

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



**MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE FLUJO DE SEDIMENTOS EN LA
PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA: ESCENARIOS
HISTÓRICOS Y PROSPECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

CLAUDIO SEBASTIAN PARDO MANSILLA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUIA
RAUL PEDRO FLORES AUDIBERT

SEPTIEMBRE 2021

AGRADECIMIENTOS

Con este trabajo termina una emocionante y divertida etapa de mi vida, que, si bien fue un poco trunca al final debido al acontecer nacional y mundial, la disfrute mucho y conocí a grandes personas con las que conviví a lo largo de mi vida universitaria. Es por eso quiero agradecer a todas las personas que me permitieron llegar hasta aquí.

Primero quiero agradecer a mi familia, en especial mis padres Edgardo y Pamela y mi Abuela Marisol quienes otorgaron total apoyo a mis elecciones y no menos importante, el apoyo económico que necesitaba para poder ir de un día para otro a una ciudad tan alejada a estudiar lo que yo quería.

A mi novia Natalia y mi gran amigo Paulo quienes me han estado apoyando y acompañando desde el colegio, lo cual pese a la distancia siguieron estando siempre presentes de las maneras que pudieran durante todos los años que me encontré lejos.

A los grandes amigos que hice en la universidad, con los que sufrí y me divertí a lo largo de la carrera apoyándonos en cada ramo que pudiéramos para poder salir adelante todos juntos.

A mis compañeros de carrera en general, todos dispuestos a ayudar en lo que pudieran y compartir la información con los demás buscando que todos pudiéramos seguir avanzando.

A mis profesores de la carrera, quienes mostraron claramente que querían que todos aprendiéramos y motivaban a su manera cada clase buscando que fuera lo mejor posible, ellos lograron aumentar aún más mi amor por la carrera que había escogido reafirmando cada vez la elección que había tomado, tanto de carrera como de universidad.

Finalmente, a mi profesor guía Raúl Flores, quien sin conocernos de antes y pese a la distancia, me guio en esta memoria y se preocupó de mis avances y de que siguiera trabajando constantemente, respetando totalmente mis tiempos y peticiones.

Muchas gracias a todos.
Claudio Pardo mansilla

RESUMEN

El agua es un elemento esencial para el desarrollo del país, pero su obtención en cuencas montañosas está sujeta a importantes procesos de erosión que afectan e impiden el correcto uso del agua. En por tanto que cobra importancia monitorear y controlar tanto el flujo de agua como el flujo de sedimentos. Por desgracia, estas mediciones normalmente no se realizan, debiendo recurrir a estimar estos flujos en base a modelos hidrológicos.

Este estudio tiene de objetivo calibrar y validar el modelo SWAT en una cuenca de alta montaña ubicada en la región de Valparaíso, Chile, tanto para caudal líquido como sólido, en base a los datos medidos en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito, permitiendo evaluar su desempeño y aplicabilidad en la generación de escenarios futuros. La información necesaria para la aplicación del modelo se recopiló desde herramientas satelitales y otras fuentes disponibles de manera online. A su vez, se usaron imágenes MODIS de la cobertura nival como un método adicional de validación del modelo.

El modelo obtuvo un gran desempeño a nivel mensual, tanto para el caudal líquido como para el caudal sólido, pero existe una subestimación en los valores peak, por lo que los valores máximos simulados tienden a ser menores que los valores máximos observados. A nivel diario el desempeño es similar para el caudal líquido, pero presenta fallos en el caudal sólido debido al incremento de la brecha entre los valores peak simulados y observados, en algunos casos alcanzando niveles no tolerables. Para el caso de la cobertura nival se alcanzó un muy buen desempeño.

Se considera que el modelo es aplicable a cuencas de alta montaña debido a un más que aceptable desempeño en las distintas instancias realizadas, obteniéndose mejores resultados en el caudal líquido por sobre el sólido. Se comprueba también que es posible la modelación a través de herramientas satelitales y fuentes de información online. No obstante, siempre es preferible y conveniente tener registros in-situ.

Palabras Clave: Erosión, Cuenca de alta montaña, Flujo de sedimentos, Modelo hidrológico, Modelo sedimentológico, Modelo SWAT, MODIS, Cobertura nival, Valparaíso, Chile.

ABSTRACT

Water is an essential element for the development of the country, but its obtaining in mountain basins is subject to important erosion processes that affect and prevent the correct use of water. Therefore, it becomes important to monitor and control both, the flow of water and the flow of sediments. Unfortunately, these measurements are rarely made, having to resort to estimating these flows based on hydrological models.

This study aims to calibrate and validate the SWAT model in a high mountain basin located in the Valparaíso region, Chile, for liquid and solid flow, based on the data measured at the Río Aconcagua station in Chacabuquito, allowing to evaluate its performance and applicability in the generation of future scenarios. The information necessary for the application of the model was collected from satellite tools and other sources available online. In turn, MODIS images of snow cover were used as an additional method of model validation.

The model performed well on a monthly basis, for liquid flow and solid flow, but there is an underestimation in peak values, so the simulated maximum values tend to be lower than the observed maximum values. At the daily level the performance is similar for the liquid flow, but it presents failures in the solid flow due to the increase in the gap between the simulated and observed peak values, in some cases reaching intolerable levels. In the case of snow coverage, a very good performance was achieved.

It is considered that the model is applicable to high mountain basins due to a more than acceptable performance in the different instances carried out, obtaining better results in the liquid flow over the solid. It is also verified that modeling is possible through satellite tools and online information sources. However, it is always preferable and convenient to have on-site records.

Keywords: Erosion, High Mountain Basin, Sediment Flow, Hydrological Model, Sedimentological Model, SWAT Model, MODIS, Snow Cover, Valparaíso, Chile.

GLOSARIO

- AppEEARS:** Aplicación para extraer y explorar muestras listas para análisis (del inglés Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples).
- ARS:** Servicio de investigación agrícola (del inglés Agricultural Research Service).
- AR5:** Quinto informe de evaluación del IPCC (del inglés Fifth Assessment Report).
- CFSR:** Sistema de reanálisis de pronóstico climático (del inglés Climate Forecast System Reanalysis).
- CMIP5:** Fase 5 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (del inglés Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).
- CMNUCC:** Convención Marco de las Naciones unidas sobre el Cambio Climático.
- CREAMS:** Sistema de manejo de químicos, escorrentía y erosión para agricultura (del inglés Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems).
- (CR)²:** Centro del Clima y la Resiliencia.
- DEM:** Modelo digital de elevación (del inglés Digital Elevation Model).
- DGA:** Dirección General de Aguas.
- EPM:** Método de erosión potencial (del inglés Erosion Potential Method).
- FAO:** Organización de comida y agricultura de las Naciones Unidas (del inglés Food and Agriculture Organization).
- GCM:** Simulación climática global (del inglés Global Climate Models).
- GEI:** Gases de efecto invernadero.
- GLM:** Modelo lineal generalizado (del inglés General Linear Model).
- HRU:** Unidad de respuesta hidrológica (del inglés Hydrologic Response Unit).
- IDE:** Infraestructura de datos geoespaciales de Chile.
- IPCC:** Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (del inglés Intergovernmental Panel on Climate Change).
- KGE:** Función objetivo de eficiencia Kling-Gupta.
- MODIS:** Herramienta satelital (del inglés Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).
- MUSLE:** Ecuación universal de pérdida de suelo modificada (del inglés Modified Universal Soil Loss Equation).
- NCEP:** Centros nacionales para la predicción del clima (del inglés National Centers for Environmental Prediction).
- NSE:** Función objetivo de eficiencia Nash-Sutcliffe.
- QGIS:** Software libre de información geográfica.
- RCM:** Simulación climática regional (del inglés Regional Climate Models).
- RCP:** Trayectorias de concentración representativas (del inglés Representative Concentration Pathways).

RegCM4: Uno de los Sistemas de Modelado Climático Regional existentes (del inglés Regional Climate Model).

RUSLE: Ecuación universal de pérdida de suelo revisada (del inglés Revised Universal Soil Loss Equation).

RStudio: Software libre de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R.

SRES: Reporte especial sobre escenarios de emisión (del inglés Special Reports on Emission Scenarios).

SWAT: Herramienta de tasación del suelo y agua (del inglés Soil and Water Assessment Tool).

SWRRB: Simulador de Recursos hídricos en cuencas rurales (del inglés Simulator for Water Resources in Rural Basins).

USDA: Departamento de agricultura de los Estados Unidos (del inglés United States Department of Agriculture).

INDICE DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivo General.....	2
1.2.	Objetivos Específicos	2
1.3.	Estructura del Documento	2
2.	Caracterización de la Zona de Estudio.....	4
2.1.	Ubicación y Descripción	4
2.2.	Clima	8
2.3.	Precipitaciones.....	8
2.4.	Comportamiento Fluvial.....	10
2.5.	Datos Observados Estación Río Aconcagua en Chacabuquito	11
3.	Revisión Bibliográfica.....	13
4.	Modelo SWAT	14
4.1.	Introducción.....	14
4.2.	Descripción General	15
4.3.	Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico.....	15
4.4.	Clima	18
4.5.	Nieve.....	18
4.6.	Hidrología.....	21
4.7.	Erosión.....	24
4.8.	Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico	25
4.9.	Albedo	26
5.	Modelo Hidrológico	28
5.1.	Recopilación y Preparación Datos de Entrada	28
5.1.1	Tipos de Datos.....	28
5.1.2	Modelo Digital de Elevación (DEM)	29
5.1.3	Punto de Salida de la Cuenca	30
5.1.4	Mapa de Uso de Suelo.....	30
5.1.5	Mapa de Tipo de Suelo.....	31
5.1.6	Variables Climáticas	31
5.2.	Procedimiento Modelo SWAT	33

5.2.1	Definición Cuenca y Subcuencas	33
5.2.2	Definición HRU	34
5.2.3	Datos de Salida.....	34
5.3.	Calibración Modelo SWAT.....	35
5.3.1	SWATCUP.....	35
5.3.2	Periodos.....	36
5.3.3	Parámetros Calibrados.....	36
5.3.4	Modelo de Calibración SUFI-2	43
5.3.5	Función Objetivo.....	44
6.	Datos Adicionales de Validación	46
6.1.	Cobertura Nival	46
6.2.	Albedo	46
7.	Proyección Cambio Climático	47
7.1.	Cambio Climático.....	47
7.1.1	Descripción.....	47
7.1.2	Escenarios RCP	49
7.1.3	Efectos del Cambio Climático.....	51
7.1.4	Impacto en Chile	52
7.2.	Datos Futuros Simulados.....	55
7.2.1	Simulación Local.....	56
7.2.2	Simulación Global.....	58
7.3.	Downscaling (DS)	60
7.3.1	Método GLM.....	61
7.3.2	Método Analógico.....	61
7.3.3	Validación	61
8.	Resultados Modelo Hidrológico.....	65
8.1.	Modelo Hidrológico Caudal Liquido y Solido Escala Mensual.....	65
8.2.	Modelo Hidrológico Caudal Liquido y Solido Escala Diaria.....	66
8.3.	Modelo Hidrológico Caudal Liquido Escala Diaria	68
8.4.	Cobertura Nival	69
8.5.	Albedo	69
8.6.	Precipitación y Temperatura Subescalados	70

8.7.	Modelo Hidrológico Futuro.....	74
9.	Análisis.....	78
9.1.	Modelo Hidrológico Caudal Liquido y Solido Escala Mensual.....	78
9.2.	Modelo Hidrológico Caudal Liquido y Solido Escala Diaria.....	78
9.3.	Cobertura Nival	79
9.4.	Albedo	80
9.5.	Precipitación y Temperatura Subescalados	80
9.6.	Modelo Hidrológico Futuro.....	81
10.	Conclusiones y Comentarios.....	83
11.	Bibliografía.....	86
12.	Anexo 1 – Datos Herramienta HydroCALC.....	88
13.	Anexo 2 – Datos de Entrada Usados en el Modelo.....	90
14.	Anexo 3 – Resultados Métodos Subescalado.....	94
15.	Anexo 4 – Resultados Modelo Periodo Futuro	99

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Limites Cuenca Río Aconcagua, Región de Valparaíso.	4
Figura 2-2: Limites de la Cuenca de Alta Montaña del Río Aconcagua analizada en este estudio.	5
Figura 2-3: Curva Hipsométrica de la Cuenca Analizada.	6
Figura 2-4: Frecuencia de Altitudes de la Cuenca Analizada.	6
Figura 2-5: Modelo Digital de Elevación (DEM) de la Cuenca Analizada (las líneas azules muestran los cauces considerados).	7
Figura 2-6: Curva Variación Estacional Estación Río Aconcagua en Chacabucito.	10
Figura 2-7: Variación temporal valores observados de caudal líquido y concentración en la estación Río Aconcagua en Chacabucito.	12
Figura 4-1: Representación esquemática del ciclo hidrológico (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009). ...	16
Figura 4-2: Ciclo de comandos HRU/Subcuenca (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009).	17
Figura 4-3: Curvas cobertura nival para distintos valores de sno_{50cov} en función de SNO_{100} (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009).	20
Figura 4-4: Esquema de posibles caminos disponibles para el agua en SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009).	22
Figura 4-5: Procesos modelados en el flujo por SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009).	25
Figura 5-1: Representación visual y forma de organización de datos para archivos tipo vectorial y tipo ráster (izquierda y derecha respectivamente) (Castro, 2019).	29
Figura 5-2: Datos grillados precipitación y temperatura (CR) ² , en rojo se muestran los pixeles usados como estaciones ficticias.	32
Figura 5-3: Cuenca y subcuencas definidas por el modelo, el triángulo azul corresponde al punto de salida de la cuenca.	33
Figura 5-4: A la izquierda promedio anual de producción de sedimentos en toneladas por hectárea. A la derecha promedio anual de nieve acumulada en milímetros.	35
Figura 5-5: Relación entre la incertidumbre de los parámetros y la incertidumbre de la predicción. Un valor singular de un parámetro lleva a una única respuesta (a), mientras que la incertidumbre de un parámetro lleva a incertidumbre en la predicción representada por el 95PPU (b), donde cuanto mayor sea la incertidumbre mayor será el 95PPU (c). Si el 95PPU no coincide con los valores medidos, se debe revisar el modelo (d) (Mikayilov, y otros, 2007).	44
Figura 7-1: Variación del promedio global de temperatura en superficie terrestre y oceánica combinada respecto del promedio del periodo 1986 a 2005, cada color indica un conjunto de datos distinto (IPCC, 2014).	47
Figura 7-2: Promedio anual global del cambio del nivel del mar con respecto al promedio del conjunto de datos de más larga duración entre 1986 y 2005, cada color indica un conjunto de	

datos distinto. Todos los conjuntos están alineados para tener el mismo valor en 1993, primer año con altimetría por satélite (línea roja) (IPCC, 2014).	48
Figura 7-3: Concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero dióxido de carbono (CO ₂ , verde), metano (CH ₄ , naranja) y óxido nitroso (N ₂ O, rojo) determinados a partir de testigos de hielo (puntos) y mediciones atmosféricas directas (líneas) (IPCC, 2014).	48
Figura 7-4: Emisiones antropógenas globales de CO ₂ procedentes de la silvicultura y otros usos de suelo y de la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y la quema en antorcha (IPCC, 2014).	49
Figura 7-5: Emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero para los escenarios SRES (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).	50
Figura 7-6: Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂) de los escenarios RCP y las categorías de escenarios del GTIII (IPCC, 2014).	51
Figura 7-7: Incrementos de temperatura para el periodo 2031-2050 con respecto al periodo 1961-1990 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).	53
Figura 7-8: Cambios porcentuales de precipitación para el periodo 1961-1990 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 en los periodos 2011-2030 y 2031-2050 (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).	54
Figura 7-9: Comparación precipitación datos históricos y datos simulación local del CR2 periodo 1979-2039.	56
Figura 7-10: Comparación temperatura mínima datos históricos y datos simulación local del CR2 periodo 1979-2039.	57
Figura 7-11: Comparación temperatura máxima datos históricos y datos simulación local del CR2 periodo 1979-2039.	57
Figura 7-12: Precipitación periodo 1990-2005 del CR2 y simulación CCSM4.	59
Figura 7-13: Precipitación periodo 1990-2005 del CR2 y simulación CSIRO.	59
Figura 7-14: Precipitación periodo 1990-2005 del CR2 y simulación IPSL.	59
Figura 7-15: Resultados validación cruzada precipitación para los 7 métodos probados (predicho/observado).	62
Figura 7-16: Resultados validación cruzada temperatura para los 7 métodos probados (predicho/observado).	63
Figura 7-17: Temperatura promedio observada junto a los valores subescalados mediante los distintos métodos utilizados.	64
Figura 8-1: Caudal líquido observado y simulado periodo 1989-2011, escala mensual.	65
Figura 8-2: Caudal sólido observado y simulado periodo 1989-2011, escala mensual.	66
Figura 8-3: Caudal líquido observado y simulado periodo de calibración 1989-2018, escala diaria.	67
Figura 8-4: Caudal sólido observado y simulado periodo de calibración 1989-2018, escala diaria.	67
Figura 8-5: Caudal líquido observado y simulado periodo 1992-2019, escala diaria.	68
Figura 8-6: Cobertura nival imágenes MODIS y simulado periodo 2000-2019.	69
Figura 8-7: Albedo promedio de la cuenca en estudio modelado y observado para el periodo 2000-2019.	70
Figura 8-8: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).	70

Figura 8-9: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	71
Figura 8-10: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	71
Figura 8-11: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	71
Figura 8-12: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	72
Figura 8-13: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	72
Figura 8-14: Curva variación estacional precipitación datos CR2 y CCSM4 subescalados.	73
Figura 8-15: Curva variación estacional temperatura mínima datos CR2 y CCSM4 subescalados.	73
Figura 8-16: Curva variación estacional temperatura máxima datos CR2 y CCSM4 subescalados.	73
Figura 8-17: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala diaria.....	74
Figura 8-18: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala diaria.	74
Figura 8-19: Cobertura nival periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala diaria.....	75
Figura 8-20: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala mensual.	75
Figura 8-21: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala mensual.	76
Figura 8-22: Cobertura nival periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala mensual.	76
Figura 8-23: Curva variación estacional caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 y M6 para escenarios RCP2.6 y RCP8.5.....	76
Figura 8-24: Curva variación estacional caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 y M6 para escenarios RCP2.6 y RCP8.5.....	77
Figura 8-25: Curva variación estacional cobertura nival periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 y M6 para escenarios RCP2.6 y RCP8.5.....	77
Figura 13-1: DEM ingresado al modelo SWAT.	90
Figura 13-2: Mapa uso de suelo ingresado al modelo SWAT. En orden descendente corresponden a zona infértil, industrial, agua, humedal mixto, hielo (colocado como agua debido a la falta de un código específico), arbusto, agricultura genérica y bosque mixto.....	91
Figura 13-3: Mapa tipo de suelo ingresado al modelo SWAT. En orden descendente corresponden a suelo franco, suelo franco-arcilloso-arenoso y suelo arcilloso.	92
Figura 13-4: Datos de precipitación y temperatura ingresados al modelo SWAT.	93
Figura 14-1: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M2 (2020-2040).....	94
Figura 14-2: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M2 (2020-2040).....	94

Figura 14-3: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	95
Figura 14-4: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	95
Figura 14-5: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	95
Figura 14-6: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	96
Figura 14-7: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	96
Figura 14-8: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).....	96
Figura 14-9: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M6 (2020-2040).....	97
Figura 14-10: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M6 (2020-2040).....	97
Figura 14-11: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M6 (2020-2040).....	97
Figura 14-12: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M6 (2020-2040).....	98
Figura 14-13: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M6 (2020-2040).....	98
Figura 14-14: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M6 (2020-2040).....	98
Figura 15-1: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	99
Figura 15-2: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	99
Figura 15-3: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	99
Figura 15-4: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	100
Figura 15-5: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	100
Figura 15-6: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	100
Figura 15-7: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	101
Figura 15-8: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	101
Figura 15-9: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.	101
Figura 15-10: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.....	102

Figura 15-11: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5. 102

Figura 15-12: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.....102

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Registros de Precipitación Total Anual de Estaciones Existentes en la Zona de Estudio.....	9
Tabla 2-2: Caudales Mensuales para Distintas Probabilidades de Excedencia Estación Río Aconcagua en Chacabucuito, la última fila corresponde a la distribución utilizada (G: Gumbel, L2: Log-Normal 2 parámetros, L3: Log-Normal 3 parámetros) (Dirección General de Aguas, 2004).....	10
Tabla 5-1: Usos de tierra genéricos incluidos en la base de datos de SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012, 2012).....	30
Tabla 5-2: Periodos considerados para la modelación, separados en calibración y validación.	36
Tabla 5-3: Parámetros calibrados a escala mensual y sus valores para cada periodo, en verde parámetros sensibles (*parámetro calibrado de forma manual).....	37
Tabla 5-4: Parámetros calibrados a escala diaria y sus valores para cada periodo, en verde parámetros sensibles (*parámetro calibrado de forma manual).....	38
Tabla 7-1: Características escenarios RCP (Rivera, Ochoa, & Salguero, 2020).	50
Tabla 7-2: Simulaciones globales y sus instituciones asociadas (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2018).....	58
Tabla 7-3: Resumen de las configuraciones de predictores (Bedia, y otros, 2020).	60
Tabla 7-4: Índices utilizados para validar el subescalado de las precipitaciones (Bedia, y otros, 2020).....	62
Tabla 8-1: Parámetros correlación caudal líquido y solido modelo hidrológico a escala mensual periodo 1989-2011.	65
Tabla 8-2: Parámetros correlación caudal líquido y solido modelo hidrológico a escala diaria periodo 1989-2018.	66
Tabla 8-3: Parámetros correlación caudal liquido modelo hidrológico a escala diaria periodo 1992-2019.....	68
Tabla 8-4: Parámetros correlación cobertura nival modelo hidrológico a escala diaria periodo 2000-2019.....	69
Tabla 12-1: Datos varios de la cuenca entregados por la herramienta HidroCALC.....	88

1. Introducción

La erosión del suelo puede ser definida como el desgaste de la superficie terrestre por distintas fuerzas físicas que debilitan, desprenden y remueven suelo o material geológico desde un punto en la superficie de la tierra para ser depositado en otro lugar (Efthimiou et al., 2017). Este fenómeno es el responsable del aumento en la turbidez de los ríos y a mayor escala de cambios geomorfológicos, tanto río arriba como río abajo, debido al traslado de material particulado. Siendo sus efectos apreciables en áreas cultivadas debido a la remoción de la capa fértil, sistemas hidroeléctricos debido a daños por sedimentos, los flujos de agua debido al material depositado en la cama de los ríos, la calidad del agua debido al aumento de sedimentos y el entorno natural debido a la distorsión del paisaje provocada por el traslado de partículas río abajo (Efthimiou et al., 2017).

La erosión es un fenómeno muy presente en cuencas montañosas, las que tienen vital importancia a lo largo del mundo en la obtención de agua para luego ser usada en la generación de energía hidroeléctrica, agricultura o su posterior potabilización, entre otros (Tuo et al., 2018), usos que se pueden ver seriamente afectados por el aumento de sedimentos, obligando en muchas ocasiones a modificar o integrar nuevos procesos que permitan mantener la calidad del agua necesaria para su correcto funcionamiento. Es debido a lo anterior, que cobra gran importancia el monitorear y controlar continuamente el flujo de sedimentos permitiendo registrar los cambios de calidad que se puedan producir a lo largo del tiempo.

En la mayoría de los casos este monitoreo no ocurre, debido a lo costoso y difícil de medir el flujo de sedimentos, además de que normalmente se privilegia la medición de caudal. Para hacer frente a esta falta de información, en la literatura existen diversos modelos (Merrit et al., 2003) para estimar este flujo en función de distintas características de las cuencas, tales como pendiente, largo del cauce, tipo de suelo, cobertura del suelo, precipitaciones, temperatura (Grusson et al., 2015 y Stehr et al., 2009). Estos modelos son cada vez más utilizados abordando una amplia gama de problemas hídricos en todo el mundo, como visualizar los efectos de distintas alternativas para mejorar la gestión del agua o variaciones debido al cambio climático en la magnitud del flujo y la calidad de este (Gassman et al., 2014). El grado de exactitud y aplicabilidad que tengan variará en cada caso debiendo ser validados antes de que puedan ser usados.

En este trabajo se busca implementar el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Neitsch et al., 2012), con el fin de evaluar su aplicabilidad en el pronóstico de flujo de sedimentos en la parte alta de la cuenca del Río Aconcagua. Específicamente, se usará como punto de control la estación Río Aconcagua en Chacabuquito, debido a que esta presenta una extensa estadística de caudales y flujo de sedimentos, posibilitando la calibración y validación del modelo. Se buscará además utilizar dicho modelo para realizar prospecciones de cambio climático tanto en términos de caudales como sedimentos. Esta memoria es parte del Proyecto Interno USM Multidisciplinario “Modelación hidrológica en la cuenca alta del río Aconcagua

incorporando el impacto de la contaminación atmosférica sobre el manto nival cuantificada mediante datos in-situ”.

1.1. Objetivo General

El objetivo general consiste en calibrar y validar el modelo SWAT en una cuenca de alta montaña en base a la estación Río Aconcagua en Chacabucuito, respecto a caudales y flujos de sedimentos, evaluando su desempeño y su aplicabilidad en la generación de escenarios futuros.

1.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Usar herramientas satelitales y otras fuentes de información disponibles de manera online para la obtención de los datos necesarios que permitan calibrar y validar el modelo.
- Determinar los parámetros que controlan de forma más predominante el comportamiento de este tipo de cuencas en función de los resultados obtenidos.
- Analizar los parámetros del modelo correspondientes a dinámica nival, comparando en lo posible con datos de terreno y satelitales.
- Analizar los datos históricos de Chacabucuito en búsqueda de patrones o cambios en los flujos medidos a lo largo del tiempo.
- Identificar y cuantificar potenciales efectos del cambio climático asociados a escorrentía y flujo de sedimentos en la parte alta de la cuenca del Río Aconcagua.

1.3. Estructura del Documento

El presente documento se ha organizado en 15 Capítulos, los cuales se reseñan brevemente a continuación:

En el Capítulo 2 se presenta y describe la zona de estudio, entregando sus características climatológicas, geomorfológicas e hidrológicas.

En el Capítulo 3 se describe el procedimiento de búsqueda y elección que llevo a la utilización del modelo SWAT, además de las referencias bibliográficas principales que ayudaron a guiar el desarrollo del estudio.

En el Capítulo 4 se presenta y describe el modelo SWAT, explicando sus características y funcionamiento a nivel general, ahondando en las áreas del modelo que se consideran más relevantes para este estudio como lo es la simulación nival.

En el Capítulo 5 se presenta el modelo hidrológico confeccionado, este capítulo se encuentra subdividido en tres secciones que corresponden a los datos de entrada utilizados, el procedimiento de ejecución del modelo y el proceso de calibración del mismo.

En el Capítulo 6 se presentan los datos de dos variables consideradas para validar el modelo, que corresponden a la cobertura nival y el albedo, las cuales se analizaron de forma posterior.

En el Capítulo 7 se describe la proyección de cambio climático realizada, este capítulo se encuentra subdividido en tres secciones que corresponden a la descripción de este fenómeno y sus efectos, los datos utilizados y los procedimientos realizados para permitir su uso.

En el Capítulo 8 se presentan los resultados obtenidos del modelo hidrológico, así como las validaciones realizadas y la proyección de cambio climático resultante.

En el Capítulo 9 se presenta un análisis de los resultados obtenidos en el Capítulo 8.

En el Capítulo 10 se presentan las conclusiones y comentarios resultantes de este estudio.

En los Capítulos 11 al 15 se presenta la bibliografía utilizada y los anexos complementarios al estudio que muestran la totalidad de los datos obtenidos.

2. Caracterización de la Zona de Estudio

2.1. Ubicación y Descripción

La cuenca analizada en este estudio corresponde a la zona de alta montaña del Río Aconcagua, la cual fue delimitada considerando como punto de control la estación “Río Aconcagua en Chacabuquito” debido a su extenso registro de caudales y flujo de sedimentos. La **Figura 2-1** muestra la cuenca completa del Río Aconcagua, mientras que la **Figura 2-2** muestra la cuenca considerada en este estudio.

La cuenca en estudio está ubicada en su totalidad en la provincia de Los Andes, región de Valparaíso, Chile. El punto de descarga como se mencionó anteriormente corresponde a la estación “Río Aconcagua en Chacabuquito” ubicada en las coordenadas 32°51'S 70°30'O.

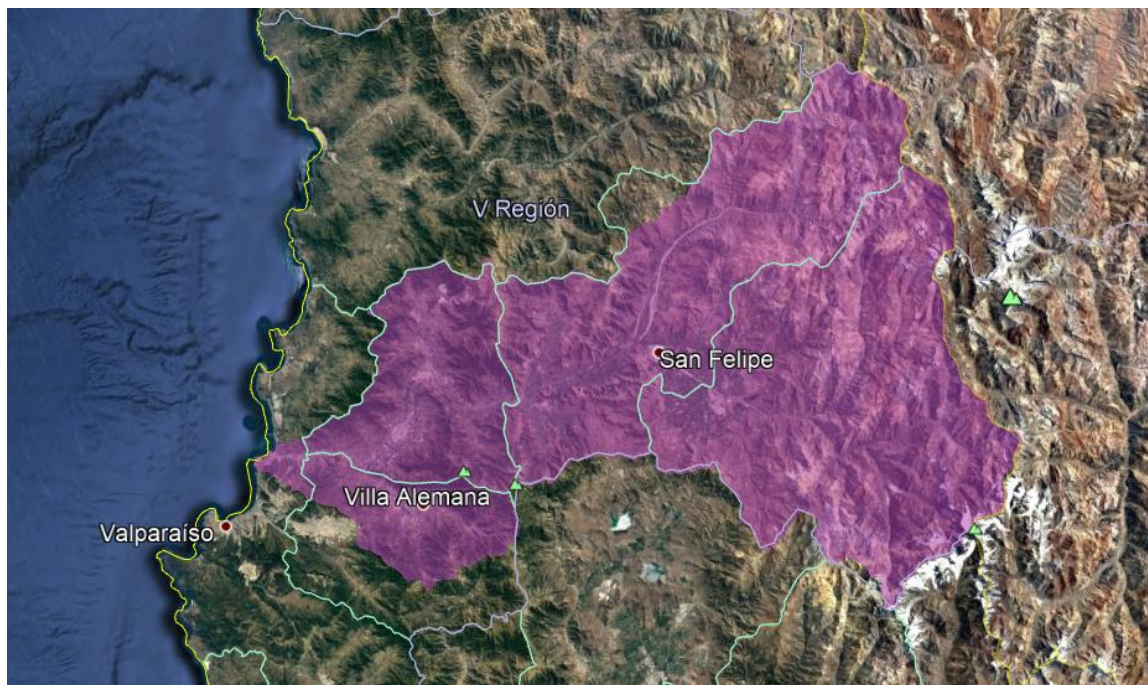


Figura 2-1: Límites Cuenca Río Aconcagua, Región de Valparaíso.



Figura 2-2: Límites de la Cuenca de Alta Montaña del Río Aconcagua analizada en este estudio.

El área total de la cuenca es de aproximadamente 2077 [Km²], con una longitud de cauce máxima de aproximadamente 80 [Km] y una altura media de 3178 [msnm], siendo 948 [msnm] su punto más bajo y 5922 [msnm] su punto más alto. En la **Figura 2-3** se muestra la curva hipsométrica de la cuenca y en la **Figura 2-4** la frecuencia de altitudes, mientras que la **Figura 2-5** muestra un modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca donde se observan también el cauce, que se mueve en un rango desde los 900 [msnm] hasta los 3000 [msnm].

Para más datos de la cuenca, en el Anexo 1 – Datos Herramienta HidroCALC se pueden consultar tablas con la información entregada por la herramienta HidroCALC (Paredes, 2014) que fue utilizada en este estudio para definir las características de la cuenca.

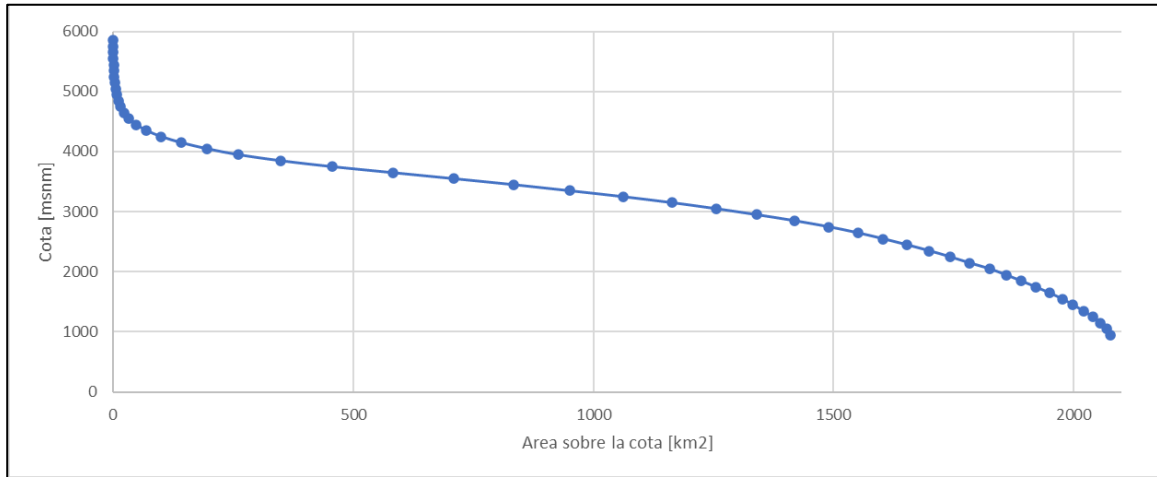


Figura 2-3: Curva Hipsométrica de la Cuenca Analizada.

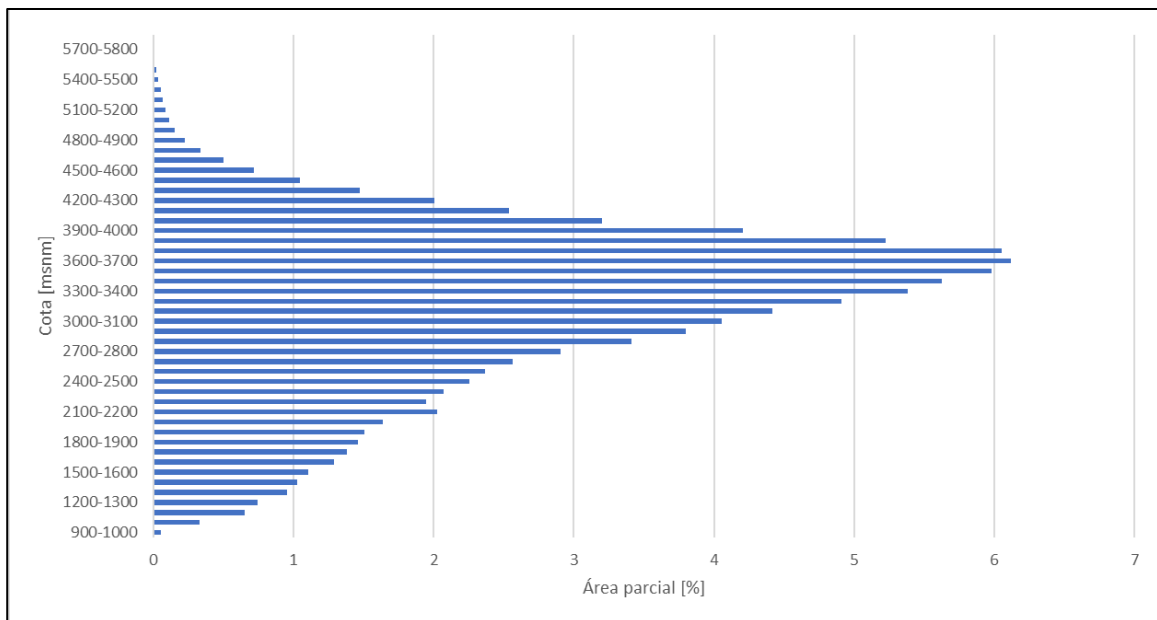


Figura 2-4: Frecuencia de Altitudes de la Cuenca Analizada.

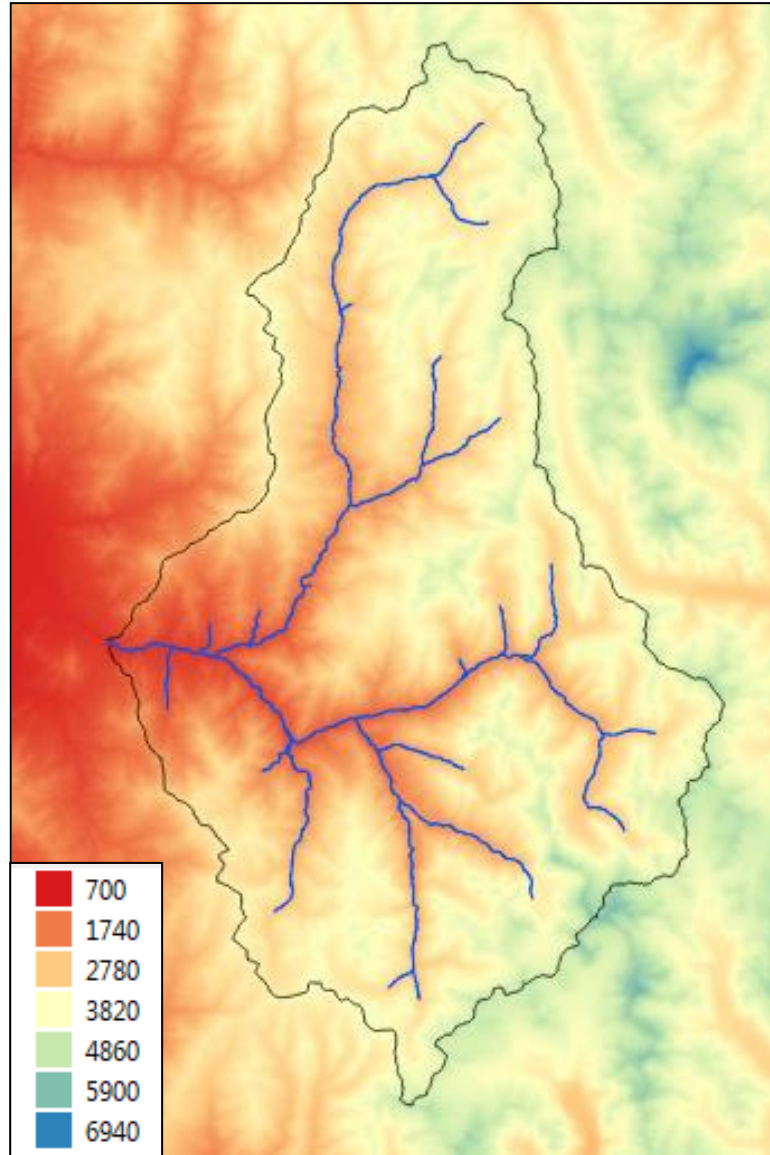


Figura 2-5: Modelo Digital de Elevación (DEM) de la Cuenca Analizada (las líneas azules muestran los cauces considerados).

