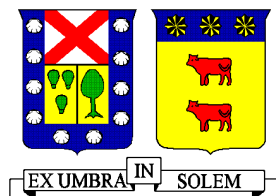


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE



MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y FLUJO DE SEDIMENTOS AFLUENTES AL EMBALSE EL YESO MEDIANTE MODELO SWAT

MITCHEL JAVIER GONZÁLEZ BELLO

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

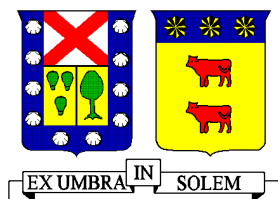
Profesor Guía
Raúl Flores Audibert

Julio de 2022

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAISO – CHILE



MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y FLUJO DE SEDIMENTOS AFLUENTES AL EMBALSE EL YESO MEDIANTE MODELO SWAT

Memoria de titulación presentada por
MITCHEL JAVIER GONZÁLEZ BELLO

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Raúl Flores Audibert

Julio 2022

RESUMEN

El objetivo principal de este informe se centra en la estimación del caudal de sedimentos afluente a El Yeso Embalse mediante la calibración, validación y extrapolación de parámetros obtenidos desde un modelo hidrológico realizado sobre una cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano, la cual contiene a dicho embalse.

Las principales actividades realizadas consistieron en la recopilación de información sobre el uso y manejo del software SWAT, la creación de un registro de estaciones con información pluviométrica, meteorológica y sedimentométrica en el área de estudio, a través de una búsqueda en las plataformas de la Dirección General de Aguas (DGA) y del Centro de Ciencias del Clima y Resiliencia (CR2), logrando una base de datos de entrada para el modelo.

La realización del modelo hidrológico se desarrolló favorablemente para las dos cuencas analizadas: El Yeso Embalse y Río Maipo en El Manzano, tanto para caudales como para sedimentos. Los datos proporcionados por la plataforma CR2 resultaron ser los más adecuados para estos fines, logrando una extrapolación de los parámetros a la cuenca de El Yeso Embalse y su posterior estimación de sedimentos afluentes y comparación con cuencas vecinas de similares características.

Finalmente, el ajuste obtenido en la calibración y validación fue aceptable, tanto para años húmedos como secos. La calibración del flujo de sedimentos afluente a la estación Río Maipo en El Manzano presenta un ajuste que se encuentra dentro del rango aceptable - insatisfactorio. En ambos casos, la incorporación de un caudal base constante fue necesaria para lograr un mejor ajuste del modelo. Los datos de cobertura de nieve proporcionados por el modelo SWAT concuerdan con los datos de cobertura nival estimados a partir de las imágenes MODIS, logrando un ajuste dentro del rango "Bueno" - "Aceptable".

Palabras clave: Modelación hidrológica; Flujo de sedimentos; Modelo SWAT.

ABSTRACT

The main objective of this report focuses on the estimation of the sediment flow to El Yeso Embalse by calibration, validation and extrapolation of parameters taken from a hydrological model performed over a watershed delimited by the Río Maipo en El Manzano station, which contains the reservoir.

The main activities developed were the compilation of information on the use and management of the SWAT software, the creation of a register of stations with pluviometric, meteorological and sedimentometric information in the study area, through a search in the platforms of the Dirección General de Aguas (DGA) and the Centro de Ciencias del Clima y Resiliencia (CR2), achieving an input database for the model.

The realization of the hydrological model was developed favorably for both basins analyzed: El Yeso Embalse and Río Maipo in El Manzano, for both flows and sediments. The data provided by the CR2 platform was the most suitable for these purposes, achieving a parameter extrapolation to the El Yeso Embalse basin and its subsequent sediment flow estimation and analysis with similar neighboring basins.

Finally, the calibration and validation setting obtained was acceptable, both for wet and dry years. The sediment flow calibration to the Río Maipo en El Manzano station presents an acceptable - unsatisfactory adjustment. In each case, a constant base flow incorporation was necessary to achieve a better model fit. The snow cover data provided by the SWAT model are consistent with the snow cover data estimated from the MODIS images, achieving " Good" - "Acceptable" range fit.

Keywords: Hydrologic modeling; Sediment flow; SWAT model.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos Generales	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Organización del documento.....	3
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES DEL MODELO Y FUENTES DE DATOS	4
2.1 Imágenes Satelitales	4
2.1.1 Imágenes MODIS.....	4
2.1.2 Productos de nieve MODIS.....	4
2.2 Datos CR ²	5
2.2.1 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia.....	5
2.2.2 Explorador climático	5
2.2.3 Productos grillados.....	5
2.3 RStudio.....	6
2.4 Modelo SWAT	6
2.4.1 Base teórica SWAT	8
2.4.2 Parámetros de ajuste.....	13
2.5 Criterios de eficiencia de Calibración	14
2.5.1 Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).....	15
2.5.2 Índice de eficiencia Kling-Gupta (KGE).....	16
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
3.1 Contexto general cuenca del Rio Maipo	17
3.2 Sistema Físico Natural	18
3.2.1 Climatología local	18
3.2.2 Hidrogeología.....	20

3.2.3	Características de los Suelos	21
3.3	Zona de estudio	22
3.3.1	Cuenca delimitada por estación Río Maipo en El Manzano	22
3.3.2	Cuenca delimitada por Embalse El Yeso	23
3.3.3	Información de glaciares presentes en la zona	24
3.4	Antecedentes para la selección del periodo de estudio	26
3.4.1	Precipitaciones y temperatura	26
3.4.2	Caudales Observados	27
3.4.3	Sedimentos observados	27
3.4.4	Imágenes satelitales.....	28
3.5	Selección periodo de estudio.....	28
CAPÍTULO 4: PREPARACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO.....		31
4.1	Datos de entrada modelo SWAT.....	31
4.1.1	Precipitación y Temperatura	31
4.1.2	Ráster de elevación.....	33
4.1.3	Cobertura de Suelos	35
4.1.4	Tipo de Suelos.....	37
4.2	Criterios para la conformación de HRU's.....	38
4.3	Datos para validación del modelo	39
4.3.1	Caudales inferidos Embalse El Yeso.....	39
4.3.2	Sedimentos observados Río Maipo en El Manzano	40
4.3.3	Cobertura nival MODIS	40
4.4	Representación del modelo	42
CAPÍTULO 5: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....		44
5.1	Resultados modelación Cuenca Río Maipo en El Manzano	44
5.1.1	Caudales	44
5.1.2	Sedimentos	45

5.2	Resultados modelación Cuenca El Yeso Embalse	46
5.2.1	Caudales	46
5.2.2	Sedimentos	47
5.3	Relación de sedimentos en cuencas vecinas.....	48
5.3.1	Comparación de la cobertura nival.....	49
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....		50
6.1	Modelo SWAT	50
6.2	Uso de datos DGA y CR2	50
6.3	Calibración y Validación de los modelos.....	51
6.4	Aporte Glaciar	51
6.5	Cobertura nival SWAT.....	52
6.6	Comparación de Sedimentos obtenidos en El Yeso Embalse	52
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES		53
BIBLIOGRAFÍA.....		54
ANEXOS.....		56
A.	Coordenadas de “Estaciones” CR2 utilizadas	56
B.	Comparación precipitaciones estaciones y CR2	58
C.	Parámetros seleccionados para el modelo	60
D.	Bandas de Elevación	62
E.	Sensibilidad de parámetros.....	64
F.	Gráficos de Calibración – Validación a nivel Diario	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1.- REPRESENTACIÓN SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE SWAT SOBRE UNA UNIDAD DE RESPUESTA HIDROLÓGICA (HRU). FUENTE: DOCUMENTACIÓN TEÓRICA SWAT 2009.....	7
FIGURA N° 2.- SECUENCIA GENERAL DEL PROCESO UTILIZADO POR SWAT EN LA MODELACIÓN DE LA FASE TERRESTRE DEL CICLO HIDROLÓGICO. FUENTE: DOCUMENTACIÓN TEÓRICA SWAT 2009.....	9
FIGURA N° 3.- CUENCA DEL RÍO MAIPO Y SUS CAUCES PRINCIPALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	17
FIGURA N° 4.- PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS EN ESTACIÓN EMBALSE EL YESO, UBICADA A UNA ALTURA DE 2568 (M.S.N.M.), ENTRE LOS AÑOS 1993 Y 2020. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A DATOS OBTENIDOS DESDE LA DGA.	19
FIGURA N° 5.- PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS EN ESTACIÓN RIO MAPOCHO RINCONADA DE MAIPÚ, UBICADA A UNA ALTURA DE 434 (M.S.N.M.), ENTRE LOS AÑOS 1991 Y 2020. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A DATOS OBTENIDOS DESDE LA DGA.....	19
FIGURA N° 6.- CUENCA DELIMITADA POR LA ESTACIÓN EL MANZANO EN SOFTWARE SWAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO.	23
FIGURA N° 7.- CUENCA DELIMITADA POR LA ESTACIÓN EL YESO EMBALSE EN SOFTWARE SWAT, JUNTO A LA CUENCA DELIMITADA POR EL PUNTO AGUAS ARRIBA DEL EMBALSE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO.	24
FIGURA N° 8.- GLACIARES PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO, CORRESPONDIENTES A LA CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO..	25
FIGURA N° 9.- DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS CON INFORMACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA ENTREGADOS POR LA PLATAFORMA CR2MET. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO.....	26
FIGURA N° 10.- ESTADÍSTICA DE CAUDALES OBSERVADOS EN ESTACIÓN RÍO MAIPO EN EL MANZANO, ENTRE LOS AÑOS 1965 Y 2018, PROPORCIONADOS POR LA DGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	27
FIGURA N° 11.- ESTADÍSTICA DE SEDIMENTOS OBSERVADOS, ESTACIÓN RÍO MAIPO EN EL MANZANO, DESDE EL AÑO 1965 AL 2018 PROPORCIONADOS POR LA DGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	28

