



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

**ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES DE RECURSOS HÍDRICOS  
APORTANTES A LOS SISTEMAS EMBALSE EL YESO Y LAGUNA NEGRA  
BAJO EL ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO RCP8.5**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**DIMITRI PABLO DIONIZIS ROJO**

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
GERARDO AHUMADA THEODULOZ  
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA

SANTIAGO DE CHILE  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: Dimitri Dionizis Rojo  
FECHA: 12/01/2018  
PROF. GUÍA: Ximena Vargas Mesa**

**ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES DE RECURSOS HÍDRICOS APORTANTES A  
LOS SISTEMAS EMBALSE EL YESO Y LAGUNA NEGRA BAJO EL ESCENARIO DE  
CAMBIO CLIMÁTICO RCP8.5**

El cambio climático es un tema que ha suscitado gran interés en las últimas décadas a nivel mundial, tanto para la comunidad científica como para la sociedad en general (IPCC, 2014), debido a los impactos que podría tener en las actividades humanas. En particular, estos impactos se podrían ver reflejados en la disponibilidad del recurso hídrico para abastecimiento de agua potable por parte de la población.

El siguiente trabajo consiste en el estudio del impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos aportantes a los sistemas de almacenamiento de agua Laguna Negra y Embalse El Yeso, ubicados en el sector del cajón del Maipo, región Metropolitana, los cuales constituyen la principal fuente de agua potable del Gran Santiago.

Para dar cumplimiento al objetivo principal del estudio, se construye un set de forzantes meteorológicas a escala horaria para el periodo histórico (1980-2015) y proyectado (2028-2060), mientras que la modelación hidrológica se lleva a cabo mediante el software CRHM, que corresponde a un modelo semi-distribuido de base física. Con este modelo, se analiza el comportamiento pluvial y nival de ambas cuencas en estudio, realizando una calibración de caudales afluentes a escala mensual durante el periodo 1980-1997, en la cual se obtuvieron los indicadores de eficiencia  $NS=0.70$  y  $\log NS=0.75$  para la cuenca Embalse El Yeso, y  $NS=0.83$  y  $\log NS=0.84$  para Laguna Negra.

Las proyecciones de cambio climático utilizadas corresponden a 3 modelos de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés) del escenario RCP 8.5 del IPCC, los cuales predicen disminuciones de la precipitación entre un 5% y 18% y aumentos de temperatura entre  $0.5^{\circ}\text{C}$  y  $1.8^{\circ}\text{C}$ , ambas variaciones a nivel anual en la zona de estudio.

Los resultados de la modelación permiten conocer los caudales afluentes a escala horaria a los sistemas de almacenamiento bajo los efectos del cambio climático, los cuales presentan discrepancias entre los distintos modelos atmosféricos utilizados en cuanto a la magnitud de los efectos. Para el Embalse El Yeso, dos de los tres modelos utilizados proyectan un aumento en la escorrentía media anual entre un 6% y un 9%, mientras que para Laguna Negra los tres modelos proyectan disminuciones entre 17 y 36%. Las otras componentes del balance hídrico (evaporación y sublimación) no presentan alteraciones estacionales, mas sí en su magnitud, lo que se corresponde con los aumentos de temperatura y disminuciones de precipitación.

*...¿Es lícito confundir la prosperidad de una clase con el bienestar de un continente?*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer, en primer lugar a mi familia, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado en mis cortos 25 años. En particular, a mi mamá que se ha sacado la cresta trabajando y dejando sus intereses de lado por darnos lo mejor junto a mis hermanas. Si bien no me puede dejar posesiones materiales (ni me interesa tenerlas), me deja la educación y los valores que me permitirán enfrentar los desafíos que me proponga.

Agradezco también a mis amigos por la confianza, amor y felicidad que me otorgan constantemente. A ls de la vida, a ls de kárate, a ls de la U, a ls de la Universidad Popular Patricio Manzano; no es necesario nombrarles pues saben quiénes son, que les respeto y les quiero mucho mucho.

De igual manera, quiero agradecer a mi profesora guía, Ximena Vargas, por aceptarme como su alumno memorista cuando el futuro se veía oscuro, por ayudarme permanentemente en la realización de esta memoria y por su disponibilidad para resolver dudas y problemas. Quiero agradecer particularmente al Nico Vásquez ya que sin su ayuda no habría podido terminar este trabajo, dedicó tardes enteras a explicarme y enseñarme, siempre con la mejor disposición y con una capacidad pedagógica que admiro y envidio mucho. Muchas gracias por el tiempo, la buena onda y, por sobre todo, el conocimiento que me entregaste abiertamente. Agradezco también a mis compañeros de la oficina y a la Jaque, quienes con su buena onda alegraban los largos días de trabajo con cosas que van mucho más allá de lo académico y que pretendo guardar cuando deje la Universidad.

Finalmente, agradezco al Pascual por ser la motivación para realizar esta memoria que le dedico. Con tu alegría, amor e inocencia viniste a alegrar nuestras vidas, por lo que te estaré eternamente agradecido.

# Tabla de Contenido

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	<i>Generales</i>	2
1.2.2	<i>Específico</i>	2
1.3	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	2
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS</b>	<b>3</b>
2.1	CAMBIO CLIMÁTICO	3
2.1.1	<i>Sistema Climático</i>	3
2.1.2	<i>Concepto de Cambio Climático</i>	4
2.1.3	<i>Antecedentes del Cambio Climático</i>	4
2.1.3.1	Antecedentes de cambio climático a nivel mundial	5
2.1.3.2	Antecedentes del cambio climático en Chile	8
2.1.4	<i>Escenarios RCP del IPCC</i>	9
2.1.5	<i>Efectos del cambio climático en los recursos hídricos</i>	11
2.2	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	12
2.2.1	<i>Tipos de modelación</i>	12
2.2.2	<i>Unidades de respuesta hidrológica (URH)</i>	13
2.2.3	<i>The Cold Region Hydrological Model (CRHM)</i>	13
2.2.4	<i>Criterios de eficiencia de calibración</i>	15
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>: ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>17</b>
3.1	CUENCA DEL RÍO MAIPO	17
3.1.1	<i>Contexto general de la cuenca</i>	17
3.1.2	<i>Sistema Físico Natural</i>	18
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	19
3.2.1	<i>Delimitación hidrológica del área</i>	19
3.2.2	<i>Información disponible</i>	22
3.2.2.1	Información Fluviométrica	22
3.2.2.2	Glaciares	24
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>: RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS</b>	<b>25</b>
4.1	DELIMITACIÓN DE URH's	25
4.2	PRECIPITACIÓN	31
4.3	TEMPERATURA	32
4.4	HUMEDAD RELATIVA	35
4.5	VELOCIDAD DEL VIENTO	36
4.6	RADIACIÓN SOLAR	39
4.7	ESTIMACIÓN DEL APORTE GLACIAR	39
4.8	ESCALAMIENTO ESPACIAL DE INPUTS	41
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA</b>	<b>42</b>
5.1	RESULTADOS DE CONSTRUCCIÓN DE FORZANTES	42
5.1.1	<i>Laguna Negra</i>	42
5.1.2	<i>Embalse El Yeso</i>	44
5.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO	45
5.2.1	<i>Cuenca Río Yeso en Embalse (AEY)</i>	46
5.2.2	<i>Cuenca Laguna Negra (ALN)</i>	48
5.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS ÓPTIMOS	50
5.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE FORZANTES GENERADAS	53
5.5	PROYECCIÓN	54
5.5.1	<i>Caudales</i>	56
5.5.2	<i>Discusión</i>	59

<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS</b>	<b>62</b>
6.1	CONSTRUCCIÓN DE FORZANTES	62
6.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	62
6.3	PROYECCIONES HIDROLÓGICAS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO	63
6.4	RECOMENDACIONES FUTURAS	63
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>65</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>68</b>
<b>A.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN CRHM</b>	<b>68</b>
<b>B.</b>	<b>UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA</b>	<b>70</b>
<b>C.</b>	<b>METODOLOGÍA HUMEDAD RELATIVA</b>	<b>71</b>
<b>D.</b>	<b>METODOLOGÍA VELOCIDAD DEL VIENTO</b>	<b>83</b>
<b>E.</b>	<b>METODOLOGÍA RADIACIÓN SOLAR</b>	<b>85</b>
<b>F.</b>	<b>SERIES DE TIEMPO DE OUTPUTS HISTÓRICOS</b>	<b>87</b>
<b>G.</b>	<b>SERIES DE TIEMPO DE OUTPUTS PROYECTADOS</b>	<b>89</b>

## Índice de tablas

Tabla 2-1. Características y comportamiento de los escenarios RCP (IPCC, 2014).....	10
Tabla 2-2: Calificación del desempeño de indicadores de eficiencia para modelación a nivel mensual.....	16
Tabla 3-1: Parámetros morfológicos de las cuencas a estudiar.....	19
Tabla 3-2: Características de las estaciones relevantes. ....	22
Tabla 4-1: Resumen bandas de altura.....	25
Tabla 4-2: Áreas expuestas de los glaciares presentes en la cuenca del Embalse El Yeso. ....	40
Tabla 5-1: Criterios de eficiencia de la modelación, cuenca AEY. RMSD: Root-mean-square difference, NRMSD: Normalized RMSD, NSE: Nash-Sutcliffe efficiency, logNSE: NSE del logaritmo de los caudales, KGE: Kling-Gupta efficiency.....	47
Tabla 5-2: Criterios de eficiencia en la modelación, cuenca ALN. ....	49
Tabla 5-3: Parámetros y valores considerados en el análisis de sensibilidad.....	50
Tabla 5-4: Proyecciones de caudal medio mensual y anual promedio para el periodo 2028-2060. Cuenca Embalse El Yeso.....	59
Tabla 5-5: Proyecciones de caudal medio mensual y anual promedio para el periodo 2028-2060. Cuenca Laguna Negra. ....	59
Tabla A-1: Parámetros del modelo CRHM asociados a cada módulo. ....	69
Tabla B-2: Características de las URH's, Cuenca Embalse El Yeso.....	70
Tabla B-3: Características de las URH's, Cuenca Laguna Negra. ....	70

## Índice de ilustraciones

Figura 2-1.Esquema de sistema climático. Modificado de Subgrupo de Energía e Industria del IPCC, 1990. ....	4
Figura 2-2. Series de tiempo de temperatura y concentración de CO <sub>2</sub> , a partir de cilindros de hielo polar. Fuente: Petit (1999). ....	5
Figura 2-3. Variación con respecto al promedio (1986-2005) de la temperatura promediada de la superficie terrestre y el océano. Los colores corresponden a distintas bases de datos (IPCC, 2014). ....	6
Figura 2-4. Variación del nivel medio del mar en relación al promedio (1986-2005). Los colores corresponden a distintas bases de datos, el color rojo corresponde a información satelital y el área sombreada da cuenta de la incertidumbre (IPCC, 2014). ....	6
Figura 2-5. Concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero CO <sub>2</sub> (verde), metano CH <sub>4</sub> (naranja), óxido de Nitrógeno (rojo) determinadas de cilindros de hielo polar (puntos) y de mediciones atmosféricas directas (líneas) (IPCC, 2014). ....	7
Figura 2-6.Emisiones globales de dióxido de carbono [Gton/año] de origen antrópico (IPCC, 2014).....	7
Figura 2-7.Mapas de cambio porcentual de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) para el periodo 2031-2050 con respecto al periodo 1961-1990, según escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2014). ....	9
Figura 2-8: Esquema de escenarios SRES definidos en el cuarto reporte (AR4) del IPCC. ....	10
Figura 2-9: Proyección de forzantes radiativas y concentración de CO <sub>2</sub> según los escenarios RCP. Cada color representa un escenario, mientras que el área sombreada da cuenta de la incertidumbre en las estimaciones (IPCC, 2014). ....	10
Figura 2-10: Emisiones de CO <sub>2</sub> observadas y proyectadas por los escenarios RCP (Sanford, 2014). ....	11
Figura 2-11: Esquema del funcionamiento modular de CRHM.....	14
Figura 3-1: Cuenca del Río Maipo y principales cursos de agua. ....	17
Figura 3-2: Comportamiento de temperatura y precipitaciones medias mensuales, estación El Yeso Embalse (2500 msnm). Periodo 1980-2015. ....	18
Figura 3-3: Curva de variación estacional, cuenca Afluente al embalse El Yeso, periodo 1983-2003. Fuente: Uribe, 2015. ....	19

Figura 3-4: Cuencas Laguna Negra y Embalse El Yeso. Elaboración propia en software QGIS. ....	20
Figura 3-5: Mapa de pendientes, cuencas Laguna Negra y Río Yeso en Embalse. ....	21
Figura 3-6: Mapa de orientación, cuencas Laguna negra y Río Yeso en Embalse.....	21
Figura 3-7: Estaciones DGA en cuencas El Yeso Embalse y Laguna Negra.....	22
Figura 3-8: Caudales medios diarios, para las estaciones presentes en la zona de estudio.....	23
Figura 3-9: Caudales medios mensuales afluentes a Laguna Negra (ALN) y Embalse El Yeso (AEY). Fuente: Lagos (2006). ....	24
Figura 3-10: Glaciares en cuencas Laguna Negra y Embalse El Yeso. ....	24
Figura 4-1: Curvas hipsométricas. Se destacan los puntos asociados a los límites superiores de cada banda de altura. ....	26
Figura 4-2: Bandas de altura, cuenca Laguna Negra. ....	26
Figura 4-3: Bandas de altura, cuenca Río Yeso en Embalse. ....	27
Figura 4-4: Orientaciones cuenca Laguna Negra. ....	27
Figura 4-5: Orientaciones cuenca Río Yeso en Embalse.....	28
Figura 4-6: Tipos de URH, cuenca Laguna Negra. ....	29
Figura 4-7: Tipos de URH, cuenca Río Yeso en Embalse. ....	29
Figura 4-8: Unidades de respuesta hidrológica, cuenca Laguna Negra. ....	30
Figura 4-9: Unidades de respuesta hidrológica, cuenca Río Yeso en Embalse. ....	30
Figura 4-10: Precipitación media anual grillada, para el periodo 1979-2015. ....	31
Figura 4-11: Zona de estudio con puntos considerados para acotar espacialmente la estadística disponible. ....	32
Figura 4-12. Temperaturas máximas y mínimas promedio, para el periodo 1979-2015.....	33
Figura 4-13: Serie de temperatura horaria, estación Laguna Negra 2016.....	33
Figura 4-14: Ciclo diario promedio de temperatura para cada mes, estación Laguna Negra 2016. ....	34
Figura 4-15: Hora promedio de ocurrencia de las temperaturas máximas y mínimas para cada mes. Estación Laguna Negra 2016. ....	34
Figura 4-16: Serie de temperatura horaria, periodo 1980-2015. ....	35
Figura 4-17: Estadística disponible de humedad relativa horaria, estación Laguna Negra. ....	35
Figura 4-18: Estadística disponible de velocidad del viento a nivel horario. Estación DGA Laguna Negra. ....	37
Figura 4-19: Velocidad del viento media mensual y promedio de cada una de las cuencas, periodo 1980-2015 (simulación 1). ....	38
Figura 4-20: Estadística disponible de radiación solar a nivel horario, estación Laguna Negra. ....	39
Figura 4-21: Caudales afluentes a los sistemas Embalse El Yeso y Laguna Negra, sin considerar aportes glaciares.....	40
Figura 4-22: Método del inverso de la distancia para escalar forzantes grilladas a cada URH.....	41
Figura 5-1: Resultado de la construcción de forzante de precipitación horaria, Laguna Negra. ....	42
Figura 5-2: Resultado de la construcción de forzante de temperatura horaria, Laguna Negra. ....	42
Figura 5-3: Resultado de la construcción de forzante de humedad relativa horaria, Laguna Negra. ....	43
Figura 5-4: Resultado de la construcción de forzante de velocidad del viento horaria, Laguna Negra. ....	43
Figura 5-5: Resultado de la construcción de forzante de radiación solar incidente horaria, Laguna Negra. ....	44
Figura 5-6: Resultado de la construcción de forzante de precipitación horaria, Embalse El Yeso. ....	44
Figura 5-7: Resultado de la construcción de forzante de temperatura horaria, Embalse El Yeso.....	45
Figura 5-8: Resultado de la construcción de forzante de velocidad del viento horaria, Embalse El Yeso... ..	45
Figura 5-9: Serie de caudales medios mensuales observados (sin aporte glaciar) y simulados con CRHM, periodo 1980-1997. Cuenca Afluyente al Embalse El Yeso (AEY). ....	46
Figura 5-10: Curva de duración y de variación estacional, periodo 1982-1997. Cuenca Afluyente al Embalse El Yeso (AEY).....	47
Figura 5-11: Serie de caudales medios mensuales observados (sin aporte glaciar) y simulados con CRHM, periodo 1980-1997. Cuenca Afluyente a Laguna Negra (ALN). ....	48

Figura 5-12: Curva de duración y de variación estacional, periodo 1982-1997. Cuenca Afluyente a Laguna Negra (ALN).	49
Figura 5-13: Comportamiento de los indicadores de calibración obtenidos del análisis de sensibilidad, cuenca AEY.	51
Figura 5-14: Comportamiento de los indicadores de calibración obtenidos del análisis de sensibilidad, cuenca ALN.	52
Figura 5-15: Series de tiempo de caudales medios mensuales, obtenidas del análisis de sensibilidad. Cuenca AEY.	52
Figura 5-16: Series de tiempo de caudales medios mensuales, obtenidas del análisis de sensibilidad. Cuenca ALN.	53
Figura 5-17: Análisis de sensibilidad de forzantes de humedad relativa y velocidad del viento. Arriba: Series temporales de caudales observados y simulados. Abajo: Indicadores de eficiencia de calibración para cada simulación.	54
Figura 5-18: Comparación de precipitación y temperatura para los periodos 1983-2015 y 2028-2060, cuenca Embalse El Yeso.	55
Figura 5-19: Comparación de precipitación y temperatura para los periodos 1983-2015 y 2028-2060, cuenca Laguna Negra.	55
Figura 5-20: Comparación de caudales proyectados en relación al periodo de línea base. Cuenca Embalse El Yeso.	57
Figura 5-21: Comparación de caudales proyectados en relación al periodo de línea base. Cuenca Laguna Negra.	57
Figura 5-22: Serie de caudales medios anuales, proyectados (2028-2060) y línea base (1983-2015). Cuencas Embalse El Yeso y Laguna Negra.	58
Figura 5-23: Comparación de flujos medios mensuales promedios entre línea base y proyección, cuenca Embalse El Yeso.	60
Figura 5-24: Comparación de flujos medios mensuales promedios entre línea base y proyección, cuenca Laguna Negra.	60
Figura 5-25: Comparación de componentes del balance hidrológico entre línea base y proyección.	61
Figura C-1: Series de Precipitación diaria, estación Laguna Negra 2012-2016.	71
Figura C-2: Ciclos diarios de humedad relativa adimensional, estación Laguna Negra 2012-2016.	72
Figura C-3: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Enero.	72
Figura C-4: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Febrero.	73
Figura C-5: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Marzo.	73
Figura C-6: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Abril.	73
Figura C-7: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Mayo.	74
Figura C-8: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Junio.	74
Figura C-9: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Julio.	74
Figura C-10: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Agosto.	75
Figura C-11: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Septiembre.	75
Figura C-12: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Octubre.	75
Figura C-13: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Noviembre.	76
Figura C-14: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Diciembre.	76
Figura C-15: Series de humedad relativa adimensional, asociadas al 20%, 50% y 80% de probabilidad de excedencia.	77
Figura C-16: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Enero.	77
Figura C-17: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Febrero.	78
Figura C-18: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Marzo.	78
Figura C-19: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Abril.	78
Figura C-20: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Mayo.	79
Figura C-21: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Junio.	79

Figura C-22: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Julio.....	79
Figura C-23: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Agosto.....	80
Figura C-24: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Septiembre. ....	80
Figura C-25: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Octubre. ....	80
Figura C-26: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Noviembre. ....	81
Figura C-27: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Diciembre.....	81
Figura C-28: Promedio y desviación estándar a nivel mensual de humedad relativa media diaria, obtenidos de análisis de frecuencias. ....	81
Figura D-29: Ciclo diario de velocidad del viento, estación Laguna Negra año 2016. ....	83
Figura D-30: Ciclo diario de velocidad del viento, adimensionalizada por la velocidad media diaria. Estación Laguna Negra, año 2016. ....	83
Figura D-31: Promedios y desviaciones estándar de velocidad del viento horaria, para cada hora de cada mes. Estación Laguna Negra, año 2016. ....	83
Figura D-32: Resultados de la calibración de la rugosidad para aplicar perfil logarítmico. Datos simulados vs observados en estación Laguna Negra año 2016. ....	84
Figura D-33: Comparación de velocidad del viento horaria simulada y observada, año 2016.....	84
Figura E-34: Nubosidad media mensual y desviación estándar. Fuente: Cepeda, 2017. ....	86
Figura E-35: Calibración parámetros "a" y "b" para estimar radiación incidente real a partir del valor potencial.....	86
Figura F-36: Caudales instantáneos simulados, periodo histórico 1980-2015. ....	87
Figura F-37: Evaporación instantánea simulada, periodo histórico 1980-2015. ....	87
Figura F-38: Sublimación instantánea simulada, periodo histórico 1980-2015.....	88
Figura G-39: Caudales instantáneos simulados, periodo proyectado 2028-2060. ....	89
Figura G-40: Evaporación instantánea simulada, periodo proyectado 2028-2060. ....	89
Figura G-41: Sublimación instantánea simulada, periodo proyectado 2028-2060.....	90

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Motivación

En las últimas décadas, el fenómeno de cambio climático ha suscitado un gran interés tanto de la comunidad científica, de instituciones gubernamentales como de la sociedad en general, pues sus efectos podrían afectar la calidad de vida de toda la población mundial. Es importante considerar que los cambios observados en los componentes del sistema climático corresponden a variaciones naturales de éste, los cuales se han visto drásticamente intensificados por las actividades productivas del ser humano a través del aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), a partir de la revolución industrial del siglo XVIII (IPCC, 2013).

En este contexto, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha desarrollado diversos informes en los últimos años, con el objetivo de analizar las emisiones de CO<sub>2</sub> y su efecto en los distintos componentes de los sistemas climáticos. En el último reporte publicado a la fecha, del año 2013, se definen cuatro escenarios de cambio climático: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5. Los escenarios RCP<sup>1</sup> describen el comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> durante el periodo 2000-2100 bajo distintos escenarios de emisiones sujetos a las medidas de mitigación y conductas adoptadas por la población. El número que acompaña el nombre de cada escenario, hace referencia a la variación del balance radiativo que se espera tener al final del periodo analizado. En este sentido, el escenario RCP8.5 corresponde al más desfavorable desde el punto de vista de emisiones de GEI.

El efecto del cambio climático asociado a los distintos escenarios descritos en la literatura, se manifiesta principalmente en cambios en la temperatura, en las tasas de precipitación, en la cobertura de nieve y en el nivel medio del mar (Figueroa, 2008). Cambios en el comportamiento de estas variables pueden afectar la disponibilidad de los recursos hídricos, tanto de actividades productivas como de abastecimiento de agua potable para la población (Videla, 2013). Por ejemplo, aumentos en las temperaturas pueden intensificar las tasas de derretimiento de nieve, afectando el régimen hidrológico a nivel de cuenca, lo que provoca cambios en las temporadas de almacenamiento y/o entrega del recurso hídrico; o bien, alteraciones en la precipitación pueden afectar la oferta hídrica, amenazando la seguridad de abastecimiento de agua potable (González, 2010).

Es bajo esta problemática en la que se enmarca la presente memoria de título, la cual pretende analizar las proyecciones de recursos hídricos aportantes a los dos principales sistemas de almacenamiento de agua potable del Gran Santiago, de modo tal de cuantificar la oferta hídrica a futuro y analizar el efecto del cambio climático sobre ésta. Los resultados permitirán dimensionar la envergadura del fenómeno estudiado y su efecto directo en el suministro de agua potable para la población de Santiago.

---

<sup>1</sup> Representative Concentrations Pathways

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Generales**

- Cuantificar la oferta hídrica aportante a las dos principales fuentes de agua potable del Gran Santiago: Embalse El Yeso y Laguna Negra; frente a cambios en la precipitación y temperatura para el periodo 2028-2060, realizando una comparación con el periodo histórico (1980-2015).

### **1.2.2 Específico**

- Obtener las forzantes hidrometeorológicas a nivel horario en las cuencas de interés.
- Calibrar el modelo hidrológico CRHM en las cuencas mencionadas, utilizando estadística observada.
- Estimar los caudales afluentes a los sistemas Laguna Negra y Embalse El Yeso, a nivel horario, para los periodos mencionados y comparar su variabilidad estacional.

## **1.3 Organización del documento**

Este documento se organiza como se detalla a continuación:

En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes nacionales e internacionales en relación al fenómeno de cambio climático. Además, se presenta una breve reseña sobre los modelos hidrológicos en general y el que será utilizado en este estudio en particular.

En el Capítulo 3 se presenta y describe la zona de estudio, abarcando sus características geomorfológicas e hidrometeorológicas.

En el Capítulo 4 se presentan las metodologías utilizadas para construir las forzantes requeridas por el modelo a escala temporal horaria, para el periodo histórico y proyectado. Además, se detalla la metodología que se utilizó para definir las unidades de respuesta hidrológica (URH's) y el escalamiento espacial de las forzantes a cada una de las unidades.

El Capítulo 5 se divide en 5 sub-capítulos. En el primero de ellos se presentan los resultados de la construcción de las forzantes, en el segundo se muestran los resultados de la calibración del modelo para el periodo histórico, en el tercero se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros obtenidos, en el cuarto se presenta el análisis de sensibilidad para las forzantes que fueron construidas con métodos estadísticos y en el quinto, finalmente, se exponen los resultados obtenidos de la proyección de caudales afluentes a los sistemas de almacenamiento estudiados, junto con la comparación del comportamiento de la evaporación y sublimación en relación al periodo histórico.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y comentarios finales del estudio, analizando el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio.

## Capítulo 2: Antecedentes Bibliográficos

En este capítulo, se presentan los antecedentes bibliográficos referentes a los temas abordados a lo largo de la presente memoria. En particular, se entregan antecedentes del fenómeno de cambio climático tanto a nivel global como nacional, se describen herramientas metodológicas utilizadas para la interpretación de la información y se presenta una descripción del modelo hidrológico utilizado a lo largo del estudio.

### 2.1 Cambio Climático

#### 2.1.1 Sistema Climático

Antes de abordar el tema de cambio climático, es necesario formular una definición general de clima y sistema climático, ya que usualmente una mala comprensión de las acepciones conlleva a una mala comprensión de la problemática.

Se entiende el concepto clima como la estadística del tiempo atmosférico, es decir, un conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a una región en particular (RAE, 2017). Se puede considerar, entonces, como un estado promedio del tiempo atmosférico en determinado lugar, por un periodo de tiempo clásico de 30 años (World Meteorological Organization, 2016). Por otra parte, resulta necesario diferenciar este concepto del tiempo atmosférico, el cual corresponde al estado fluctuante de las condiciones atmosféricas de un lugar y que varían en escalas de tiempo considerablemente menores en relación al clima. Las variables meteorológicas sobre las cuales se realiza la estadística para la determinación del clima corresponden típicamente a temperatura, precipitación, viento, humedad relativa, entre otras.

De acuerdo a las definiciones anteriores, es posible definir un sistema climático como un sistema dinámico e interrelacionado, consistente en cinco componentes principales (Figuroa, 2008), cuya principal forzante corresponde a la radiación solar (ver Figura 2-1):

- **Atmósfera:** Capa gaseosa que envuelve a la Tierra.
- **Hidrosfera:** Agua en estado líquido, tanto dulce como salada.
- **Criósfera:** Agua en estado sólido.
- **Litosfera:** Superficie correspondiente a suelo.
- **Biosfera:** Seres vivos presentes en la Tierra.

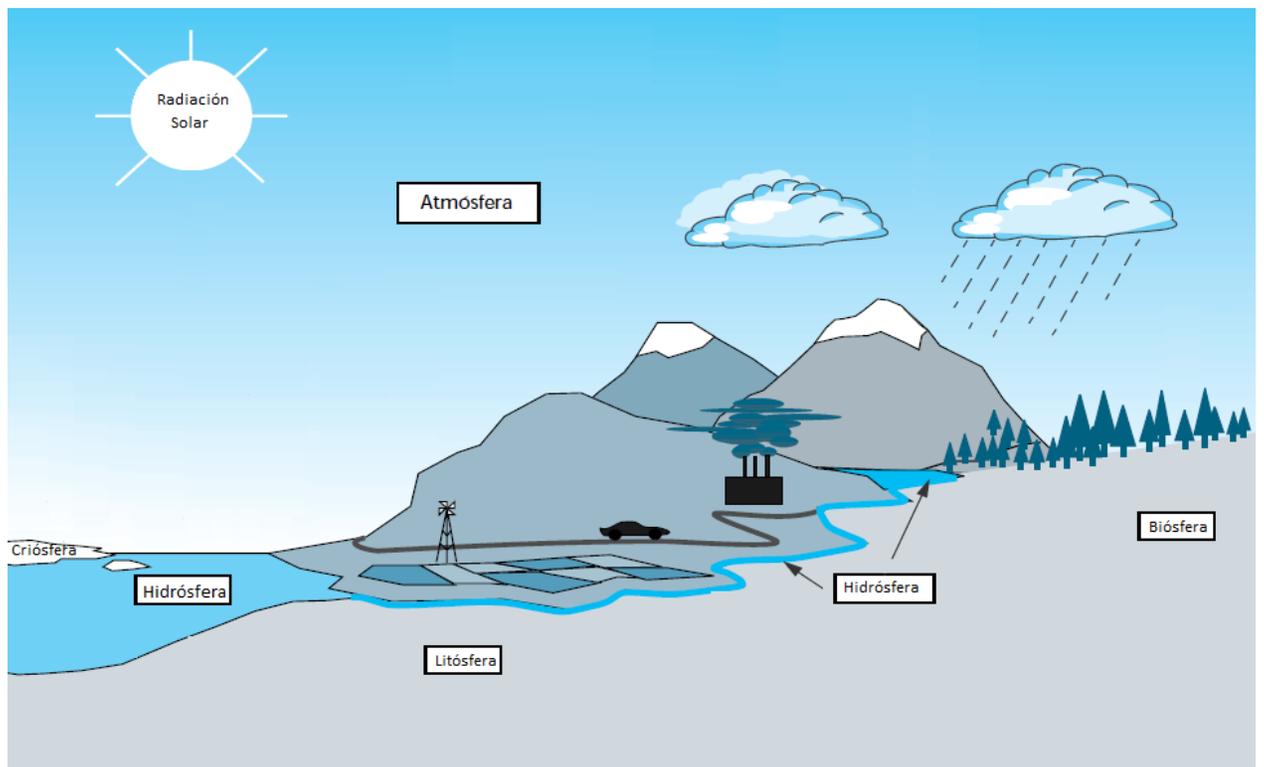


Figura 2-1. Esquema de sistema climático. Modificado de Subgrupo de Energía e Industria del IPCC, 1990.

El clima, al tratarse de índices estadísticos de las series de tiempo atmosférico de un lugar específico, presenta variaciones espaciales y temporales. La primera de estas se evidencian principalmente al variar la latitud del lugar en estudio (Marengo, 2011); mientras que las variaciones temporales, si son estadísticamente significativas (i.e., si son capaces de modificar estadísticos), dan cuenta de un fenómeno de **Cambio Climático**.

### 2.1.2 Concepto de Cambio Climático

El cambio climático corresponde a un proceso natural dentro del sistema climático de la Tierra (del Río, 2015), y dice relación con variaciones estadísticas significativas que persisten por un periodo extenso de tiempo, al menos décadas (Figuerola, 2008).

Si bien se trata de un proceso natural, diversos estudios han determinado que la actividad antrópica ha acelerado de manera considerable este proceso, por medio del aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la revolución industrial (IPCC, 2014; IPCC Expert Meeting Report, 2008; Krellenberg & Hansjürgens, 2014).

En base a lo anterior, para combatir los efectos del cambio climático, resulta imprescindible diferenciar los factores naturales y antropogénicos que lo generan, de modo tal de llevar a cabo políticas efectivas que apunten a la disminución sistemática de las emisiones de CO<sub>2</sub> con el objetivo de encontrar un balance entre el desarrollo tecnológico y la sostenibilidad.

### 2.1.3 Antecedentes del Cambio Climático

En esta sección se presentan una serie de antecedentes que dan cuenta del fenómeno de cambio climático que actualmente afecta al planeta, tanto a nivel nacional como internacional.

### 2.1.3.1 Antecedentes de cambio climático a nivel mundial

El cambio climático, tal como se mencionó anteriormente, corresponde a un proceso natural que ha implicado periodos de calentamiento y enfriamiento durante la historia de la Tierra, tal como se muestra en la Figura 2-2 (Petit, 1999). En ella se puede apreciar la alta correlación existente entre la variación de la temperatura media del planeta y la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

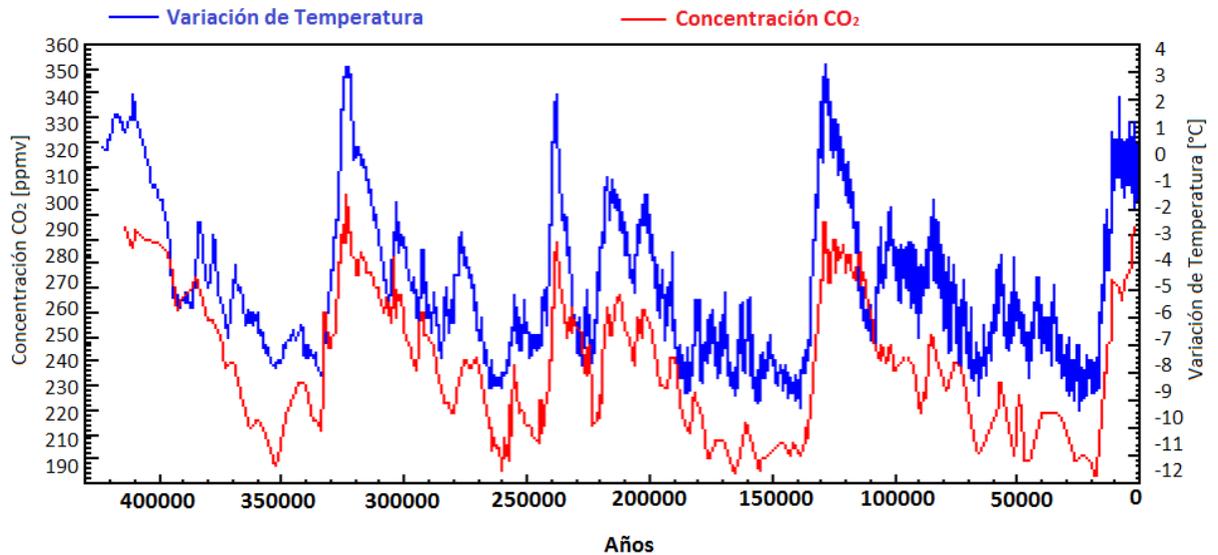


Figura 2-2. Series de tiempo de temperatura y concentración de CO<sub>2</sub>, a partir de cilindros de hielo polar. Fuente: Petit (1999).

Esta alta correlación entre ambas variables se debe a que el CO<sub>2</sub>, junto a otros GEI, genera un filtro para la luz solar, que impide que ciertas longitudes de onda sean liberadas de la atmósfera, provocando un aumento de temperatura.

La Figura 2-2, además de evidenciar que el fenómeno de cambio climático se origina naturalmente, demuestra que la actividad antrópica en la era industrial (parte derecha del gráfico, cercana al año “0”) ha producido un aumento considerable en las emisiones de GEI a una escala de tiempo mucho menor (del orden de siglos) en relación a las variaciones históricas (del orden de milenios). Esto se aprecia en el comportamiento de la serie de temperatura en los años más recientes, en donde el *peak* ha sido menor que en los otros ciclos, pero se ha mantenido constante, a diferencia de la tendencia histórica que luego del *peak* presentaba una evidente disminución (Petit, 1999).

Según el quinto, y último, reporte del IPCC del año 2014, denominado AR5, la influencia humana en el cambio climático es clara y las emisiones recientes de GEI de origen antrópico son las más altas de las cuales se tiene registro en la historia, lo que ha provocado que los impactos del cambio climático se intensifiquen en sistemas humanos y naturales (IPCC, 2014). Para dar sustento a lo anterior, en el mencionado reporte se detallan las variables medibles que dan cuenta de los efectos de la intensificación del cambio climático:

- a. Temperatura: La Figura 2-3 muestra la variación de temperatura promedio anual global con respecto al nivel medio durante el periodo 1986-2005.

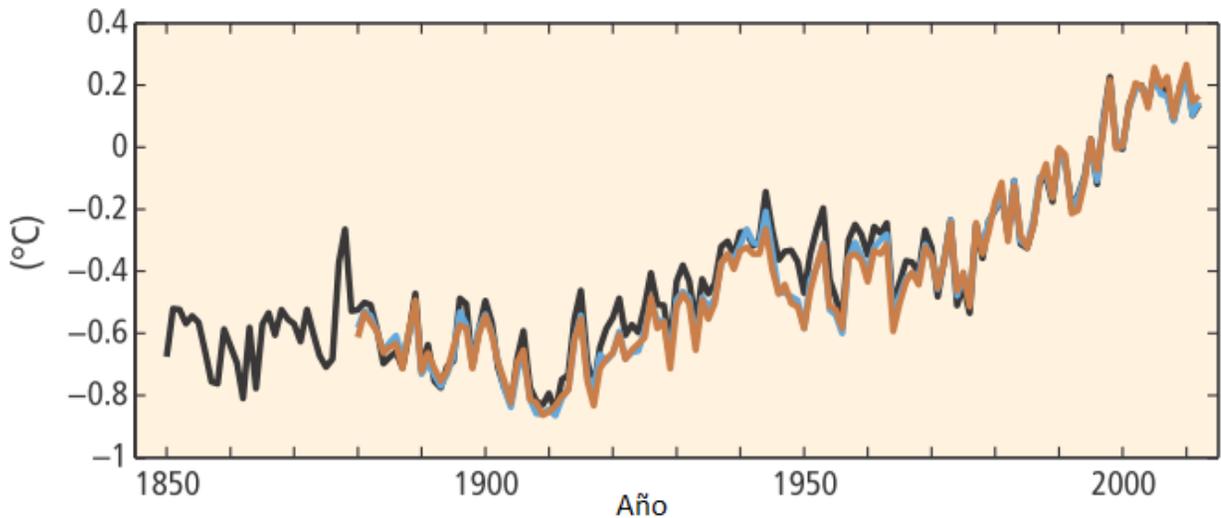


Figura 2-3. Variación con respecto al promedio (1986-2005) de la temperatura promediada de la superficie terrestre y el océano. Los colores corresponden a distintas bases de datos (IPCC, 2014).

El incremento de temperatura media anual global presentado en la Figura 2-3 corresponde a  $0.85 [^{\circ}\text{C}]$  ( $0.65$  a  $1.06 [^{\circ}\text{C}]$ ) para el periodo entre 1880 y 2012. Es posible apreciar, además, el acelerado aumento de ésta, especialmente en los últimos 50 años, lo que se puede relacionar con el considerable crecimiento industrial en este periodo.

- b. Nivel del mar: La Figura 2-4 muestra el comportamiento del nivel del mar en relación al valor promedio (1986-2005).

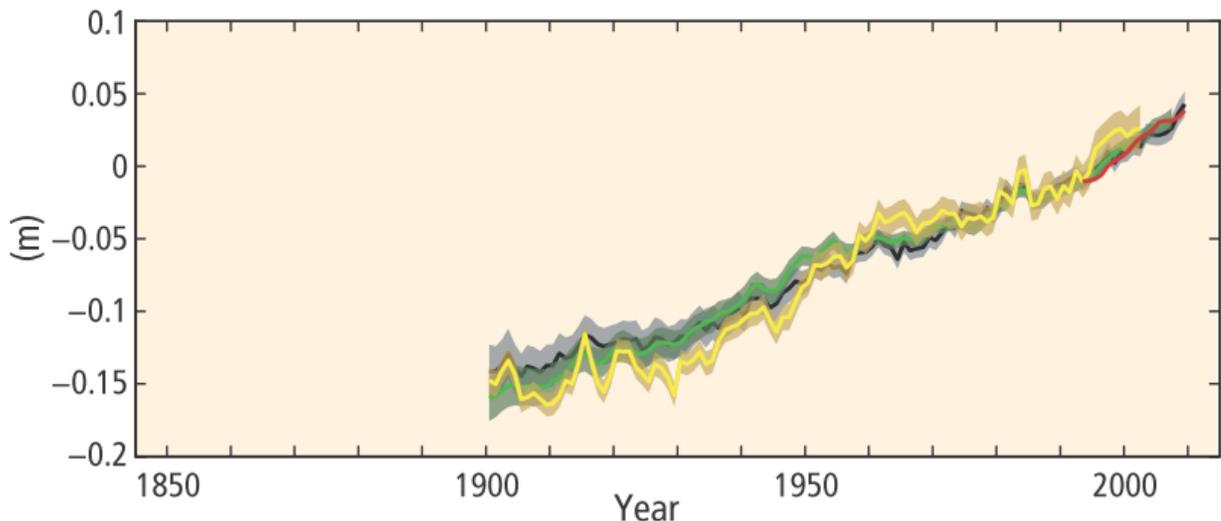


Figura 2-4. Variación del nivel medio del mar en relación al promedio (1986-2005). Los colores corresponden a distintas bases de datos, el color rojo corresponde a información satelital y el área sombreada da cuenta de la incertidumbre (IPCC, 2014).

El aumento presentado en la Figura 2-4 en el nivel del mar se correlaciona con el incremento en la temperatura comentado anteriormente. El aumento de la temperatura ha acelerado el derretimiento de glaciares y hielo polar, cuya área se estima que se ha reducido en un 4.1% por década (IPCC, 2014). Durante el siglo XX, el nivel del mar aumentó  $0.19 [m]$ , duplicando la tasa de la cual se tenía registros durante el siglo XIX.

- c. Gases de efecto invernadero: La Figura 2-5 muestra las concentraciones atmosféricas de GEI.

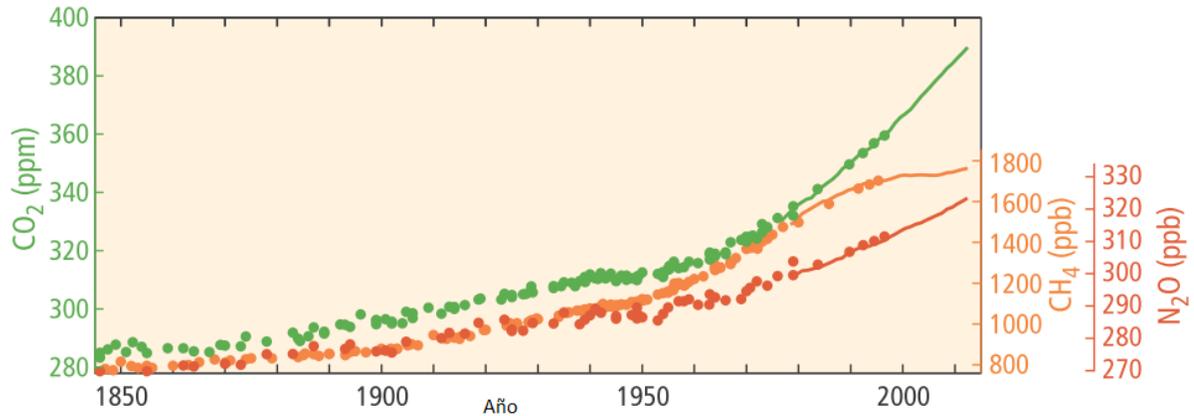


Figura 2-5. Concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero  $\text{CO}_2$  (verde), metano  $\text{CH}_4$  (naranja), óxido de Nitrógeno (rojo) determinadas de cilindros de hielo polar (puntos) y de mediciones atmosféricas directas (líneas) (IPCC, 2014).

De acuerdo a la Figura 2-5, es posible apreciar un aumento en torno al 30% en la concentración de dióxido de carbono, 40% para el metano y 20% para el óxido de nitrógeno a partir de 1950 a la fecha, lo que ratifica la influencia de la industrialización en el fenómeno de calentamiento global.

- d. Emisiones de  $\text{CO}_2$  de origen antrópico: La quema de combustibles fósiles, la producción de cements y el cambio en el uso de suelo son parte de las actividades que más contribuyen a las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera por parte del ser humano. La Figura 2-6 muestra las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera a causa de la actividad humana.

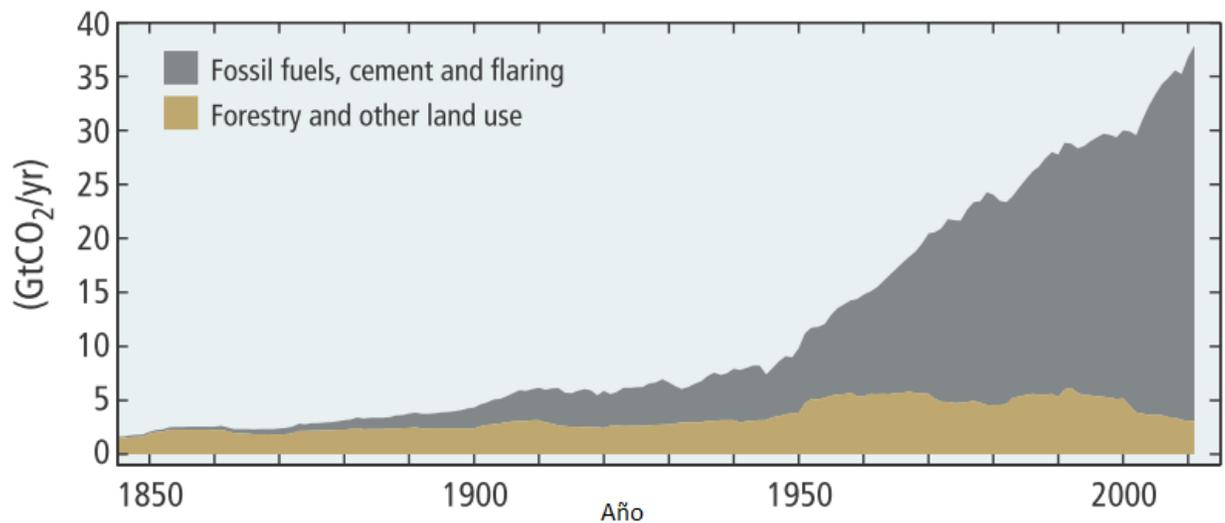


Figura 2-6. Emisiones globales de dióxido de carbono [Gton/año] de origen antrópico (IPCC, 2014).