2.2. Clima

Los climas que se distinguen en la cuenca del Río Aconcagua corresponden a Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes (Dirección General de Aguas, 2004), los cuales se describen a continuación:

- **Clima templado mediterráneo con estación seca prolongada:** Se desarrolla prácticamente en toda la cuenca del río Aconcagua. Su característica principal es la presencia de una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que llegan a cero grados. Los Andes registra una temperatura media anual de 15.2 [°C] pero los contrastes térmicos son fuertes. En verano las máximas alcanzan valores superiores a 27 [°C] durante el día. En los sectores elevados, las precipitaciones aumentan alcanzando valores medios anuales de 467 [mm] y temperaturas medias anuales de 14.1 [°C].
- **Clima frío de altura:** Se localiza en la Cordillera de los Andes por sobre los 3.000 metros de altura. Las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas caracterizan este tipo climático, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo de tipo permanentes en cumbres y quebradas de la alta Cordillera.

2.3. Precipitaciones

Existen cuatro estaciones meteorológicas en la cuenca que son “Río Aconcagua en Chacabucito”, “Canal Colorado en Bocatoma”, “Río Aconcagua en Río Blanco” y “Río Juncal en Juncal”, pero los registros de las últimas tres se remontan solamente a 2015, por lo que solo la estación Río Aconcagua en Chacabucito permite una representatividad de la zona con registros que comienzan en el año 2000. Estas mediciones indican un promedio de 254 mm anuales concentrando el 74% de estas lluvias en los meses de mayo, junio, julio y agosto, la cual se acumula como nieve que se derretirá en verano. La **Tabla 2-1** muestra los registros de las estaciones mencionadas anteriormente, incluyendo también la estación “Putando en los Patos”, la cual se encuentra en las cercanías de la zona de estudio.

Tabla 2-1: Registros de Precipitación Total Anual de Estaciones Existentes en la Zona de Estudio.

Fecha	Precipitación Total Anual [mm]				
	Río Aconcagua en Chacabuquito	Río Aconcagua en Rio Blanco	Río Juncal en Juncal	Canal Colorado en Bocatoma	Putando en los Patos
2000	426.8				
2001	295.9				
2002	478.7				515.9
2003	171.8				217.6
2004	336.4				292.7
2005	418.3				380.4
2006	359.1				296.3
2007	175.2				188.4
2008	345.7				348.0
2009	253.3				17.8
2010	220.7				95.7
2011	145.3				157.6
2012	209.9				103.8
2013	142.1				124.3
2014	138.4				117.7
2015	252.2	427.1	256.0	413.8	231.6
2016	328.5	568.2	290.2	376.5	329.9
2017	233.0	256.2	231.8	245.8	196.3
2018	120.7	253.0	188.6	223.8	122.5
2019	23.6	97.0	59.4	80.6	29.3

2.4. Comportamiento Fluvial

Al considerar la totalidad de la cuenca del Río Aconcagua se presenta un comportamiento mixto Nivo-Pluvial, pero debido a que en este estudio se analiza solamente la zona de alta montaña se registra un comportamiento puramente Nival, registrándose los máximos caudales entre los meses de noviembre y febrero debido a los deshielos, siendo en años secos el periodo de menores caudales correspondiente a los meses entre mayo y agosto (Dirección General de Aguas, 2004). La **Tabla 2-2** muestra el régimen registrado en la estación Río Aconcagua en Chacabucito, los cuales se muestran graficados en la **Figura 2-6**.

Tabla 2-2: Caudales Mensuales para Distintas Probabilidades de Excedencia Estación Río Aconcagua en Chacabucito, la última fila corresponde a la distribución utilizada (G: Gumbel, L2: Log-Normal 2 parámetros, L3: Log-Normal 3 parámetros) (Dirección General de Aguas, 2004).

Pex (%)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Pex 5%	25.305	22	24.497	28.204	28.727	41.324	62.154	110.141	174.465	154.319	81.776	47.254
Pex 10%	22.42	19.384	21.321	23.94	24.854	34.614	52.285	95.593	141.253	114.419	65.192	38.436
Pex 20%	19.413	16.656	18.01	19.629	20.817	27.93	42.405	79.675	109.112	81.336	50.426	30.65
Pex 50%	14.871	12.537	13.01	13.431	14.719	18.533	28.417	54.203	65.928	46.247	32.976	21.565
Pex 85%	10.836	8.877	8.569	8.416	9.303	11.183	17.356	31.177	34.35	28.273	22.448	16.188
Pex 95%	9.005	7.217	6.553	6.396	6.845	8.312	12.992	21.459	22.759	23.56	19.222	14.57
Dist	G	G	G	L2	G	L2	L2	G2	L3	L3	L3	L3

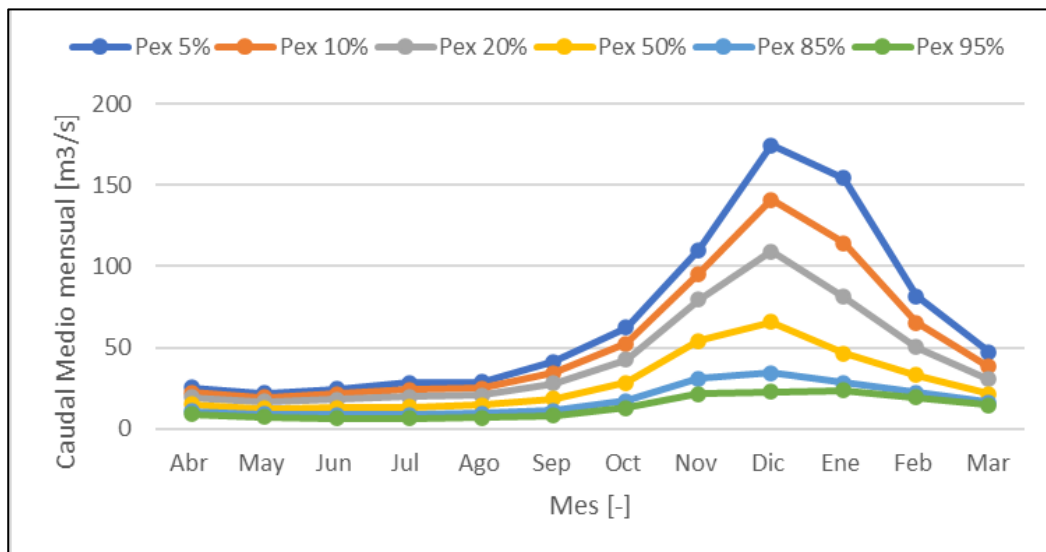


Figura 2-6: Curva Variación Estacional Estación Río Aconcagua en Chacabucito.

2.5. Datos Observados Estación Río Aconcagua en Chacabuquito

En la **Figura 2-7** se muestran todas las mediciones registradas en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito, que serán los datos utilizados para calibrar y verificar el correcto funcionamiento del modelo hidrológico a realizar. Estas mediciones corresponden a un periodo que se extiende desde mayo de 1966 hasta septiembre de 2018, si bien la estación sigue en funcionamiento, los registros no han sido actualizados.

Si observamos el grafico, notamos que el caudal liquido posee periodos de tiempo con caudales mayores que otros, aun así, no pareciera seguir ningún patrón más que el hecho de que existen épocas con mayor cantidad de agua y épocas más secas.

Sin embargo, para el caso de la concentración y por ende del caudal sólido, existen periodos que claramente poseen magnitudes mayores con respecto a otros periodos. Desde el año 1966 hasta el año 1978 se mantiene una amplitud bastante constante, la cual disminuye y se vuelve mucho más irregular desde el año 1979. Alrededor del año 2000 podemos apreciar una clara disminución de las amplitudes manteniéndose así hasta el año 2011, donde desde 2012 los valores se disparan alcanzando incluso en dos ocasiones amplitudes superiores a cualquier registro previo de periodos anteriores, manteniéndose así hasta el final de los registros en 2018.

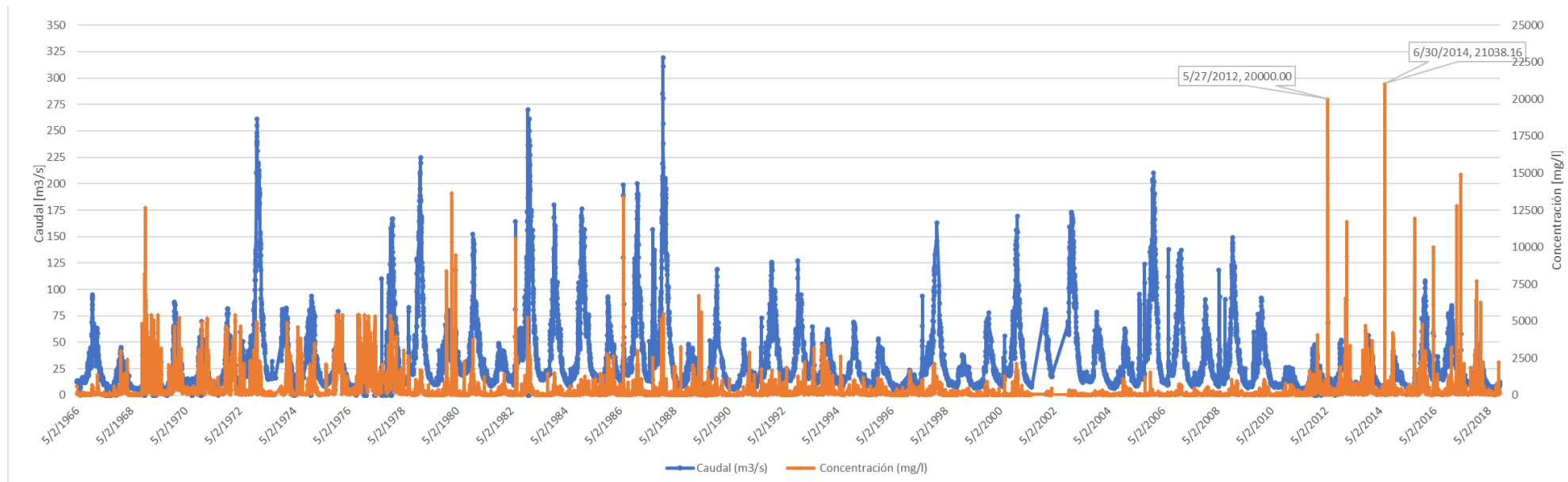


Figura 2-7: Variación temporal valores observados de caudal líquido y concentración en la estación Río Aconcagua en Chacabuco.

3. Revisión Bibliográfica

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica en busca de modelos sedimentológicos cuyos parámetros y funcionamiento se adecuarán a las características de la cuenca en estudio, que contara además con una amplia cantidad de documentación, para esto se recurrió a distintas publicaciones que revisan y clasifican los distintos modelos existentes (Fu, Merritt, Croke, Weber, & Jakeman, 2018) (Merritt, Letcher, & Jakeman, 2003).

En base a los datos de entrada y procedimientos necesarios para la aplicación de los distintos modelos existentes, se consideró probar con tres modelos de distintos niveles de complejidad, usando de base publicaciones donde estos modelos fueron utilizados y que se asemejaran al caso de estudio. Los modelos seleccionados inicialmente fueron “Erosion Potential Method (EPM)” (Efthimiou, Evdoxia, & Karavitis, 2017) (Auddino, Dominici, & Viscomi, 2015), “BQART model” (Syvitski & Milliman, 2007) y “Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)” (Efthimiou, Evdoxia, & Karavitis, 2017) (Bonilla, Reyes, & Magri, 2010) (George, Singh, Kumar, & Naithani, 2020)

No obstante, los resultados obtenidos con estos modelos no lograron una correcta representación del comportamiento de la cuenca, alcanzando correlaciones muy bajas entre los valores observados y simulados, por lo que se consideró como siguiente paso a seguir el recurrir a un modelo de incluso mayor complejidad y el elegido fue el “Soil and Water Assessment Tool (SWAT)” debido a su amplio uso y documentación disponible.

El trabajo de (Gassman, Sadeghi, & Srinivasan, 2014) hace una recopilación de 22 estudios que han hecho uso de este modelo, los cuales lograron elevadas correlaciones, otorgando evidencia solida de que el modelo SWAT es una herramienta útil para el manejo de problemas relacionados a los recursos hidrológicos y el manejo de las tierras. Mientras que trabajos como (Mikayilov, y otros, 2007) o (Grusson, y otros, 2015) muestran la información necesaria, la forma de aplicación del modelo y los parámetros más relevantes para su calibración, ambos trabajos fueron realizados en cuencas alpinas cuyo flujo es controlado por la nieve.

La aplicación de este modelo entrego resultados preliminares con una correlación mucho mayor que los modelos probados anteriormente, por lo que se decide que, los trabajos posteriores en este estudio serán referidos al modelo SWAT.

4. Modelo SWAT

4.1. Introducción

El modelo SWAT fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola (Agricultural Research Service, ARS), perteneciente al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) durante los años 1990. Fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de tierra en el agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas en cuencas grandes y complejas con distintos tipos de suelo, uso de suelo y condiciones de manejo durante largos periodos de tiempo.

El modelo está basado en procesos físicos, esto significa que no incorpora ecuaciones de regresión que describan relaciones entre las variables de entrada y salida, sino que requiere información específica acerca del clima, propiedades de los suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra. Luego, los procesos físicos asociados con el movimiento de agua, movimiento de sedimentos, crecimiento de cultivos, ciclo de nutrientes, entre otros, que ocurren en la cuenca son directamente entregados por el modelo en base a la información ingresada. Esto permite modelar cuencas sin monitoreo de datos, así como cuantificar el impacto de información opcional agregada al modelo.

Es un modelo de tiempo continuo, cuya escala puede variar desde diaria hasta anual según los requerimientos del usuario. Está diseñado justamente para simular comportamientos continuos, siendo imposible simular eventos singulares o detallados de escorrentía.

SWAT utiliza de manera conjunta características de varios modelos desarrollados por el ARS, siendo una directa actualización del modelo “Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB)”. Otros modelos que contribuyeron significativamente al desarrollo de SWAT fueron “Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS)”, “Ground Water Loading Effects on Agricultural Management Systems (GLEAMS)” y “Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC)”.

En este trabajo, se utilizó la versión 2012 del modelo SWAT (<https://swat.tamu.edu/software/swat-executables/>) mediante una interfaz para el programa QGIS (<https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>) llamada QSWAT (<https://swat.tamu.edu/software/qswat/>), haciendo uso del manual de usuario que entrega la misma página del modelo (Dile, Srinivasan, & George, 2020). Esta interfaz permite la definición de las características hidrológicas de la cuenca, así como la organización y manipulación de la información espacial necesaria para el completo funcionamiento del modelo.

4.2. Descripción General

SWAT posee dos unidades en las que se subdivide la cuenca, el primer nivel es la subcuenca que posee una posición geográfica dentro de la cuenca y esta espacialmente relacionada a las demás, permitiendo el traspaso de caudal, sedimentos y contaminantes entre ellas representando como se mueven estos flujos a lo largo de la cuenca. Estas se definen a partir de un área umbral, que entrega el área mínima de drenaje requerida para formar el origen de un río.

El segundo nivel es la unidad de respuesta hidrológica (HRU) que subdivide las subcuencas, esta corresponde al área total que posee una combinación específica de uso y tipo de suelo y es usada para mantener la heterogeneidad espacial, por lo que cada subcuenca contendrá por lo menos una HRU. Estas no están ubicadas espacialmente dentro de la subcuenca y no existe interacción entre las distintas HRU.

Las variables como contenido de agua, escorrentía superficial y sedimentos se calculan para cada HRU, calculándose luego para las subcuencas como la suma de las HRU que la componen. Las características físicas como la pendiente, el ángulo de inclinación y los datos climáticos se consideran para cada subcuenca. De forma adicional, cada subcuenca cuenta con cauces tributarios y un cauce principal, pudiéndose definir de forma adicional humedales, estanques o represas.

La información ingresada es agrupada y organizada para cada subcuenca en las categorías clima, HRU, estanques/humedales, agua subterránea y canal principal, donde cada HRU se asume tiene propiedades hidrológicas homogéneas.

Finalmente, el cálculo de la hidrología se divide en dos partes principales, 1) Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico y 2) Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico. La cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas que se agregan al cauce en cada subcuenca es controlada por la fase terrestre. Mientras que la fase de enrutamiento determina el movimiento del agua, sedimentos y contaminantes desde la red hídrica hacia la salida de la cuenca.

4.3. Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico, mostrado en la **Figura 4-1**, se basa en la ecuación de balance mostrada a continuación:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (4.1)$$

SW_t : Contenido final de agua en el suelo (mmH₂O).

SW_0 : Contenido inicial de agua en el suelo (mmH₂O).

t : Tiempo (días).

R_{day} : Cantidad de precipitación en un día i (mmH₂O).

Q_{surf} : Cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mmH₂O).

E_a : Cantidad de evapotranspiración en un día i (mmH₂O).

W_{seep} : Cantidad de agua que entra a la zona de vadosa del perfil del suelo en un día i (mmH₂O).

Q_{gw} : Cantidad de flujo de retorno en un día i (mmH₂O).

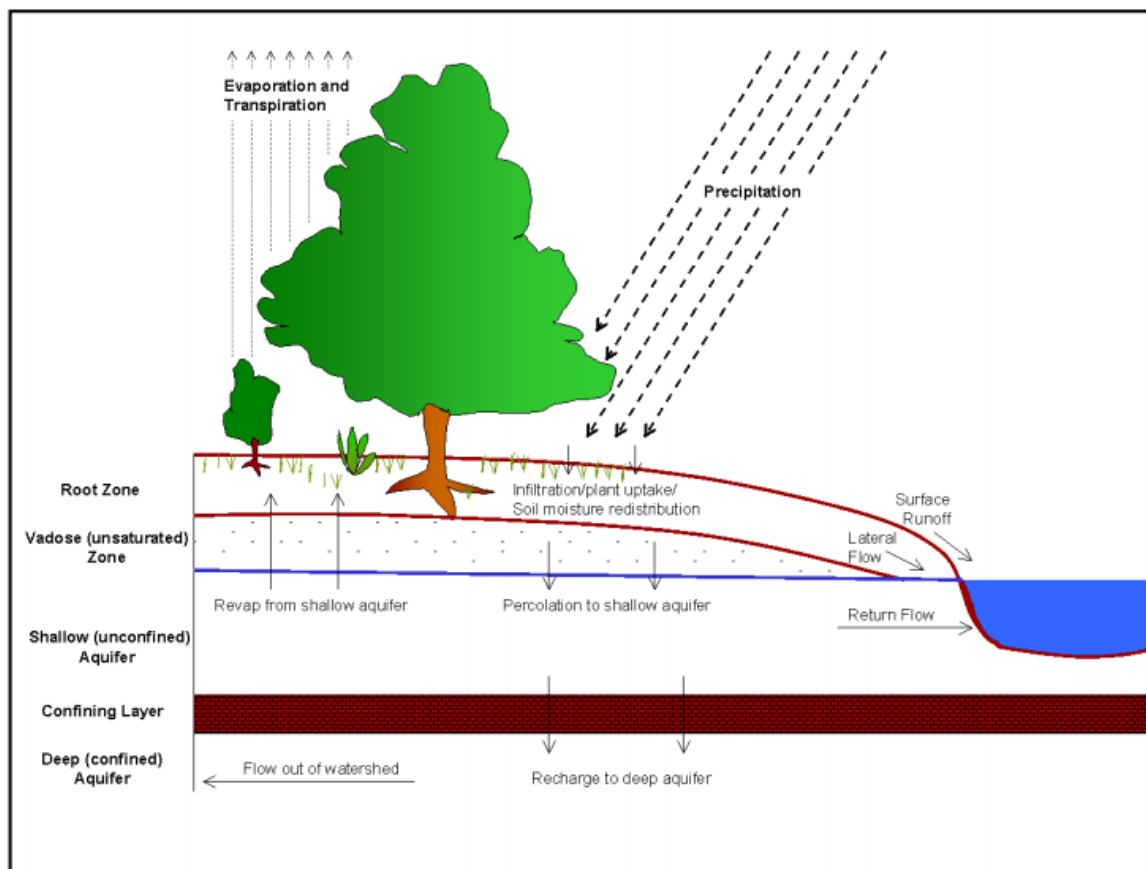


Figura 4-1: Representación esquemática del ciclo hidrológico (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*, 2009).

Las subdivisiones de la cuenca permiten al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración en distintas cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas de forma separada para cada HRU y dirigidas para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto aumenta la precisión y entrega una mejor representación física del balance de agua.

La **Figura 4-2** muestra la secuencia general del proceso usado por SWAT para modelar la fase de tierra del ciclo hidrológico. Los diferentes datos de entrada y procesos de la fase terrestre del ciclo hidrológico son mencionados en secciones posteriores.

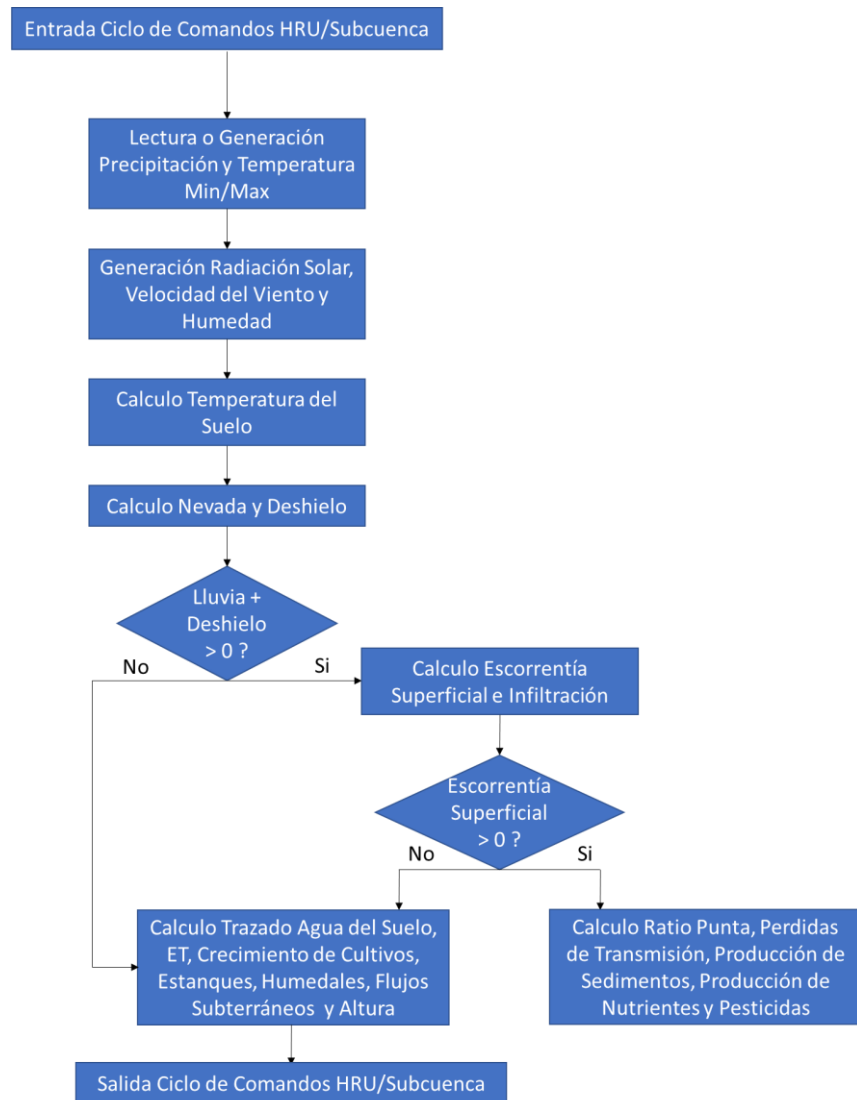


Figura 4-2: Ciclo de comandos HRU/Subcuenca (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*, 2009).

4.4. Clima

El clima de la cuenca proporciona los datos de humedad y energía que controlan el balance de agua y determinan la importancia de los diferentes componentes del ciclo hidrológico.

Las variables climáticas requeridas consisten en precipitación diaria, temperatura mínima y máxima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Estas variables pueden ser tanto registros de datos observados, como datos generados por el mismo modelo durante la simulación. En el caso de necesitar la generación de valores, estos son generados para cada subcuenca de manera independiente y sin correlación entre ellos, herramienta que será usada en este trabajo para la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad.

La radiación solar es generada en base a una distribución normal. Una ecuación de continuidad se agrega al modelo con el fin de justificar variaciones en la radiación causada por condiciones secas o lluviosas, ajustándose hacia abajo al simular condiciones lluviosas y hacia arriba al simular condiciones secas. Los ajustes son hechos de manera que los valores generados mantengan el promedio mensual original.

La velocidad del viento se genera en base a una ecuación exponencial modificada, obteniendo el valor promedio diario.

La humedad relativa usa una distribución triangular para simular el valor promedio diario. Al igual que con la radiación solar, esta es ajustada para tener en cuenta los efectos de condiciones lluviosas y secas.

4.5. Nieve

Los procesos relacionados con el derretimiento de la nieve son representados a nivel de subcuenca, pudiendo subdividirse cada una en hasta 10 bandas de elevación con el fin de incorporar variaciones de precipitación y temperatura según se varia la altitud. La tasa de cambio de precipitación y temperatura es definida por el usuario, siendo la variación de estas calculadas como se muestra a continuación:

$$P_B = P + (Z_B - Z) \frac{P_{laps}}{days_{pcp, yr} * 1000} \quad (4.2)$$

$$T_B = T + (Z_B - Z) \frac{T_{laps}}{1000} \quad (4.3)$$

P: Precipitación de la subcuenca (mmH₂O).
T: Temperatura de la subcuenca (°C).
Z: Elevación de la subcuenca a la que se registran la precipitación y temperatura (m).
P_B: Precipitación ajustada para cada banda de elevación (mmH₂O).
T_B: Temperatura ajustada para cada banda de elevación (°C).
Z_B: Elevación promedio para cada banda de elevación (m).
Days_{pcp,yr}: Promedio anual de días con precipitaciones.

El manto de nieve en SWAT es representado mediante su equivalente en agua (snow wáter equivalent, SWE) (mmH₂O), el cual aumenta con las nevadas (las nevadas ocurren si la temperatura promedio diaria es menor a la temperatura crítica) y disminuye con el derretimiento o sublimación de la nieve como se muestra a continuación:

$$SWE_{day} = SWE_{(day-1)} + SF - SM - E_s \quad (4.4)$$

SWE_{day}: Equivalente de nieve en agua del día i (mmH₂O).
SWE_(day-1): Equivalente de nieve en agua del día anterior al día i (mmH₂O).
SF: Cantidad de agua caída como nieve del día i (mmH₂O).
SM: Cantidad de agua acumulada como nieve que se derritió del día i (mmH₂O).
E_s: Cantidad de agua acumulada como nieve que se sublimó del día i (mmH₂O).

El derretimiento de la nieve es controlado por la temperatura del aire y del manto de nieve, la tasa de derretimiento y el área cubierta de nieve. La nieve derretida será cero hasta que el manto de nieve exceda el umbral de temperatura dado. La temperatura del manto de nieve es una función de la temperatura promedio diaria durante los días precedentes y varía como una función amortiguada de la temperatura del aire. La influencia en el día actual de la temperatura del manto de nieve en días anteriores es controlada por un factor de retardo, que afecta la densidad y la profundidad del manto de nieve mediante la ecuación mostrada a continuación:

$$T_{snowpack(day)} = T_{snowpack(day-1)} * (1 - TIMP) + T_{av} * TIMP \quad (4.5)$$

T_{snowpack(day)}: Temperatura del manto de nieve del día i (°C).
T_{snowpack(day-1)}: Temperatura del manto de nieve del día anterior al día i (°C).
TIMP: Factor de retardo de la temperatura del manto de nieve (-).
T_{av}: Temperatura promedio del aire del día i (°C).

El crecimiento y decrecimiento del manto de nieve se calcula mediante una curva de agotamiento de área mostrada en la Ecuación (4.6) basada en un logaritmo natural. Esta curva necesita una profundidad umbral que será un valor único para toda la cuenca en estudio, donde las áreas con profundidades sobre este umbral tendrán una cobertura de nieve permanentemente.

$$sno_{cov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \left(\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp \left(1 - sno_{50cov} * \frac{SNO}{SNO_{100}} \right) \right)^{-1} \quad (4.6)$$

sno_{cov} : Fracción del área cubierta por nieve (%).

SNO: Contenido de agua del manto de nieve en un día i (mmH₂O).

SNO_{100} : Profundidad umbral de nieve con la cual el 100% del área se encuentra cubierta de nieve (mmH₂O).

sno_{50cov} : Coeficiente de forma de la curva de cobertura nival, según su valor la curva toma formas como las mostradas en la **Figura 4-3** que determinan el aumento de área cubierta según aumenta la cantidad de nieve (-).

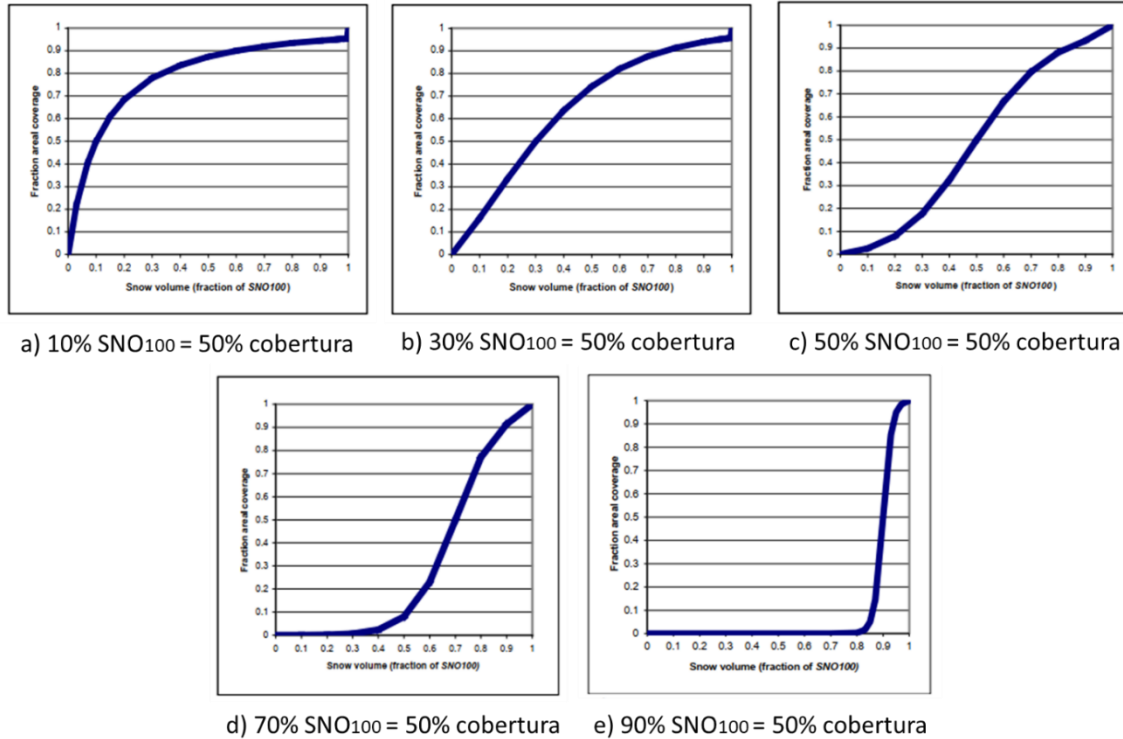


Figura 4-3: Curvas cobertura nival para distintos valores de sno_{50cov} en función de SNO_{100} (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009).

La profundidad de la nieve en una banda de elevación se asume constante cuando SWE excede SNO_{100} , por lo que la curva de agotamiento de área afecta el derretimiento de la nieve solo cuando la cantidad de agua del manto de nieve esta entre 0 y SNO_{100} . El derretimiento de nieve es calculado con la función lineal que se muestra a continuación:

$$SM = b_{mlt} * sno_{cov} \left(\frac{T_{snowpack} + T_{max}}{2} - T_{mlt} \right) \quad (4.7)$$

SM: Cantidad de nieve derretida en el día i (mmH₂O).

T_{snowpack}: Temperatura promedio del manto de nieve en el día i (°C).

T_{max}: Temperatura máxima del aire en el día i (°C).

T_{mlt}: Temperatura umbral a la que la nieve se derrite (°C).

b_{mlt}: Factor de derretimiento en el día i (mmH₂O/día°C), determinado mediante la Ecuación (4.8).

$$b_{mlt} = \frac{SMFMN + SMFMX}{2} + \frac{SMFMN - SMFMX}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{365} (d_n - 81) \right) \quad (4.8)$$

SMFMN: Factor de derretimiento para el 21 de junio.

SMFMX: Factor de derretimiento para el 21 de diciembre.

d_n: Representa el día del año.

La Ecuación (4.8) fue adaptada para su aplicación en el hemisferio sur, en donde el factor SMFMN será mayor que el factor SMFMX debido a las estaciones, en el hemisferio norte se comportaran de forma inversa.

4.6. Hidrología

La precipitación puede ser interceptada por la vegetación o caer en la superficie del suelo. El agua en el suelo se infiltrará o fluirá sobre el terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hasta un canal contribuyendo a la respuesta rápida del canal, mientras que el agua infiltrada se puede mantener en el suelo y ser evapotranspirada luego o puede lentamente acercarse a la superficie mediante caminos subterráneos. Los posibles movimientos del agua simulados por SWAT se muestran en la **Figura 4-4** y son descritos a continuación.

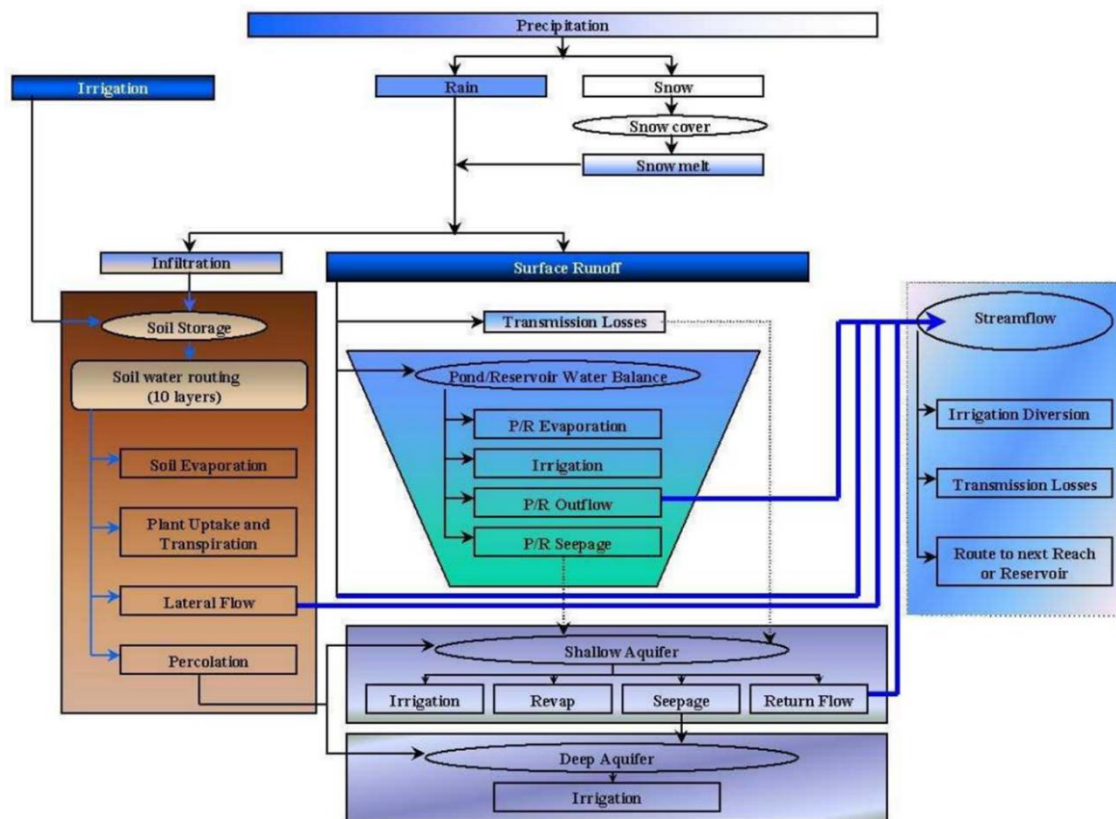


Figura 4-4: Esquema de posibles caminos disponibles para el agua en SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009).

- Escorrentía superficial

La escorrentía superficial es calculada mediante dos métodos distintos, a) Método Curva Numero y b) Método Green y Ampt. Debido a que el método Green y Ampt necesita de mediciones de precipitación subdiarias, en este trabajo se usará el método curva número, que utiliza datos de precipitaciones diarias. En el método de la curva numero la curva varia de manera no lineal con el contenido de humedad del suelo, bajando cuando se acerca al punto de marchitez y aumenta hasta cerca de 100 al acercarse el suelo a la saturación.

- Almacenamiento de Dosel

Es el agua interceptada por la superficie vegetativa, donde se mantiene y hace posible la evaporación. Al usar el método curva número el almacenamiento de dosel es contabilizado en los cálculos de escorrentía superficial. El modelo permite ingresar la cantidad de agua máxima que

puede ser almacenada en el dosel, luego al momento de calcular la evaporación, el agua es removida primero desde el almacenamiento de dosel.

- Infiltración

Se refiere a la entrada de agua en el perfil del suelo desde su superficie. Según la infiltración continúa el suelo comienza a saturarse, por lo que la tasa de infiltración disminuye con el tiempo hasta que alcanza un valor constante. Debido a que el método curva número opera a un nivel diario, no es posible modelar la infiltración directamente. En este caso la cantidad de agua que entra al perfil del suelo es calculada como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la esorrentía superficial.

- Redistribución

Es el movimiento continuo del agua a través del perfil del suelo una vez que ya se ha detenido en la superficie del suelo. La redistribución es causada por la diferencia en el contenido de agua del perfil del suelo y terminara cuando la distribución sea uniforme a lo largo de todo el perfil. El flujo hacia abajo ocurre cuando la capacidad de una capa es excedida y la capa de abajo no se encuentra saturada, en caso de que una capa se encuentra a menos de 0°C no se permite redistribución.

- Evapotranspiración

Incluye evaporación de ríos, lagos, suelo descubierto y superficies vegetativas, evaporación dentro de las hojas de las plantas y sublimación de superficies de hielo y nieve. El modelo calcula la evaporación de suelos y plantas de forma separada, usando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua para estimar la evaporación en suelos y una función lineal de evapotranspiración potencial e índice de área de hoja para la evaporación en plantas.