FIGURA N° 12.- REPRESENTACIÓN DE LOS PERIODOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN UTILIZADOS EN EL MODELO HIDROLÓGICO CORRESPONDIENTE A LA CUENCA EL YESO EMBALSE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	29
FIGURA N° 13.- REPRESENTACIÓN DE LOS PERIODOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN UTILIZADOS EN EL MODELO HIDROLÓGICO CORRESPONDIENTE A LA CUENCA DELIMITADA POR LA ESTACIÓN RÍO MAIPO EN EL MANZANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	30
FIGURA N° 14.- REPRESENTACIÓN DE LAS ESTACIONES UTILIZADAS EN EL MODELO SWAT PARA CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO.	32
FIGURA N° 15.- REPRESENTACIÓN DE LAS ESTACIONES UTILIZADAS EN EL MODELO SWAT PARA LA CUENCA EL YESO EMBALSE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO. ..	33
FIGURA N° 16.- ARCHIVO DIGITAL DE ELEVACIÓN STRM UTILIZADO EN LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO.	34
FIGURA N° 17.- REPRESENTACIÓN DE LA COBERTURA DE SUELOS ENTREGADA POR GEP PARA LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO.	35
FIGURA N° 18.- REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE SUELOS UTILIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO, EN BASE AL MAPA DE SUELOS MUNDIAL FAO/UNESCO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	37
FIGURA N° 19.- CAUDALES INFERIDOS MEDIANTE BALANCE HÍDRICO SOBRE EL EMBALSE EL YESO, PROPORCIONADOS POR AGUAS ANDINAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	40
FIGURA N° 20.- SERIE DE TIEMPO OBTENIDA A PARTIR DE LA INTERPRETACIÓN DE COBERTURA NIVAL ENTREGADA POR PLATAFORMA MODIS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	41
FIGURA N° 21.- REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA POR EL MODELO SWAT. LAS CAPAS USO DE SUELO, MAPA DE SUELO Y DEM CONFORMAN LA BASE PARA SIMULAR LOS PROCESOS QUE OCURREN EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	42
FIGURA N° 22.- REPRESENTACIÓN DE LAS SUBCUENCAS RÍO MAIPO EN EL MANZANO Y EL YESO EMBALSE UTILIZADAS EN EL MODELO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN SOFTWARE ARCGIS PRO.	43
FIGURA N° 23.- GRÁFICO DE CAUDAL OBSERVADO VERSUS SIMULADO EN LA ESTACIÓN RÍO MAIPO EN EL MANZANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	44
FIGURA N° 24.- GRÁFICO DE SEDIMENTOS OBSERVADO VERSUS SIMULADO EN LA ESTACIÓN RÍO MAIPO EN EL MANZANO. EL ACHURADO NARANJO REPRESENTA EL PERIODO UTILIZADO EN LA CALIBRACIÓN Y EL SECTOR AZUL, UTILIZADO EN LA VALIDACIÓN DEL MODELO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	45

FIGURA N° 25.- GRÁFICO DE CAUDAL OBSERVADO VERSUS SIMULADO EL YESO EMBALSE A ESCALA MENSUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	46
FIGURA N° 26.- REPRESENTACIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO CONSTRUIDA EN BASE A LOS PARÁMETROS DE SEDIMENTOS OBTENIDOS DESDE LA CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO, ANTES Y DESPUÉS DE LA EXTRAPOLACIÓN DE PARÁMETROS SEDIMENTOMÉTRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	47
FIGURA N° 27.- COMPARACIÓN DE SEDIMENTOS POR UNIDAD DE CAUDAL EN CUENCAS ALEDAÑAS A EL YESO EMBALSE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	48
FIGURA N° 28.- COMPARACIÓN DE LA COBERTURA NIVAL SWAT Y MODIS, CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49

ANEXOS

FIGURA B 1.- COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES ENTRE LA ESTACIÓN RÍO MAIPO EN SAN ALFONSO Y PUNTO GRILLADO CR2 MÁS CERCANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	58
FIGURA B 2.- COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES ENTRE LA ESTACIÓN RÍO MAIPO EN EL MANZANO Y PUNTO GRILLADO CR2 MÁS CERCANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
FIGURA B 3.- COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES ENTRE LA ESTACIÓN RÍO MAIPO EN LAS HUALTATAS Y PUNTO GRILLADO CR2 MÁS CERCANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	59
FIGURA B 4.- COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES ENTRE LA ESTACIÓN EL YESO EMBALSE Y PUNTO GRILLADO CR2 MÁS CERCANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	59
FIGURA B 5.- COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES ENTRE LA ESTACIÓN RÍO MAIPO EN SAN ALFONSO Y PUNTO GRILLADO CR2 MÁS CERCANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	59
FIGURA E 1.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON LOS PARÁMETROS PLAPS (IZQUIERDA) Y TLAPS (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	64
FIGURA E 2.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON LOS PARÁMETROS SFTMP (IZQUIERDA) Y SMTMP (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	64
FIGURA E 3.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON LOS PARÁMETROS SMFMX (IZQUIERDA) Y SMFMN (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	65

FIGURA E 4.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON EL PARÁMETRO TIMP. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	65
FIGURA E 5.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON LOS PARÁMETROS ALPHA_BF (IZQUIERDA) Y GW_DELAY (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	66
FIGURA E 6.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON LOS PARÁMETROS GW_REVAP (IZQUIERDA) Y REVAPMN (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	66
FIGURA E 7.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON LOS PARÁMETROS GWQMN (IZQUIERDA) Y RCHRG_DP (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	67
FIGURA E 8.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON LOS PARÁMETROS GWHT (IZQUIERDA) Y GW_SPYLD (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	67
FIGURA E 9.- VARIACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO NASH SUTCLIFFE CON EL PARÁMETRO CN2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	68
FIGURA E 10.- CURVAS DE DEFLEXIÓN DE LA COBERTURA NIVAL PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE COBERTURA AL 50% DE SNO100. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
FIGURA E 11.- VARIACIÓN DE LA COBERTURA NIVAL USANDO DIFERENTES VALORES DE SON100. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	70
FIGURA F 1.- GRÁFICO DE CAUDAL OBSERVADO VERSUS SIMULADO RÍO MAIPO EN EL MANZANO A ESCALA DIARIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	70
FIGURA F 2.- GRÁFICO DE CAUDAL OBSERVADO VERSUS SIMULADO EL YESO EMBALSE A ESCALA DIARIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1.- PARÁMETROS CONSIDERADOS EN LA MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE UNA CUENCA EN SWAT.....	13
TABLA N° 2.- PARÁMETROS CONSIDERADOS EN LA MODELACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DE UNA CUENCA EN SWAT.....	14
TABLA N° 3.- CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DEL NSE.	15
TABLA N° 4.- CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DEL KGE.....	16
TABLA N° 5.- COBERTURAS DE SUELO PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO, JUNTO A SU CLASIFICACIÓN SWAT.....	36
TABLA N° 6.- DESCRIPCIÓN DE CÓDIGOS QUE UTILIZA EL SOFTWARE SWAT PARA LA COBERTURA DE SUELOS.	36
TABLA N° 7.- TIPOS DE SUELOS SEGÚN LA FAO/UNESCO PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO... 38	
TABLA N° 8.- INDICADORES DE EFICIENCIA PARA EL MODELO REALIZADO EN LA ESTACIÓN RIO MAIPO EN EL MANZANO EN CUANTO A CAUDALES, PARA LOS PERIODOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN A ESCALA MENSUAL.	45
TABLA N° 9.- INDICADORES DE EFICIENCIA PARA EL MODELO REALIZADO EN LA ESTACIÓN RIO MAIPO EN EL MANZANO EN CUANTO A SEDIMENTOS, PARA LOS PERIODOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN A ESCALA MENSUAL.	45
TABLA N° 10.- INDICADORES DE EFICIENCIA PARA EL MODELO REALIZADO EN EL YESO EMBALSE EN CUANTO A CAUDALES, PARA LOS PERIODOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN A ESCALA MENSUAL.....	47
TABLA N° 11.- SUPERFICIE DE LAS CUENCAS UTILIZADAS EN LA COMPARACIÓN DE SEDIMENTOS. 48	
TABLA N° 12.- INDICADORES DE EFICIENCIA PARA LA COBERTURA NIVAL OBTENIDA EN SWAT Y MODIS.....	49

ANEXOS

TABLA A 1.- COORDENADAS UTILIZADAS EN LA CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO.	56
TABLA A 2.- COORDENADAS UTILIZADAS EN LA CUENCA EL YESO EMBALSE.....	57
TABLA C 1- RANGO DE PARÁMETROS SELECCIONADOS PARA LA CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA EN SWAT, CUENCA EL YESO EMBALSE.	60
TABLA C 2- RANGO DE PARÁMETROS SELECCIONADOS PARA LA CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA EN SWAT, CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO.....	61
TABLA C 3.- RANGOS DE PARÁMETROS SELECCIONADOS PARA LA CALIBRACIÓN SEDIMENTOMÉTRICA EN SWAT, CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO.	61

TABLA D 1 - ALTURA CENTRAL EN METROS DE CADA UNA DE LAS BANDAS DE ELEVACIÓN CREADAS PARA CADA UNA DE LAS SUBCUENCAS DEL MODELO SWAT, CUENCA RÍO MAIPO EN EL MANZANO.	62
TABLA D 2- ALTURA CENTRAL EN METROS DE CADA UNA DE LAS BANDAS DE ELEVACIÓN CREADAS PARA CADA UNA DE LAS SUBCUENCAS DEL MODELO SWAT, CUENCA EL YESO EMBALSE.....	63
TABLA E 1.- VALORES DE COV1 Y COV2 UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE DEFLEXIÓN DE LA COBERTURA NIVAL.....	69
TABLA F 1.- INDICADORES DE EFICIENCIA PARA EL MODELO REALIZADO EN LA ESTACIÓN RIO MAIPO EN EL MANZANO EN CUANTO A CAUDALES, TANTO PARA EL PERIODO DE CALIBRACIÓN COMO EL DE VALIDACIÓN A ESCALA DIARIA.....	71
TABLA F 2.- INDICADORES DE EFICIENCIA PARA EL MODELO REALIZADO EN LA ESTACIÓN EL YESO EMBALSE EN CUANTO A CAUDALES, TANTO PARA EL PERIODO DE CALIBRACIÓN COMO EL DE VALIDACIÓN A ESCALA DIARIA.	71

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El estudio del flujo de sedimentos en las cuencas de nuestro país es un tema que aún no ha sido abarcado en gran profundidad. Las cuencas andinas de Chile central, ubicadas entre los 30° y 35° de latitud Sur, se caracterizan por tener un régimen hidrológico predominantemente nival (Cortés et al., 2011). El derretimiento nival es capaz de movilizar sedimentos influenciado por la presencia de zonas montañosas de alta pendiente que facilitan los procesos erosivos, produciendo un gran transporte de sedimentos hacia aguas abajo, que pueden ir acompañados de deslizamientos de tierras, caídas de rocas, coladas detríticas, sedimentos glaciares, etc. (Mao, 2016).

El embalse artificial construido sobre el Río Yeso en la cuenca del Río Maipo está en funcionamiento desde el año 1967, recibiendo año a año las aguas provenientes de los deshielos nivales y glaciares de alta montaña. Actualmente esta zona no posee registros sedimentométricos que proporcionen información sobre la cantidad de arrastre de sedimentos producidos, por lo cual surge la necesidad de la utilización de un modelo hidrológico capaz de simular este fenómeno. Una herramienta con grandes capacidades de modelamiento hidrológico es el software Soil and Water Assessment Tool (SWAT), cuyos desarrolladores pertenecen al Servicio de Investigación Agrícola de EE. UU. Este software permite predecir el impacto que las condiciones climáticas y las acciones humanas pueden producir sobre los flujos de agua, sedimentos y la calidad química en grandes cuencas (Neitsch et al., 2011). Este programa ha sido utilizado en algunas cuencas de la zona centro-sur de Chile con buenos resultados en la reproducción de los caudales (Sther et al., 2008). Sin embargo, su capacidad para el modelado de flujo de sedimentos es una herramienta que no se ha desarrollado en profundidad en cuencas chilenas.

En esta memoria se pretende proporcionar una estimación de la serie histórica de sedimentos afluentes al embalse El Yeso, mediante el uso de información sedimentométrica y calibración sedimentológica del modelo SWAT en una cuenca de características morfológicas similares, como lo es la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano, la cual contiene a la cuenca delimitada por el embalse El Yeso.

