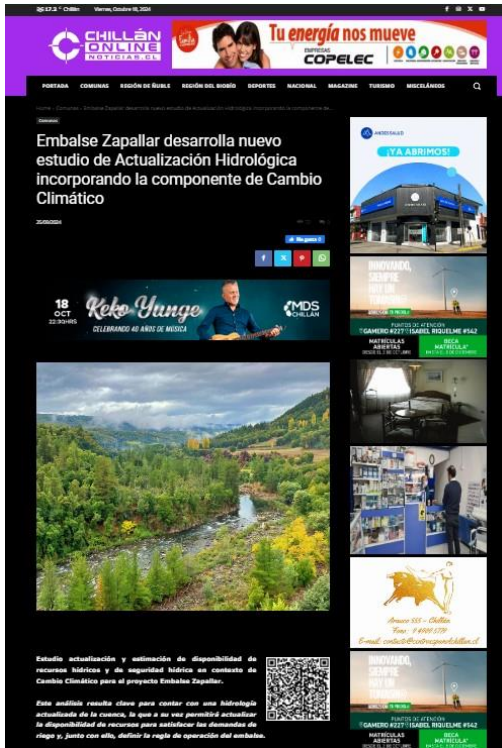
La delimitación de su objetivo principal radica en una difusión lo más amplia y constante de aquellos alcances contemplados en este estudio; estos son: la actualización y estimación de la disponibilidad de los Recursos Hídricos y de la Seguridad Hídrica en Contexto de Cambio Climático para el Proyecto Embalse Zapallar.

En este contexto, durante la primera etapa de difusión del Estudio y de acuerdo con los Términos de Referencia del contrato, se elaboró: 1) nota de prensa informativa abordando los objetivos y alcances del estudio y 2) una columna radial junto a la Inspectora Fiscal DOH Nivel Central, Karen Canales. Este primer material circula (publicado en septiembre 2024), fue posicionado en los soportes de prensa escrita: **Diario La Tercera (nacional)** y **Diario La Discusión (regional)**.

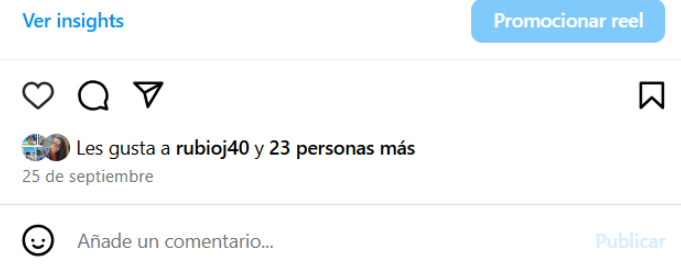
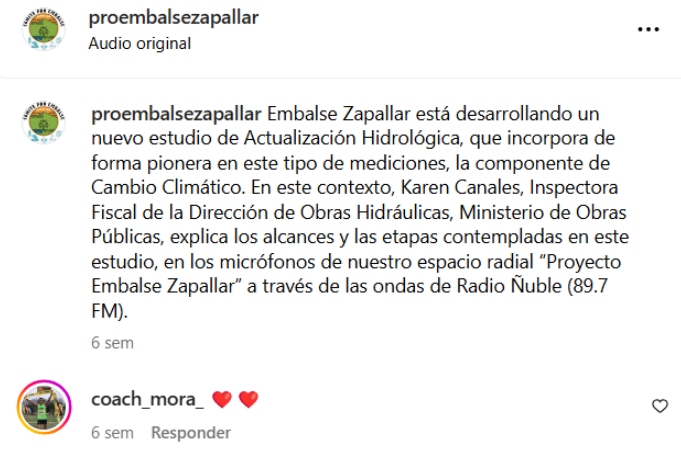
Asimismo, se incorporó su publicación en plataformas de noticias a nivel regional (**Chillanonline.cl**) y en medios radiofónicos de alta recordación, tales como **Radio Ñuble (89.7 FM; Chillán)**.



Plan de Medios Escritos: **Diario La Discusión (regional)** y **Diario La Tercera (nacional)**.



Karen Canales Zamorano
 INSPECTORA FISCAL DOH - MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