- Flujo subterráneo lateral

Es la contribución al canal que se origina bajo la superficie, pero sobre la zona en que las rocas están saturadas de agua. El flujo en el perfil del suelo (0-2 m) es calculado de manera simultánea con la redistribución, usando un modelo de almacenamiento cinemático que predice el flujo en cada estrato del suelo, para esto se tiene en consideración la variación de conductividad, la pendiente y el contenido de agua.

- Canales tributarios

Existen dos tipos de canales en una subcuenca, a) el canal principal y b) los canales tributarios. Los canales tributarios son canales de menor orden que se separan del canal principal dentro de la cuenca. Todo flujo de los canales tributarios de la subcuenca es dirigido y descarga en el canal principal de la misma subcuenca. Los atributos de estos canales son usados para determinar el tiempo de concentración para la subcuenca.

- Perdidas de transmisión

Son pérdidas en el flujo superficial a través de percolación desde el lecho del cauce. Estas pérdidas ocurren en ríos intermitentes donde la contribución de agua subterránea ocurre solo durante ciertas épocas del año.

- Flujo de retorno

Es el volumen de agua del flujo originado en el flujo subterráneo. SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos, un acuífero superficial y libre que contribuye con flujo de retorno a las corrientes dentro de la cuenca, y un acuífero profundo y confinado que contribuye con flujo de retorno a corrientes fuera de la cuenca.

4.7. Erosión

La producción de erosión y sedimento se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida de suelo universal (MUSLE), el cual usa la cantidad de escorrentía para simular la producción de erosión y sedimento. El modelo hidrológico entrega una estimación del volumen de escorrentía y la tasa máxima de escorrentía los cuales, junto al área de la subcuenca, son usados para calcular la variable de energía erosiva de escorrentía. El factor de manejo de cultivo es recalculado cada día que ocurre escorrentía, que es una función de la biomasa en el suelo, residuos y otros factores dependientes de las plantas.

El modelo MUSLE (Prado Hernandez, Rivera Ruiz, Leon Mojarro, Carrillo Garcia, & Martinez Ruiz, 2017) es una versión modificada del modelo USLE, cuyo cambio consiste en el reemplazo del primer factor R, correspondiente a la erosividad de la lluvia, por el escurrimiento superficial y el caudal peak de una tormenta, la expresión es la siguiente:

$$Y = 11.8(Q_s * q_p)^{0.56} * K * L * S * C * P \quad (4.9)$$

Y: Producción de sedimentos en un evento determinado (Mg/evento).

Q_s: Volumen escurrido (m³).

q_p : Gasto peak del evento (m^3/s).
 K: Factor de erosionabilidad del suelo (Mg/ha/MJ/mm).
 L: Factor de longitud de la pendiente (-).
 S: Factor del grado de la pendiente (-).
 C: Factor de cultivo y manejo del cultivo (-).
 P: Factor de prácticas de manejo (-).

4.8. Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico

Una vez que se han determinado las cargas de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas del canal principal, las cargas son dirigidas por la red de canales de la cuenca. De forma adicional a mantener el rastreo del flujo en el canal, SWAT modela la transformación de los químicos en el canal y cauce. La **Figura 4-5** ilustra los distintos procesos modelados dentro del flujo.

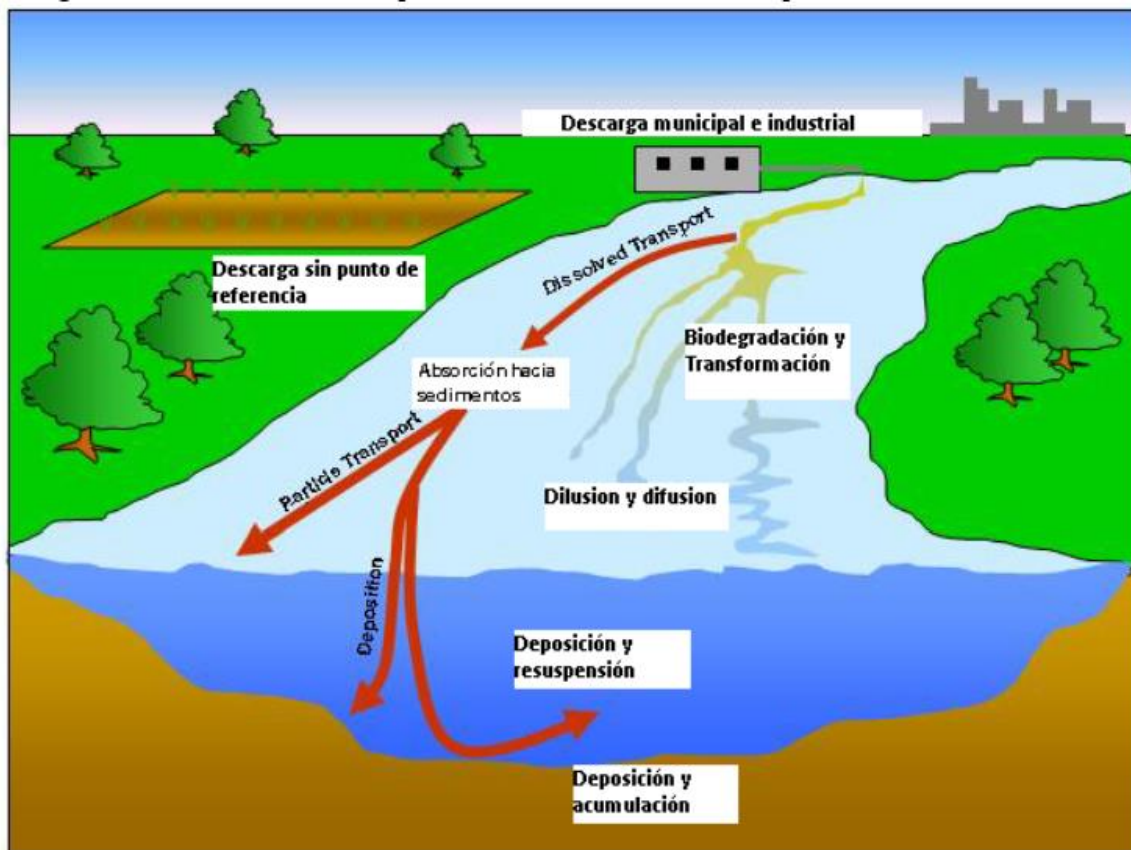


Figura 4-5: Procesos modelados en el flujo por SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009).

Según el agua fluye río abajo, existen diversos factores de pérdida como la evaporación, la transmisión a través del lecho del río o la remoción de agua desde el río para agricultura y usos humanos. A la vez que este puede ser complementado por la lluvia que cae directamente en el canal y/o la adición de agua proveniente de puntos de descarga.

El transporte de sedimentos en el canal es controlado por la operación simultanea de dos procesos, deposición y degradación. En las últimas versiones de SWAT, las ecuaciones han sido simplificadas y la máxima cantidad de sedimentos que puede ser transportada desde un segmento de canal es una función de la velocidad máxima en el canal. La fuerza disponible en el canal es usada para movilizar y depositar material del suelo hasta que la totalidad de este es removido, mientras que el exceso de fuerza en el canal causa degradación del lecho. La degradación del lecho es ajustada según la erosionabilidad del lecho y la cobertura del canal.

4.9. Albedo

El albedo es la proporción de radiación solar incidente de onda corta que es reflejada por la superficie. Esta variable tiene muy baja importancia dentro del modelo, por lo que, si bien es calculada de manera diaria, las expresiones utilizadas son bastante simples y no es usada para calculo posteriores. El albedo depende del tipo de suelo, la cobertura de plantas y la cobertura de nieve separándose en tres casos distintos que se definen a continuación (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, 2009):

- Si el equivalente del agua de nieve es mayor o igual que 0.5 mm:

$$\alpha = 0.8 \quad (4.10)$$

α : Albedo.

- Si el equivalente del agua de nieve es menor que 0.5 mm y no hay plantas creciendo en el HRU:

$$\alpha = \alpha_{soil} \quad (4.11)$$

α_{soil} : Albedo del suelo definido por el usuario (originalmente establecido en 0.1).

- Si el equivalente del agua de nieve es menor que 0.5 mm y hay plantas creciendo en el HRU:

$$\alpha = \alpha_{plant} * (1 + COV_{sol}) + \alpha_{soil} * COV_{sol} \quad (4.12)$$

$$COV_{sol} = e^{-5*10^{-5}*CV} \quad (4.13)$$

α_{plant} : Albedo de las plantas definido por el usuario (originalmente establecido en 0.23).

COV_{sol} : Índice de cobertura de suelo.

CV: Biomasa sobre la tierra y el residuo [kg/ha].

5. Modelo Hidrológico

5.1. Recopilación y Preparación Datos de Entrada

5.1.1 Tipos de Datos

Antes de definir los datos de entrada en sí, es necesario definir los tipos de datos que serán usados. Dependiendo de la información que se quiere entregar, los datos de entrada se presentan en tres formatos distintos que son vectorial, ráster y serie de datos. Tanto el tipo vectorial como el tipo ráster corresponden a distintas formas en las que se representa gráficamente la información espacial. Las series de datos por otra parte corresponde a como su nombre lo dice, valores escalares organizados en series, que para este caso son en escala diaria.

La representación vectorial implica el uso de tres elementos que son puntos, líneas y polígonos, representando cada elemento una unidad homogénea de información. Los atributos temáticos que corresponden a estos elementos espaciales se manejan habitualmente desde tablas de datos.

La representación ráster es un conjunto de celdas adyacentes llamadas pixeles que representan las unidades de información espacial. Cada celda tiene un código asignado correspondiente al tipo de información temática que representa.

Si bien se puede lograr una mayor precisión y calidad usando la representación vectorial, además de que son archivos de menor tamaño. La representación ráster es necesaria para la correcta visualización de variables espaciales continuas, además de que permite una sencilla y elevada capacidad de superposición y combinación de capas. En la **Figura 5-1** se puede observar un ejemplo de representación vectorial y ráster.

Los datos de entrada necesarios para la ejecución del modelo, junto con su obtención y preparación se detallan en los puntos a continuación.

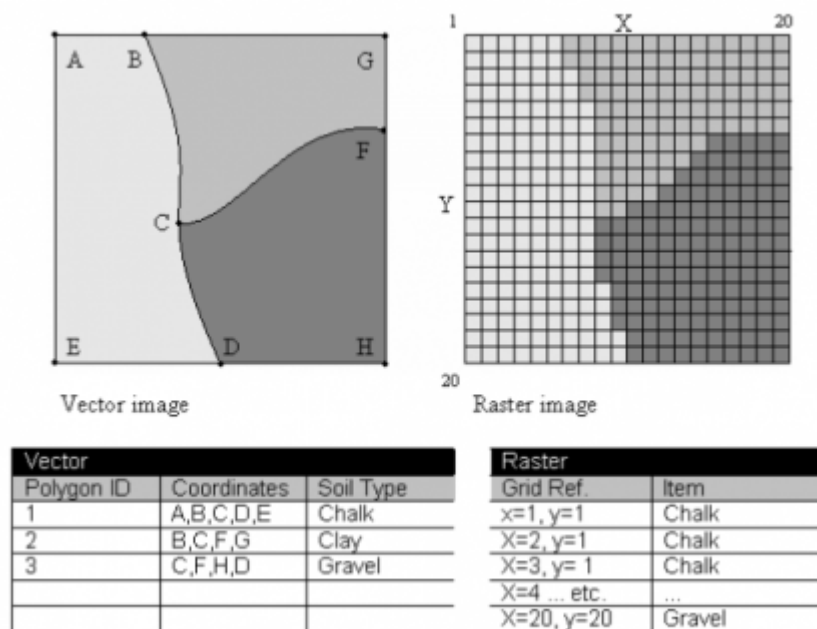


Figura 5-1: Representación visual y forma de organización de datos para archivos tipo vectorial y tipo ráster (izquierda y derecha respectivamente) (Castro, 2019).

5.1.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)

El primer dato de entrada corresponde a un modelo digital de elevación en formato ráster, el cual se usará para determinar los límites de la cuenca, las subcuencas y los cauces dentro de esta.

Existen variadas fuentes de las que se pueden obtener archivos DEM, siendo las de mayor resolución las correspondientes al satélite Alos Palsar, las cuales tienen un tamaño de pixel de 12.5 [m] y se pueden descargar desde ASF Data Search (<https://search.asf.alaska.edu/>), existen incluso versiones ya recortadas para cada región chilena en la página de Infraestructura de datos geoespaciales (IDE, <https://www.ide.cl/>) del ministerio de bienes raíces.

No obstante, los DEM de Alos Palsar no son reconocidos por el modelo, probablemente debido al tamaño de píxel, por lo que se recurrió a los proporcionados por el satélite SRTM mediante la página earthdata (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), el cual posee un tamaño de píxel de 30 [m].

Se descargaron tres archivos DEM (S33W070, S33W071 y S34W071) que corresponden a la zona de la cuenca, los cuales fueron combinados y recortados mediante QGIS para crear un único DEM que ingresar al modelo.

5.1.3 Punto de Salida de la Cuenca

Corresponde a un archivo vectorial que contiene solo un punto con el fin de entregar al modelo las coordenadas del punto de salida, ya que en base a esto se definirá la cuenca hacia aguas arriba. En este trabajo, como ya se ha mencionado, se consideró como punto de salida la estación Río Aconcagua en Chacabucuito.

5.1.4 Mapa de Uso de Suelo

El mapa de uso de suelo se puede obtener para todo Chile en la página del IDE (<https://www.ide.cl/index.php/flora-y-fauna/item/1513-catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion>), el cual se encuentra actualizado al 2013 para la Región de Valparaíso. El archivo original es vectorial, pero debe transformarse a ráster para ingresarlo al modelo.

Otro aspecto importante es que el mapa original tiene una terminología propia para definir cada tipo de uso de suelo, por lo que se debe cargar al modelo un archivo que traduzca estos tipos de uso a los reconocidos por SWAT, la **Tabla 5-1** muestra los usos genéricos, pero existen usos más específicos como por ejemplo códigos para cada tipo de cultivo. Los usos de suelo considerados son infértil, industrial, agua, humedal mixto, hielo, arbusto, agricultura genérica y bosque mixto. Cabe destacar que, debido a la falta de una clasificación para hielo y nieve, este uso de suelo fue también clasificado como agua.

Tabla 5-1: Usos de tierra genéricos incluidos en la base de datos de SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012, 2012).

Name	Plant Code	Origin of Plant Growth Values	Plant Type
Agricultural Land-Generic	AGRL	use values for Grain Sorghum	warm season annual
Agricultural Land-Row Crops	AGRR	use values for Corn	warm season annual
Agricultural Land-Close-grown Orchard	AGRC	use values for Winter Wheat	cool season annual
Hay [†]	ORCD	use values for Apples	trees
Forest-mixed	HAY	use values for Bermudagrass	perennial
Forest-deciduous	FRST	use values for Oak	trees
Forest-evergreen	FRSD	use values for Oak	trees
Wetlands	FRSE	use values for Pine	trees
Wetlands-forested	WETL	use values for Alamo Switchgrass	perennial
Wetlands-nonforested	WETF	use values for Oak	trees
Pasture [†]	WETN	use values for Alamo Switchgrass	perennial
Summer pasture	PAST	use values for Bermudagrass	perennial
Winter pasture	SPAS	use values for Bermudagrass	perennial
Range-grasses	WPAS	use values for Fescue	perennial
Range-brush	RNGE	use values for Little Bluestem ($LAI_{max}=2.5$)	perennial
Range-southwestern US	RNGB	use values for Little Bluestem ($LAI_{max}=2.0$)	perennial
Water [*]	SWRN	use values for Little Bluestem ($LAI_{max}=1.5$)	perennial
	WATR		not applicable

5.1.5 Mapa de Tipo de Suelo

Para el tipo de suelo se utilizó el mapa proporcionado por la Organización de Comida y Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas (<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/>). Si bien este mapa también se transformó de vectorial a ráster, la nomenclatura original de la FAO existe en la base de datos de SWAT, por lo que no se necesitaron cambios en este aspecto. Los tipos de suelo considerados son suelo franco, suelo franco-arcilloso-arenoso y suelo arcilloso.

5.1.6 Variables Climáticas

Las variables climáticas necesarias para el funcionamiento del modelo son precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, las cuales deben ser a escala diaria o menor.

Como se mencionó anteriormente la radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa serán simuladas por el modelo usando el Sistema de Reanálisis de Pronóstico Climático (CFSR) de los Centros Nacionales para la Predicción del Clima (NCEP), el cual está diseñado como un sistema de alta resolución que acopla atmosfera-océano-tierra para proveer los mejores valores estimados para estas variables en base al periodo 1979-2014.

Para las series de precipitación y temperatura se consideró como primera opción los registros de las estaciones existentes dentro de la cuenca, que corresponden a las estaciones Río Aconcagua en Chacabucito, Canal Colorado en Bocatoma, Río Aconcagua en Río Blanco y Río Juncal en Juncal, cuyos registros son proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>). No obstante, estos registros se extienden solamente hasta el año 2014 en algunas estaciones, entregando un periodo de datos muy acotado para trabajar.

En función de lo anterior, se recurrió a los datos grillados CR2MET proporcionados por el Centro del Clima y la Resiliencia ((CR)²) en su página (<https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>). Estos tienen una extensión para todo Chile y comprenden el periodo 1979-2020 con una resolución aproximada de 5 [km]. Estos datos son creados mediante modelos estadísticos como funciones de transferencia para traducir precipitación, flujos de humedad y otras variables de gran escala del Reanálisis Europeo Global (ERA-Interim) en precipitación regional, los cuales son calibrados luego considerando los datos observados de precipitación y topografía de la zona específica. Para el caso de la temperatura, además de lo anteriormente mencionado, se agrega la consideración de datos de temperatura superficial estimada mediante imágenes satelitales.

En base a estos datos y usando el programa RStudio (<https://www.rstudio.com/>), se eligieron 17 puntos de la grilla donde se crearían estaciones ficticias que ingresar al programa, la distribución de los puntos se muestra en la **Figura 5-2**. Como último paso, también con la ayuda de RStudio, se dio a las series de datos el formato correspondiente solicitado por SWAT creando archivos de texto para cada estación. A lo anterior se agrega un archivo de texto principal cuya función es llamar a los archivos de cada estación, además de establecer sus coordenadas y metros de altura sobre el nivel del mar. Se deben crear archivos tanto para las precipitaciones (conteniendo la precipitación diaria), como para la temperatura (conteniendo la temperatura máxima y mínima diaria).

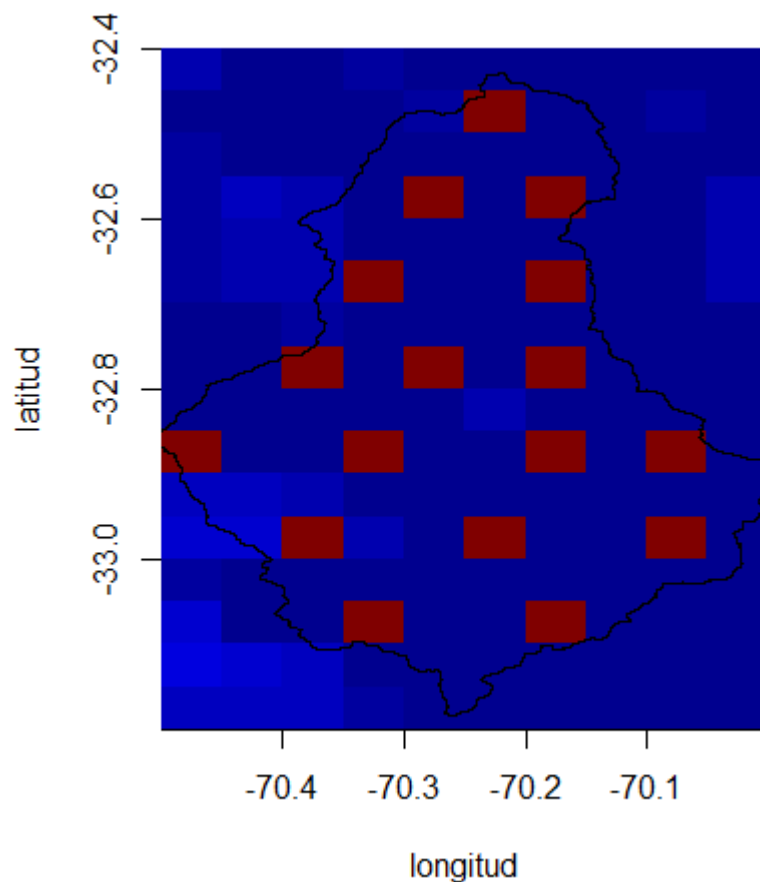


Figura 5-2: Datos grillados precipitación y temperatura $(CR)^2$, en rojo se muestran los pixeles usados como estaciones ficticias.

Si se desea mayor detalle, el Anexo 2 – Datos de Entrada Usados en el Modelo muestra imágenes de los archivos ingresados al modelo.

5.2. Procedimiento Modelo SWAT

5.2.1 Definición Cuenca y Subcuencas

Una vez se encuentran preparados todos los datos de entrada, el modelo hace todos los procesos de manera autónoma, siendo los pasos que quedan principalmente para regular el nivel de precisión que considerará el modelo, obviamente contra más precisión se exija, mayor será el tiempo y recursos computacionales necesarios.

Lo primero es cargar el DEM y definir el valor de área límite de cauce, esto significa que una celda será parte de un cauce solo cuando un número superior al límite definido de celdas drenen en ella. Debido a la magnitud de la cuenca en estudio, el límite definido fue de 30 [km²]. Configurado esto, se carga el punto de salida de la cuenca y de forma autónoma se definirán las fronteras de la cuenca y subcuencas como se muestra en la **Figura 5-3**.

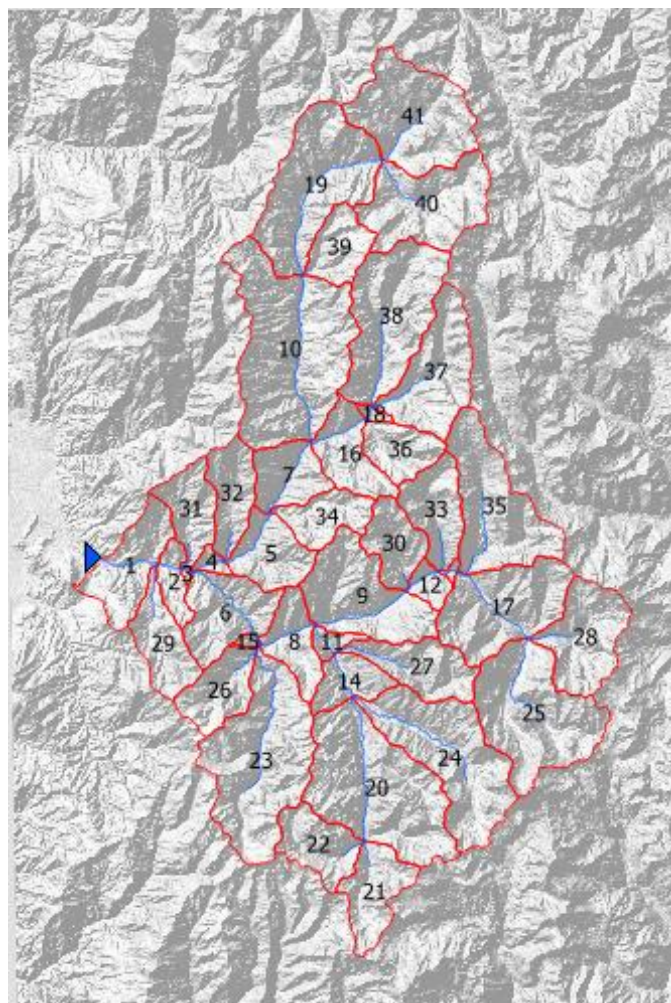


Figura 5-3: Cuenca y subcuencas definidas por el modelo, el triángulo azul corresponde al punto de salida de la cuenca.

5.2.2 Definición HRU

Terminado el paso anterior, se cargan los mapas de uso de suelo y tipo de suelo con los que se definirán las HRU de cada subcuenca. Si bien este proceso es autónomo, existen diversas opciones para definir como se calcularán las subcuencas en base a las HRU.

El modelo permite entregar mayor importancia a un parámetro específico (uso de suelo, tipo de suelo o pendiente) o filtrar en base a estos mismos parámetros. En este trabajo con el fin de agilizar la velocidad de cálculo y considerando que se definieron varias subdivisiones dentro de la cuenca (41 subcuencas), se consideró la opción de HRU dominante, esto significa que la HRU cuyas características sean las más dominantes dentro de la subcuenca se definirá como la única abarcando la totalidad del área de esa subcuenca.

Terminado esto se cargan las variables climáticas y se corre el programa. Con el fin de comparar la precisión de los modelos, se realizaron dos modelos distintos correspondientes a escala mensual y escala diaria.

5.2.3 Datos de Salida

Una vez ejecutado el modelo se crean varios archivos de texto conteniendo tanto los datos de entrada como los datos de salida, los cuales pueden ser llamados mediante una herramienta de visualización, la **Figura 5-4** muestra los resultados de producción de sedimentos y nieve acumulada entregados por el modelo para cada cuenca.

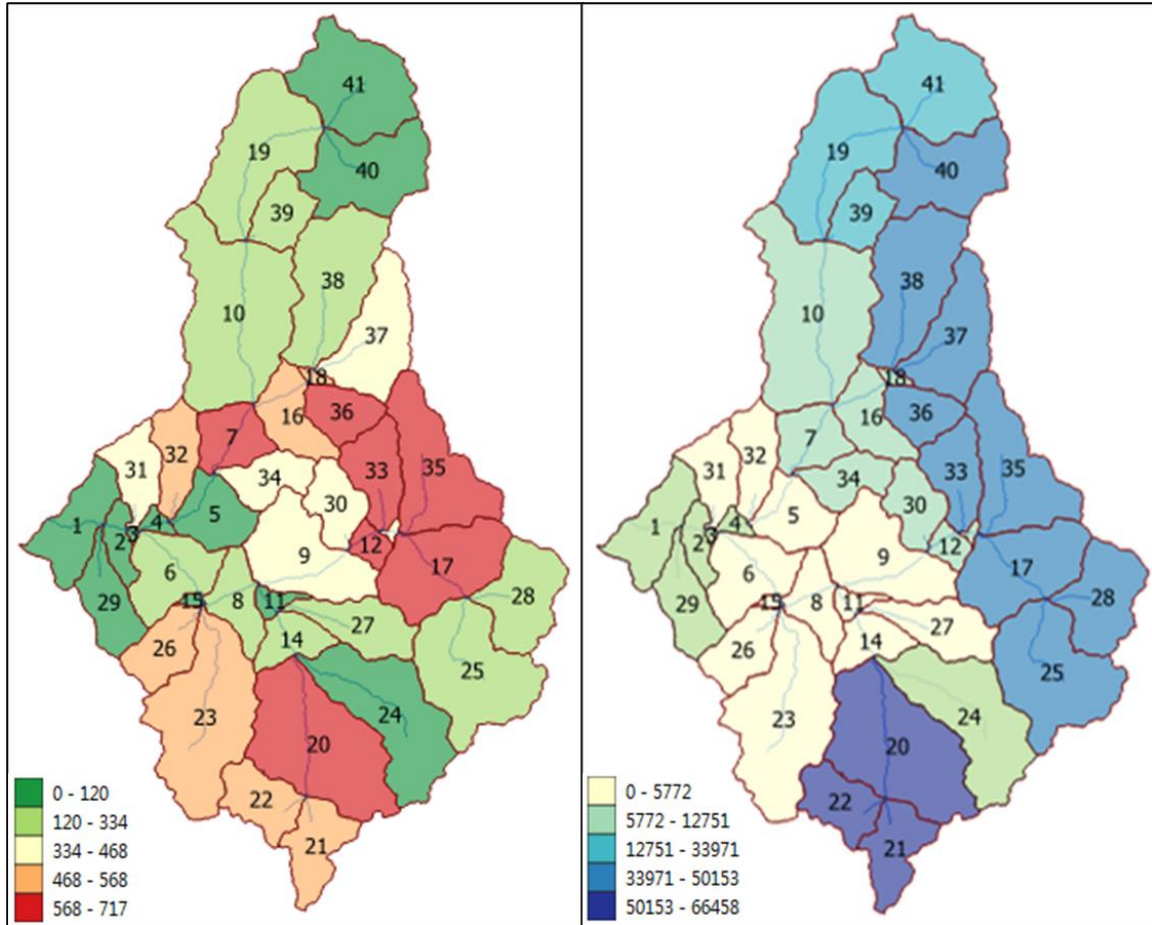


Figura 5-4: A la izquierda promedio anual de producción de sedimentos en toneladas por hectárea. A la derecha promedio anual de nieve acumulada en milímetros.

5.3. Calibración Modelo SWAT

5.3.1 SWATCUP

Una vez ejecutado el modelo, los datos de entrada se ordenan de tal manera que sea posible su modificación, permitiendo iterar el sistema para mejorar los resultados. No obstante, esta es una tarea compleja para realizar de manera manual.

Es aquí donde SWAT proporciona una nueva herramienta llamada SWATCUP (<https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>) que permite una edición mucho más rápida para así mejorar la modelación. Esta herramienta es básicamente una interfaz que permite modificar de manera más sencilla los distintos parámetros definidos por el modelo durante su ejecución, los cuales se encuentran almacenados en archivos de texto.

5.3.2 Periodos

Si analizamos la **Figura 2-7** como se hizo en secciones anteriores, podemos ver 4 periodos marcados en la curva de caudal sólido, por lo que al momento de calibrar el modelo se decidió dividir los datos totales en 3 periodos distintos, los cuales a su vez serian divididos en dos subgrupos correspondientes a un periodo de calibración y uno de validación. La **Tabla 5-2** muestra los periodos considerados, a los cuales se debe agregar un periodo largo que fue simulados solamente con caudal líquido, el cual va desde 1992 hasta 2019 donde la calibración corresponde a 1989-2008 y la validación a 2009-2019.

Tabla 5-2: Periodos considerados para la modelación, separados en calibración y validación.

Periodo	Calibración	Validación
1	1989-1994	1995-2000
2	2001-2006	2007-2011
3	2012-2015	2016-2018

5.3.3 Parámetros Calibrados

Existe una enorme cantidad de parámetros modificables que comprenden los distintos aspectos del modelo, los cuales se definen en el manual de usuario (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012, 2012), junto con los archivos de salida y sus respectivos formatos. En este trabajo se recurrió a otros estudios para definir cuáles son los parámetros más relevantes en cuencas nivales (Mikayilov, y otros, 2007) (Grusson, y otros, 2015). La **Tabla 5-3** y la **Tabla 5-4** muestra los parámetros considerados en este trabajo, donde los marcados en verde corresponden a aquellos cuya modificación marcaba un claro efecto en los resultados obtenidos. De forma adicional, se incluye tanto el valor por defecto que otorga el modelo, así como su valor optimo obtenido para cada periodo.

Tabla 5-3: Parámetros calibrados a escala mensual y sus valores para cada periodo, en verde parámetros sensibles (*parámetro calibrado de forma manual).

Nombre Parámetro	Rango (según SWATCUP)		¿Sensible?	Valor Parámetro		
	Min	Max		Original	1989-2000	2001-2011
PLAPS	-100	500	No	0	475	475
TLAPS	-10	10	Si	0	-8	-8
SNO_SUB	0	150	No	0	0	0
SFTMP	-10	10	Si	1	2	2
SMTMP	-10	10	Si	0.5	2	2
SMFMX	0	20	No	4.5	1.22	1.22
SMFMN	0	20	Si	4.5	6.07	6.07
TIMP	0	1	No	1	1	1
SNOCOVMX	0	500	No	1	1	1
SNO50COV	0	1	Si	0.5	0.5	0.5
GW_DELAY	0	500	Si	31	31	31
ALPHA_BF	0	1	No	0.048	0.048	0.048
GWQMN	0	5000	Si	1000	600	600
GW_REVAP	0.02	0.2	No	0.02	0.02	0.02
RCHRG_DP	0	1	No	0.05	0.05	0.05
GWHT	0	25	No	1	1	1
CANMX	0	100	No	0	0	0
ESCO	0	1	No	0.95	0.95	0.95
EPCO	0	1	No	1	1	1
SOL_BD	-0.3	0.3	No	1.3	1.3	1.3
SOL_AWC	-0.3	0.3	Si	0.1	0.1	0.1
SOL_K	-0.3	0.3	No	7.99	7.99	7.99
CH_N2	-0.01	0.3	Si	0.014	0.014	0.014
CH_K2	-0.01	500	No	0	0	0
PRF*	0	2	Si	1	2	1

Tabla 5-4: Parámetros calibrados a escala diaria y sus valores para cada periodo, en verde parámetros sensibles (*parámetro calibrado de forma manual).

Nombre Parámetro	Rango		¿Sensible?	Valor Parámetro				
	Min	Max		Original	1989-2000	2001-2011	2012-2018	1992-2019
PLAPS	-100	500	si	0	475	475	475	475
TLAPS	-10	10	si	0	-6	-6	-6	-6
SNO_SUB	0	150	no	0	0	0	0	0
SFTMP	-10	10	si	1	2	2	2	2
SMTMP	-10	10	si	0.5	2	2	2	2
SMFMX	0	20	si	4.5	1.22	1.22	1.22	1.22
SMFMN	0	20	si	4.5	6.07	6.07	6.07	6.07
TIMP	0	1	no	1	1	1	1	1
SNOCOV MX	0	500	no	1	1	1	1	1
SNO50COV	0	1	no	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
GW_DELAY	0	500	si	31	31	31	31	
ALPHA_BF	0	1	si	0.048	0.78	0.78	0.78	
GWQMN	0	5000	si	1000	600	600	600	
GW_REVAP	0.02	0.2	no	0.02	0.02	0.02	0.02	
RCHRG_DP	0	1	si	0.05	0.05	0.05	0.05	
GWHT	0	25	no	1	1	1	1	
CANMX	0	100	no	0	0	0	0	
ESCO	0	1	no	0.95	0.95	0.95	0.95	
EPCO	0	1	no	1	1	1	1	
SOL_BD	-0.3	0.3	no	1.3	1.3	1.3	1.3	
SOL_AWC	-0.3	0.3	no	0.1	0.1	0.1	0.1	
SOL_K	-0.3	0.3	no	7.99	7.99	7.99	7.99	
CH_N2	-0.01	0.3	si	0.014	0.014	0.014	0.014	
CH_K2	-0.01	500	no	0	0	0	0	
PRF*	0	2	si	1.0	2.0	1.0	2.0	

A continuación, se realizará una breve descripción de cada parámetro calibrado según lo indicado en el manual de usuario (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012, 2012).

5.3.3.1 Datos de Entrada de las Subcuencas

- PLAPS: Ratio de lapso de precipitación (mm H₂O/Km)

Este parámetro es usado para ajustar las precipitaciones de cada banda de elevación dentro de las subcuencas, un valor positivo denota un incremento de las precipitaciones según se incrementa la altura, mientras que un valor negativo denota un decrecimiento de las precipitaciones según se incrementa la altura. Si no se definen bandas de elevación las precipitaciones no se ajustan.

- TLAPS: Ratio de lapso de temperatura (°C/Km)

Este parámetro es usado para ajustar la temperatura de cada banda de elevación dentro de las subcuencas, un valor positivo denota un incremento de la temperatura según se incrementa la altura, mientras que un valor negativo denota un decrecimiento de la temperatura según se incrementa la altura. Si no se definen bandas de elevación la temperatura no se ajusta.

- SNO_SUB: Contenido inicial de agua como nieve (mm H₂O)

Este parámetro indica la cantidad inicial de nieve presente en la cuenca. La cantidad de nieve en la cuenca es expresada como profundidad de agua en vez de profundidad de nieve debido a que, a diferencia del agua, la densidad de la nieve es altamente variable.

5.3.3.2 Datos de Entrada de la Cuenca

- SFTMP: Temperatura de nevada (°C)

Umbral de la temperatura promedio del aire bajo el cual la precipitación comienza a caer como nieve. La temperatura de nevada debería estar entre -5°C y 5°C.

- SMTMP: Temperatura base de derretimiento de nieve (°C)

Umbral de la cobertura nival, esta no se derretirá hasta que su temperatura exceda este valor limite. La temperatura de derretimiento de nieve debería estar entre -5°C y 5°C.

- SMFMX: Factor de derretimiento para nieve del 21 de junio (mm H₂O/°C/día)

Para cuencas del hemisferio sur es el factor de derretimiento mínimo que, junto con el SMFMN, permite variar la tasa de derretimiento a lo largo del año. La variable reporta el impacto

de la densidad de la cobertura nival en el derretimiento de la nieve y su rango varía dependiendo de la presencia urbana en la cuenca.

- SMFMN: Factor de derretimiento para nieve del 21 de diciembre ($\text{mm H}_2\text{O}/^\circ\text{C}/\text{día}$)

Para cuencas del hemisferio sur es el factor de derretimiento máximo que, junto con el SMFMX, permite variar la tasa de derretimiento a lo largo del año. La variable reporta el impacto de la densidad de la cobertura nival en el derretimiento de la nieve y su rango varía dependiendo de la presencia urbana en la cuenca.

- TIMP: Factor de desfase de la temperatura en la cobertura nival

Este factor controla el efecto que tiene la temperatura en la cobertura nival del día previo en el día actual. Puede variar entre 0.01 y 1, donde según nos acercamos a 1 significa que la temperatura promedio del aire del día actual ejerce mayor influencia en la cobertura nival y los días anteriores tienen muy poca relevancia, al contrario, al acercarse a 0 la temperatura de la cobertura nival es cada vez menos influenciada por la temperatura del día actual y se vuelven más relevantes los días anteriores.

- SNOCOVMX: Contenido mínimo de agua como nieve que corresponde al 100% de cobertura nival ($\text{mm H}_2\text{O}$)

Debido a variables como la topografía o las sombras la cobertura nival raramente será uniforme a lo largo de toda el área de la cuenca, haciendo que partes de la cuenca puedan no tener nieve. SWAT correlaciona estas variables con curvas de agotamiento de área como las mostradas en la **Figura 4-3**, donde el parámetro SNOCOVMX corresponde al límite sobre el cual la superficie siempre estará 100% nevada. Es importante recordar que al superar este valor la profundidad de nieve es asumida uniforme.

- SNO50COV: Fracción del volumen representado por SNOCOVMX que corresponde al 50% de la cobertura nival

Segundo parámetro, junto al parámetro SNOCOVMX, que se utiliza para definir alguna de las curvas mostradas en la **Figura 4-3**. Estas curvas indican la relación no lineal considerada por el modelo entre el agua como nieve y la cobertura nival.

5.3.3.3 *Datos de Entrada del Agua Subterránea*

- GW_DELAY: Tiempo de desfase del agua subterránea (días)

El agua que sobrepasa la profundidad más baja del perfil del suelo entra y fluye a través de la zona vadosa antes de convertirse en recarga del acuífero superficial. Este parámetro define el desfase entre que el agua sale del perfil del suelo y que entra al acuífero superficial, que dependerá de la profundidad y las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas de la zona vadosa.