1.2 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos de esta memoria de título, para poder desarrollar este trabajo.

1.2.1 Objetivos Generales

El objetivo general de este trabajo es estimar el flujo de sedimentos afluente al embalse El Yeso mediante la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT.

1.2.2 Objetivos Específicos

Con relación a los objetivos específicos abarcados en esta memoria, podemos encontrar los siguientes:

- Calibrar el modelo SWAT para transporte de sedimentos en la cuenca Río Maipo en El Manzano, para ser extrapolados a la cuenca El Yeso Embalse.
- Calibrar el modelo SWAT para la escorrentía superficial en la cuenca del embalse El Yeso.
- Generar una serie temporal aproximada de sedimentos en el embalse El Yeso Embalse.
- Estudiar los efectos en caudales y sedimentos al variar parámetros del modelo.
- Comparar la cobertura nival simulada por el modelo y la observada a través de imágenes satelitales.

1.3 Organización del documento

El presente estudio se organizó, secuencialmente, en los siguientes capítulos:

Capítulo 1, Introducción: se presenta la justificación y propósitos del estudio.

Capítulo 2, Antecedentes del modelo y fuentes de datos: se presentan los preceptos teóricos básicos, generales y específicos relacionados con la problemática, enfatizando en el modelo SWAT, los criterios de eficiencia de calibración y los datos CR2.

Capítulo 3, Caracterización del área de estudio: se presentan las características geográficas e hidrológicas principales de la cuenca del Río Maipo, así como la justificación de la elección del período de estudio sobre el cual se realiza la calibración y validación de las cuencas.

Capítulo 4, Preparación del modelo hidrológico: se describen los datos de entrada del modelo SWAT, así como los datos relacionados con el proceso de representación y calibración del modelo.

Capítulo 5, Calibración y validación del modelo: se presentan los resultados obtenidos del estudio, relacionados con la información presentada en los capítulos anteriores.

Capítulo 6, Discusión: se plantean los puntos más relevantes que se desprenden de los resultados obtenidos del modelo.

Capítulo 7, Conclusiones: se presentan las ideas principales que se desprenden del trabajo realizado y que dan respuesta al cumplimiento de los objetivos planteados.

Capítulo 2: ANTECEDENTES DEL MODELO Y FUENTES DE DATOS

2.1 Imágenes Satelitales

Hoy en día, las aplicaciones de las imágenes satelitales son ampliamente variadas. Su uso comprende desde la topografía, monitoreo del cambio climático, seguimiento de huracanes, estudio de la cobertura terrestre hasta el espionaje militar. En términos generales, se puede definir una imagen satelital como una fotografía captada por un sensor diseñado especialmente para recibir la radiación electromagnética emitida por algún cuerpo emisor (tierra), el cual ha sido montado sobre un satélite artificial para orbitar la superficie terrestre.

2.1.1 Imágenes MODIS

El Espectro Radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) es un importante instrumento del Sistema de Observación de la Tierra perteneciente a la NASA, el cual emplea un espejo de barrido transversal y un conjunto de elementos detectores individuales para proporcionar imágenes de la superficie de la Tierra y de las nubes en 36 bandas espectrales. Es capaz de proporcionar imágenes de resolución media a gruesa, con un ciclo de repetición de 1 a 2 días. El objetivo principal de MODIS es facilitar el estudio de la vegetación y sus propiedades, la cubierta terrestre, los cambios globales de la superficie terrestre, el albedo de la superficie y la cobertura de nieve y hielo, de forma diaria.

2.1.2 Productos de nieve MODIS

Los productos de cobertura nival MODIS, son parte de los productos geofísicos derivados de la interpretación de datos obtenidos por MODIS. Se ha cartografiado a escala mundial la extensión de la cobertura nival desde febrero del año 2000, lográndose obtener mapas diarios de la cobertura nival. Estos datos se proporcionan en escala diaria y también en su forma compuesta, donde los valores de cobertura son entregados en un intervalo de tiempo de 8 días. En esta última versión, se entrega un mapa donde los valores de nieve por celda corresponden a la presencia de nieve dentro de cualquier día del periodo (8 días), y en caso de no existir nieve, la celda se rellena con la observación que se haya producido con más frecuencia.

Para la detección de nieve en cada celda, se utiliza un algoritmo basado en índice NDSI, el cual combina los efectos de una reflectancia muy elevada en bandas visibles y muy bajas en el infrarrojo de onda corta (Hall et al., 2021).

2.2 Datos CR²

2.2.1 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia

El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² es un espacio constituido por académicos e investigadores de diferentes ámbitos, cuyo propósito es generar conocimiento sobre la ciencia del clima y la resiliencia, a partir de la colaboración multidisciplinaria.

Nace en el año 2013 financiado por el programa de áreas prioritarias (FONDAP) de la Comisión Nacional Científica y Tecnológica (CONICYT). En él convergen académicos e investigadores de la Universidad de Chile, la Universidad de Concepción y la Universidad Austral de Chile y de otras instituciones académicas.

2.2.2 Explorador climático

Dentro de sus servicios climáticos, destaca la creación del Explorador Climático, el cual utiliza las bases de datos compiladas por el CR², que desde su creación ha trabajado en recopilar y consolidar una extensa, completa y actualizada base de datos de observaciones climatológicas disponible para Chile. Estos datos corresponden a series de tiempo espacialmente distribuidos y registrados a través de instrumentos in situ o remotos. Los registros observacionales contemplan datos de temperatura, precipitación y caudal, obtenidos principalmente desde las plataformas informáticas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y la Dirección General de Aguas (DGA).

2.2.3 Productos grillados

Los datos proporcionados por CR2MET contienen información meteorológica en una grilla rectangular de 0.05° latitud - longitud para el territorio de Chile continental entre los años 1979 y 2020. El desarrollo de este producto nace por la necesidad de contar con datos coherentes, distribuidos espacialmente con información disponible para el estudio del clima e hidrología a escala regional y la evaluación de modelos atmosféricos.

Para su construcción, los distintos investigadores realizaron una regionalización estadística, en la cual los datos disponibles son llevados a una distribución equiespaciada de las variables, utilizando como base los datos del reanálisis atmosférico ERA-Interim (Dee et al., 2011), cuyas grillas son del orden de los 80 km, teniendo en cuenta la topografía e información meteorológica local.

2.3 RStudio

RStudio corresponde a un programa desarrollado para manejar de forma más cómoda el lenguaje de programación R. Este lenguaje de programación fue diseñado para realizar análisis estadísticos y gráficas, el cual se ha masificado debido a su uso relativamente sencillo en comparación con otros lenguajes de programación, siendo utilizado por investigadores científicos, profesores, estudiantes, analistas de diversas áreas, etc.

Para los propósitos de esta memoria, este programa fue utilizado para procesar los datos entregados por la plataforma MODIS, principalmente en el cálculo de la cobertura nival de la zona de estudio, el cálculo de cobertura nival entregado por el programa SWAT y reemplazar los parámetros asociados a la calibración de sedimentos en El Yeso Embalse dentro de los archivos correspondientes.

2.4 Modelo SWAT

Soil and Water Assessment Tool es una herramienta desarrollada por el Dr. Jeff Arnold para el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del USDA. El modelo está desarrollado pensando en el uso para la evaluación de suelo y agua a escala de cuenca hidrográfica, con el fin de poder predecir el impacto que generan las prácticas humanas sobre los suelos, el agua, los sedimentos y los químicos que son utilizados en la agricultura, los cuales a menudo están presentes en cuencas grandes y complejas, con diferentes tipos y usos de suelo, bajo largos periodos de estudio.

Dentro de las principales características de modelo, se puede señalar que:

- Tiene una base física. SWAT requiere información específica sobre el clima, las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y los usos que se da a los suelos dentro de la cuenca.

- Utiliza insumos fácilmente disponibles. Aunque SWAT puede utilizarse para estudiar procesos más especializados, como el transporte de bacterias, los datos mínimos requeridos para realizar una simulación se encuentran frecuentemente disponibles por medio de los organismos gubernamentales.
- Es eficiente desde el punto de vista computacional. La simulación de cuencas muy grandes o de una estrategia de gestión puede realizarse sin una inversión excesiva de tiempo.
- SWAT es un modelo de tiempo continuo, es decir, un modelo de rendimiento a largo plazo. Desde este punto de vista, el modelo no está diseñado para simular, por ejemplo, el trazado detallado de inundaciones producidas por un evento en particular.

El conjunto de datos entregado al programa es utilizado para la confección de unidades de respuesta hidrológica, que representan sectores de la cuenca que poseen similares características de uso de suelo, tipo de suelo y rangos de pendiente, la cual puede ser establecida por el usuario. A continuación, en la Figura N° 1 se presenta un esquema de los procesos involucrados en el ciclo hidrológico que se lleva a cabo sobre cada HRU presente en la cuenca de estudio.

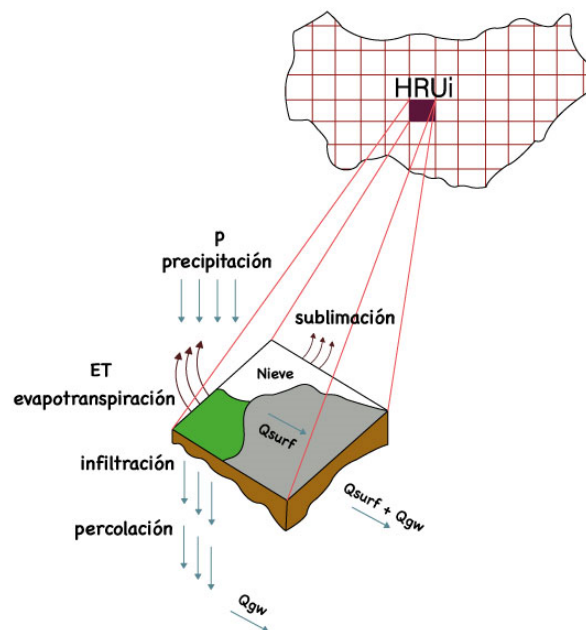


Figura N° 1.- Representación sobre el funcionamiento del software SWAT sobre una unidad de respuesta hidrológica (HRU). Fuente: Documentación teórica SWAT 2009.

El modelo delimita la cuenca a partir de los datos de altitud para luego ser dividida en subcuencas. En una etapa siguiente, se crean los HRU según la información descrita, con lo cual el modelo comienza a reflejar diferencias en evapotranspiración y otras condiciones hidrológicas para diferentes coberturas del terreno, cultivos y suelos, calculándose la escorrentía para cada HRU, las cuales se suman finalmente para establecer las escorrentías totales en la subcuenca e incrementar la precisión del balance del agua (Neitsch *et al.* 2011).

2.4.1 Base teórica SWAT

Dentro del programa se permite la simulación de diferentes procesos físicos que pueden existir dentro de una cuenca, la cual es subdividida en unidades más pequeñas que resultan útiles ante la presencia de diferencias en los usos de tierra o suelo, que pudiesen afectar de forma significativa a la hidrología de la cuenca.