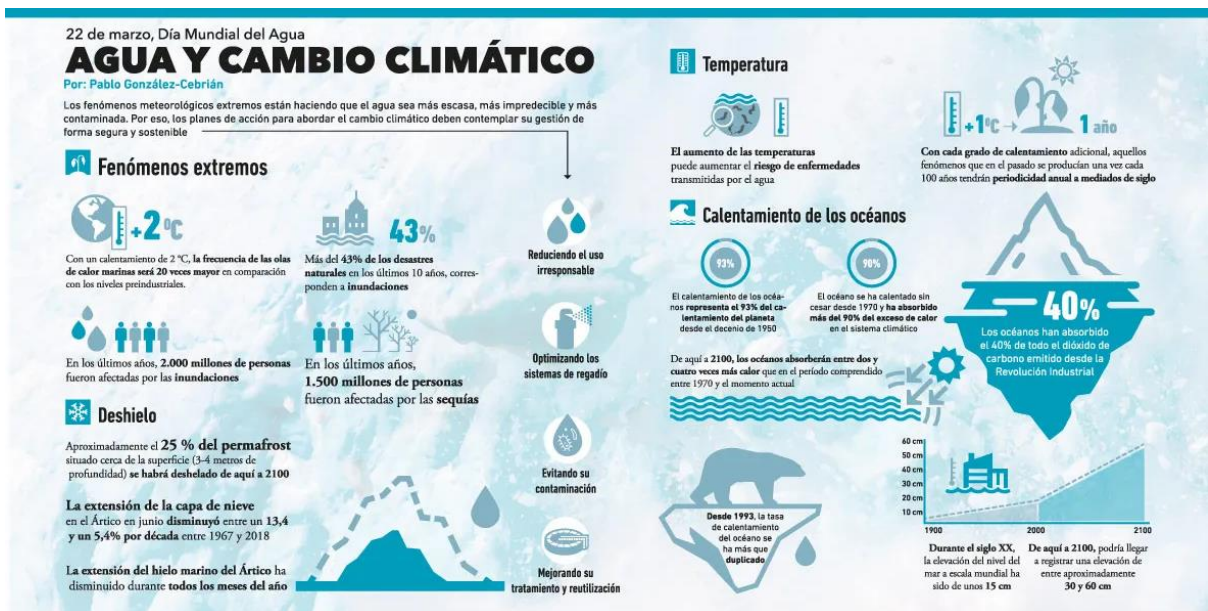


Plan de Medios Digitales y Radio: Portal Chillán Online y Radio Ñuble 89.7 FM (Chillán).

Difusión Resultados Finales

Para la difusión final del estudio - entrega de resultados obtenidos por el Estudio y aprobados por DOH- se consideran los siguientes entregables:

- Infografía Editorial Informativa.
- Material PPT.
- Díptico.



Modelo Infografía Editorial Tipo (sólo referencial).

El desarrollo de la Infografía Editorial Informativa, considera como base los resultados obtenidos por el Estudio Disponibilidad y Seguridad Hídrica Embalse Zapallar.

De la misma forma, se incorpora la producción y edición de material relevante en relación al análisis hidrológico, cambio climático y otras importantes métricas emanadas del estudio. Contenido específico a exhibir ante las distintas comunidades y/o públicos de interés mediante presentaciones tipo PPT, Díptico u otros, en contexto de las actividades de Participación Ciudadana en desarrollo por parte de DOH-MOP.

En cuanto a la difusión final del estudio, TYP SA Chile preparará los materiales (Infografía Editorial Informativa, material PPT y Díptico a cargo de su profesional periodista), para luego entregarlo a la empresa encargada de la difusión a nivel de PAC territorial (Michell Consultores).

12. CONCLUSIONES Y VISIÓN CRÍTICA DEL CONSULTOR

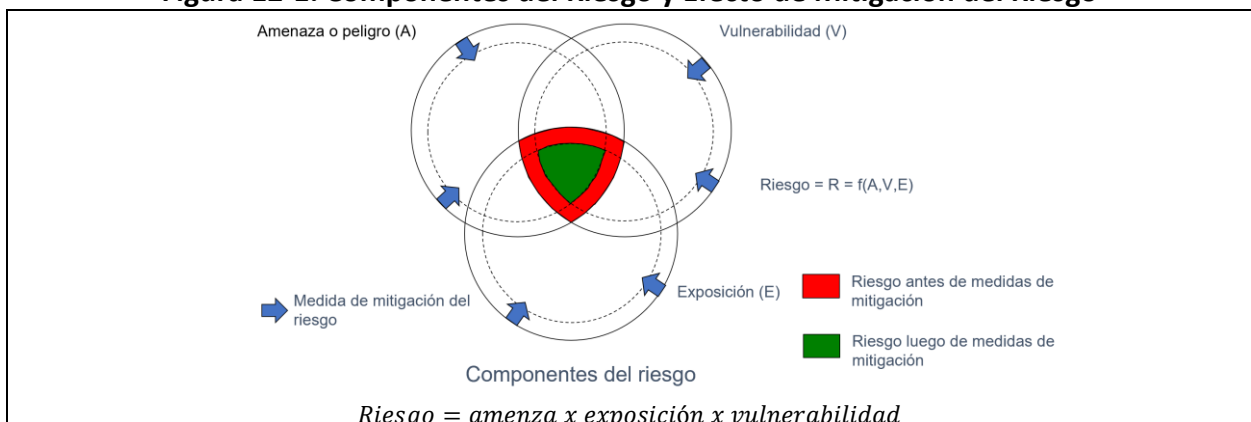
Se han revisado todos los antecedentes disponibles hasta la fecha respecto al análisis de disponibilidad de recursos hídricos desde el embalse Zapallar. En una primera parte se hacen comentarios generales y posteriormente en cada estudio se agrega un recuadro con ideas fuerza sobre la visión del consultor y la información útil de cada proyecto analizado.

Comentarios Generales Componente de Cambio Climático y la Zona de Estudio Según la Visión Del Consultor:

Es fundamental utilizar el enfoque de amenaza, riesgo y vulnerabilidad (Dewan, 2013) para la zona de estudio. Según la información revisada en estudios anteriores, se refuerza la idea de que la zona está expuesta a una amenaza climática, caracterizada por disminuciones en la precipitación y aumentos en la temperatura. Frente a esto, la seguridad hídrica de los agricultores que actualmente no reciben recursos del canal matriz Laja Diguillín presenta una alta vulnerabilidad. En este contexto, el riesgo se entiende como la probabilidad de ocurrencia o el grado de pérdida de un elemento específico esperado ante una amenaza particular (por ejemplo, pérdidas de hectáreas de cultivo por no satisfacer adecuadamente sus requerimientos hídricos). La matriz productiva asociada al área agrícola es uno de los elementos clave que permiten reforzar la idea de riesgo.

Por otro lado, existen externalidades ambientales positivas que contribuirían a disminuir la vulnerabilidad de la zona respecto a crecidas en el área de inundación y al aumento en la recarga de las aguas subterráneas en la zona de estudio (al aumentar el caudal en la red de distribución de canales). En la Figura 12-1 se muestra en forma gráfica las componentes del riesgo a partir de las diapositivas del curso ICH3222 (DIHA-UC):

Figura 12-1: Componentes del Riesgo y Efecto de Mitigación del Riesgo



Fuente: ICH3222, DIHA-UC

Se debe concientizar a la zona aguas abajo del Embalse Zapallar de los beneficios del proyecto para la seguridad de riego, consumo humano, incendio y eventual volumen controlador de crecida.