- ALPHA_BF: Factor Alpha del flujo base (1/día)

Es un indicador de la respuesta del flujo subterráneo a los cambios en la recarga, este se mueve desde valores de 0.1-0.3 para suelos con respuesta lenta hasta 0.9-1.0 para suelos con respuesta rápida.

- GWQMN: Profundidad del agua en el acuífero superficial requerida para que ocurra retorno del flujo (mm H₂O)

El flujo subterráneo hacia la superficie es permitido solo si la profundidad en el acuífero superficial es igual o superior a este valor.

- GW_REVAP: Coeficiente de renovación del agua subterránea

Según se aproxima a 0 el movimiento del agua desde el acuífero superficial a la zona raíz está restringido, mientras que según se aproxima a 1 la tasa de transferencia desde el acuífero superficial a la zona raíz se acerca a la tasa de evapotranspiración potencial. Sin embargo, su valor debería moverse entre 0.02 y 0.2.

- RCHRG_DP: Fracción de percolación del acuífero profundo

La fracción de percolación desde la zona raíz que recarga el acuífero profundo, este varía entre 0.0 y 1.0.

- GWHT: Altura inicial de agua subterránea (m)

5.3.3.4 Datos de Entrada HRU

- CANMX: Máximo almacenamiento de dosel (mm H₂O)

El dosel de las plantas puede afectar significativamente la infiltración, la escorrentía superficial y la evapotranspiración al interceptar y atrapar una fracción de la lluvia. El modelo permite variar la cantidad de agua que se puede almacenar en el dosel día a día gracias al índice de área de hoja, este parámetro define la máxima cantidad de agua que puede ser atrapada en el dosel cuando las hojas están completamente desarrolladas.

- EPCO: Factor de compensación de absorción de la planta

La cantidad de agua requerida por las plantas en un día dado es variable, siendo suministrada por capas inferiores si las capas superiores no contienen el agua suficiente. Este parámetro puede variar entre 0.01 y 1.00, donde según se aproxima a 1.00 el modelo permite una mayor demanda de absorción de agua que es entregada por capas inferiores del suelo y según se aproxima a 0.01 el modelo permite menor variación de la distribución de profundidad original.

- ESCO: Factor de compensación de evaporación del suelo

Este coeficiente fue incorporado para permitir al usuario modificar la distribución de profundidad usada para definir la demanda de evaporación del suelo. Su valor oscila entre 0.01 y 1.00 donde contra menor sea su valor, el modelo es capaz de suplir la demanda extrayendo agua desde capas inferiores.

5.3.3.5 Datos de Entrada Suelos

- SOL_BD: Densidad húmeda aparente (Mg/m³ o g/cm³)

Expresa la tasa de masa de partículas sólidas respecto del volumen total de suelo. Este parámetro es definido para cada capa de suelo.

- SOL_AWC: Capacidad de agua disponible en la capa de suelo (mm H₂O/mm suelo)

También llamada agua disponible para las plantas. Este parámetro es definido para cada capa de suelo.

- SOL_K: Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)

Relaciona la tasa de flujo de agua al gradiente hidráulico y es una medida de la facilidad del movimiento del agua a través del suelo. Este parámetro es definido para cada capa de suelo.

5.3.3.6 *Datos de Entrada Red de Canales*

- CH_N2: Valor de Manning (n) en el canal principal
- CH_K2: Conductividad hidráulica efectiva en el canal principal

Es la cantidad de agua que se infiltra a acuíferos subterráneos, se considera que el lecho puede estar constantemente entregando o recibiendo agua desde los acuíferos subterráneos por lo que este parámetro variará según su categoría y tipo de lecho.

- PRF: Factor de ajuste de tasa máxima de los sedimentos en el canal principal

Los sedimentos son una función de la tasa de flujo máxima y el flujo diario promedio. Esta variable se incorporó para permitir el ajuste del efecto de la tasa máxima de flujo en la producción de sedimento.

5.3.4 **Modelo de Calibración SUFI-2**

SWATCUP cuenta con un programa de optimización llamado SUFI-2 (eawag, 2015), el cual representa la incertidumbre de los parámetros de entrada como distribuciones uniformes y cuantifica la incertidumbre de los parámetros de salida mediante el 95% de incertidumbre de la predicción (95PPU), esta es calculada en los niveles 2.5% y 97.5% de distribución acumulativa de las variables de salida las cuales son obtenidas a través del muestreo de hipercubo latino. La **Figura 5-5** muestra el concepto del análisis de incertidumbre de forma gráfica, donde podemos ver que un valor de parámetro singular (un punto) lleva a una única respuesta del modelo (**Figura 5-5a**), mientras que la incertidumbre en un parámetro (línea) lleva al 95PPU ilustrado por la zona gris (**Figura 5-5b**). Según la incertidumbre del parámetro aumenta, también lo hace la incertidumbre de los datos de salida (**Figura 5-5c**). Si al graficar los datos medidos junto al 95PPU se obtiene algo similar a lo mostrado en la **Figura 5-5d**, podría ser necesario desplazar el rango del parámetro en la dirección apropiada.

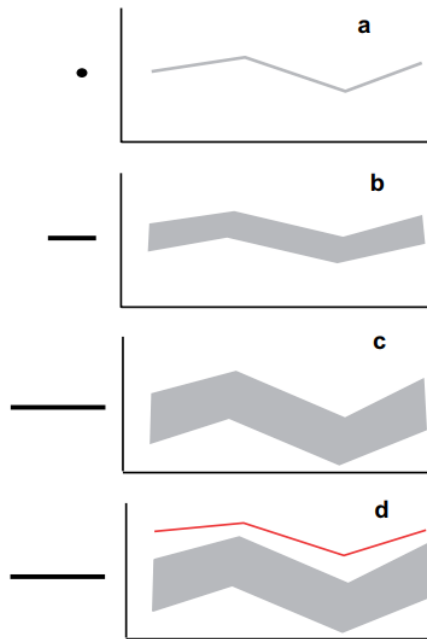


Figura 5-5: Relación entre la incertidumbre de los parámetros y la incertidumbre de la predicción. Un valor singular de un parámetro lleva a una única respuesta (a), mientras que la incertidumbre de un parámetro lleva a incertidumbre en la predicción representada por el 95PPU (b), donde cuanto mayor sea la incertidumbre mayor será el 95PPU (c). Si el 95PPU no coincide con los valores medidos, se debe revisar el modelo (d) (Mikayilov, y otros, 2007).

SUFI-2 comienza asumiendo una elevada incertidumbre del parámetro permitiendo que los datos medidos queden contenidos dentro del 95PPU, luego decrece esta incertidumbre paso a paso hasta que dos reglas son satisfechas: (1) la banda del 95PPU encierra la mayor parte de los datos observados y (2) la distancia promedio entre la parte superior (al nivel 97.5%) e inferior (al nivel 2.5%) del 95PPU es “pequeña” (Mikayilov, y otros, 2007). La cuantificación de ambas reglas es en cierta medida dependiente del problema y debe ser definida caso a caso.

5.3.5 Función Objetivo

SUFI-2 necesita un indicador según el cual medir si la variación de un parámetro mejora o no la simulación resultante, para lo cual SWATCUP permite la elección entre once funciones objetivo distintas que se pueden consultar en el manual de usuario (Mikayilov, y otros, 2007).

En este trabajo se seleccionaron las funciones objetivo habitualmente utilizadas en estudios similares de análisis de caudales líquidos y sólidos en cuencas, estas corresponden al modelo de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) y Kling-Gupta (KGE) cuyas formulas se especifican a continuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (5.1)$$

Q_m : Dato medido i.

Q_s : Dato simulado i.

$Q_{m,i}$: Dato medido i.

$\bar{Q}_m$: Promedio de los datos medidos.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}, \alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_m}, \beta = \frac{\mu_s}{\mu_m} \quad (5.2)$$

r : Coeficiente de regresión lineal entre los datos medidos y simulados.

σ_s : Desviación estándar de los datos simulados.

σ_m : Desviación estándar de los datos medidos.

μ_s : Promedio de los datos simulados.

μ_m : Promedio de los datos medidos.

6. Datos Adicionales de Validación

6.1. Cobertura Nival

La nieve es uno de los parámetros más importantes dentro de la cuenca en estudio, siendo esta la que proporciona prácticamente la totalidad del caudal efluente. En función de esto resulta relevante comparar la cantidad de nieve simulada por el modelo con la que realmente se acumula en la cuenca.

Si bien no se tienen registros directos de medición de nieve, existen imágenes satelitales que muestran la extensión de la cobertura nival a lo largo de la cuenca, el cual puede ser comparado al parámetro ya mencionado anteriormente de cobertura nival entregado por el modelo.

Para esto se usaron las imágenes satelitales MODIS proporcionadas por la NASA, en específico las imágenes MOD10 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod10.php>) que corresponden a las de cobertura nival. Existen varios productos dentro del MOD10 y si bien existe un registro diario, para este estudio se utilizó un registro cada 8 días que corresponde a las imágenes MOD10A2 cuyos detalles se pueden ver en su guía de usuario (Hall & Riggs, 2021). La ventaja de este producto por sobre el diario es que ya viene corregido por la posible presencia de nubes que provocarían píxeles sin datos, los cuales son corregidos en base a las imágenes capturadas en los días contiguos.

La información de las imágenes satelitales fue procesada mediante RStudio obteniéndose el porcentaje del área de cada subcuenca cubierto de nieve en cada imagen, para luego con estos determinar el porcentaje de la cuenca completa cubierta de nieve.

6.2. Albedo

Otro parámetro analizado fue el albedo, el cual en el caso de estudio depende directamente de la nieve debido a que esta cubre casi toda la cuenca durante el invierno.

Al igual que en el caso anterior, para este registro se usaron imágenes MODIS, en específico imágenes MOD43 correspondientes al albedo. No obstante, en este caso estas no fueron directamente descargadas, si no que se recurrió a la Aplicación para Extraer y Explorar Muestras Listas para Análisis (AppEEARS, <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>) la cual permite visualizar de forma más inmediata el albedo para la cuenca en estudio, que es lo que se estaba buscando. La imagen satelital utilizada fue la MOD43A3 cuyos detalles se pueden ver en su guía de usuario (Schaaf & Wang, 2015).

7. Proyección Cambio Climático

7.1. Cambio Climático

7.1.1 Descripción

El cambio climático es la variación del estado de clima identificable en su valor medio o en sus propiedades que persiste durante largos periodos de tiempo. El cambio climático puede deberse a procesos naturales o a forzantes externas.

Si bien este es 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 efectos invernadero, proceso que se inició a partir de la revolución industrial.

Según el quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) hecho en 2014, denominado AR5, la influencia humana en el sistema climático es clara y las emisiones antropogénicas recientes de gases invernadero son las más altas de la historia (IPCC, 2014).

Desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2014). Algunas de las variables que dan cuenta de lo anterior se muestran a continuación:

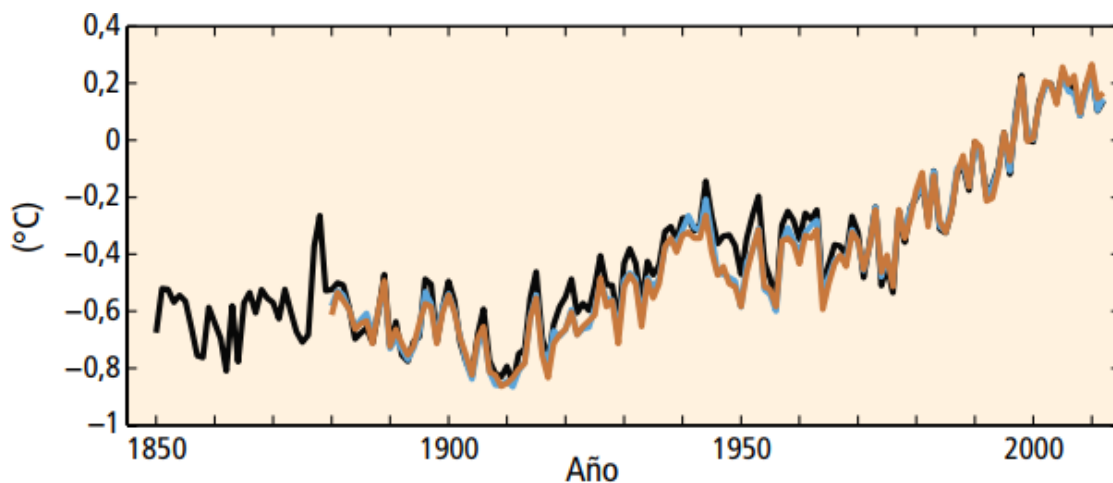


Figura 7-1: Variación del promedio global de temperatura en superficie terrestre y oceánica combinada respecto del promedio del periodo 1986 a 2005, cada color indica un conjunto de datos distinto (IPCC, 2014).

Los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica promediados a nivel global muestran un calentamiento de 0.85 (0.65 a 1.06) [°C] durante el periodo 1880-2012, como se observa en la **Figura 7-1**, debido a esto las tendencias basadas en periodos cortos son muy sensibles a las fechas de inicio y final sin reflejar las condiciones climáticas a largo plazo.

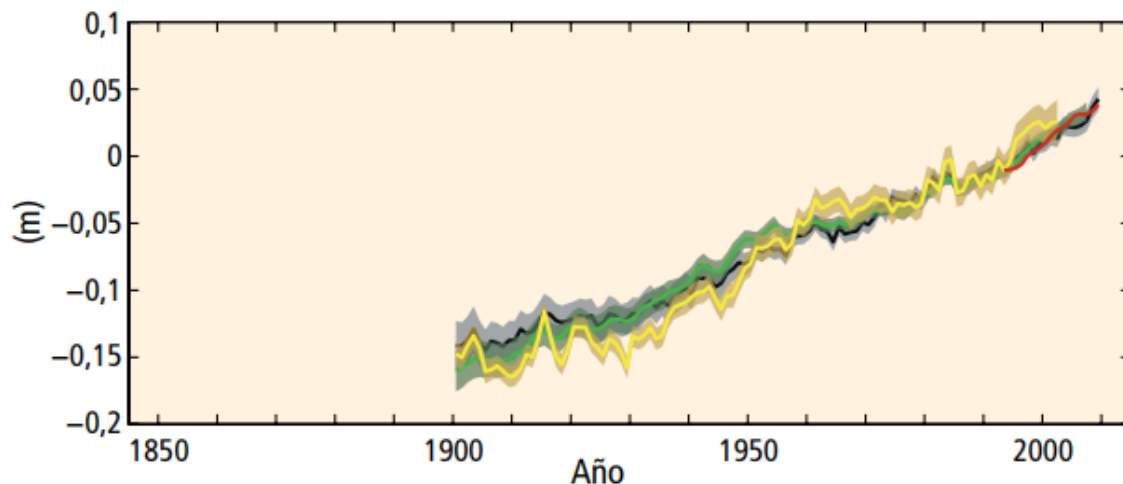


Figura 7-2: Promedio anual global del cambio del nivel del mar con respecto al promedio del conjunto de datos de más larga duración entre 1986 y 2005, cada color indica un conjunto de datos distinto. Todos los conjuntos están alineados para tener el mismo valor en 1993, primer año con altimetría por satélite (línea roja) (IPCC, 2014).

La **Figura 7-2** muestra el promedio global anual del cambio en el nivel del mar con respecto al promedio del conjunto de datos, elevándose 0.19 (0.17 a 0.21) [m]. El aumento en el nivel del mar tiene relación al aumento de temperatura mencionado anteriormente el cual ha acelerado el derretimiento de glaciares, los que han disminuido en un rango del 3.5% al 4.1% por decenio.

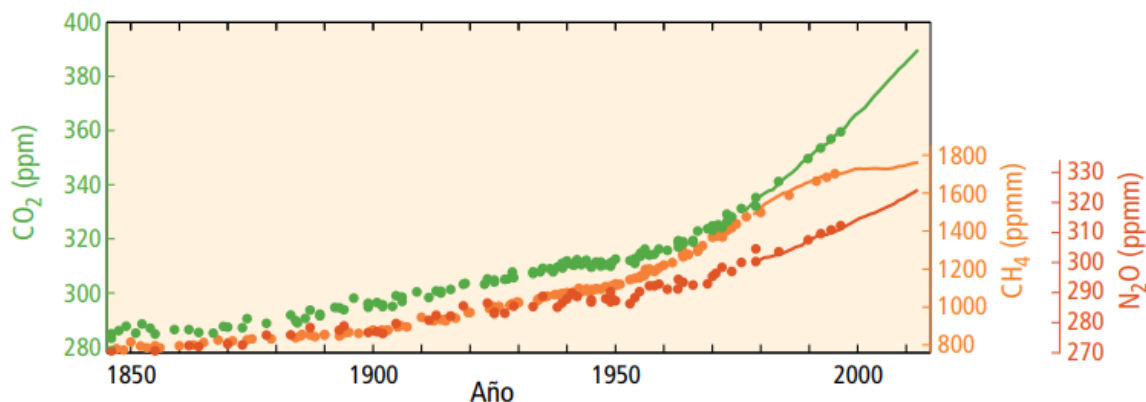


Figura 7-3: Concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero dióxido de carbono (CO_2 , verde), metano (CH_4 , naranja) y óxido nitroso (N_2O , rojo) determinados a partir de testigos de hielo (puntos) y mediciones atmosféricas directas (líneas) (IPCC, 2014).

Las emisiones antropogénicas acumuladas de gases de efecto invernadero (GEI) han experimentado grandes aumentos en las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) como se muestra en la **Figura 7-3**. Entre 1750 y 2011 las emisiones antropogénicas de CO_2 a la atmósfera acumuladas fueron 2040 [GtCO_2], de las cuales alrededor de la mitad han sido producidas en los último 40 años como muestra la **Figura 7-4**. Cerca del 40% de estas emisiones aún sigue en la atmósfera, mientras que el resto fueron removidas almacenándose en la tierra (plantas y suelo) y en el océano. Los océanos han absorbido alrededor del 30% del CO_2 antropógeno provocando su acidificación.

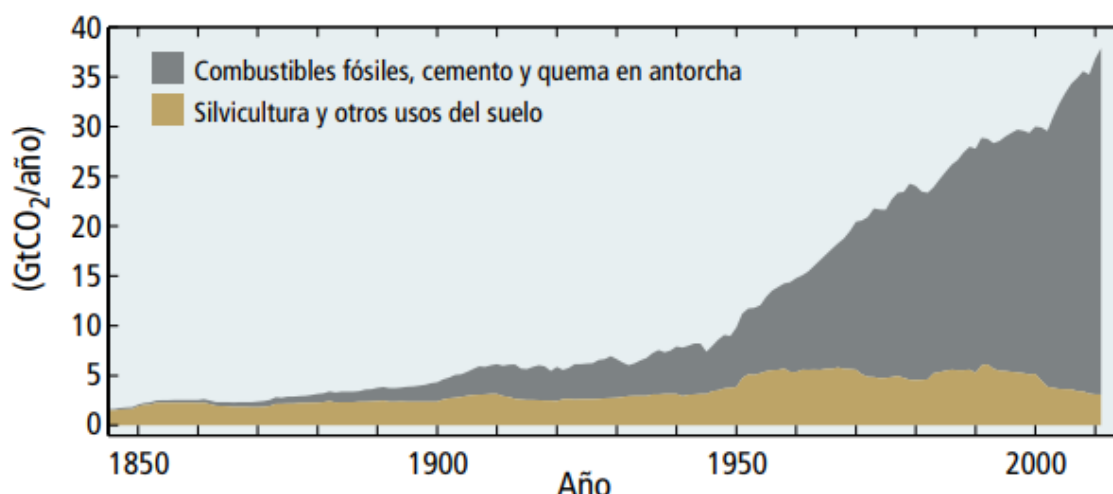


Figura 7-4: Emisiones antropógenas globales de CO_2 procedentes de la silvicultura y otros usos de suelo y de la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y la quema en antorcha (IPCC, 2014).

Las proyecciones futuras dan en cuenta una gama de posibilidades para el clima, el cual dependerá de cómo evolucione la sociedad mundial, las tecnologías, las fuentes energéticas, el crecimiento poblacional y las acciones políticas de mitigación.

7.1.2 Escenarios RCP

El IPCC publicó en el año 2000 el reporte especial sobre escenarios de emisión (SRES), el cual propuso trabajar con un conjunto de escenarios basados en supuestos de evolución de la población mundial enfocado en aspectos sociales, demográficos, tecnológicos y políticas ambientales. En función de lo anterior, se definen los escenarios 1 y 2, dependiendo si el desarrollo se incentiva a nivel global o local, y los escenarios A y B, dependiendo si se prioriza un desarrollo económico o medioambiental, dando paso a cuatro escenarios combinados

principales (A1, A2, B1 y B2) y a sub-escenarios derivados de estas familias. La **Figura 7-5** muestra las emisiones proyectadas para algunos de estos escenarios.

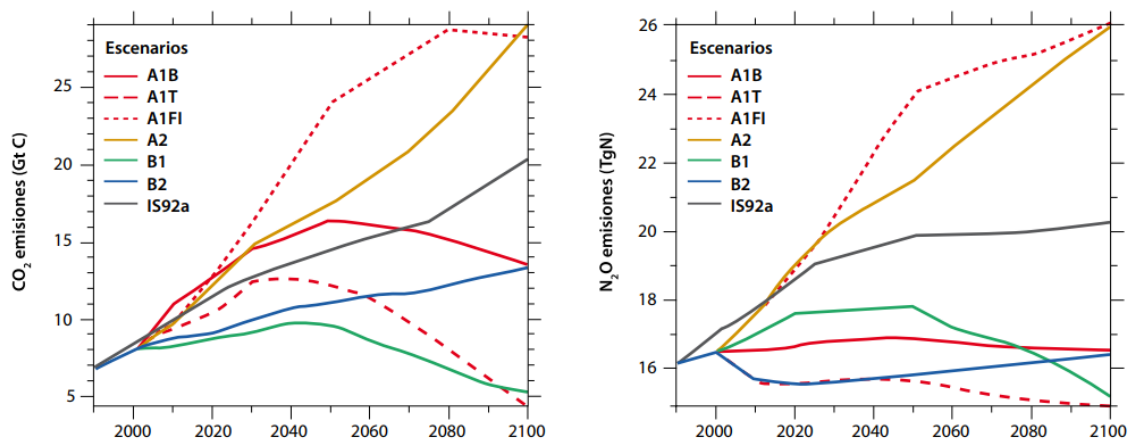


Figura 7-5: Emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero para los escenarios SRES (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

El problema es que un nivel específico de concentraciones de GEI puede ser alcanzado a partir de múltiples condiciones de desarrollo, por lo que en su quinto reporte el IPCC decidió dejar obsoletos los escenarios SRES reemplazándolos con cuatro nuevos escenarios que representan las actuales proyecciones climáticas.

Estos nuevos escenarios se llaman trayectorias representativas de concentración (RCP), los cuales describen el comportamiento de las concentraciones GEI hasta 2100. Cada escenario RCP se diferencia por la forzante radiativa [W/m^2], que corresponde a la cantidad de radiación que queda atrapada en la atmósfera productos de los gases emitidos. La **Tabla 7-1** muestra el detalle de los escenarios y la **Figura 7-6** muestra las emisiones anuales de CO_2 a la atmósfera proyectados por cada escenario.

Tabla 7-1: Características escenarios RCP (Rivera, Ochoa, & Salguero, 2020).

Escenario	Forzante radiativa [W/m^2]	Tendencia forzante radiativa	CO_2 en 2100 [ppm]
RCP 2.6	2.6	Decreciente en 2100	421
RCP 4.5	4.5	Estable en 2100	538
RCP 6.0	6.0	Creciente	670
RCP 8.5	8.5	Creciente	936

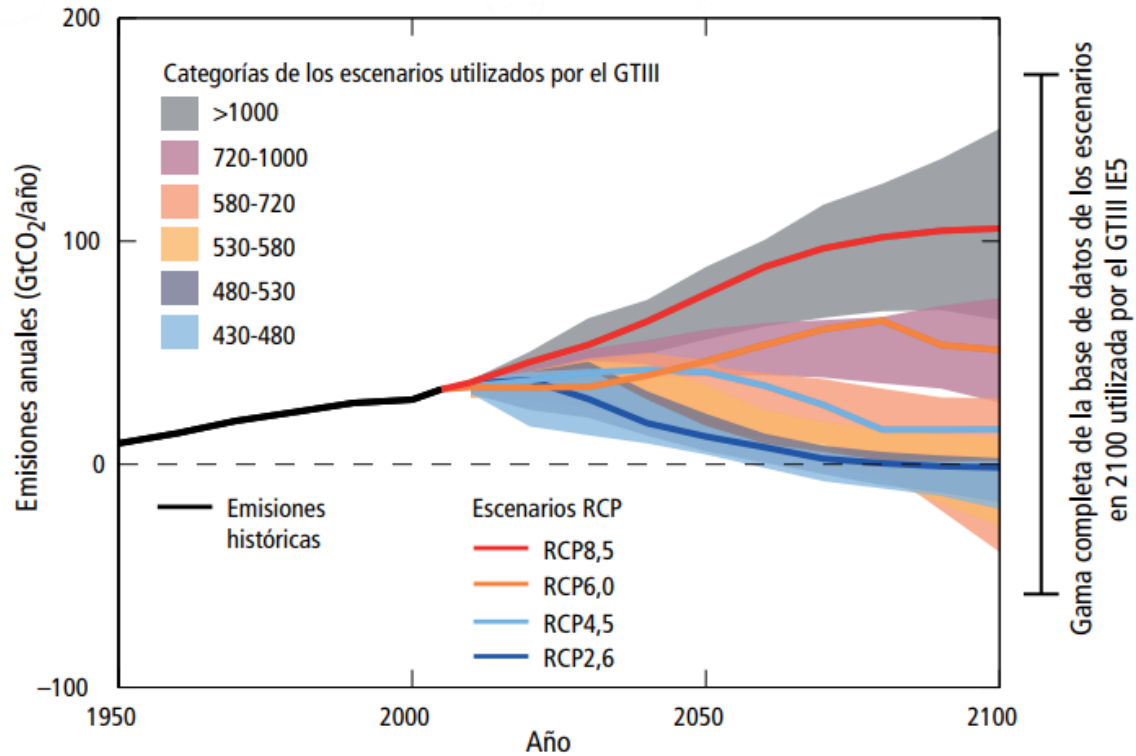


Figura 7-6: Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) de los escenarios RCP y las categorías de escenarios del GTIII (IPCC, 2014).

En función de lo anterior, se aprecia un escenario favorable donde las emisiones disminuyen a futuro (RCP 2.6), dos escenarios intermedios (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario desfavorable (RCP 8.5).

7.1.3 Efectos del Cambio Climático

Desde 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, siendo algunos de estos cambios asociados a la influencia humana (IPCC, 2014). Entre estos cambios encontramos fenómenos como:

- Disminución de temperaturas frías extremas
- Aumento de temperaturas cálidas extremas
- Elevación de los niveles máximos del mar
- Mayor número de precipitaciones intensas

Estos puntos hacen esperables cambios en las distintas etapas del ciclo hidrológico, modificando las tasas de congelación y derretimiento del agua en alturas elevadas, la tasa de evaporación de agua y la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, entre otras. Todos estos son parámetros que podrían afectar la disponibilidad de agua en una cuenca y por ende la cantidad de agua disponible para la población.

7.1.4 Impacto en Chile

Chile cumple con lo señalado en la Convención Marco de las Naciones unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) sobre países que se consideran especialmente vulnerables (Ministerio del Medio Ambiente, 2014) debido a que presenta zonas:

- De borde costero de baja altura
- áridas y semiáridas
- Con cobertura forestal y expuestas al deterioro forestal
- Propensas a desastres naturales
- Propensas a la sequía y desertificación
- Urbanas con problemas de contaminación atmosférica
- De ecosistemas frágiles

A continuación, se describen algunos de los impactos proyectados para Chile (Ministerio del Medio Ambiente, 2014):

7.1.4.1 Temperatura

Se proyecta un aumento de temperatura en todo el territorio nacional, con un gradiente descendiente de norte a sur y de cordillera a océano, siendo este calentamiento menor que el promedio global. Se espera, por tanto, que el mayor calentamiento se produzca en la zona norte y sobre la Cordillera de los Andes, tal como muestra la **Figura 7-7**.

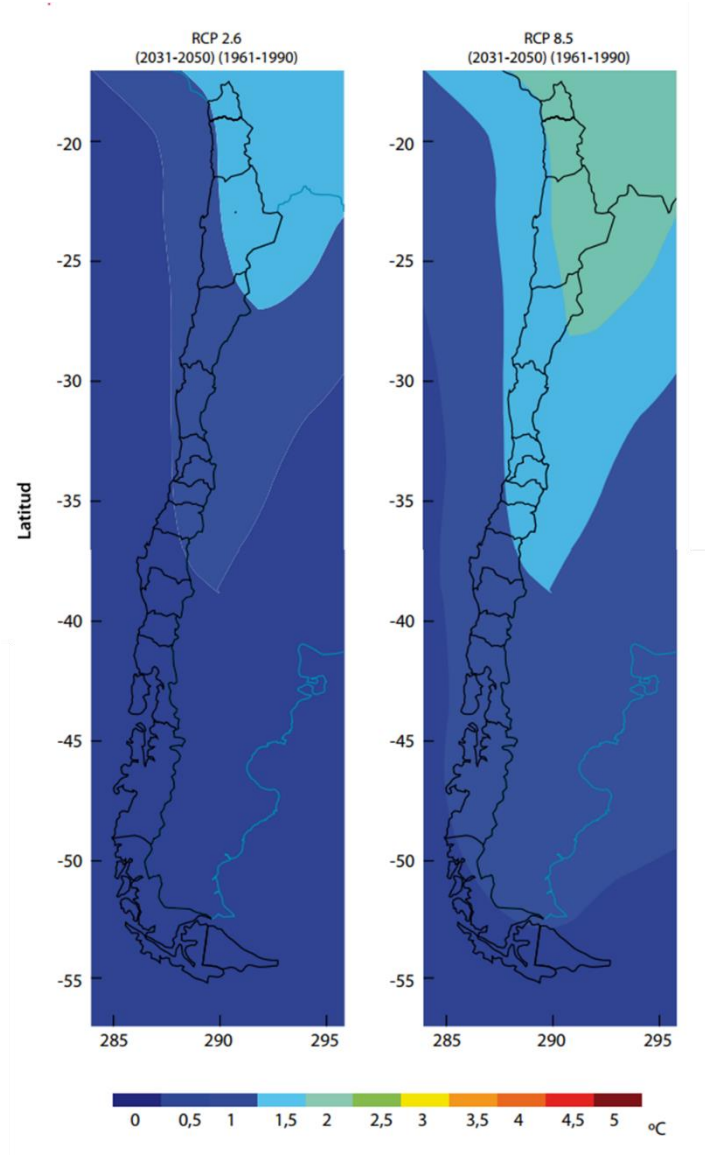


Figura 7-7: Incrementos de temperatura para el periodo 2031-2050 con respecto al periodo 1961-1990 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

Para el periodo cercano, entre 2011 y 2030, los aumentos de temperatura fluctúan entre los 0.5 [°C] para la zona sur y los 1.5 [°C] para la zona norte. Para el periodo entre 2031 y 2050 se mantiene el patrón de calentamiento, pero con valores mayores.

7.1.4.2 Precipitación

Para el periodo cercano, entre 2011 y 2030, se proyectan disminuciones de precipitación entre 5 y 15%, para las latitudes 27°S a 45°S, que comprende desde la cuenca del Río Copiapó (Región de Atacama) hasta la cuenca del Río Aysén (Región de Aysén). Una distribución más detallada de esta disminución puede verse en la **Figura 7-8**.

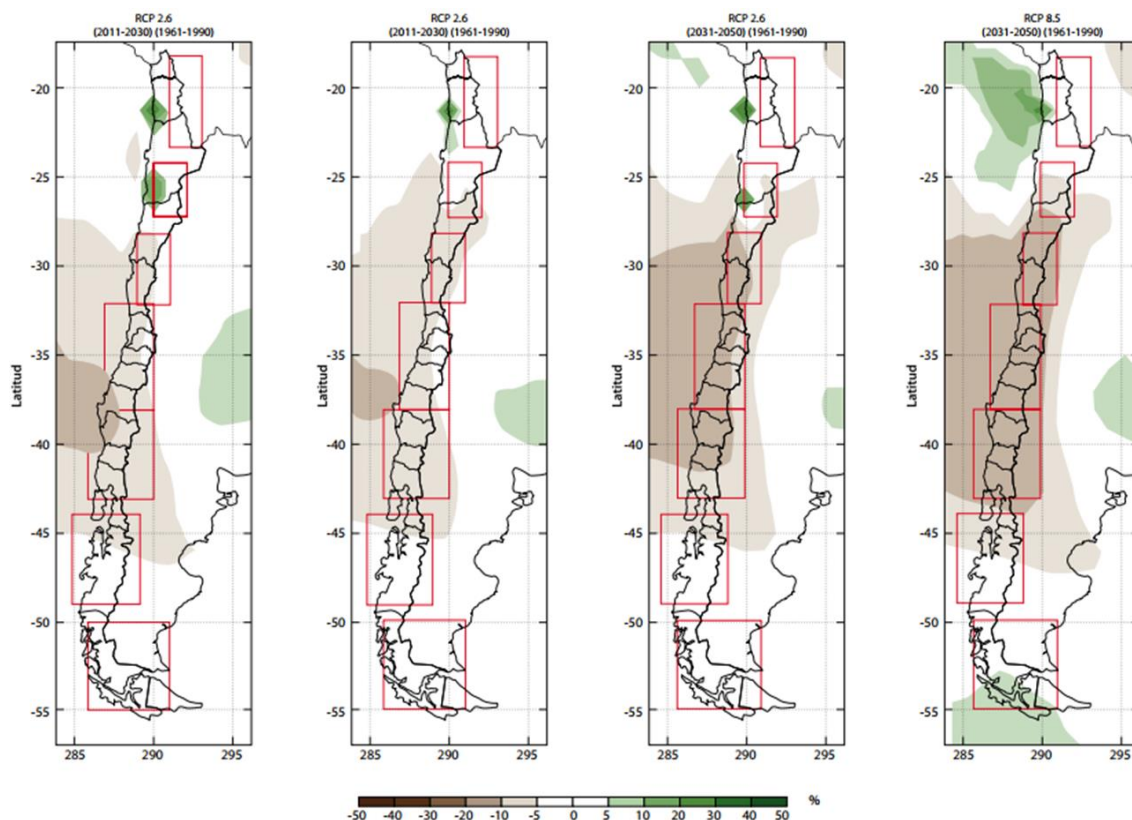


Figura 7-8: Cambios porcentuales de precipitación para el periodo 1961-1990 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 en los periodos 2011-2030 y 2031-2050 (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

7.1.4.3 Eventos climáticos extremos

Análisis han encontrado un marcado aumento en la probabilidad de eventos de sequía, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XXI, proyectando que para fines del siglo XXI este tipo de eventos ocurriría más de 10 veces en 30 años.

Por otra parte, pese a que se espera que el número de eventos de precipitación extrema disminuya, la ocurrencia de eventos de alta precipitación en días con temperaturas elevadas aumentará. La importancia de esto yace en que el incremento de altura de la isoterma cero tiende

a aumentar considerablemente el caudal de los ríos generando catástrofes debido a inundaciones, crecidas y aluviones.

7.1.4.4 Recursos hídricos

Se estima una reducción de los caudales medios mensuales para las cuencas ubicadas entre los paralelos 30°S y 42°S, que corresponde a las regiones entre Coquimbo y Los Lagos. Los estudios dan cuenta de una reducción significativa de caudales en los ríos Elqui, Illapel, Aconcagua, Maipo, Cachapoal, Teno, Cautín y otros.

El hecho de que la isoterma cero se eleve producto del aumento en las temperaturas reduce la capacidad de almacenar nieve a lo largo del año, además de alterar la fecha en que comienzan los derretimientos y se manifiestan los caudales en las cuencas, especialmente las nivales. A esta se les suman las cuencas dependientes de glaciares, los cuales han ido en retroceso los últimos años.

En el caso para la zona austral (paralelos 50°S y 55°S) se espera un leve aumento de los caudales.

7.2. Datos Futuros Simulados

El modelo SWAT permite la rápida simulación de escenarios futuros, necesitando solamente introducir nuevos datos para las variables climáticas, que en este trabajo corresponden a la precipitación y la temperatura.

Al igual que para las variables climáticas históricas, los datos fueron obtenidos del (CR)², el cual proporciona una gran variedad de simulaciones diferenciándose en la extensión considerada, el modelo utilizado y los escenarios considerados. Se cuenta con tres conjuntos de datos principales, diferenciándose por su contexto de realización y resolución espacial que corresponden a globales, para América del Sur y para Chile continental.

Las simulaciones climáticas globales (GCM) tienen entre 100 y 200 [km] de resolución. Estas se hicieron con múltiples modelos climáticos acoplados para la Fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) en el marco del quinto reporte del IPCC que involucró alrededor de 30 grupos de investigación.

Las simulaciones climáticas regionales (RCM) tienen aproximadamente 48 [km] de resolución y provienen del Experimento de Subescala Climática Regional Coordinado (CORDEX) y de la Red Europea-Sudamericana para el Estudio del Impacto y Evaluación del Cambio Climático (CLARIS). Estas son simulaciones forzadas desde los modelos globales o por reanálisis atmosférico.

Las simulaciones climáticas locales tienen 44 y 10 [km] de resolución y se realizaron con el Sistema de Modelado Climático Regional (RegCM4) y el Modelo del Instituto Max Planck del Sistema Meteorológico Terrestre (MPI-ESM-MR) como forzante respectivamente, ejecutadas por el (CR)². El modelo RegCM4 es un modelo regional de la atmosfera y la superficie continental de área limitada y alta resolución espacial que puede ser localizado en cualquier parte del globo (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², 2018).

7.2.1 Simulación Local

Como primera opción se considera el uso de las simulaciones locales con la forzante RegCM4 debido a su mayor resolución, estos datos incluyen los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, aplicando para el periodo 2006-2050. La **Figura 7-9**, **Figura 7-10** y **Figura 7-11** muestran una comparación entre los valores usados para el modelo hidráulico y los valores simulados para el futuro.