La información de entrada para cada subcuenca es agrupada u organizada en las siguientes categorías: Clima, HRU's, Estanques/Humedales, agua subterránea y el canal principal o tramo que drena la subcuenca. Sin importar el tipo de problema que se esté modelando en SWAT, el modelo se sustenta en la fase terrestre del ciclo hidrológico, basada a su vez en la ecuación del balance de agua presentada en la Ecuación N° (1) descrita a continuación (Neitsch *et al.*, 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde:

SW_t : Contenido final de agua en el suelo en el día i (mm H₂O)

SW_0 : Contenido inicial de agua en el suelo en el día i (mm H₂O)

R_{day} : Precipitación en el día i (mm H₂O)

Q_{surf} : Escorrentía superficial en el día i (mm H₂O)

E_a : Evapotranspiración en el día i (mm H₂O)

w_{seep} : Cantidad de agua entrando en zona no saturada en el día i (mm H₂O)

Q_{gw} : Cantidad de agua subterránea que escurre en el día i (mm H₂O)

A continuación, en la Figura N° 2 se presenta una secuencia general del proceso seguido por SWAT para modelar la fase terrestre del ciclo hidrológico:

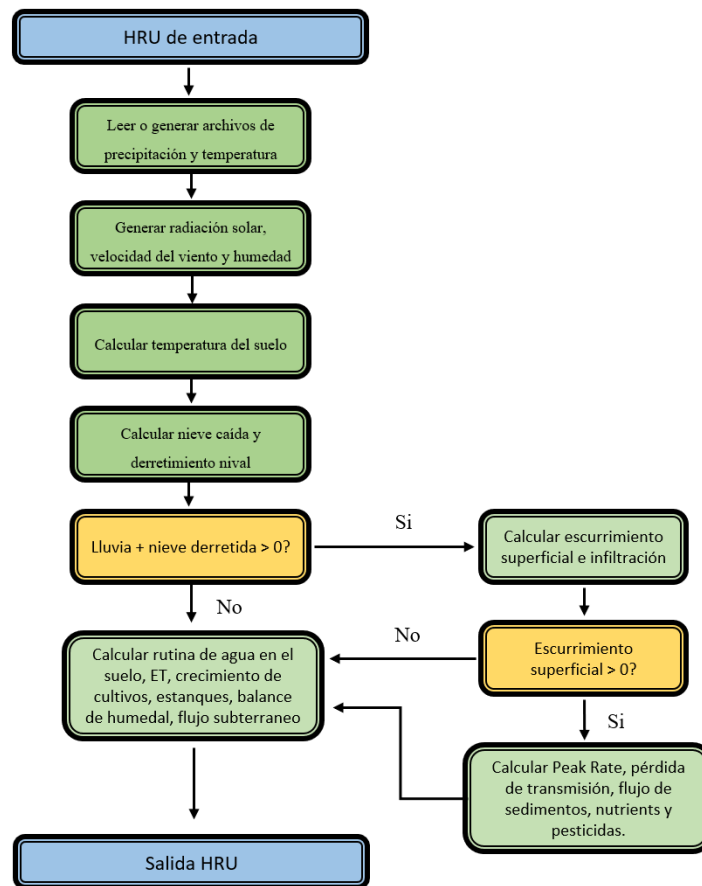


Figura N° 2.- Secuencia general del proceso utilizado por SWAT en la modelación de la fase terrestre del ciclo hidrológico. Fuente: Documentación teórica SWAT 2009.

Cobertura nival SWAT

Dentro del algoritmo del programa se puede clasificar la precipitación como lluvia o lluvia/nieve helada según la temperatura media diaria del aire, denominada T_{s-r} y definida por el usuario. Si la temperatura media diaria del aire es inferior a la temperatura límite, la precipitación dentro del HRU se clasifica como nieve y el equivalente en agua de la precipitación en forma de nieve se añade al manto de nieve.

Las precipitaciones de nieve se almacenan en la superficie del suelo en forma de manto de nieve, donde la cantidad de agua almacenada se reporta como un equivalente de agua de nieve. El manto de nieve aumentará con las nevadas adicionales o disminuirá con el derretimiento de la nieve o la sublimación de esta. El balance de masas del manto de nieve que desarrolla SWAT viene dado por la Ecuación N° (2) descrita a continuación:

$$SNO_t = SNO_o + R_{day} - E_{sub} - SNO_{mlt} \quad (2)$$

Donde:

SNO_t : Contenido de agua en el manto de nieve en un día dado (mm H₂O)

SNO_o : Contenido de agua en el manto de nieve inicial (mm H₂O)

R_{day} : Precipitación sólida en un día dado (mm H₂O)

E_{sub} : Sublimación en un día dado (mm H₂O)

SNO_{mlt} : Cantidad de nieve derretida en un día dado (mm H₂O)

Curva de agotamiento de la cobertura nival SWAT

La curva de agotamiento de la cobertura nival representa el porcentaje de cobertura nival que contiene, por ejemplo, un HRU en un día determinado. Requiere de la definición de una profundidad límite, SNO_{100} , por encima de la cual siempre habrá un 100% de cobertura nival. La profundidad límite dependerá de factores como la distribución de la vegetación, la carga de nieve por el viento la erosión de la nieve por el viento, entre otros, y será única para la cuenca hidrográfica de interés.

La ecuación de la curva de agotamiento que describe la cobertura nival viene dada por la Ecuación N° (3) descrita a continuación:

$$sno_{cov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \cdot \left(\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp \left(cov_1 - cov_2 \cdot \frac{SNO}{SNO_{100}} \right) \right)^{-1} \quad (3)$$

Donde:

sno_{cov} : Fracción del área del HRU cubierta por nieve.

SNO : Contenido de agua de la capa de nieve en un día dado (mm H₂O).

SNO_{100} : Profundidad límite del manto nival a la cual existe un 100% de cobertura en el HRU (mm H₂O).

cov_1 y cov_2 : Coeficientes que definen la forma de la curva de cobertura nival, calculados con dos puntos conocidos de la curva: 95% de cobertura al 95% de SNO_{100} y 50% de cobertura a la fracción del SNO_{100} especificada por el usuario.

Bandas de Elevación

El modelo SWAT permite la creación de hasta 10 bandas de elevación, las cuales deben ser incorporadas de forma manual. El propósito es subdividir cada una de las subcuencas del modelo en rangos de altura, con la finalidad de capturar la variación orográfica de la precipitación y temperatura producida por las variaciones geográficas dentro de la cuenca. De esta forma, los procesos de cobertura y derretimiento nivales se modelan separadamente dentro de cada banda.

Ecuaciones para el derretimiento nival SWAT

La fusión de la nieve en el SWAT se calcula como una función lineal entre la diferencia de la temperatura media del aire del manto de nieve máximo y la temperatura base o temperatura límite de fusión de la nieve, dada por la Ecuación N° (4) descrita a continuación:

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} \cdot sno_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mlt} \right] \quad (4)$$

Donde:

SNO_{mlt} : Cantidad de nieve derretida en un día dado (mm H₂O).

b_{mlt} : Factor de derretimiento nival para un día dado (mm H₂O/día - °C).

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

T_{snow} : Temperatura de la capa de nieve en un día dado (°C).

T_{mx} : Temperatura máxima del aire en un día dado (°C).

T_{mlt} : Temperatura base sobre la cual se puede derretir la nieve (°C).

El factor de derretimiento nival tiene una variación estacional, donde los valores mínimos y máximos vienen dados por el solsticio de invierno y verano, el cual viene dado por la Ecuación N° (5) descrita a continuación:

$$b_{mlt} = \frac{(b_{mlt6} + b_{mlt12})}{2} + \frac{(b_{mlt6} - b_{mlt12})}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (d_n - 81)\right) \quad (5)$$

Donde:

b_{mlt} : Factor de derretimiento nival para un día dado (mm H₂O/día - °C).

b_{mlt6} : Factor de derretimiento para el 21 de junio (mm H₂O/día - °C).

b_{mlt12} : Factor de derretimiento para el 21 de diciembre (mm H₂O/día - °C).

d_n : Número del día del año en curso (-).

Ecuación para la estimación de la concentración de sedimentos

La estimación de los sedimentos se realiza mediante el cálculo de la concentración máxima de sedimentos que puede ingresar y ser transportado dentro de una sección del canal. Esta cantidad máxima se define mediante el parámetro $conc_{sed,ch,mx}$, el cual viene dado por la Ecuación N° (6) descrita a continuación:

$$conc_{sed,ch,mx} = C_{sp} \cdot (v_{ch,pk})^{spexp} \quad (6)$$

Donde:

$conc_{sed,ch,mx}$: Concentración máxima de sedimentos que puede ser transportada por el agua (Ton/m³ o Kg/L).

C_{sp} : Parámetro lineal definido para calcular la cantidad máxima de sedimento reentrante al canal.

$v_{ch,pk}$: Velocidad peak en el canal (m/s).

$SPEXP$: Exponente definido para calcular el sedimento reentrante al canal.

2.4.2 Parámetros de ajuste

Dentro del programa SWAT existe la posibilidad de modificar una gran cantidad de parámetros relacionados con el ciclo hidrológico, ya sean: parámetros globales de la cuenca, subcuenca, aguas subterráneas, escurrimiento superficial, nieve, precipitaciones, temperaturas, etc.

Con el propósito de obtener un ajuste aceptable, se llevó a cabo una recopilación de los parámetros más relevantes para el modelo, en base a los trabajos realizados por diferentes autores (Abbaspour et al., 2007; Ahl et al., 2008). Para los propósitos de la realización de este modelo, se consideran los parámetros relativos al escurrimiento de aguas y al arrastre de sedimentos.

Dentro de los parámetros seleccionados para modelar el transporte de sedimentos, se tienen los siguientes:

Tabla N° 1.- Parámetros considerados en la modelación del transporte de sedimentos de una cuenca en SWAT.

Parámetro	Descripción	Tipo
PRF	Factor de ajuste de la tasa de máximos para la ruta de sedimentos en el canal principal.	.bsn
SPEXP	Parámetro de exponente para el cálculo de la reentrada de sedimentos en la ruta de sedimentos del canal.	.bsn
SPCON	Parámetro lineal para el cálculo de la cantidad máxima de sedimento que puede reentrar durante el enrutamiento de sedimentos en el canal.	.bsn

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, los parámetros más relevantes obtenidos a partir de la revisión que modelan el escurrimiento de agua, son los siguientes:

Tabla N° 2.- Parámetros considerados en la modelación de la escorrentía superficial de una cuenca en SWAT.