1. En el estudio **Modelación de R&Q INGENIERÍA (2017)** desarrolló un modelo simplificado de oferta y demanda hídrica (utilizando modelo hidrológico WEAP), sin embargo, carece de un análisis de proyecciones de forzantes meteorológicas que afecten la disponibilidad y demanda del recurso hídrico. En el caso de las cuencas aportantes, en dicho estudio fueron subdivididas según el número de bandas que recaen sobre su área, asignándoles las precipitaciones adoptadas de cada banda. La información de entrada de esta variable resulta crítica para el modelo al ser la única entrada de agua al sistema. Si bien la metodología aplicada es correcta, se basa en información antigua (1978-2015) con meteorología que no es representativa de las condiciones más recientes.

Además, se recomienda actualizar esta fuente de información con los datos más recientes de las estaciones y evaluar la forma en que distribuyen hacia las unidades de modelación.

El modelo hidrológico RQ (2017) en base al que se analizó el tamaño de embalse actualmente no cumple con normas de Guías Metodológicas del Servicio de Evaluación Ambiental. Según análisis preliminar de tendencia de precipitaciones y temperatura del acápite “Contexto Hidro-Climático” durante los últimos 30 años la tendencia a la disminución lluvia anual y el aumento en la temperatura es una componente innegable en la zona de estudio.

El cambio al Código de Aguas prioriza consumo humano y subsistencia, este aspecto debe ser reforzado en la actual implementación de la regla de operación. Se deben realizar trabajos de terreno que permitan tener mediciones de los siguientes ítems:

- Pérdida de la red de canales
- Afloramiento en tramos del río
- Derrames entre sectores de riego
- Otros flujos relevantes (interacción río acuífero)

Todos estos aspectos tendrán un impacto en la actualización de la regla de operación del actual sistema.

Se sugiere aprovechar la información de distintos productos climáticos que entregan información de precipitaciones de forma distribuida y con un extenso periodo de información, tales como CR2MET.

Se destaca como información relevante del estudio el modelo WEAP, identificación de zonas de pérdidas y afloramientos, sin embargo, los valores adoptados deben ser contrastado con mediciones de terreno.

2. El estudio de **DOH-MN (2018)** elaboró un catastro de usuarios en el área de influencia del proyecto ubicada la actual Región de Ñuble y actualizó los diseños de ingeniería del Embalse. En este estudio no se analizaron cambios futuros de las variables precipitación máxima diaria y temperatura durante los eventos de tormenta que pueden afectar los caudales máximos instantáneos durante crecidas.

Respecto a las crecidas para estimar la CMP, utilizó los valores de PMP con la metodología de hidrograma unitario sintético utilizado previamente en el cálculo de crecidas asociadas a periodos de retorno, con las mismas parametrizaciones de convolución, distribución horaria e infiltración, con el que obtiene un caudal máximo instantáneo superior, como era esperable, al estimado para el periodo de retorno de 10.000 años. Esta metodología se considera correcta y bien desarrollada. Sin embargo, se deben incluir los datos más recientes, en particular los asociados al año 2023, donde se presentaron eventos de precipitación que podrían alterar los resultados de forma significativa. Se destaca que, a pesar de haber sido de forma cualitativa y sin base numérica, consideró efectos de cambio climático.

Desde el punto de vista de crecidas:

Fórmulas empíricas del Manual DGA-AC (1995) fueron estimadas con estadística pasada que no representativa del último periodo climatológico. Si bien son una buena referencia, se requiere utilizar fórmulas que tengan en cuenta las variables anteriormente analizadas. Por lo que la componente de crecidas que presenta DOH-MN (2018) será considerado como base, pero se complementará con factores y estimaciones que incorporen directamente la componente de cambio climático.

El enfoque de Hidrograma Unitario Sintético, que corresponde a una función impulso-respuesta, permitirá actualizar los caudales máximos considerando Cambio Climático.

Al respecto también se debería poder definir un volumen de amortiguamiento de crecidas para distintos periodos de retorno, de tal manera que frente a eventos extremos se incluya en el manual de operación del embalse un volumen mínimo para seguridad de los habitantes que se ubican aguas abajo del embalse.

3. En el estudio **Impacto Ambiental de GAEC (2020)** no se analizaron cambios futuros de las variables precipitación y temperatura a nivel mensual, estacional o anual que puedan modificar las disponibilidades o demandas futuras del recurso hídrico; tampoco se observan análisis de cambios de las forzantes meteorológicas durante los eventos de tormenta que pueden afectar los caudales máximos instantáneos durante crecidas.

Este estudio fue llevado a cabo en forma previa a la elaboración y publicación de las Guías Metodológicas SEA que consideran que el cambio climático debe ser incorporado en el análisis del estudio (año 2023).

Todos los análisis y antecedentes que emanen de la presente consultoría permitirán complementar información clave para el entendimiento y el efecto del Proyecto Embalse Zapallar y su entorno hídrico.

4. El estudio de **Regla Operacional Zapallar de la Universidad de Chile (2021)**, contiene la formulación del modelo operacional y los resultados de la simulación de operación del embalse Zapallar utilizando una regla de operación estándar. Se concluye que la capacidad del embalse no es suficiente para satisfacer la totalidad de la demanda de riego. Esto indica preliminarmente que una mayor capacidad del embalse permitirá una utilización más cabal del derecho eventual disponible y posiblemente se vería reflejado en años de llenado incompleto del embalse, pero con una mayor superficie regada con 85% de seguridad.