Se aprecia en la Figura 2-6 el dramático aumento en las emisiones de dióxido de carbono a partir de 1950, producto del desarrollo industrial y el crecimiento exponencial de la población mundial durante este periodo (IPCC, 2014).

### 2.1.3.2 Antecedentes del cambio climático en Chile

En la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1992), se definen nueve criterios de vulnerabilidad de países frente al cambio climático, de los cuales Chile cumple con siete (Ministerio del Medio Ambiente, 2017):

- Áreas costeras de baja altura.
- Zonas áridas y semiáridas.
- Zonas de bosques.
- Territorio susceptible a desastres naturales.
- Áreas propensas a sequías y desertificación.
- Zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica.
- Ecosistemas montañosos.

Debido a lo anterior, es posible concluir que Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático. Diversos estudios se han llevado a cabo con el objetivo de cuantificar los impactos del cambio climático a nivel país (CEPAL, 2012; Ministerio del Medio Ambiente, 2014), los cuales son coincidentes en las tendencias y difieren principalmente en la intensidad de los cambios proyectados. Entre ellos, es importante destacar (Ministerio del Medio Ambiente, 2014):

- a. Temperatura: De acuerdo a registros históricos, se aprecian aumentos de temperatura en el valle central y la cordillera. Para el año 2030, bajo el escenario RCP2.6, se esperan aumentos de 0.5 [°C] para la zona sur y austral, y de 1.5 [°C] para el norte grande y el altiplano, mientras que el escenario RCP8.5 proyecta aumentos de hasta 2 [°C] (ver Figura 2-7).
- b. Precipitación: Se ha observado una disminución estadísticamente significativa en la zona centro-sur, mientras que en la zona semiárida, las precipitaciones se han caracterizado por sucesiones de años lluviosos y sequías prolongadas (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Las proyecciones indican, para el año 2030, una disminución entre el 5% y el 15% para las cuencas ubicadas entre el Río Copiapó y el Río Aysén. Se espera, además, que esta disminución se intensifique para la segunda mitad del siglo XXI, especialmente para la zona centro-sur (ver Figura 2-7).

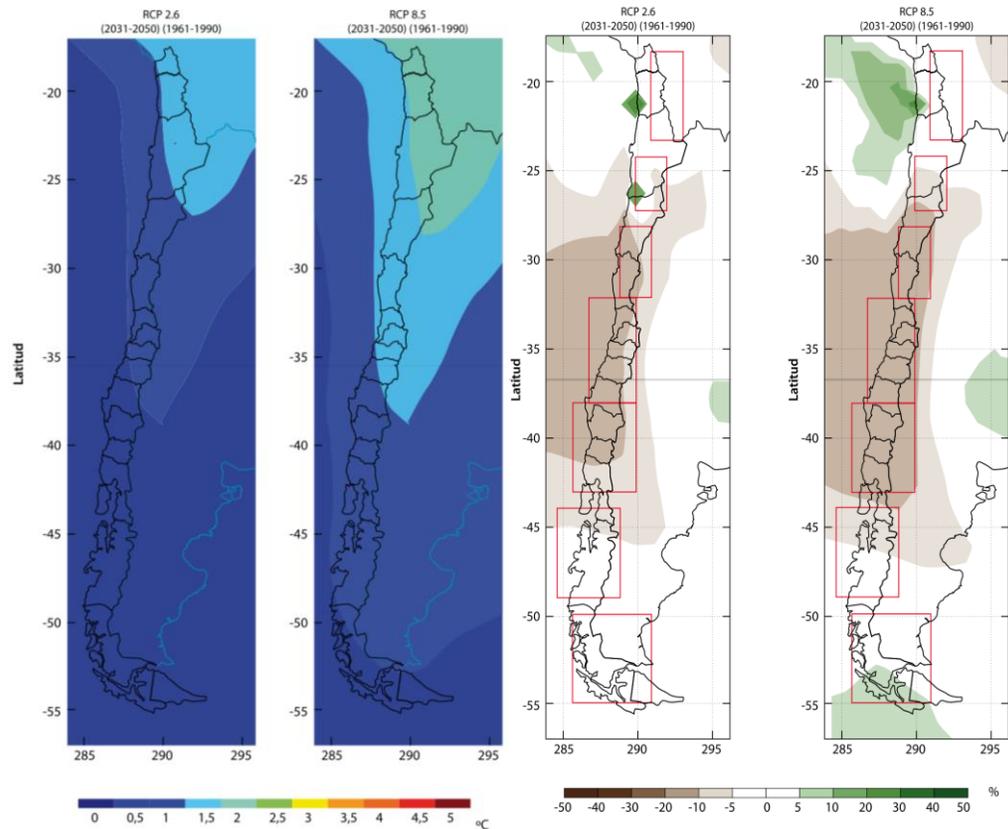


Figura 2-7. Mapas de cambio porcentual de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) para el periodo 2031-2050 con respecto al periodo 1961-1990, según escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

- c. **Recursos Hídricos:** Se ha proyectado una reducción significativa de los caudales medios mensuales para las regiones entre Copiapó y Los Lagos, junto con una elevación de la isoterma 0 [°C] (Ministerio del Medio Ambiente, 2017), lo que implica una disminución de las reservas de agua en las cuencas de régimen nival y nivo-pluvial y un aumento del riesgo frente a eventos extremos de precipitación (Serrano, 2014). Se espera un retroceso significativo de glaciares (Cepeda, 2017), lo que afectaría el aporte a la escorrentía durante periodos secos. Adicionalmente, para el Norte Grande y Norte Chico, se espera un aumento en la frecuencia de eventos de escasez hídrica y lluvias extremas (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

#### 2.1.4 Escenarios RCP del IPCC

Históricamente, el IPCC había propuesto trabajar con un conjunto de escenarios de cambio climático denominados SRES, los cuales se basan en supuestos de evolución de la población mundial en aspectos sociales, demográficos, tecnológicos y en función de las directrices de desarrollo en las cuales se enfoquen las naciones (Gómez, 2013). En este sentido, se definen los escenarios 1 y 2 dependiendo si el desarrollo se incentiva a nivel local o global; y por otro lado, los escenarios A y B, los cuales dan cuenta de si se prioriza un desarrollo económico o medioambiental. De este modo, se conforman los escenarios que se esquematizan en la Figura 2-8:

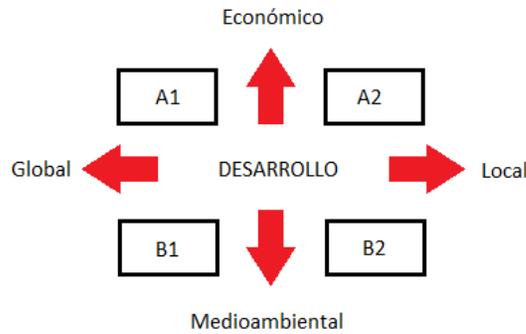


Figura 2-8: Esquema de escenarios SRES definidos en el cuarto reporte (AR4) del IPCC.

Considerando que un mismo estado del sistema climático, desde el punto de vista de concentraciones de GEI o de la forzante radiativa, puede ser alcanzado a partir de múltiples condiciones de desarrollo, el IPCC en su quinto reporte (IPCC, 2014) ha decidido dejar obsoletos los escenarios SRES descritos anteriormente, reemplazándolos por cuatro nuevos escenarios que representan el estado del arte actual en lo que se refiere a proyecciones climáticas, con el fin de uniformar las distintas investigaciones que se llevan a cabo en esta materia (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2011).

Estos escenarios se denominan Trayectorias Representativas de Concentración, o simplemente RCP por sus siglas en inglés. Representan y describen el comportamiento de las concentraciones de GEI hasta el año 2100, debido a esto reciben el nombre de trayectorias. Cada escenario RCP se diferencia por la cantidad de radiación que queda atrapada en la atmósfera producto de los gases emitidos a la atmósfera, la cual se denomina forzante radiativa [ $W/m^2$ ].

La Tabla 2-1 muestra en detalle las características de cada uno de estos escenarios:

Tabla 2-1. Características y comportamiento de los escenarios RCP (IPCC, 2014).

Escenario	Forzante Radiativa [ $W/m^2$ ]	Concentración [ppm]	Comportamiento
RCP 8.5	>8.5	>1370 al 2100	Creciente
RCP 6	~6 en la estabilización al 2100	~850 en la estabilización al 2100	Estabilización sin peaks
RCP 4.5	~4.5 en la estabilización al 2100	~650 en la estabilización al 2100	Estabilización sin peaks
RCP 2.6	3 en el peak, posterior descenso	490 en el peak, posterior descenso	Peak y disminución

La Figura 2-9 muestra gráficamente lo presentado en la Tabla 2-1:

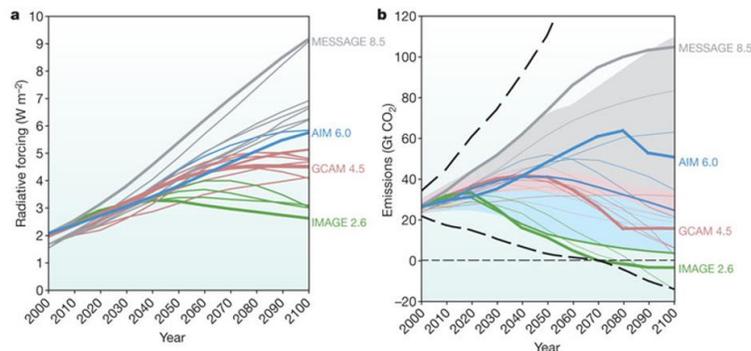


Figura 2-9: Proyección de forzantes radiativas y concentración de  $CO_2$  según los escenarios RCP. Cada color representa un escenario, mientras que el área sombreada da cuenta de la incertidumbre en las estimaciones (IPCC, 2014).

De acuerdo a lo explicado anteriormente, se puede desprender que los escenarios de cambio climático propuestos comprenden un escenario donde se disminuyen rigurosamente las emisiones (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6) y un escenario muy desfavorable (RCP8.5).

De acuerdo a las mediciones realizadas hasta el momento, las emisiones actuales de GEI han ido por encima de lo proyectado por el escenario RCP8.5, que es el más desfavorable (Sanford, 2014), tal como se muestra en la Figura 2-10:

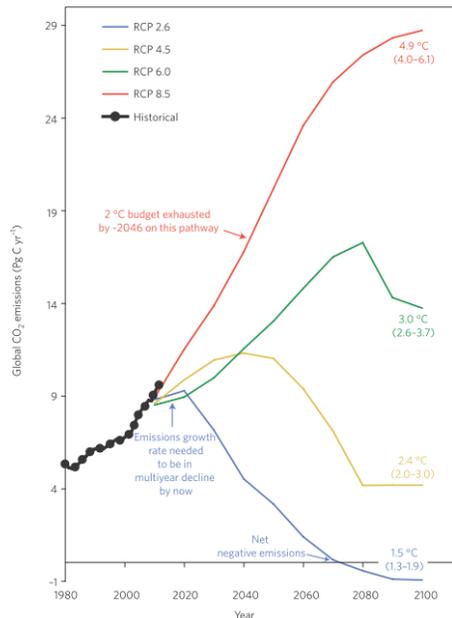


Figura 2-10: Emisiones de CO<sub>2</sub> observadas y proyectadas por los escenarios RCP (Sanford, 2014).

### 2.1.5 Efectos del cambio climático en los recursos hídricos

El principio de conservación de masa en el ciclo hidrológico a nivel de cuenca sugiere que cualquier cambio en los factores que lo regulan puede alterar la distribución espacial y temporal del recurso hídrico (Figueroa, 2008). De acuerdo a la información presentada previamente, cambios en las tasas de precipitación o el derretimiento de nieve y hielo están alterando los sistemas hidrológicos, afectando los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad (IPCC, 2013).

Desde 1950 a la fecha, se han presenciado cambios en eventos extremos, muchos de los cuales han sido asociados a la actividad humana (IPCC, 2014). Entre ellos, es importante destacar:

- Disminución de las temperaturas mínimas extremas.
- Incremento de las temperaturas máximas extremas.
- Incremento en el nivel del mar en extremas máximas.
- Incremento en el número de eventos extremos de precipitación.

De acuerdo a las alteraciones descritas, es posible esperar diversos cambios en los componentes del ciclo hidrológico. En este sentido, variaciones en la temperatura podrían modificar las tasas de evaporación y evapotranspiración, así como también el derretimiento y la sublimación de hielo y nieve; variaciones en las tasas de precipitación pueden generar déficit o superávit de agua a nivel de cuenca, lo que afectaría la disponibilidad del recurso para la población.

## **2.2 Modelación hidrológica**

Para estudiar el comportamiento histórico y proyectado de los sistemas Embalse El Yeso y Laguna Negra, se ha seleccionado a priori el modelo hidrológico CRHM. Con el objetivo de alcanzar una mejor comprensión en relación a la modelación hidrológica, se presenta a continuación una breve descripción de los distintos tipos de modelación, junto con una descripción del modelo a utilizar en este estudio.

### **2.2.1 Tipos de modelación**

Los modelos hidrológicos pretenden recrear el comportamiento de un sistema hidrológico real a partir de ecuaciones que relacionan las forzantes del sistema con sus respuestas. Esta recreación corresponde a una simplificación de los sistemas naturales complejos y pretende rescatar los aspectos relevantes de estos sistemas (Flügel, 1995)

Los modelos hidrológicos cuentan con tres criterios de clasificación, los cuales se presentan a continuación (Pomeroy, et al., 2007):

1. De acuerdo a la naturaleza de su algoritmo de cálculo:
  - a. Empírico: Relaciones encontradas de manera empírica para describir los procesos hidrológicos.
  - b. Conceptual: Representación matemática simplificada de los procesos.
  - c. Físicamente basado: Leyes físicas para describir los procesos hidrológicos.
2. De acuerdo al enfoque con el que maneja sus resultados:
  - a. Estocásticos: Variables de estado poseen una distribución de probabilidad, lo que permite incluir rangos de incerteza.
  - b. Determinísticos: Variables de estado son definidas por forzantes y parámetros del modelo.
3. De acuerdo a su representatividad espacial:
  - a. Agregados: El sistema corresponde a una única unidad de respuesta hidrológica (URH) que recibe y entrega agua, considerando homogeneidad en las características geomorfológicas de la cuenca.
  - b. Distribuidos: El sistema se representa espacialmente por una grilla que incorpora la heterogeneidad de las características geomorfológicas de la cuenca.

- c. Semidistribuidos: Conjunto de URHs que intercambian el agua entre sí y que representan la heterogeneidad espacial de algunas de las características geomorfológicas de la cuenca.

En este trabajo se utilizará un modelo hidrológico de base física, determinístico y semidistribuido.

### **2.2.2 Unidades de respuesta hidrológica (URH)**

Las unidades de respuesta hidrológica son sectores de una cuenca que son análogos desde el punto de vista hidrológico, es decir, responden de manera similar frente a las forzantes meteorológicas. Esta homogeneidad entre distintos sectores de la cuenca, responde a la similitud que existe entre diversos factores de relevancia hidrológica, entre los cuales destacan (Flügel, 1997; Dehotin & Braud, 2008):

- Elevación: La precipitación y la temperatura varían con la altura.
- Pendiente: Determina la velocidad de escorrentía superficial.
- Orientación: Especialmente en cuencas con nieve, pues las laderas que están expuestas a la radiación solar responden de distinta manera a las que no lo están.
- Cubierta vegetal: Determina capacidad de abstracción, resistencia al escurrimiento y tasas de evapotranspiración, entre otras.
- Tipo de suelo: Determina tasas de infiltración, evapotranspiración, entre otras.

De los factores antes mencionados, no todos son considerados en la definición de las URH's, pues es el modelador quien debe definir un criterio que dé cuenta de los procesos hidrológicos relevantes para la elección de los factores a considerar en la delimitación de las URH's.

La incorporación de unidades de respuesta hidrológica en problemas de ciencias e ingeniería se ha visto facilitada por la disponibilidad de modelos de elevación digital (DEM's, por sus siglas en inglés) y sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), siendo utilizadas de distinta manera dependiendo de las necesidades y la interpretación del modelador (Prasad, 2004).

### **2.2.3 *The Cold Region Hydrological Model (CRHM)***

Este modelo ha sido desarrollado por el Centro de Hidrología de la Universidad de Saskatchewan, Canadá, es de código libre y se puede descargar de manera gratuita desde la página de la institución. La Figura 2-11 muestra un esquema simplificado de las interacciones entre los módulos seleccionados.

Entre las ventajas de CRHM se puede destacar la flexibilidad en la modelación, ya que, al tener una estructura modular, permite escoger qué módulos se desea incorporar dependiendo de las necesidades u objetivos del estudio. Además, sus ecuaciones son de base física, por lo que poseen un respaldo teórico que permite representar de manera correcta los procesos físicos involucrados, lo que supone, en teoría, prescindir de calibración (Pomeroy, et al., 2007).

La principal desventaja del modelo para/con el modelador, radica en que cada corrida se debe realizar de manera manual, es decir, se debe seleccionar un set de parámetros, obtener las

variables de salida y analizar el desempeño de ese set en particular. Esto supone una demanda de tiempo considerable en la etapa de calibración, sobre todo cuando el modelador está comenzando a comprender el efecto y sensibilidad de cada parámetro en el sistema.

Este modelo, construido especialmente para ser utilizado en regiones frías, permite simular los siguientes procesos de considerable incerteza en la hidrología de nieves: sublimación, fusión, intercepción vegetal, transporte de nieve por viento, infiltración, humedad del suelo, evapotranspiración y seguimiento direccional de flujos superficiales y subterráneos, mediante una abstracción del suelo de tres capas, considerando una capa de recarga, una capa inferior y el acuífero (Videla, 2013).

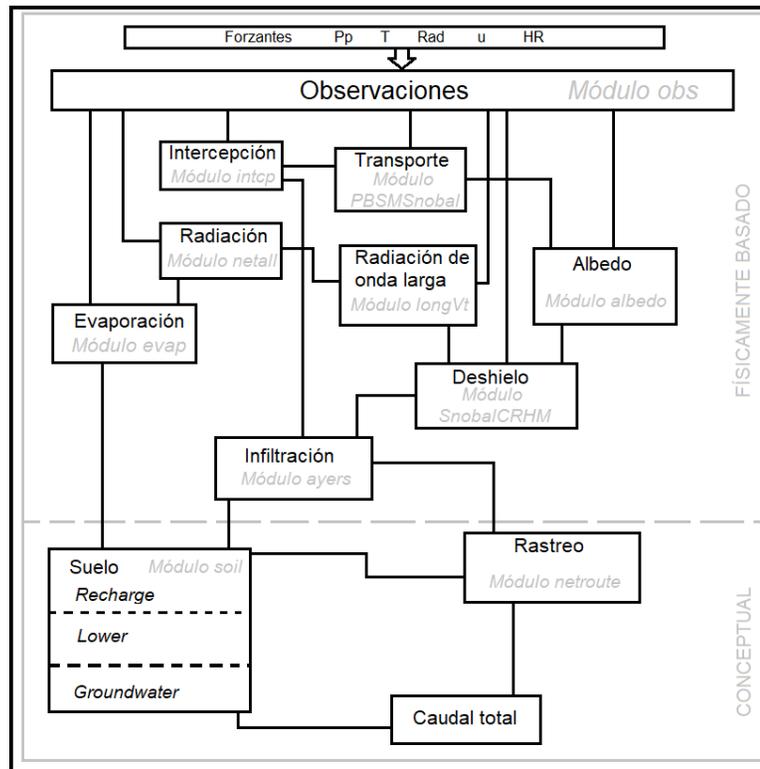


Figura 2-11: Esquema del funcionamiento modular de CRHM.

La utilización de este modelo posee pocos algunos antecedentes a nivel nacional, entre los cuales destacan:

- Gonthier (2012): Aplicación del modelo en tres cuencas de alta montaña, concluyendo que éste no es capaz de simular satisfactoriamente la hidrología de la zona, subestimando la acumulación de nieve hasta en un 400% (Gonthier, 2012).
- Krogh (2012): Aplicación del modelo en la cuenca del Río Baker, comparando el desempeño éste ante distintos sets de forzantes (estaciones, ERA-Interim, CFSR), obteniendo resultados satisfactorios en la calibración y en la representación de los procesos de acumulación de nieve e infiltración (Krogh, 2012).
- Videla (2013): Aplicación del modelo en la cuenca Alta del Río Maipo, representando de manera satisfactoria los procesos de acumulación, infiltración y drenaje de la cuenca. Da

énfasis en la distribución diferencial de la cobertura nival, la cual, concluye, queda determinada por la geomorfología abrupta del terreno (Videla, 2013).

- Uribe (2015): Aplicación a la cuenca Alta del Río Maipo para modelar el proceso de acumulación y derretimiento a distintas escalas temporales. No logró representar la escorrentía de la cuenca debido a la carencia de un módulo glaciar, mas sí la acumulación de nieve (Uribe, 2015).
- Comte (2017): Analiza la cuenca del Río Mapocho en Los Almendros, modelando de manera correcta la escorrentía y acumulación, sin embargo detecta un error en el módulo de infiltración que afecta la generación de escorrentía superficial (Comte, 2017).
- Jara (2017): Aplicación del modelo en la cuenca Alta del Río Copiapó con datos de re análisis y estaciones, con el objetivo de estimar la influencia de la sublimación nival en el balance de la cuenca. El modelo da resultados satisfactorios en la representación de los procesos estudiados (Jara, 2017).

Los módulos seleccionados, junto con los parámetros relevantes, se presentan y describen en el Anexo A.

#### 2.2.4 Criterios de eficiencia de calibración

El objetivo de la modelación, en primera instancia, es recrear de buena manera series observadas de alguna variable de interés. Por lo tanto, la calibración se reduce a un problema de optimización en el que se debe maximizar una función objetivo variando los parámetros, sujeto a satisfacer las ecuaciones del modelo y a la factibilidad física de la parametrización.

Debido a la complejidad de los procesos modelados y al elevado número de parámetros libres, la función objetivo no es única, sino que se deben satisfacer múltiples propósitos. Debido a esto, se cuenta con distintos indicadores matemáticos, que evalúan el desempeño del modelo frente a datos observados. A continuación se presentan los que serán utilizados en esta memoria, que corresponden al criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), tanto para los datos originales como para el logaritmo de los datos (Krause, 2005), eficiencia de Kling-Gupta (KGE) (Gupta, 2009) y eficiencia de Nash-Sutcliffe relativa (NSE<sub>rel</sub>) (Kling, 2012):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [X_{si} - X_{oi}]^2}{\sum_{i=1}^n [X_{oi} - \bar{X}_o]^2} \quad (2.1)$$

$$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\log(X_{si}) - \log(X_{oi})]^2}{\sum_{i=1}^n [\log(X_{oi}) - \overline{\log(X_o)}]^2} \quad (2.2)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (2.3)$$

$$NSE_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{X_{si} - X_{oi}}{X_{oi}} \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{X_{oi} - \bar{X}_o}{\bar{X}_o} \right]^2} \quad (2.4)$$

Donde:

- $n$ : Número de observaciones.
- $X_{si}$ : Variable simulada en el tiempo  $i$ .
- $X_{oi}$ : Variable observada en el tiempo  $i$ .
- $\bar{X}_o$ : Promedio de las observaciones.
- $r$ : Coeficiente de correlación lineal entre observaciones y simulaciones.
- $\beta$ : Razón entre el promedio simulado y observado.
- $\gamma$ : Razón entre la desviación estándar simulada y observada.

Los indicadores anteriores varían entre  $-\infty$  (pésimo ajuste) y 1 (ajuste perfecto); además cuando valen 0 significa que es igual de preciso que modelar con el promedio de la serie observada.

Por su construcción, cada uno de los criterios de eficiencia refleja un tipo de ajuste en particular. El NSE representa de buena manera el ajuste de los valores altos, pues en su ecuación aparecen las variables al cuadrado. El logNSE refleja la calidad del ajuste en los valores bajos, pues la función logaritmo disminuye la dispersión entre valores altos y bajos. El  $NSE_{rel}$  pretende compensar los efectos anteriores normalizando los cuadrados por la serie observada. Finalmente, el KGE es una función multiobjetivo, pues garantiza que no sólo el indicador sea igual a 1 en el óptimo, sino que los tres parámetros que lo conforman también deben serlo, es decir, asegura que los promedios, desviaciones estándar y coeficientes de correlación lineal de las series simuladas y observadas sean consistentes.

La Tabla 2-2 muestra rangos de valores de algunos indicadores y su calificación del desempeño de la modelación (Moriasi, et al., 2006):

*Tabla 2-2: Calificación del desempeño de indicadores de eficiencia para modelación a nivel mensual.*

<b>Desempeño</b>	<b>NSE [-]</b>	<b><math>\beta</math> [%]</b>
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$\beta < 10$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$10 \leq \beta < 15$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$15 \leq \beta < 25$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$	$\beta \geq 25$

## Capítulo 3: Antecedentes de la zona de estudio

Para realizar la modelación hidrológica de las cuencas a estudiar, se requiere caracterizarlas en función de sus propiedades físicas y naturales, así como también de la información hidrometeorológica medida de la que disponen. Para ello, en el presente capítulo se entregan una serie de características de la zona de estudio, tanto a nivel general como local.

### 3.1 Cuenca del Río Maipo

#### 3.1.1 Contexto general de la cuenca

El río Maipo da origen a la cuenca hidrográfica del mismo nombre, la cual abarca una superficie aproximada de 15.380 [km<sup>2</sup>] y se extiende prácticamente en la totalidad de la Región Metropolitana, junto con algunas localidades de la V Región de Valparaíso (Videla, 2013).

Su cauce principal se extiende por aproximadamente 250 [km], desde su nacimiento en los flancos del Volcán Maipo hasta su desembocadura en el Océano Pacífico en las cercanías de la localidad de Llole (ver Figura 3-1), transportando un caudal promedio anual de 92,3 [m<sup>3</sup>/s] (Serrano, 2014).

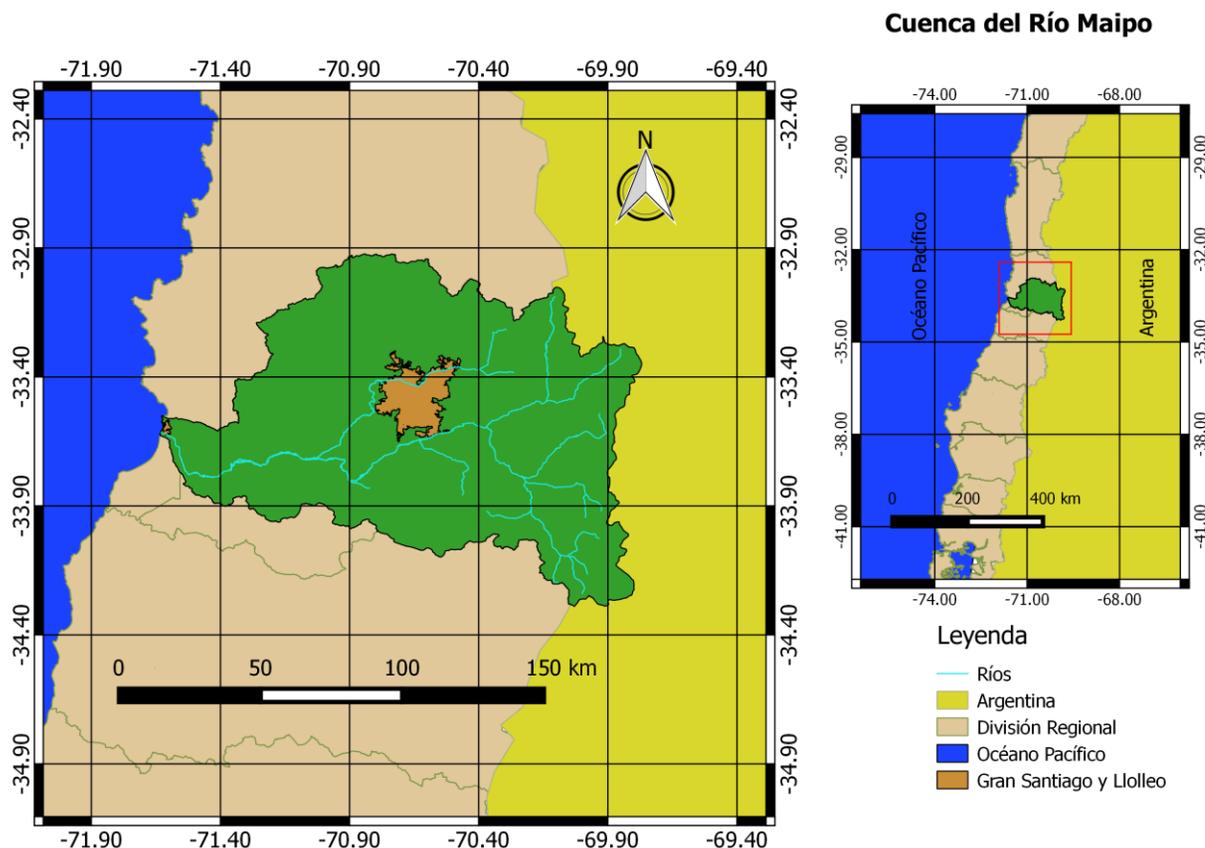


Figura 3-1: Cuenca del Río Maipo y principales cursos de agua.

El régimen hidrológico de esta cuenca se caracteriza por una componente pluvial, dada por las precipitaciones líquidas en la parte media y baja, correspondientes a las zonas de depresión intermedia, Cordillera de la Costa y litoral, y una componente nival asociada al deshielo en la parte alta de la cuenca, correspondiente a la zona cordillerana (Videla, 2013).

Esta cuenca suscita un elevado interés a nivel país, ya que concentra aproximadamente el 41% de la población total, razón por la cual da lugar a las principales actividades económicas a nivel nacional alcanzando un ritmo de crecimiento considerablemente mayor al promedio nacional (Videla, 2013).

Para efectos de este estudio, interesa conocer las características de la parte más alta de la cuenca, denominada comúnmente sub-cuenca del Río Maipo Alto, ya que ésta constituye la principal fuente de agua potable del Gran Santiago, alcanzando el 70% de la demanda actual (Bustos, 2011).

### 3.1.2 Sistema Físico Natural

La climatología de la cuenca del Río Maipo corresponde a un clima templado mediterráneo, caracterizado por un periodo estival seco y caluroso y un periodo invernal frío donde se producen la mayor parte de las precipitaciones (Uribe, 2015).

En la sub-cuenca del Río Maipo Alto, se registran fuertes contrastes térmicos entre invierno y verano, alcanzando mínimas de  $-15$  [°C] en invierno y máximas sobre los  $30$  [°C] en verano (Estación DGA El Yeso Embalse). En cuanto a las precipitaciones, se suelen presentar en forma de nieve sobre los  $1.800$  [msnm] (Videla, 2013), aumentando con la altura y alcanzando valores medios anuales de  $860$  [mm] (Estación El Yeso Embalse, 1980-2015). Conforme aumenta la altura, el clima de la cuenca se puede caracterizar como frío de altura, destacándose por la acumulación de nieve y presencia de glaciares en cumbres y quebradas cordilleranas. La Figura 3-2 presenta el climograma de la estación DGA El Yeso Embalse, ubicada a la salida del Embalse El Yeso:

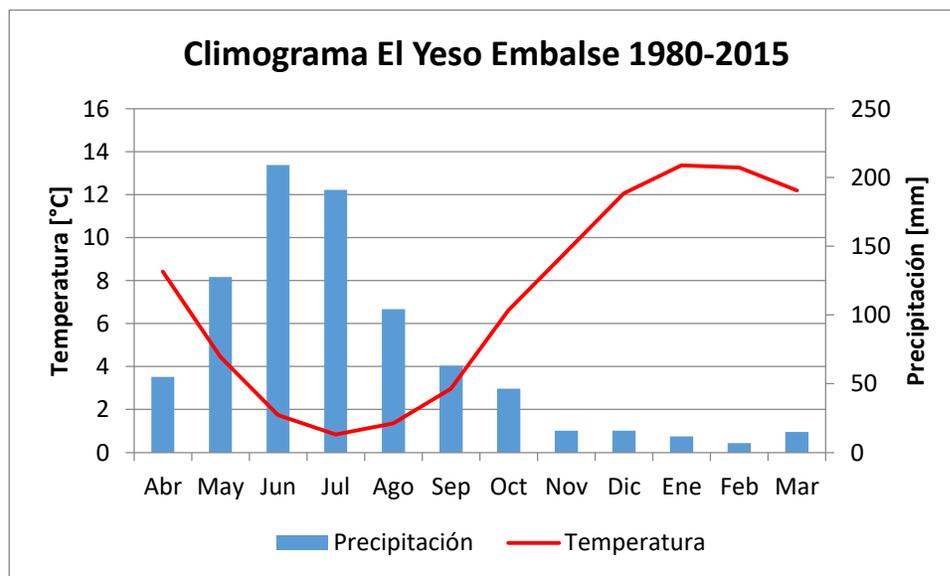


Figura 3-2: Comportamiento de temperatura y precipitaciones medias mensuales, estación El Yeso Embalse (2500 msnm). Periodo 1980-2015.

En cuanto a la hidrología de la parte alta de la cuenca, tal como se mencionó anteriormente, se caracteriza por un régimen nival con valores mayores de caudal medio mensual en los meses de verano debido a los deshielos de la precipitación sólida acumulada durante el invierno. La estación El Yeso Embalse no permite apreciar el régimen fluviométrico de la cuenca en estudio, ya que sus mediciones se encuentran condicionadas por la operación del embalse, por lo que se

cuenta con una serie de caudales sintéticos a nivel mensual correspondientes a la cuenca Afluyente al embalse El Yeso para el periodo 1983-2015 (Uribe, 2015). La cuenca define un área de 360 [km<sup>2</sup>] con una elevación media de 4000 [msnm], cuya curva de variación estacional se muestra en la Figura 3-3:

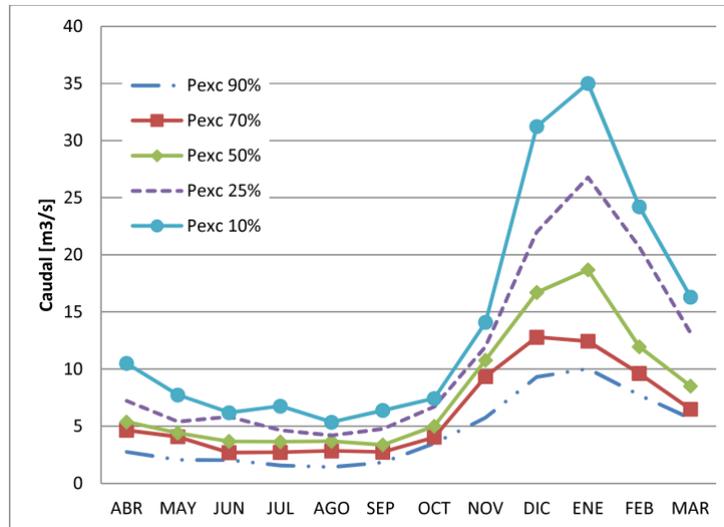


Figura 3-3: Curva de variación estacional, cuenca Afluyente al embalse El Yeso, periodo 1983-2003. Fuente: Uribe, 2015.

## 3.2 Caracterización del área de estudio

Cada uno de los sistemas de almacenamiento de agua en estudio, por medio de sus desagües, definen sus respectivas cuencas hidrográficas. La cuenca afluyente a Laguna Negra se nutre del derretimiento de la nieve acumulada durante el invierno y del glaciar Echaurren, mientras que la cuenca afluyente al embalse El Yeso lo hace a partir del escurrimiento del Río Yeso, que se forma a partir del derretimiento de la nieve acumulada y de los deshielos de los glaciares presentes en el paso Portillo de Piuquenes, posteriormente confluye al Río Maipo a la altura de la localidad de San Gabriel.

### 3.2.1 Delimitación hidrológica del área

Recordando que el objetivo principal del presente estudio es determinar los caudales afluentes a los sistemas de almacenamiento Laguna Negra y Embalse El Yeso, se han definido dos cuencas con estos nombres, determinadas por los puntos de salida de los cuerpos de agua que las definen. La delimitación de las cuencas a estudiar se muestra en la Figura 3-4.

Los parámetros y características de las cuencas a analizar se presentan en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Parámetros morfológicos de las cuencas a estudiar.

Parámetro	Cuenca	
	Laguna Negra	Embalse El Yeso
Área [km <sup>2</sup> ]	59,9	349,2
Altura mínima [msnm]	2.689	2.509
Altura máxima [msnm]	4.631	6.103
Altura media [msnm]	3.553	3.582
Pendiente media [°]	25,6	28,4

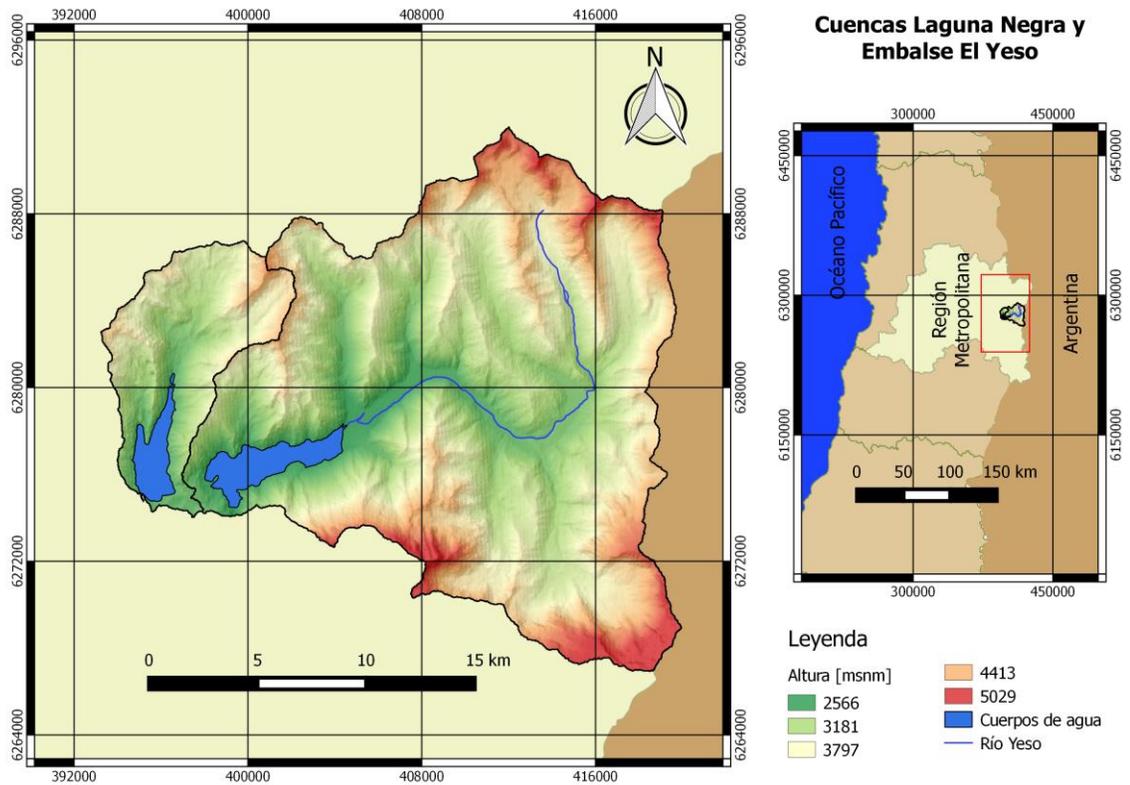


Figura 3-4: Cuencas Laguna Negra y Embalse El Yeso. Elaboración propia en software QGIS.

A partir del mapa de alturas de ambas cuencas, es posible mediante el software QGIS, conocer la pendiente y orientación de cada una de las cuencas. Esta información se presenta en la Figura 3-5 y Figura 3-6.

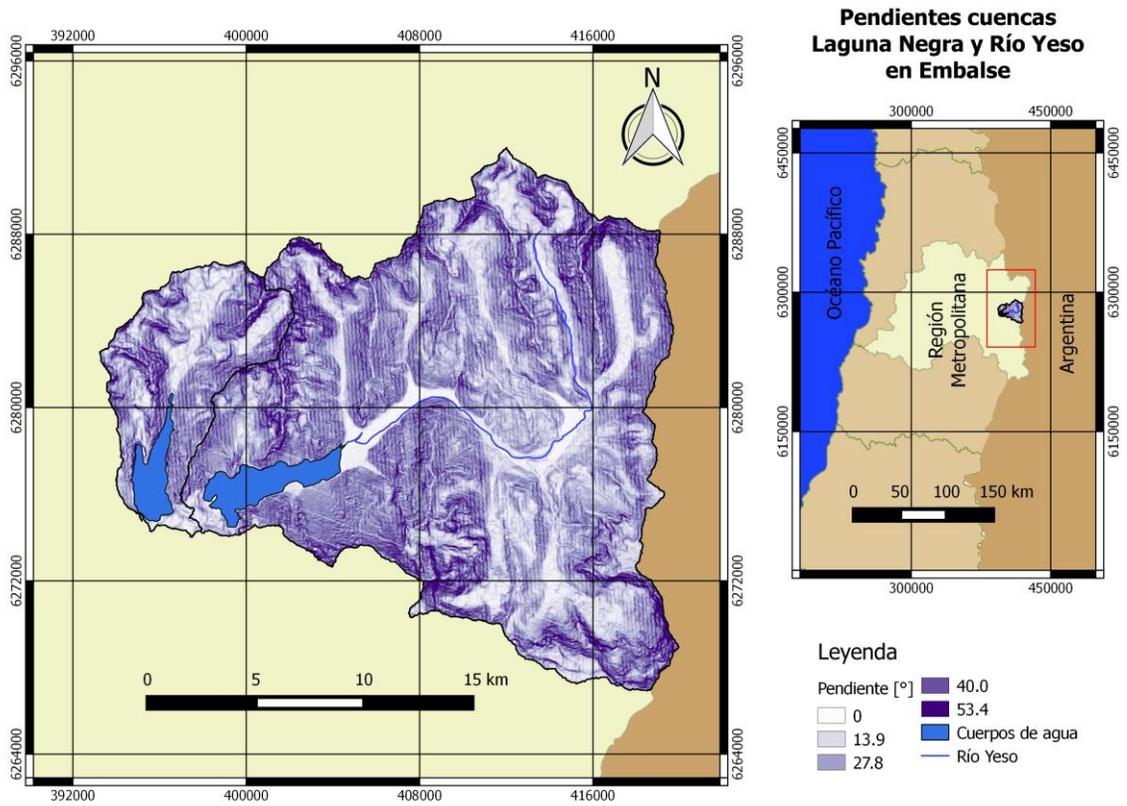


Figura 3-5: Mapa de pendientes, cuencas Laguna Negra y Río Yeso en Embalse.

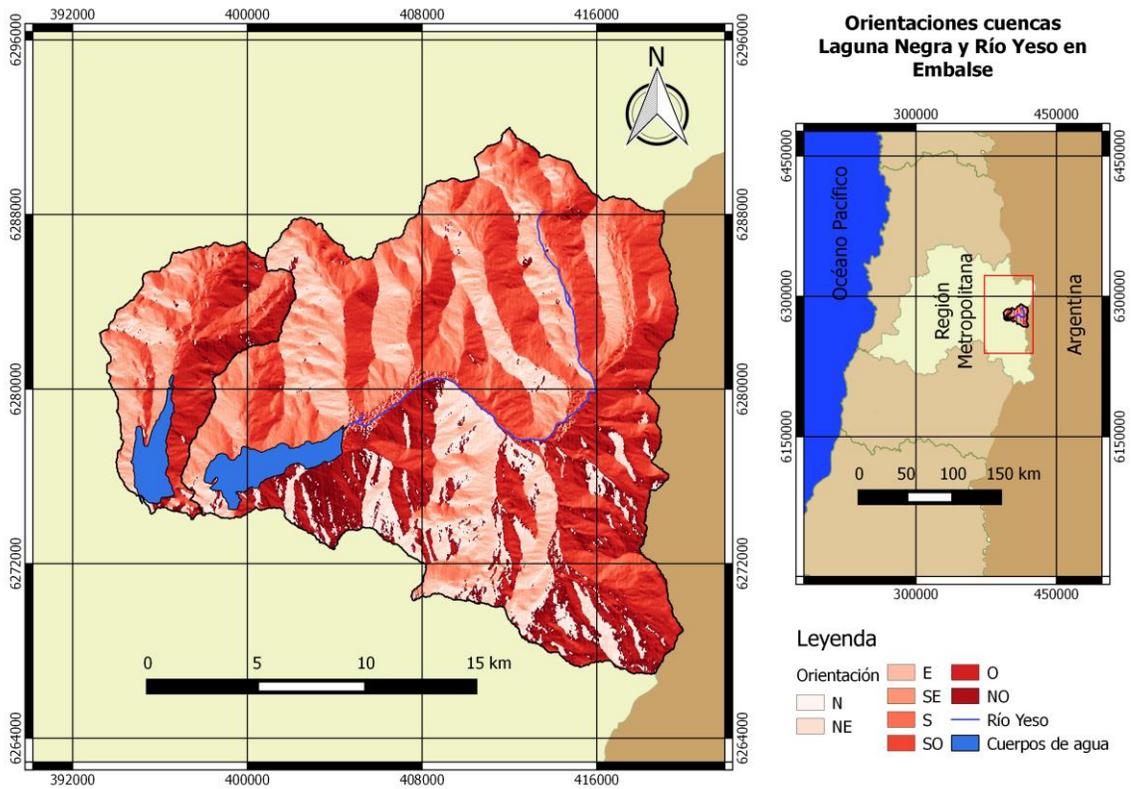


Figura 3-6: Mapa de orientación, cuencas Laguna negra y Río Yeso en Embalse.