Parámetro	Descripción	Tipo
PLAPS	Tasa de cambio de la precipitación en la altura	.sub
TLAPS	Tasa de cambio de la temperatura en la altura	.sub
TIMP	Factor de retardo para la temperatura de deshielo.	.bsn
SMFMX	Tasa máxima de deshielo para el 21 de diciembre.	.bsn
SMFMN	Tasa máxima de deshielo para el 21 de junio.	.bsn
SFTMP	Temperatura media del aire a la que la precipitación tiene la misma probabilidad de ser lluvia o nieve.	.bsn
SNO100	Altura límite de nieve sobre la cual existe un 100% de cobertura.	.bsn
ALPHA_BF	Constante de recesión del flujo base.	.gw
GW_REVAP	Coefficiente de re-evaporación de las aguas subterráneas.	.gw
GWQMN	Límite de profundidad para acuíferos poco profundos para flujo base.	.gw
REVAPMN	Límite de profundidad para re-evaporación en acuíferos poco profundos.	.gw
RCHRG_DP	Coefficiente de percolación del acuífero.	.gw
GWHT	Altura inicial de agua subterránea.	.gw
GW_SPYLD	Rendimiento específico del acuífero poco profundo.	.gw

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Criterios de eficiencia de Calibración

Con el fin de comprender que tan bien se ajustan los resultados de una modelación hidrológica respecto de los valores observados, se utilizan los índices de eficiencia. Actualmente existe una gran variedad de indicadores, los cuales se utilizan para cuantificar diferentes aspectos. Para este caso, los índices utilizados fueron: NSE y KGE (Gupta et al., 2009), los cuales son ampliamente utilizados para la estimación de la eficiencia hidrológica en un modelo.

A continuación, se describen ambos indicadores de eficiencia y sus parámetros.

2.5.1 Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Es uno de los criterios más utilizados en el análisis comparativo de calibración y validación de modelos hidrológicos, es adimensional y se encuentra dentro del intervalo $] - \infty, 1]$, siendo 1 un ajuste perfecto entre observación y simulación. El criterio de NSE resulta de la normalización del criterio de error cuadrático medio, mostrando el rendimiento del modelo hidrológico en comparación con un modelo lineal de base (media de las observaciones) (Gupta et al., 2009), (Nash et al., 1970).

Este índice es calculado mediante la Ecuación N° (7):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [X_{s,i} - \overline{X_o}]^2}{\sum_{i=1}^n [X_{o,i} - \overline{X_o}]^2} \quad (7)$$

Donde:

n : Número de observaciones.

$X_{s,i}$: Variable simulada en el tiempo i .

$X_{o,i}$: Variable observada en el tiempo i .

$\overline{X_o}$: Promedio de las observaciones.

Los valores de la eficiencia de Nash-Sutcliffe se pueden clasificar según su rendimiento, como se indica en la Tabla N° 3 descrita a continuación:

Tabla N° 3.- Criterios de evaluación de rendimiento del NSE.

Clasificación de Rendimiento	NSE
Muy bueno	≥ 0.90
Bueno	0.80–0.90
Aceptable	0.65–0.80
Insatisfactorio	< 0.65

Fuente: (Ritter et al., 2013)

2.5.2 Índice de eficiencia Kling-Gupta (KGE)

La eficiencia de Kling-Gupta (KGE), combina las tres componentes de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de los errores del modelo (es decir, la correlación, el sesgo y la relación de varianzas o coeficientes de variación) de una manera más equilibrada. Se ha utilizado ampliamente para la calibración y evaluación de los modelos hidrológicos en los últimos años, donde se considera que el valor óptimo es 1.

Este índice es calculado mediante la Ecuación N° (8) descrita a continuación:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2} \quad (8)$$

Donde:

$r = \frac{cov(X_o, X_s)}{\sigma_o \sigma_s}$: Coeficiente de correlación lineal entre las variables observadas (X_o) y simuladas (X_s).

$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$: Razón entre la desviación estándar de las variables simuladas y observadas.

$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$: Razón entre las medias de las variables simuladas y observadas.

Los valores de la eficiencia de Kling - Gupta se pueden clasificar según su rendimiento, como se indica en la Tabla N° 4 descrita a continuación:

Tabla N° 4.- Criterios de evaluación de rendimiento del KGE.

Clasificación de Rendimiento	KGE
Bueno	≥ 0.75
Intermedio	0.50–0.75
Bajo	0.00–0.50
Muy bajo	<0.00

Fuente: (Kling et al., 2012)

Capítulo 3: CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Contexto general cuenca del Río Maipo

La cuenca hidrográfica del Río Maipo se extiende entre los paralelos 32° 55' - 34° 15' latitud Sur y meridianos 69° 55' – 71° 33' longitud Oeste. Abarca casi en su totalidad a la región Metropolitana, y una participación menor en las regiones de Valparaíso y Libertador General Bernardo O'Higgins. Es la fuente principal de abastecimiento para la región Metropolitana, concentrando cerca del 70% de la demanda de agua potable y un 90% de la demanda de regadío (CADE - IDEPE, 2004).

La cuenca drena una superficie de 15.304 [Km²] a través de sus 250 [Km] de cauces, los cuales nacen en la laguna Nacimiento, en los falderos del Volcán Maipo, hasta desembocar en el Océano Pacífico, cercano a la localidad de Llole, inmediatamente al sur del Puerto de San Antonio, con un caudal promedio de 92.3 [m³/s] (Serrano, 2014)

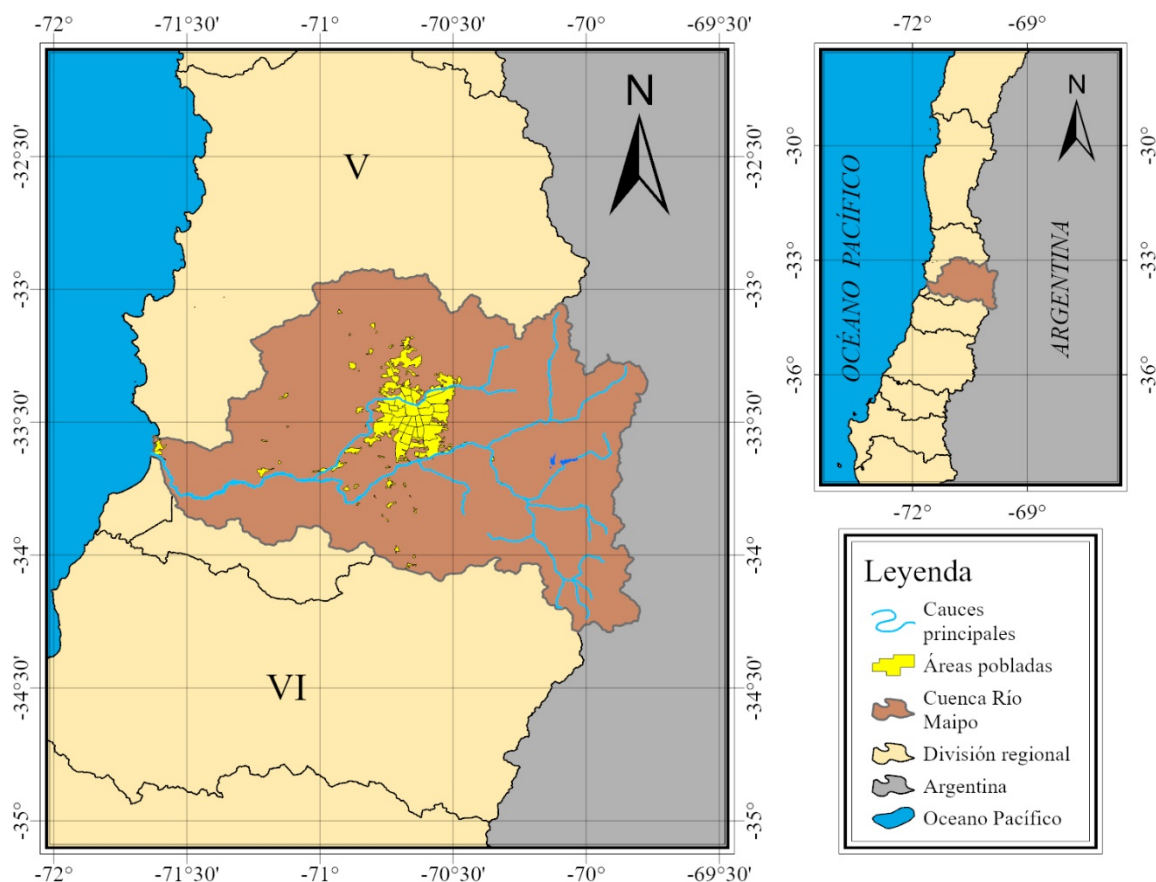


Figura N° 3.- Cuenca del Río Maipo y sus cauces principales. Fuente: Elaboración propia.

El régimen hidrológico presente en la cuenca del Maipo puede ser clasificado como nival, mixto o pluvial, según la ubicación que se tome como referencia. En la parte alta de la cuenca, predomina el régimen nival, mientras que para la parte baja de la cuenca, predomina un régimen pluvial.

En la zona media, se puede observar una componente nival y pluvial, debido a las precipitaciones caídas en forma líquida y sólida (CADE – IDEPE, 2004).

3.2 Sistema Físico Natural

3.2.1 Climatología local

La cuenca del Río Maipo posee un ciclo anual de precipitaciones bien definido, donde se puede observar un máximo invernal y un período estival con cantidades significativamente menores que van en aumento hacia el sur. Este régimen se conoce como clima templado mediterráneo y abarca desde los 30 ° S hasta los 40 ° S (Videla, 2013).

La Cuenca del Maipo registra una temperatura media anual de 10 °C en su parte alta, con fuertes gradientes térmicos, llegando a alcanzar temperaturas máximas de 27 °C durante el día. En la Figura N° 4 se pueden observar las precipitaciones y temperaturas medias mensuales obtenidas de la estación El Yeso Embalse. En este sector las precipitaciones se pueden presentar en forma de nieve sobre los 1.500 (m.s.n.m.), la cual aumenta en función de la altura, alcanzando valores medios anuales de 536 [mm] en Estación San José de Maipo y 640 [mm] en la estación El Yeso Embalse.

Por sobre los 3.000 (m.s.n.m.) las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas caracterizan un clima Frío de Altura, permitiendo la acumulación de nieve y mantención de cuerpos de hielo en cumbres y quebradas de la alta Cordillera.

La zona que comprende la parte media de la cuenca, se registra una temperatura media anual de 22,5°C, pero al igual que en la Cordillera de los Andes, los gradientes térmicos son fuertes, alcanzando valores máximos de 30° C en épocas de verano.

En cuanto a las precipitaciones, se concentran principalmente durante los meses de mayo a septiembre, marcando un punto máximo en los meses de junio y julio. En la Figura N° 5 se observan las precipitaciones y temperaturas medias mensuales obtenidas desde la estación Río Mapocho Rinconada de Maipú, diferenciándose con la estación El Yeso Embalse debido a la altura a la que se encuentra cada una.