El modelo utilizó la información hidrológica, superficies agrícolas, demandas de agua de riego, derechos de agua, características del proyecto de embalse y otras, de los antecedentes e informes disponibles de la DOH. Los escenarios referidos a regar las hectáreas base o aquellas que cumplen con la seguridad del 85% consideran las condiciones registradas históricamente para dichos efectos. La simulación de la regla operacional incluye sólo la hidrología y demandas históricas de los cultivos para realizar el balance en el embalse, sin considerar cambios futuros de la disponibilidad y demanda hídrica por efecto del cambio climático.

El modelo de regla operacional implementado por UCH-DIC para DOH permitió estimar la seguridad de riego de manera práctica y sencilla. Al respecto se recomienda continuar con el mismo enfoque y estructura de datos para actualizar la regla de reparto. Sin embargo, resulta primordial que se incorporen flujos de afloramientos y derrames de riego en la seguridad de riego, ya que el enfoque actual implementado por UCH-DIC se considera demasiado conservador al no incluir estos flujos.

Por otro lado, la regla de reparto debe ser actualizada en cuanto a la prioridad de cada uno de los flujos: consumo humano y subsistencia y servicios ecosistémicos (caudal ecológico). Como parte de la actualización de la Etapa 2 el modelo WEAP implementado con forzantes climáticas permitirá correr y actualizar la regla de operación considerando distintos escenarios climáticos.

5. Ahora bien, en el estudio de **Homologación de la hidrología para la estimación de la oferta natural de agua en Chile, DGA-UCH (2021)**, circunscrito en el marco del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, se desarrolló un producto grillado a escala de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ de latitud y longitud denominado CR2Met, que determinó las forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura máxima, mínima y media) a nivel diario para todo el territorio continental chileno. Para la zona de interés del presente estudio se observan aumentos similares de la temperatura media anual del orden de $1,5^\circ\text{C}$ para el periodo 2030 a 2060 mientras que las variaciones de precipitación anual promedio muestran diferencias cuya intensidad de los cambios tiene concordancia con la sensibilidad asociada a los modelos, donde CSIRO-Mk3-6-0 (menor sensibilidad) presenta menores reducciones (hasta 5%) mientras que IPSL-CM5A-LR (mayor sensibilidad) muestra las reducciones más significativas (hasta 15%).

Este estudio entrega datos preliminares de reducciones futuras en el recurso hídrico en la zona de estudio. Al respecto los archivos de salida que contienen flujos de caudal, infiltración y otras componentes del balance hídrico serán un punto de referencia para actualizar la regla operacional del Balance Hídrico. Tal como se presentó en este informe la disminución de precipitación y aumento de temperatura implica que se consideren algunos de los GCMs o Escenarios analizados en el trabajo de DGA-UCH.

6. En el estudio **Software para la Gestión del Sistema Laja de la Universidad Concepción/DOH/CIBAS (2023)**, actualmente en desarrollo, se busca instalar una herramienta (software) para apoyar de manera objetiva y con mayor información a quienes toman las decisiones de consumo. También se busca simular distintos escenarios que se presenten en el año, como pronósticos de caudales, deshielos o la cantidad de agua que se proporcione en algunos meses. Se espera que el proyecto finalice y tenga operativo sus resultados en el año 2025. En esta iniciativa están involucrados los Canalistas del Laja, Canal Zañartu, Canal Laja-Diguillín, Colbún, la Dirección de Obras Hidráulicas y la Dirección General de Aguas también está interesada en tomar parte.

Esta herramienta, debería entregar múltiples resultados de interés, entre ellos los caudales de trasvase del canal Laja-Diguillín. Según la información recopilada del proyecto IDEA, en el cual participa la DOH, da a entender que entregaría caudales de trasvase.

Es relevante coordinar con el equipo profesional del proyecto IDEA reuniones de manera de utilizar dicha información y generar sinergias con el proyecto regional. Con ello, a partir de ese proyecto tomar los caudales de ingreso en el sistema Laja-Diguillín, ya que en el presente estudio no se tiene considerado realizar un modelo específico del sistema Laja.

Este proyecto se encuentra en desarrollo, durante julio del presente año (2024) cumple su primer año de ejecución en el cual se presentará un informe de avance. Al respecto DOH Región Ñuble, como servicio interesado en el proyecto de investigación aplicada, permitirá llevar a cabo una serie de instancias de intercambio con el equipo que ejecuta este proyecto IDEA. Durante la Etapa 1 y Etapa 2 se espera tener un nutrido intercambio con DOH regional y nivel central, así como con entidades interesadas.

7. El estudio **Plan Estratégico de Gestión Hídricos Biobío (DGA-UC-UCSC 2021)** se desarrolló en el marco de una serie de planes estratégicos de gestión hídrica para distintas cuencas del País. Entre los años 2019-2020 se ejecutaron los planes para varias cuencas, luego entre los años 2020-2021 se sumaron otras 10 cuencas más donde entre ellas se encuentra los resultados del plan estratégico de la cuenca del río Biobío, buscando conocer la oferta de los recursos hídricos, la demanda actual y la proyectada del agua, mediante una caracterización, diagnóstico y modelación hídrica de cada cuenca.

El estudio hace un extenso análisis sobre la caracterización climática de la zona de interés, mostrando las distribuciones espaciales de la precipitación, temperatura mínima y evapotranspiración anual en los distritos agroclimáticos obtenidos a base de la información del Atlas Agroclimático de Chile.