### 3.2.2 Información disponible

En la zona de estudio, se destacan por su ubicación estratégica, dos estaciones DGA. Estas corresponden a las estaciones Laguna Negra y El Yeso Embalse. La Figura 3-7 muestra las estaciones DGA relevantes en las cuencas a estudiar.

La Tabla 3-2 presenta la descripción de cada una de las estaciones presentadas en la Figura 3-7.

Tabla 3-2: Características de las estaciones relevantes.

Estación	Cota [msnm]	Estado	Tipo	Periodo	Acrónimo
Río Yeso en Embalse	2475	Suspendida	Fluviométrica	1945 - 1978	RYeE
El Yeso nivel de embalse	2558	Vigente	Calidad y Sedimentológica	2000 - Actual	EY-NE
El Yeso en Embalse	2475	Vigente	Ruta de nieve	1962 - Actual	EY-RN
Río Yeso en Piuquenes	2550	Suspendida	Fluviométrica	1969 - 1972	RYeP
Laguna Negra	2780	Vigente	Meteorológica	1965 - Actual	LN
Estero Glaciar Echaurren	3000	Suspendida	Fluviométrica	1976 - 2004	EGE

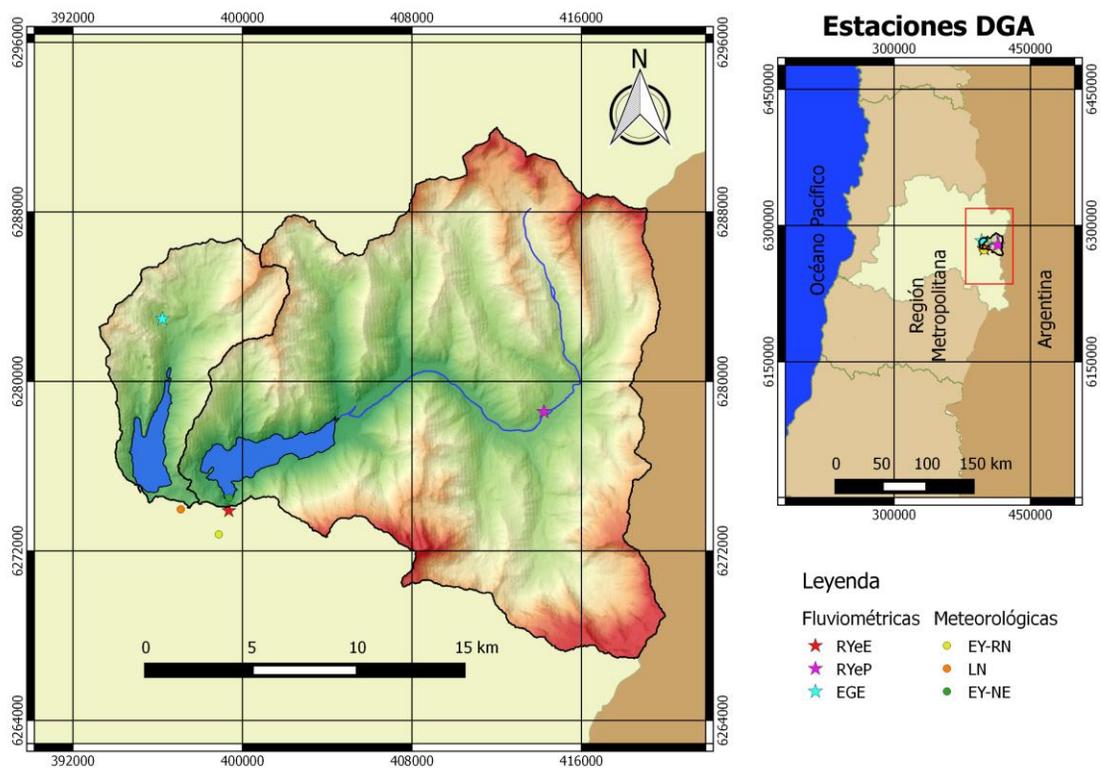


Figura 3-7: Estaciones DGA en cuencas El Yeso Embalse y Laguna Negra

#### 3.2.2.1 Información Fluviométrica

A nivel nacional, la red hidrométrica de la DGA se ubica concentrada en la depresión intermedia y hacia la costa, en desmedro de las zonas de alta montaña, donde se tienen muy pocas estaciones, ya sea por las dificultades de acceso o por lo despoblado de estas zonas que actualmente no suscitan mayor interés por parte de las autoridades.

En las cuencas a estudiar, no se tiene un control fluviométrico de calidad, ya que las estaciones disponibles han registrado durante poco tiempo la variable de interés, o bien estas mediciones poseen vacíos debido a las condiciones extremas durante los meses de invierno.

La Figura 3-8 presenta la estadística fluviométrica a nivel medio diario, disponible en las estaciones mostradas en la Figura 3-7.

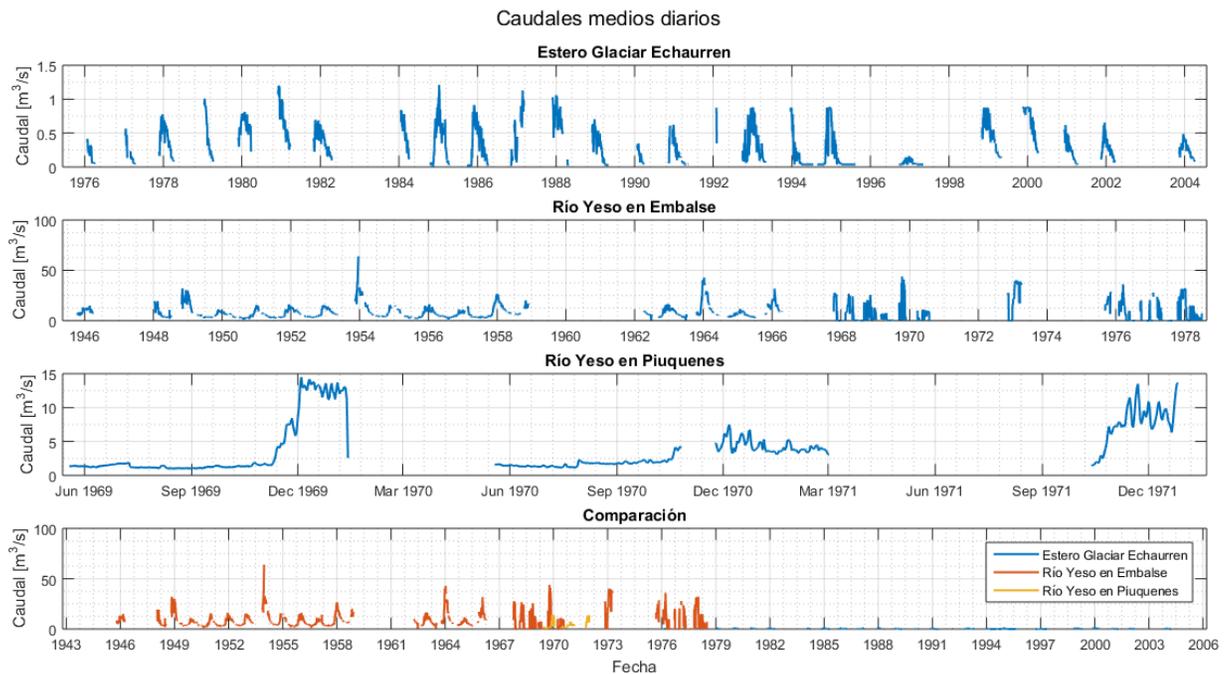


Figura 3-8: Caudales medios diarios, para las estaciones presentes en la zona de estudio.

De acuerdo a la Figura 3-7, la estación Río Yeso en Embalse corresponde al punto de salida de la cuenca Embalse El Yeso, sin embargo, las mediciones de caudal se realizan aguas abajo del embalse, por lo que éstas se encuentran afectadas por la operación de la obra hidráulica y no representan el comportamiento de la cuenca en régimen natural.

Debido a la carencia de registros de calidad, se utilizarán series de afluentes a los sistemas Laguna Negra y Embalse El Yeso, estimadas por Lagos (2006) a partir del nivel de los cuerpos de agua y la magnitud de sus efluentes. Estas series se encuentran a nivel mensual y consideran todos los aportes a los sistemas de almacenamiento, tanto superficiales como subterráneos, y se presentan en la Figura 3-9.

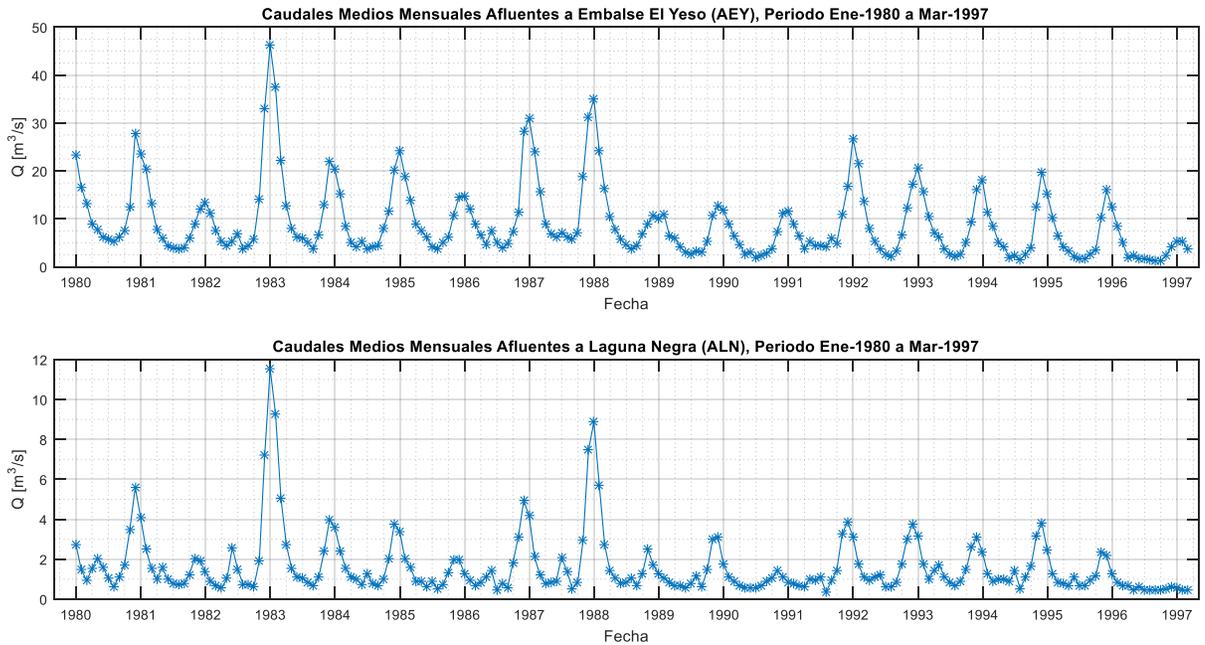


Figura 3-9: Caudales medios mensuales afluentes a Laguna Negra (ALN) y Embalse El Yeso (AEY). Fuente: Lagos (2006).

### 3.2.2.2 Glaciares

A partir del catastro de glaciares de la DGA (DGA, 2010), se han identificado los principales glaciares presentes en las cuencas en estudio, los cuales se presentan en la Figura 3-10.

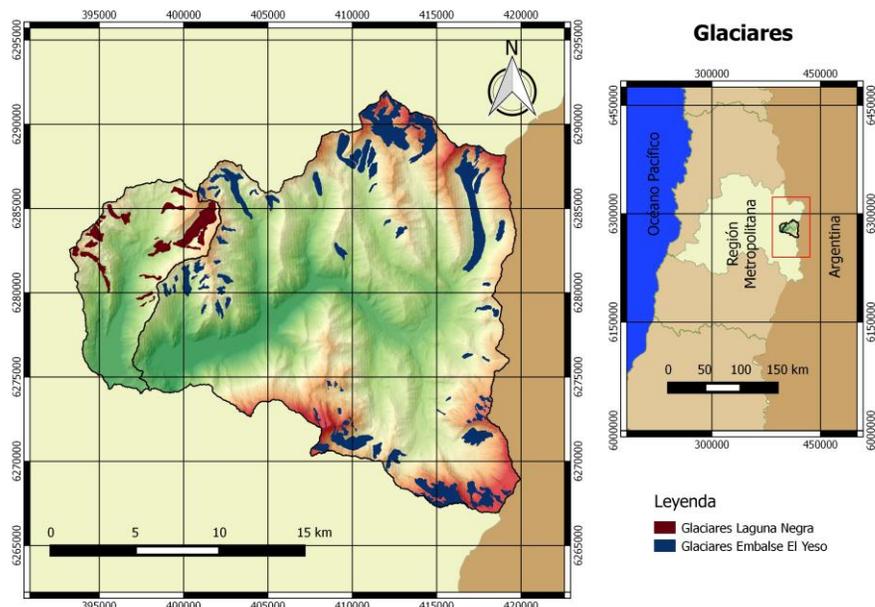


Figura 3-10: Glaciares en cuencas Laguna Negra y Embalse El Yeso.

Las áreas glaciares de cada una de las cuencas, a partir de lo presentado en la Figura 3-10, son 6,9 y 32,1 [km<sup>2</sup>] para las cuencas Laguna Negra y Embalse El Yeso, respectivamente. Estos valores corresponden al 11,46% y 9,14% del área total para las cuencas Laguna Negra y Embalse El Yeso, respectivamente.

## Capítulo 4: Recopilación y preparación de datos

Para llevar a cabo la modelación hidrológica en la zona de estudio, se requieren definir las características morfológicas y meteorológicas correspondientes, las cuales constituirán las series de entrada y parámetros del modelo CRHM. En particular, las variables de entrada requeridas corresponden a precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar incidente de onda corta, todas a nivel horario; además de las características morfológicas de cada URH como elevación, orientación y pendiente.

### 4.1 Delimitación de URH's

Al tratarse de cuencas de alta montaña, con un predominante régimen nival, el fenómeno hidrológico dominante es la acumulación y ablación de la nieve, por lo tanto, los factores que resultan relevantes a la hora de definir las URH's son la altura y la orientación. La primera de ellas genera variaciones en la precipitación y temperaturas, mientras que la segunda determina la radiación solar que incide sobre el manto de nieve.

Para definir las URH's, se discretizaron las cuencas en bandas de altura a partir de sus curvas hipsométricas (Figura 4-1). Para la cuenca Laguna Negra se consideraron 4 bandas de altura, asociadas al 25, 50, 75 y 100% del área (ver Figura 4-2), mientras que para la cuenca Río Yeso en Embalse, se definieron 3 bandas de altura, asociadas al 30, 60 y 100% del área (ver Figura 4-3), esto debido a que el comportamiento hidrológico de la parte más alta de la cuenca es similar y no es necesario hacer una discretización más fina. El resumen de las bandas de altura se muestra en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Resumen bandas de altura.

Bandas de Altura	Río Yeso en Embalse			Laguna Negra			
	30	60	100	25	50	75	100
Porcentaje del área total [%]	30	60	100	25	50	75	100
Área acumulada [km <sup>2</sup> ]	104.77	209.54	349.24	14.97	29.94	44.91	59.88
Área banda [km <sup>2</sup> ]	104.77	104.77	139.70	14.97	14.97	14.97	14.97
Altura máxima [msnm]	3284	3753	6103	2964	3344	3701	4631
Altura mínima [msnm]	2509	3284	3753	2689	2964	3344	3701
Altura media [msnm]	2951.4	3597.4	4243.3	2785.1	3170.3	3556.9	3942.2
Desviación estándar altura [msnm]	226.0	133.2	409.6	88.2	111.4	103.5	185.5

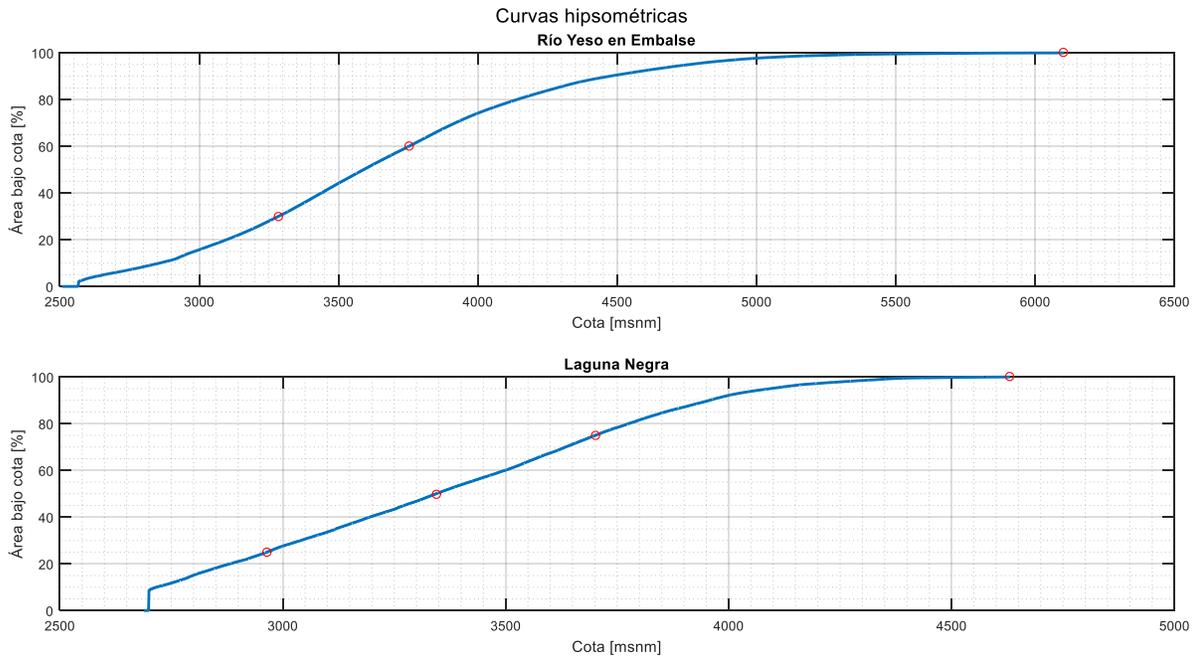


Figura 4-1: Curvas hipsométricas. Se destacan los puntos asociados a los límites superiores de cada banda de altura.

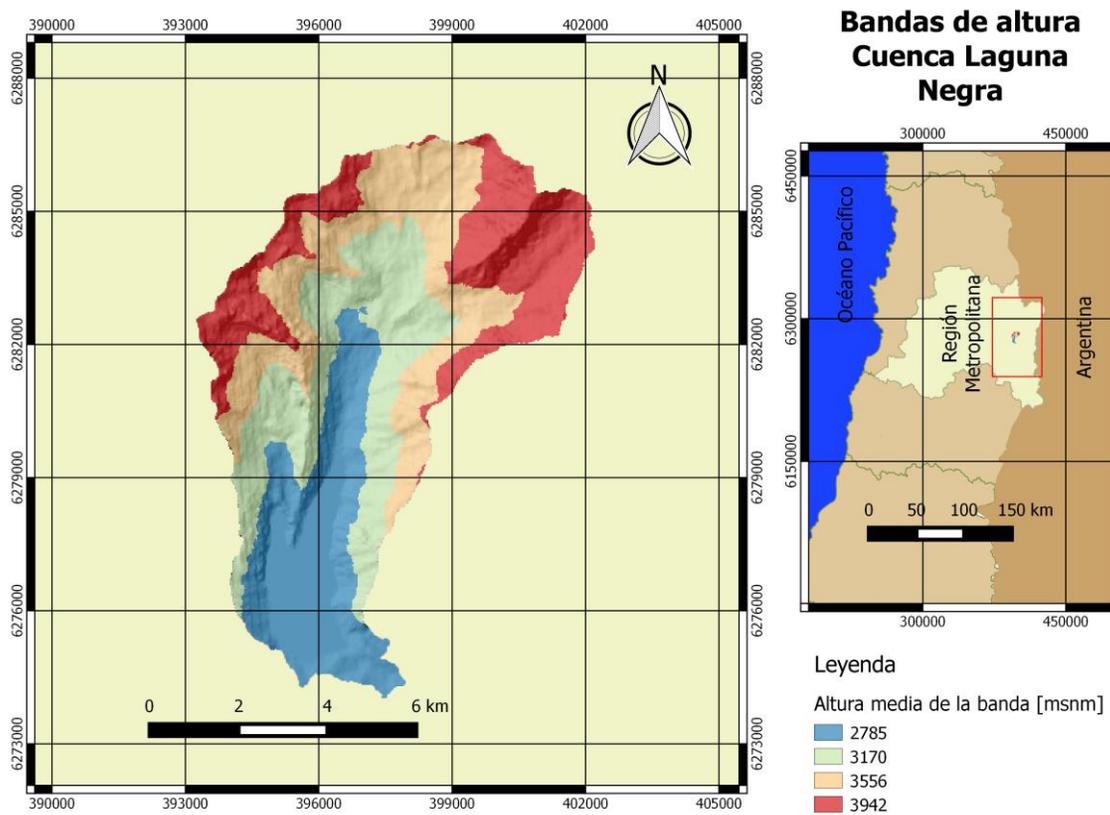


Figura 4-2: Bandas de altura, cuenca Laguna Negra.

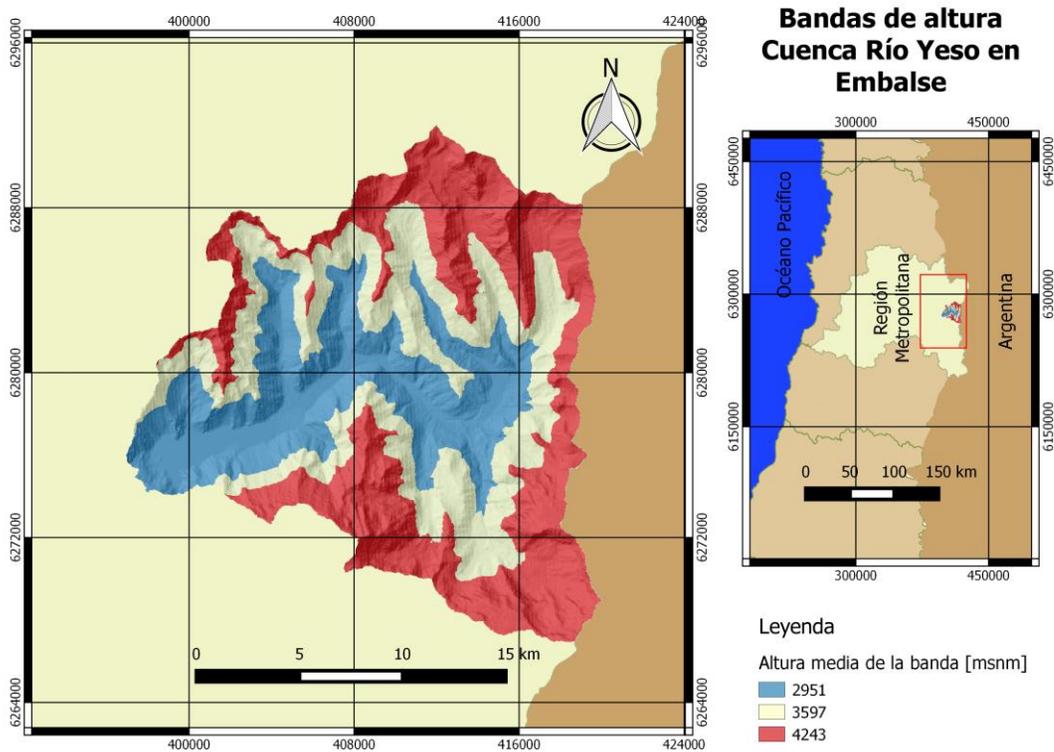


Figura 4-3: Bandas de altura, cuenca Río Yeso en Embalse.

Una vez definidas las bandas de altura, se proceden a analizar las orientaciones de las cuencas. Para ello, se consideran los valores presentados en la Figura 3-6 y se diferencian las orientaciones Nor-Oeste y Sur-Este, tal como se muestra en la Figura 4-4 y Figura 4-5:

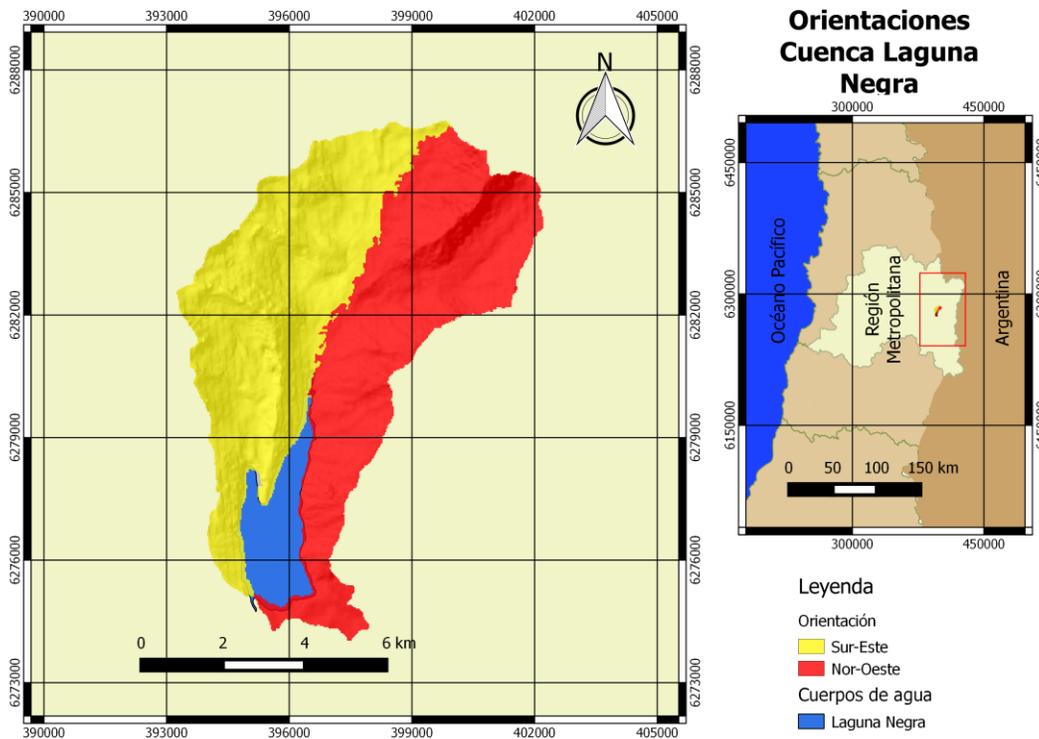


Figura 4-4: Orientaciones cuenca Laguna Negra.

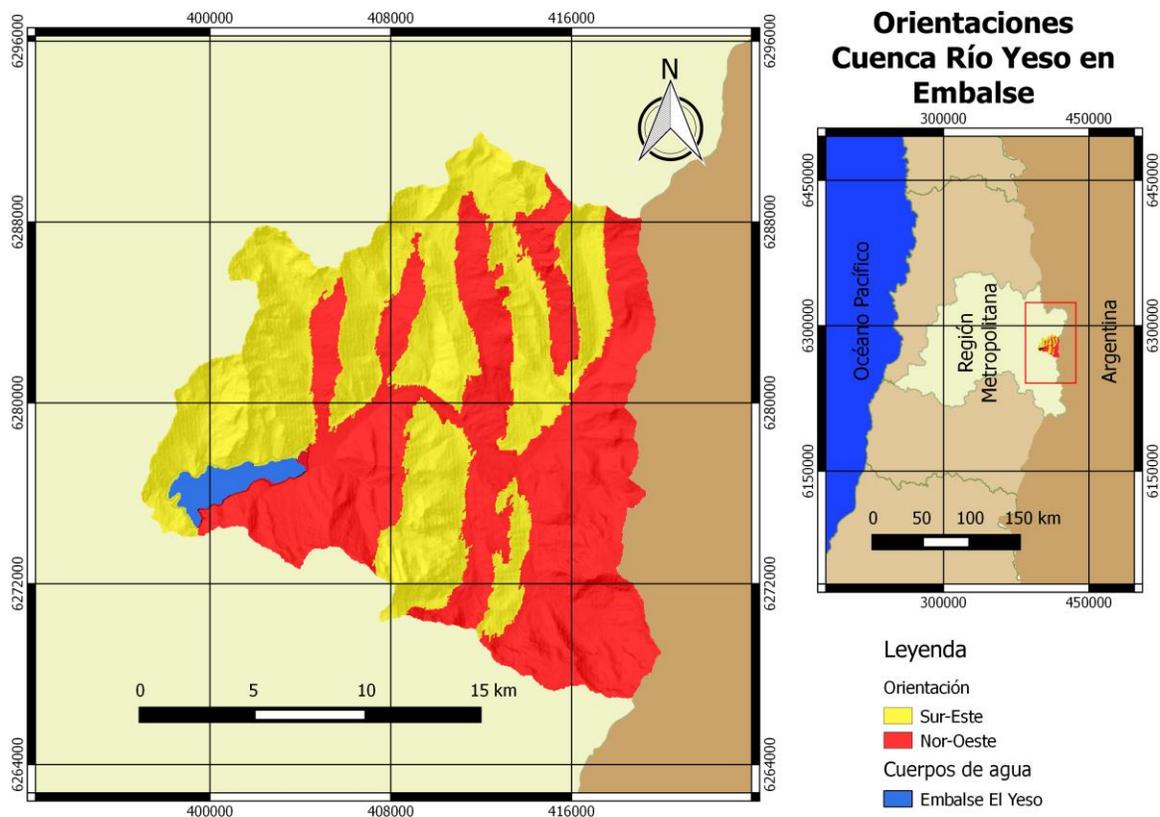
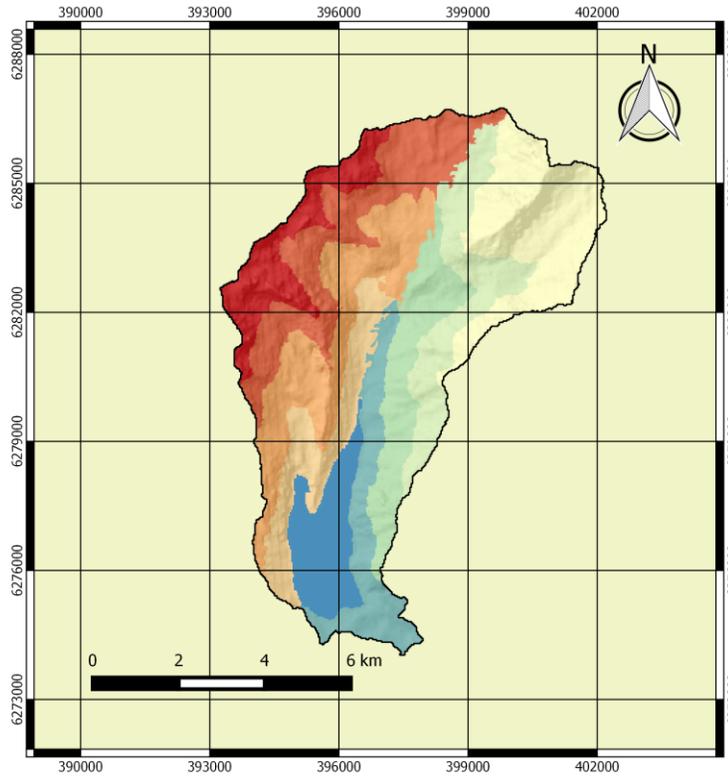


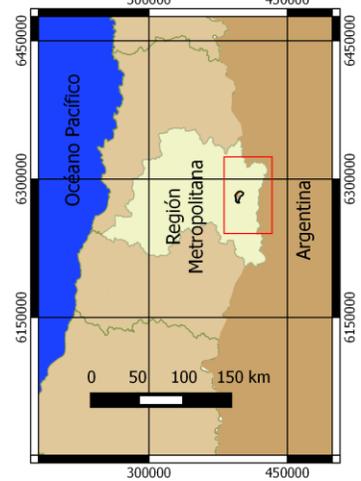
Figura 4-5: Orientaciones cuenca Río Yeso en Embalse.

Con las orientaciones y las bandas de altura, es posible generar las URH's por medio de la cruce de esta información. Para ello, se definen clases o tipos de URH, las cuales corresponden a una orientación y una banda de altura en particular, por lo tanto, para la cuenca Laguna Negra se tienen 8 tipos, mientras que para el Embalse El Yeso se tienen 6 tipos. Además, para mejorar la calidad de la modelación, se ha decidido considerar un tipo adicional de URH en ambas cuencas (denominada tipo "0"), correspondiente al cauce principal y al cuerpo de agua, ya que esta URH será la que reciba el agua de todas las otras unidades.

El resultado del procedimiento anterior se presenta en las Figura 4-6 y Figura 4-7:



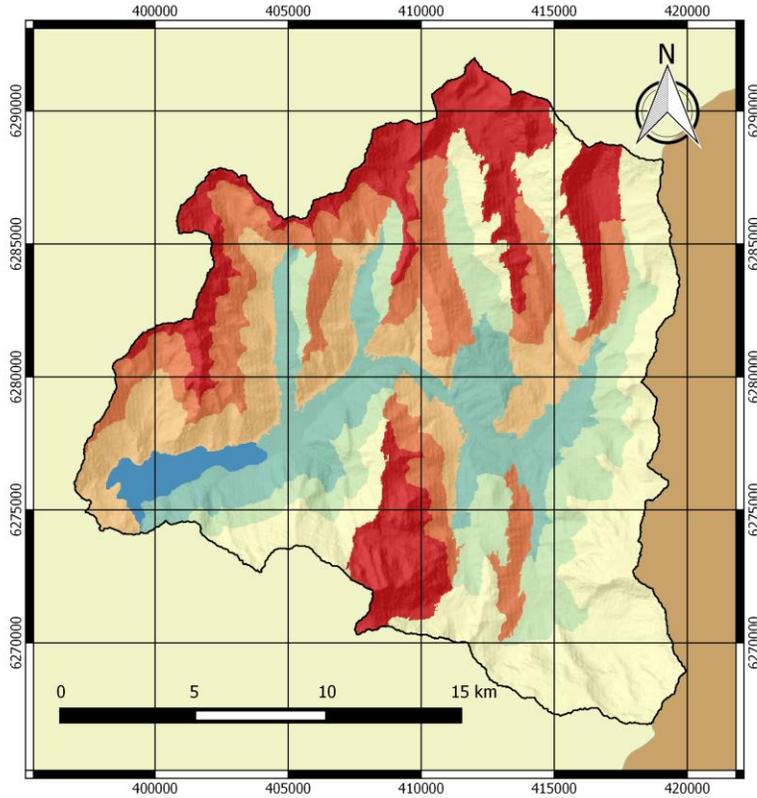
**Tipos de URH  
Cuenca Laguna Negra**



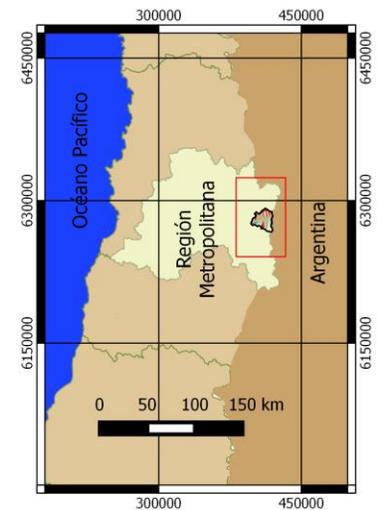
**Leyenda**

Tipo URH	Alta - NO
0	Baja - SE
Baja - NO	Media - SE
Media - NO	Media Alta - SE
Media Alta - NO	Alta - SE

*Figura 4-6: Tipos de URH, cuenca Laguna Negra.*



**Tipos de URH  
Cuenca Río Yeso en  
Embalse**



**Leyenda**

Tipo URH	Alta - NO
0	Baja - SE
Baja - NO	Media - SE
Media - NO	Alta - SE

*Figura 4-7: Tipos de URH, cuenca Río Yeso en Embalse.*

Finalmente, con los tipos de URH's definidos, se deben individualizar cada una de las unidades, ya que en la cuenca Río Yeso en Embalse hay tipos de URH que se encuentran separadas geográficamente, por lo tanto deben ser consideradas como distintas para la modelación. El resultado de este procedimiento se muestra en las Figura 4-8 y Figura 4-9, mientras que el detalle de cada unidad se adjunta en Anexo B.

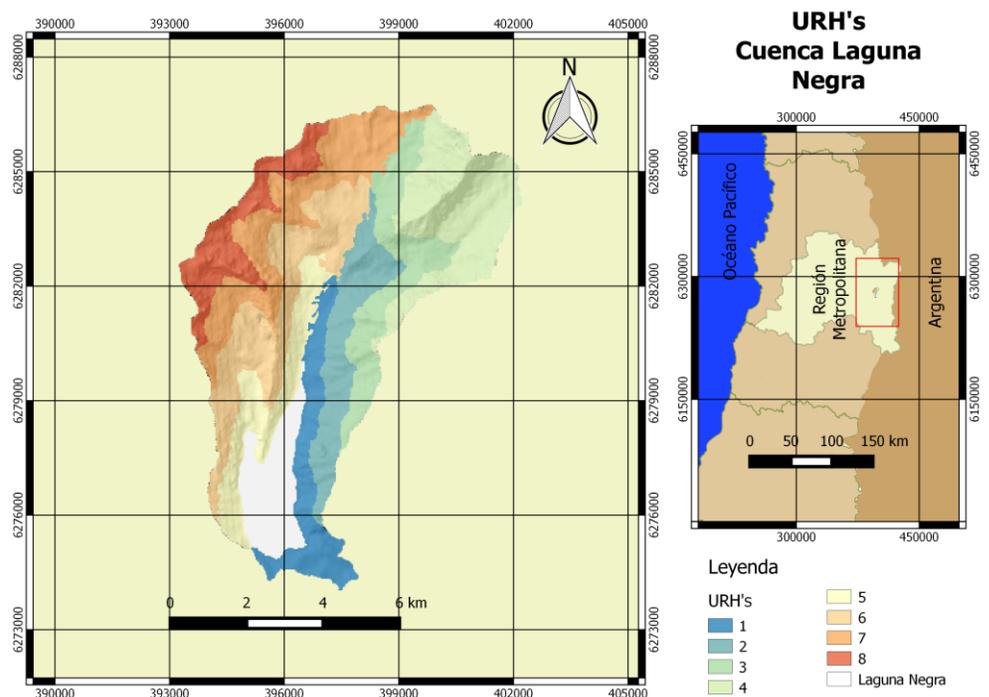


Figura 4-8: Unidades de respuesta hidrológica, cuenca Laguna Negra.

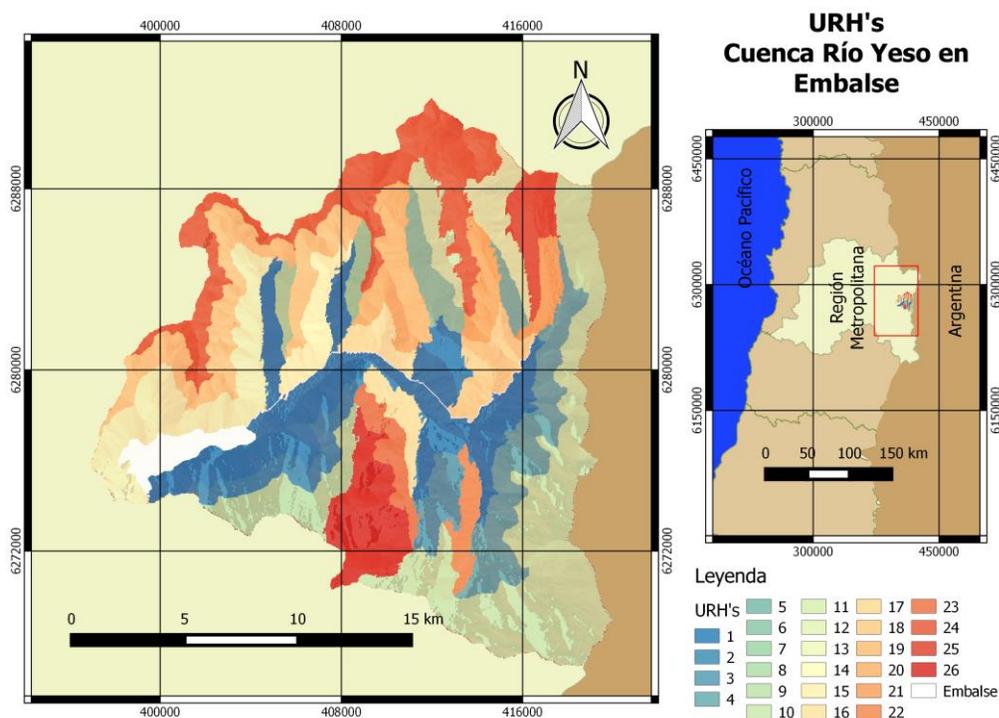


Figura 4-9: Unidades de respuesta hidrológica, cuenca Río Yeso en Embalse.

## 4.2 Precipitación

Se cuenta con estadística de precipitación cada 3 horas para el periodo 1980-2015, para todo Chile con resolución espacial de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (Vargas, et al., 2017), la cual se presenta promediada temporalmente en la Figura 4-10.

Para acotar la estadística a la zona de estudio, se consideraron 17 puntos de la grilla, los cuales se presentan en la Figura 4-11.

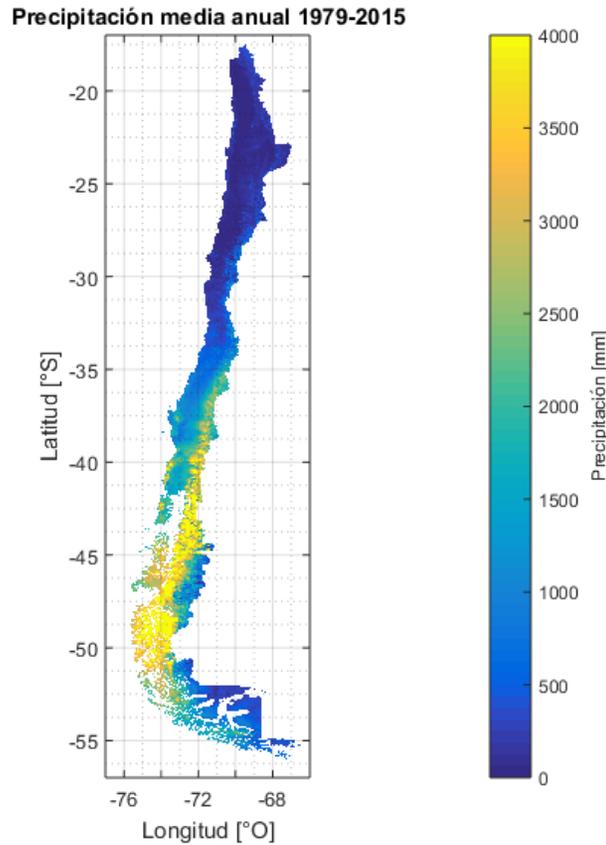


Figura 4-10: Precipitación media anual grillada, para el periodo 1979-2015.

Con el procedimiento anterior, se tiene una serie de precipitación diaria para el periodo 1980-2015 en cada punto considerado.

Para escalar los datos a nivel horario, se ha supuesto que toda la precipitación en el intervalo de 3 horas, se distribuye de manera homogénea en cada hora, por lo tanto:

$$Pp_{t_i} = \frac{Pp_{3h}}{3} \quad (4.1)$$

Donde  $Pp_{3h}$  es la precipitación cada 3 horas, y  $Pp_t$  es la precipitación a la hora  $t$ .

A partir de lo anterior, se cuenta con la serie de precipitación horaria para el periodo 1980-2015.

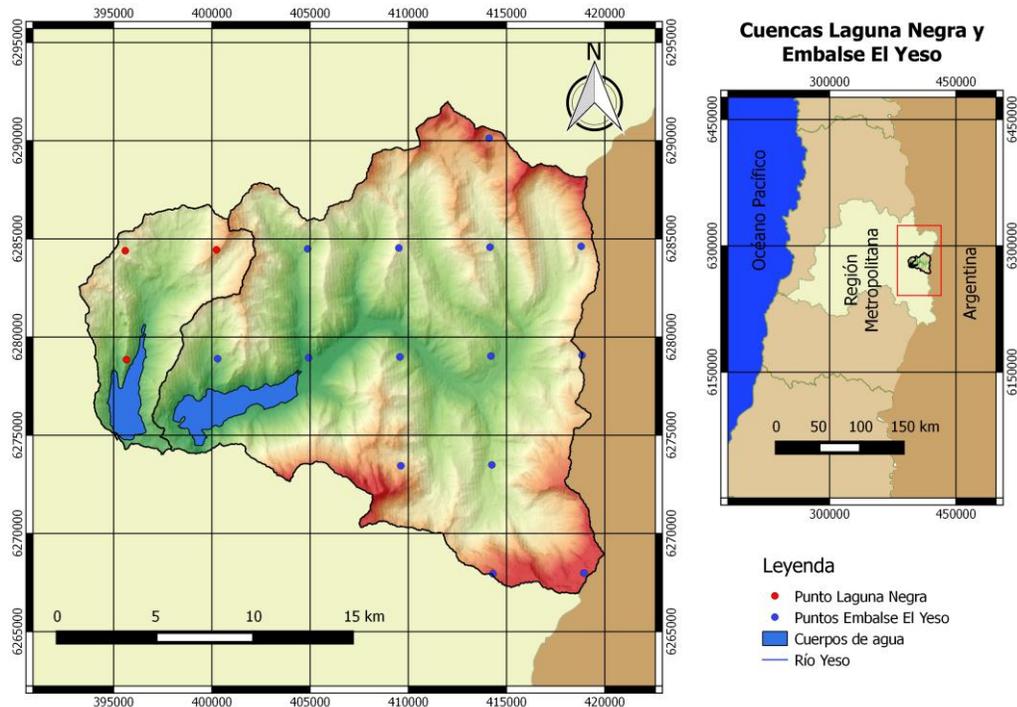


Figura 4-11: Zona de estudio con puntos considerados para acotar espacialmente la estadística disponible.