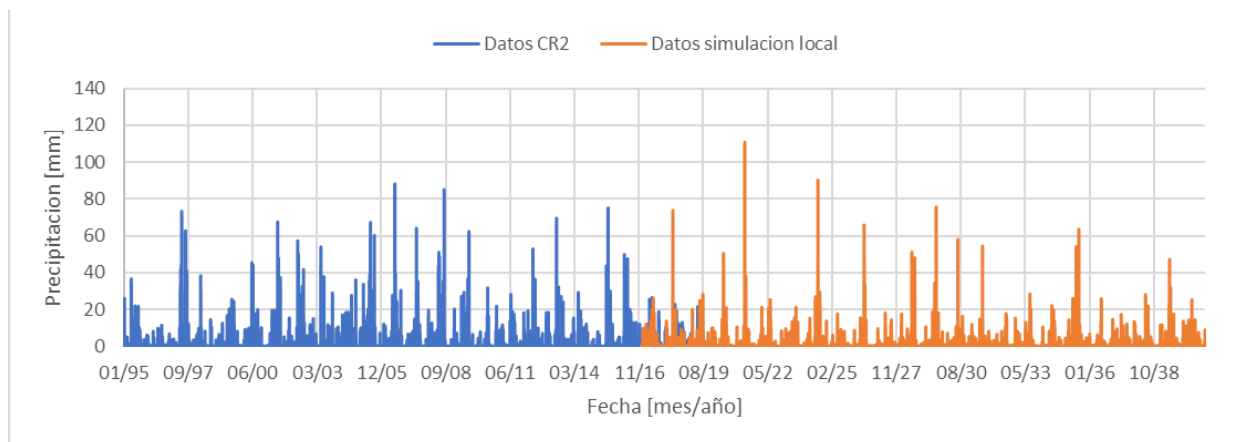


Figura 7-9: Comparación precipitación datos históricos y datos simulación local del CR2 periodo 1979-2039.

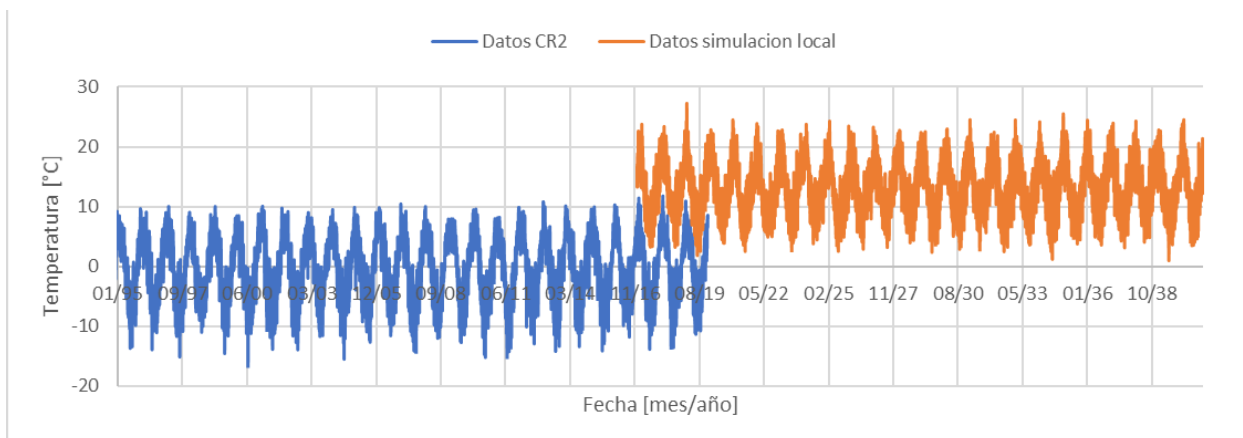


Figura 7-10: Comparación temperatura mínima datos históricos y datos simulación local del CR2 periodo 1979-2039.

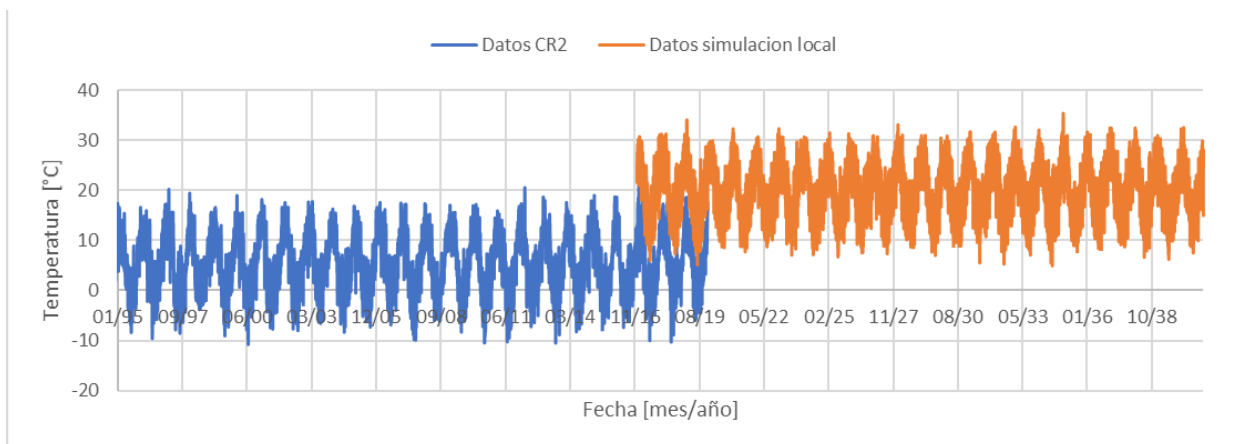


Figura 7-11: Comparación temperatura máxima datos históricos y datos simulación local del CR2 periodo 1979-2039.

Se observa claramente que, si bien existe una disminución en las precipitaciones simuladas respecto de las históricas, esta es una variación menor y que puede ser debido a la disminución esperada en las lluvias a futuro consecuencia del calentamiento global. Sin Embargo, es claro que el salto abrupto en las temperaturas simuladas respecto de las históricas no es natural y muestra un problema en los datos locales simulados para la zona más cordillerana.

Este salto puede deberse a errores en la calibración de las temperaturas más cordilleranas, las cuales pueden variar ampliamente respecto de las percibidas más al oeste debido al rápido aumento de altura. En este caso los valores simulados podrían estar subestimando el descenso de temperatura percibido.

Siendo la temperatura un factor primordial para el derretimiento de nieve, es posible que el uso de estos datos produzca resultados de menor validez al ser introducidos al modelo, por lo que se considera el uso de otra fuente de datos.

7.2.2 Simulación Global

Se recurre a las simulaciones globales del CMIP5 que incluyen los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5, en este caso el periodo de tiempo disponible será variable dependiendo del modelo utilizado. La **Tabla 7-2** muestra las distintas simulaciones globales disponibles.

Tabla 7-2: Simulaciones globales y sus instituciones asociadas (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2018).

Modelo CMIP5	Institución/descripción
ACCESS1-0 ACCESS1-3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia and Bureau of Meteorology (BOM), Australia.
bcc-csm1.1 bcc-csm1.1-m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China.
BNU-ESM	Beijing Normal University Earth System Model, China.
CanCM4 CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canadá.
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, Estados Unidos.
CESM1-BGC CESM1-CAM5 CESM1-CAM5-1-FV2 CESM1-FASTCHEM CESM1-WACCM	National Science Foundation, Department of Energy, NCAR, Estados Unidos.
CMCC-CESM CMCC-CM CMCC-CMS	Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italia.
CNRM-CM5 CNRM-CM5-2	Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo-France, Francia.
CSIRO-Mk3.6-0 CSIRO-Mk3.1-1-2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia.
EC-EARTH	Consortium of European Research Institutions and Researchers, Based on State-of-the-Art Models for the Atmosphere, the Ocean, Sea Ice and the Biosphere.
FGOALS-g2 FGOALS-s2	The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China.
FIO-ESM	The First Institute of Oceanography Earth System Model, SOA, China.
GFDL-CM2p1 GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Estados Unidos.
GISS-E2-H GISS-E2-H-CC GISS-E2-R GISS-E2-R-CC	The Goddard Institute for Space Studies, NASA, Estados Unidos.
HadCM3 HadGEM2-AD HadGEM2-CC HadGEM2-ES	Hadley Centre, Reino Unido.
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics, Rusia.
IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, Francia.
MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM MIROC4h MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón.
MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR MPI-ESM-P	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania.
MRI-CGCM3 MRI-ESM1	Meteorological Research Institute, Japón.
NorESM1-ME NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Noruega.

Se comprobaron los datos de tres modelos distintos que son CCSM4, CSIRO e IPSL, cuyas simulaciones históricas se compararon con los datos del CR2 utilizados en el modelo (1990-2005). La **Figura 7-12**, **Figura 7-13** y **Figura 7-14** muestran las comparaciones de precipitación entre los datos del CR2 y los de cada modelo.

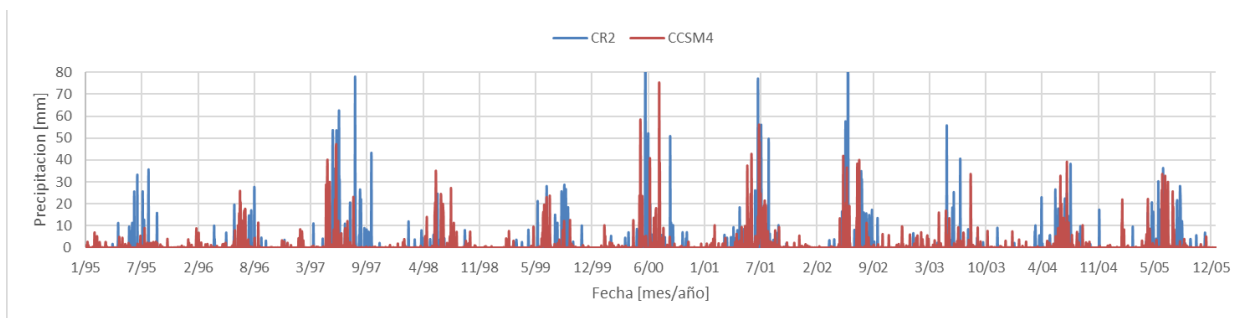


Figura 7-12: Precipitación periodo 1990-2005 del CR2 y simulación CCSM4.

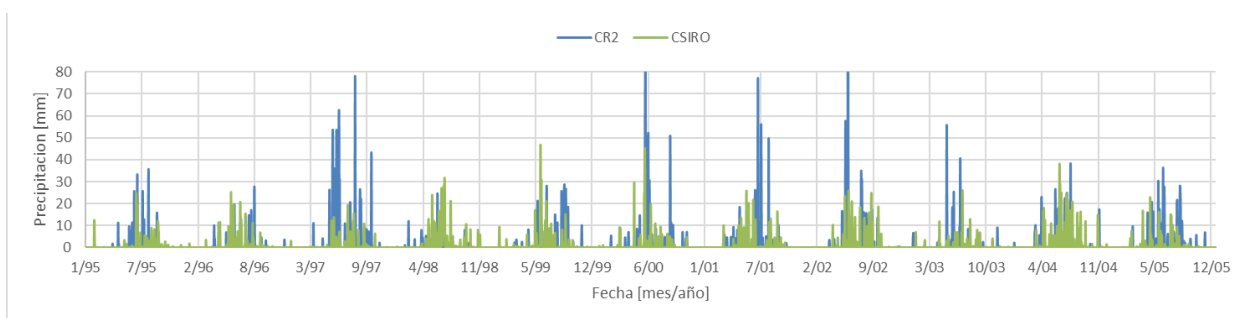


Figura 7-13: Precipitación periodo 1990-2005 del CR2 y simulación CSIRO.

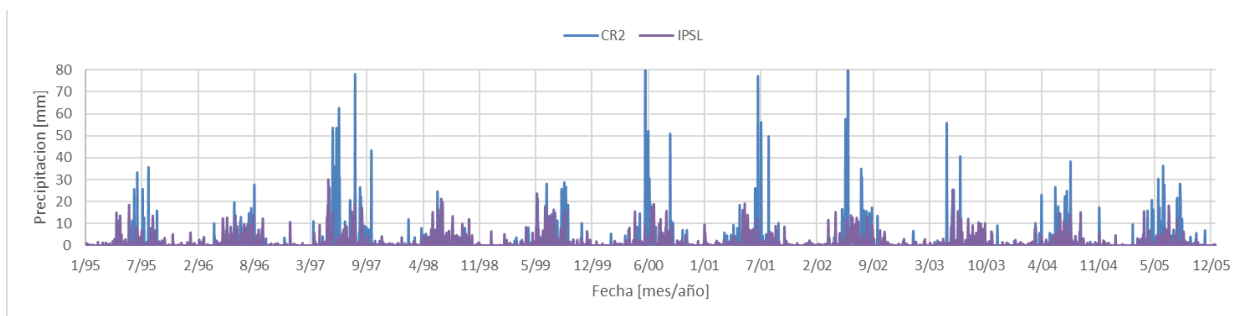


Figura 7-14: Precipitación periodo 1990-2005 del CR2 y simulación IPSL.

Es fácilmente observable que, de los modelos considerados, los modelos CSIRO e IPSL no representan de buena forma los valores máximos de precipitación observados, siendo estos valores más distribuidos a lo largo del invierno en vez del rápido aumento y descenso en las lluvias que muestran los datos del CR2, así como los datos observados. No así el modelo CCSM4, el cual se acerca mucho más a este patrón logrando una buena similitud a lo largo de los años analizados, por lo que se seleccionara este modelo como los datos proyectados a utilizar.

7.3. Downscaling (DS)

El funcionamiento del modelo SWAT determina el punto con mediciones más cercano a cada subcuenca para determinar las variables climáticas que se aplicaran a esta, por lo que se requiere de varios puntos con mediciones dentro de una cuenca para que el modelo pueda funcionar de manera correcta, razón por la cual no se utilizaron datos de las estaciones existentes y se recurrió a los datos del CR2.

Para el caso de simulaciones futuras se decidió utilizar los datos de la simulación global CCSM4, cuyo problema yace en la poca resolución que posee (0.94° cada píxel), obteniéndose apenas cuatro puntos en un rango aceptable de cercanía a la cuenca en estudio. Siendo imposible trabajar solo con estos 4 puntos es que se recurre al proceso de “Downscaling” (subescalado) que permite el reescalado de los datos a la resolución deseada, en este caso se usara la misma resolución que poseen los datos del CR2 ya utilizados.

Esta tarea se realizó mediante la herramienta del grupo Santander para RStudio llamada Climate4R (<https://github.com/SantanderMetGroup/climate4R>), para esto se recurrió a dos de las referencias formales que entrega la misma página (Bedia, y otros, 2020) (Bedia, y otros, 2018) que incluyen una referencia al código utilizado, el cual fue adaptado para poder ser aplicado al caso de este estudio.

Se cargan los valores que serán escalados (modelo CCSM4) y los valores según los que se escalaran (CR2) de un mismo periodo (1990-2005), la forma de relacionarlos dependerá del método utilizado. La **Tabla 7-3** muestra los posibles métodos a utilizar.

Tabla 7-3: Resumen de las configuraciones de predictores (Bedia, y otros, 2020).

<i>SD Method</i>	<i>ID</i>	<i>Predictor configuration description</i>
GLM	M1	Spatial: n combined PCs explaining 95% of variance
GLM	M2	Spatial: n independent PCs explaining 95% of the variance
GLM	M3	Local: first nearest gridbox
GLM	M4	Local: 4 nearest gridboxes
Analog	M5	Spatial: original standardized [†] predictor fields
Analog	M6	Spatial: n combined PCs explaining 95% of variance
Analog	M7	Spatial: n independent PCs explaining 95% of the variance

7.3.1 Método GLM

Los Modelos Lineales Generalizados (GLMs) son una extensión de la regresión lineal clásica, el cual permite modelar el valor esperado de un variable de predicción aleatoria cuya distribución pertenece a la familia exponencial (Y) a través de una función matemática arbitraria llamada función enlace (g) y un conjunto de parámetros desconocidos (β), en base a la formula siguiente (Bedia, y otros, 2020):

$$E(Y) = \mu = g^{-1}(X\beta) \quad (7.1)$$

X: Predictor.

E(Y): Valor esperado del predictando.

β : Parámetros desconocidos, estos pueden ser estimados por máxima verosimilitud, considerando un algoritmo iterativo de mínimos cuadrados.

7.3.2 Método Analógico

Los métodos analógicos se basan en el supuesto de que similares patrones atmosféricos en una región determinada conducen a resultados meteorológicos locales similares. Para un patrón atmosférico dado, la predicción local correspondiente se estima de acuerdo con una medida de similitud determinada. Este método permite tener en cuenta la no linealidad de las relaciones entre predictores y predictandos. El principal inconveniente de esta técnica es que no puede predecir valores fuera del rango observado (Bedia, y otros, 2020).

Cabe destacar que normalmente los métodos funcionan con más de una variable, por ejemplo, para el caso de la precipitación se considera también la humedad. No obstante, esto obliga a trabajar con vectores de datos mucho más extensos debido a los largos periodos y áreas analizadas haciendo imposible su cálculo en este trabajo debido a limitaciones de hardware, por lo que el análisis realizado fue solamente utilizando cada variable respecto de si misma.

7.3.3 Validación

Una parte crucial del proceso de subescalado es la validación, que permite evitar conclusiones engañosas del rendimiento del modelo debido a los datos creados. Para esto se utiliza un método de validación cruzada, donde la muestra original (periodo histórico) se divide en submuestras de igual tamaño y mutuamente excluyentes (pliegues). En cada iteración un pliegue se retiene para la prueba (fase de predicción) y los demás se usan para el entrenamiento (fase de calibración), finalmente las muestras resultantes se fusionan para producir una única serie que se valida con los datos observados (Bedia, y otros, 2020).

Los modelos se validan primero en base a los registros climáticos históricos reales, para luego aplicarse a las series futuras. Por lo tanto, el objetivo de la validación cruzada es estimar correctamente el rendimiento de una técnica particular considerada dado un conjunto de datos de predictores conocidos, para luego poder aplicar esta técnica a los datos predictores futuros. Los índices de rendimiento utilizados para la precipitación se muestran en la **Tabla 7-4**, mientras que la **Figura 7-15** y **Figura 7-16** muestran los resultados obtenidos para cada modelo en el caso de la precipitación y la temperatura respectivamente.

Tabla 7-4: Índices utilizados para validar el subescalado de las precipitaciones (Bedia, y otros, 2020).

Code	Description	Type
R01	Relative frequency of wet days (precip ≥ 1 mm)	index
Mean	Mean	index
SDII	Simple Daily Intensity Index	index
Skewness	Skewness	index
WWProb	Wet-wet transition probability (wet ≥ 1 mm)	index
DWProb	Dry-wet transition probability (wet ≥ 1 mm)	index
WetAnnualMaxSpell	Median of the annual wet (≥ 1 mm) spell maxima	index
DryAnnualMaxSpell	Median of the annual dry (< 1 mm) spell maxima	index
AnnualCycleAmp	Amplitude of the daily annual cycle	index

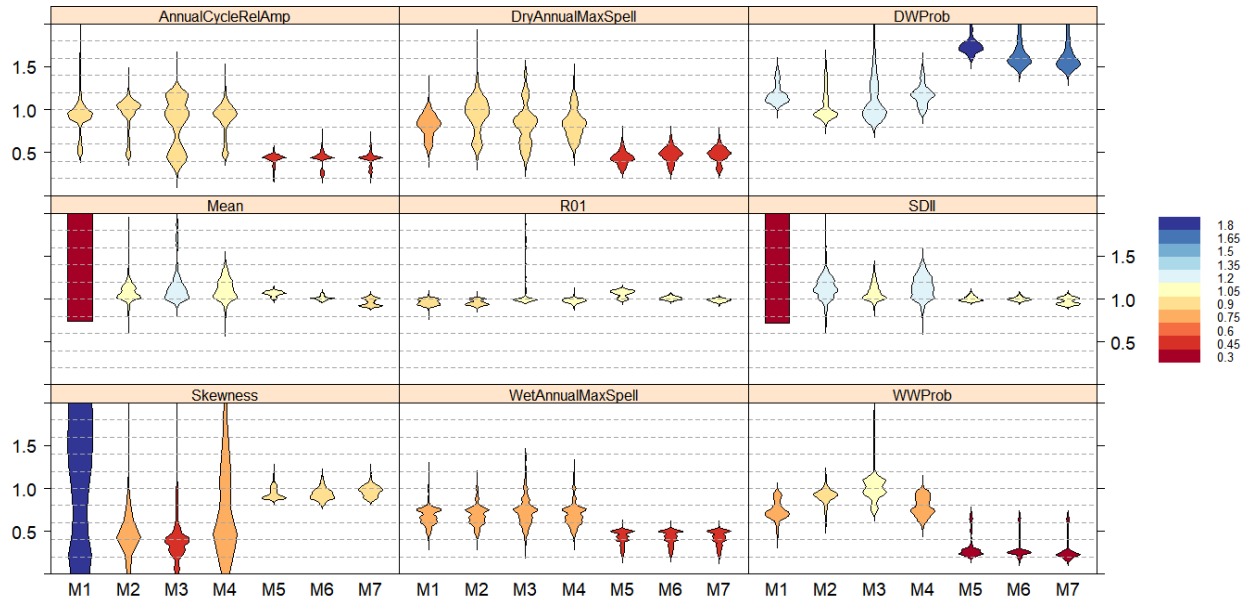


Figura 7-15: Resultados validación cruzada precipitación para los 7 métodos probados (predicho/observado).

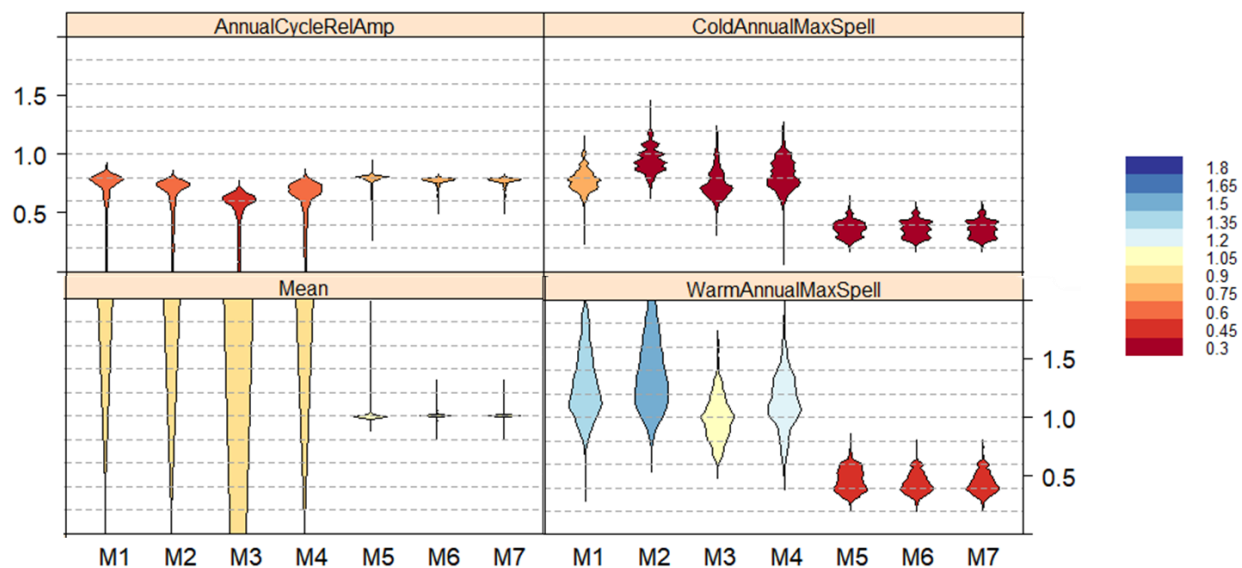


Figura 7-16: Resultados validación cruzada temperatura para los 7 métodos probados (predicho/observado).

En base a los resultados obtenidos, los métodos elegidos fueron M2, M5 y M6 (**Tabla 7-3**). Se puede apreciar que tal como se mencionó anteriormente, los métodos M5 y M6 al ser análogos muestran diferencias marcadas en los valores extremos (indicador DryAnnualMaxSpell y WetAnnualMaxSpell para precipitación, ColdAnnualMaxSpell y WarmAnnualMaxSpell para temperatura) debido a que el método solo puede generar valores dentro del rango definido por los datos observados creando máximos y mínimos de menor magnitud que los originales.

Finalmente, la **Figura 7-17** muestra las temperaturas generadas por el proceso de subescalado utilizando los distintos métodos considerados. Se puede observar que en general para el caso de la temperatura todos los métodos tienen un buen comportamiento generando curvas similares a los datos observados, siendo notorio solamente el aspecto ya mencionado de que los datos subescalados no alcanzan las temperaturas mínimas y máximas registradas, sino que se obtienen valores contenidos en estos límites.

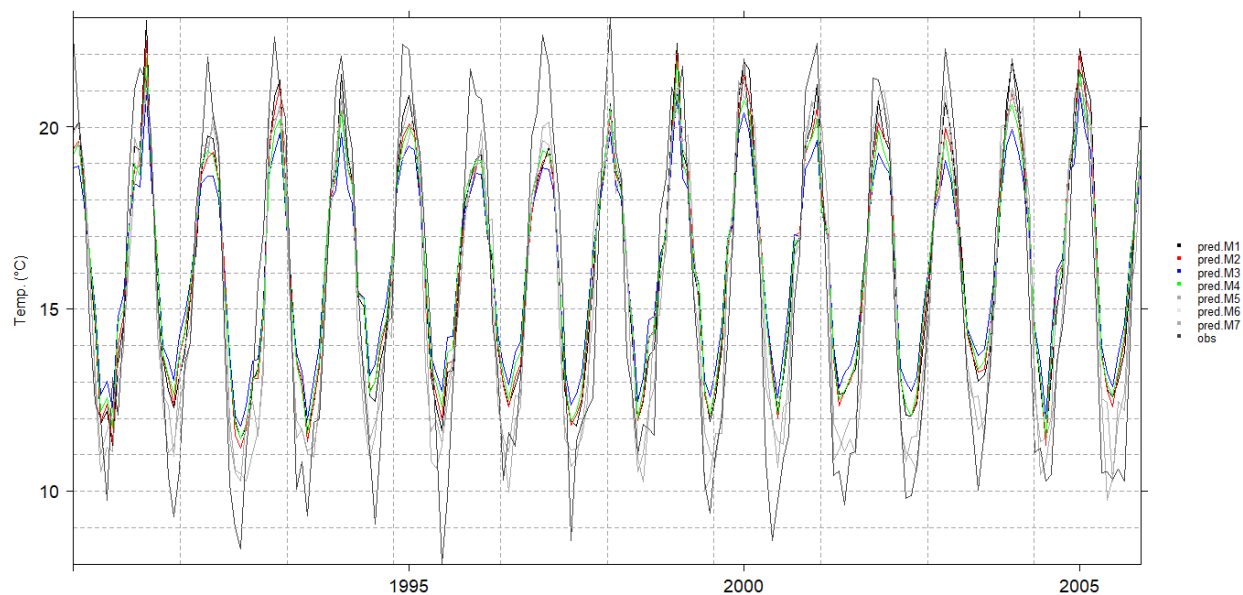


Figura 7-17: Temperatura promedio observada junto a los valores subescalados mediante los distintos métodos utilizados.

Una vez listas las series de datos futuros, que corresponden al modelo CCSM4 en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 subescalado mediante los métodos M2, M5 y M6, se aplican directamente al modelo hidrológico ya calibrado.

8. Resultados Modelo Hidrológico

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de caudales líquidos y sólidos para cada una de las labores realizadas. Cabe destacar que debido a lo largo de las series de datos para el periodo de estudio más el proyectado (1979-2039), se presentan un periodo acotado (2001-2030) permitiendo visualizar de mejor manera los resultados.

8.1. Modelo Hidrológico Caudal Líquido y Sólido Escala Mensual

El modelo mensual fue realizado para el periodo 1989-2011, el cual fue separado en cuatros subperiodos, dos de calibración y dos de validación. La **Tabla 8-1** muestra los valores de NSE y KGE obtenidos para cada subperiodo, mientras que la **Figura 8-1** y **Figura 8-2** muestran las curvas de datos observados y simulados para cada periodo correspondiente.

Tabla 8-1: Parámetros correlación caudal líquido y sólido modelo hidrológico a escala mensual periodo 1989-2011.

Periodo	Año inicio	Año final	Caudal		Sedimentos	
			NSE	KGE	NSE	KGE
Calibración	1989	1994	0.64	0.52	0.54	0.49
Validación	1995	2000	0.69	0.54	0.25	0.41
Calibración	2001	2006	0.48	0.33	0.29	0.31
Validación	2007	2011	0.65	0.46	0.59	0.52

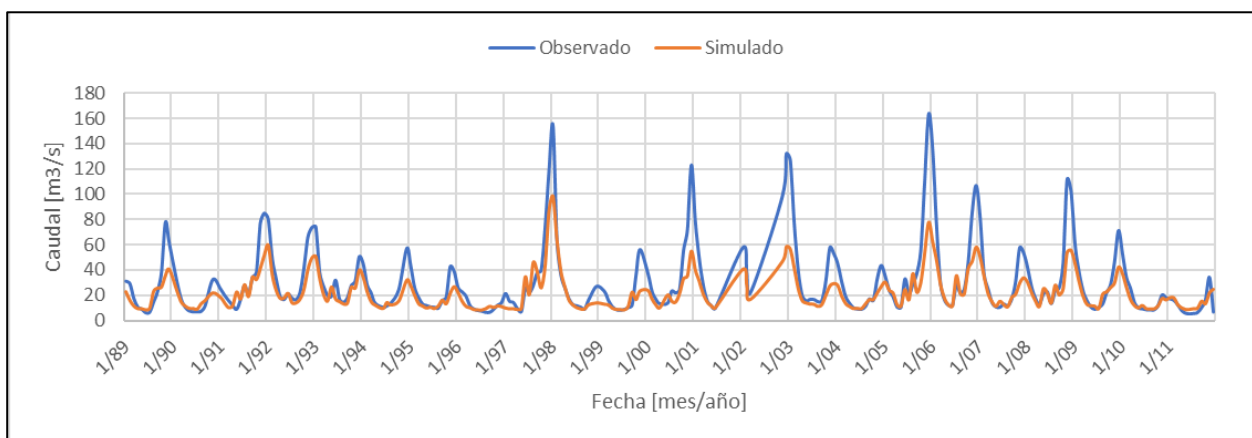


Figura 8-1: Caudal líquido observado y simulado periodo 1989-2011, escala mensual.

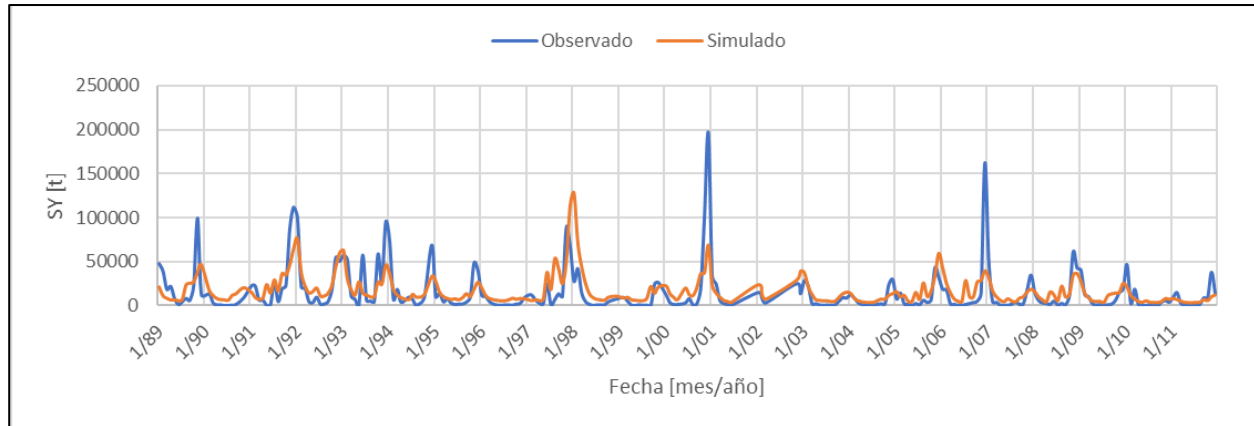


Figura 8-2: Caudal solido observado y simulado periodo 1989-2011, escala mensual.

8.2. Modelo Hidrológico Caudal Liquido y Solido Escala Diaria

El modelo diario fue realizado para el periodo 1989-2018, que es donde terminan los registros de datos medidos. En este caso el periodo fue separado en seis subperiodos, tres de calibración y tres de validación. La **Tabla 8-2** muestra los valores de NSE y KGE obtenidos para cada subperiodo, mientras que la **Figura 8-3** y **Figura 8-4** muestran las curvas de datos observados y simulados para el periodo de estudio.

Tabla 8-2: Parámetros correlación caudal líquido y solido modelo hidrológico a escala diaria periodo 1989-2018.

Periodo	Año inicio	Año final	Caudal		Sedimentos	
			NS	KGE	NS	KGE
Calibración	1989	1994	0.77	0.74	0.34	0.34
Validación	1995	2000	0.72	0.63	0.32	0.27
Calibración	2001	2006	0.65	0.50	0.10	0.24
Validación	2007	2011	0.76	0.68	0.26	0.36
Calibración	2012	2015	0.65	0.65	0.04	-0.24
Validación	2016	2018	0.75	0.73	0.04	-0.20

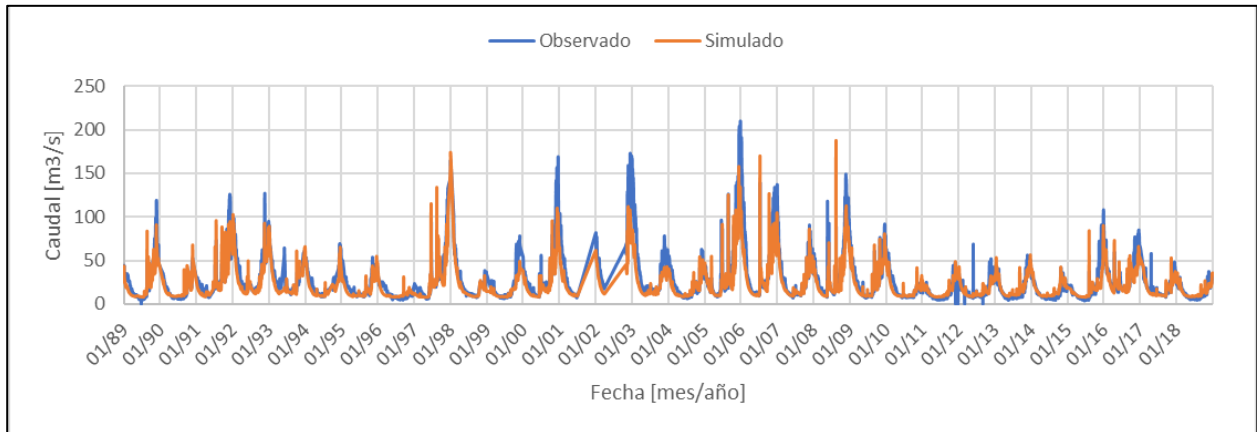


Figura 8-3: Caudal liquido observado y simulado periodo de calibración 1989-2018, escala diaria.

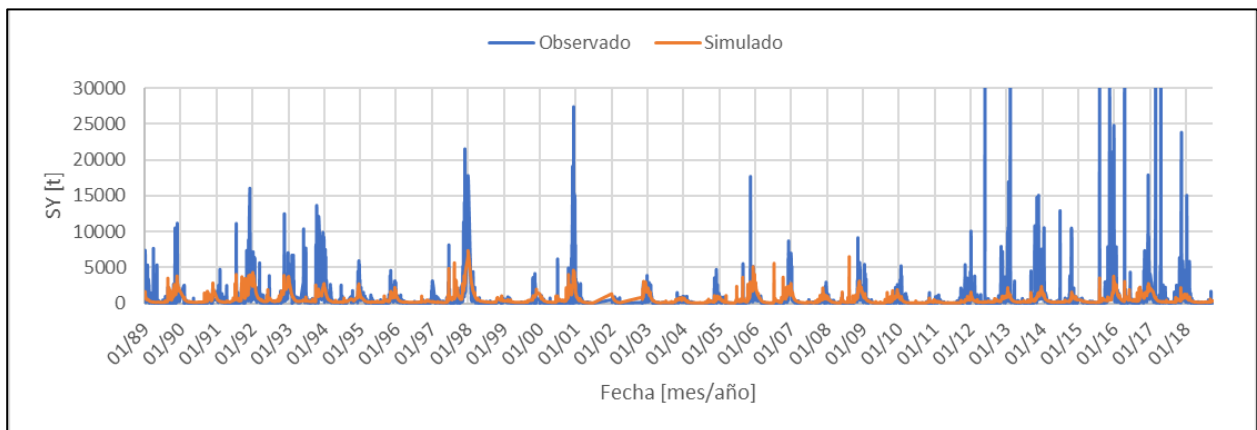


Figura 8-4: Caudal solido observado y simulado periodo de calibración 1989-2018, escala diaria.

8.3. Modelo Hidrológico Caudal Líquido Escala Diaria

De Forma adicional al modelo anterior, se realizó otro modelo solo de caudal líquido que abarcara la totalidad del periodo de estudio (1992-2018, no comienza en 1989 debido a un periodo de “calentamiento” que necesita el modelo al comenzar), utilizando durante todo el periodo los mismos valores de parámetros, a diferencia de los modelos anteriores donde los valores mostraban pequeñas variaciones para cada periodo. La **Tabla 8-3** muestra los valores obtenidos para el NSE y KGE, mientras que la **Figura 8-5** muestra las curvas de datos observados y simulados para el periodo completo del que se tiene mediciones de caudal en la estación Chacabuquito.

Tabla 8-3: Parámetros correlación caudal líquido modelo hidrológico a escala diaria periodo 1992-2019.

Periodo	Año inicio	Año final	Caudal	
			NS	KGE
Calibración	1992	2008	0.71	0.60
Validación	2009	2019	0.71	0.74

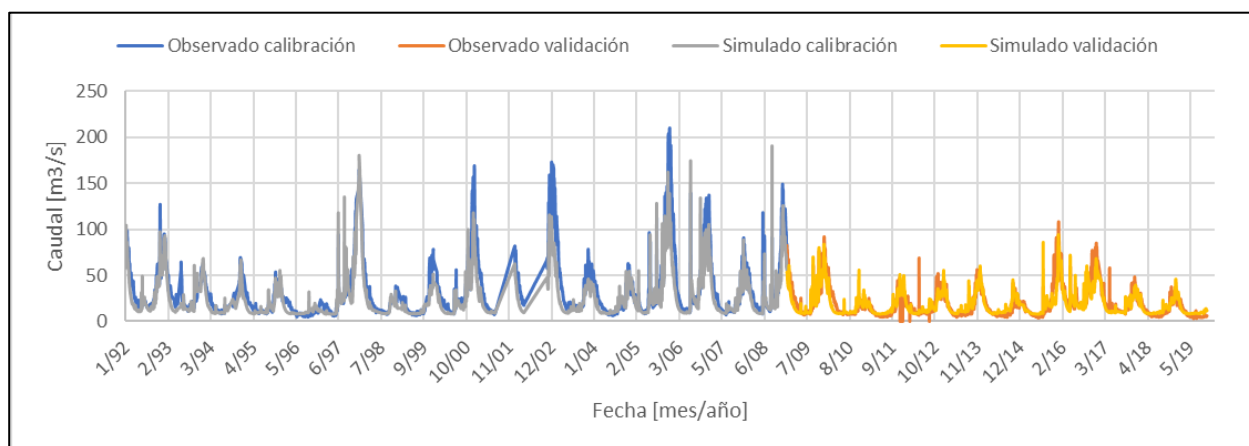


Figura 8-5: Caudal líquido observado y simulado periodo 1992-2019, escala diaria.