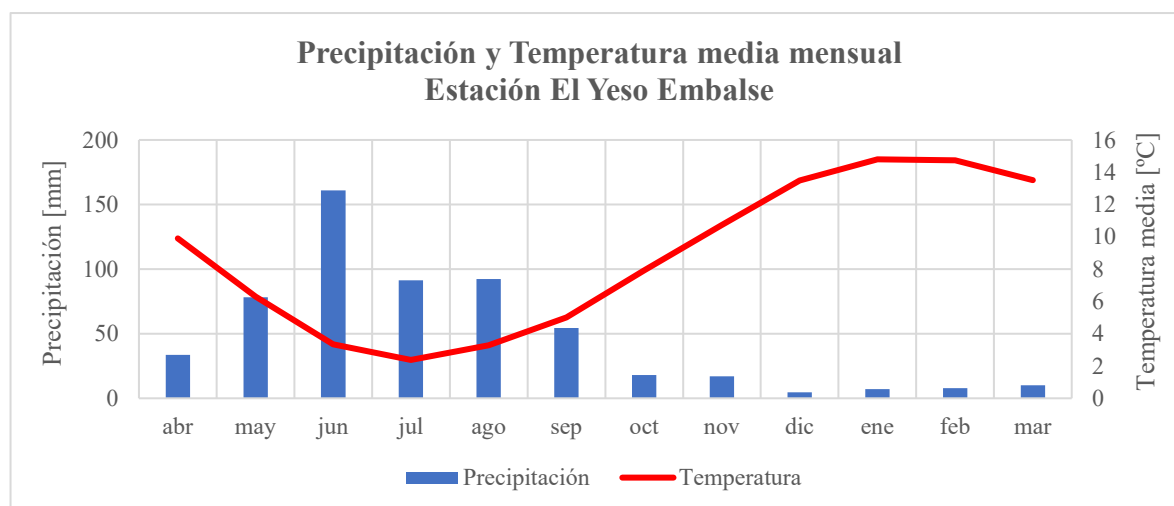


Figura N° 4.- Precipitaciones y temperaturas medias en estación Embalse El Yeso, ubicada a una altura de 2568 (m.s.n.m.), entre los años 1993 y 2020. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la DGA.

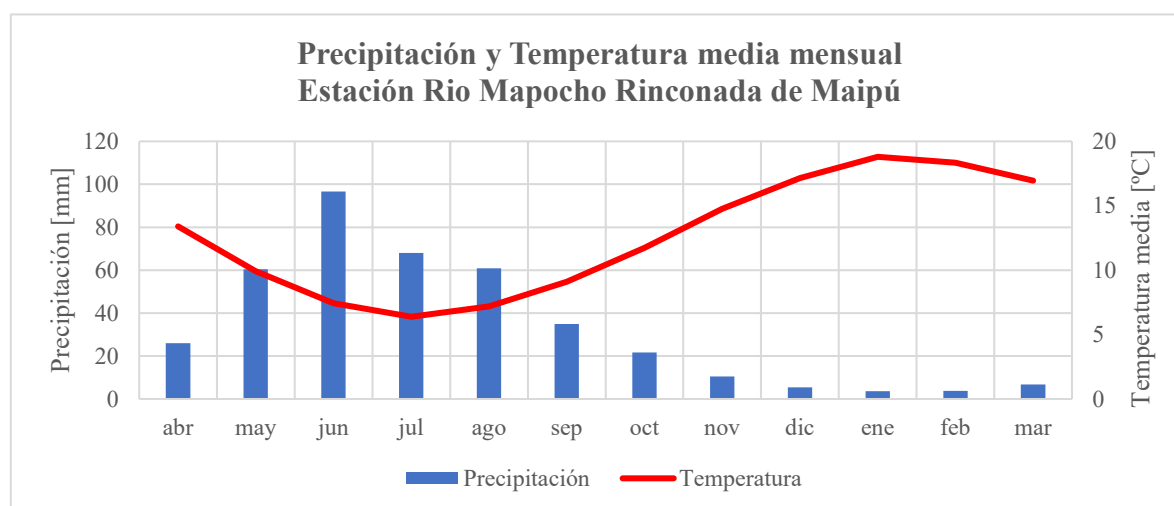


Figura N° 5.- Precipitaciones y temperaturas medias en estación Río Mapocho Rinconada de Maipú, ubicada a una altura de 434 (m.s.n.m.), entre los años 1991 y 2020. Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la DGA.

En base a lo anterior, se pueden destacar los contrastes que existen en cuanto a las variaciones de precipitaciones y temperatura a lo largo del año, diferenciándose dos estaciones: seca y lluviosa, con una duración promedio de 8 y 4 meses respectivamente. Por su parte, en el sector medio (depresión central) y valles interiores de la Cordillera de la Costa, se impide la influencia del océano, dando paso a una inversión térmica y una disminución de precipitaciones en los sectores aledaños a su ladera oriental (sotavento). Lo anterior se diferencia con el clima de altura en la parte alta de la cuenca, donde la Cordillera de los Andes produce un efecto contrario, aumentando las precipitaciones a medida que se asciende en altitud (Barlovento). La geografía de la cuenca provoca que existan dos sectores diferentes entre sí: el sector andino y la depresión intermedia (Videla, 2013).

3.2.2 Hidrogeología

En la entrada de la cordillera los Andes, se presentan rocas graníticas producto de la excavación del lecho del río, la cual conforma una barrera hidrogeológica que impide el flujo de aguas subterráneas a la cuenca. El río Mapocho y los esteros Angostura y Colina, ingresan a la cuenca a través de lechos excavados en roca volcánica impermeable. A causa de esto, las aguas que fluyen desde las hoyas hidrográficas de los ríos Colina, Mapocho, Maipo Superior y Angostura, solo lo pueden hacer de manera superficial para infiltrarse posteriormente en zonas de relleno, constituyendo una zona de permeabilidad prácticamente nula.

Las características geológicas de la depresión intermedia, correspondientes a una fosa tectónica, hacen que su permeabilidad sea media - alta.

A su vez, la cordillera de la costa se constituye por rocas graníticas paleozoicas, en conjunto con rocas volcánicas y sedimentarias cretácicas, las cuales en su proceso de meteorización han formado “maicillo”, permitiendo la infiltración y acumulación de aguas subterráneas. Como resultado, la permeabilidad de esta zona es media-baja.

En base a la información disponible en el Mapa Hidrogeológico de Chile, se da cuenta de la existencia de un acuífero que se ubica en el sector cordillerano, específicamente en el sector del río Volcán y Yeso (Cade-Idepe, 2004). Esta reserva de aguas subterráneas, llamada acuífero de Santiago, se localiza desde la precordillera hasta Talagante, y alberga un volumen equivalente a 40 embalses El Yeso. Siguiendo el sentido de escurrimiento del río Maipo, se puede encontrar otro acuífero

localizado en el sector del río Volcán, el cual se junta con el río Maipo. En la zona cordillerana restante, no existe presencia de acuíferos. En el valle de la cuenca existen acuíferos que poseen diversas características, tanto de profundidad como de calidad química de las aguas. En la zona comprendida entre los esteros Puangue y Lampa, no se encuentran acuíferos subterráneos, debido a las características de permeabilidad allí existentes (Cade-Idepe, 2004).

3.2.3 Características de los Suelos

En líneas generales, en la cuenca del río Maipo, se pueden distinguir cuatro diferentes tipos de suelos:

1. Sección superior de la cuenca (alta cordillera): Suelos esqueléticos sobre afloramiento rocoso. En las hoyas hidrográficas de los ríos Colina, Mapocho Maipo superior y Angostura, la litología y disposición no favorecen la acumulación y transmisión de aguas subterráneas.
2. Sección media de la cuenca (precordillera): Zonas precordilleranas que rodean la cuenca con suelos estratificados, bien drenados y de fertilidad natural alta. Representado por tres sectores de norte a sur en la cuenca, cuyas características varían según se indica a continuación:
 - Textura: moderadamente finas y finas a moderadamente gruesa y media.
 - Permeabilidad: media – baja
 - Escorrentía: media - alta
 - Riesgo de erosión: moderado – alto
3. Sección de fondo, valle de la cuenca: Suelos con problemas de drenaje y permeabilidad; muestran grados variables de salinidad y/o alcalinidad y serias limitaciones para su utilización agrícola, cuyas características varían según se indica a continuación:
 - Textura: fina, muy arcillosa a arcillo arenosa
 - Permeabilidad: baja, suelos impermeables
 - Escorrentía: alta
 - Riesgo de erosión: alto

4. Sección baja de la cuenca (zona costera): Valles estrechos como Melipilla y estero Puangue. Suelos de material granítico, estratificados. Generalmente bien drenados, de fertilidad natural baja o moderada y una subutilización agrícola marcada por la falta de agua, cuyas características varían según se indica a continuación:

- Textura: moderadamente gruesa y gruesa.
- Permeabilidad: media - alta
- Escorrentía: media - lenta
- Riesgo de erosión: medio – bajo

La caracterización sectorizada según su ubicación en la cuenca brinda información sobre el comportamiento esperado en cuanto al escurrimiento de aguas frente al desarrollo de un modelo hidrológico.

3.3 Zona de estudio

Para llevar a cabo los objetivos planteados en el apartado 1.2, fue necesaria la definición de dos subcuencas dentro de la cuenca del Río Maipo, sobre las cuales se realizó la modelación hidrológica en base al uso del software SWAT. Estas corresponden a las subcuencas Río Maipo en El Manzano y El Yeso Embalse, ubicadas en la parte alta de la cuenca Río Maipo.

3.3.1 Cuenca delimitada por estación Río Maipo en El Manzano

Para poder obtener la demarcación de esta cuenca, hace falta conocer un modelo DEM (Modelo de Elevación Digital, por sus siglas en inglés) y un punto de desfogue dado por las coordenadas de la estación Río Maipo en El Manzano cuya latitud y longitud corresponden a 33.59 S y 70.38 O respectivamente.

Este punto fue utilizado para delimitar el perímetro de la cuenca, en base a la línea divisoria de aguas del sector, mediante el uso del software SWAT quien realiza la delimitación como primer paso para la obtención de un modelo hidrológico de la zona, en conjunto con los cauces de aguas principales.

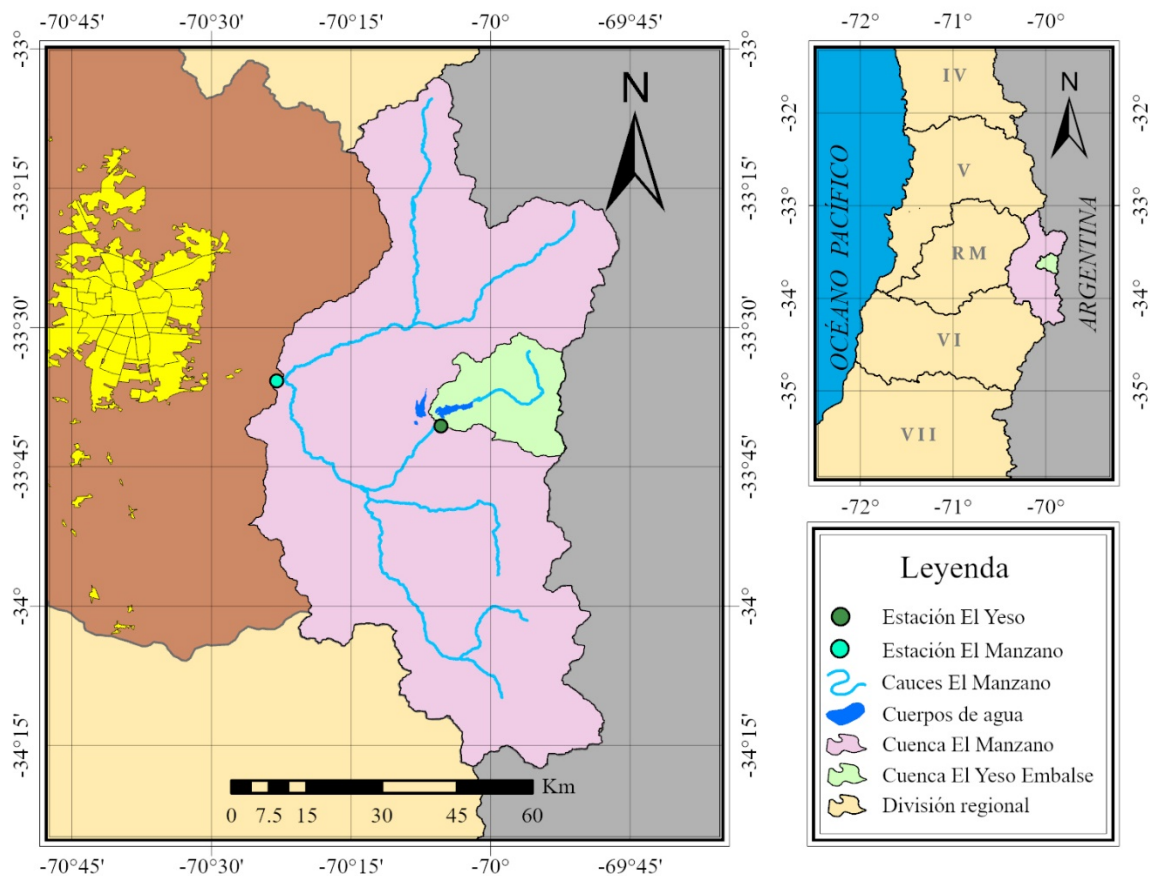


Figura N° 6.- Cuenca delimitada por la estación El Manzano en software SWAT. Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