### 4.3 Temperatura

El estudio de Actualización del Balance Hídrico Nacional, realizado por la Universidad de Chile en conjunto con la Pontificia Universidad Católica para la DGA (no publicado a la fecha) generó estadística de temperaturas máximas y mínimas a nivel diario para el periodo 1980-2015 para todo Chile con resolución espacial de  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ .

Con el fin de esquematizar la información utilizada en la modelación, se presenta la Figura 4-12, que corresponde a las temperaturas máximas y mínimas promedio para el periodo mencionado.

De manera análoga a lo realizado con la precipitación, se consideran los puntos con estadística mostrados en la Figura 4-11, de modo tal que se tienen series de temperatura máxima y mínima para cada día del periodo 1980-2015 en cada uno de los puntos considerados.

A partir de la estadística de temperatura máxima y mínima, se requiere generar la serie de temperatura a nivel horario, para lo cual se ha desarrollado la metodología que se detalla a continuación.

Se ha descargado la estadística de temperatura a nivel horario de la estación DGA Laguna Negra para el año 2016, cuya serie se muestra en la Figura 4-13.

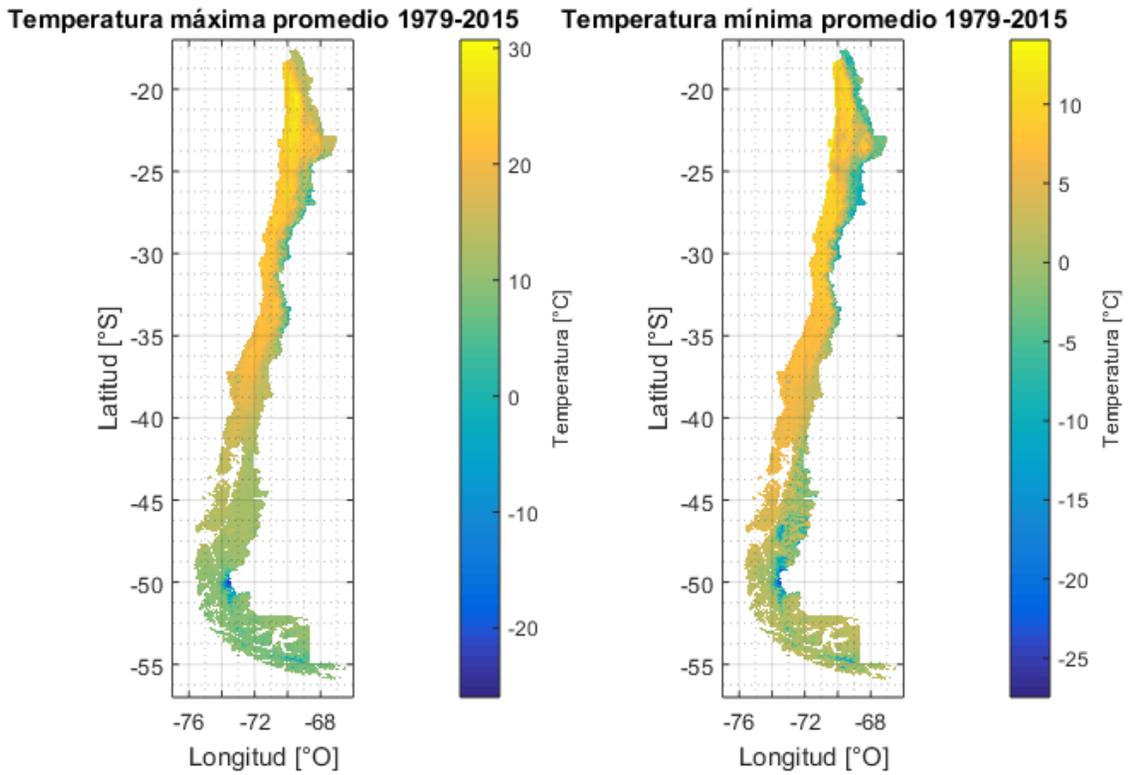


Figura 4-12. Temperaturas máximas y mínimas promedio, para el periodo 1979-2015.

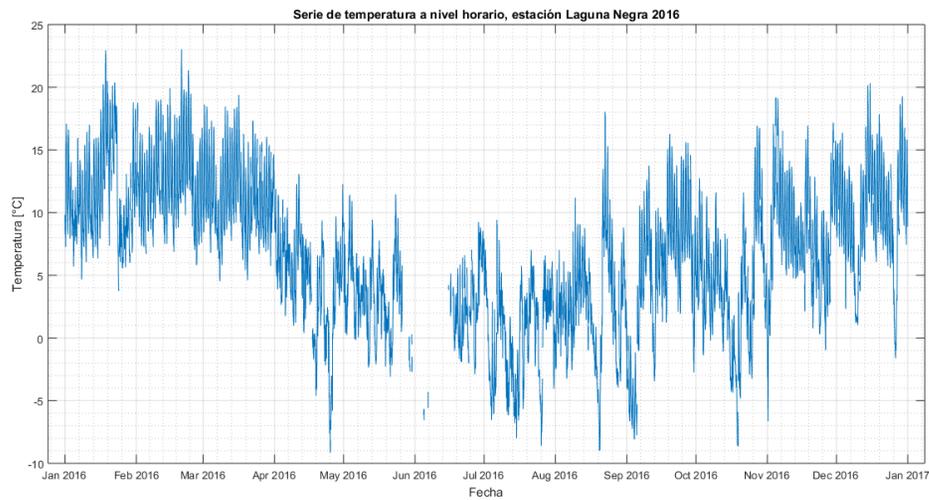


Figura 4-13: Serie de temperatura horaria, estación Laguna Negra 2016.

Con la estadística anterior, es posible obtener el ciclo diario promedio de la temperatura para cada mes, lo que se realiza considerando todos los días con mediciones y promediando la temperatura de cada hora. De este modo, se obtienen las series que se muestran en la Figura 4-14.

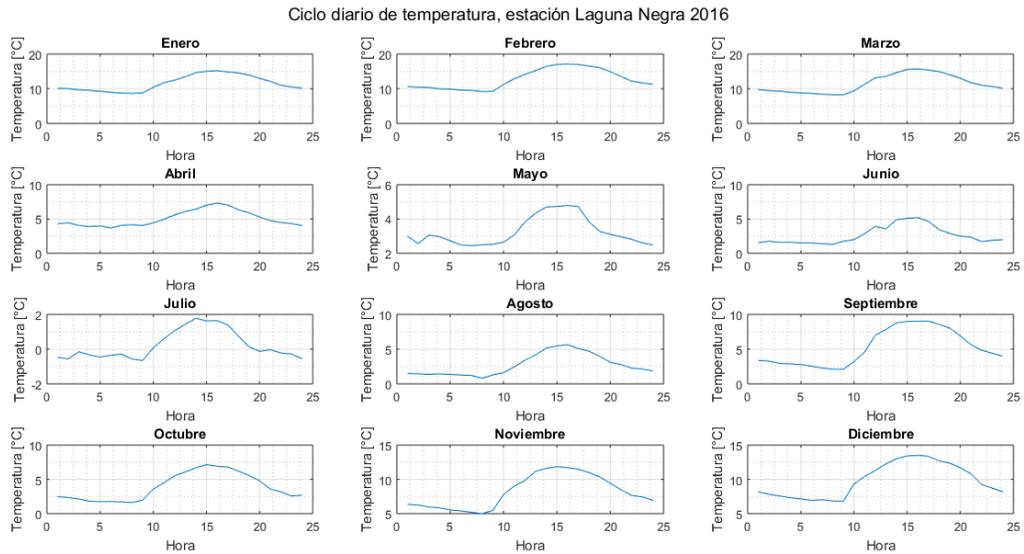


Figura 4-14: Ciclo diario promedio de temperatura para cada mes, estación Laguna Negra 2016.

A partir de la información presentada en la Figura 4-14, es posible obtener la hora promedio en la que ocurren las temperaturas mínimas y máximas para cada mes, lo que se presenta en la Figura 4-15:

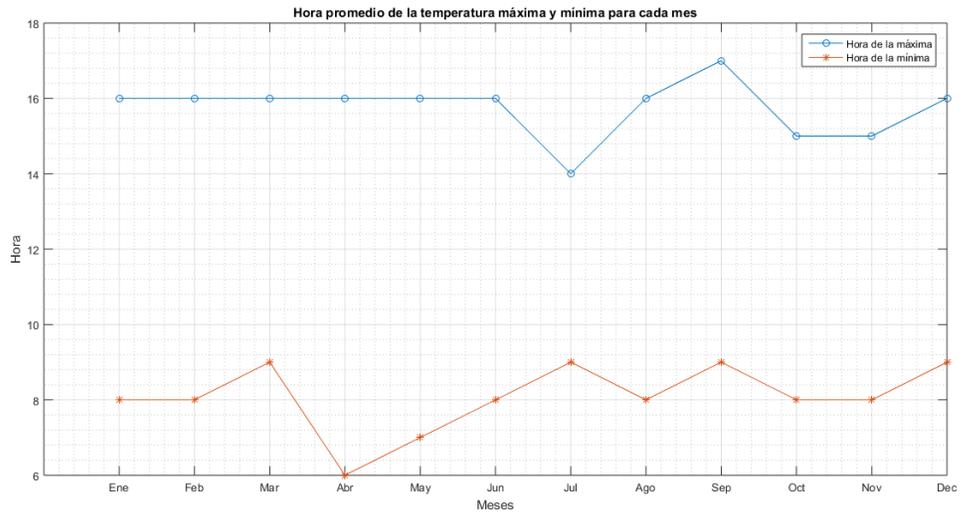


Figura 4-15: Hora promedio de ocurrencia de las temperaturas máximas y mínimas para cada mes. Estación Laguna Negra 2016.

Se observa que no existe gran variación en la hora de la ocurrencia de las temperaturas máximas y mínimas entre cada mes, por lo tanto se considera que las horas buscadas corresponden a la moda de los valores presentados en la Figura 4-15, de modo tal que se supondrá que la temperatura mínima ocurre a las 8 A.M. y la máxima a las 16 P.M.

Con los valores diarios de temperatura mínima y máxima, junto con la hora de su ocurrencia, es posible trazar una variación lineal entre la mínima y la máxima de cada día, de modo tal de obtener la serie de temperaturas escaladas a nivel horario, tal como se muestra en la Figura 4-16:

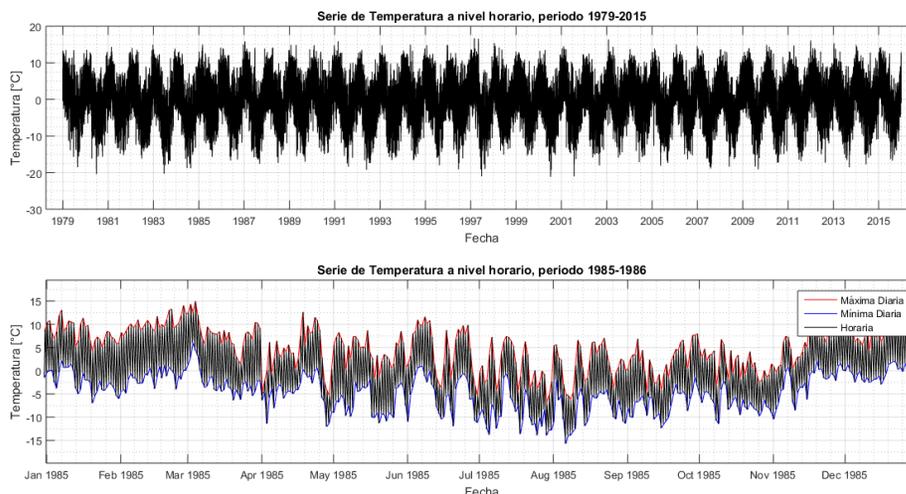


Figura 4-16: Serie de temperatura horaria, periodo 1980-2015.

La Figura 4-16 superior muestra la serie de temperatura horaria para el periodo completo, mientras que la inferior corresponde a los años 1985-1986, y se muestra a modo de ejemplo para evidenciar el ajuste y la variación lineal entre la máxima y la mínima de cada día.

#### 4.4 Humedad relativa

En la zona de estudio, se cuenta con estadística de humedad relativa a nivel horario en la estación Laguna Negra, sin embargo se tienen registros sólo de los años 2012 a 2016 (Figura 4-17). Debido a esto, se requiere desarrollar un procedimiento que permita generar series a nivel horario para el periodo 1980-2015.

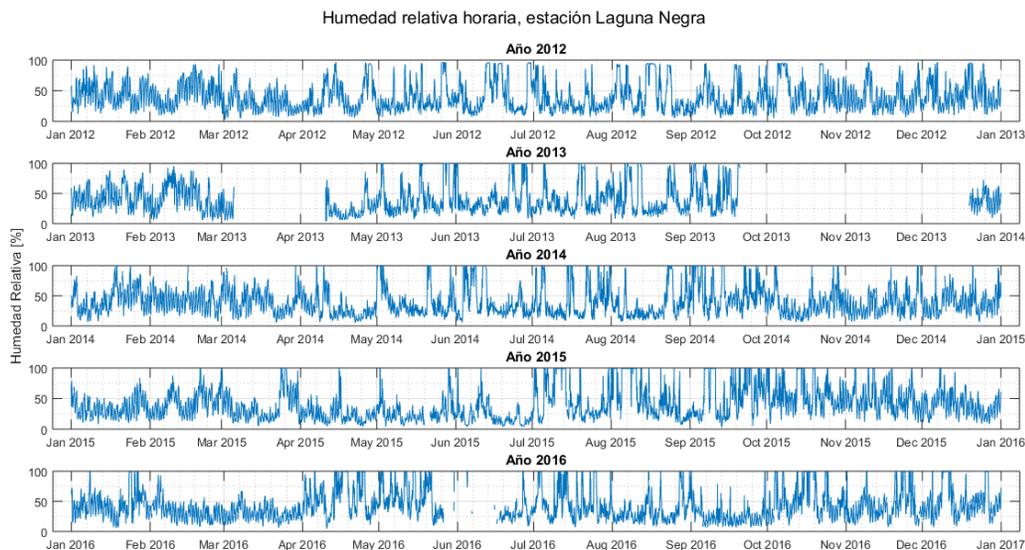


Figura 4-17: Estadística disponible de humedad relativa horaria, estación Laguna Negra.

Para construir la forzante de humedad relativa para el periodo 1980-2015 a nivel horario, se ha desarrollado un procedimiento estadístico, el cual se describe brevemente en esta sección y se explica de manera detallada en el Anexo C.

Con la estadística disponible, presentada en la Figura 4-17, se analizan los ciclos diarios de humedad relativa para cada mes (adimensionalizada por la humedad relativa media diaria).

Luego, se debe asociar una probabilidad de excedencia a cada ciclo diario a partir de su valor medio, lo que se realiza con una distribución Weibull. A partir de esto, se obtienen las curvas de duración de humedad relativa adimensional para cada hora de cada mes.

Posteriormente, se generan números aleatorios para cada mes de simulación. Si el número es menor a 0.3, se le asigna la serie asociada al 20%; si el número es mayor a 0.7, se le asigna la serie asociada al 80%; y si se encuentra entre 0.3 y 0.7, se le asigna la serie asociada al 50% de probabilidad de excedencia. En este procedimiento se ha supuesto que todos los días de cada mes, siguen la misma distribución. Además, para abordar la incertidumbre asociada al procedimiento, se han generado tres series de aleatorios mensuales.

El resultado hasta el momento son los ciclos diarios adimensionales de humedad relativa para cada mes, asociados a las tres probabilidades de excedencia consideradas. Por lo tanto, se requieren valores de humedad relativa media diaria para el periodo 1980-2015, con el objetivo de amplificar las series adimensionales.

Estos valores medios diarios se construyen a partir del promedio y desviación estándar de los datos observados, obtenidos con análisis de frecuencias a nivel mensual. Con estos estadígrafos a nivel mensual, es posible obtener la humedad relativa media diaria para cada día del periodo que se desea construir, generando un número aleatorio entre 0 y 1 para cada día, que representa la probabilidad de no excedencia asociada a la humedad relativa media diaria de cada día. Con la probabilidad y la distribución de probabilidad seleccionada, se estima el valor medio diario de la humedad relativa por medio del método del factor de frecuencias.

Con el objetivo de abordar la incertidumbre en la generación de números aleatorios, se han realizado 10 simulaciones distintas.

Con los valores de humedad relativa media diaria, y las series adimensionales horarias generadas previamente, se obtiene la serie de humedad relativa a nivel horario para el periodo 1980-2015.

Como se realizaron 3 simulaciones para los ciclos diarios tipo de humedad relativa adimensional, y 10 simulaciones para la humedad relativa media diaria, se tienen finalmente 30 simulaciones para la humedad relativa para el periodo 1980-2015.

#### **4.5 Velocidad del viento**

En la zona de estudio, se cuenta con mediciones de velocidad del viento en la estación Laguna Negra (ver Figura 3-7) a nivel horario para el año 2016, con fallas en el registro de información durante el mes de Junio producto de la cobertura nival, tal como se muestra en la Figura 4-18:

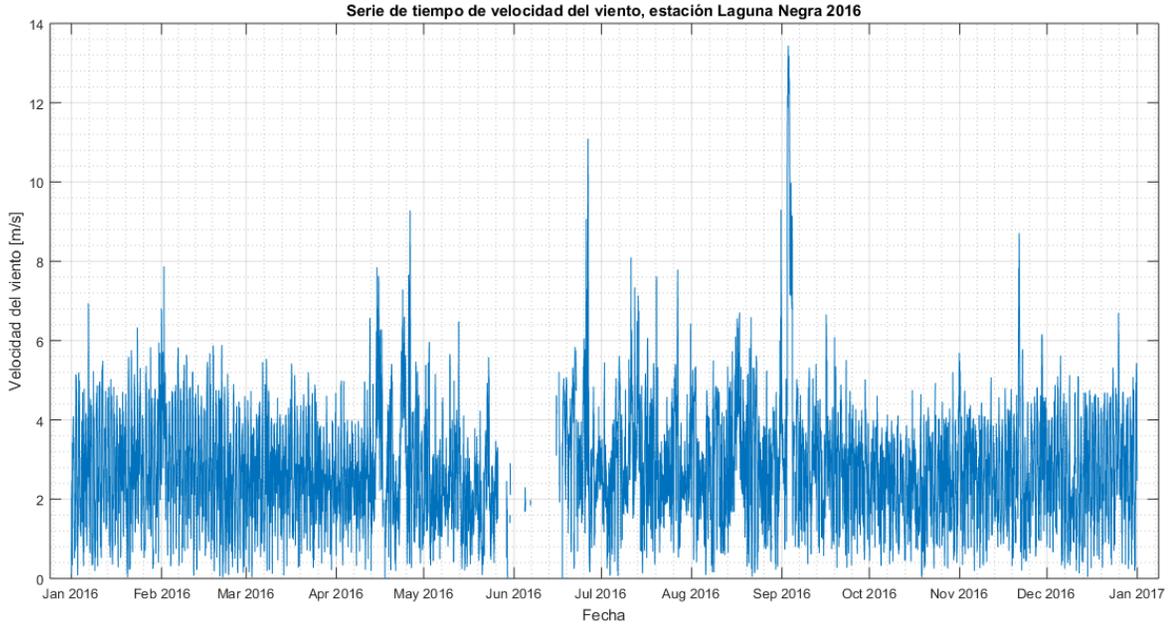


Figura 4-18: Estadística disponible de velocidad del viento a nivel horario. Estación DGA Laguna Negra.

Ante la escasez de información en la zona para generar las series durante el periodo deseado a nivel horario, se recurre a la estadística del Explorador Eólico utilizada en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, correspondiente a velocidades del viento a nivel diario durante el periodo 1980-2015, con la misma resolución espacial mostrada en la Figura 4-11. La metodología que se detalla a continuación se llevó a cabo con el objetivo de escalar las series de tiempo de nivel diario a nivel horario, y los gráficos con los estadísticos se adjuntan en el Anexo D.

En primer lugar, se determina la variación intradiaria de velocidad del viento para cada mes a partir de la estadística de la estación Laguna Negra (adimensionalizando cada día por el valor medio diario, con el objetivo de rescatar la forma del ciclo intradiario), con lo cual se obtiene el promedio y desviación estándar de velocidad del viento para cada hora de cada mes.

Posteriormente, se genera un número aleatorio para cada hora del periodo 1980-2015, el cual representa la probabilidad de no excedencia de la velocidad del viento para cada hora. Con este valor, se utiliza el método del factor de frecuencias para estimar la velocidad del viento a nivel horario, como se presentan en la Ecuación (4.2). Para considerar la incertidumbre asociada a generar números aleatorios, se realizan 10 simulaciones distintas.

$$x_{h,m,T} = \mu_{h,m} + K_{T_h} \cdot \sigma_{h,m} \quad (4.2)$$

$$T_h = \frac{1}{1 - \text{aleatorio}_h} \quad (4.3)$$

Donde:

- $T_h$ : Periodo de retorno asociado a la hora  $h$ .
- $x_{h,m,T}$ : Velocidad del viento asociada a la hora  $h$  del mes  $m$  de periodo de retorno  $T_h$ .
- $\mu_{h,m}$ : Velocidad del viento promedio a la hora  $h$  del mes  $m$ .

- $\sigma_{h,m}$ : Desviación estándar de la velocidad del viento a la hora  $h$  del mes  $m$ .
- $K_T$ : Factor de frecuencias asociado al periodo de retorno  $T_h$ .

Considerando que la estadística del explorador eólico está medida a 10 metros sobre el suelo, y el modelo CRHM la requiere a 2 metros, se utiliza el perfil logarítmico (ecuación (4.4)) para llevar las velocidades del viento a 2 metros sobre el suelo, calibrando las rugosidades a nivel mensual para incorporar el efecto de cambios en la rugosidad producto de la cobertura nival. Esta calibración se realiza con el objetivo que las series simuladas el año 2016 se ajusten de buena manera con las observadas en la estación.

$$V_2 = V_{10} \cdot \frac{\log\left(\frac{2}{Z_0}\right)}{\log\left(\frac{10}{Z_0}\right)} \quad (4.4)$$

Donde:

- $V_2$  y  $V_{10}$ : Velocidades a 2 y 10 metros sobre el suelo, respectivamente.
- $Z_0$  [m]: Rugosidad del terreno, calibrada a nivel mensual.

Con este procedimiento es posible obtener el ciclo horario de velocidad del viento adimensional para cada día del periodo de simulación. Finalmente, estos ciclos diarios se amplifican por el valor medio diario proveniente de la estadística del explorador eólico, por lo tanto, se tienen 10 series de velocidad del viento a nivel horario para el periodo 1980-2015 con resolución espacial  $0.05 \times 0.05^\circ$ .

La Figura 4-19 muestra los valores medios mensuales de las series generadas de velocidad del viento para cada una de las cuencas con el procedimiento descrito previamente.

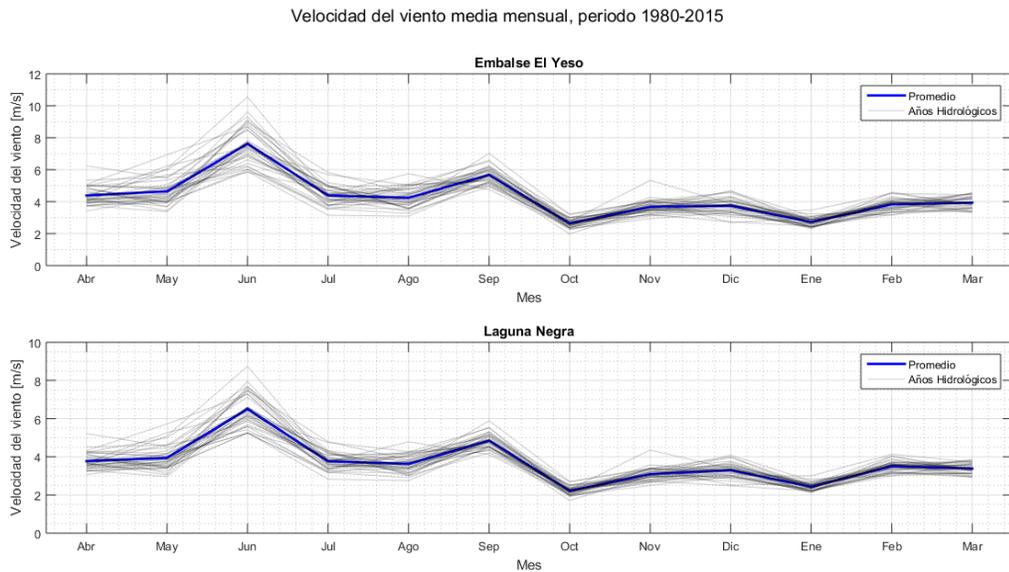


Figura 4-19: Velocidad del viento media mensual y promedio de cada una de las cuencas, periodo 1980-2015 (simulación 1).

## 4.6 Radiación solar

En la zona de estudio, se cuenta con mediciones de radiación solar incidente y reflejada a nivel horario de la estación Laguna Negra para el año 2016, tal como se muestra en la Figura 4-20:

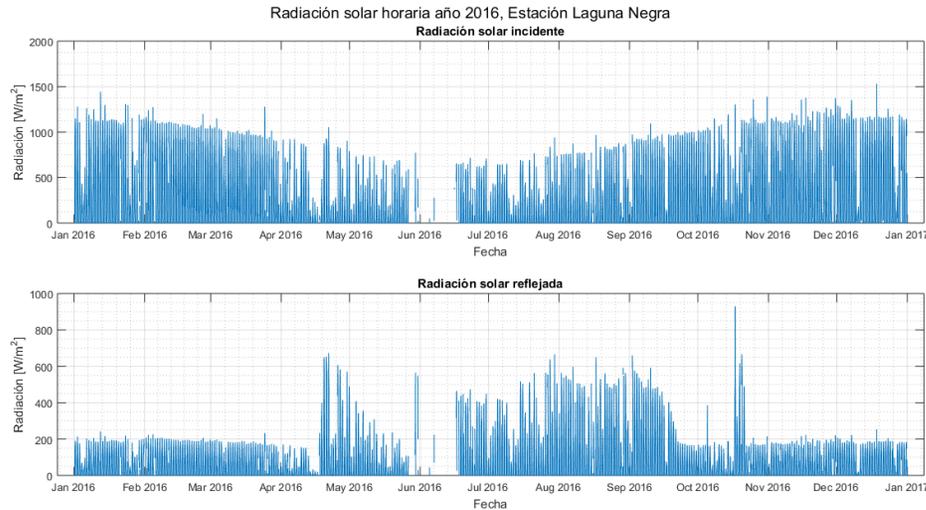


Figura 4-20: Estadística disponible de radiación solar a nivel horario, estación Laguna Negra.

Debido a la cantidad insuficiente de información disponible, se ha utilizado la metodología descrita en *Principles of Snow Hydrology* (De Walle & Rango, 2008), la cual permite estimar la radiación incidente de onda corta en función del día juliano para superficies inclinadas. La descripción de la metodología y los gráficos obtenidos se adjuntan en el Anexo E.

## 4.7 Estimación del aporte glaciar

La versión utilizada de CRHM no cuenta con un módulo glaciar, sin embargo, se están realizando esfuerzos para lograr incorporarlo al software, de modo tal de modelar los aportes glaciares de las cuencas que se deseen estudiar (Siemens, 2016; Anderson, 2017). Como las cuencas de interés sí poseen glaciares (ver Figura 3-10), el aporte de éstos a los sistemas debe ser restado de las series observadas, de modo tal de modelar únicamente los aportes pluviales y nivales.

La zona de estudio presenta escasez de registros de aportes glaciares, por lo que sólo se cuenta con la estación Estero Glaciar Echaurren (EGE, ver Figura 3-7), cuyas mediciones corresponden a caudales medios diarios durante el periodo 1976-2004 y se presentaron en la Figura 3-8. El aporte de EGE debe ser restado de la serie de tiempo de caudales afluentes a Laguna Negra (ALN) para realizar la calibración del modelo sin considerar los aportes glaciares. Sin embargo, esto no puede realizarse con los afluentes al Embalse El Yeso (AEY), pues no se tienen registros de los aportes glaciares en esta cuenca.

Para dar solución a esta problemática, se calcula el rendimiento del Glaciar Echaurren mediante la Ecuación (4.5):

$$q_{EGE} = \frac{Q_{EGE}}{A_{EGE}} \quad (4.5)$$

Donde:

- $Q_{EGE} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal medido en la estación EGE.
- $\hat{A}_{EGE} [km^2]$ : Área expuesta del glaciar, 0,51  $[km^2]$  (DGA, 2010).
- $q_{EGE} \left[ \frac{m}{s} \right]$ : Rendimiento unitario del glaciar Echaurren.

Como las cuencas Laguna Negra y Embalse El Yeso son adyacentes, las condiciones meteorológicas se consideran similares en ambas, por lo tanto, ante la escasez de registros, se supuso que los glaciares presentes en la cuenca del Embalse El Yeso poseen el mismo rendimiento que el glaciar Echaurren. De este modo, se puede estimar el aporte glaciar en esta cuenca ponderando por el área expuesta de los glaciares ahí presentes. Estos valores se muestran en la Tabla 4-2:

Tabla 4-2: Áreas expuestas de los glaciares presentes en la cuenca del Embalse El Yeso.

Glaciar	Área expuesta $[km^2]$
Pirámide	0,1
Bello	2,59
Yeso	1,65
Yeguas Muertas	0,95

Finalmente, se restan los aportes glaciares de las series de afluentes ALN y AEY, con lo cual se obtienen las series de caudales medios mensuales que permitirán calibrar el modelo. Estas series se muestran en la Figura 4-21.

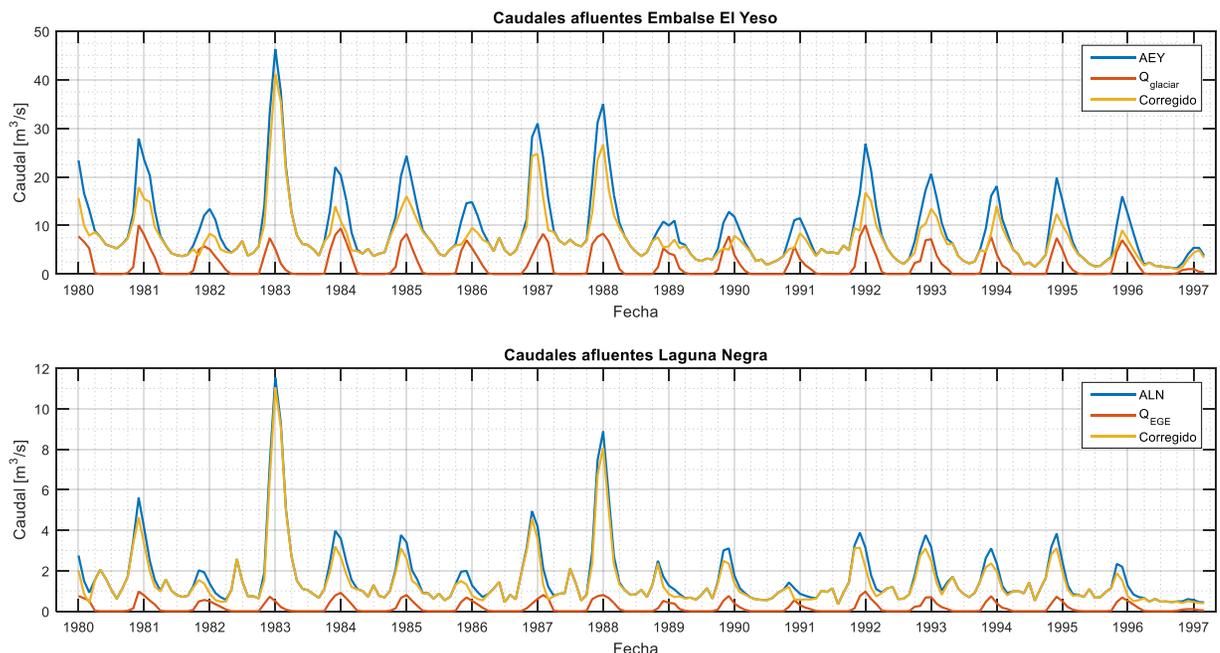


Figura 4-21: Caudales afluentes a los sistemas Embalse El Yeso y Laguna Negra, sin considerar aportes glaciares.

## 4.8 Escalamiento espacial de inputs

Se requiere asociar una serie temporal de forzantes meteorológicas a cada unidad de respuesta hidrológica a partir de las series de tiempo de las forzantes conocidas en los puntos presentados en la Figura 4-11.

En primer lugar, se calculan las coordenadas de los centros de gravedad de cada URH y, posteriormente, se calculan las distancias entre cada centroide y los cuatro puntos de la grilla que lo albergan (ver Figura 4-22). Con las series de tiempo y las distancias ya conocidas, se realiza una ponderación por el inverso de la distancia de acuerdo a la Ecuación (4.6)

$$F_i = \frac{\sum_{p=1}^4 F_p \cdot \frac{1}{d_{i-p}}}{\sum_{p=1}^4 \frac{1}{d_{i-p}}} \quad (4.6)$$

Donde:

- $F_i$  es la forzante en la URH  $i$ .
- $F_p$  es la forzante en el punto  $p$  que alberga al centroide  $i$
- $d_{i-p}$  es la distancia entre el centroide  $i$  y el punto  $p$  de la grilla.

De este modo, se tienen las series de tiempo de todas las forzantes asociadas a cada URH para ser incorporadas al modelo CRHM

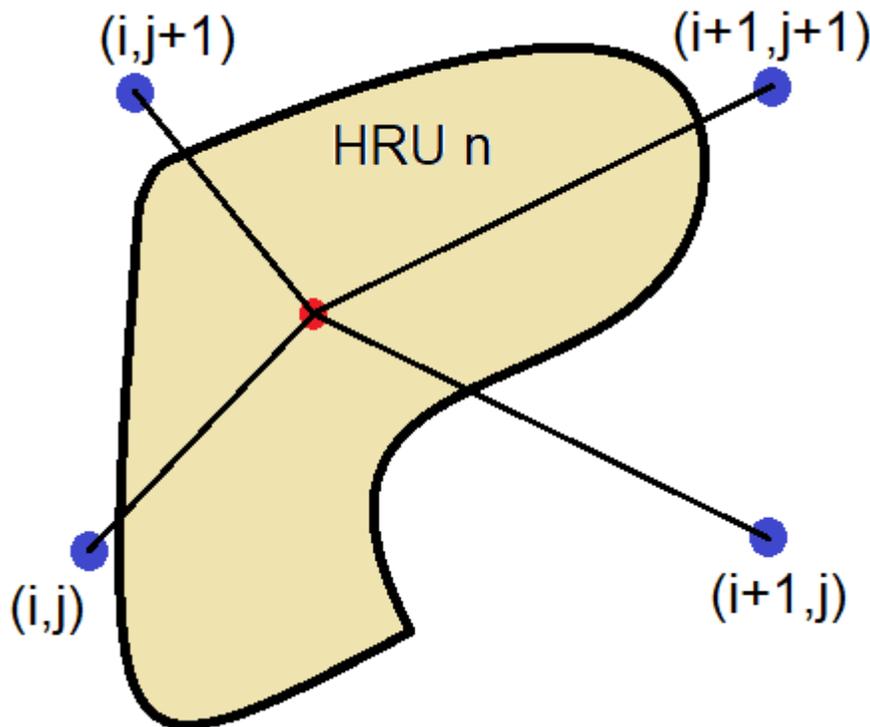


Figura 4-22: Método del inverso de la distancia para escalar forzantes grilladas a cada URH.

# Capítulo 5: Resultados de la modelación hidrológica

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos, desde la construcción de las forzantes hasta la simulación histórica y proyectada con CRHM.

## 5.1 Resultados de construcción de forzantes

Tal como se explicó previamente en el Capítulo 4, se aplicaron distintas metodologías para asociar una serie temporal horaria de cada forzante a cada URH. En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de aplicar la metodología descrita.

### 5.1.1 Laguna Negra

Las Figura 5-1 a Figura 5-5 muestran un resumen de las forzantes obtenidas para la cuenca Laguna Negra. Es importante recordar que para la forzante de humedad relativa no se contó con un producto grillado, por lo tanto, a todas las URH's se les asoció la misma serie temporal.

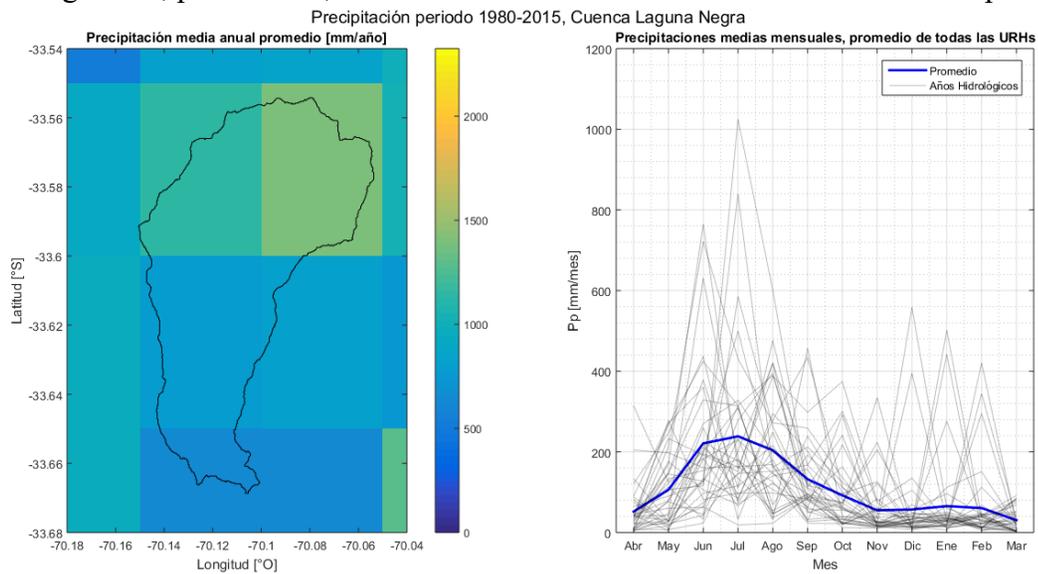


Figura 5-1: Resultado de la construcción de forzante de precipitación horaria, Laguna Negra.

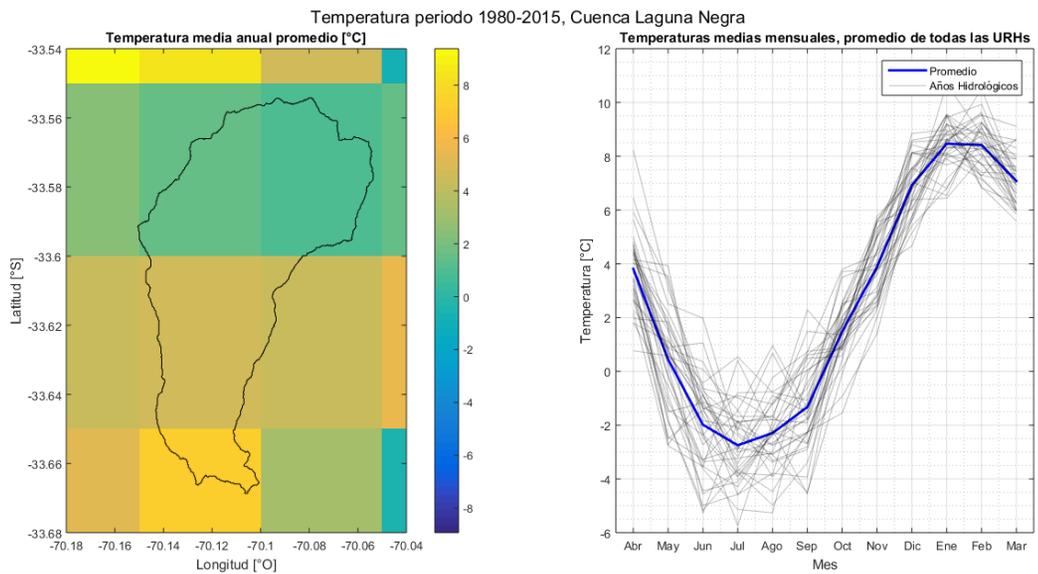


Figura 5-2: Resultado de la construcción de forzante de temperatura horaria, Laguna Negra.

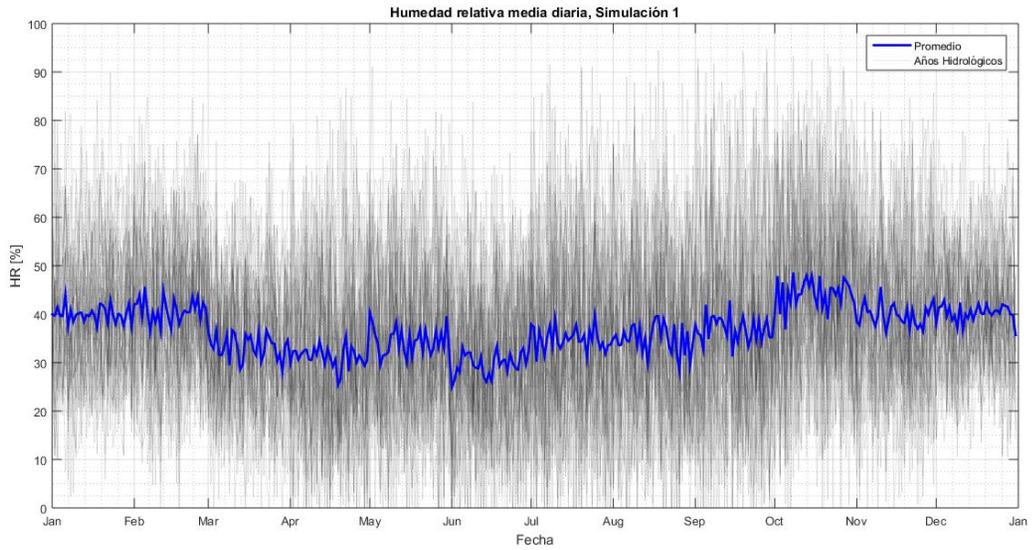


Figura 5-3: Resultado de la construcción de forzante de humedad relativa horaria, Laguna Negra.

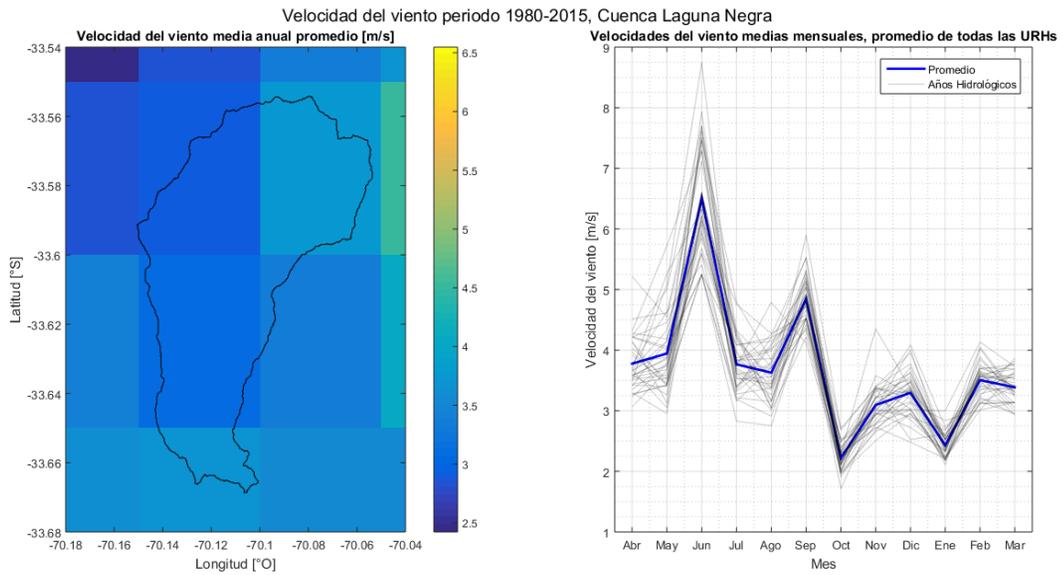


Figura 5-4: Resultado de la construcción de forzante de velocidad del viento horaria, Laguna Negra.