El estudio PEHG-Biobío (2021) al pertenecer a una cuenca vecina (con la cual se realizan trasvases de cuenca) permite tener estimaciones preliminares de disminución porcentual futura y aumento de temperatura para los escenarios futuros. Al respecto se señala que, bajo el escenario RCP8.5, y de acuerdo con lo indicado en la plataforma de Simulaciones Climáticas del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, la zona donde se ejecuta esta iniciativa tendría un aumento de la temperatura entre 0,5 -0,6°C en el futuro cercano (2020-2035), de 0,6 - 1,05 °C en el futuro intermedio (2035-2050) alcanzando incluso un aumento de 2°C para finales de siglo. Para las precipitaciones se indica una clara tendencia a disminuir los valores totales anuales, con valores promedios en torno al 96% en el futuro cercano (2020-2035) y 92% en el futuro intermedio (2035-2050). Se señala, además, que resultados similares fueron encontrados en el estudio Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral (DGA, 2019).

En el caso de los eventos extremos asociados al cambio climático, se plantea la necesidad de determinar los efectos que el cambio climático ejercerá sobre estos, ya que actualmente no se cuenta con proyecciones y/o simulaciones de este aspecto. Dicho aspecto se abordará durante la Etapa 2 del presente proyecto para el caso de la cuenca de estudio del Embalse Zapallar, correspondiente a la cuenca del río Diguillín.

8. Por otra parte, en el **Acuerdo de Operación y Recuperación del Lago Laja complementa convenio de 1958**, celebrado entre el director de DOH y el representante de ENEL, se indica que la cuenca del Laja ha experimentado una disminución de la pluviometría es por ello que la DOH realizó un estudio en 2014 que concluyó que los caudales estadísticos medios afluentes al lago Laja resultaron inferiores a los considerados en el tiempo que se suscribió el Convenio de 1958. Además, la cláusula 10° establece la facultad de las partes para revisar el convenio. Basados en estudios, a partir del año 2014, se formó la mesa de trabajo que cuenta con la participación de la Asociación de Canalistas del Laja, Asociación de Canalistas Zañartu, Junta de Vigilancia del Río Diguillín, Enel, DOH y DGA, con el apoyo de los ministerios de Agricultura, Energía y CNR.

La información presentada en este acuerdo permite estimar inicialmente los caudales de trasvase desde el río Laja al canal matriz Laja-Diguillín. Se consideró la demanda de estos regantes en los nuevos volúmenes de riego, garantizándoles agua del lago de manera oportuna y segura durante la temporada de riego. Además, se asegura a los primeros regantes un volumen de emergencia en situaciones de escasez hídrica, definido por la DOH, independientemente del colchón del lago y del régimen del Convenio.

9. Sobre las **“Guías Cambio Climático en Proyectos SEIA”** y **“Cambio Climático y Recurso Hídrico” (SEA, 2023)**.

La información clave que presentan las dos guías SEA sobre cambio climático y recurso hídrico indican que los trabajos que se desarrollan en el contexto de la presente consultoría están alineados con la actualización de requerimientos ambientales que el Servicio de Evaluación Ambiental pone como piso base para proyectos de gran envergadura. El postulado principal del SEA es que Chile es un país con alta vulnerabilidad frente al cambio climático, hecho que se refuerza en la zona de estudio al analizar la estadística de precipitación, temperatura y caudal de las últimas treinta décadas. La incorporación de productos grillados CR2MET y series GCMs CMIP6 pondrán al día el proyecto de Embalse Zapallar.

10. Finalmente, se revisaron **otros estudios complementarios**, cuyas conclusiones se detallan a continuación:

ESTUDIO	AÑO	CONCLUSIONES
"Evaluación de Medio Término Proyecto Laja Diguillín Depto. De Planificación DOH 2002"	2002	Entrega la evaluación económica del sistema de riego Canal Laja-Diguillín
"Definición de Alternativas de Ingeniería para Áreas Blancas y Áreas Adicionales Proyecto Laja Diguillín, Región del Biobío SIGA-DOH 2012"	2012	Identificación y agrupación de las áreas Blancas y Adicionales, susceptibles a ser regadas el canal Matriz Diguillín - Coltón. Realización de un estudio Hidrológico en el río Diguillín con el objetivo de determinar el caudal en régimen natural aguas arriba de la bocatoma Diguillín y aguas abajo de la bocatoma. Con una seguridad del 85%
"Ingeniería de las Adecuaciones del Sistema de Riego del Proyecto Laja-Diguillín REG-DOH 2001"	2001	Se entrega información de las obras de riego proyectadas que abastecen de agua proveniente del río Diguillín, desde el Embalse Zapallar o Diguillín y que permitirá surtir del recurso a la zona alta de las comunas de San Ignacio y El Carmen (sobre el canal Laja - Diguillín). Se considera la información entregada de los sectores definidos como Sector 3, 8 y el sector 2, permitiendo obtener la red de canales principales proyectados en cada una de las áreas de riego, destacándose el canal Zapallar que nace desde el embalse Zapallar y que alimenta las áreas de El Carmen Alto y San Ignacio a través de los canales proyectados. Se consideran una serie de obras adicionales, generando una nueva red para abastecer la totalidad de las áreas de riego. Dicha red proyectada permite tener información de las áreas de riego nuevas que serán abastecidas por el Embalse Zapallar.

11. En síntesis, existen abundantes estudios con gran cantidad de información de los recursos hídricos que se han desarrollado en la zona de influencia del proyecto. El principal inconveniente es que no consideran información estadística relevante de los últimos años (2023 en particular) y la gran mayoría no considera análisis de forzantes climáticos. Por otro lado, preocupa la situación del sistema Laja, la cual está siendo desarrollada por la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) y la Universidad de Concepción (UdeC) en colaboración con DOH, ya que el presente estudio debiese utilizar los caudales generados por dicho software en el Trasvase del canal Laja, de lo contrario ambos estudios no serán concordantes, puesto que el presente estudio no considera modelar el Sistema Laja.

12. Del análisis realizado, la presente consultoría tomó como base el modelo WEAP desarrollado el 2017, actualizando toda la estadística e información de la actualización del Balance Hídrico Nacional.