8.4. Cobertura Nival

Usando el modelo hidrológico a escala diaria de la sección anterior, se extrajo la variable correspondiente a la cobertura nival y se comparó con los datos de cobertura nival calculados usando las imágenes MODIS. El periodo y subperiodos considerados fueron los mismos (1992-2019), con la diferencia que las imágenes MODIS comienzan en el año 2000, por lo que la serie de datos utilizada será para el periodo 2000-2019. La **Tabla 8-4** muestra los valores obtenidos para el NSE y KGE, mientras que la **Figura 8-6** muestra las curvas de datos extraídos de las imágenes MODIS y simulados para el periodo completo.

Tabla 8-4: Parámetros correlación cobertura nival modelo hidrológico a escala diaria periodo 2000-2019.

Periodo	Año inicio	Año final	Caudal	
			NS	KGE
Calibración	2000	2008	0.77	0.86
Validación	2009	2019	0.82	0.90

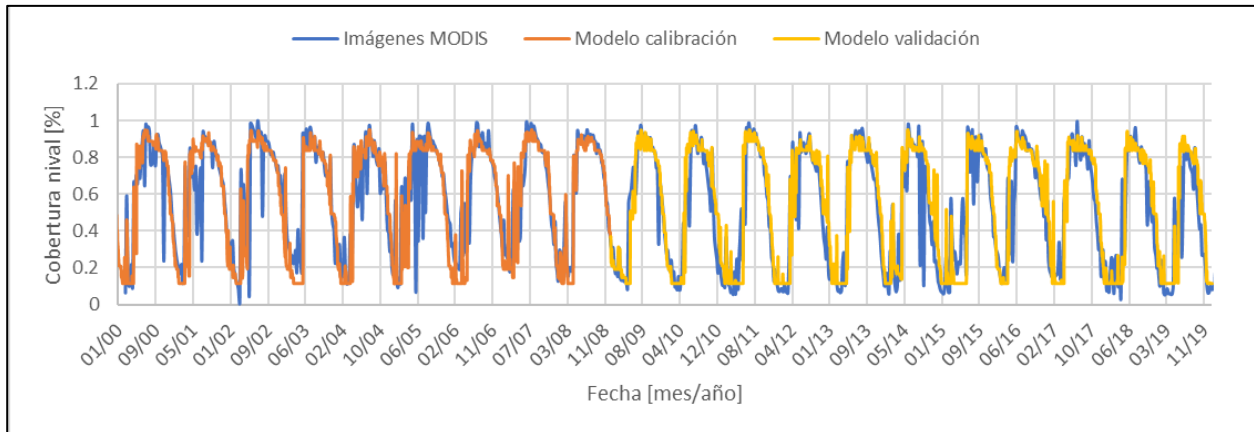


Figura 8-6: Cobertura nival imágenes MODIS y simulado periodo 2000-2019.

8.5. Albedo

En base a los tres posibles casos mencionados en la subsección correspondiente al albedo de la sección Modelo SWAT, se grafican los valores de albedo obtenidos para cada día junto a los valores obtenidos mediante las imágenes MODIS y la herramienta AppEEARS. La **Figura 8-7** muestra el periodo 2000-2008 y 2009-2019 correspondientes a calibración y validación respectivamente.

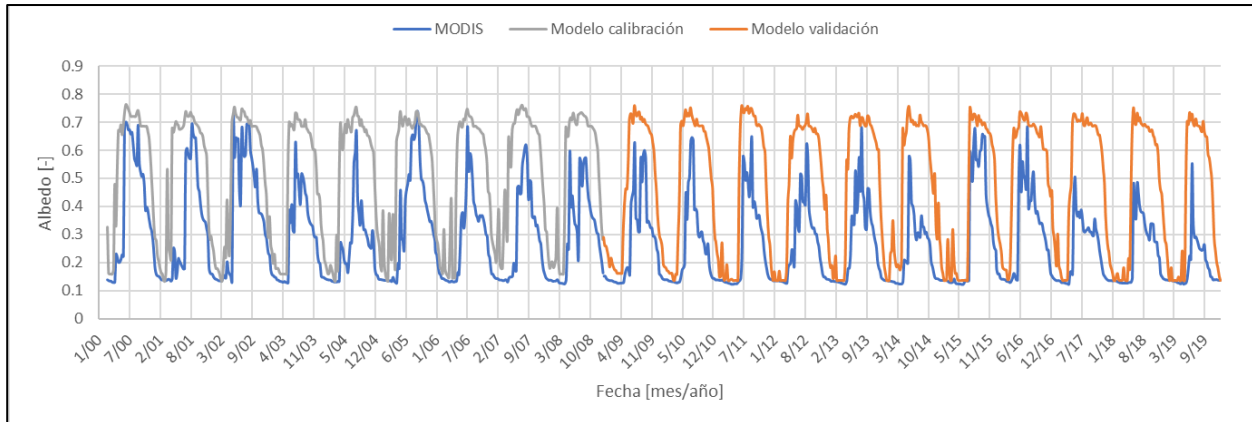


Figura 8-7: Albedo promedio de la cuenca en estudio modelado y observado para el periodo 2000-2019.

8.6. Precipitación y Temperatura Subescalados

Se realiza una comparación de las variables climáticas futuras, obtenidas mediante los métodos de subescalado, con los valores del CR2 para confirmar la validez de los datos. De la **Figura 8-8** a la **Figura 8-13** muestran la comparación entre los datos del CR2 y los datos finales del modelo CCSM4 para la precipitación y temperatura, tanto mínima como máxima, subescalado mediante el método M5 (**Tabla 7-3: Resumen de las configuraciones de predictores** .**Tabla 7-3**), para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 respectivamente. Para ver los gráficos correspondientes a todos los métodos utilizados (M2, M5 y M6) consultar el Anexo 3 – Resultados Métodos Subescalado.

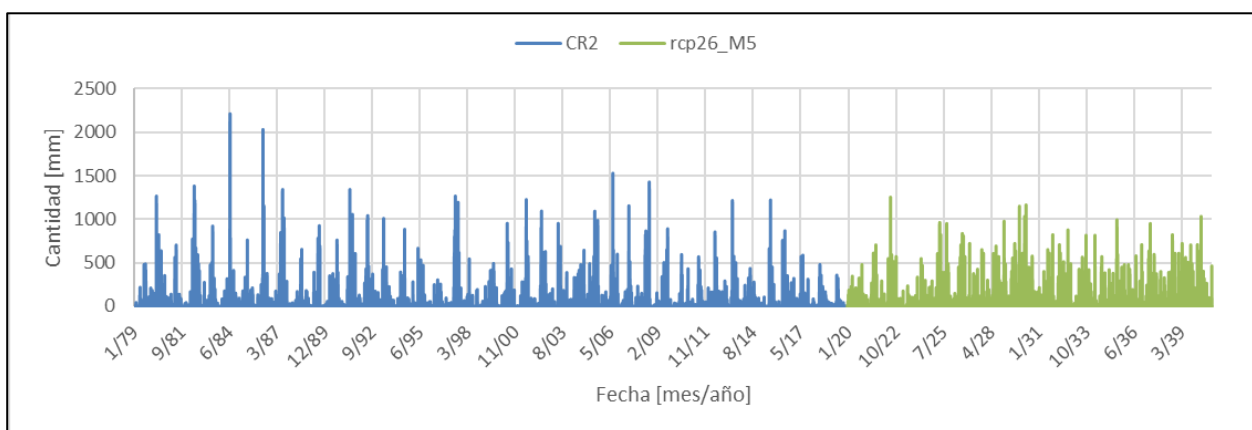


Figura 8-8: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).

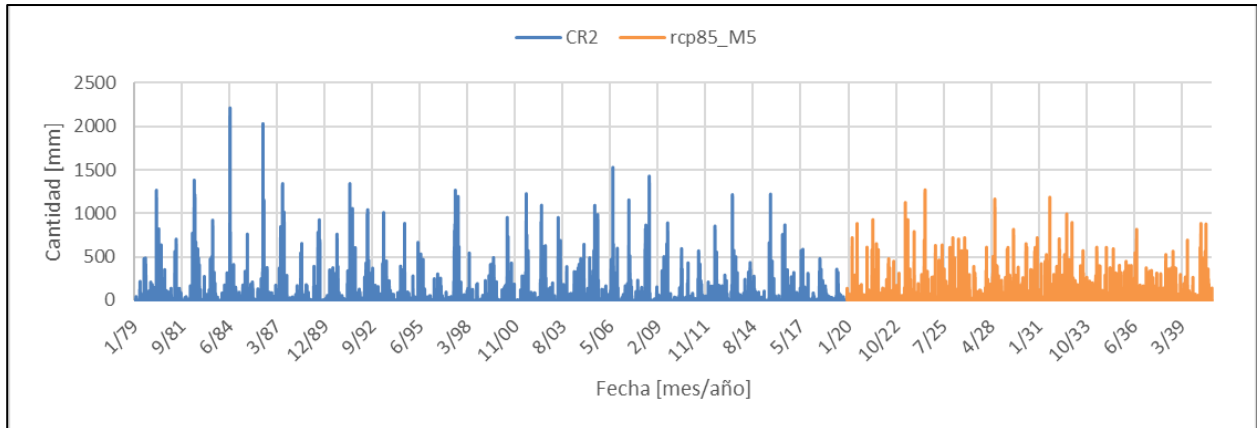


Figura 8-9: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).

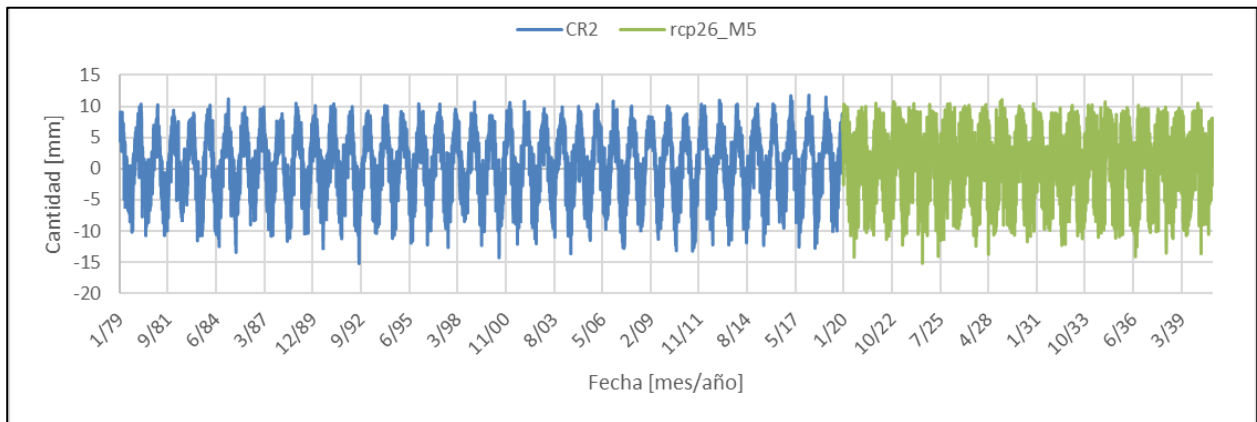


Figura 8-10: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).

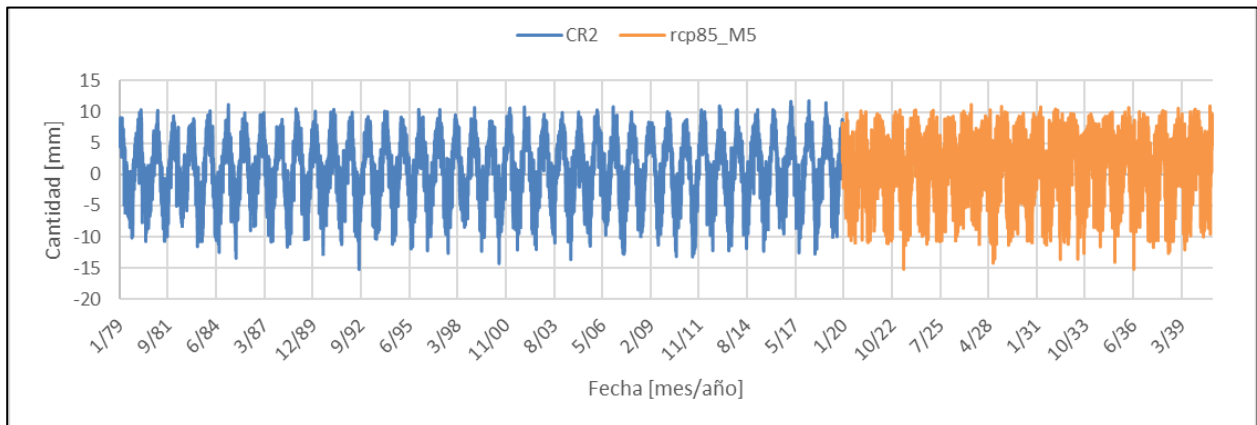


Figura 8-11: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).

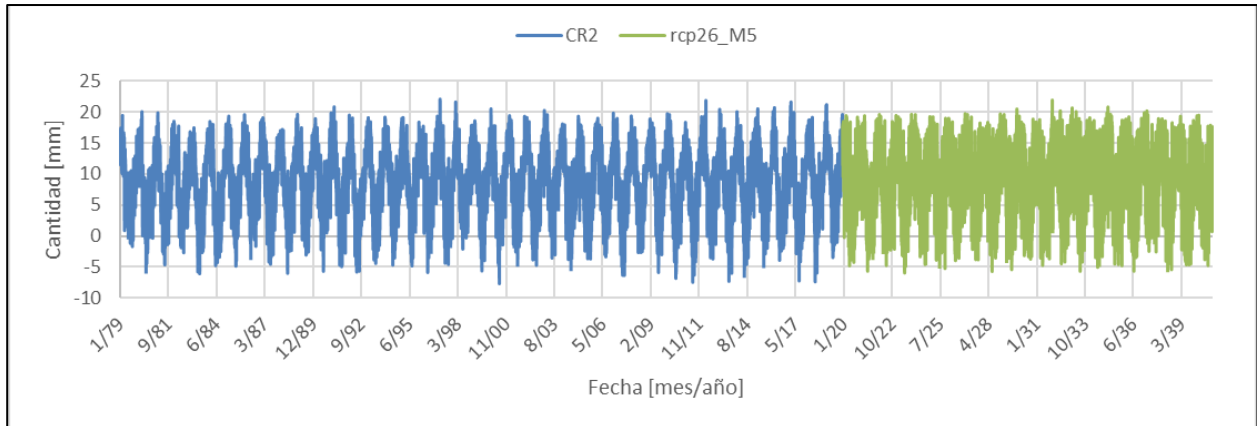


Figura 8-12: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).

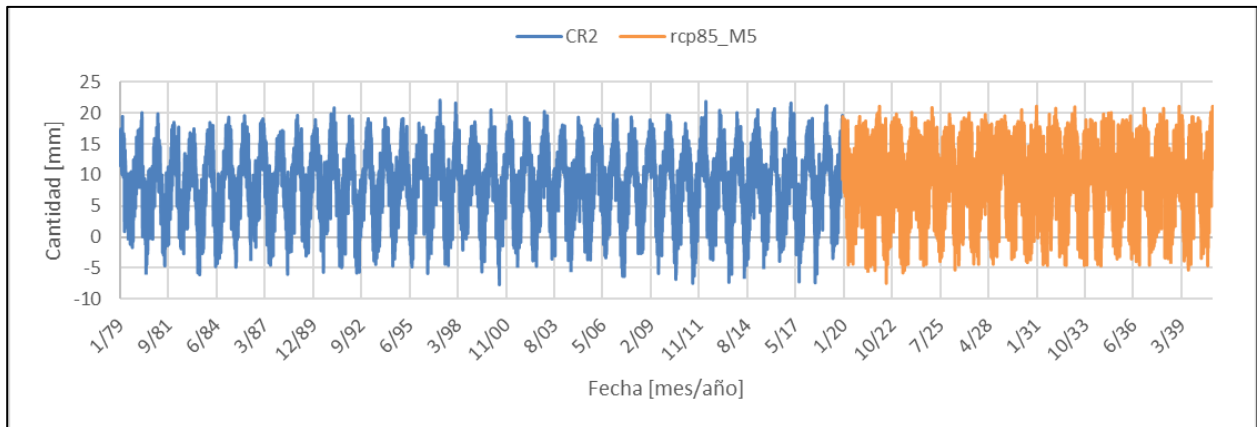


Figura 8-13: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).

Para cada serie de datos obtenida se calculó el promedio de cada mes y se construyeron curvas de variación estacional. La **Figura 8-14**, **Figura 8-15** y **Figura 8-16** muestran las curvas de variación estacional de la precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima respectivamente.

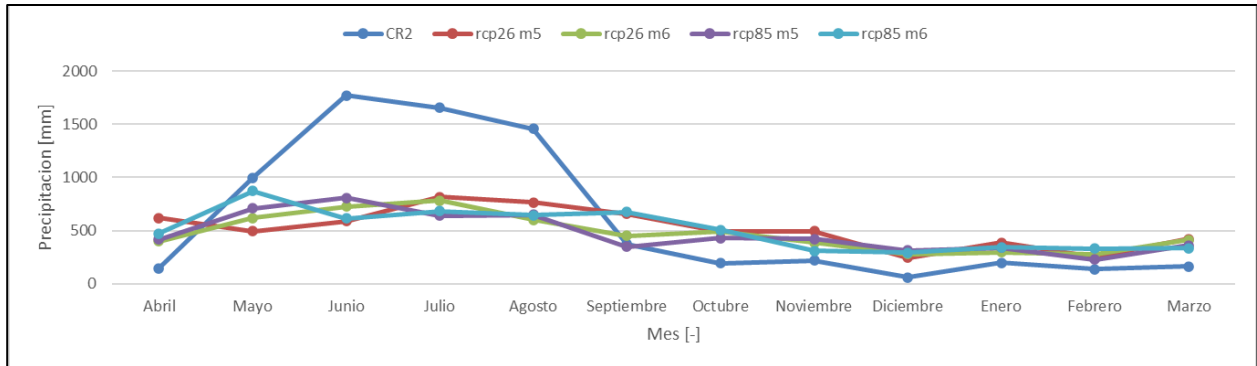


Figura 8-14: Curva variación estacional precipitación datos CR2 y CCSM4 subescalados.

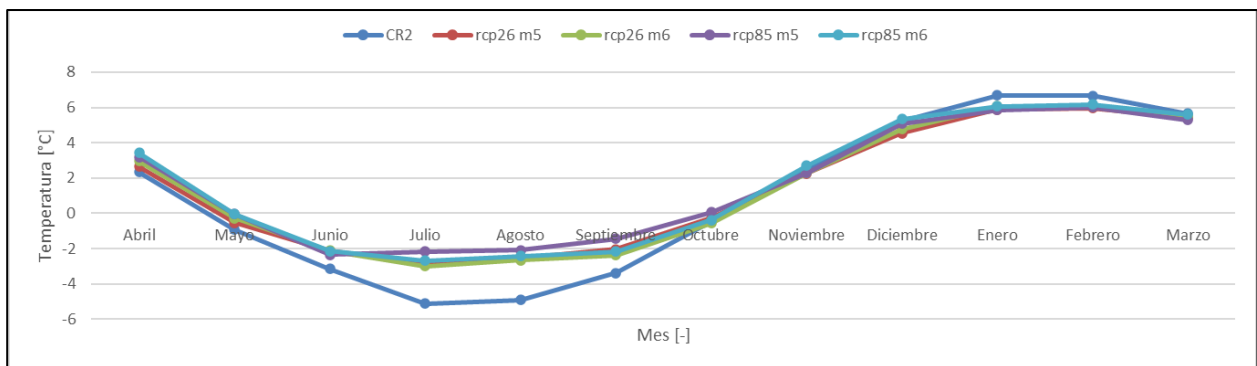


Figura 8-15: Curva variación estacional temperatura mínima datos CR2 y CCSM4 subescalados.

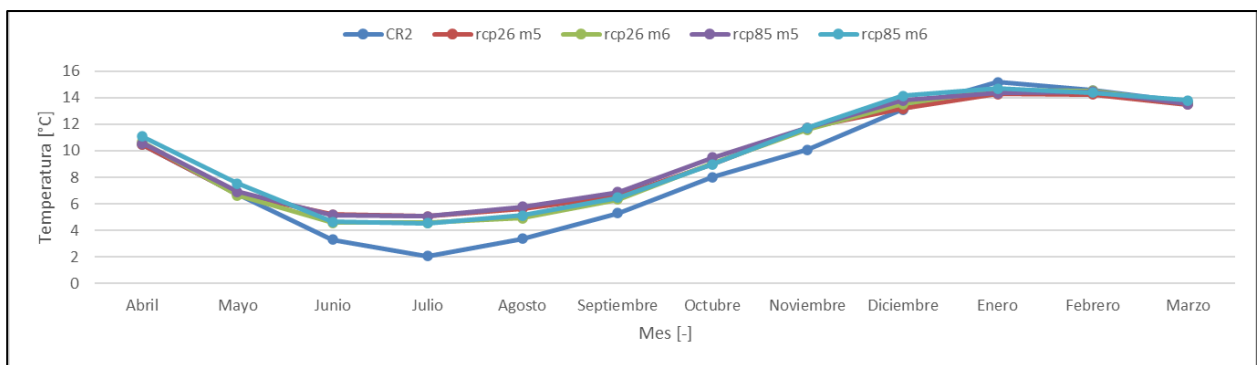


Figura 8-16: Curva variación estacional temperatura máxima datos CR2 y CCSM4 subescalados.

8.7. Modelo Hidrológico Futuro

Al observar las variables climáticas resultantes mostradas anteriormente, se decidió utilizar las correspondientes al método de subescalado M5 y M6 de ambos escenarios climáticos (RCP2.6 y RCP8.5), las cuales fueron agregadas al modelo hidrológico ya calibrado para ver el efecto del cambio climático sobre el caudal líquido y solido de la cuenca en estudio. Se compararon los datos observados y simulados para el periodo en estudio (1989-2019) y el periodo futuro (2020-2040) para el caudal líquido, caudal sólido y cobertura nival a una escala diaria. No obstante, para permitir visualizar mejor los datos obtenidos considerando lo extenso de las series de datos, los gráficos muestran solamente el periodo 2001-2030. La **Figura 8-17**, **Figura 8-18** y **Figura 8-19** muestran el método M5 para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Para ver los gráficos correspondientes a todos los métodos utilizados (M2, M5 y M6) consultar el Anexo 4 – Resultados Modelo Periodo Futuro.

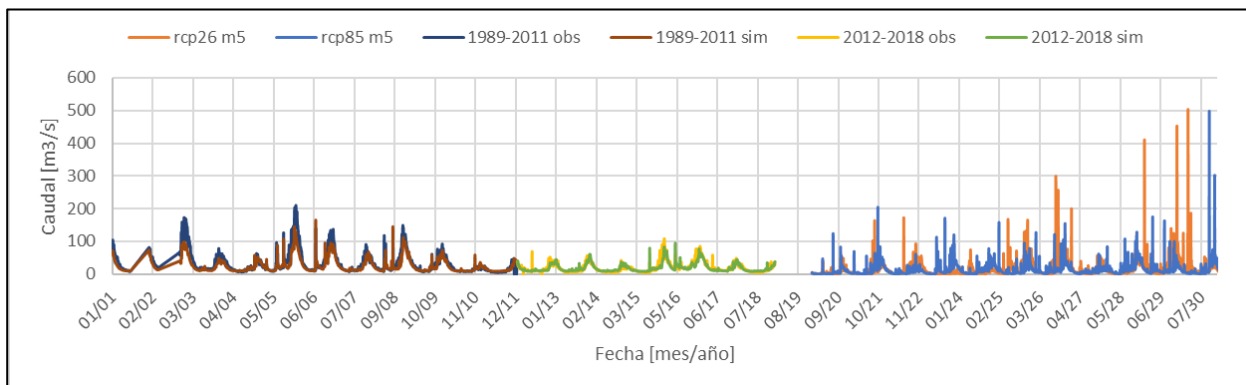


Figura 8-17: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala diaria.

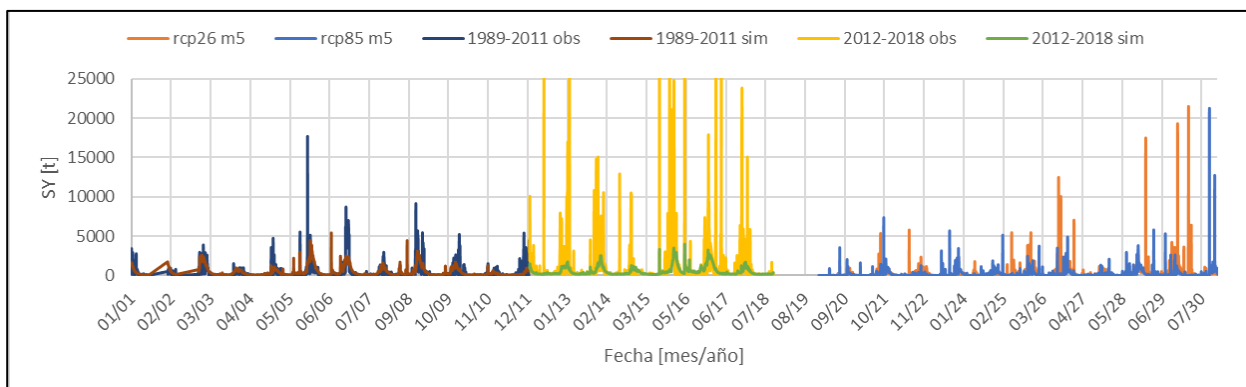


Figura 8-18: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala diaria.

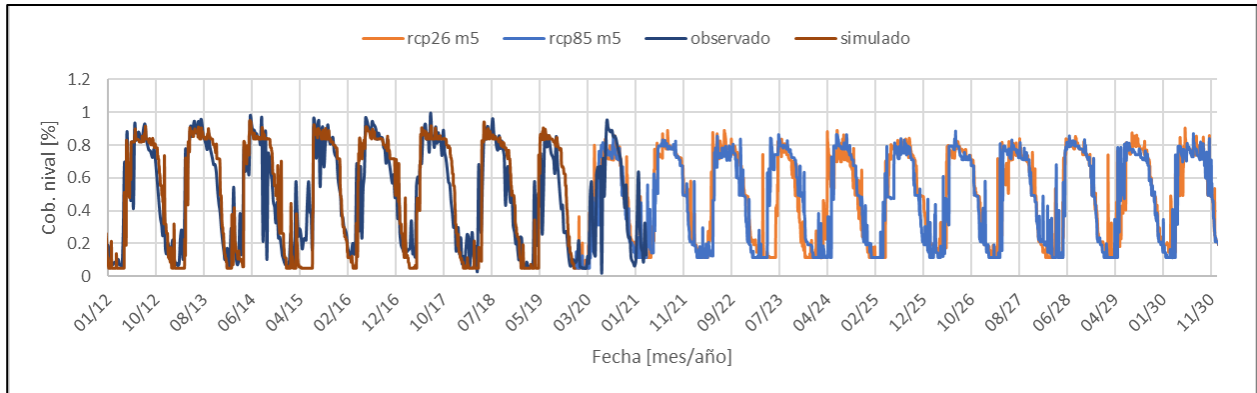


Figura 8-19: Cobertura nival periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala diaria.

Al igual que los gráficos anteriores, la **Figura 8-20**, **Figura 8-21** y **Figura 8-22** muestran el método M5 para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 del periodo 2001-2030, pero a escala mensual. Para ver los gráficos correspondientes a todos los métodos utilizados (M2, M5 y M6) consultar el Anexo 4 – Resultados Modelo Periodo Futuro.

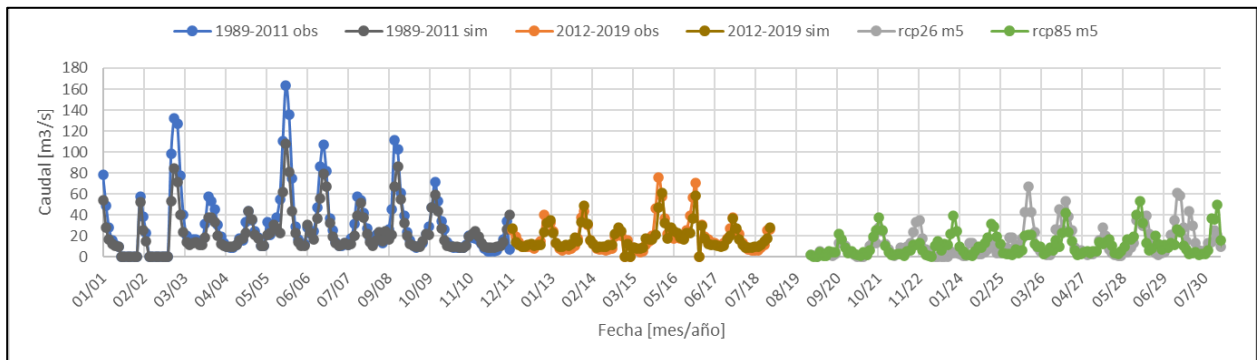


Figura 8-20: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala mensual.

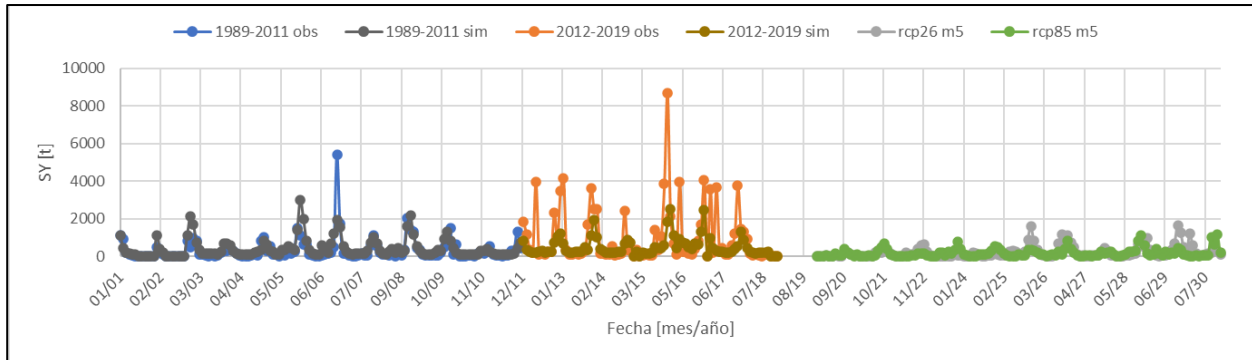


Figura 8-21: Caudal sólido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala mensual.

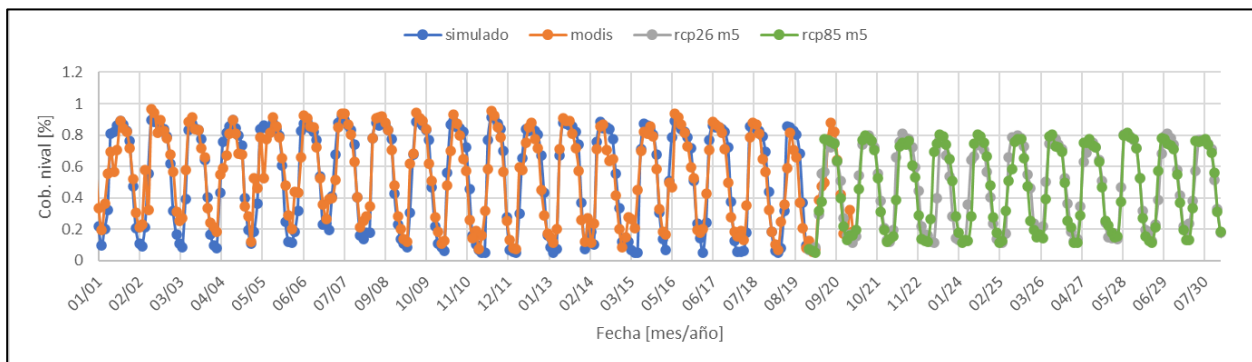


Figura 8-22: Cobertura nival periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5, escala mensual.

Para cada serie de datos obtenida se calcula el promedio de cada mes y se construyen curvas de variación estacional. La **Figura 8-23**, **Figura 8-24** y **Figura 8-25** muestran las curvas de variación estacional del caudal líquido, caudal sólido y cobertura nival respectivamente.

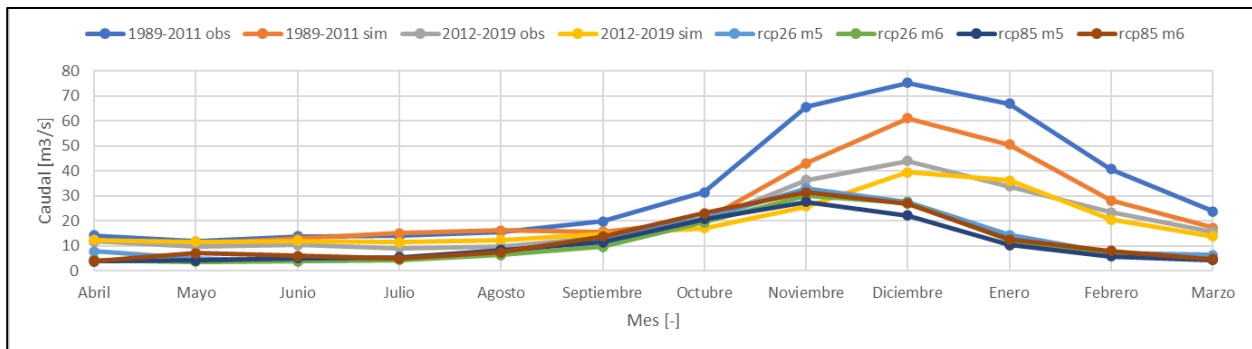


Figura 8-23: Curva variación estacional caudal líquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 y M6 para escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

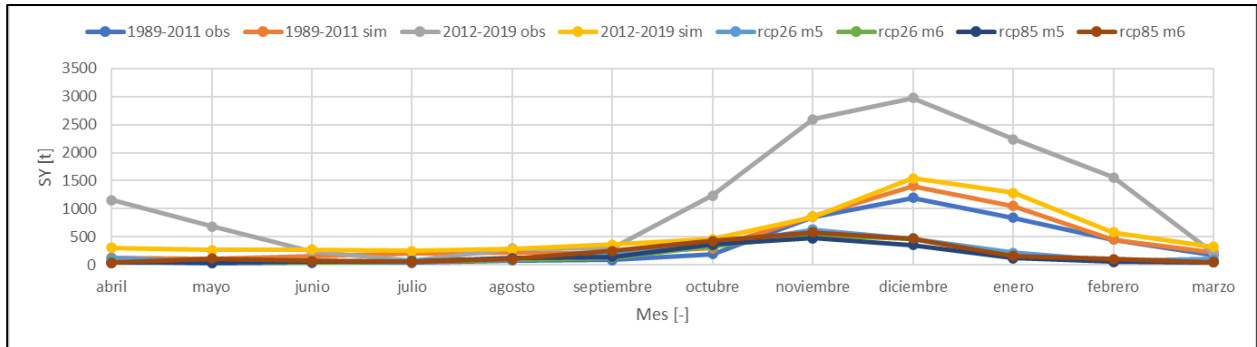


Figura 8-24: Curva variación estacional caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 y M6 para escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

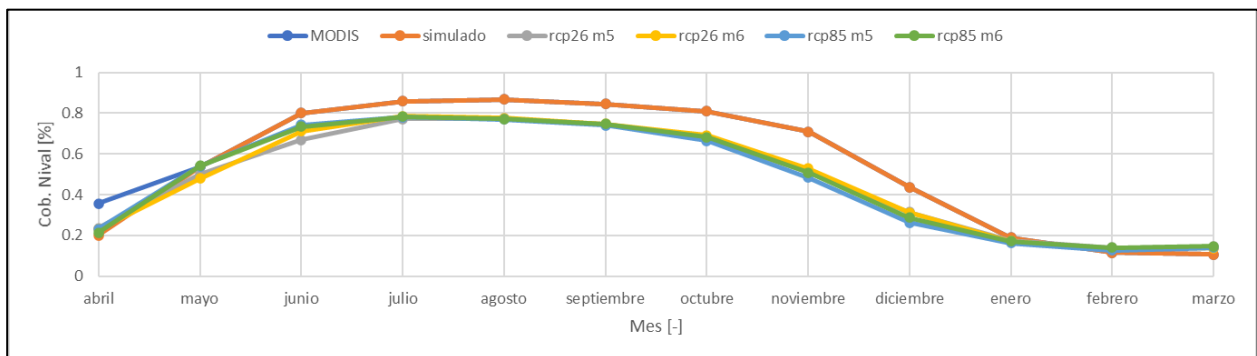


Figura 8-25: Curva variación estacional cobertura nival periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) según método M5 y M6 para escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

9. Análisis

9.1. Modelo Hidrológico Caudal Líquido y Sólido Escala Mensual

Se puede observar de la **Figura 8-1** que el modelo mensual consigue muy buenos resultados en el caudal líquido, lo que se confirma con los valores de NSE resultantes que alcanzan valores sobre 0.6 y los de KGE que rondan el 0.5 (**Tabla 8-1**). La excepción a lo anterior es el periodo 2001-2006 que muestra dos claros máximos que el programa no logró simular disminuyendo el NSE y KGE a 0.48 y 0.33 respectivamente, no obstante, en general la curva simulada se ajusta correctamente a los datos observados al igual que los otros periodos.

El caso del caudal sólido para el modelo mensual (**Figura 8-2**) es más variable, obteniéndose valores de NGE sobre 0.5 y de KGE cercanos al 0.5 para los periodos 1989-1994 y 2007-2011, pero más bajos para los periodos 1995-2000 y 2001-2006 (**Tabla 8-1**). No obstante, ambos valores de correlación bajos se deben a valores puntuales muy altos en los cuales el modelo no alcanza valores similares, observando en general una correlación alta para el resto de los valores. Queda en evidencia que el programa no es suficientemente sensible a aumentos abruptos, provocando que los aumentos súbitos no sean percibidos por el modelo y disminuyan la calidad de los resultados.

En general, el modelo mensual simula correctamente los periodos y duraciones del caudal líquido y sólido permitiendo curvas muy similares a las observadas, pero tiende a subestimar en ocasiones las magnitudes de estos ciclos. Es claro también que la representación de los procesos hidrológicos es mucho mejor que la de los procesos sedimentológicos, obteniendo simulaciones del caudal líquido mucho más precisas que las del caudal sólido.