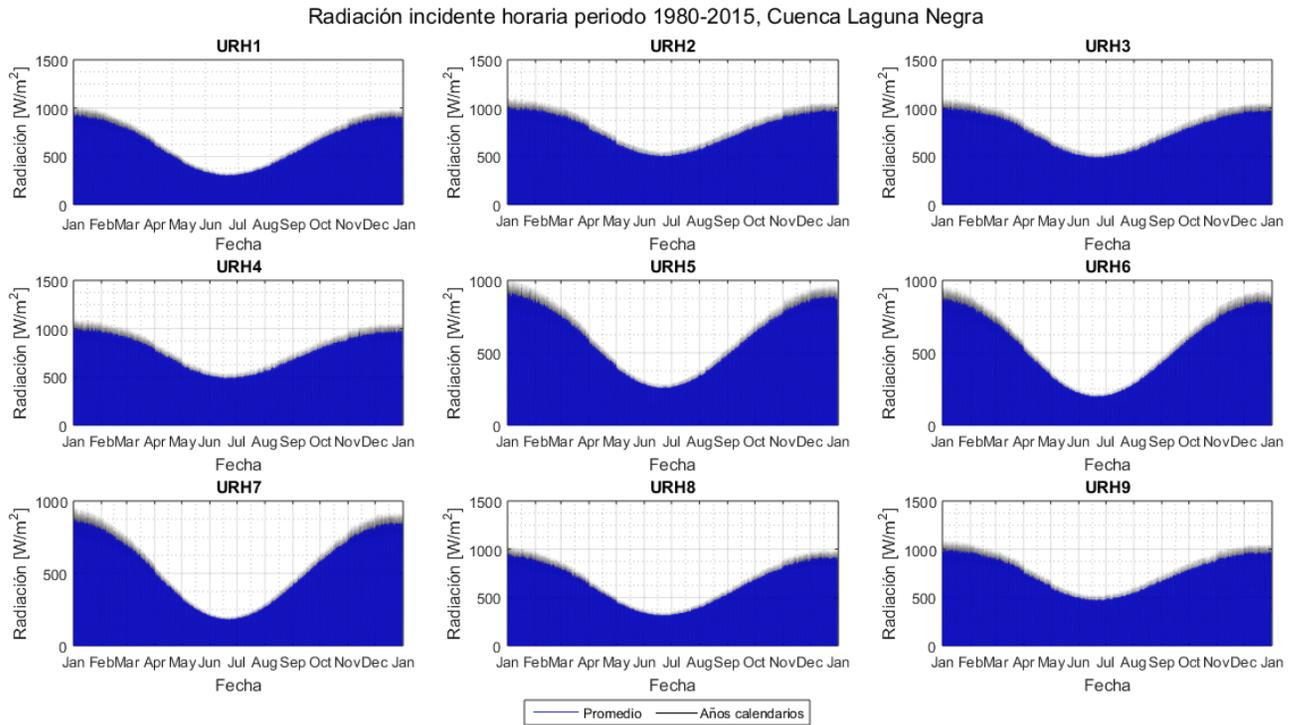


Figura 5-5: Resultado de la construcción de forzante de radiación solar incidente horaria, Laguna Negra.

### 5.1.2 Embalse El Yeso

Las Figura 5-6 a Figura 5-8 presentan las forzantes obtenidas en la Cuenca Embalse El Yeso. No se muestra la humedad relativa puesto que son las mismas series mostradas en la Figura 5-3 utilizadas para Laguna Negra.

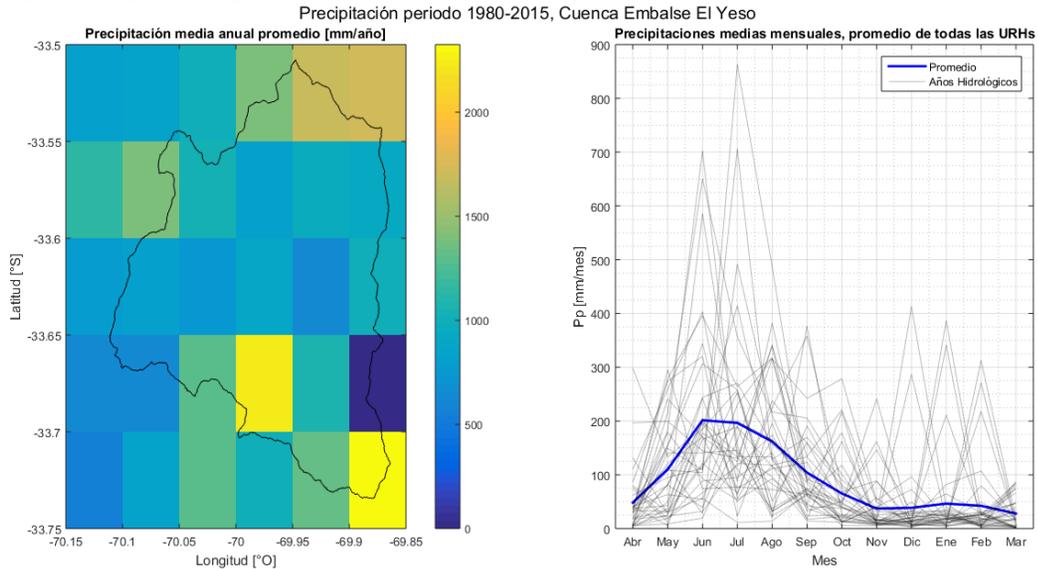
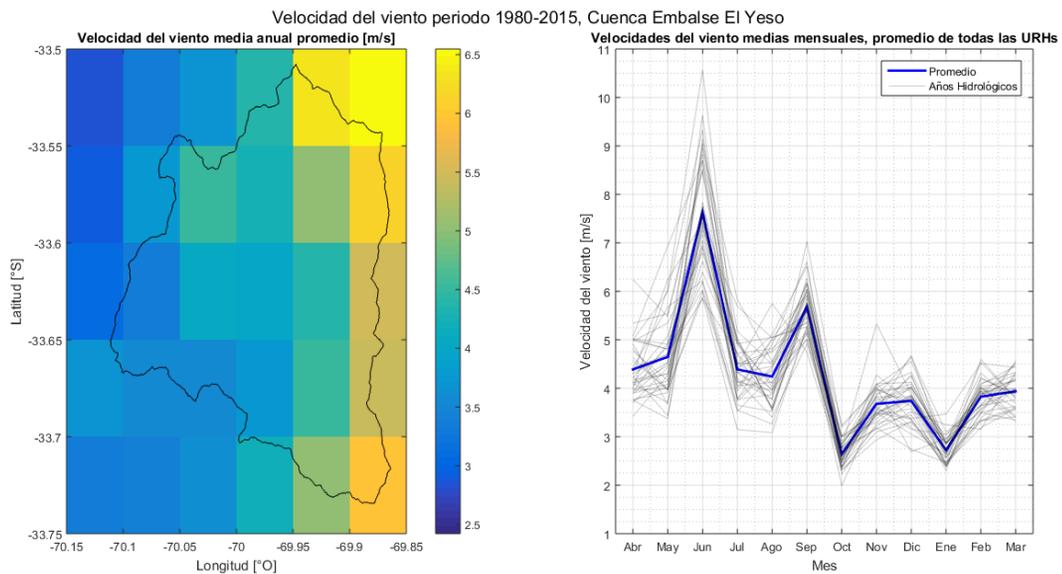
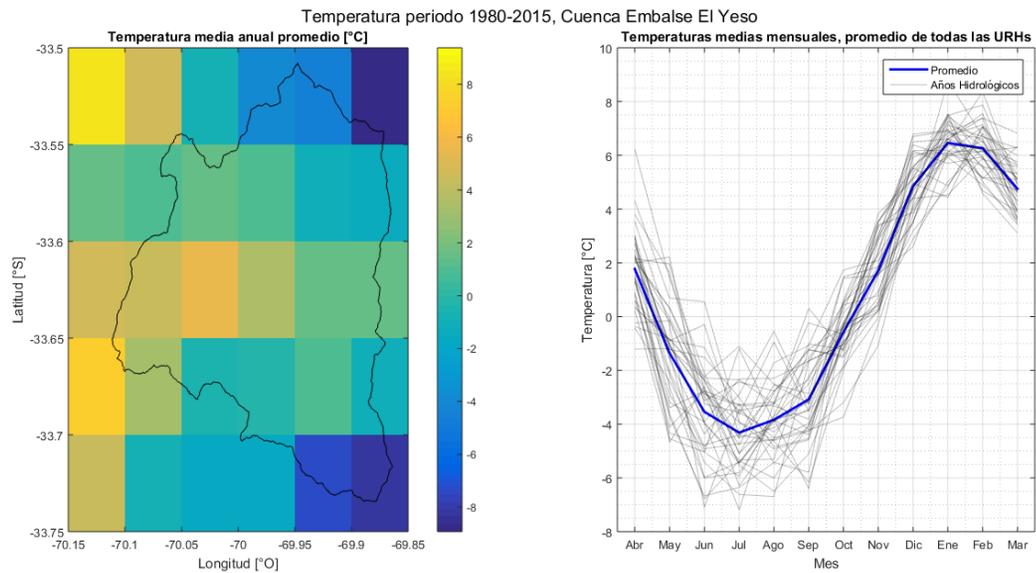


Figura 5-6: Resultado de la construcción de forzante de precipitación horaria, Embalse El Yeso.



## 5.2 Calibración del modelo

La estadística de caudales observados (ALN y AEY) se encuentra disponible desde Enero de 1980 hasta Marzo de 1997 (ver Figura 3-9), por lo tanto se han definido los siguientes periodos para realizar el análisis:

- Calentamiento o *warm-up*: Desde Enero de 1980 hasta Marzo de 1982. Se ha considerado más de un año puesto que el inicio de los registros no corresponde al inicio del año hidrológico.
- Calibración: Desde Abril de 1982 hasta Marzo de 1992, con lo que se tienen 10 ciclos hidrológicos completos.

- Validación: Desde Abril de 1992 hasta Marzo de 1997, con lo que se tienen 5 ciclos hidrológicos completos y, por lo tanto, la mitad del número de datos disponibles para la calibración.

Como CRHM es un modelo de base física, muchos de sus parámetros no deben modificarse pese a que el software lo permita, por lo tanto, la calibración se ha realizado variando principalmente los parámetros del módulo *Soil* (tamaño y conductividad de las distintas capas de suelo), junto con parámetros asociados a la nieve (módulos *Albedo* y *SnobalCRHM*).

El análisis del proceso de calibración se realizó por separado para cada cuenca y se describe en las secciones 5.2.1 y 5.2.2.

### 5.2.1 Cuenca Río Yeso en Embalse (AEY)

La calibración realizada reproduce de buena manera el comportamiento del sistema en relación a las observaciones de caudales, tanto para el periodo de calibración como validación, tal como se observa en la Figura 5-9. La Figura 5-10 muestra las curvas de duración y variación estacional obtenidas con los *outputs* de CRHM.

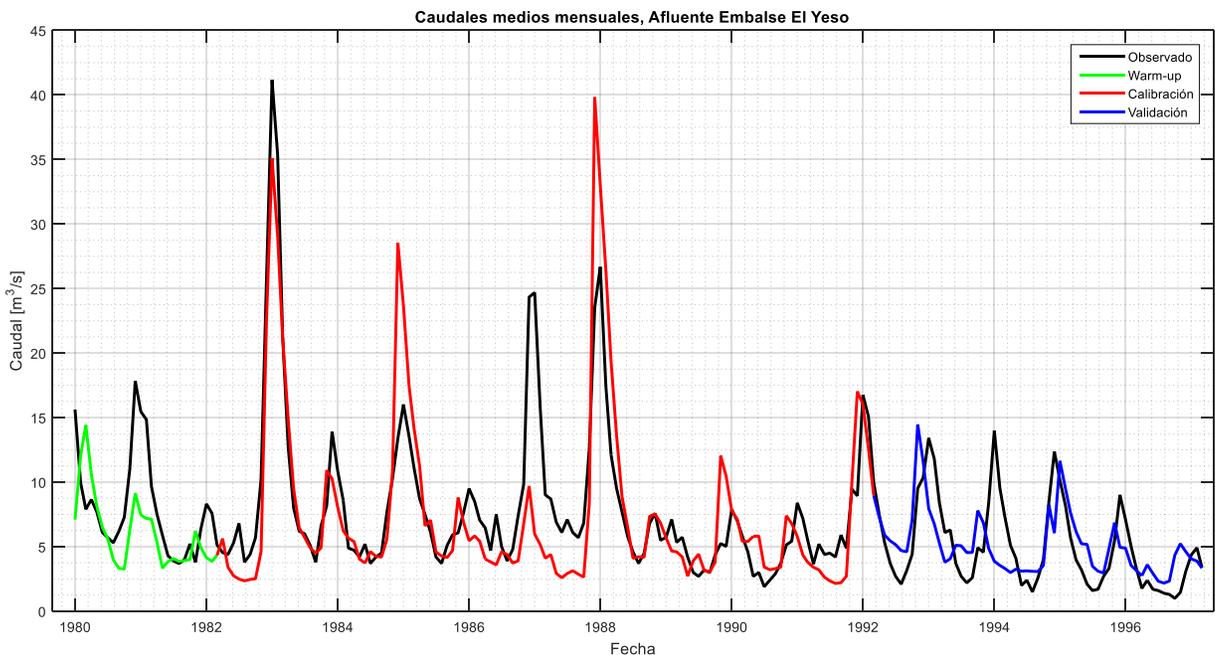


Figura 5-9: Serie de caudales medios mensuales observados (sin aporte glaciar) y simulados con CRHM, periodo 1980-1997. Cuenca Afluente al Embalse El Yeso (AEY).

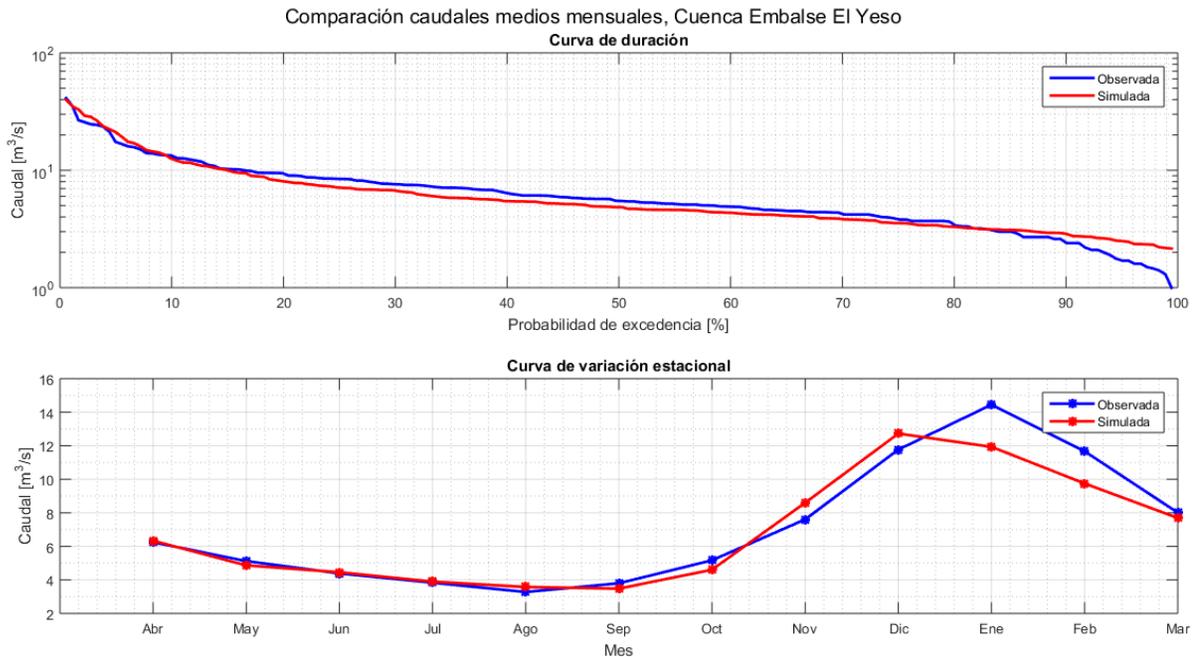


Figura 5-10: Curva de duración y de variación estacional, periodo 1982-1997. Cuenca Afluyente al Embalse El Yeso (AEY).

En la Tabla 5-1 se presenta un resumen de los criterios de eficiencia utilizados, donde se observa un buen desempeño de estos, especialmente en el periodo de calibración. Es importante destacar que en el cálculo de estos indicadores se ha eliminado el año hidrológico de 1987, puesto que la simulación presentó anomalías que no representan los caudales observados, lo cual se puede atribuir a sesgos en la precipitación forzante del modelo en ese periodo.

Tabla 5-1: Criterios de eficiencia de la modelación, cuenca AEY. RMSD: Root-mean-square difference, NRMSD: Normalized RMSD, NSE: Nash-Sutcliffe efficiency, logNSE: NSE del logaritmo de los caudales, KGE: Kling-Gupta efficiency.

Indicadores	AEY					Vsim/Vobs
	RMSD	NRMSD	NSE	logNSE	KGE	
Calibración	3.185	0.382	0.699	0.754	0.844	0.92
Validación	2.182	0.431	0.553	0.552	0.658	1.05

En base a la calibración realizada, se logra representar de manera correcta el proceso asociado a la escorrentía de la cuenca, los cuales pueden ser clasificados como “muy buenos” en la estimación de volúmenes, y “bueno” y “satisfactorio” en NSE para calibración y validación, respectivamente, según la literatura (Moriassi, et al., 2006). Lo anterior se manifiesta en buenos indicadores de eficiencia principalmente en el periodo de calibración y en los flujos base durante los inviernos (Figura 5-9). En relación a estos últimos, es necesario destacar que la estadística medida presentaba *peaks* en los meses de invierno (Junio o Julio, dependiendo del año), los que podrían explicarse producto de lluvias de invierno, sin embargo es poco creíble que estas lluvias se vean reflejadas a nivel mensual, por lo que se ha decidido descartar esos meses para el cálculo de los indicadores.

No obstante lo anterior, el modelo responde adecuadamente a las forzantes, lo que se manifiesta en el buen ajuste de los promedios mensuales presentados en la curva de variación estacional de la Figura 5-10. En ella se aprecia que durante los meses de invierno, la respuesta del modelo es prácticamente exacta; mientras que en los meses de deshielo (Octubre a Febrero) el ajuste es menos preciso y la respuesta del modelo tiende a adelantar los caudales máximos.

El hecho de que el modelo tienda a adelantar los caudales máximos podría explicarse por la presencia de glaciares. Estos cuerpos de hielo comienzan a aportar a la escorrentía una vez que se derrite la nieve que ha sido acumulada sobre ellos durante el invierno, lo cual sucede después del mes de Diciembre. Es por esto que el *peak* de la estadística observada tiende a producirse en Enero, mientras que el modelo lo reproduce en Diciembre, pues la metodología utilizada para estimar los aportes glaciares no ha sido tan precisa como se quisiera, producto de la escasez de información y porque el modelo no incorpora un módulo que permite manejar los aportes glaciares.

### 5.2.2 Cuenca Laguna Negra (ALN)

Esta cuenca fue calibrada mediante la transferencia de parámetros de la cuenca AEY, ya que al ser adyacentes es de esperar que sus características geomorfológicas (parámetros del módulo *Soil*) sean similares. Una vez transferidos los parámetros, se realizó una calibración más fina con el objetivo de representar mejor los procesos hidrológicos del sistema y obtener mejores indicadores de eficiencia.

La serie de tiempo de caudales observados y simulados se muestra en la Figura 5-11, en la cual se aprecia un buen desempeño del modelo, sobre todo en los flujos base de los periodos invernales. La Figura 5-12 muestra la comparación de las curvas de duración y las curvas de variación estacional.

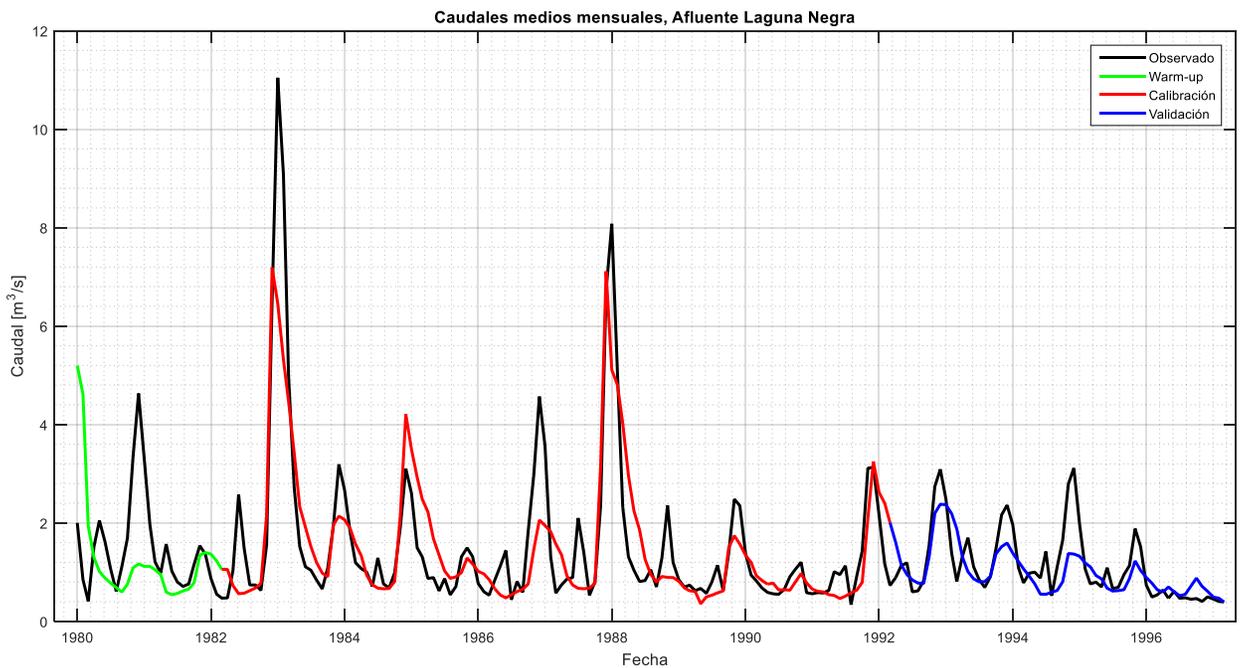


Figura 5-11: Serie de caudales medios mensuales observados (sin aporte glaciar) y simulados con CRHM, periodo 1980-1997. Cuenca Afluente a Laguna Negra (ALN).

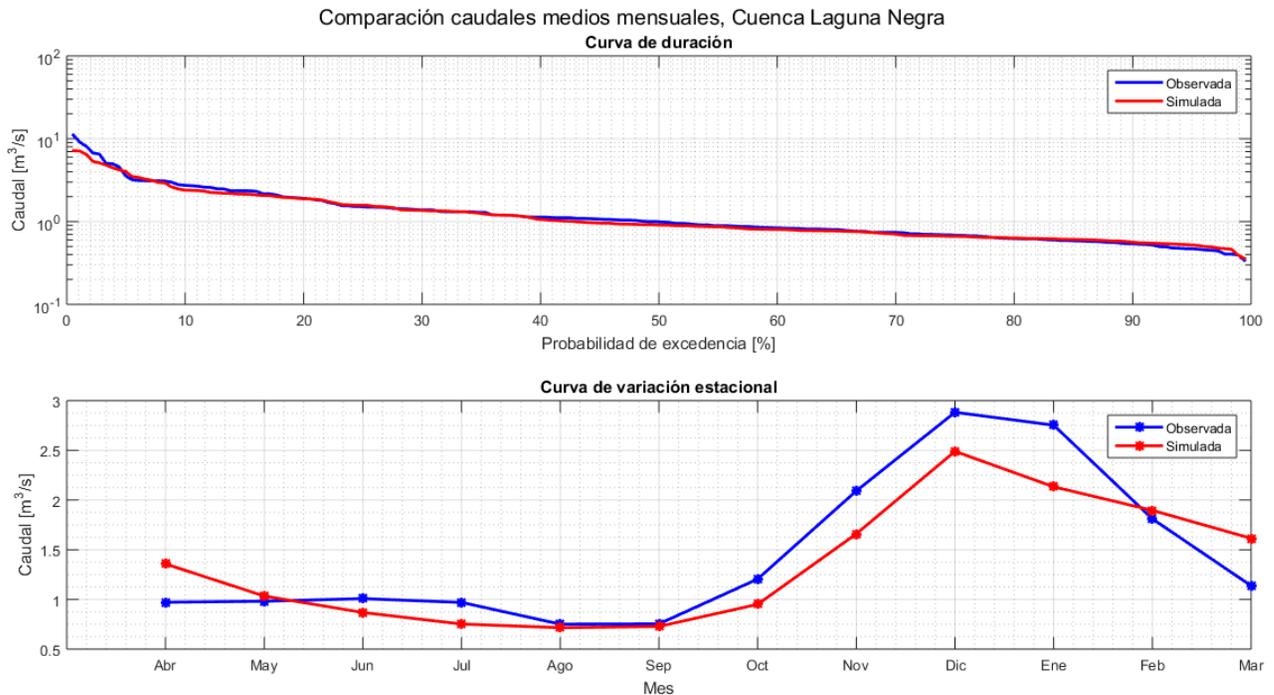


Figura 5-12: Curva de duración y de variación estacional, periodo 1982-1997. Cuenca Afluyente a Laguna Negra (ALN).

La Tabla 5-2 muestra un resumen de los criterios de eficiencia, donde se aprecia un buen desempeño de estos, incluso mejor que en la cuenca del Embalse El Yeso, a excepción de la razón de volúmenes de agua, donde se obtienen diferencias mayores al 10%, lo que se aprecia también en la curva de variación estacional de los caudales medios mensuales promedios.

Al igual que en la cuenca anterior, se ha descartado el año hidrológico 1987 en el cálculo de los indicadores, puesto que también presentaba anomalías que de intentar calibrar, se traducían en peores ajustes para el resto de los años.

Tabla 5-2: Criterios de eficiencia en la modelación, cuenca ALN.

Indicadores	ALN					
	RMSD	NRMSD	NSE	logNSE	KGE	Vsim/Vobs
Calibración	0.662	0.391	0.833	0.837	0.852	0.904
Validación	0.352	0.312	0.739	0.770	0.727	0.857

Los valores de NSE pueden ser clasificados, según la literatura, como muy buenos tanto para calibración como validación, mientras que para la estimación de volúmenes se clasifican como “muy bueno” y “bueno”, para calibración y validación, respectivamente (Moriassi, et al., 2006).

El parámetro que ha cambiado de valor en la calibración de ambas cuencas corresponde a  $gw\_K$  perteneciente al módulo *Soil*, el que representa la permeabilidad del acuífero. El valor considerado en la cuenca Río Yeso en Embalse fue de 40 [mm/día], mientras que en Laguna Negra se adoptó un valor de 70 [mm/día].

Es posible apreciar en la Figura 5-11 que el modelo hidrológico responde acertadamente a las forzantes, evidenciando un buen ajuste en relación a la estadística observada, principalmente en los flujos base. Al igual que en la cuenca Embalse El Yeso, se han descartado los *peaks* de invierno a nivel mensual en el cálculo de los indicadores, puesto que se cree que no son

mediciones del todo certeras. Se observa además un peor ajuste en las recesiones de la curva de deshielo en relación a la cuenca AEY, las cuales tienden a sobreestimar el caudal observado. Esto se explica por la mayor permeabilidad del acuífero con la que se logró calibrar esta cuenca, ya que el suelo tiende a entregar el agua más rápido que en AEY.

Lo anterior se ha realizado de esta manera debido a que si se intentaba mejorar la curva de recesión, empeoraba (subestimando) los flujos base del invierno siguiente, lo que implicaría que no se están modelando de manera correcta los caudales mínimos, que son justamente los de interés ya que la finalidad de los sistemas en estudio es la disponibilidad del recurso para abastecimiento de agua potable.

En la curva de variación estacional de la Figura 5-12 se vuelve a evidenciar un buen ajuste de los caudales medios en los meses de invierno, y si bien los *peaks* de verano coinciden en Diciembre, se aprecia que el modelo subestima considerablemente la magnitud de la escorrentía en Enero, lo que se explica nuevamente por la presencia de glaciares, en particular, del glaciar Echaurren. Como el modelo CRHM no cuenta con un módulo glaciar, tiende a disminuir la escorrentía una vez que se acaba la nieve, sin considerar que el proceso natural posterior corresponde al derretimiento del glaciar, lo cual se manifiesta en la elevada escorrentía observada durante Enero.

Las series de tiempo de caudales simulados y observados se adjuntan, para cada cuenca, en el Anexo F.

### 5.3 Análisis de sensibilidad de parámetros óptimos

El modelo CRHM no cuenta con un modelo de optimización incorporado, lo que implica que la calibración debe realizarse de manera manual estudiando el efecto de cada uno de los parámetros involucrados en la modelación.

Debido a lo anterior, y para tener certeza que el set de parámetros escogidos corresponde al óptimo global (o al menos se encuentra cerca), se realizó un análisis de sensibilidad a los parámetros del suelo, que además de ser los más sensibles, son los más inciertos pues no se tienen mediciones de ellos en terreno.

El objetivo de este análisis es estudiar cómo se comportan los criterios de eficiencia y los caudales simulados al variar un parámetro a la vez y se realizó para ambas cuencas por separado considerando los valores de la Tabla 5-3:

Tabla 5-3: Parámetros y valores considerados en el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Valores	Descripción
gw_K [mm/día]	5; 20; 40; 70; 100	Permeabilidad del acuífero.
gw_max [mm]	300; 800; 1200; 1800; 2500	Capacidad máxima del acuífero.
lower-ssr_K [mm/día]	0.1; 0.5; 1; 3; 10	Tasa a la cual la segunda capa de suelo entrega el agua al flujo subsuperficial.

Parámetro	Valores	Descripción
rechr-ssr_K [mm/día]	0.1; 1; 5; 10; 20	Tasa a la cual la primera capa de suelo (zona de recarga) entrega el agua al flujo subsuperficial.
soil_moist_max [mm]	50; 300; 500; 800; 1000	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo.
soil_rechr_max [mm]	1; 5; 10; 50; 100	Máxima capacidad de almacenamiento de la capa superficial de suelo (zona de recarga).

Las Figura 5-13 y Figura 5-14 muestran el comportamiento de los indicadores de eficiencia de calibración en función de los distintos valores de los parámetros descritos en la Tabla 5-3 para cada cuenca, mientras que las Figura 5-15 y Figura 5-16 muestran la serie de tiempo de caudales observados junto con la envolvente de las simulaciones obtenida al variar cada parámetro en cada una de las cuencas estudiadas:

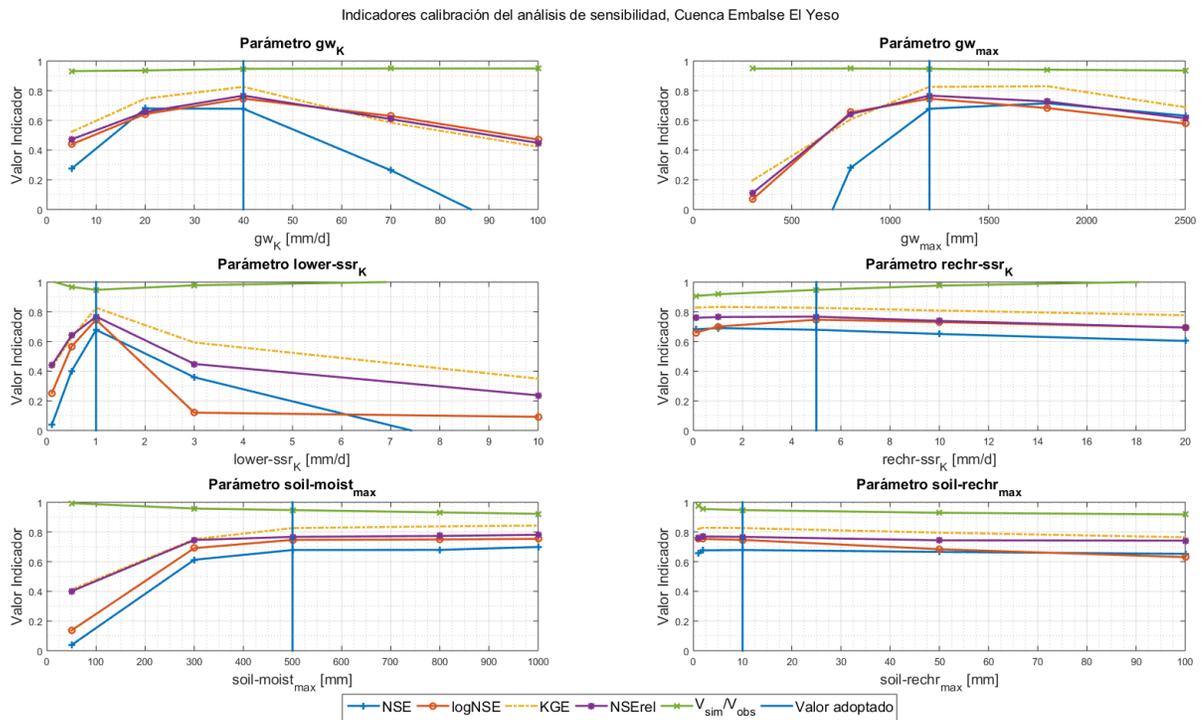


Figura 5-13: Comportamiento de los indicadores de calibración obtenidos del análisis de sensibilidad, cuenca AEY.

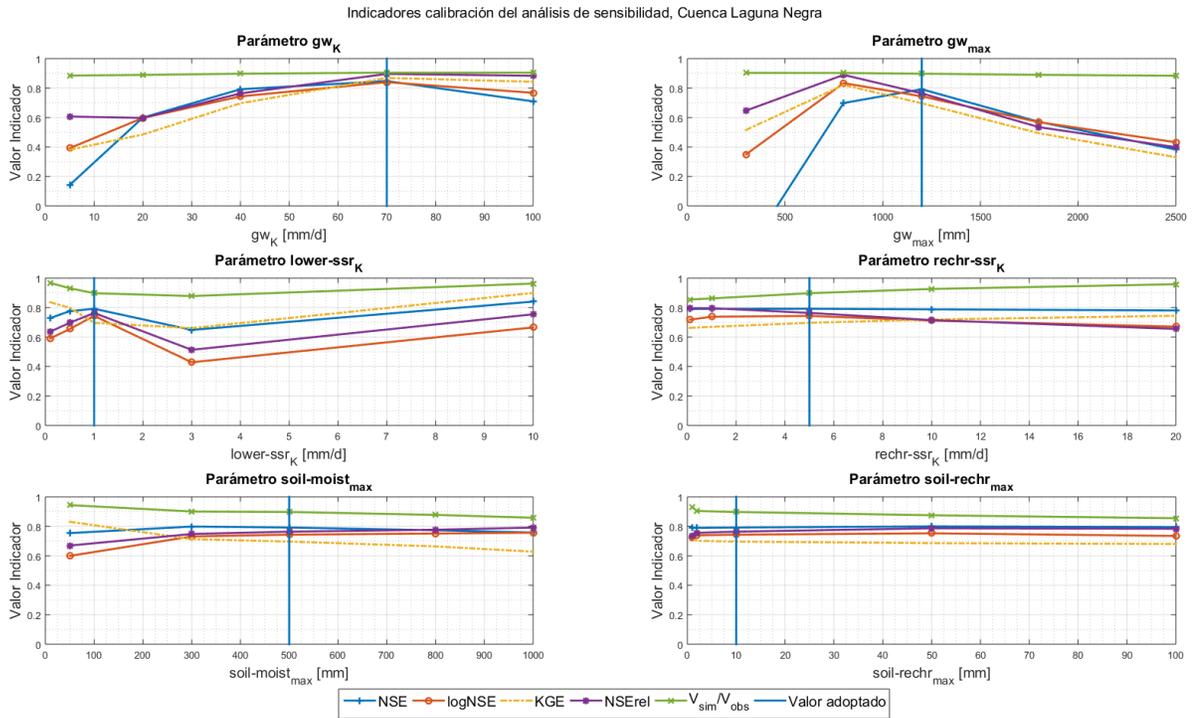


Figura 5-14: Comportamiento de los indicadores de calibración obtenidos del análisis de sensibilidad, cuenca ALN.

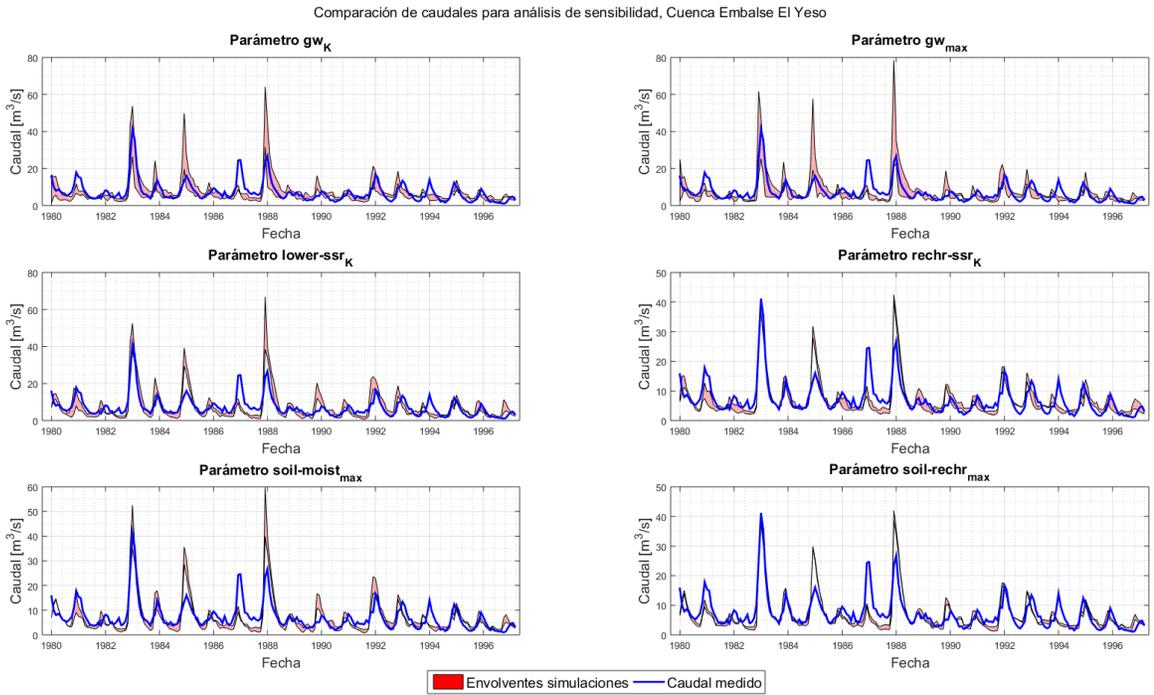


Figura 5-15: Series de tiempo de caudales medios mensuales, obtenidas del análisis de sensibilidad. Cuenca AEY.

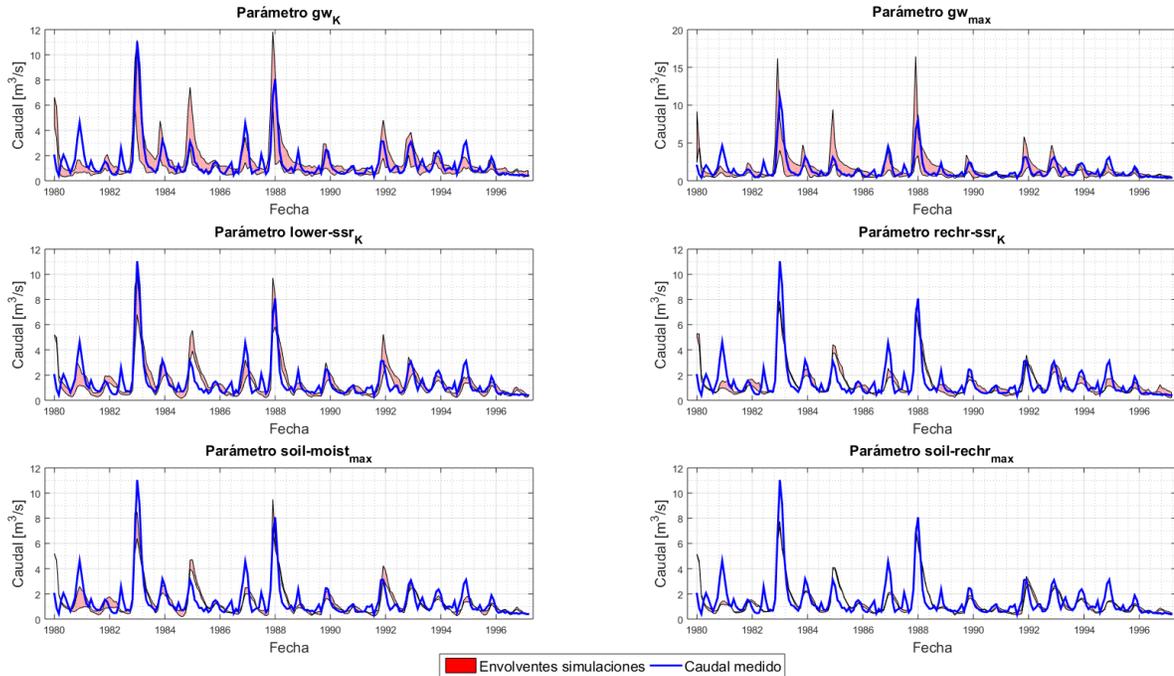


Figura 5-16: Series de tiempo de caudales medios mensuales, obtenidas del análisis de sensibilidad. Cuenca ALN.

De las Figura 5-15 y Figura 5-16, es posible apreciar en función del tamaño de la envolvente de las simulaciones, que los parámetros más sensibles corresponden a las propiedades del acuífero, en particular su permeabilidad y capacidad máxima (parámetros  $gw_K$  y  $gw_{max}$ ), los cuales adicionalmente presentan mucha incertidumbre ya que no se tienen mediciones en terreno.

Para verificar que los valores escogidos en la calibración son óptimos, se aprecia en las Figura 5-13 y Figura 5-14, que es imposible variar alguno de los parámetros sin empeorar un indicador de eficiencia. En este sentido, se ha priorizado el máximo valor del indicador Nash-Sutcliffe del logaritmo de los caudales por sobre otro indicador que podría aumentar si se cambia el valor del parámetro, esto debido a que, como se mencionó anteriormente, es menester modelar de buena manera los caudales bajos ( $\log NSE$ ) que determinan la disponibilidad del recurso por sobre los altos ( $NSE$ ) que no representan una limitante en la disponibilidad.

#### 5.4 Análisis de sensibilidad de forzantes generadas

Como se detalló en las secciones 4.4 y 4.5, se han desarrollado métodos estadísticos para construir las forzantes de humedad relativa y velocidad del viento a nivel horario para el periodo requerido. Debido a esto, se debe estudiar la sensibilidad de la modelación frente a las distintas series de forzantes generadas, para analizar si es que los métodos estadísticos utilizados afectan la calibración.

Tal como se mencionó anteriormente, se han construido 30 simulaciones para la humedad relativa y 10 simulaciones para la velocidad del viento, lo que genera 300 sets de forzantes. Debido a limitantes computacionales y de tiempo, no es posible realizar 300 corridas del modelo, por lo que se han seleccionado 10 sets de forzantes de manera aleatoria para estudiar su comportamiento. El objetivo de este procedimiento es analizar el comportamiento de los criterios de eficiencia para los distintos sets de forzantes.

La Figura 5-17 muestra las series de tiempo de caudales para ambas cuencas en estudio, junto con la envolvente de los valores de las simulaciones realizadas. En ellas se aprecia la poca sensibilidad de la modelación con respecto a las series de humedad relativa y velocidad del viento, ya que los caudales simulados no varían considerablemente entre una simulación y otra. Además, se presenta el comportamiento de los indicadores de eficiencia en las distintas simulaciones realizadas, donde se aprecia que los indicadores no son sensibles al set de forzantes que se utilice y siguen mostrando un buen desempeño, al igual que en la calibración original.

En base a lo expuesto anteriormente, se determina que la generación de escorrentía por parte del modelo no es sensible al set de forzantes utilizado, por lo que la proyección será realizada únicamente con la simulación 1 para la cual fueron calibradas las cuencas.

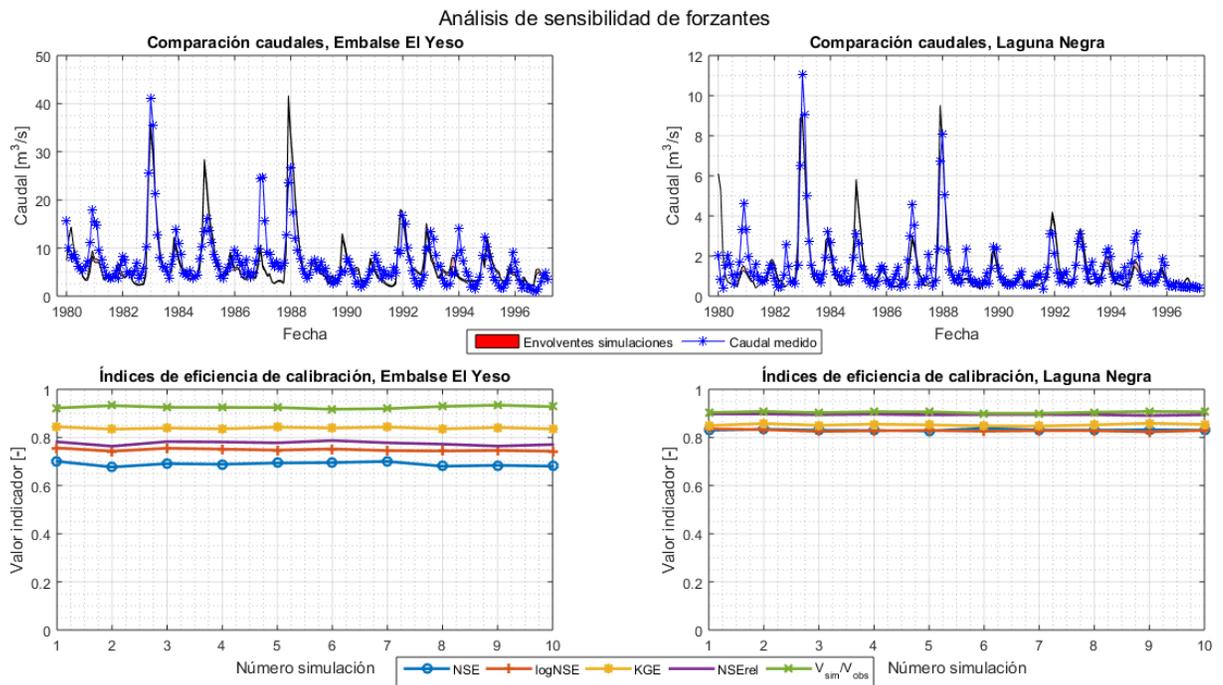


Figura 5-17: Análisis de sensibilidad de forzantes de humedad relativa y velocidad del viento. Arriba: Series temporales de caudales observados y simulados. Abajo: Indicadores de eficiencia de calibración para cada simulación.