➤ En relación a las forzantes hidrometeorológicas en periodos histórico y futuro lo siguiente:

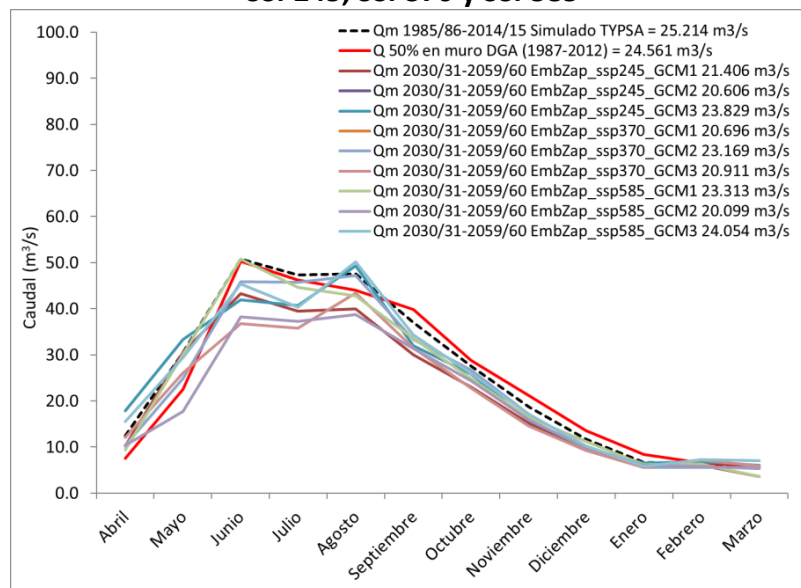
A nivel de forzantes meteorológicas, se han realizado múltiples evaluaciones sobre su desarrollo y aplicabilidad. El producto CR2MET se destaca como una herramienta útil para representar la meteorología de la zona, especialmente en lo que respecta a las precipitaciones. Este producto ya considera el efecto de "under catchment", lo que lo hace apropiado para su representación en áreas de alta montaña. Sin embargo, en el contexto de precipitaciones extremas, se ha observado una leve subestimación en la región que requiere atención para mejorar su precisión. En lo que respecta a las variables de temperaturas extremas, CR2MET presenta limitaciones y necesita corrección, presentándose un sesgo en función de la elevación. El sesgo en estas variables se atribuye a la escasez de registros disponibles de estaciones meteorológicas. Estas estaciones son utilizadas como base para el desarrollo del modelo, lo que puede comprometer la precisión en zonas específicas. Por lo tanto, aunque CR2MET constituye un buen producto base, es fundamental realizar una verificación cuidadosa antes de su aplicación en regiones particulares, dado que fue desarrollado a una escala mayor a la que se desarrolla este estudio.

En relación con el efecto del cambio climático en la zona, el uso de múltiples modelos y escenarios permite obtener un rango más amplio de las potenciales variaciones esperadas. A medida que se analiza el mediano plazo, la similitud en los resultados de los diferentes escenarios de gases de efecto invernadero se traduce en diferencias mínimas en términos de cambios precipitación anual entre los distintos modelos y escenarios. Sin embargo, existen particularidades que permiten diferenciar un modelo de otro, en aspectos tales como variaciones en la curva estacional y eventos extremos esperados. Esta diferenciación es crucial, ya que, dependiendo de las necesidades específicas del análisis, se pueden identificar los modelos y escenarios que representan las condiciones más desfavorables. Esta característica subraya la importancia de utilizar distintos modelos y escenarios, incluyendo aquellos intermedios, además de los que son requeridos por la autoridad, como una estrategia efectiva para estimar adecuadamente los potenciales efectos del cambio climático en el contexto de la evaluación del proyecto.

➤ En relación al modelo hidrológico WEAP y al análisis de seguridad hídrica lo siguiente:

Desde el punto de vista de caudales medios mensuales para los tres escenarios climáticos y los tres Modelos de Circulación General se observa un descenso futuro de los caudales para la zona de estudio. El caudal medio varió entre 20,1 m³/s para SSP585 GCM2 y 24,1 m³/s para SSP585 GCM3. La tendencia es a la baja al compararlo con valores medios del presente estudio para el periodo base de 30 años 1985/86-2014/15 (25,2 m³/s), estimado por TYP en el modelo de simulación implementado en el presente estudio. El valor de periodo histórico en la zona de estudio es cercano al caudal de 50% probabilidad de excedencia estimado por DGA (1987-2012) (24,5 m³/s).

Figura 12-2: Caudales Medios Mensuales para los tres GCMs Considerados y Los Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585



Fuente: Elaboración Propia

Desde el punto de vista de modelo operacional se debe mencionar que:

Se simularon tres escenarios de operación de embalse considerando entregas asociadas a derechos permanentes considerando información de convenios y caudales impuestos según actual RCA:

Tabla 12-1 Escenarios De Modelación Para Estimar Seguridad De Riego En Embalse Zapallar