9.2. Modelo Hidrológico Caudal Líquido y Sólido Escala Diaria

Los resultados del modelo a escala diaria tienen un comportamiento similar a los de escala mensual, pero deja mucho más en evidencia los problemas mencionados anteriormente. Para el caso del caudal líquido cuyos datos observados se muestran mucho más cíclicos (**Figura 8-3**) el usar una escala menor mejora la correlación aumentando el NSE y KGE para todos los periodos, llegando a superar el 0.7 en algunos casos (**Tabla 8-2**) y esta mejora se puede apreciar a simple vista ya que las curvas simuladas son muy similares a los datos observados.

Por otro lado, para el caso de los sedimentos, si bien estos presentan también ciclos que se corresponden con los del caudal líquido, se observan aumentos y disminuciones mucho más abruptas (**Figura 8-4**), siendo imposible para los datos simulados seguir estos cambios y disminuyendo en gran medida los valores de NGE y KGE obtenidos que varían entre 0.1 y 0.3. En general, como se mencionó anteriormente, el modelo reproduce los ciclos de manera correcta,

pero subestima las magnitudes, siendo estas diferencias mucho más marcadas en la escala diaria por sobre la escala mensual.

Los sedimentos del periodo 2012-2018 sufren los mismos problemas ya mencionados, pero se debe destacar que este periodo tiene valores observados de caudal sólido mucho mayores que los periodos anteriores, provocando que las diferencias registradas entre los datos simulados y observados sean extremadamente mayores alcanzando incluso valores cercanos al 0 para el NSE y negativos para el KGE. Este aumento repentino de las mediciones de sedimentos se puede observar también en la **Figura 2-7**.

En resumen, debido a la distribución de los datos medidos, la simulación a escala diaria aumenta su exactitud para el caso del caudal líquido, pero disminuye para el caso del caudal sólido con respecto a la simulación a escala mensual, lo que se refleja claramente en los valores de NSE y KGE obtenidos.

Originalmente, la separación en distintos periodos de calibración se realizó debido a la clara diferencia de magnitudes que presentaba el caudal sólido a lo largo de los años, agrupando en periodos los años que tuvieran comportamientos similares permitiendo obtener mejores correlaciones que si se considerara solo un periodo. No obstante, la **Figura 8-5** muestra que esto no se repite en el caso del caudal líquido, donde si bien existen diferencias en las magnitudes a lo largo de los años, estas son menores y puede representarse todo el periodo de estudio (1989-2019) sin problema obteniendo valores de NSE y KGE muy altos (**Tabla 8-3**).

9.3. Cobertura Nival

En la **Figura 8-6** se puede observar que los datos simulados de cobertura nival tienen una muy alta correlación con los medidos, visible también en los valores de NSE y KGE que van desde el 0.77 hacia arriba (**Tabla 8-4**).

La buena correlación de la cobertura nival, además de validar el modelo en sí, permite en cierta medida validar los datos utilizados de precipitación y temperatura, ya que el cálculo de esta, así como la cantidad de nieve acumulada, dependen principalmente de estos parámetros y se realiza de forma previa a los procesos más complejos simulados en la cuenca y cauces dentro de esta. Se considera también que, debido a las características de la cuenca en estudio, la simulación del caudal líquido está totalmente determinado por los procesos nivales.

Cabe recordar que los datos observados de cobertura nival fueron determinados mediante imágenes satelitales, por lo que los datos pueden presentar variaciones respecto de la realidad. Por ejemplo, la existencia de momentos sin nieve durante invierno que se pueden ver en la **Figura 8-6** de forma marcada en 2005 y 2014, pueden deberse a días de calor que derritieron la nieve existente para luego volver a cubrirse en días posteriores, pero pueden deberse también a

problemas en las mediciones causados por la presencia de nubes varios días seguidos que impidieran la correcta toma de imágenes.

9.4. Albedo

Si bien el albedo no es un valor relevante en el modelo SWAT y por ende su forma de cálculo es bastante básica, se consideró su validación debido a su directa relación con la cobertura nival. La **Figura 8-7** muestra que el albedo simulado posee un comportamiento muy similar a la nieve simulada, no obstante, las magnitudes son mucho más bajas provocando que a diferencia de la nieve este no logre una buena representación.

Queda a la vista que la mayor discrepancia es el valor considerado para la nieve, siendo el otorgado por el modelo de 0.8, mientras que las imágenes satelitales registran un valor más bajo que varía alrededor de 0.5.

9.5. Precipitación y Temperatura Subescalados

Los valores de precipitaciones obtenidos tienen claras variaciones según el método de subescalado utilizado, variando tanto la distribución como la magnitud de estos, como se puede ver en el Anexo 3 – Resultados Métodos Subescalado. Siendo claramente el método M2 el de peor desempeño, mientras que los métodos M5 y M6 tienen desempeños mucho mejores y similares, por eso fueron los métodos considerados para el estudio. Es claro que el método de subescalado seleccionado para las precipitaciones es relevante, porque afectara de forma notoria los datos puntuales obtenidos.

Para el caso de la temperatura que presenta ciclos mucho más claros que las precipitaciones, las curvas obtenidas con cada método son muy similares entre sí, observándose solo diferencias menores, por lo que a simple vista no sería de mayor importancia que método de subescalado se seleccionara, ya que a diferencia de con las precipitaciones se obtendrán resultados bastante similares.

Se puede apreciar a simple vista que los valores subescalados de precipitación y temperatura mantienen curvas similares a los datos del CR2 para ambos escenarios climáticos, validando su posible uso para estudiar el comportamiento futuro de la cuenca al mantener comportamientos y ciclos similares (**Figura 8-8** a la **Figura 8-13**).

No obstante, cabe recalcar la notoria disminución de valores extremos y la mayor presencia de valores de baja magnitud, esto se debe a que los métodos de subescalado interpolan dentro de los límites definidos por los valores observados, siendo imposible obtener valores fuera de este rango y por ende disminuyendo la aparición de eventos extremos. Si bien existen métodos que

recurren a otras estrategias para intentar reproducir de mejor manera estos valores extremos, estos se encuentran sujetos a esta restricción que tendera siempre a entregar más importancia a representar el comportamiento promedio por sobre los eventos aislados, que podrían ser los más relevantes, ya que son los causantes de las situaciones de riesgo.

En base a lo mencionado anteriormente, si bien se demuestra que los métodos de subescalado son útiles y entregan muy buenos resultados, se debe recordar que como toda interpolación el modelado será respecto a la media eliminando en gran medida la posibilidad de evaluar los eventos extremos que pueden estar presentes en la realidad.

La **Figura 8-14** muestra las curvas de variación estacional de los valores subescalados junto a los datos del CR2. Las curvas de valores subescalados son bastante similares entre sí y muestran una clara disminución de las precipitaciones en los meses lluviosos (desde mayo hasta agosto) con respecto a los valores del CR2, mientras que los demás meses que deberían ser secos muestran un pequeño aumento. Si bien la disminución de las lluvias en invierno es una consecuencia esperada frente al cambio climático, parte de esta disminución puede ser debido al proceso ya mencionado del subescalado que simula valores solo dentro del rango ya estipulado, lo que puede ser la razón también del pequeño aumento registrado en verano debido a que el método de subescalado busca mantener un promedio similar al de los datos observados.

En el caso de la temperatura, la **Figura 8-15** y **Figura 8-16** muestran que en los valores subescalados existe un aumento de temperatura durante invierno con respecto a los del CR2, mientras que las temperaturas durante verano se mantienen sin cambio. Esto podría afectar de manera importante el comportamiento dentro de la cuenca debido a que dificultaría la acumulación de nieve durante el invierno disminuyendo el almacenaje natural de agua para el verano.

9.6. Modelo Hidrológico Futuro

En la **Figura 8-17** se observa que los valores de caudal líquido proyectado a escala diaria son muy similares a los valores medidos, con la diferencia que existe una mayor presencia de valores extremos en los valores proyectados, también se puede apreciar que al menos a corto plazo (2020-2040) no existe mucha diferencia entre ambos escenarios climáticos analizados (RCP2.6 y RCP8.5).

Para el caso del caudal sólido a escala diaria, la **Figura 8-18** muestra valores similares al periodo 2000-2011, que son mucho menores que los valores registrados en el periodo 2012-2018, dando cuenta nuevamente de lo alto que son los valores de este periodo con respecto a los registrados en otros años. Al igual que para el caso del caudal líquido, no existe mucha diferencia entre ambos escenarios climáticos.

Finalmente, la **Figura 8-19** muestra la cobertura nival a escala diaria, donde es notorio que, si bien los ciclos se mantienen iguales, estos disminuyen en amplitud aumentando los mínimos y disminuyendo los máximos, lo que puede deberse al defecto del proceso de subescalado que interpola solamente dentro de los límites observados. A parte de lo ya mencionado, no se percibe ningún cambio respecto de los valores observados.

Para los casos a escala mensual presentados en la **Figura 8-20**, **Figura 8-21** y **Figura 8-22**, se pueden observar y comparar de mejor manera las magnitudes proyectadas con respecto a las observadas. Para el caudal líquido, el caudal efluente del periodo 2020-2030 es un poco menor que el del periodo 2012-2019, mostrando un descenso producto de la disminución esperada en las precipitaciones debido al cambio climático. De igual manera el caudal sólido muestra un descenso respecto a años anteriores, con magnitudes más bajas que el periodo 2000-2011 y mucho más bajas que el periodo 2012-2018. En el caso de la cobertura nival no hay cambios respecto al gráfico de escala diaria.

La **Figura 8-23** muestra las curvas de variación estacional del caudal líquido, donde es claro que existe una disminución en las curvas proyectadas respecto de las observadas y simuladas. Es interesante notar también un corrimiento de los meses de mayor caudal, el cual actualmente considera el periodo septiembre-marzo con su máximo en diciembre para los datos observados, a uno que considera el periodo septiembre-enero con su máximo en noviembre para los datos proyectados. Este fenómeno de corrimiento de los meses de mayor caudal ha sido reportado en variados estudios en cuencas nivales al analizar los efectos del calentamiento global, siendo el causante el aumento de temperatura que provoca alcanzar antes los umbrales necesarios para derretir la nieve.

En las curvas de variación estacional de caudal sólido podemos ver el mismo comportamiento observado en el caudal líquido, existiendo una disminución de las magnitudes y un corrimiento del máximo como se puede observar en la **Figura 8-24**.

Las curvas de variación estacional de cobertura nival muestran una disminución al igual que los casos anteriores entre los valores observados y proyectados como se observa en la **Figura 8-25**. Pareciera existir también un leve corrimiento hacia la izquierda del periodo máximo, pero mucho menos marcado que los observados en el caudal líquido y sólido.

10. Conclusiones y Comentarios

En función de los objetivos planteados y los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo SWAT es perfectamente aplicable a cuencas de alta montaña, entregando muy buenos resultados tanto a escala mensual como diaria y tanto para el flujo de agua (caudal líquido) como para los sedimentos (caudal sólido). No obstante, es necesario validar su desempeño caso a caso debido a los distintos factores que pueden afectar el comportamiento interno de una cuenca. Se debe comentar que, al observar el funcionamiento interno del modelo si bien este incluye procesos para simular tanto el caudal líquido como el sólido, es claro que este se encuentra mayormente enfocado al primero por sobre el segundo, estando el caudal sólido directamente ligado a los resultados del caudal líquido.

La mayor dificultad encontrada en este estudio fue la insuficiente información meteorológica. Frente a esto se comprueba que es posible la modelación de cuencas a través de solamente herramientas satelitales y fuentes de información online, siendo los utilizados en este caso variables climáticas del CR2 y mapas proporcionados por el IDE. Recordando aun así que parte importante de la modelación es el proceso de calibración, en el cual es necesario el registro de datos in situ, siendo los utilizados en este caso las mediciones de caudal y sedimentos de la estación Río Aconcagua en Chacabucito.

Respecto a lo anterior, cabe comentar también que los datos grillados como lo son las variables meteorológicas del CR2, son datos contruidos mediante variables estadísticas y pueden no representar de forma fidedigna la realidad, como ocurrió con otras fuentes de datos a nivel global que discrepan en las zonas cordilleranas, situación que no ocurrió con los datos del CR2 donde los valores mantenían distribuciones y magnitudes bastante cercanas a la realidad. En general siempre será mejor opción los registros in situ, no obstante, en muchos casos no se cuenta con registros extensos y confiables, casos en los cuales los datos grillados son una buena alternativa a considerar si se tienen los cuidados necesarios.

Entrando de lleno al modelo, como era de esperar los parámetros más relevantes del modelo fueron los relacionados a la nieve, tales como la temperatura de congelamiento, la temperatura de derretimiento junto a otros factores estacionales, a los que se suman los correspondientes al agua subterránea tales como el tiempo de desfase del agua subterránea y la profundidad de acuífero. La sensibilidad a estos parámetros fue bastante similar tanto en la escala mensual como en la escala diaria, por lo que se considera que son factores que definen el comportamiento de la cuenca y deben ser correctamente calibrados para definir de forma fiel los procesos internos de la cuenca.

A lo anterior se debe agregar la mención a una de las herramientas complementarias que proporciona el modelo, que consisten en el ajuste de precipitación y temperatura según se incrementa la altura mediante dos parámetros respectivos (PLAPS y TLAPS). Esta herramienta permite la utilización de valores de precipitación y temperatura no homogéneas a lo largo de cada

subcuenca permitiendo entregar valores mucho más precisos, lo que se puede observar al ser la sensibilidad a estos parámetros superior en la escala diaria por sobre la escala mensual.

Al momento de revisar las variables de cobertura nival y albedo que están altamente ligadas, podemos observar que el desempeño es mucho mejor para la cobertura nival por sobre el albedo. Esto se puede dar debido a que la cobertura nival es un parámetro importante dentro del modelo, no así el albedo, dando por ello mucha menos importancia a los métodos de cálculo del segundo. Cabe mencionar, que por defecto el modelo considera el albedo de la nieve como 0.8, valor que es el normalmente utilizado en este tipo de estudios, no obstante, el valor registrado en las imágenes MODIS tiene un rango que varía alrededor de 0.5 siendo menor al esperado. Resultaría necesario corroborar con mediciones in situ el albedo registrado, para ver si el bajo albedo se debe a errores de medición de MODIS o si existen otros factores que provocan un menor albedo en la nieve de la cuenca en estudio.

Las proyecciones de cambio climático mostraron comportamientos esperados, que se han visto reflejados ya en otros estudios climáticos, como lo son la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura. Si bien la disminución no es demasiado alta en el periodo analizado, significa una disminución del agua disponible en una zona que ya tiene problemas de escasas actualmente, por lo que es un problema que no se debe menospreciar.

Otro comportamiento que se marcó en las proyecciones fue un corrimiento hacia el invierno de los meses de mayor caudal (mayoritariamente durante el verano en la actualidad), lo que podría modificar de forma importante el agua disponible en la región, ya que actualmente se mantiene una disponibilidad durante invierno gracias a las lluvias y durante verano gracias al derretimiento de nieve, este corrimiento podría mantener o aumentar el caudal durante los meses de invierno-primavera, pero provocaría una disminución importante durante el verano. A largo plazo este fenómeno podría llevar a un claro corrimiento de las estaciones frente a sus fechas actuales.

Se comprobó también durante la simulación de las proyecciones, la utilidad de herramientas de subescalado para los casos en que no existe un registro a la escala adecuada, obteniendo un buen desempeño sin una excesiva complejidad. Lo anterior viene ligado a tener que cerciorarse de la verosimilitud de los datos, como en este caso que los datos proyectados del CR2 tienen un buen comportamiento para la zona central, pero discrepan en la cordillera que es el área de este estudio.

Siguiendo la línea del proceso de subescalado, se debe trabajar en métodos que permitan una buena reproducción de los eventos extremos, que son de gran importancia en estos temas al poder ser los causantes de diversos peligros para los servicios o personas que dependan y/o se ubiquen en estos cauces. En este estudio es claro como los valores resultantes del subescalado se encuentran dentro de los límites de los valores originales impidiendo la aparición de posibles eventos extremos como los presentes en la realidad.

Finalmente, se debe comentar el hecho del súbito aumento en los sedimentos medidos en el periodo 2012-2018, lo que lleva a la posibilidad de que un modelo tenga un correcto desempeño en la actualidad, pero no necesariamente a futuro, siendo necesario en ocasiones recalibrar los modelos a lo largo del tiempo para adaptarse a posibles cambios dentro de la cuenca, ya sean de origen natural o humano.

11. Bibliografía

- Auddino, M., Dominici, R., & Viscomi, A. (2015). Evaluation of yield sediment in the Sfalassà Fiumara (south-western, Calabria) by using Gavrilović method in GIS environment. *Rendiconti online della Società Geologica Italiana*, 33, 3-7.
- Bedia, J., Iturbide, M., Herrera García, S., Medina, J., Fernández, J., Frías, M., . . . Gutiérrez, J. (2018). The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing. *Environmental Modelling and Software*.
- Bedia, J., Medina, J., Legasa, M., Iturbide, M., Manzanas, R., Herrera García, S., . . . Gutiérrez, J. (2020). Statistical downscaling with the downscaleR package: contribution to the VALUE intercomparison experiment. *Geoscientific Model Development*, 13, 1711-1735.
- Bonilla, C., Reyes, J., & Magri, A. (2010). Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70, 159-169.
- Castro, L. (2019). Fundamentos Sistemas de Información Geográfica. IPO-429: Modelación Hidrológica. UTFSM, Valparaíso.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2018). *Guía de Referencia para la Plataforma de Visualización de Simulaciones Climáticas*. Universidad de Chile, Santiago.
- Dile, Y., Srinivasan, R., & George, C. (2020). *QGIS 3 Interface for SWAT (QSWAT3)*.
- Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Santiago: CADE-IDEPE consultores en ingeniería.
- eawag. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*.
- Efthimiou, N., Evdoxia, L., & Karavitis, C. (2017). Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. *Hydrological Sciences Journal*, 62, 1-21.
- Fu, B., Merritt, W., Croke, B., Weber, T., & Jakeman, A. (2018). A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. *Environmental Modelling & Software*, 114, 75-97.
- Gassman, P., Sadeghi, A., & Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of environmental quality*, 43, 1-8.
- George, J., Singh, A., Kumar, S., & Naithani, S. (2020). Soil erosion and sediment yield estimation using remote sensing data and GIS of watershed in North West Himalayan region. *Indian Journal of Soil Conservation*, 47, 244-254.
- Grusson, Y., Sun, X., Gascoin, S., Sauvage, S., Raghavan, S., Anctil, F., & Sánchez, J. (2015). Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. *Journal of Hydrology*, 531, 574-588.
- Hall, D., & Riggs, G. (2021). *MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m Grid, Version 61*. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Ginebra.
- Merritt, W., Letcher, R., & Jakeman, A. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799.

- Mikayilov, F., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., . . . Srinivasan, R. (2007). Modelling of Hydrology and Water Quality in the Pre-Alpine/Alpine Thur Watershed Using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333, 413-430.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Santiago.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2009). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2012). *Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012*. Texas.
- Paredes, L. F. (2014). *HidroCALC*. v.D1.0.
- Prado Hernandez, J. V., Rivera Ruiz, P., Leon Mojarro, B., Carrillo Garcia, M., & Martinez Ruiz, A. (2017). *Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: caso El Malacate*.
- Rivera, P., Ochoa, W., & Salguero, M. (2020). *Escenarios de Cambio Climático para Guatemala, C.A.*
- Schaaf, C., & Wang, Z. (2015). *MCD43A3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global - 500m V006*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Syvitski, J., & Milliman, J. (2007). Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean. *Journal of Geology*, 115.

12. Anexo 1 – Datos Herramienta HidroCALC

Tabla 12-1: Datos varios de la cuenca entregados por la herramienta HidroCALC

Área de la cuenca:	2077,19 Km ² .
Perímetro de la cuenca:	330 Km.
Longitud del máx. recorrido:	80,443218750000 Km.
Coefficiente o índice de compacidad:	2,027
Factor de forma:	0,325

Pendiente del cauce principal:	0,0279
Ancho promedio:	25,962 Km.
Altitud más frecuente:	3601,00 - 3700,01

Cota inf.	Cota sup.	Área parcial (Km ²)	Área parcial (%)
948,02	1000,05	1,154	0,056
1001,00	1100,01	6,797	0,327
1101,00	1200,02	13,570	0,653
1201,00	1300,00	15,413	0,742
1301,00	1400,00	19,762	0,951
1401,00	1500,00	21,349	1,028
1501,00	1600,01	22,969	1,106
1601,00	1700,01	26,715	1,286
1701,00	1800,00	28,694	1,381
1801,00	1900,00	30,251	1,456
1901,00	2000,00	31,254	1,505
2001,00	2100,02	34,045	1,639
2101,00	2200,02	41,999	2,022
2201,00	2300,02	40,365	1,943
2301,00	2400,02	43,001	2,070
2401,00	2500,02	46,780	2,252
2501,00	2600,03	49,212	2,369
2601,00	2700,01	53,213	2,562
2701,00	2800,02	60,284	2,902
2801,00	2900,03	70,875	3,412
2901,00	3000,01	78,834	3,795
3001,00	3100,01	84,264	4,057
3101,00	3200,00	91,706	4,415
3201,00	3300,01	101,948	4,908
3301,00	3400,01	111,843	5,384
3401,00	3500,01	116,814	5,624
3501,00	3600,01	124,180	5,978
3601,00	3700,01	127,066	6,117
3701,00	3800,01	125,686	6,051
3801,00	3900,00	108,530	5,225
3901,00	4000,02	87,341	4,205
4001,00	4100,00	66,512	3,202
4101,00	4200,00	52,761	2,540
4201,00	4300,00	41,675	2,006
4301,00	4400,00	30,594	1,473
4401,00	4500,00	21,678	1,044
4501,00	4600,00	14,909	0,718
4601,00	4700,00	10,331	0,497
4701,00	4800,00	6,980	0,336
4801,00	4900,00	4,663	0,224

4901,00	5000,00	3,116	0,150
5001,00	5100,00	2,275	0,110
5101,00	5200,00	1,765	0,085
5201,00	5300,00	1,434	0,069
5301,00	5400,00	1,075	0,052
5401,00	5500,00	0,675	0,032
5501,00	5600,00	0,447	0,022
5601,00	5700,00	0,198	0,010
5701,00	5800,00	0,118	0,006
5801,00	5900,00	0,065	0,003
Suma	:	2077,185	

Coeficiente de masividad:	0,002
Coeficiente orográfico:	0,005
Rectángulo equivalente:	
a:13,730 m.	
b:151,270m.	
Relación de confluencias:	2,061

Relación de longitudes:	0,900	
Densidad de drenaje:	0,226	
Frecuencia de ríos:	0,052	
Tiempo de concentración:	16,5 h	(Ec. de Temez)

13. Anexo 2 – Datos de Entrada Usados en el Modelo

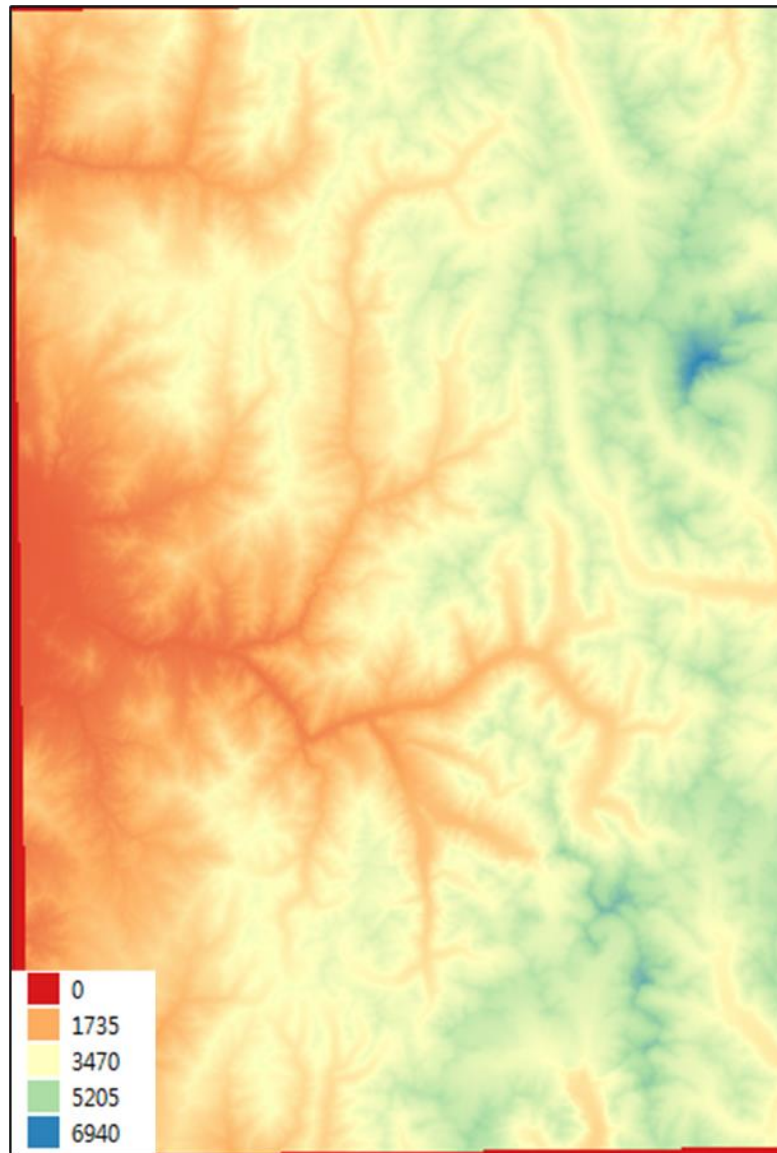


Figura 13-1: DEM ingresado al modelo SWAT.

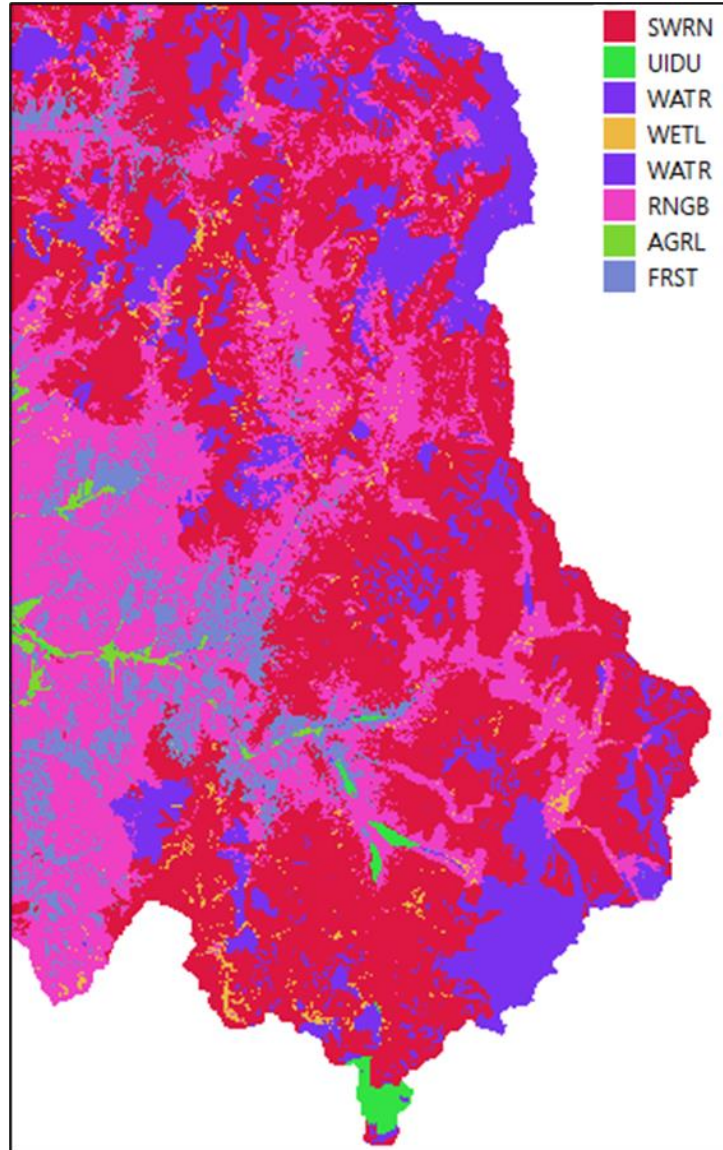


Figura 13-2: Mapa uso de suelo ingresado al modelo SWAT. En orden descendente corresponden a zona infértil, industrial, agua, humedal mixto, hielo (colocado como agua debido a la falta de un código específico), arbusto, agricultura genérica y bosque mixto.

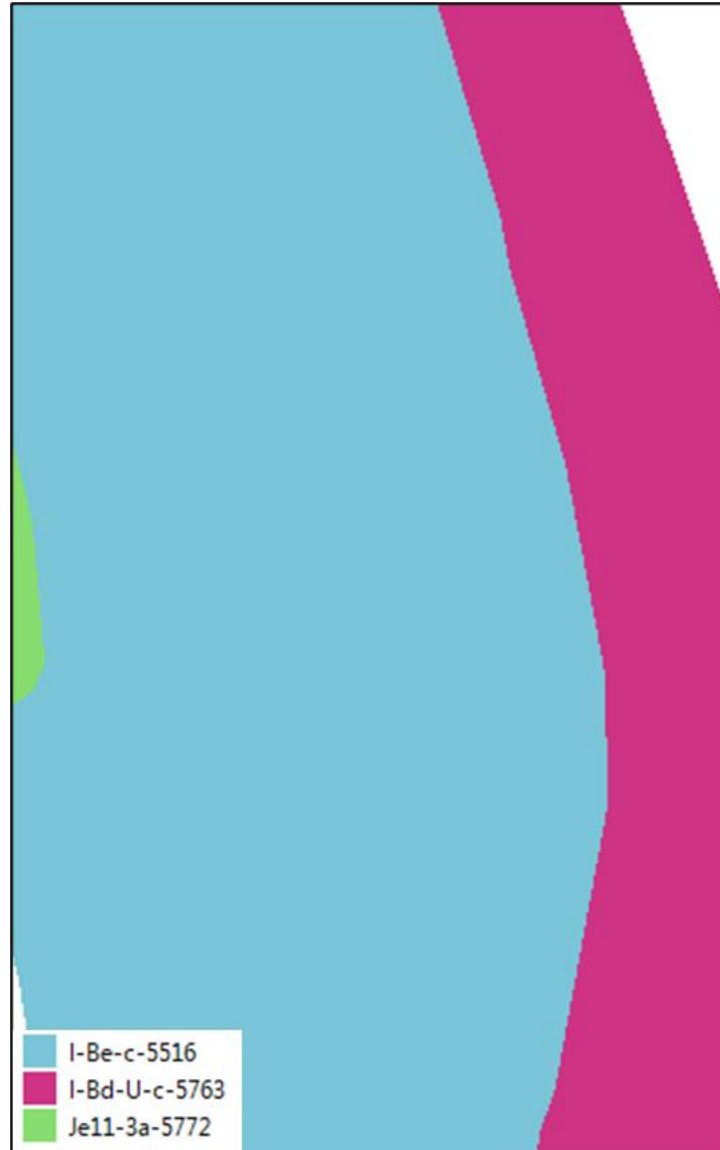


Figura 13-3: Mapa tipo de suelo ingresado al modelo SWAT. En orden descendente corresponden a suelo franco, suelo franco-arcilloso-arenoso y suelo arcilloso.

prec.txt: Bloc de notas					p_007_287.txt: Bloc de notas					temp.txt: Bloc de notas					t_007_287.txt: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
ID,NAME,LAT, LONG,ELEVATION					19790101					ID,NAME,LAT, LONG,ELEVATION					19790101				
1,p_047_287,-32.875,-70.475,1411.000					0					1,t_047_287,-32.875,-70.475,1411.000					3.08833333333334,9.56500000000002				
2,p_037_297,-32.975,-70.375,2720.000					0					2,t_037_297,-32.975,-70.375,2720.000					3.61333333333334,12.21333333333334				
3,p_037_277,-32.775,-70.375,2482.000					0					3,t_037_277,-32.775,-70.375,2482.000					5.46833333333334,13.78333333333334				
4,p_032_307,-33.075,-70.325,3449.000					0					4,t_032_307,-33.075,-70.325,3449.000					6.40333333333335,14.89				
5,p_032_287,-32.875,-70.325,3033.000					0					5,t_032_287,-32.875,-70.325,3033.000					7.68333333333335,15.2916666666667				
6,p_032_267,-32.675,-70.325,2776.000					0					6,t_032_267,-32.675,-70.325,2776.000					7.59666666666668,14.13				
7,p_027_277,-32.775,-70.275,2850.000					0					7,t_027_277,-32.775,-70.275,2850.000					7.58500000000002,14.6116666666667				
8,p_027_257,-32.575,-70.275,3570.000					0					8,t_027_257,-32.575,-70.275,3570.000					7.39666666666668,14.745				
9,p_022_297,-32.975,-70.225,2788.000					0					9,t_022_297,-32.975,-70.225,2788.000					6.85500000000001,15.41				
10,p_022_247,-32.475,-70.225,4062.000					0					10,t_022_247,-32.475,-70.225,4062.000					6.52666666666668,14.5116666666667				
11,p_017_307,-33.075,-70.175,4408.000					0					11,t_017_307,-33.075,-70.175,4408.000					5.70500000000001,13.0366666666667				
12,p_017_287,-32.875,-70.175,2816.000					0					12,t_017_287,-32.875,-70.175,2816.000					3.81166666666667,9.43833333333335				
13,p_017_277,-32.775,-70.175,3810.000					0					13,t_017_277,-32.775,-70.175,3810.000					3.84666666666667,12.1216666666667				
14,p_017_267,-32.675,-70.175,3496.000					0					14,t_017_267,-32.675,-70.175,3496.000					5.03166666666668,13.7666666666667				
15,p_017_257,-32.575,-70.175,3756.000					0					15,t_017_257,-32.575,-70.175,3756.000					5.75000000000001,13.7616666666667				
16,p_007_297,-32.975,-70.075,3597.000					0					16,t_007_297,-32.975,-70.075,3597.000					5.87166666666668,14.4683333333334				
17,p_007_287,-32.875,-70.075,3476.000					0					17,t_007_287,-32.875,-70.075,3476.000					7.16833333333335,15.9716666666667				

Figura 13-4: Datos de precipitación y temperatura ingresados al modelo SWAT.

14. Anexo 3 – Resultados Métodos Subescalado

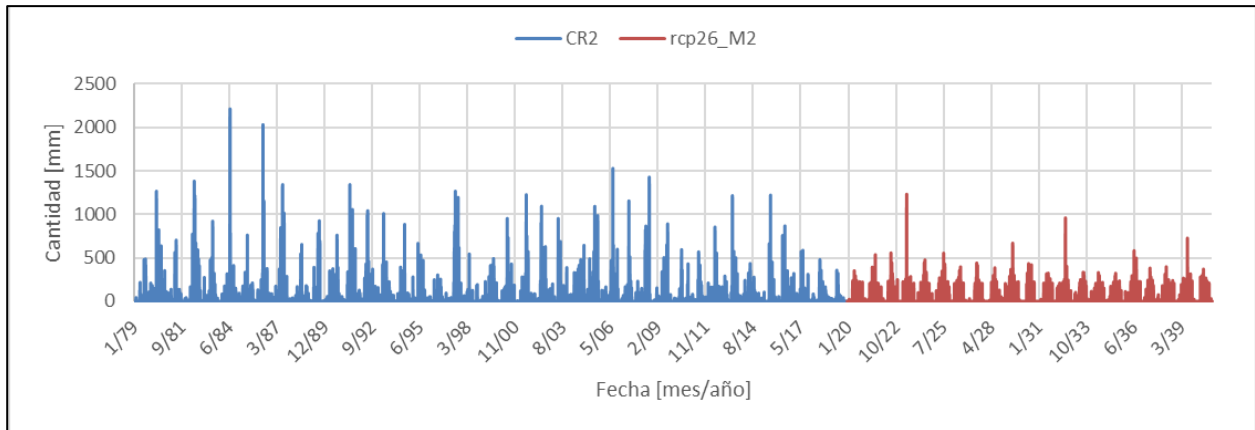


Figura 14-1: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M2 (2020-2040).

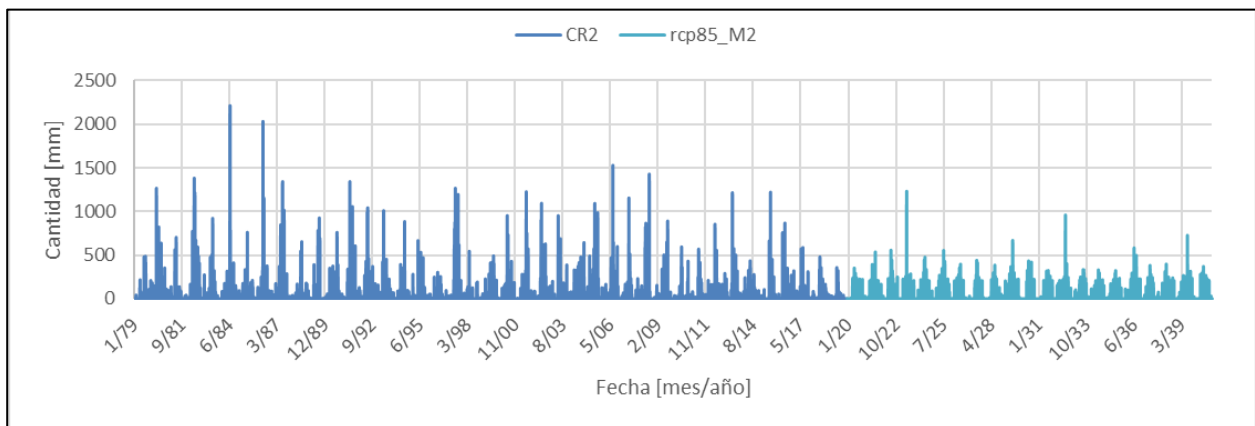


Figura 14-2: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M2 (2020-2040).

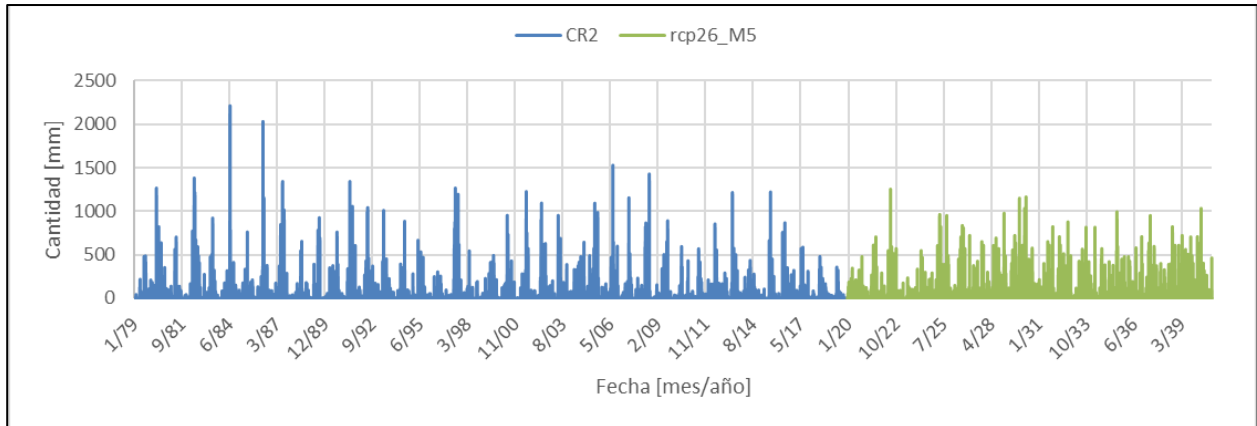


Figura 14-3: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).