## 5.5 Proyección

En esta sección se estudia el comportamiento de la modelación frente a cambios en las series de precipitación y temperatura. Las forzantes proyectadas han sido construidas en el marco del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, realizado por la Universidad de Chile en conjunto con la Pontificia Universidad Católica para la DGA (no publicado a la fecha) y representan la proyección de precipitación y temperatura cada 3 horas para el periodo 2028-2060.

Las forzantes futuras se han construido mediante variaciones mensuales de precipitación [%] y temperatura [°C], a partir de la comparación de los periodos de línea base (1983-2015) y futuro (2028-2060). Tanto la precipitación como la temperatura están asociadas a tres modelos de circulación global de la atmósfera (GCM) bajo el escenario RCP8.5 del IPCC: CCSM-4, CSIRO Mk3.6.0 e IPSL-CM5A-LR.

Las variaciones proyectadas de temperatura y precipitación en relación al periodo de línea base para cada una de las cuencas, se presentan en la Figura 5-18 y Figura 5-19.

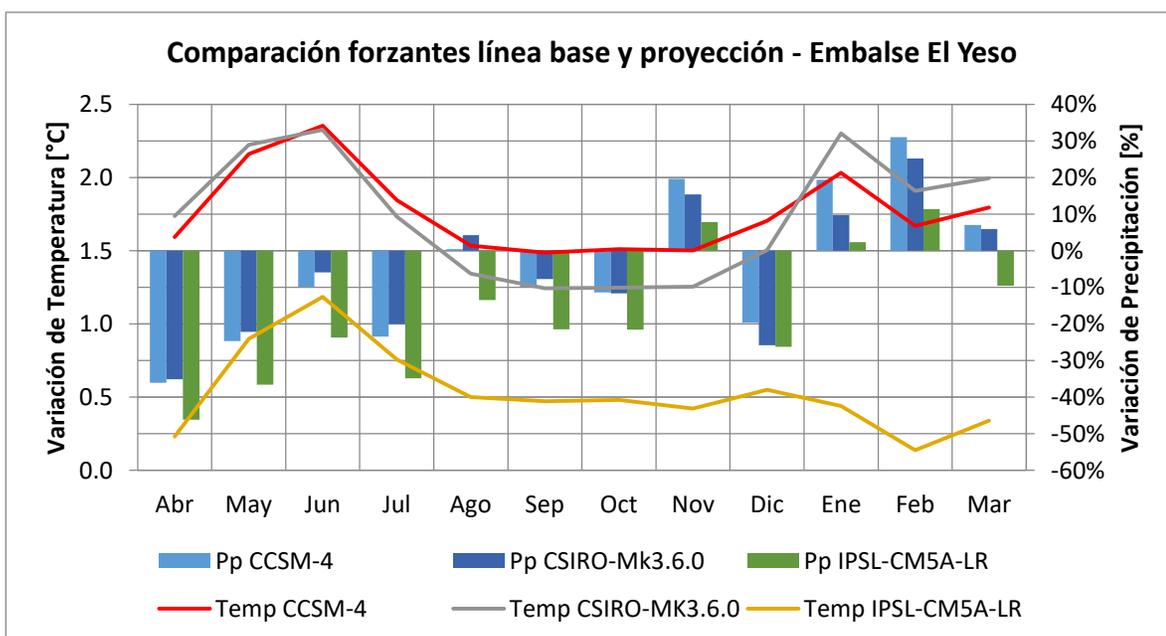


Figura 5-18: Comparación de precipitación y temperatura para los periodos 1983-2015 y 2028-2060, cuenca Embalse El Yeso.

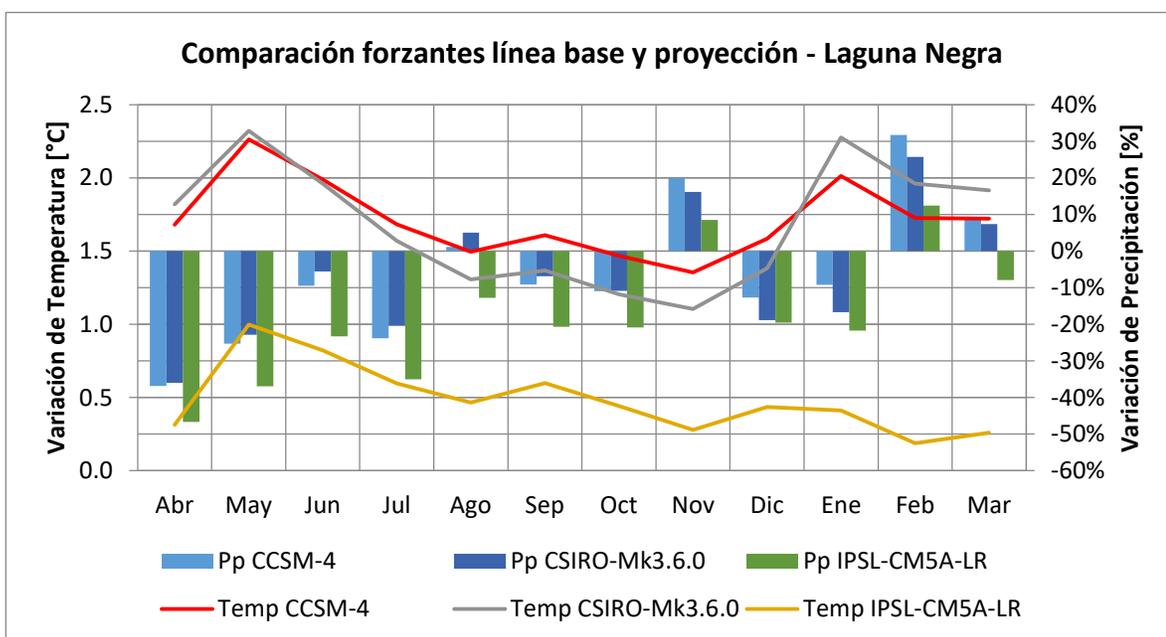


Figura 5-19: Comparación de precipitación y temperatura para los periodos 1983-2015 y 2028-2060, cuenca Laguna Negra.

A partir de lo presentado en la Figura 5-18 y Figura 5-19, es posible apreciar que las proyecciones para ambas cuencas son similares. En ellas se aprecian aumentos en las temperaturas medias mensuales para todos los meses y disminuciones de la precipitación en todos los meses de invierno (los aumentos de precipitación en meses de verano no resultan significativos, puesto que en ellos las tasas de precipitación son prácticamente nulas).

Un hecho importante de destacar corresponde a las diferencias que se aprecian entre los distintos modelos atmosféricos: CCSM-4 y CSIRO-Mk3.6.0 discrepan considerablemente con respecto a IPSL-CM5A-LR. Los primeros dos modelos proyectan aumentos de temperatura de 1.7°C a nivel anual y disminuciones en torno al 6% de la precipitación anual; mientras que el tercer modelo proyecta aumentos de 0.5°C en la temperatura media anual y disminuciones en torno al 18% de la precipitación anual. Se espera que estas discrepancias en los modelos se vean representadas en la modelación hidrológica, ya que constituyen escenarios climáticos muy diferentes por lo que su efecto debiera verse reflejado en la disponibilidad de los recursos hídricos.

Los pronósticos de precipitación y temperatura de los modelos CCSM-4 y CSIRO-Mk3.6.0, son consistentes con estudios anteriores a nivel nacional. Cepeda (2017) analizó las proyecciones bajo el escenario RCP8.5 de caudales nivo-glaciares en la cuenca del Río Olivares (adyacente a la cuenca del Río Maipo) para los periodos 2015-2045 y 2045-2075, obteniendo aumentos de temperatura anual entre 1.3°C y 2.7°C y disminuciones en la precipitación anual entre 9% y 20% para cada uno de los periodos analizados, respectivamente. La Dirección General de Aguas (2011) realizó un estudio sobre los efectos del cambio climático en los caudales nivo-glaciares en la cuenca del Río Maipo, donde se obtuvieron aumentos de temperatura anual de 2°C y disminuciones en la precipitación anual de 20% para el periodo 2041-2070 en el embalse El Yeso.

Con los nuevos sets de forzantes y los parámetros obtenidos en cada cuenca, se corrió nuevamente el modelo hidrológico, para conocer el comportamiento del sistema frente a los cambios proyectados de precipitación y temperatura.

### **5.5.1 Caudales**

Las Figura 5-20 y Figura 5-21 muestran las curvas de duración de caudales instantáneos y curvas de variación estacional de caudales medios mensuales promedios obtenidas según los distintos modelos atmosféricos para el periodo proyectado. Además, estas figuras muestran los valores asociados al periodo histórico simulado (“línea base”), correspondiente a los años 1983-2015 para permitir la comparación. Las series de tiempo de caudales simulados (línea base) y proyectados se presentan en los Anexos F y G, respectivamente.

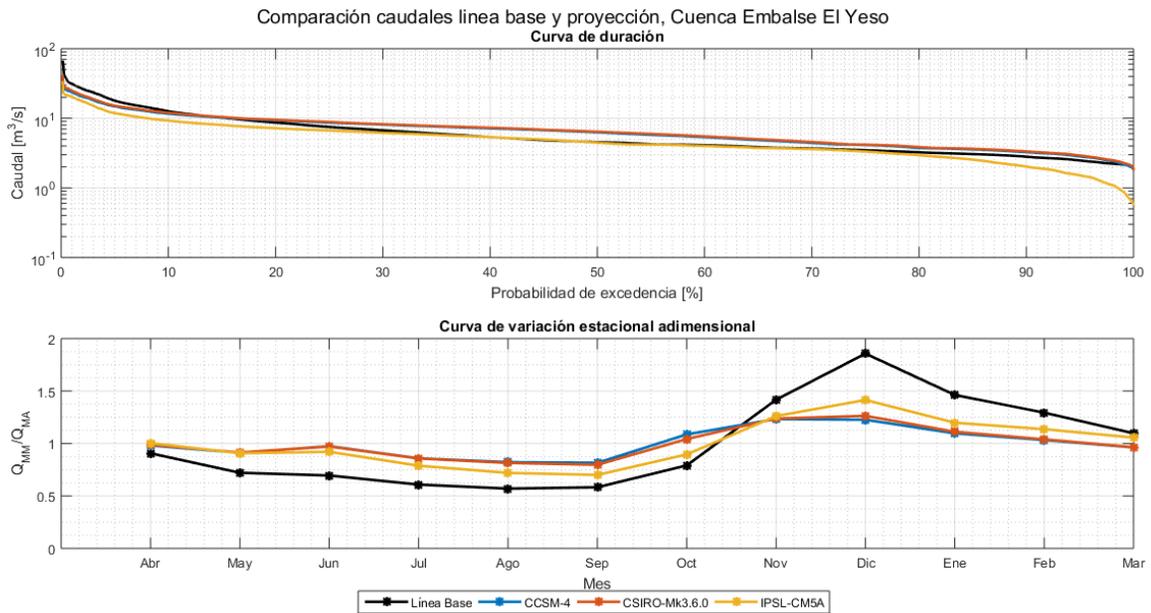


Figura 5-20: Comparación de caudales proyectados en relación al periodo de línea base. Cuenca Embalse El Yeso.

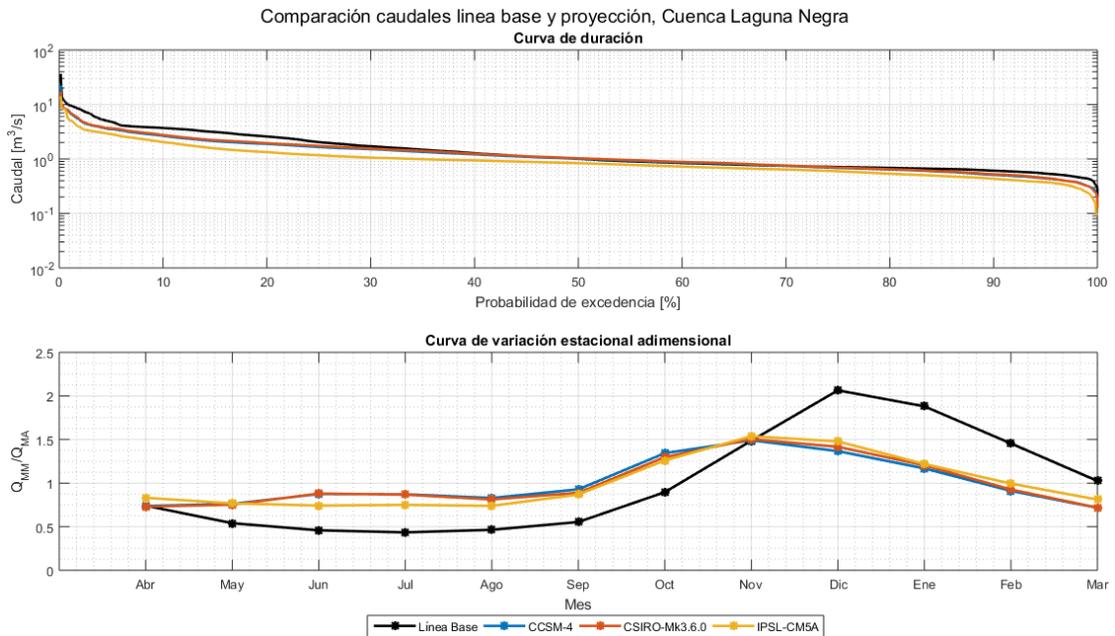


Figura 5-21: Comparación de caudales proyectados en relación al periodo de línea base. Cuenca Laguna Negra.

La Figura 5-22 muestra la serie de tiempo de caudales medios anuales históricos y proyectados para cada una de las cuencas, valores por los cuales fueron adimensionalizadas las curvas de variación estacional mostradas en las Figura 5-20 y Figura 5-21.

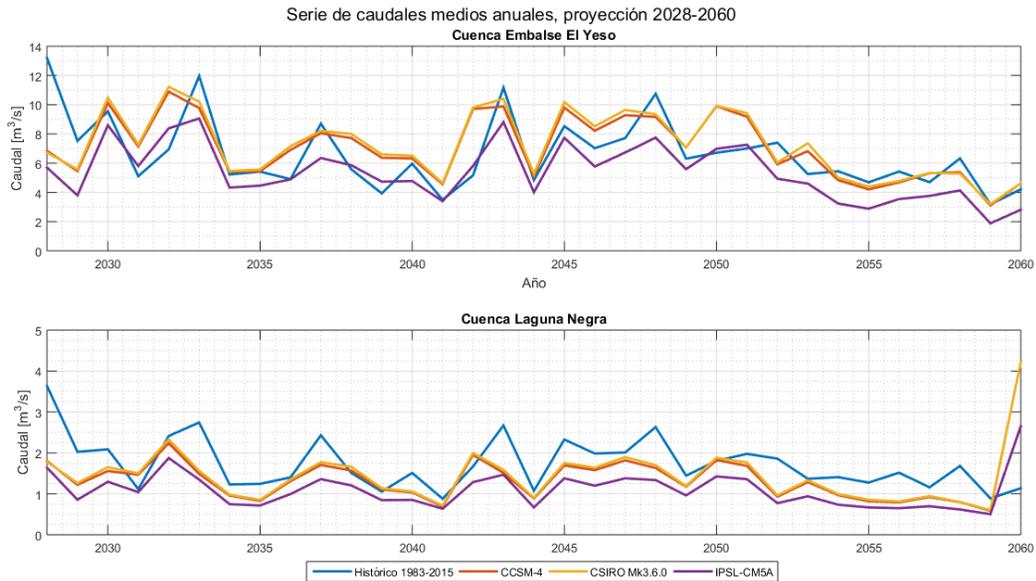


Figura 5-22: Serie de caudales medios anuales, proyectados (2028-2060) y línea base (1983-2015). Cuencas Embalse El Yeso y Laguna Negra.

Es posible apreciar en las Figura 5-20 y Figura 5-21 que según los tres modelos considerados se tendrá un aumento de los caudales en los meses de invierno, una disminución en los caudales de verano junto con un adelantamiento del mes de máximo derretimiento. Los tres hechos anteriores se explican por el aumento proyectado de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, lo que provoca menos acumulación durante los meses de invierno y que, por ende, la nieve tienda a acabarse antes en relación al periodo histórico. De esta forma, las curvas de variación estacional para ambas cuencas tienden a aplanarse, presentando menor variabilidad estacional en relación al caudal medio anual, lo cual podría dar indicios de cambios en el régimen hidrológico de las cuencas para futuros lejanos.

En relación a los caudales medios anuales (Figura 5-22), existe discrepancia en la cuenca Embalse El Yeso, ya que el modelo IPSL-CM5A evidentemente manifiesta una baja mientras que los modelos CCSM-4 y CSIRO Mk-3.6.0 pronostican un alza en los caudales medios anuales en relación al periodo histórico. Esta discrepancia se explica en la diferencia de magnitud del aumento proyectado en la escorrentía en los meses de invierno por los distintos modelos. Con respecto a la cuenca Laguna Negra, los tres modelos proyectan una disminución de los caudales medios anuales en relación al periodo de línea base, volviendo a ser muy coincidentes en sus valores los modelos CCSM-4 y CSIRO Mk-3.6.0, mientras que nuevamente IPSL-CM5A es más pesimista en la proyección de la disponibilidad del recurso.

La Tabla 5-4 y Tabla 5-5 muestran el detalle desagregado de las figuras anteriormente presentadas. En ellas se detalla la variación porcentual de caudales medios mensuales con respecto al periodo histórico, caudales anuales promedio y promedios estacionales para cada cuenca y según cada modelo proyectado.

Tabla 5-4: Proyecciones de caudal medio mensual y anual promedio para el periodo 2028-2060. Cuenca Embalse El Yeso.

Proyección Caudales Embalse El Yeso													
Modelo	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
CCSM-4	10.4%	32.9%	52.6%	60.5%	63.7%	55.7%	53.1%	-0.7%	-24.8%	-26.7%	-21.7%	-12.3%	6.3%
CSIRO Mk 3.6.0	13.9%	37.0%	55.9%	64.1%	65.9%	55.4%	49.3%	2.1%	-20.3%	-23.3%	-18.9%	-9.6%	9.1%
IPSL-CM5A	-11.4%	1.5%	10.5%	12.3%	9.6%	2.5%	-4.9%	-24.8%	-37.0%	-37.5%	-32.1%	-24.5%	-18.7%
Promedio	4.3%	23.8%	39.6%	45.6%	46.4%	37.9%	32.5%	-7.8%	-27.4%	-29.2%	-24.2%	-15.5%	-1.1%
Promedio estacional	32.9%						-11.9%						

Tabla 5-5: Proyecciones de caudal medio mensual y anual promedio para el periodo 2028-2060. Cuenca Laguna Negra.

Proyección Caudales Laguna Negra													
Modelo	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
CCSM-4	-25.8%	11.3%	63.4%	78.2%	62.3%	48.1%	31.6%	-9.7%	-38.7%	-56.3%	-55.6%	-49.6%	-19.4%
CSIRO Mk 3.6.0	-24.3%	13.5%	69.9%	83.4%	64.1%	45.9%	29.0%	-6.8%	-34.5%	-53.3%	-53.2%	-47.7%	-17.0%
IPSL-CM5A	-34.2%	-14.0%	4.1%	15.8%	8.3%	5.2%	-6.9%	-27.4%	-48.2%	-61.4%	-59.3%	-53.8%	-36.9%
Promedio	-28.1%	3.6%	45.8%	59.2%	44.9%	33.1%	17.9%	-14.7%	-40.5%	-57.0%	-56.0%	-50.3%	-24.4%
Promedio estacional	26.4%						-33.4%						

La Tabla 5-4 y Tabla 5-5 son consistentes con lo descrito previamente: Se proyecta un aumento de la escorrentía durante los meses de invierno y una disminución durante los meses de verano. Además, se ratifica la discrepancia del modelo IPSL en relación a los dos restantes, proyectando disminuciones anuales de 18,7% y 36,9% para las cuencas Embalse El Yeso y Laguna Negra, respectivamente.

Para la cuenca Embalse El Yeso, dos de los tres modelos han pronosticado aumentos entre 6% y 9% en la escorrentía media anual, lo cual se contradice claramente con las proyecciones del tercer modelo. Para explicar este fenómeno, se requieren analizar los flujos de entrada y salida de las cuencas, para comparar los cambios en las magnitudes de estos entre la línea base y la proyección.

### 5.5.2 Discusión

La modelación hidrológica realizada ha entregado resultados disímiles entre los distintos modelos y las dos cuencas estudiadas, generando proyecciones de distinta magnitud entre el Embalse El Yeso y Laguna Negra. En la presente sección se pretenden explicar las diferencias encontradas en la magnitud de los efectos del cambio climático por medio del análisis de los procesos físicos involucrados y de las componentes del ciclo hidrológico.

Las componentes del balance de masa se escriben según la Ecuación (5.1), en la que las flechas indican la dirección de cada flujo.

$$Pp \downarrow = S \uparrow + E \uparrow + \vec{Q} \quad (5.1)$$

Donde:

- $Pp \downarrow$ : Precipitación, flujo vertical de entrada.
- $S \uparrow$ : Sublimación del manto nival, flujo vertical de salida.

- $E \uparrow$ : Evaporación desde láminas de agua, cubierta vegetal y suelo, flujo vertical de salida.
- $\vec{Q}$ : Escorrentía de la cuenca, que incorpora las componentes de derretimiento, flujo subsuperficial y subterráneo.

La Figura 5-23 y Figura 5-24 muestran los valores medios mensuales promedio de cada una de las componentes descritas previamente, entre la línea base y la proyección, para ambas cuencas analizadas.

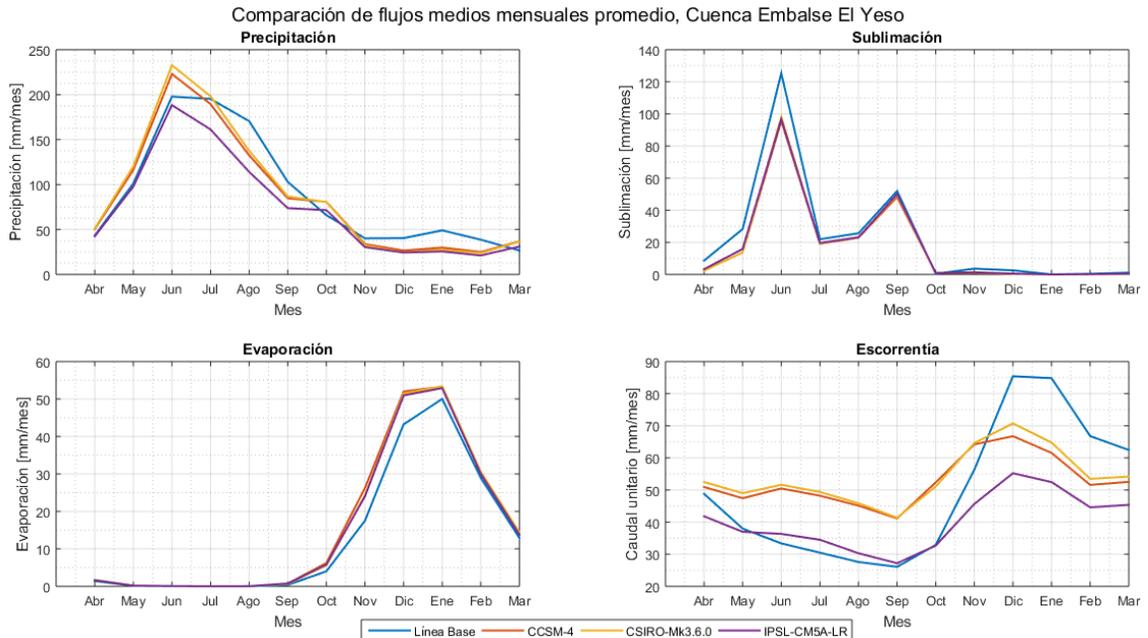


Figura 5-23: Comparación de flujos medios mensuales promedios entre línea base y proyección, cuenca Embalse El Yeso.

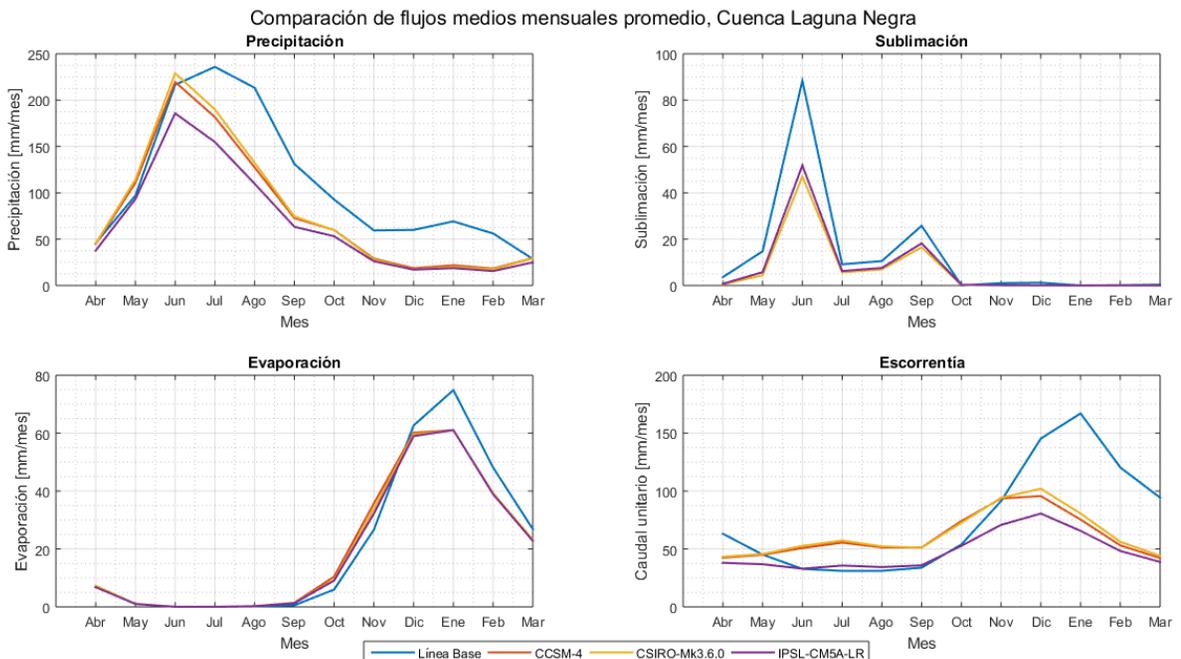


Figura 5-24: Comparación de flujos medios mensuales promedios entre línea base y proyección, cuenca Laguna Negra.

Se aprecia que no habrá variaciones considerables en la estacionalidad de las tasas de evaporación y sublimación en relación al periodo de línea base. En particular, las tasas de evaporación siguen siendo muy bajas durante los meses de invierno (bajas temperaturas) y alcanzando los máximos en los meses de verano, en los cuales se alcanzan las mayores temperaturas.

En relación a la estacionalidad de los procesos, es posible apreciar que la mayor variación se tendrá para la precipitación, en particular en la cuenca Laguna Negra, donde la mayor precipitación tenderá a adelantarse de Julio a Junio, evidenciando una disminución en las precipitaciones de los meses posteriores según los tres modelos. Esta variación en la precipitación implica menores volúmenes de entrada a la cuenca, lo que se ve reflejado posteriormente en menores caudales de salida. Como las alteraciones en la precipitación son menores en la cuenca Embalse El Yeso, la escorrentía no se ve tan afectada como en Laguna Negra.

La Figura 5-25 presenta la comparación de los flujos descritos entre los periodo de línea base y proyección, tanto en monto como en porcentaje de la precipitación, para cada una de las cuencas estudiadas.

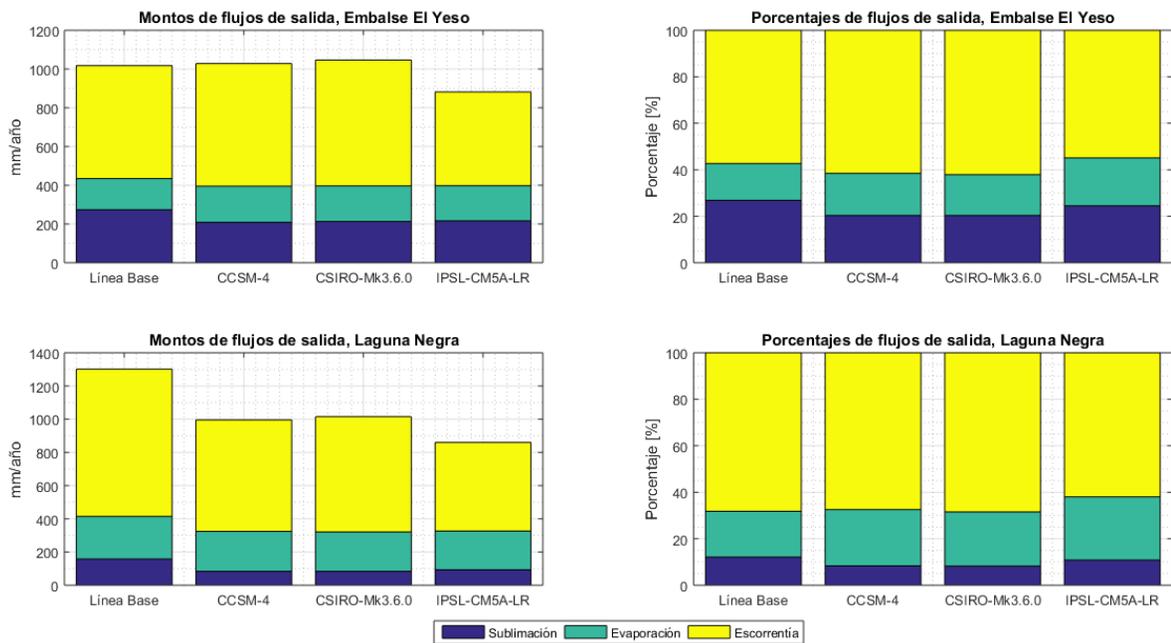


Figura 5-25: Comparación de componentes del balance hidrológico entre línea base y proyección.

La Figura 5-25 indica que no se pronostican mayores diferencias porcentuales en los flujos de salida de las cuencas entre la línea base y la proyección, mas sí se proyectan alteraciones en los montos de éstos. En Laguna Negra, se observan disminuciones anuales superiores a 200 [mm], lo que es consistente con las variaciones analizadas de la precipitación, por lo que habrán menores volúmenes de entrada a la cuenca. Por otro lado, en Embalse El Yeso, los modelos CCSM-4 y CSIRO-Mk3.6.0 proyectan aumentos en los volúmenes de salida, lo que se condice con sus proyecciones de aumento de precipitación en los meses de invierno (Figura 5-23) y permite explicar el aumento de la escorrentía media anual proyectado por ambos modelos para esta cuenca.

## Capítulo 6: Conclusiones y comentarios

Luego del estudio realizado y en función de los objetivos planteados y los resultados obtenidos, es posible concluir que:

### 6.1 Construcción de forzantes

Antes de calibrar un modelo, es extremadamente importante realizar una buena construcción de las forzantes de éste y un correcto escalamiento espacial de éstas, ya que la calidad de la modelación depende totalmente de la calidad de las forzantes consideradas. Como en la mayoría de los casos, la estadística hidrometeorológica disponible no se encontraba completa, se debieron utilizar metodologías que permitieran superar esta dificultad.

En este sentido, se ha logrado construir un set de forzantes a nivel horario para el periodo 1980-2015 a partir de productos grillados y de mediciones en estaciones de buena calidad, cuya metodología permite ser extendida a otras cuencas de interés.

Además de la construcción de las forzantes, es importante destacar la trascendencia de una correcta definición de unidades de respuesta hidrológica previa a la modelación, ya que de esta discretización espacial depende la calidad de la modelación, por cuanto permita o no representar los procesos hidrológicos que en la cuenca ocurren.

A partir de lo anterior, se cree que se ha logrado una correcta discretización de las cuencas por medio de las URH's definidas, sin embargo se debe hacer notar que el escalamiento espacial de las forzantes no ha sido del todo riguroso, ya que asociar una serie al centroide de una unidad puede inducir a errores, como por ejemplo, que el centroide quede fuera de la URH y a toda esa unidad se le asocie una serie que está escalada en un punto fuera de ella. Para solucionar esta problemática, se podrían dividir las URH's en sub-zonas más pequeñas de modo tal que los centroides de cada sub-zona queden dentro de ella, para luego ponderar cada sub-zona por su área y así obtener la serie de entrada en cada URH (Sanzana, 2012).

Resulta importante considerar la observación anterior, pues se cuenta con la ventaja excepcional de trabajar con un producto grillado, cuya calidad de resolución podría verse mermada al realizar un escalamiento espacial poco riguroso.

### 6.2 Calibración del modelo hidrológico

A partir de los resultados gráficos y numéricos obtenidos de la calibración del modelo CRHM, es posible concluir que se ha logrado representar de manera correcta los procesos hidrológicos involucrados en ambas cuencas, lo que se sustenta en el buen desempeño de los indicadores de eficiencia obtenidos tanto en la calibración como en la validación.

Los valores de los criterios de eficiencia se consideran muy buenos, especialmente para el periodo de calibración donde se alcanzó un valor de 0.837 de Nash-Sutcliffe para el logaritmo de los caudales en la cuenca Laguna Negra; los indicadores tendieron a disminuir en el periodo de validación, cuyo valor más bajo fue  $\log NSE=0.552$  en la cuenca Embalse El Yeso. Se debe destacar que se priorizó un buen ajuste de los caudales bajos, ya que son éstos los que determinan la disponibilidad del recurso hídrico afluente a los sistemas de almacenamiento.

El modelo CRHM utilizado, no representa los aportes glaciares, por lo que estos debieron ser estimados ya que ambas cuencas cuentan con glaciares que aportan a sus escorrentías

principalmente en los meses finales de la temporada de deshielo, por lo tanto, los resultados de la calibración están condicionados por la calidad en la estimación de los aportes glaciares, para los cuales no se contaba con mediciones suficientes en la zona de estudio.

Es importante destacar que para mejorar la calibración obtenida, habría sido muy ventajoso contar con estimaciones de los afluentes a los sistemas de almacenamiento de mejor calidad, tanto en la magnitud de las observaciones como en su escala temporal. La estadística que se utilizó para calibrar se encuentra a escala mensual, mientras que el modelo fue corrido a escala horaria, por lo que muchos de los procesos que pueden ser detectados a escala horaria se ven atenuados al mensualizar los valores obtenidos. Además, las observaciones no corresponden a un periodo tan actualizado como se desearía y presentaban anomalías en algunos meses de invierno que raramente se aprecian en hidrogramas de cuencas similares, lo cual dificultó considerablemente el proceso de calibración, decidiendo finalmente descartar los meses que se creyeran anómalos.

A modo de resumen, se cree que se cuenta con una muy buena calibración de las cuencas en estudio, la cual podría ser mejorada al incorporar el efecto de los glaciares y al contar con mediciones en terreno de mejor calidad.

### **6.3 Proyecciones hidrológicas bajo cambio climático**

Los resultados obtenidos de la proyección hidrológica son consistentes con los documentados en estudios anteriores (Gómez, 2013; Cepeda, 2017; DGA, 2011), ya que coinciden en los cambios estacionales que se esperan observar: ante el aumento de temperatura, aumentarán los caudales en los meses de invierno, provocando un agotamiento más temprano de la nieve, lo que adelantará la máxima esorrentía en el periodo de estiaje, disminuyendo los máximos durante este periodo.

Las proyecciones realizadas evidencian que la mayor alteración en los afluentes se tendrá en los meses de Noviembre a Febrero, producto del agotamiento del manto nival. Esto es de vital importancia al estudiar la disponibilidad del recurso, pues son justamente estos meses en los que se sustenta la oferta hídrica anual.

Además, ante el aumento de temperaturas, se ha proyectado aumentos en las tasas de evaporación, principalmente en los meses de Agosto a Octubre, en los cuales se comienza a percibir un aumento en las temperaturas y aún no se ha extinguido el manto nival. Este aumento en las tasas de evaporación, se traduce en un aumento en las salidas de agua de la cuenca, lo que implica una menor oferta hídrica a futuro en la zona de estudio.

### **6.4 Recomendaciones futuras**

Para dar mayor representatividad a los resultados obtenidos se cree que hay dos factores relevantes que han sido comentados a lo largo del estudio.

El primero de ellos radica en que el modelo utilizado no considera la presencia de glaciares, por lo que urge contar con mediciones de los aportes glaciares en las cuencas estudiadas. Estas mediciones pueden servir tanto para recalibrar el modelo descontando el aporte glaciar de las series observadas, o bien, para calibrar un módulo glaciar que pueda ser incorporado al modelo (recordar que CRHM es de código abierto).

En segundo lugar, la estadística fluviométrica en la zona de estudio deja mucho que desear. Sólo se tienen mediciones completas de los deshielos del glaciar Echaurren y de la estación Embalse El Yeso, la cual se encuentra condicionada por la operación del embalse, por lo que sería un gran aporte poder estimar con mayor precisión los afluentes a los dos sistemas estudiados a una escala temporal, al menos, diaria.

Además de la estadística fluviométrica, sería de gran utilidad contar con mediciones de altura de nieve en la zona, ya que éstas permitirían calibrar de mejor manera los parámetros del modelo asociados a la nieve y de esta forma, mejorar la calibración obtenida contrastando las mediciones con las simulaciones.

Finalmente, en relación al fenómeno de cambio climático que está experimentando el planeta, brota la reflexión interna con respecto a las potenciales alteraciones en la disponibilidad del recurso hídrico. Actualmente, gran parte de los proyectos de hidrología se desarrollan bajo condiciones de estacionariedad, las cuales no necesariamente se mantienen en el contexto de alteración en que se encuentran los sistemas naturales en general, e hidrológicos, en particular, lo que puede inducir a errores de dimensionamiento tanto en obras de ingeniería como en disponibilidad de recursos hídricos para proyectos que pretendan hacer uso de ellos.

## Bibliografía

- Ahumada, G., Bustos, D., & González, M. (2012). Effect of climate change on drinking water supply in Santiago de Chile. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 27-34.
- Alduchov, O., & Eskridge, R. (1995). Improved Magnus form Approximation of Saturation Vapor Pressure. *Notes and Correspondence*, 601-609.
- Anderson, E. R. (2017). *Modelling changes in multi-decadal streamflow contributions - Bologna Glacier, Selwyn Mountains, NWT, Canada*. Saskatchewan.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. Second Edition*. Lancaster University, UK.: Wiley-Blackwell.
- Bustos, D. (2011). *Cambio Climático y eventos de emergencia en el suministro de agua potable en el Gran Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*.
- CEPAL. (2012). *La Economía del Cambio Climático en Chile*.
- Cepeda, J. (2017). *Análisis de los caudales nivo-glaciares históricos y proyectados en la cuenca del Río Olivares: Comparación entre modelo DHSVM y WEAP. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería*.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2008). *Plan de Acción Nacional de Cambio Climático*. Santiago: La Australiana.
- Comte, M. (2017). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Mapocho en Los Almendros usando el modelo CRHM. Memoria para optar al título de ingeniera civil*.
- Cortés, G. e. (2012). Assessment of the current climate and expected climate changes in the Metropolitan Region of Santiago de Chile. *Helmholtz Centre for Environmental Research*.
- De Walle, D., & Rango, A. (2008). *Principles of Snow Hydrology*.
- Dehotin, J., & Braud, I. (2008). Which spatial discretization for distributed hydrological models? Proposition of a methodology and illustration for medium to large-scale catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 769 - 796.
- del Río, P. (2015). *Análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca de Pangal en Pangal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*.
- DGA. (2010). *Diseño de una estrategia para la implementación del catastro público de aguas (CPA)*. Data Research.
- DGA. (2011). *Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel; y estimación de los efectos del cambio climático*. Santiago.
- Díaz, M. (2015). *Modelación de hidrogramas de crecidas usando proyecciones de precipitaciones diarias del modelo climático MC3.6. Aplicación en la cuenca Butamalal en Butamalal, VIII región, Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*.
- ERIDANUS. (2013). *Determinación del impacto del cambio climático en el potencial esperado de generación hidroeléctrica en cuenca o subcuencas del Río maule*.
- Fang, X. e. (2013). Multi-Variable evaluation of hydrological model predictions for a headwater basin in the Canadian Rocky Mountains. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1635-1659.
- Figueroa, R. (2008). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca - Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención RHMA*.
- Flügel, W.-A. (1995). Hydrological response units (HRUs) to preserve basin heterogeneity in hydrological modelling using PRMS/MMS- case study in the Bröl basin, Germany. *Modelling and Management of sustainable basin-scale water resource systems*, 79-87.
- Flügel, W.-A. (1997). Combining GIS with regional hydrological modelling using hydrological response units (HRUs): and application for Germany. *Mathematics and Computers in Simulation*, 297-304.
- Gómez, T. (2013). *Evaluación del impacto del cambio climático en centrales hidroeléctricas de la cuenca del Alto Cachapoal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*.

- Gonthier, C. A. (2012). *Influencia de la Escala Espacial y Representación Hidrológica de una Cuenca de Montaña sobre la Capacidad Predictiva de un Modelo Hidrológico*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Santiago.
- González, M. J. (2010). *Efecto del cambio climático en la seguridad de suministro de agua potable en el Gran Santiago*.
- Gupta, H. V. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 80-91.
- Huichaquelén, C. (2017). *Variabilidad del caudal medio anual durante el periodo histórico 1600-2000 en la cuenca del Maule, Chile. Uso de información de experimento 3.6 del CMIP5*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil.
- IPCC. (2013). *Summary for Policy Makers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Basis. Contribution of WG I to the AR5 of IPCC*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014, Synthesis Report AR5*. Ginebra.
- IPCC Expert Meeting Report. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies*. Noordwijkerhout.
- Jara, F. J. (2017). *Influencia de la sublimación nival en el balance hídrico de la cuenca alta del Río Copiapó, Chile*. Santiago.
- Kling, H. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 264-277.
- Krause, P. (2005). Comparison of different criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 89-97.
- Krellenberg, K., & Hansjürgens, B. (2014). *Climate Adaptation Santiago*.
- Krogh, S. A. (2012). *Avances en la modelación hidrológica de gran escala en cuencas patagónicas mediante incorporación de reanálisis climatológicos: Aplicación a la cuenca del Río Baker, región de Aysén*. Santiago.
- Lagos, M. (2009). Vulnerabilidad futura de los recursos hídricos afluentes al embalse El Yeso. XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. SOCHID.
- Lagos, M., Vargas, X., Cepeda, J., Vásquez, N., & Bobadilla, M. P. (2016). How important is to model glaciers in water resources under climate change projections? *American Geophysical Union*.
- Lagos, P. (2006). *Criterios de seguridad hidrológicos en sistemas de abastecimiento de agua potable*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención recursos hídricos y medio ambiente.
- Lawrence, M. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air. *American Meteorological Society*, 225-233.
- Marengo, J. e. (2011). Climate Change: Evidence and Future Scenarios for the Andean Region. *Research Gate*, 110-127.
- Marks, J. D. (1999). A spatially distributed energy balance snowmelt model for application in mountain basins. *Hydrological Processes*, 1935-1959.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2016). *Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Acuerdo contra el Cambio Climático: Seminario regional educación, sustentabilidad y Desarrollo: Calidad del aire y cambio climático*.
- Moriasi, D., Arnold, J., Liew, M. V., Binger, R., Hermel, D., & Veith, T. (2006). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 885-900.
- Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Petit, J. e. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 429-436.