Escenario de Modelación	Satisfacción de Derechos	Consideraciones adicionales	Escenario Cambio Climático a simular
<p>Primer escenario: considerando DDPP de 21357,7 l/s (aguas arriba CM D-C: 3643,38 l/s aguas abajo CM D-C: 17714,32 l/s) Estimados a partir de Convenio Marzo 1998 DOH-JVRD y Convenio DOH-JVRD Marzo 2023) Nota 1: los cálculos se hicieron considerando 1 ha 1 acción y un factor 1,05 l/s/acción.</p>	<p>Para satisfacer los DDPP (21357,7 l/s) se consideran: los caudales de toda la cuenca que generan los DDPP del río Diguillín, es decir hoyía intermedia, afloramientos y zona afluente al embalse. Se embalsan sólo derechos eventuales 100 Hm³/mes durante los meses junio-julio-agosto-septiembre Se deja pasar caudal ecológico 5,59 m³/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm³ y un volumen para Incendio de 0,1 Hm³, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>
<p>Segundo escenario: Según RCA (05-02-2024) "a través de la descarga al río Diguillín el embalse deberá entregar los caudales de los DDPP de riego, aguas arriba y aguas abajo del canal matriz del Diguillín Coltón, los cuales suman un caudal máximo de 10,5 m³/s (3,7+7,0). A ello debe agregarse el caudal ecológico de 5,59 m³/s".</p>	<p>Este escenario dejaría pasar 10,5 m³/s, correspondientes a DDPP de aguas arriba y aguas abajo del canal matriz Diguillín Coltón. Se embalsan sólo derechos eventuales 100 Hm³/mes durante los meses junio-julio-agosto-septiembre. Se deja pasar caudal ecológico 5,59 m³/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm³ y un volumen para Incendio de 0,1 Hm³, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>
<p>Tercer escenario: considera actual gestión integrada de trasvase del sistema Laja-Diguillín en el que los DDPP del río Diguillín ubicados aguas abajo del CM D-C son satisfechos mediante el cumplimiento de trasvase de aguas del Lago Laja (según acuerdos vigentes a la fecha entre DOH-JVRD 16-12-2013).</p>	<p>Se deja pasar DDPP aguas arriba de CM D-C: 3,7 m³/s + caudal Ha Blancas y Adicionales entre Oct-Mar, resto del año DDPP (21,4 m³/s). Se embalsan sólo DDEE entre jun-sept. Caudal ecológico 5,59 m³/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm³ y un volumen para Incendio de 0,1 Hm³, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>

Al respecto se puede mencionar que:

La cuenca, según registros históricos recopilados en el presente trabajo, actualmente funciona con una visión integrada de cuenca, en la que además del caudal principal del río Diguillín también se consideran todos los aportes de afluentes y afloramiento. En ningún caso se ha llevado repartos de agua sólo considerando el caudal afluente en cabecera del río Diguillín en forma aislada, sería un sinsentido plantear que la cabecera del río Diguillín tiene que satisfacer el 100%, tanto desde el punto de vista administrativo legal como desde la gestión de recursos hídricos. La cabecera de los ríos genera parte de la oferta hídrica, mientras que las cuencas laterales y afloramientos permiten constituir los derechos permanentes asociados al 85% de probabilidad de excedencia, esto porque en la constitución de derechos y estimación de oferta prima un volumen de control en el que se consideran todas las fuentes que constituyen un

derecho y no solo una parte de la cuenca. Este hecho respalda los escenarios de inclusión de Hoya Intermedia, sobre todo porque cada derecho se constituye considerando todos los aportes que ocurren aguas arriba de cada entrega.

Considerando la optimización de la regla de reparto para los tres escenarios analizados se logra una seguridad de riego sobre el 85% para todos los casos analizados. Por lo que el proyecto de Embalse Zapallar, bajo el análisis de todos los escenarios analizados, casos bases sin y con cambio climático, cumple con una seguridad de riego para los agricultores de la zona. Cabe mencionar que no se recomienda bajo ningún punto entregar siempre el 100% de la demanda de riego a pie de embalse, sino más bien hacer una optimización de reservar un porcentaje pequeño para aquellos meses de riego más tardíos (marzo-abril).

Por otro lado, cabe destacar que la evaluación considera una reserva de agua para consumo humano y volumen para incendios sin poner en riesgo la seguridad de riego, por lo que se debe reforzar como una fortaleza adicional del Proyecto Embalse Zapallar, considerando sobre todo que actualmente el consumo humano se considera un uso priorizado en la legislación vigente.

Tal como se indicó anteriormente el caso más desfavorable corresponde al de no inclusión de Hoya Intermedia para entrega de DDPP. Este escenario corresponde al más restrictivo y menos probable, ya que implica que la JVRD cambie la forma en la que hace repartos de agua que ha considerado históricamente todas las fuentes y los afloramientos. Además, implicaría que con un área muy reducida de toda la cuenca del río Diguillín se tenga que cumplir el 100% de entrega de DDPP. Se refuerza, por tanto, que se debe considerar a futuro un manejo integrado de la cuenca, tanto con las Organizaciones Usuarias, así como considerando todos los aportes de la cuenca (afluentes y afloramientos). Este enfoque se entiende que ha sido el espíritu que ha primado considerando que actualmente DOH realiza entrega de caudales de trasvase según convenios y común acuerdo con regantes, y ese espíritu debería mantenerse para la futura gestión de los recursos hídricos y evitar escenarios desfavorables como la no inclusión de la Hoya Intermedia.

Puntos de control fluviométricos clave para la gestión integrada del Embalse Zapallar:

1. Considerar a futuro el control de caudal a pie de embalse Zapallar
2. Considerar la medición de esteros afluentes: Chacay, San Vicente y Temuco en junta con río Diguillín.
3. Considerar la medición o puntos de control fluviométrico aguas arriba de la junta con esteros afluentes Chacay, San Vicente y Temuco.
4. Por último, desde un punto de vista ecosistémico también se recomienda llevar a cabo mediciones continuas de los afloramientos de vertientes ubicadas aguas arriba del embalse, ya que a la fecha solo se cuenta con aforos puntuales.