La cuenca drena un área de 4.839 (Km²) y sus cotas máxima, media y mínima son 6.550, 3.181 y 875 (m.s.n.m.) respectivamente. La precipitación anual media asciende a los 840 [mm], y se caracteriza por poseer suelos predominantemente áridos.

3.3.2 Cuenca delimitada por Embalse El Yeso

Al igual que en el apartado anterior, teniendo como base el archivo DEM y el punto de desfogue, es posible delimitar la cuenca en cuestión. Para este caso, existen dos cuencas: la primera de ellas corresponde a la delimitación proporcionada por la estación El Yeso Embalse, la cual está ubicada aguas abajo del embalse y una segunda cuenca, delimitada por un punto definido inmediatamente aguas arriba del embalse. El propósito de la elección de este punto es reducir la influencia que produce la acumulación de agua y sedimentos en el embalse, pudiendo contribuir de forma negativa al modelo hidrológico de la zona.

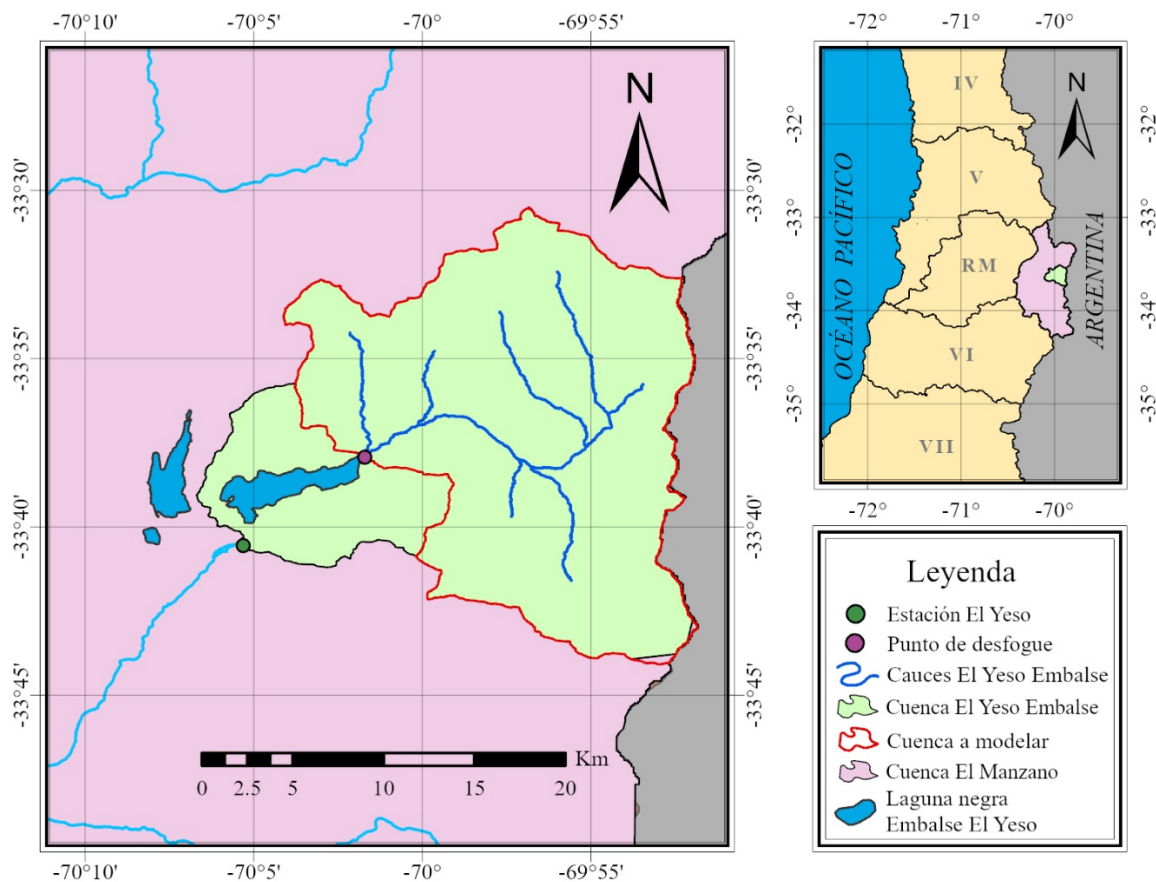


Figura N° 7.- Cuenca delimitada por la estación El Yeso Embalse en software SWAT, junto a la cuenca delimitada por el punto aguas arriba del embalse. Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

La cuenca delimitada por la estación El Yeso Embalse drena un área de 350 (Km²) aproximadamente y sus cotas máxima, media y mínima son 6.103, 3.582 y 2.509 [m.s.n.m] respectivamente, mientras que la precipitación anual media asciende a los 860 [mm] (estadística Estación El Yeso Embalse, 1980 – 2015), presentándose en su mayoría en forma de nieve, la cual aumenta con la altura.

3.3.3 Información de glaciares presentes en la zona

La geografía montañosa presente en la zona de estudio y en nuestro país en general, es un condicionante que favorece la acumulación de nieve, dando origen a la formación de glaciares, los cuales pueden ser encontrados desde las regiones en el extremo norte hasta las regiones en el extremo sur. Se ha documentado que cerca de un 70% de la población en zonas altoandinas aprovecha los recursos hídricos provenientes desde los deshielos glaciares (Bórquez et al., 2006).

Para el caso de las cuencas correspondientes a El Yeso Embalse y Río Maipo en El Manzano, la presencia de glaciares ha sido documentada para fines científicos. Estos datos se encuentran disponibles en el IDE Chile, cuya organización encargada de la recopilación es la DGA. Este inventario se encuentra disponible para todo el territorio nacional, en base a imágenes promedio del año 2002. Según esta información, la superficie cubierta por glaciares en la cuenca El Yeso Embalse es de 54 [Km²], lo cual representa el 16.7% del total de la superficie de la cuenca. Para el caso de la cuenca Río Maipo en El Manzano, la superficie total cubierta por glaciares asciende a 373 [Km²], lo cual representa el 7.6 % del total de la superficie de la cuenca.

A continuación, en la Figura N° 8 se puede apreciar la distribución de glaciares en la zona de estudio:

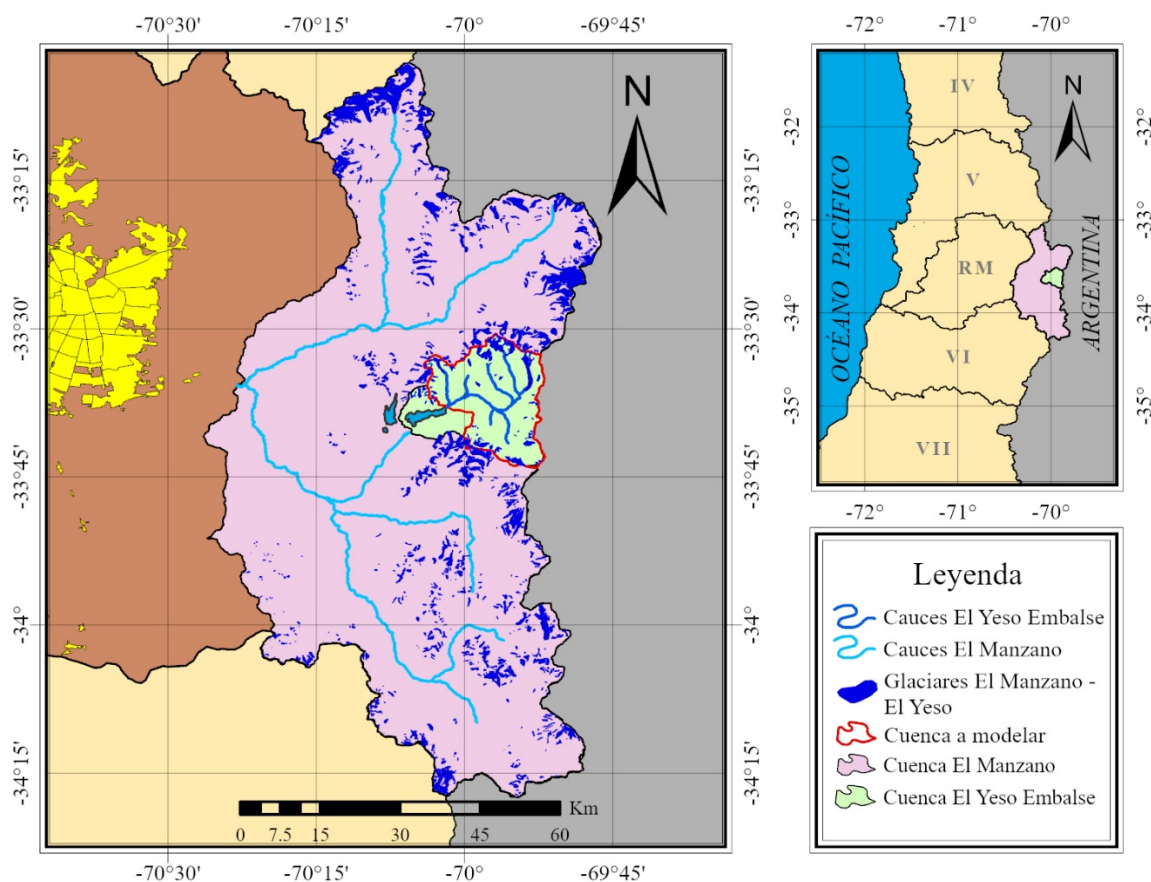


Figura N° 8.- Glaciares presentes en la zona de estudio, correspondientes a la cuenca Río Maipo en El Manzano. Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

3.4 Antecedentes para la selección del periodo de estudio

Según la recopilación de datos obtenidas desde las diferentes fuentes consultadas, se tienen diferentes periodos de tiempo según el tipo y la fuente del dato. En base a esta información, se selecciona el periodo más conveniente para el desarrollo del modelo.