- Pomeroy, J., Gray, D., Hedstrom, N., Quinton, W., Granger, R., & Carey, S. (2007). The Cold Regions Hydrological Model, a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*.
- Prasad, V. H. (2004). Delineation of hydrologic response units using remote sensing and GIS. *Research Gate*, 62-82.
- RAE. (2017). *Real Academia Española*. Obtenido de [www.rae.es](http://www.rae.es)
- Salazar, A. (2017). *Determinación de una metodología para la predicción de forzantes meteorológicas a escala local en un clima no estacionario. Aplicación a cuencas de Chile Central. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.*
- Sanford, T. e. (2014). The climate policy narrative for a dangerously warming world. *Nature*, 164-166.
- Sanzana, P. (2012). *Automatización del procesamiento de unidades de respuesta hidrológica (URHs) con Grass para un modelo hidrológico distribuido. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería mención Recursos hídricos y medio ambiente. Santiago.*
- Serrano, R. (2014). *Proyecciones de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del Maipo, bajo escenarios recientes de cambio climático. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.*
- Siemens, E. (2016). *Effects of climate variability on hydrological processes in Canadian Rockies headwaters catchment. Saskatchewan.*
- Silva, C. (2010). *Aplicabilidad de funciones de transferencia para proyección de efectos de cambio climático sobre caudales en la cuenca alta del río Loa. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil.*
- Taylor, K., Stouffer, R., & Meehl, G. (2011). *A summary of the CMIP5 Experiment Design.*
- Universidad de Chile. (2011). *Selección y aplicación de un modelo hidrológico para estimar los impactos del cambio climático en la generación de energía del sistema interconectado central. Santiago.*
- Uribe, F. (2015). *Comparación de la cobertura nival e hidrogramas simulados a distintas escalas temporales en la cuenca alta del río Maipo, por distintas conceptualizaciones del proceso nival. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.*
- Varas, E. (1985). Influencia del Hietograma de una tormenta en la crecida resultante. *Estudios en honor de Francisco Javier Domínguez, AUCh.*, 655-668.
- Vargas, X., McPhee, J., Vicuña, S., Meza, F., Daniele, L., Rondanelli, R., & Lagos, M. (2017). *ACTUALIZACIÓN BALANCE HÍDRICO EN CHILE. METODOLOGÍA Y DESAFÍOS DE MODELACIÓN. XXIII Congreso SOCHID.*
- Vega, A. (2016). *Balance hídrico de la cuenca del Salar del Huasco mediante el modelo hidrológico de simulación TopModel usando información de reanálisis atmosférico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.*
- Videla, Y. (2013). *Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Maipo mediante la aplicación del software CRHM 2008-2012. Memoria para optar al título de geógrafo.*
- World Meteorological Organization. (2016). *Climate Services for supporting Climate Change adaptation, supplement to the technical guidelines for the national adaptation plan.*

## Anexos

### A. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN CRHM

Tal como se mencionó anteriormente, el modelo CRHM presenta una estructura modular y permite al modelador elegir qué módulos desea incorporar dependiendo de sus necesidades y de la información disponible. Los módulos considerados en este trabajo se presentan y describen brevemente a continuación:

1. basin: Maneja las características morfológicas de la cuenca y de cada URH.
2. global: Calcula radiación incidente de onda corta, radiación solar directa y difusa para superficies inclinadas.
3. obs: Maneja las forzantes (inputs) del modelo y las distribuye al resto de los módulos.
4. calcsun: Estima horas de sol de cada día.
5. intcp: Estima intercepción.
6. longVt: Calcula radiación incidente de onda larga.
7. netall: Modela radiación neta (“all-wave net”) a partir de las horas de sol, temperatura y humedad.
8. albedo\_Richard: Calcula el albedo de la nieve.
9. pbsmSnobal: Estima el transporte de nieve por viento.
10. evap: Calcula la evaporación utilizando los métodos de Granger, Priestley&Taylor o Penman-Monteith.
11. SnobalCRHM#2: Calcula el derretimiento de nieve por medio del balance de energía.
12. Ayers: Estima infiltración.
13. Soil: Maneja el contenido de humedad de las capas de suelo.
14. Netroute: Maneja el intercambio de agua superficial, subsuperficial y subterránea (“ruteo”) entre las distintas URH’s.

Cada uno de los módulos anteriores posee parámetros y variables. Los parámetros se pueden asignar por separado a cada URH y las variables son series de tiempo para cada URH que se calculan en función de las forzantes y parámetros.

Los parámetros asociados a cada módulo se presentan en la Tabla A-1:

Tabla A-1: Parámetros del modelo CRHM asociados a cada módulo.

Módulo	Parámetro	Unidad
albedo_Richard	a1	s
	a2	s
	Albedo_Bare	-
	Albedo_Snow	-
	amax	-
	amin	-
Ayers	smin	mm/h
	basin_area	km2
	groundcover	%
	texture	%
basin	basin_area	-
	basin_name	-
	hru_area	-
	hru_AS_L	-
	hru_elev	-
	hru_GSL	-
	hru_lat	-
	hru_names	-
	INIT_STATE	-
	Loop_to	-
	RapidAdvance_to	-
	RUN_END	-
	RUN_ID	-
	RUN_START	-
	StateVars_to_Update	-
TraceVars	-	
evap	basin_area	km2
	evap_type	-
	F_Qg	-
	hru_area	km2
	hru_elev	m
	Ht	m
	inhibit_evap	-
	rs	-
	Zwind	m
global	hru_AS_L	°
	hru_elev	m
	hru_GSL	°
	hru_lat	°
	Time_Offset	h
intcp	basin_area	km2
	hru_area	km2
longVt	epsilon_s	-
	Vt	-
Netroute	basin_area	km2
	gwKstorage	d
	gwLag	h
	gwwhereeto	-
	hru_area	km2
	Kstorage	d
	Lag	h
	order	-
	runKstorage	d
	runLag	h
	Sdmax	mm
	Sd_ByPass	-
	soil_rechr_ByPass	-
	soil_rechr_max	mm
	ssrKstorage	d
	ssrLag	h
whereeto	-	

Módulo	Parámetro	Unidad
obs	basin_area	km2
	catchadjust	-
	ClimChng_flag	-
	ClimChng_precip	-
	ClimChng_t	-
	ElevChng_flag	-
	hru_area	km2
	hru_elev	m
	HRU_OBS	-
	lapse_rate	°C/100m
	obs_elev	m
	ppt_daily_distrib	-
	precip_elev_adj	1/100m
	snow_rain_determination	-
tmax_allrain	°C	
tmax_allsnow	°C	
pbsmSnohal	A_S	m
	basin_area	km2
	distrib	-
	fetch	m
	hru_area	km2
	Ht	m
	inhibit_bs	-
	inhibit_evap	-
inhibit_subl	-	
N_S	1/m2	
SnohalCRHM	basin_area	km2
	hru_area	km2
	hru_elev	m
	hru_F_g	W/m2
	hru_rho_snow	kg/m3
	hru_T_g	°C
	KT_sand	-
	max_h2o_vol	-
	max_z_s_0	m
	rain_soil_snow	-
	relative_hts	-
	T_g_or_G_flux	-
	z_0	m
	z_g	m
z_T	m	
z_u	m	
Soil	basin_area	km2
	cov_type	-
	gw_init	mm
	gw_K	mm/d
	gw_max	mm
	inhibit_evap	-
	lower_ssr_K	mm/d
	rechr_ssr_K	mm/d
	Sdinit	mm
	Sdmax	mm
	Sd_gw_K	mm/d
	Sd_ssr_K	mm/d
	soil_gw_K	mm/d
	soil_moist_init	mm
	soil_moist_max	mm
	soil_rechr_init	mm
soil_rechr_max	mm	
soil_ssr_runoff	-	
soil_withdrawal	-	
transp_limited	-	

## B. UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA

- Embalse El Yeso

Tabla B-2: Características de las URH's, Cuenca Embalse El Yeso.

N°	Tipo	H <sub>media</sub>	H <sub>máx</sub>	H <sub>mín</sub>	$\alpha_{media}$	$\alpha_{máx}$	$\alpha_{mín}$	$\theta_{media}$	$\theta_{máx}$	$\theta_{mín}$	Área	%Área
1	1	2932	3464	2523	240.2	360.0	0.2	23.0	72.4	0.0	47.96	13.73
2	2	3503	3752	3284	233.8	360.0	0.3	34.4	68.4	2.4	8.57	2.45
3	2	3505	3837	3284	207.4	360.0	0.4	23.3	56.8	0.3	8.32	2.38
4	2	3557	3752	3284	229.3	360.0	0.4	21.6	56.6	0.3	21.07	6.03
5	2	3573	3752	3284	241.4	303.6	146.6	28.9	66.8	2.4	2.40	0.69
6	2	3471	3752	3129	237.1	360.0	7.1	25.9	53.4	0.0	6.33	1.81
7	2	3501	3752	3284	268.6	346.0	206.6	33.2	59.2	3.4	2.74	0.78
8	2	3544	3837	3284	261.6	360.0	1.8	34.5	56.7	1.1	2.23	0.64
9	3	4158	5294	3753	210.3	360.0	0.2	36.3	67.2	1.5	10.92	3.13
10	3	4310	6099	3753	199.3	360.0	0.1	30.8	77.8	0.0	56.53	16.19
11	3	4027	4711	3753	230.0	360.0	0.7	33.4	66.0	1.1	5.29	1.51
12	3	4133	5148	3753	249.2	359.5	0.5	31.1	68.3	0.3	7.67	2.20
13	4	2942	6103	2509	154.6	360.0	0.5	27.6	70.3	0.0	23.52	6.73
14	4	3054	6103	2583	147.6	360.0	0.4	25.1	63.8	0.0	7.42	2.12
15	4	3036	6103	2650	194.3	359.6	0.4	27.4	61.2	0.0	4.41	1.26
16	4	3051	6103	2703	64.1	360.0	0.3	27.3	56.3	0.0	4.74	1.36
17	4	3133	6103	2871	165.1	360.0	0.6	20.1	52.4	0.0	8.36	2.39
18	5	3510	3837	3284	161.7	360.0	0.7	31.9	70.6	0.3	24.52	7.02
19	5	3440	3752	3148	128.0	360.0	1.1	22.9	60.8	0.5	12.09	3.46
20	5	3538	3756	3284	149.7	360.0	1.6	23.3	59.4	0.3	5.61	1.61
21	5	3516	3752	3284	157.2	333.4	8.1	24.8	70.6	0.3	3.98	1.14
22	5	3478	3752	2923	74.1	360.0	2.4	25.1	51.2	0.3	5.02	1.44
23	5	3524	3752	3284	77.8	360.0	0.3	30.0	64.6	4.7	6.00	1.72
24	6	4093	5186	3752	158.1	360.0	0.3	35.8	74.3	0.3	34.87	9.99
25	6	4216	5155	3753	152.7	360.0	1.5	32.9	75.1	0.0	7.87	2.25
26	6	4343	5383	3753	110.4	360.0	0.2	33.8	70.4	0.8	16.10	4.61
27	Embalse	2723	3195	2511	214.0	360.0	3.4	7.6	43.9	0.0	7.89	2.26

- Laguna Negra

Tabla B-3: Características de las URH's, Cuenca Laguna Negra.

N°	Tipo	H <sub>media</sub>	H <sub>máx</sub>	H <sub>mín</sub>	$\alpha_{media}$	$\alpha_{máx}$	$\alpha_{mín}$	$\theta_{media}$	$\theta_{máx}$	$\theta_{mín}$	Área	%Área
1	1	2780	2963	2689	212.6	360.0	0.9	15.5	56.3	0.0	5.14	8.58
2	2	3185	3347	2964	266.4	360.0	0.8	26.2	53.3	0.8	5.90	9.86
3	3	3553	3720	3344	264.9	360.0	1.7	23.5	61.7	0.3	6.48	10.83
4	4	3955	4631	3701	260.5	360.0	0.2	32.7	75.3	0.5	9.71	16.22
5	5	2857	2964	2691	139.2	360.0	0.6	23.2	68.1	0.0	5.14	8.59
6	6	3163	3343	2964	152.9	360.0	0.4	23.3	76.6	0.0	9.07	15.16
7	7	3556	3888	3341	148.2	360.0	1.9	26.6	73.2	0.3	8.69	14.51
8	8	3864	4184	3699	123.6	360.0	0.6	30.5	70.3	0.3	5.07	8.47
9	Laguna	2700	2700	2700	-	-	-	0.0	0.0	0.0	4.66	7.79

## C. METODOLOGÍA HUMEDAD RELATIVA

Para generar la serie deseada, en primer lugar se deben descartar los días con precipitación, ya que en ellos la humedad relativa es cercana a 100%, por lo que dichos datos no aportan información relevante al momento de intentar estudiar alguna tendencia en la variable. La estadística de precipitación diaria se encuentra disponible en la estación Laguna Negra para el periodo 2012-2016 (Figura C-1), por lo tanto, se genera un vector binario con valor 1 si hubo precipitación en ese día, y 0 si no hubo. Luego, se descartan los días con precipitación de la estadística de humedad relativa.

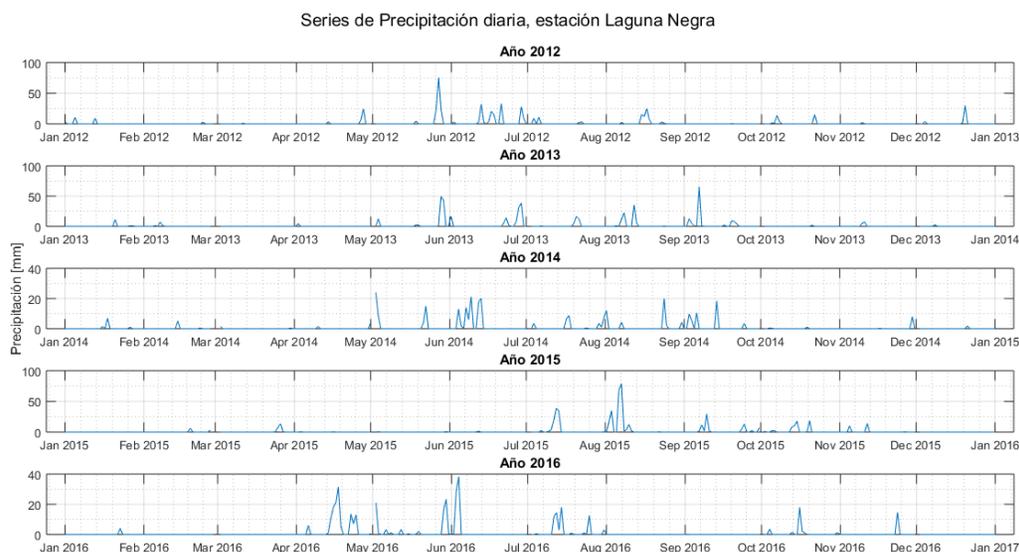


Figura C-1: Series de Precipitación diaria, estación Laguna Negra 2012-2016.

Con el objetivo de detectar formas características de los ciclos diarios, se construye el adimensional:

$$HR_{adim} = \frac{HR_{t_i}}{\overline{HR}_i} \quad (C.1)$$

Donde  $HR_{t_i}$  es la humedad relativa a la hora  $t$  del día  $i$ , y  $\overline{HR}_i$  es la humedad relativa media diaria del día  $i$ . La Figura C-2 muestra los resultados del procedimiento descrito, donde cada serie corresponde a un día de estadística:

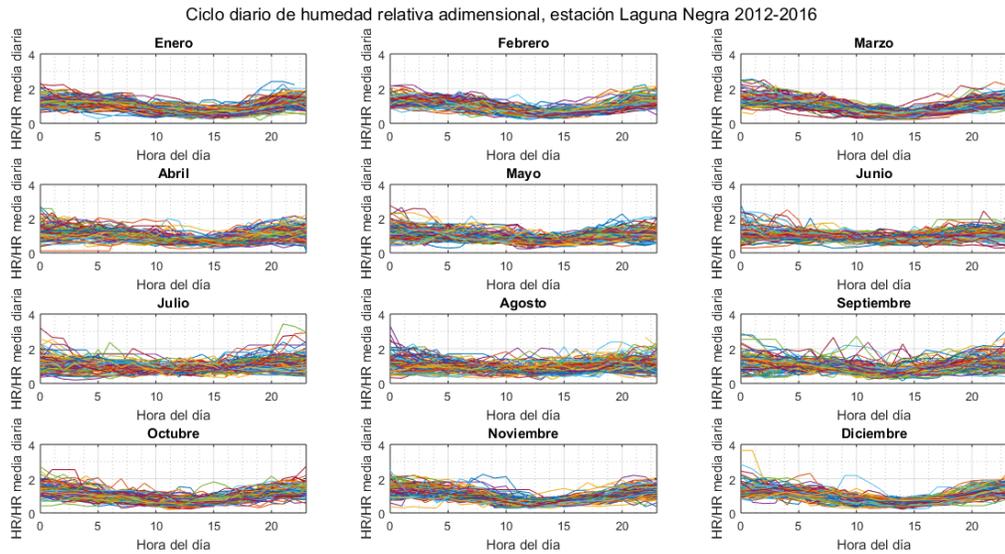


Figura C-2: Ciclos diarios de humedad relativa adimensional, estación Laguna Negra 2012-2016.

Con las series de humedad relativa adimensional mostradas, se requieren determinar las series diarias asociadas a distintas probabilidades de excedencia, para lo cual se ordenan los datos de cada hora de mayor a menor y se les asocia una probabilidad de excedencia con la fórmula de Weibull:

$$P_{exc_i} = \frac{i}{N + 1} \quad (C.2)$$

Donde  $i$  corresponde al índice del dato y  $N$  es el número de datos que se tiene en el mes correspondiente.

A partir de lo anterior, se construyen las curvas de duración para cada hora de cada mes, tal como se presenta en las siguientes figuras:

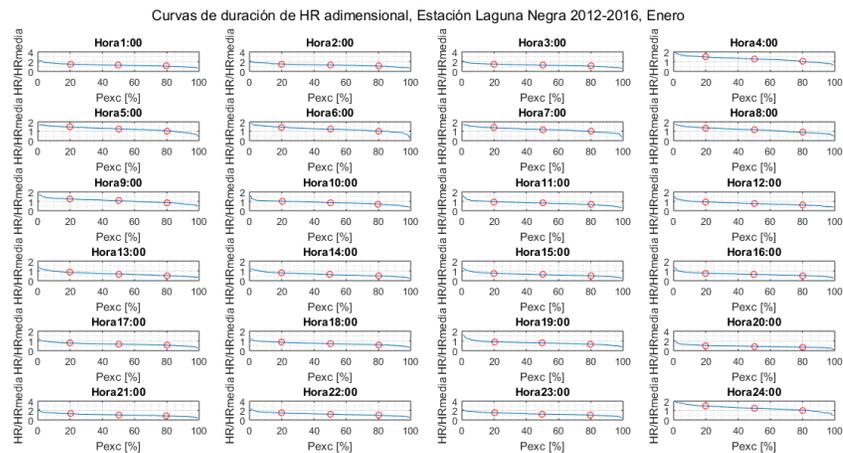


Figura C-3: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Enero.

Curvas de duración de HR adimensional, Estación Laguna Negra 2012-2016, Febrero

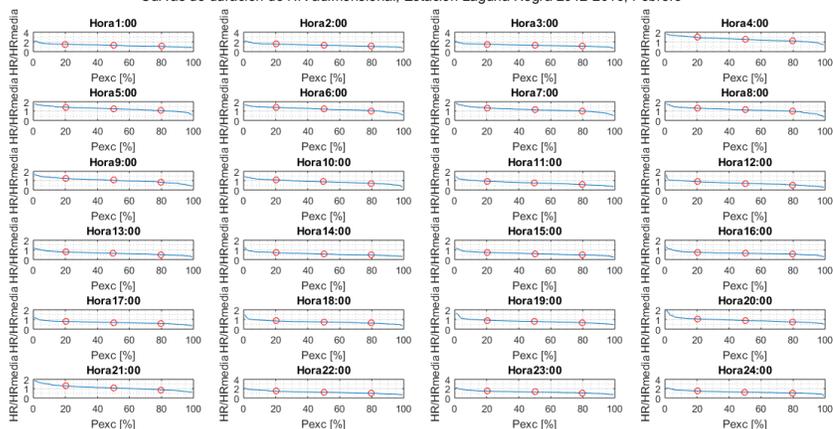


Figura C-4: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Febrero.

Curvas de duración de HR adimensional, Estación Laguna Negra 2012-2016, Marzo

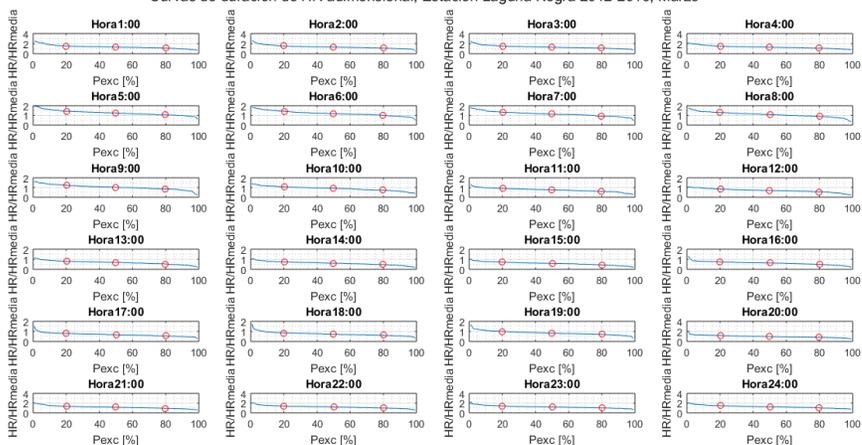


Figura C-5: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Marzo.

Curvas de duración de HR adimensional, Estación Laguna Negra 2012-2016, Abril

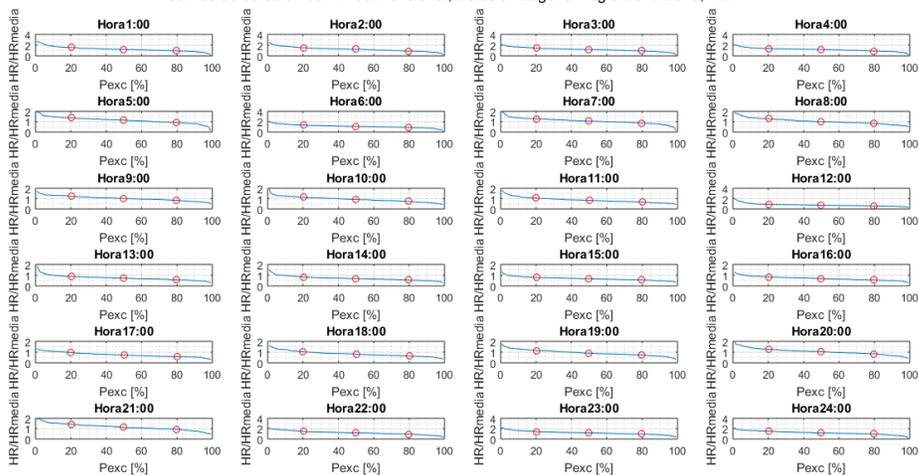


Figura C-6: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Abril.

Curvas de duración de HR adimensional, Estación Laguna Negra 2012-2016, Mayo

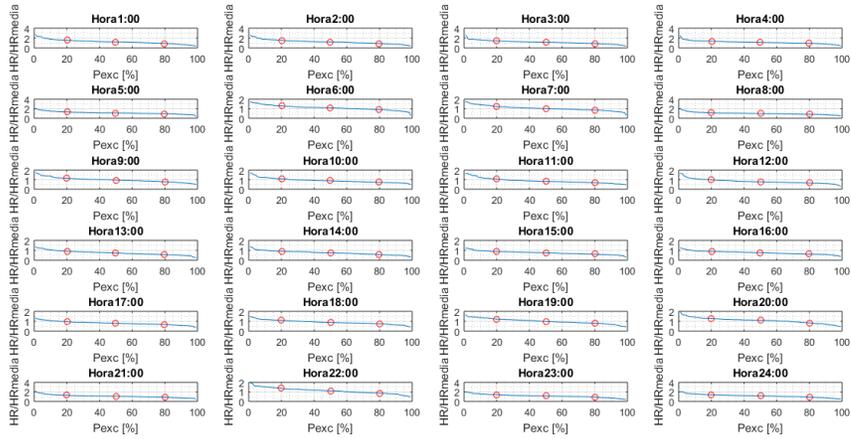


Figura C-7: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Mayo.

Curvas de duración de HR adimensional, Estación Laguna Negra 2012-2016, Junio

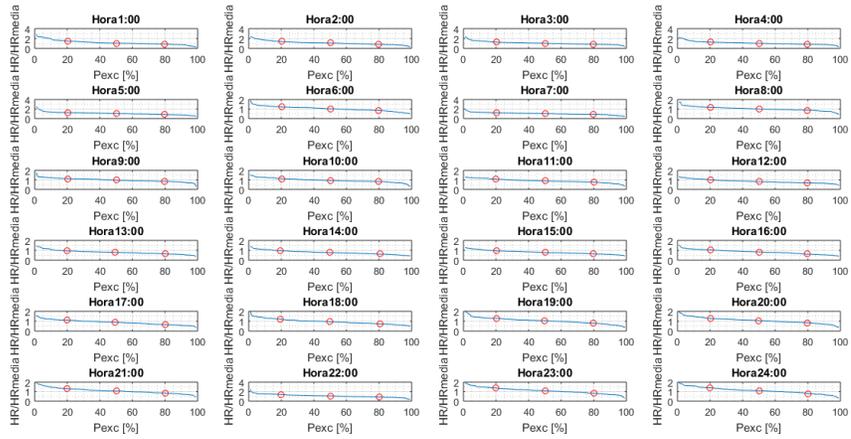


Figura C-8: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Junio.

Curvas de duración de HR adimensional, Estación Laguna Negra 2012-2016, Julio

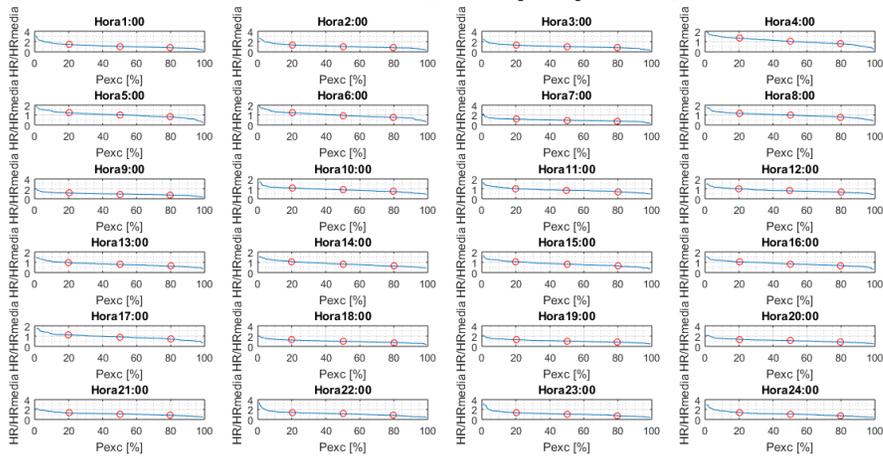


Figura C-9: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Julio.

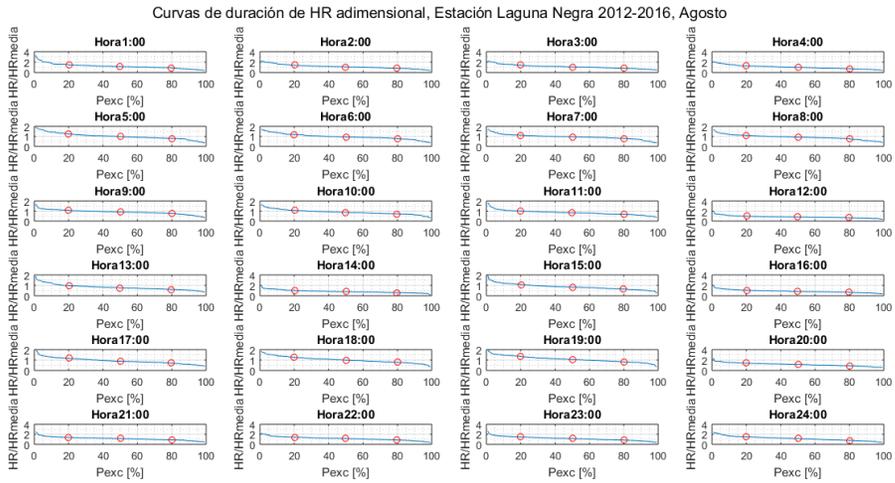


Figura C-10: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Agosto.

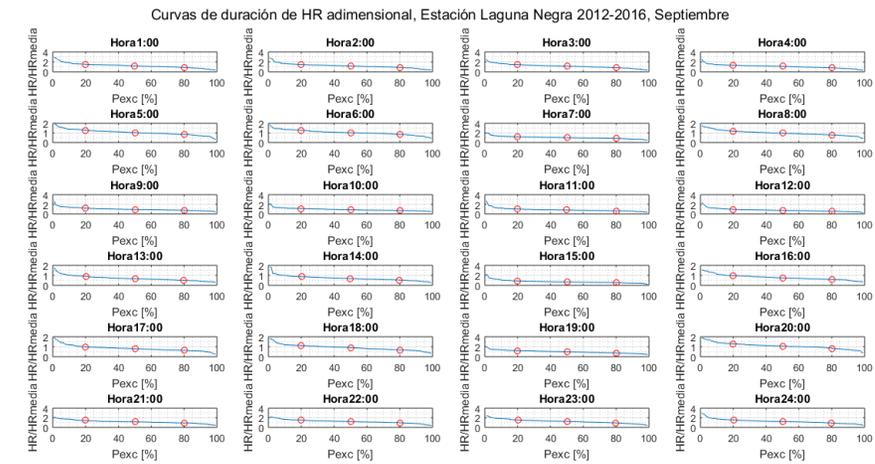


Figura C-11: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Septiembre.

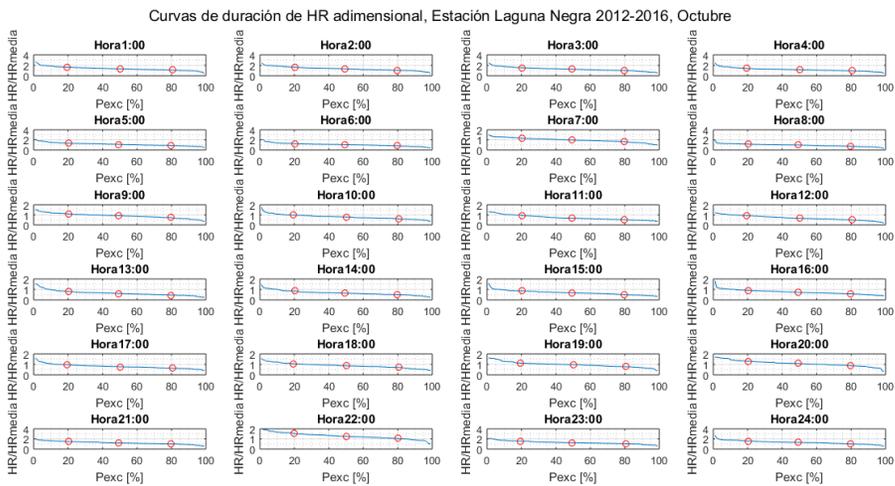


Figura C-12: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Octubre.

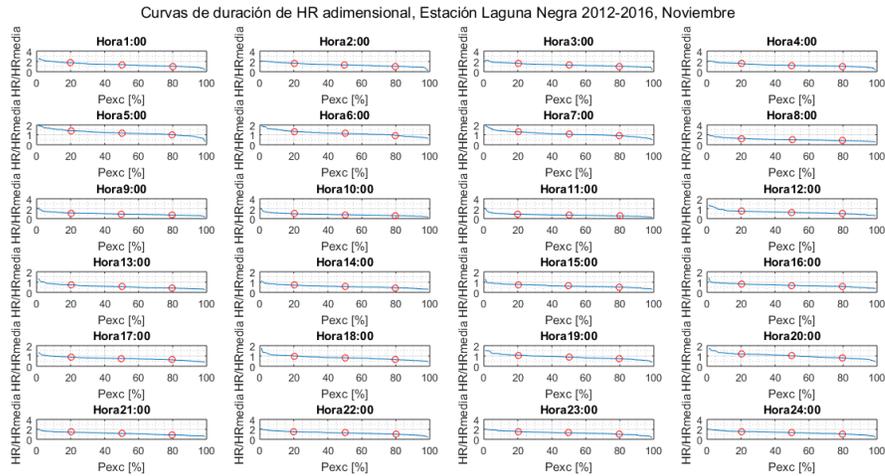


Figura C-13: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Noviembre.

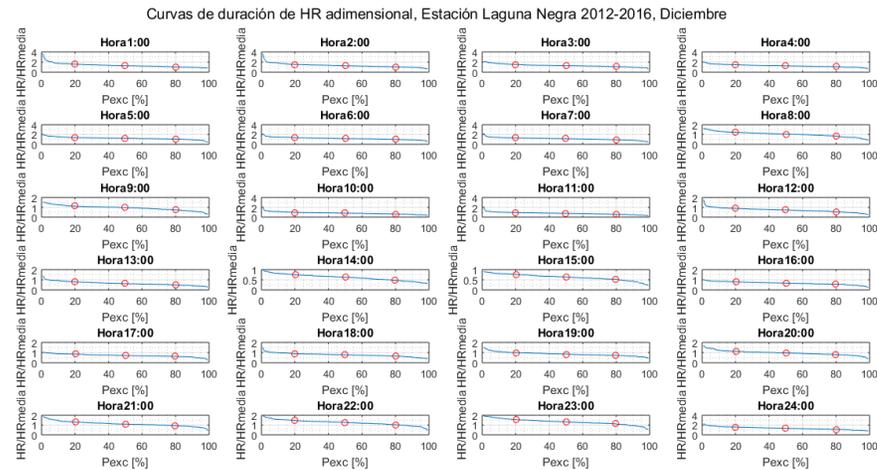


Figura C-14: Curvas de duración de humedad relativa para cada hora, mes de Diciembre.

En las figuras anteriores se han destacado las probabilidades de excedencia correspondientes al 20%, 50% y 80%, las cuales tienen asociadas una serie diaria de humedad relativa adimensional. El objetivo de esto es obtener distribuciones tipo de humedad relativa adimensional para cada mes, para posteriormente generar la serie horaria de humedad relativa para el periodo 1980-2015.

Para llevar a cabo lo anterior, se genera un número aleatorio entre 0 y 1 para cada mes de simulación (en total, 444 meses entre 1979 y 2015). Si el número es menor a 0.3, se le asigna la serie asociada al 20%; si el número es mayor a 0.7, se le asigna la serie asociada al 80%; y si se encuentra entre 0.3 y 0.7, se le asigna la serie asociada al 50% de probabilidad de excedencia. En este procedimiento se ha supuesto que todos los días de cada mes, siguen la misma distribución. Además, para abordar la incertidumbre asociada al procedimiento, se han generado tres series de aleatorios mensuales.

La Figura C-15 muestra las series tipo de humedad relativa adimensional asignadas a cada mes:

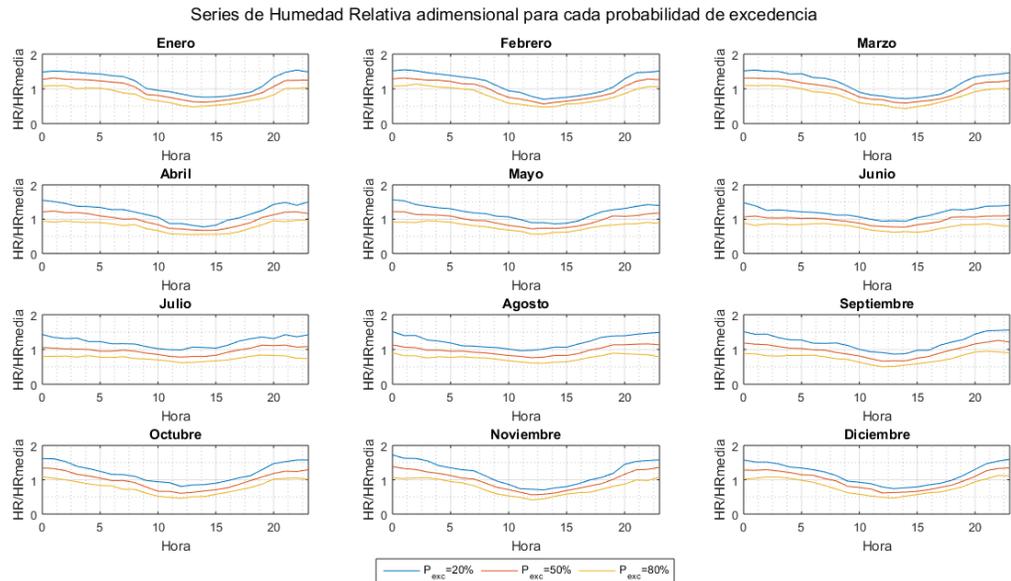


Figura C-15: Series de humedad relativa adimensional, asociadas al 20%, 50% y 80% de probabilidad de excedencia.

Hasta acá, se tienen series de humedad relativa adimensional para cada día del periodo 1979-2015, por lo que se necesitan valores de humedad relativa media diaria para llevar las series adimensionales a valores de humedad relativa.

Las humedades relativas medias diarias se obtienen a partir de análisis de frecuencias para cada mes, con la estadística medida en la estación en los años 2012-2015. Para estos análisis de frecuencias, se ha seleccionado por simplicidad la distribución Normal, ya que los ajustes generados por las otras distribuciones (Log-Normal, Pearson y Log-Pearson) eran muy similares, tal como se muestra en las Figura C-16 a Figura C-27:

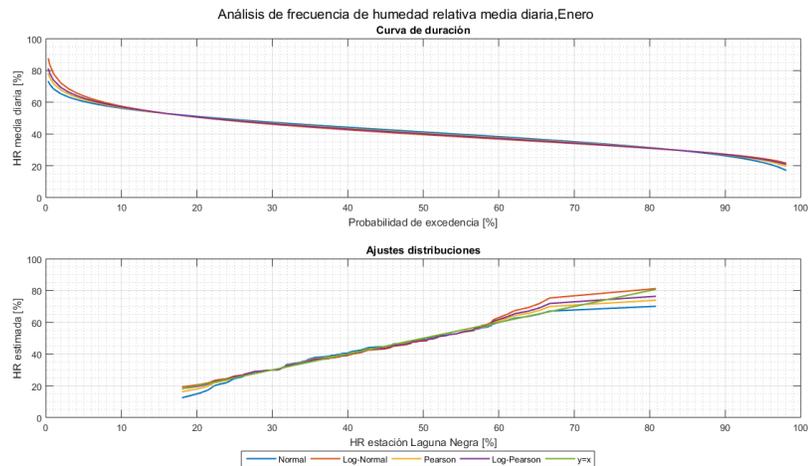
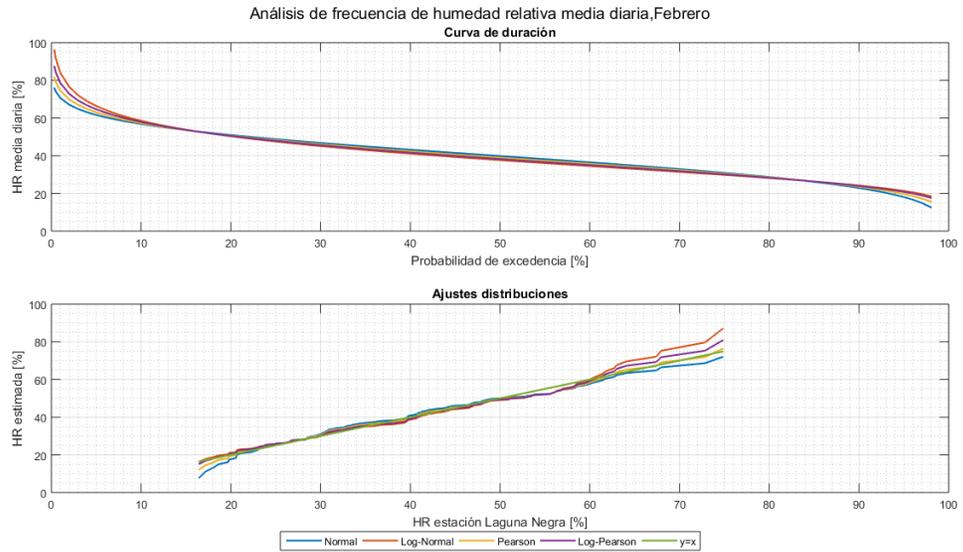
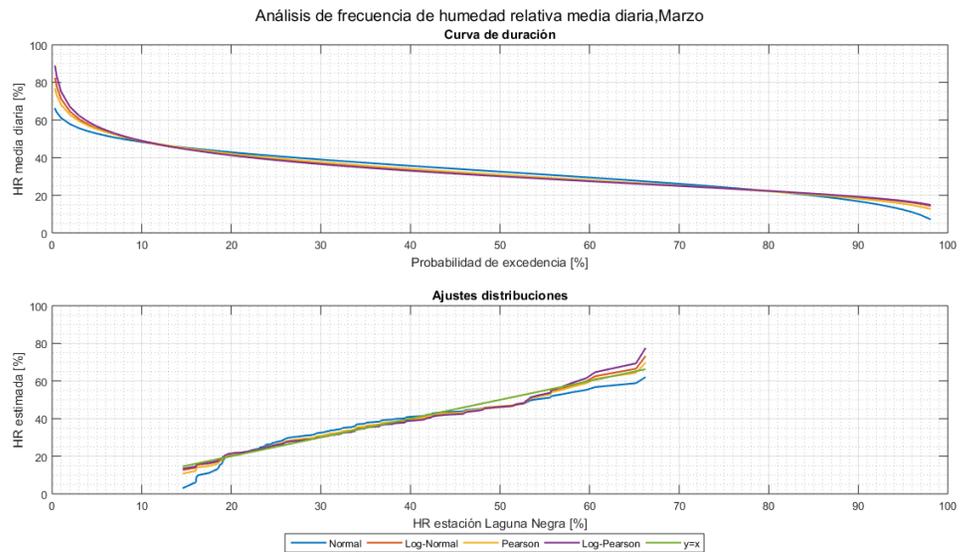


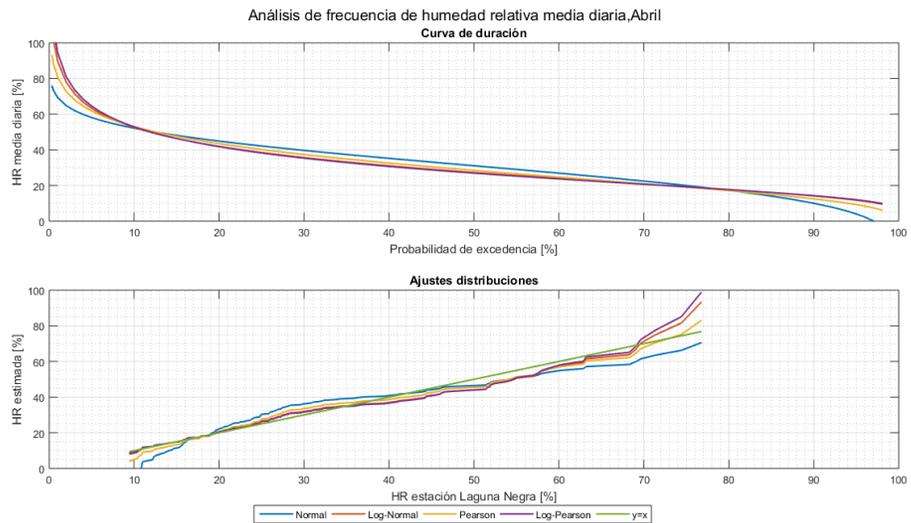
Figura C-16: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Enero.