➤ En relación al análisis de crecidas extremas lo siguiente:

- Se realizó un estudio de crecidas en la cuenca del embalse Zapallar, en el que se ha considerado dos períodos de análisis, siendo el primero el correspondiente al período histórico (1960 a 2023) y el segundo a uno que incluye los efectos esperados del cambio climático que va desde el 2024 a 2074.
- Dadas las condiciones climáticas y geomorfológicas se tiene que las crecidas máximas aportantes al embalse Zapallar son en su totalidad en periodo invernal y de carácter pluvial.
- El método de cálculo utilizado para la estimación de las crecidas corresponde a la implementación del hidrograma unitario del SCS mediante el *software* HEC-HMS, en el cual se utiliza el método de abstracción de la Curva Número, asumiendo, dado el carácter pluvial de la cuenca, que el suelo se encuentra en una condición precedente húmeda.
- Se estimaron las crecidas para los periodos de retorno de 100, 1000, 10000 años y la de precipitación máxima probable (PMP). Al comparar estos resultados con los presentados por MN Ingenieros (2018), se tiene una disminución de un 9% para las crecidas máximas.
- Se analizaron los caudales generados por los GCM MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM en los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 los cuales muestran en promedio una disminución del 5% en comparación a los resultados obtenidos del análisis histórico.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018, April). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *EGU general assembly conference abstracts* (p. 19739).
2. Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate dynamics*, 50(1), 31-49.
3. Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
4. Chow, Ven Te (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL.
5. Convenio Ad-referéndum uso de obra, uso de aguas (acciones) y gastos de Explotación del proyecto Laja Diguillín Dirección de Obras Hidráulicas y Regantes Áreas Blancas 09-marzo-2023.
6. Convenio ad-referéndum. Dirección de Obras Hidráulicas y Junta de Vigilancia río Diguillín y sus afluentes. 2-marzo-1998.
7. DGA. (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. In *SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica*.
8. DGA. (2019a). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas sur y parte norte de la macrozona austral. In *SIT N° 441. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas*.
9. DGA. (2019b). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la parte sur de la macrozona austral e Isla de Pascua. In *SIT N° 444. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*.
10. DGA-UC-UCSC (2021). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Biobío.
11. DOH-CNR (2020). Informe Técnico Evaluación Proyecto Riego de Áreas Blancas y Adicionales Sistema Laja Diguillín.
12. DOH-Enel (2017). Acuerdo de Operación Y Recuperación del Lago Laja Complementa Convenio De 1958.
13. Garreaud S., R (1992). Estimación Línea de Nieve en Cuencas Andinas de Chile Central. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. Vol7. Núm.2.
14. Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., ... & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code

- genealogy. *Climatic Change*, 177(6), 87. Kochendorfer, J., Nitu, R., Wolff, M., Mekis, E., Rasmussen, R., Baker, B., ...& Poikonen, A. (2017). Analysis of single-Alter-shielded and unshielded measurements of mixed and solid precipitation from WMO-SPICE. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3525-3542.
15. Gestión Ambiental Estratégica Consultores (2020).. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Embalse Zapallar.
 16. Informe Técnico IT DGA ÑUBLE N° 247 DEL 05-08-2020--ND-0801-10347. Dirección General de Aguas, Región Ñuble, 2020.
 17. José Luis Arumí Ribera, Verónica Delgado Schneider, Óscar Reicher Salazar, 2020. Sistemas de vertientes en el valle del Renegado: importancia, características y vulnerabilidad.
 18. Minuta DGA Ñuble N°247. Informe Técnico. 05-agosto-2020.
 19. MN Ingenieros (2018). Estudios Actualización y Complementación Diseño Embalse Zapallar Región del Bío-Bío. Informe Final. Tomo IV. Estudios básicos
 20. MN Ingenieros (2018). Estudios Actualización y Complementación Diseño Embalse Zapallar, Región del Bío-Bío – Informe Final.
 21. O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
 22. Osorio, E. Muñoz-M. Billib-H. "Hidrogeología de la cuenca del Diguillín en el complejo volcánico Nevados del Chillán." *Revista Latinoamericana de Hidrogeología* 9, no. 1 (2014): 25-32.
 23. Pollock, M. D., O'donnell, G., Quinn, P., Dutton, M., Black, A., Wilkinson, M. E., ... & O'Connell, P. E. (2018). Quantifying and mitigating wind-induced undercatch in rainfall measurements. *Water Resources Research*, 54(6), 3863-3875.
 24. Ponce. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Empresa de Transformación Agraria Trag S.A.
 25. R&Q Ingeniería (2017). Modelación y Evaluación Agroeconómica del Embalse Zapallar, VII Región del Bío-Bío – Informe Final.
 26. R&Q Ingeniería (2017). Planillas de Resultados Modelo WEAP. "Modelación y Evaluación Agroeconómica del Embalse Zapallar, VII Región del Bío-Bío – Informe Final.
 27. SEA (2023). Criterio de Evaluación en el SEIA: Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico.
 28. SEA (2023). Guía Metodológica Para la Consideración del Cambio Climático en el SEIA.
 29. SEA (2024). Resolución de Calificación Ambiental Proyecto Embalse Zapallar. 05 de Febrero 2024.

30. Universidad de Católica de la Santísima Concepción/CIBAS/Universidad de Concepción (2023). Presentación Software Para la Gestión del Sistema Río-Lago Laja Para la Seguridad Hídrica Bajo La Actual y Futura Crisis Climática.
31. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (2021). Determinación de Regla Operacional para el Embalse Zapallar Región de Ñuble. Informe Final.
32. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (2021). Determinación de Regla Operacional para el Embalse Zapallar Región de Ñuble.
33. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (2022). Homologación del Cálculo Hidrológico Para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile. SIT N°524.
34. Xavier, A. C. F., Martins, L. L., Rudke, A. P., de Morais, M. V. B., Martins, J. A., & Blain, G. C. (2022). Evaluation of Quantile Delta Mapping as a bias-correction method in maximum rainfall dataset from downscaled models in São Paulo state (Brazil). *International Journal of Climatology*, 42(1), 175-190.