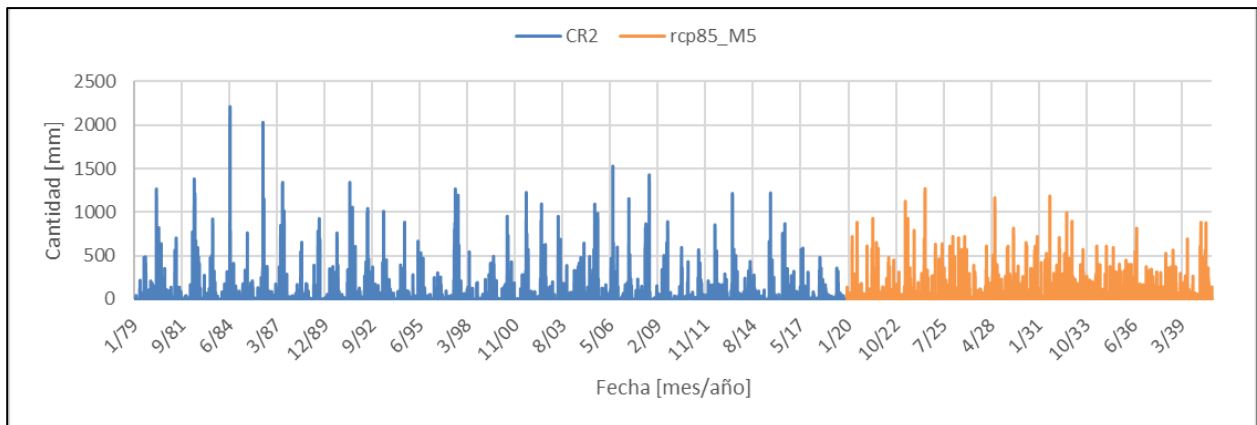


Figura 14-4: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).

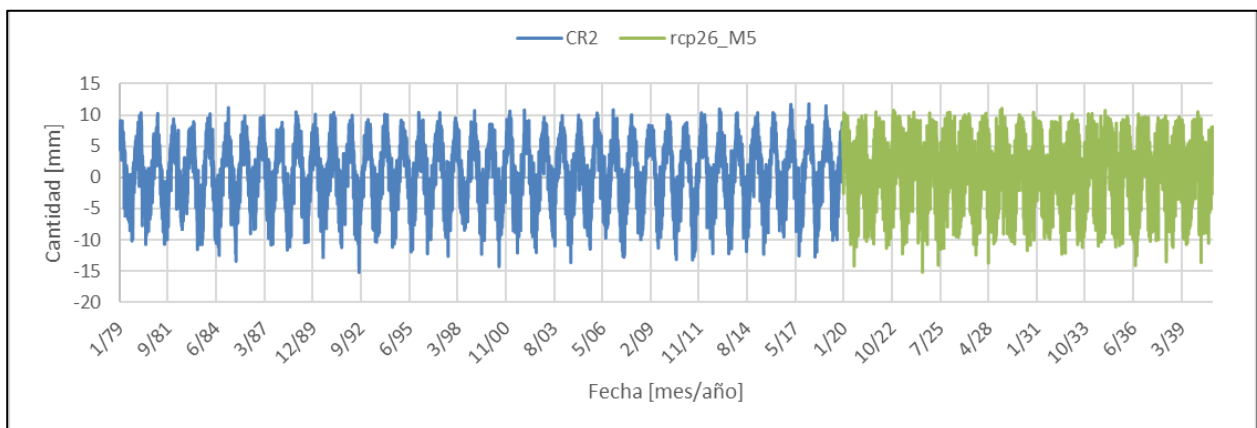


Figura 14-5: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).

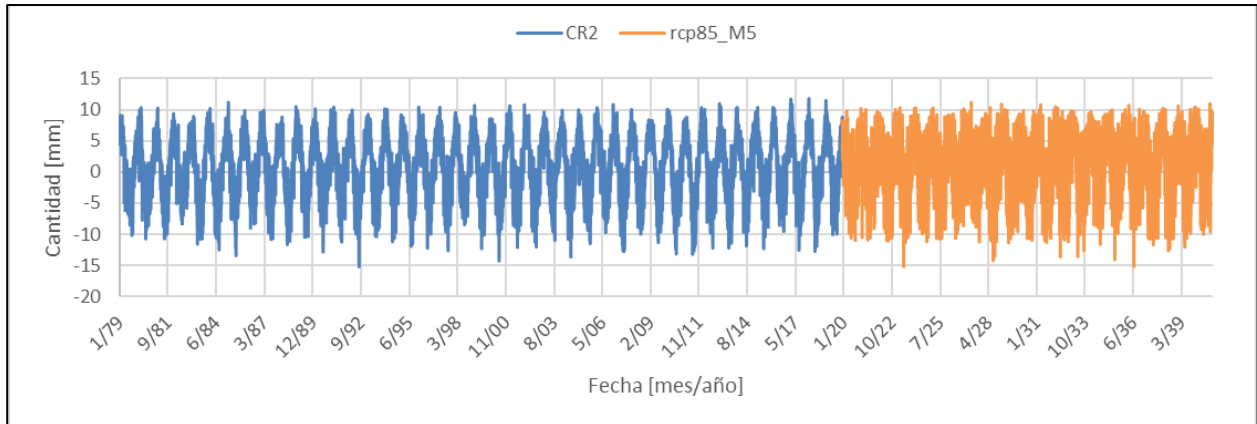


Figura 14-6: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).

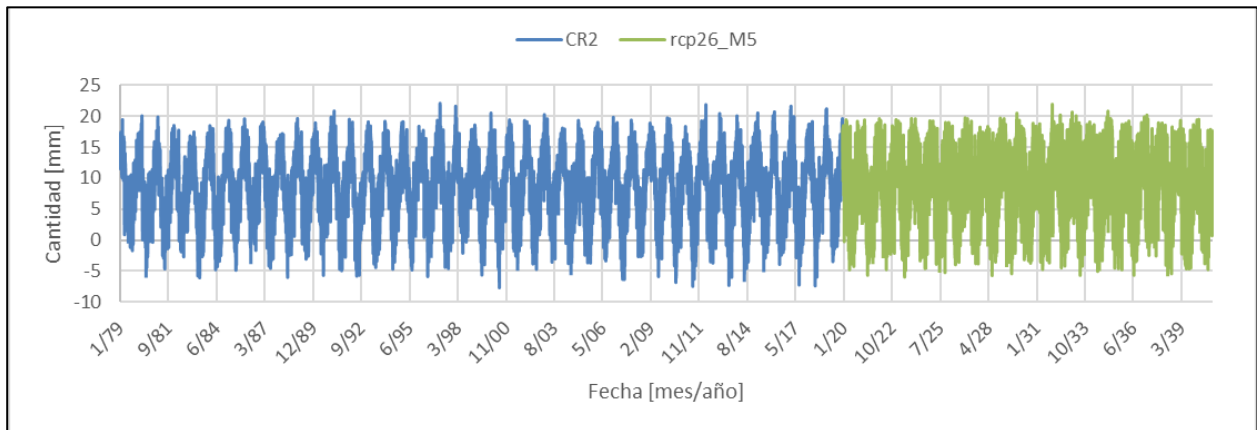


Figura 14-7: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M5 (2020-2040).

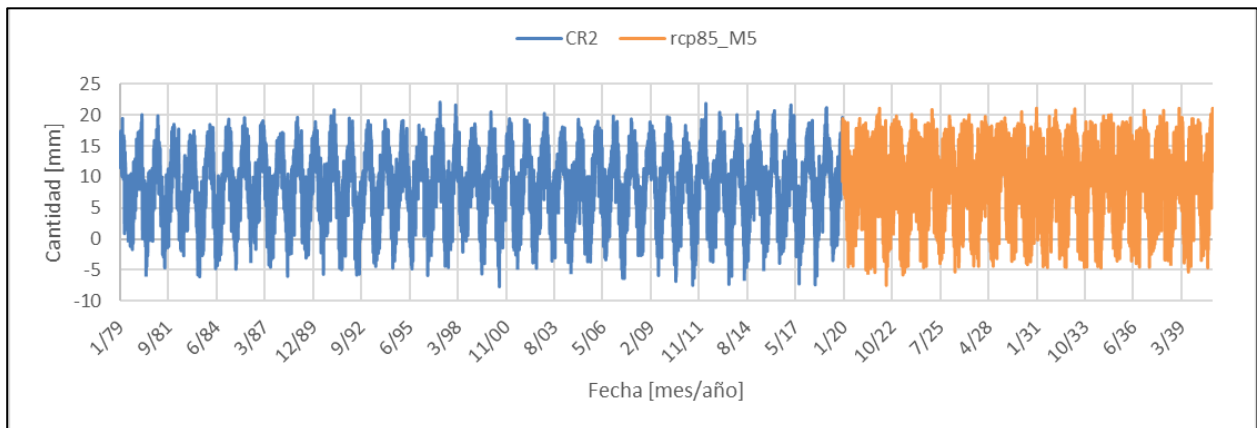


Figura 14-8: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M5 (2020-2040).

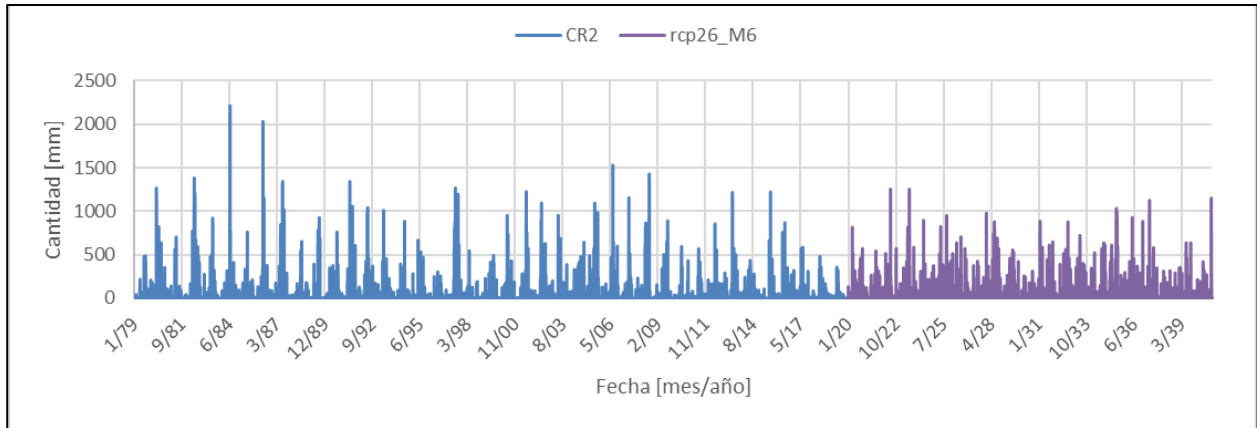


Figura 14-9: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M6 (2020-2040).

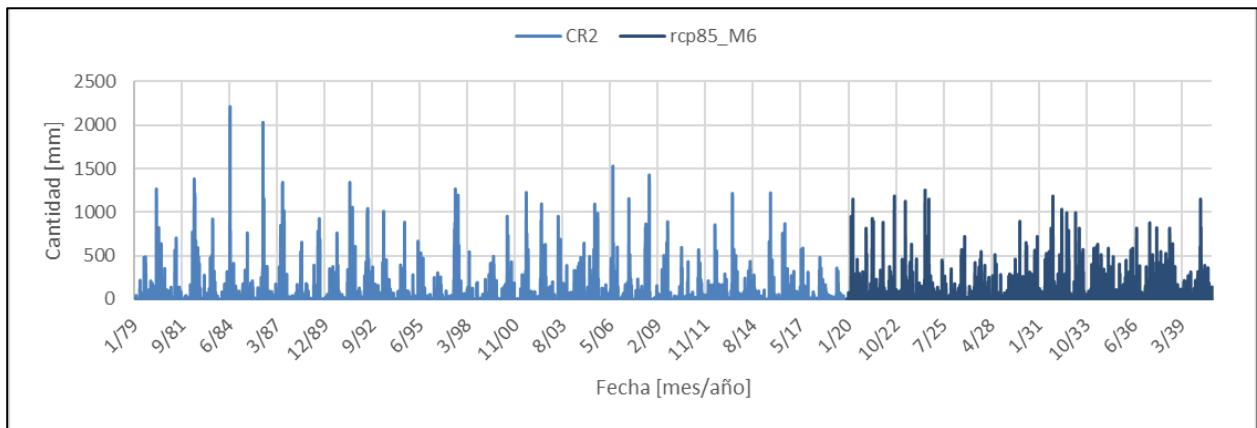


Figura 14-10: Precipitación diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M6 (2020-2040).

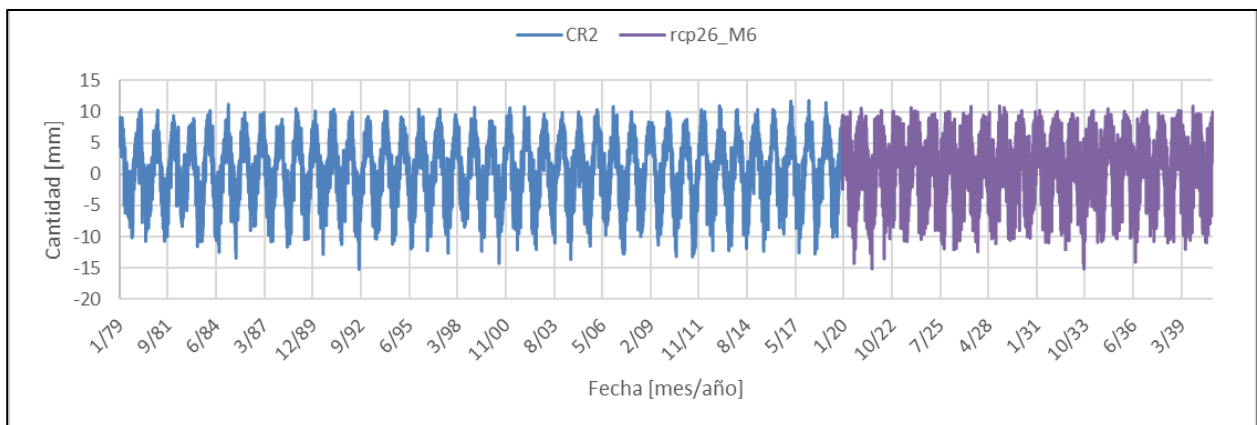


Figura 14-11: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M6 (2020-2040).

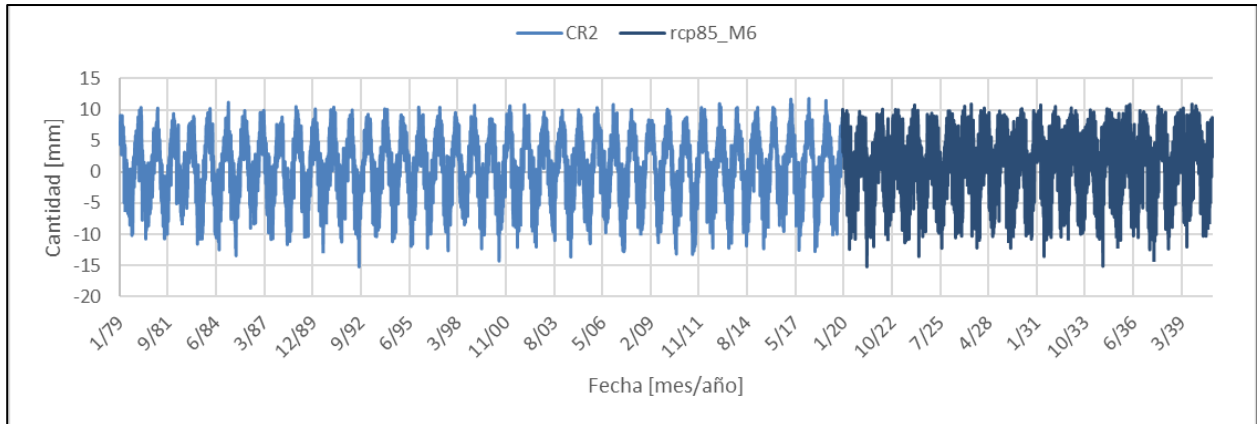


Figura 14-12: Temperatura mínima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M6 (2020-2040).

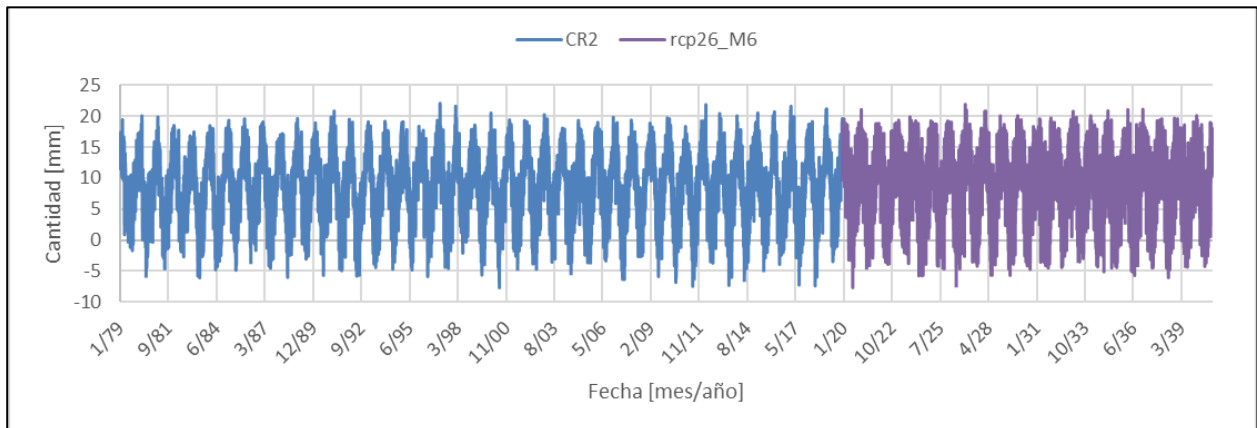


Figura 14-13: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP2.6 subescalada mediante M6 (2020-2040).

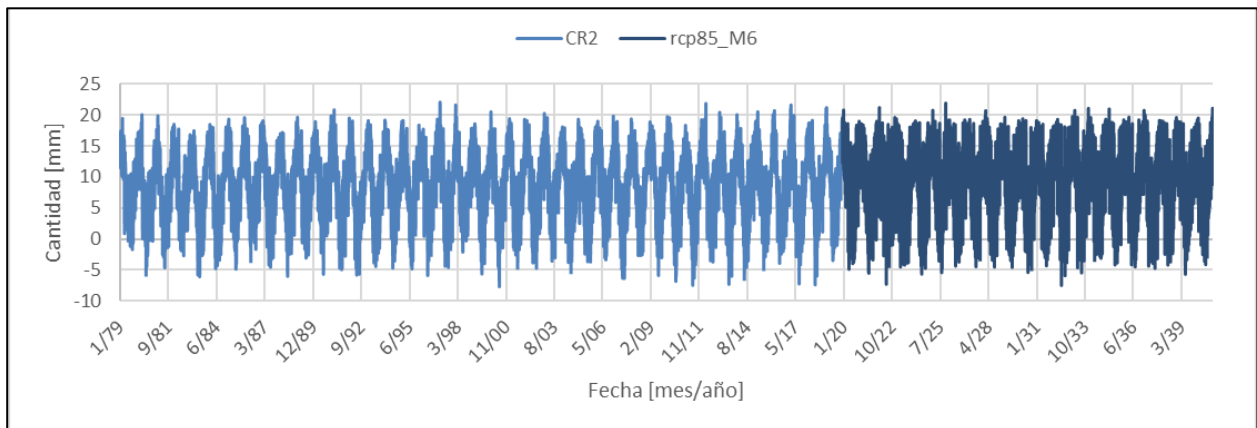


Figura 14-14: Temperatura máxima diaria del CR2 (1979-2019) y del CCSM4 escenario RCP8.5 subescalada mediante M6 (2020-2040).

15. Anexo 4 – Resultados Modelo Periodo Futuro

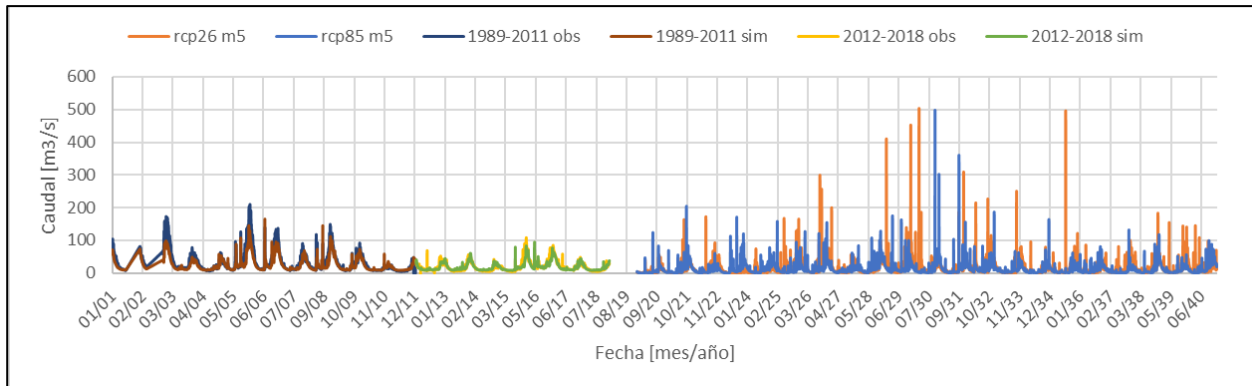


Figura 15-1: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

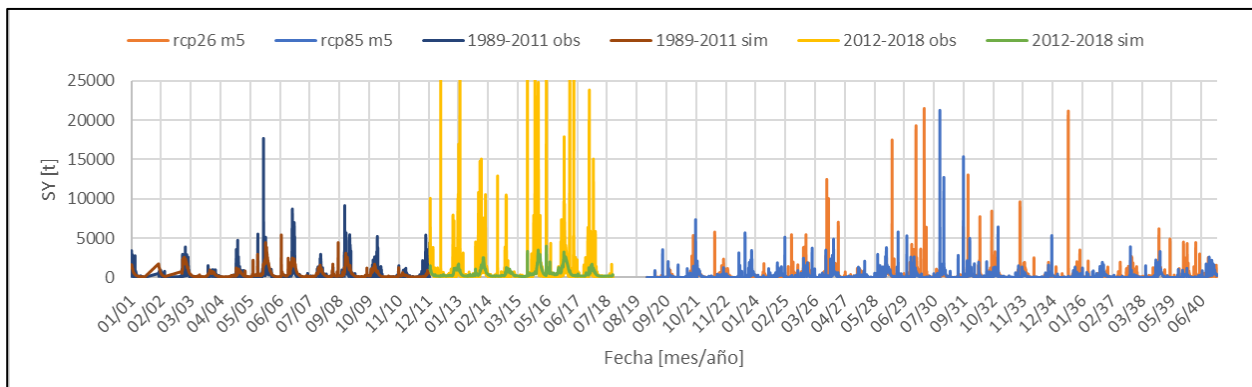


Figura 15-2: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

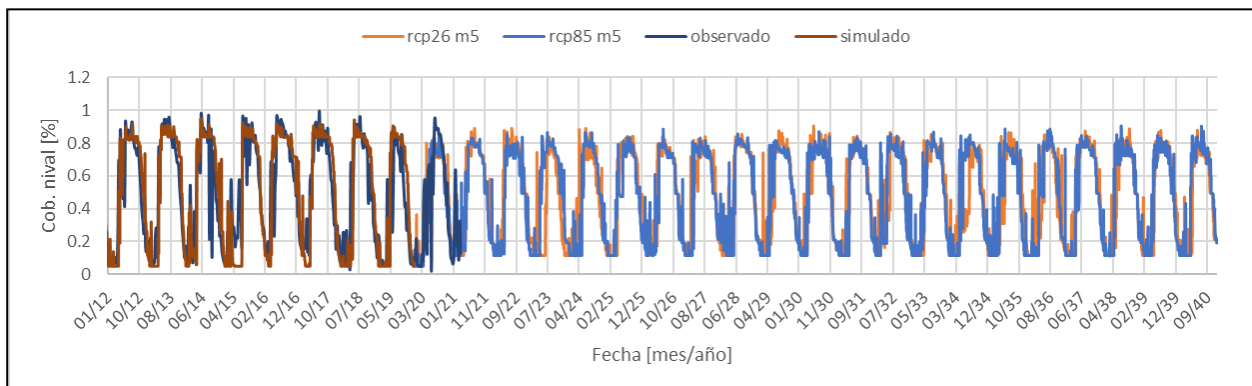


Figura 15-3: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

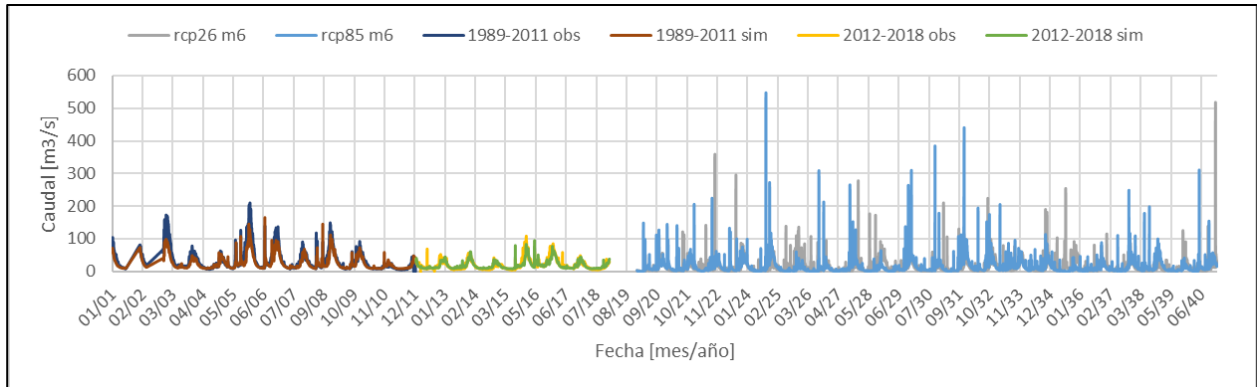


Figura 15-4: Caudal líquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

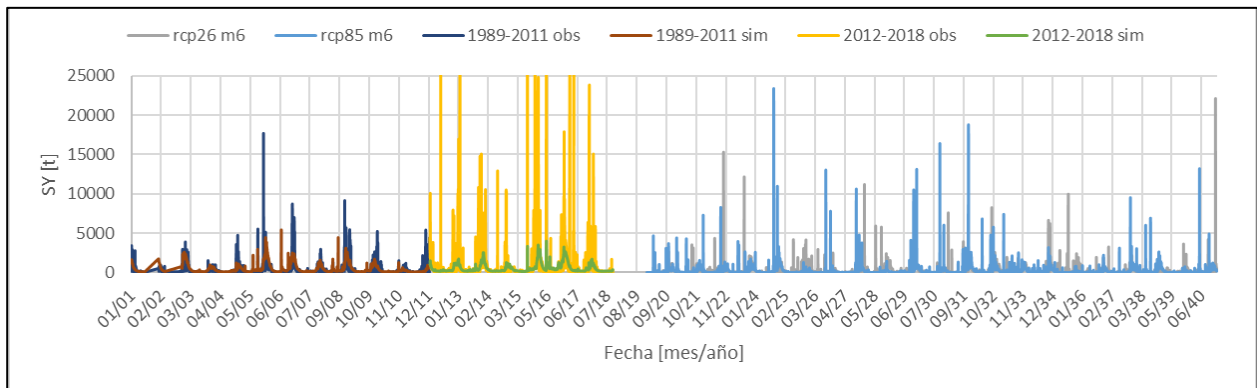


Figura 15-5: Caudal sólido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

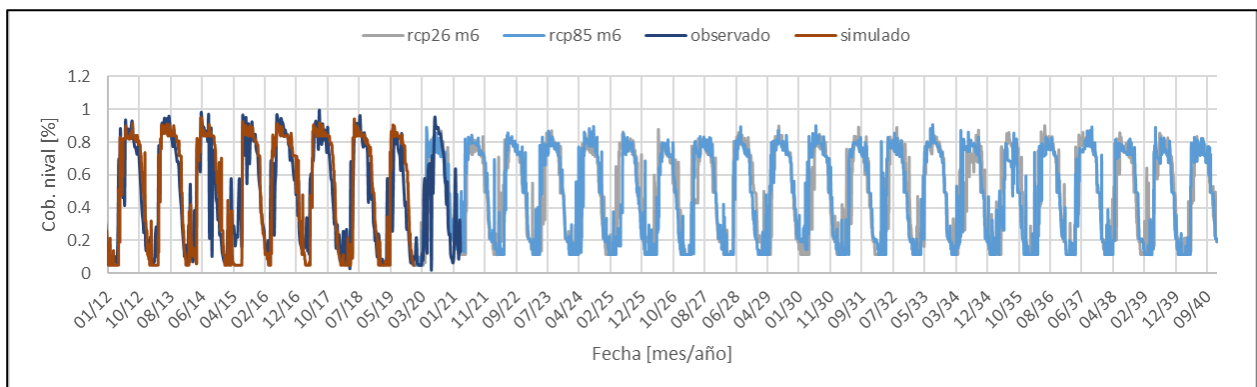


Figura 15-6: Caudal líquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala diaria según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

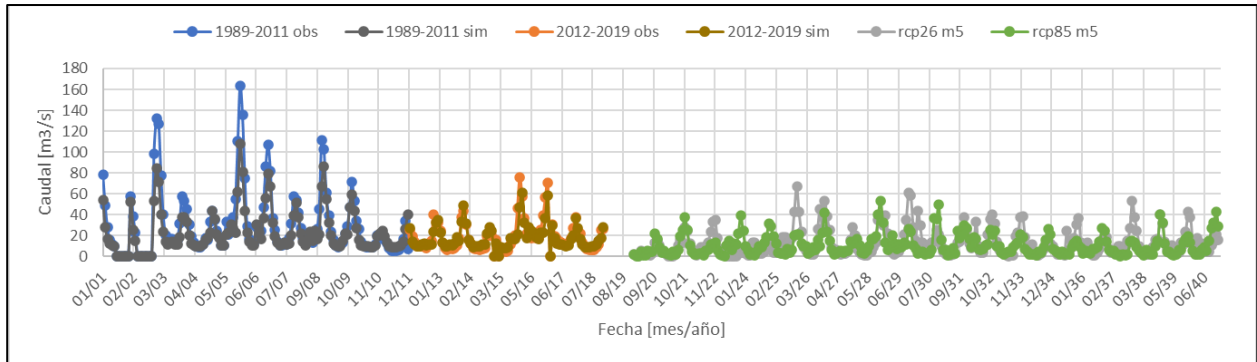


Figura 15-7: Caudal líquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

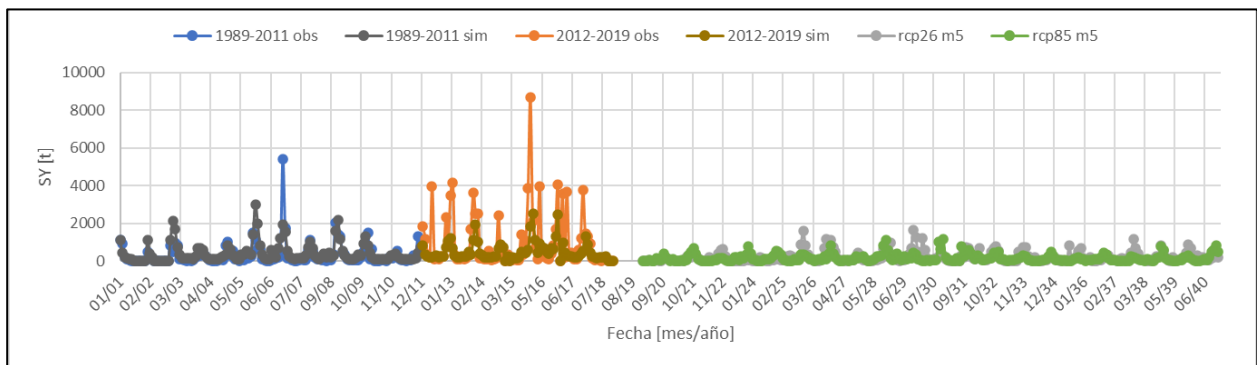


Figura 15-8: Caudal sólido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

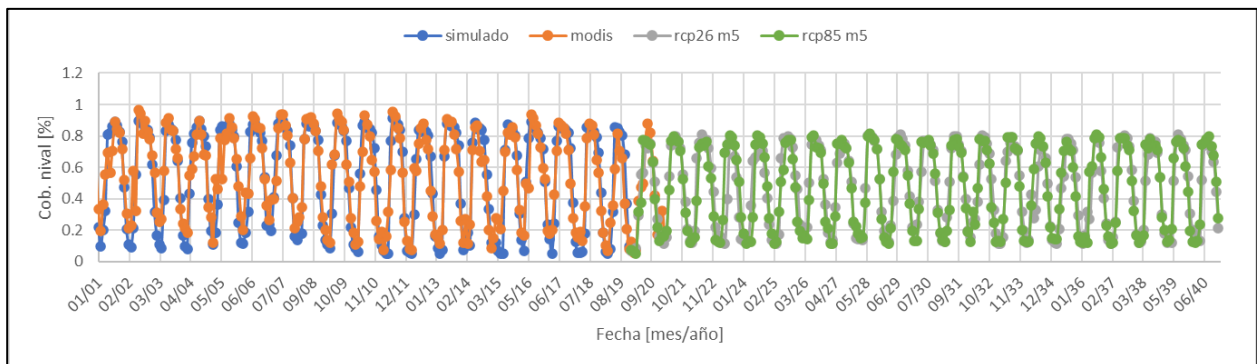


Figura 15-9: Caudal líquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M5 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

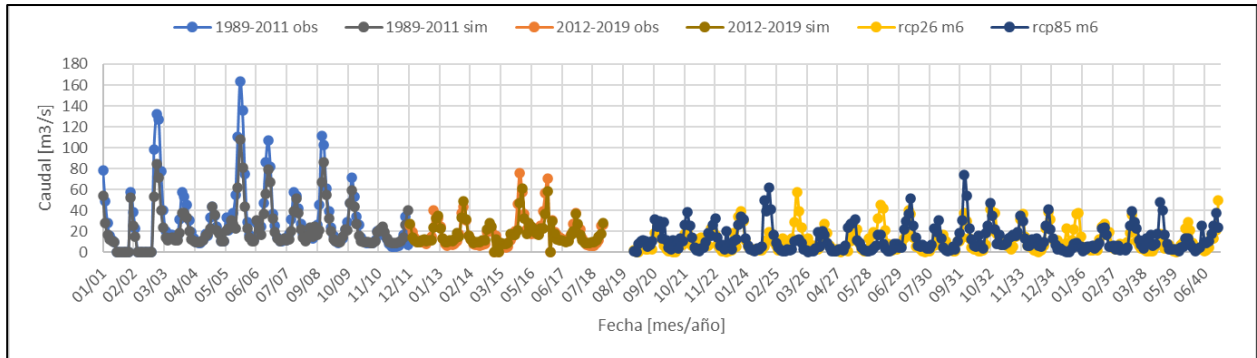


Figura 15-10: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

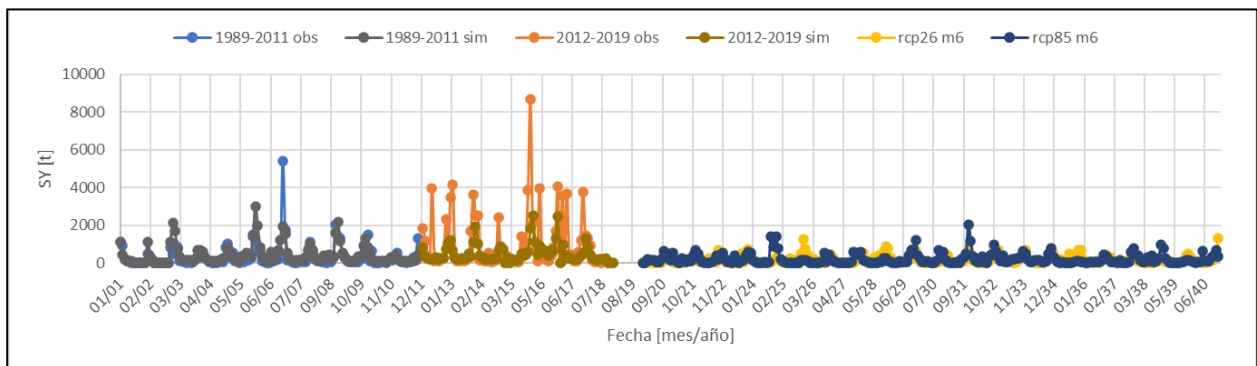


Figura 15-11: Caudal solido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

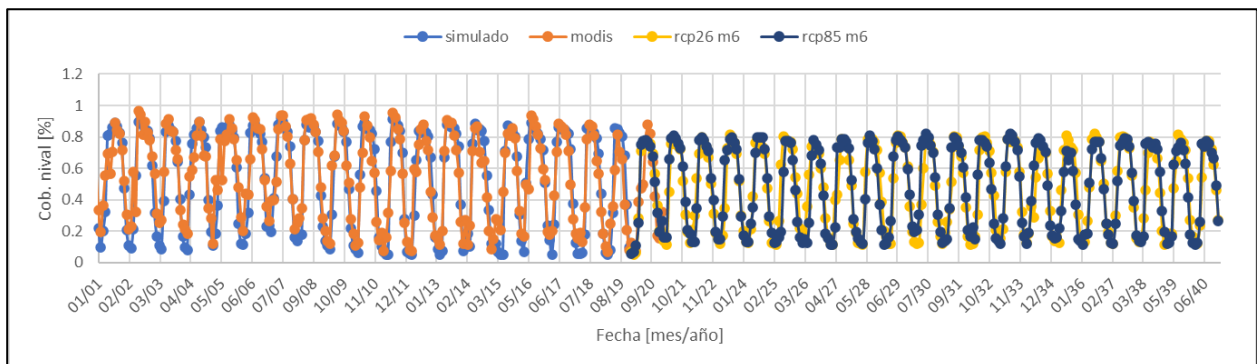


Figura 15-12: Caudal liquido periodo estudio (1989-2019) y futuro (2020-2040) a escala mensual según método M6 escenarios RCP2.6 y RCP8.5.