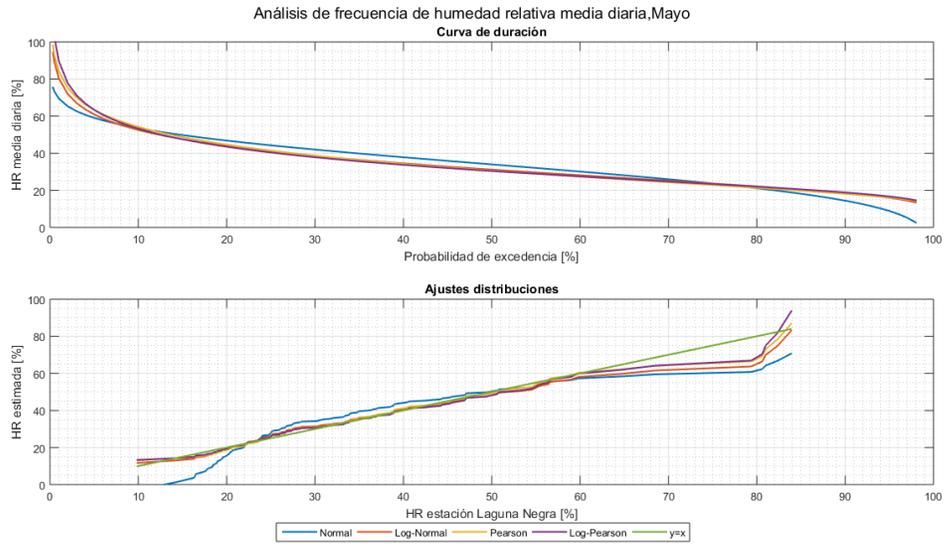
*Figura C-17: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Febrero.*



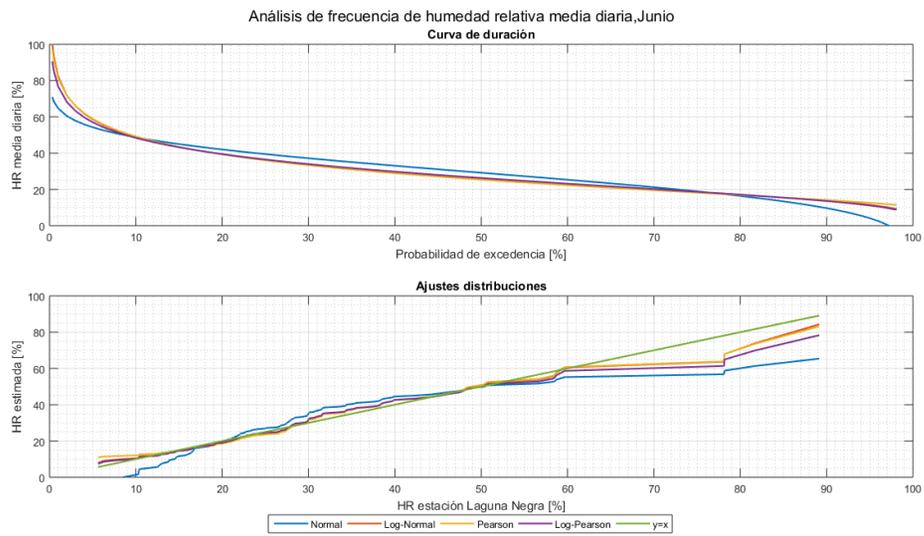
*Figura C-18: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Marzo.*



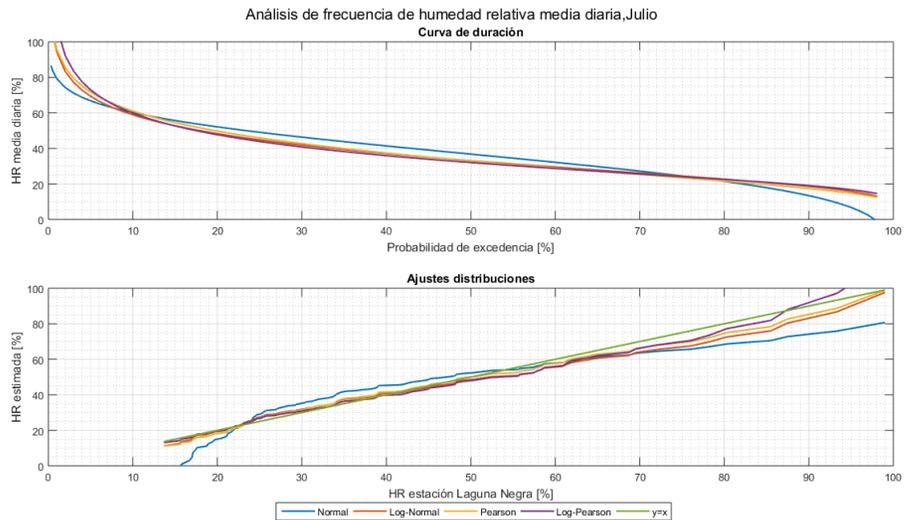
*Figura C-19: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Abril.*



*Figura C-20: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Mayo.*



*Figura C-21: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Junio.*



*Figura C-22: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Julio.*

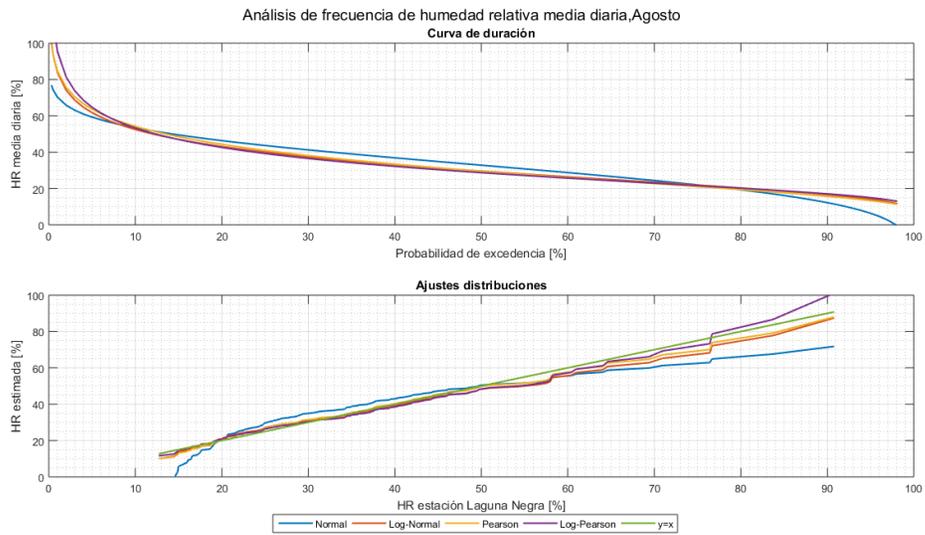


Figura C-23: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Agosto.

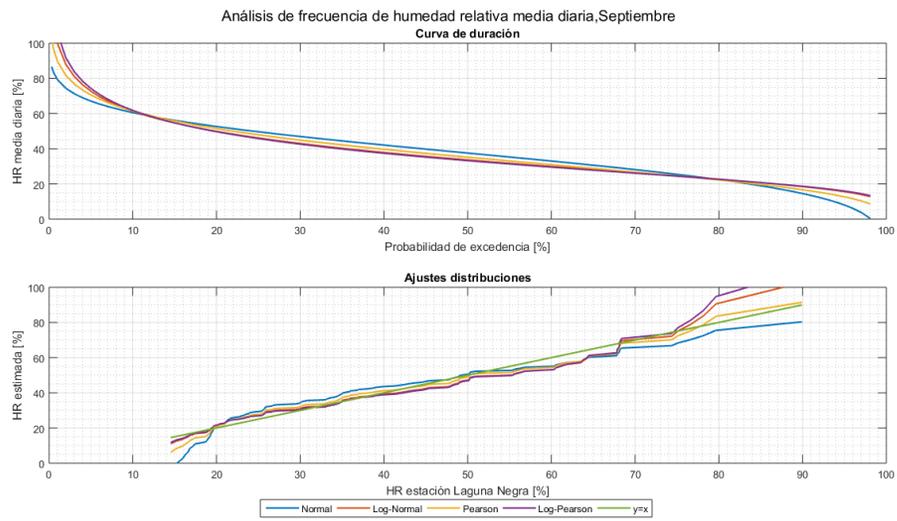


Figura C-24: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Septiembre.

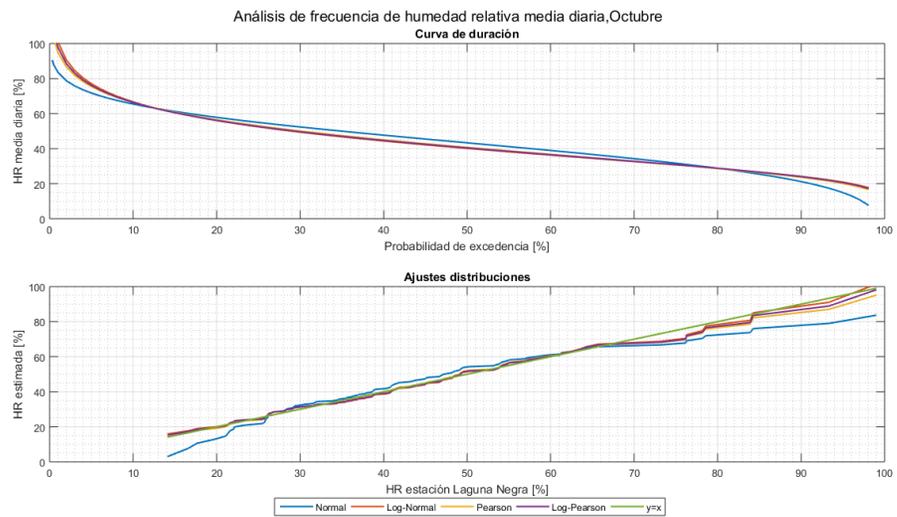


Figura C-25: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Octubre.

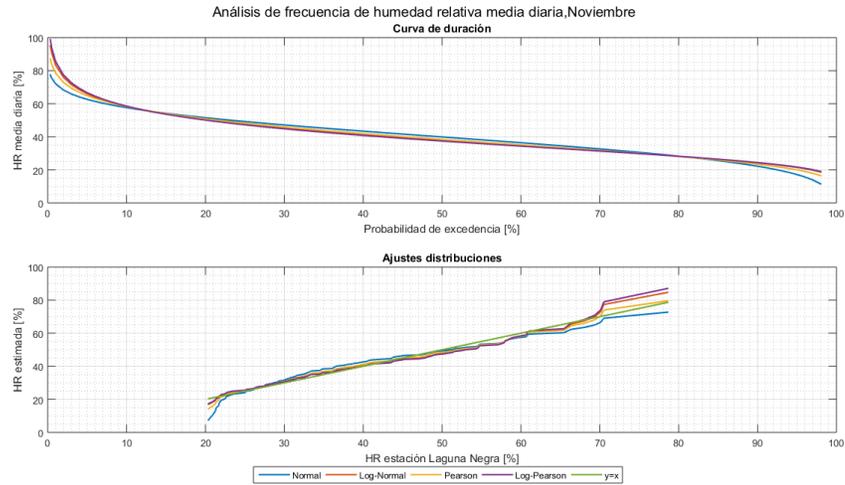


Figura C-26: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Noviembre.

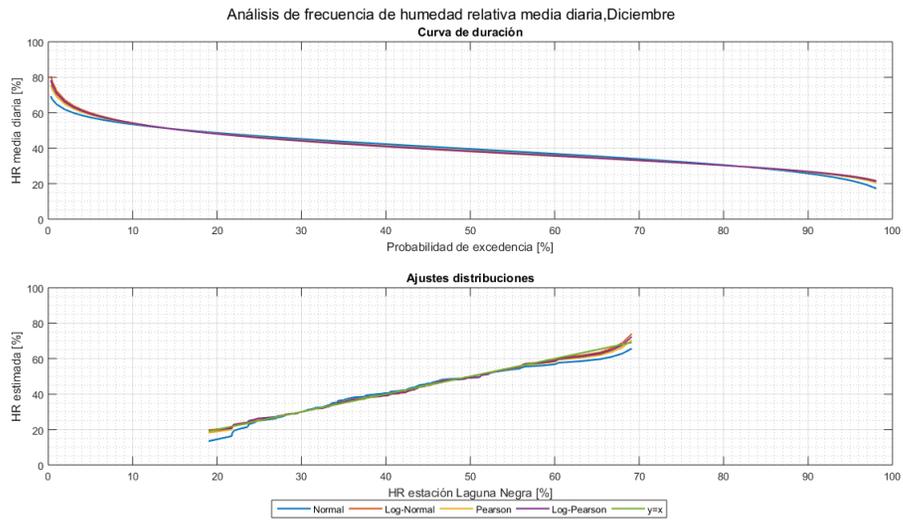


Figura C-27: Análisis de frecuencia de humedad relativa media diaria, Diciembre.

El resultado del procedimiento anterior es la media y la desviación estándar de la humedad relativa media diaria para cada mes, como se muestra en la Figura C-28:

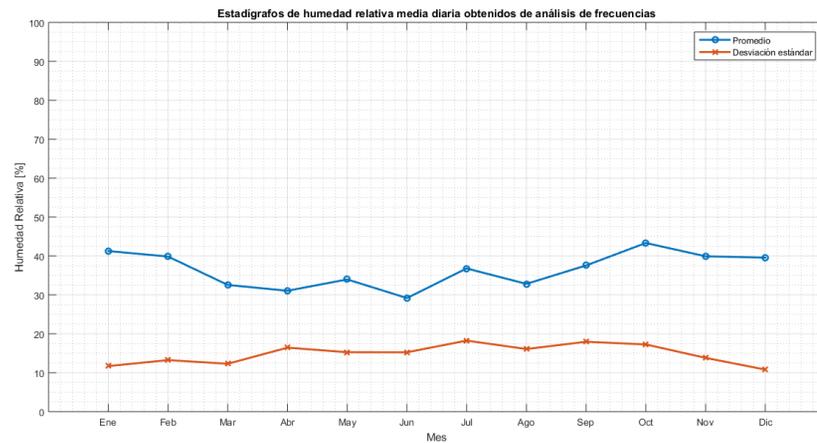


Figura C-28: Promedio y desviación estándar a nivel mensual de humedad relativa media diaria, obtenidos de análisis de frecuencias.

Para obtener el valor de la humedad relativa media diaria de cada día del periodo 1979-2015, se genera un número aleatorio entre 0 y 1 para cada día. Este número corresponde a la probabilidad de no excedencia asociada a la humedad relativa media diaria de ese día, por lo tanto, el valor buscado se calcula con las siguientes ecuaciones:

Sea  $x_i$  el número aleatorio generado para el día  $i$ . El periodo de retorno, en años, asociado a ese día se calcula como:

$$T_i = \frac{1}{1 - x_i} \quad (C.3)$$

El valor del factor de frecuencias,  $K_{T_i}$ , asociado a esa probabilidad se calcula de acuerdo a la ecuación (C.4) (Chow, 1994):

$$K_{T_i} = \begin{cases} W_i - \frac{2.515517 + 0.802853 \cdot W_i + 0.010328 \cdot W_i^2}{1 + 1.432788 \cdot W_i + 0.189269 \cdot W_i^2 + 0.001308 \cdot W_i^3} & \text{si } \frac{1}{T_i} \leq 0.5 \\ -W_i + \frac{2.515517 + 0.802853 \cdot W_i + 0.010328 \cdot W_i^2}{1 + 1.432788 \cdot W_i + 0.189269 \cdot W_i^2 + 0.001308 \cdot W_i^3} & \text{si } \frac{1}{T_i} > 0.5 \end{cases} \quad (C.4)$$

Donde la variable  $W_i$  se calcula según:

$$W_i = \begin{cases} \sqrt{\ln T_i^2} & \text{si } \frac{1}{T_i} \leq 0.5 \\ \sqrt{\ln \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{T_i}\right)^2}} & \text{si } \frac{1}{T_i} > 0.5 \end{cases} \quad (C.5)$$

Finalmente, el valor de la humedad relativa media diaria se calcula, para el día  $i$  y el mes  $j$ , como:

$$\overline{HR}_i = \mu_j + K_{T_i} \cdot \sigma_j \quad (C.6)$$

Con el objetivo de abordar la incertidumbre en la generación de números aleatorios, se han realizado 10 simulaciones distintas.

Con los valores de humedad relativa media diaria, y las series adimensionales horarias generadas previamente, se obtiene la serie de humedad relativa a nivel horario para el periodo 1980-2015.

Como se realizaron 3 simulaciones para los ciclos diarios tipo de humedad relativa adimensional, y 10 simulaciones para la humedad relativa media diaria, se tienen finalmente 30 simulaciones para la humedad relativa para el periodo 1980-2015.

## D. METODOLOGÍA VELOCIDAD DEL VIENTO

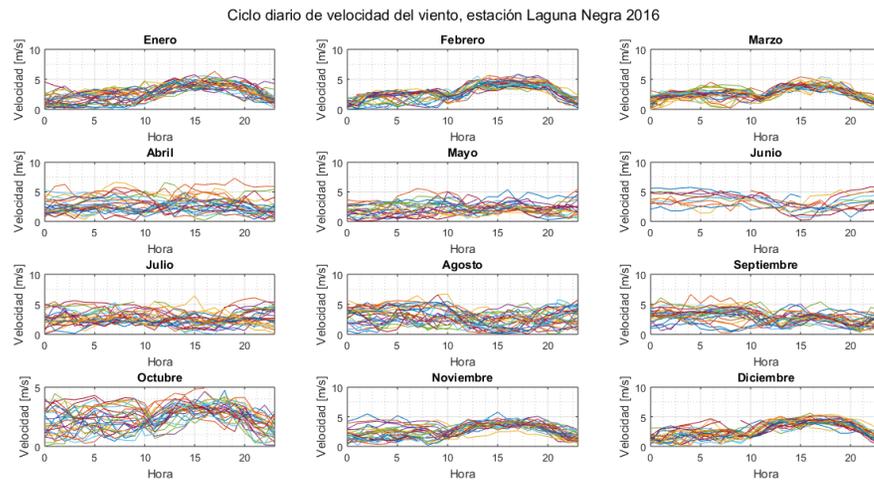


Figura D-29: Ciclo diario de velocidad del viento, estación Laguna Negra año 2016.

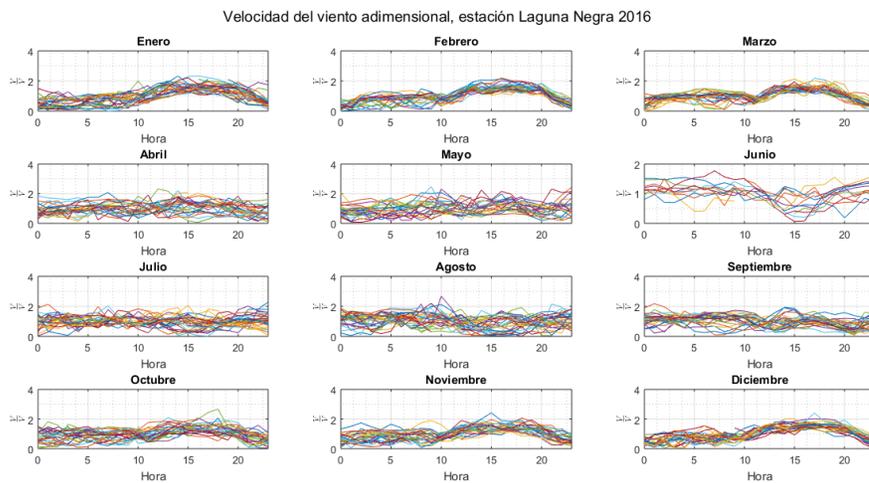


Figura D-30: Ciclo diario de velocidad del viento, adimensionalizada por la velocidad media diaria. Estación Laguna Negra, año 2016.

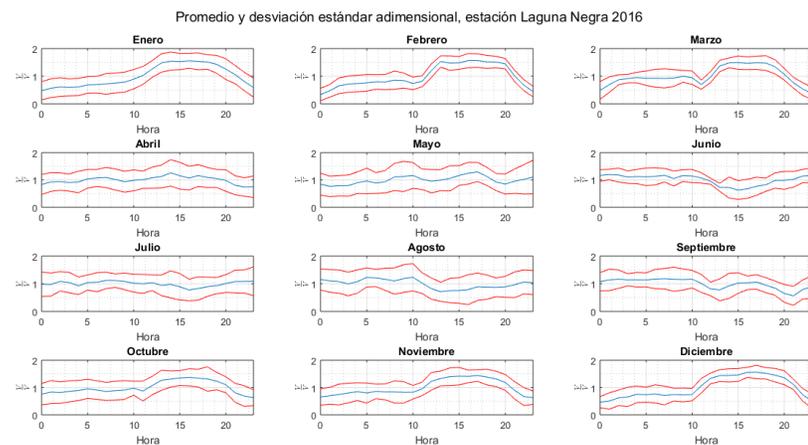


Figura D-31: Promedios y desviaciones estándar de velocidad del viento horaria, para cada hora de cada mes. Estación Laguna Negra, año 2016.

Pendientes y coeficientes de posición, correlaciones entre datos simulados y medidos año 2016

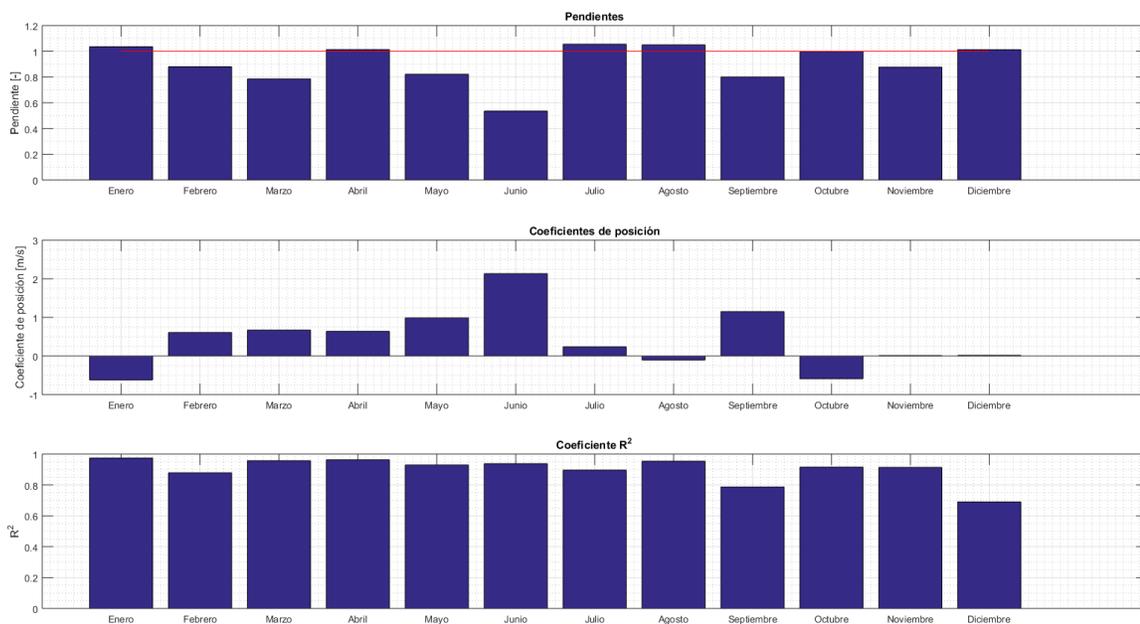


Figura D-32: Resultados de la calibración de la rugosidad para aplicar perfil logarítmico. Datos simulados vs observados en estación Laguna Negra año 2016.

Comparación series de viento horario, año 2016. Simulación:1

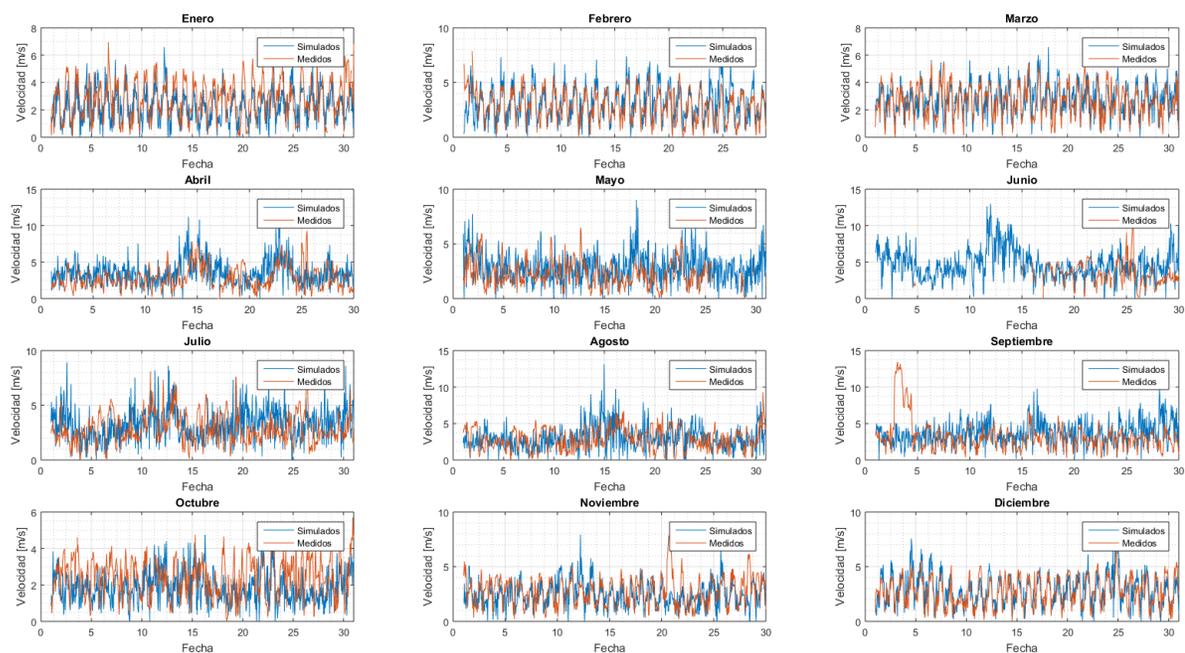


Figura D-33: Comparación de velocidad del viento horaria simulada y observada, año 2016.

## E. METODOLOGÍA RADIACIÓN SOLAR

La radiación incidente de onda corta sobre superficies inclinadas, se estima de acuerdo a la ecuación (E.7):

$$K \downarrow = I_q \cdot (a - b \cdot C) \quad (E.7)$$

Donde:

- $K \downarrow \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ : Radiación incidente de onda corta.
- $I_q \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ : Radiación solar potencial de onda corta.
- $C [-]$ : Nubosidad.
- $a$  y  $b$ : Parámetros por calibrar.

La radiación solar potencial,  $I_q$ , se obtiene a partir de la ecuación (E.8):

$$I_q = \frac{I_0}{e^2} \cdot [\sin(\theta') \sin(\delta) + \cos(\theta') \cos(\omega t')] \quad (E.8)$$

Donde:

- $I_0$ : Constante solar, oscila entre 1360 y 1400  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
- $e$ : Vector radio, representa las variaciones entre la distancia Tierra-Sol a lo largo del año.
- $\theta'$ : Latitud de la superficie horizontal equivalente.  

$$\theta' = \arcsin[\sin(k_s) \cos(h) \cos(\theta) + \cos(k_s) \sin(\theta)] \quad (E.9)$$
- $k_s$ : Pendiente del terreno.
- $h$ : Orientación de la ladera, con respecto al norte.
- $\delta$ : Declinación solar.
- $\omega t'$ : Angulo horario de la superficie horizontal equivalente.

$$\omega t' = \omega t + a \quad (E.10)$$

- $a$ : Diferencia en longitud entre la superficie horizontal equivalente y la inclinada.

$$a = \arctan\left[ \frac{\sin(h) \sin(k_s)}{\cos(k_s) \cos(\theta) - \cos(h) \sin(k_s) \sin(\theta)} \right] \quad (E.11)$$

El comportamiento anual de las series de  $e$ ,  $\delta$  y  $\omega t$ , ha sido obtenido a partir de información de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Comercio de Estados Unidos.

La estadística de nubosidad fue obtenida del trabajo de Cepeda (2017) a nivel mensual para la estación DGA Pirque, distinguiendo entre días con y sin precipitación, tal como se presenta en la Figura E-0-34:

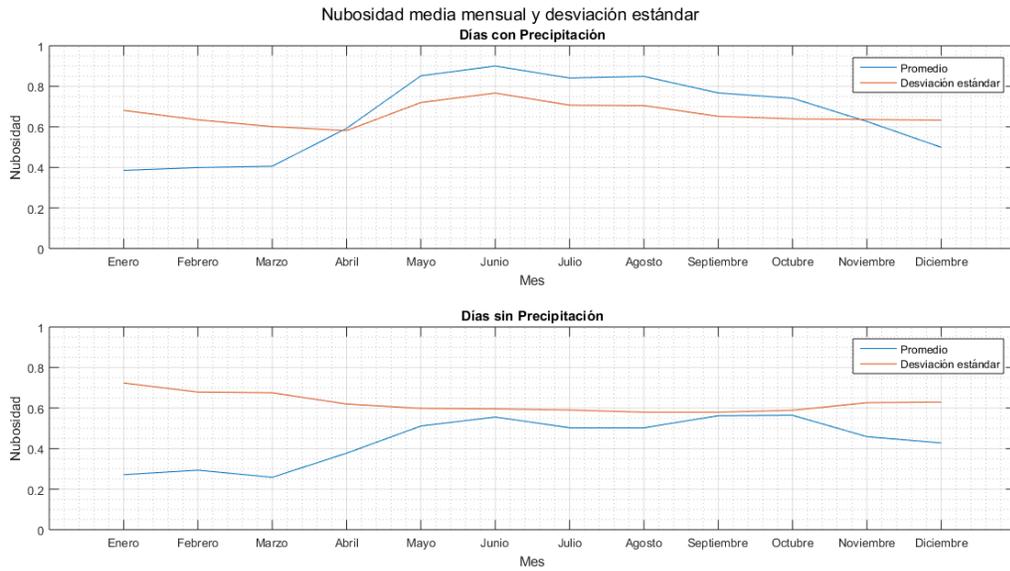


Figura E-34: Nubosidad media mensual y desviación estándar. Fuente: Cepeda, 2017.

Una vez generadas las series de radiación potencial, se deben corregir los valores por efectos de la nubosidad, para lo cual intervienen dos parámetros presentes en la ecuación (E.7). Estos parámetros se calibraron de modo tal que la serie generada para el año 2016 se ajustara de buena manera a la observada en la estación Laguna Negra, tal como se muestra en la Figura E-35:

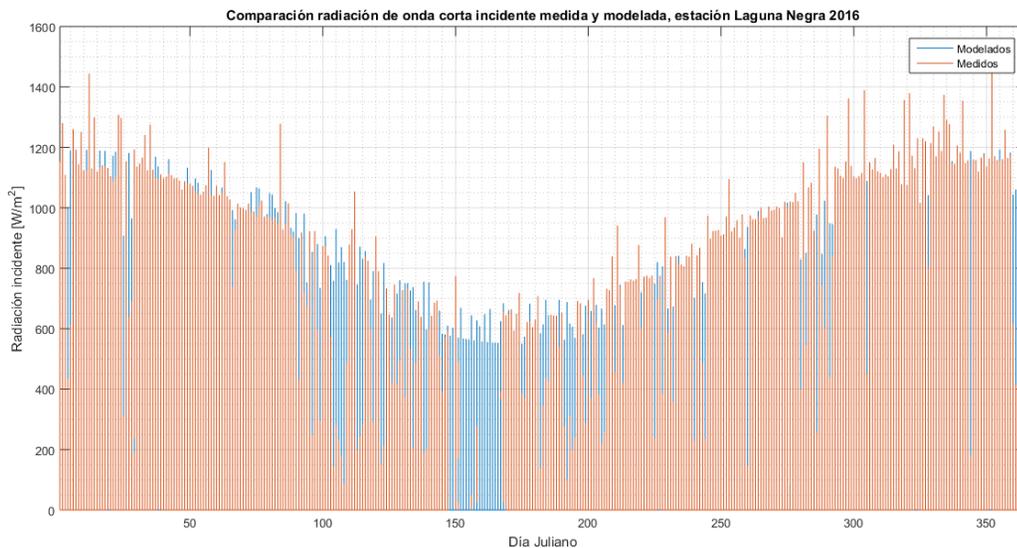


Figura E-35: Calibración parámetros "a" y "b" para estimar radiación incidente real a partir del valor potencial.

Los valores obtenidos para los parámetros son  $a = 0.85$  y  $b = 0.2$ , los cuales se encuentran dentro de los rangos presentados por De Walle (2008).

Como para cada URH se conocen sus características morfológicas medias (orientación, pendiente, latitud), se construyeron las series horarias de radiación incidente de onda corta asociadas a cada unidad para el periodo 1980-2015.

## F. SERIES DE TIEMPO DE OUTPUTS HISTÓRICOS

Caudales instantáneos simulados, periodo 1980-2015

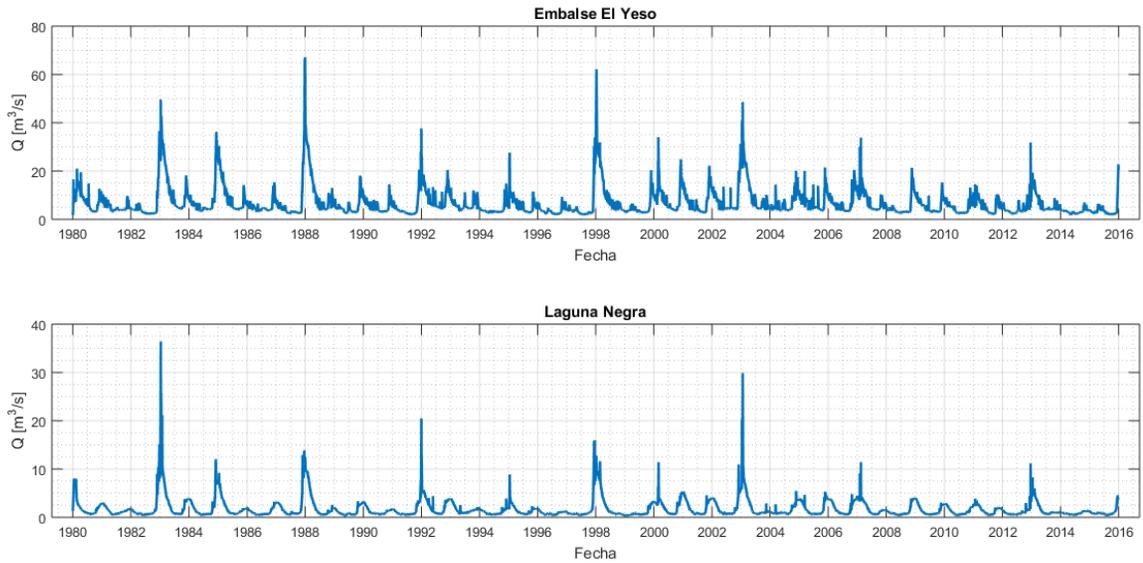


Figura F-36: Caudales instantáneos simulados, periodo histórico 1980-2015.

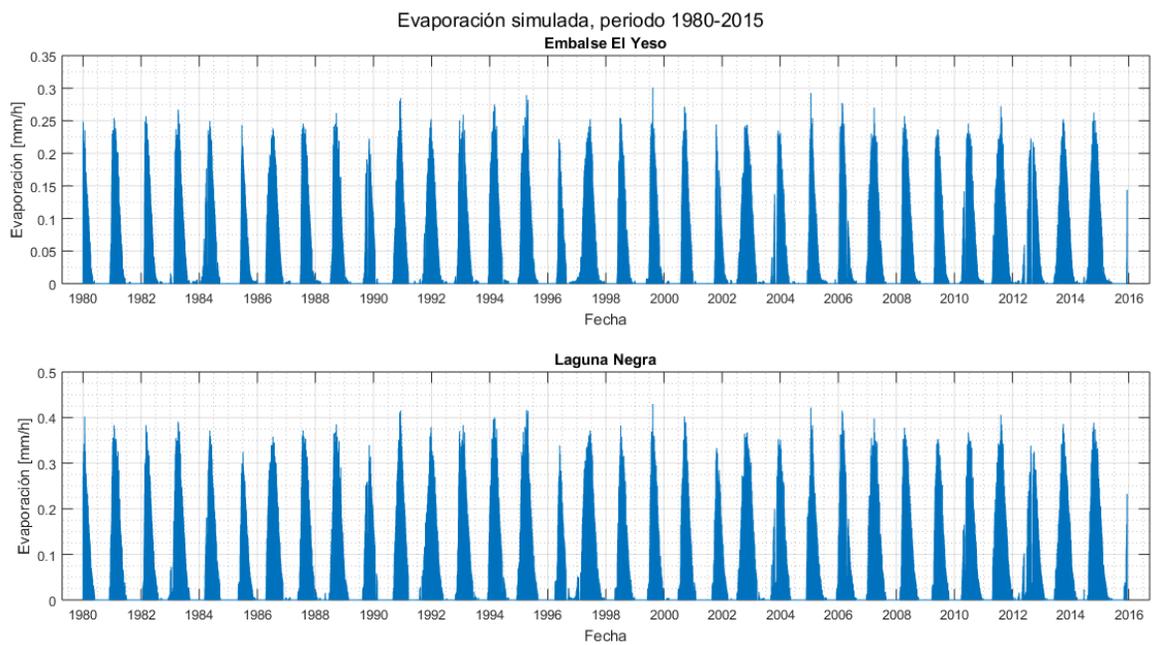
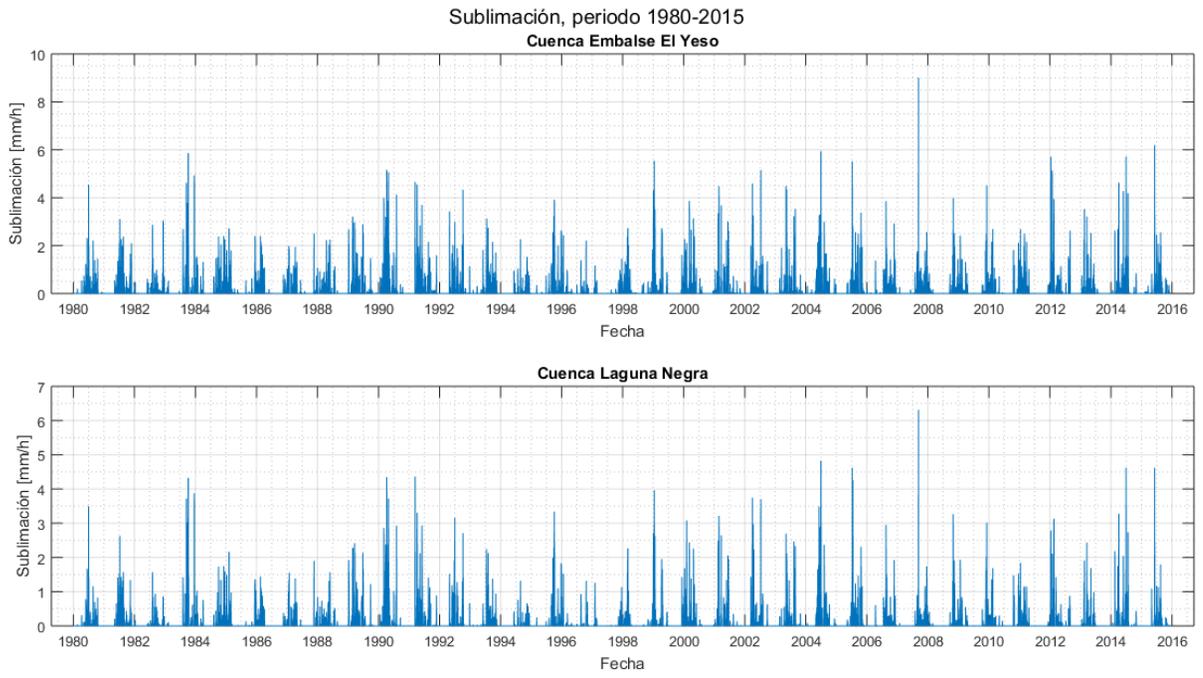


Figura F-37: Evaporación instantánea simulada, periodo histórico 1980-2015.



*Figura F-38: Sublimación instantánea simulada, periodo histórico 1980-2015.*

## G. SERIES DE TIEMPO DE OUTPUTS PROYECTADOS

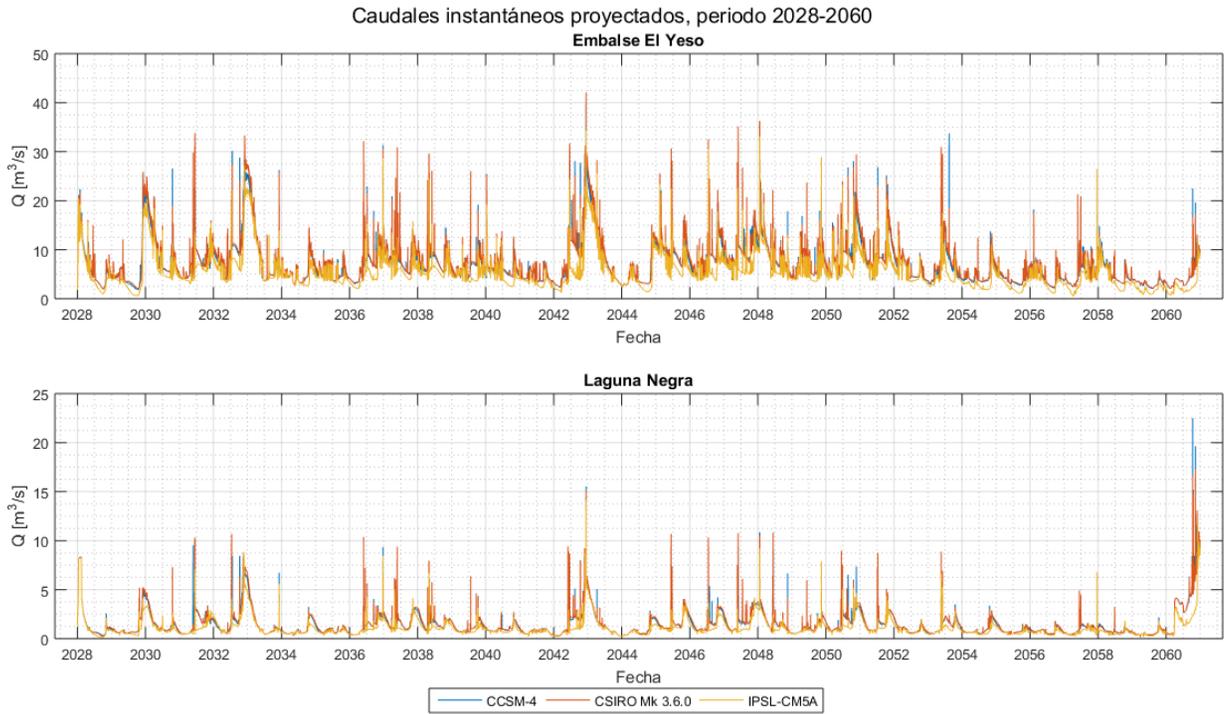


Figura G-39: Caudales instantáneos simulados, periodo proyectado 2028-2060.

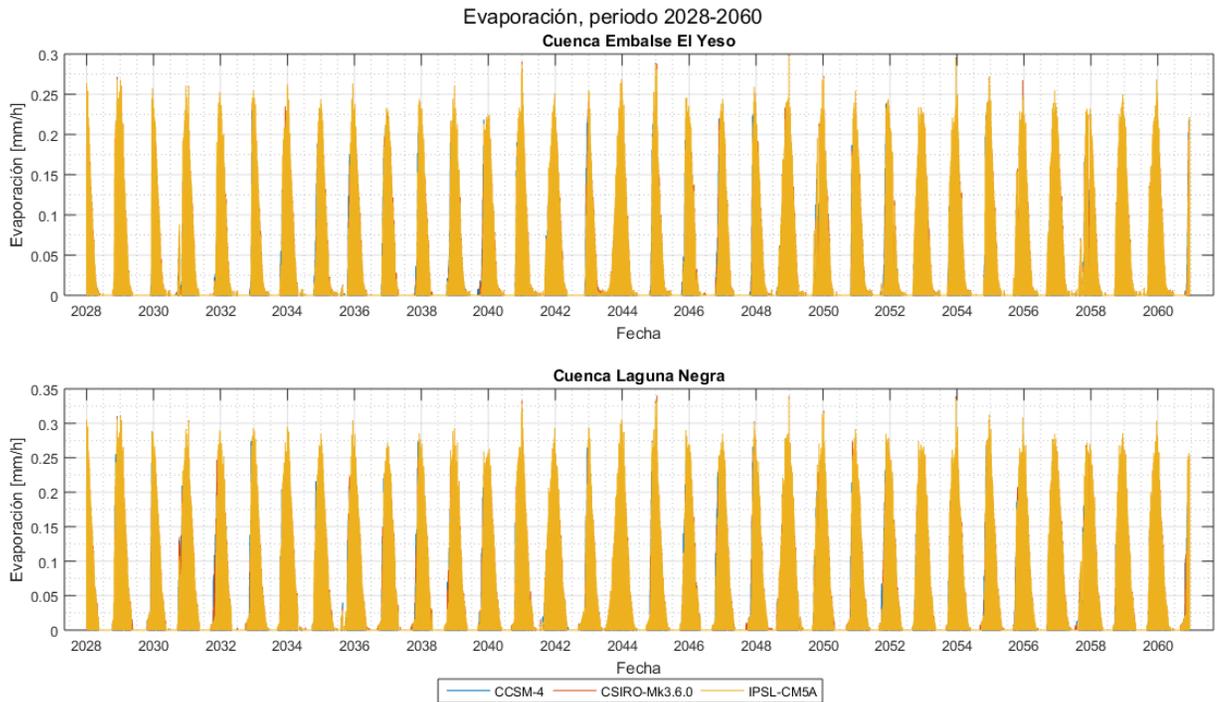
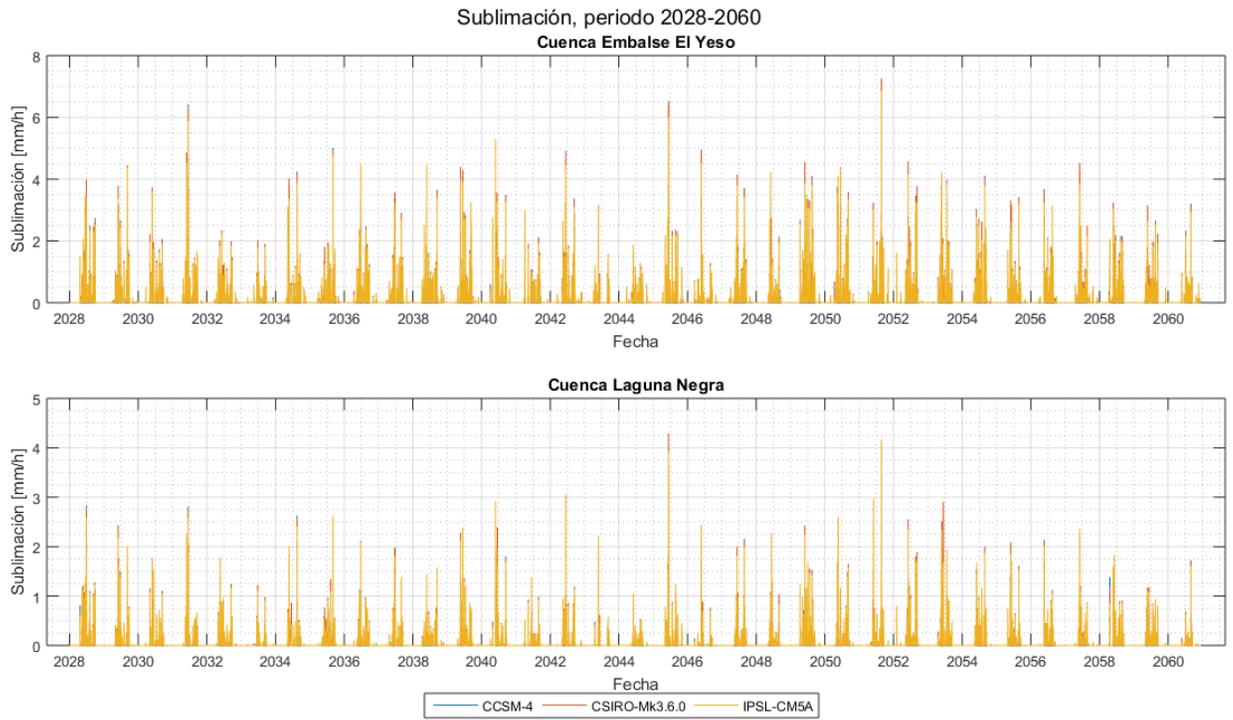


Figura G-40: Evaporación instantánea simulada, periodo proyectado 2028-2060.



*Figura G-41: Sublimación instantánea simulada, periodo proyectado 2028-2060.*