A continuación, se revisan las fuentes de datos más relevantes para la selección del periodo de estudio.

3.4.1 Precipitaciones y temperatura

Se cuenta con información disponible desde el año 1979 hasta el año 2021, según los datos obtenidos desde la plataforma CR2, los cuales se encuentran distribuidos en forma grillada para todo el territorio nacional, tanto para el caso de precipitaciones como el de temperaturas mínimas y máximas, lo cual hace factible su uso para ambas cuencas. En la Figura N° 9 se puede observar la distribución de la información disponible sobre la zona de estudio.

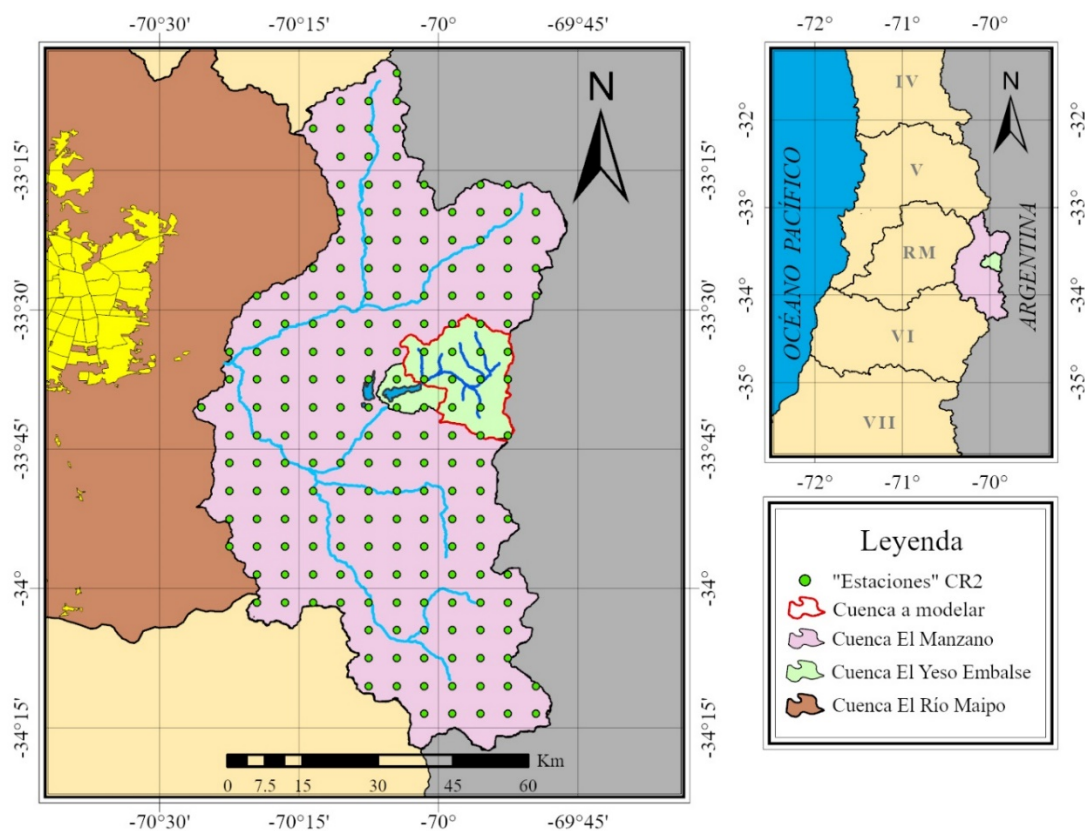


Figura N° 9.- Distribución de puntos con información de precipitación y temperatura entregados por la plataforma CR2MET. Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

3.4.2 Caudales Observados

Los caudales observados corresponden a datos reales medidos en terreno, ya sea por alguna estación con la capacidad de hacerlo, o bien, corresponden a datos que pueden ser inferidos mediante alguna técnica afín.

En el caso de la estación Río Maipo en El Manzano, se cuenta con datos de caudal registrados entre los años 1965 al 2018, como se indica a continuación, en la Figura N° 10.

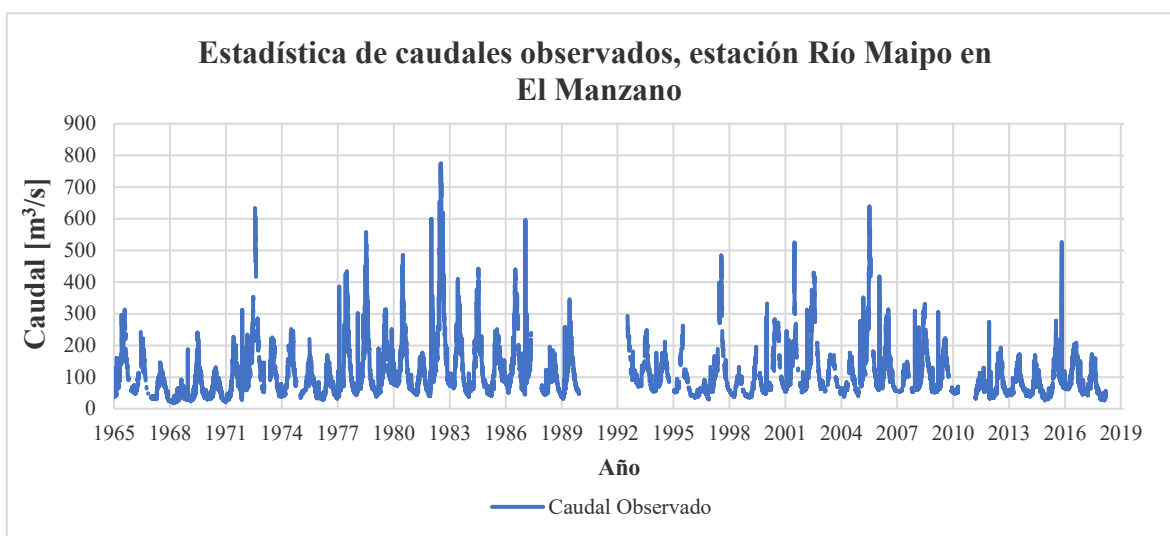


Figura N° 10.- Estadística de caudales observados en estación Río Maipo en El Manzano, entre los años 1965 y 2018, proporcionados por la DGA. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, para la cuenca El Yeso Embalse, los datos fueron calculados a través de un balance hídrico sobre la operación del embalse, los cuales fueron facilitados por Aguas Andinas para los propósitos de esta memoria, debido que no existe una estación con la capacidad de medición de estos datos en la zona.

3.4.3 Sedimentos observados

Los datos de sedimentos para la estación Río Maipo en El Manzano, están disponibles entre los años 1965 y 2018, al igual que la estadística de caudales. A continuación, en la Figura N° 11 se puede apreciar la estadística de sedimentos que fueron medidos en la estación Río Maipo en El Manzano:

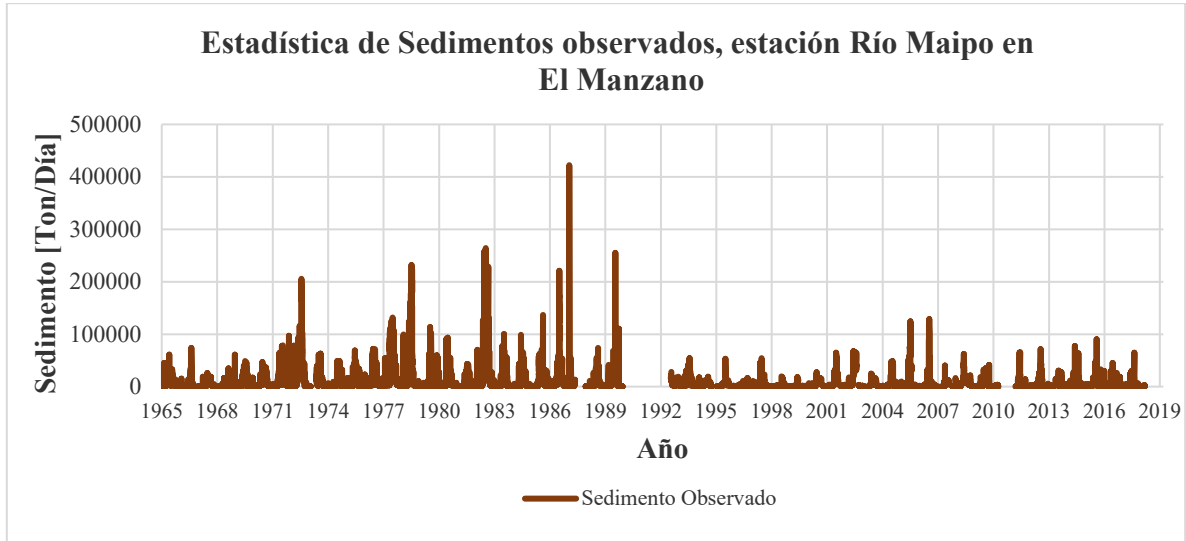


Figura N° 11.- Estadística de sedimentos observados, estación Río Maipo en El Manzano, desde el año 1965 al 2018 proporcionados por la DGA. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la estación El Yeso Embalse, no se tienen registros sedimentométricos con los cuales realizar una calibración o comparación directa de datos modelados en la cuenca, siendo el motivo de estudio de esta memoria.

3.4.4 Imágenes satelitales

Para el caso de las imágenes satelitales, las imágenes MODIS están disponibles desde el año 2000 a la fecha. El propósito del uso de estas imágenes es poder obtener una estimación de la cobertura nival en base a las imágenes satelitales, mediante un adecuado procesamiento para la zona de estudio para poder ser contrastados con la información de cobertura nival entregada por el software SWAT

3.5 Selección periodo de estudio

En base a la información recopilada y señalada anteriormente, se selecciona un periodo de trabajo acorde a los datos disponibles. En primer lugar, se necesitan de datos reales, medidos en terreno o inferidos, como lo es el caso de El Yeso Embalse, con los cuales poder contrastar los datos del modelo hidrológico realizado. Debido a que los datos de caudales observados en El Yeso Embalse comienzan en el año 1996 y terminan en el año 2020, se selecciona este periodo en particular para realizar el modelo y tener una base con la cual comprar los resultados. A su vez, este periodo de tiempo se divide en dos: el de calibración y el de validación.

La etapa de calibración del modelo consiste en obtener los parámetros relativos al ciclo hidrológico que mejor se ajustan a los caudales observados, teniendo como datos de entrada, las precipitaciones y temperaturas entregadas por la plataforma CR2MET. Dicho ajuste es cuantificado a través del uso de los indicadores de eficiencia NSE y KGE.

Frente a un escenario donde los caudales siguen una clara tendencia a disminuir año a año, es necesario saber que los parámetros obtenidos de una calibración utilizando solo años húmedos, tienen a sobreestimar los caudales a futuro y, por el contrario, una calibración con un periodo de tiempo que considera solo años secos tiende a subestimar los caudales de los años lluviosos. Con la finalidad de mitigar los efectos que se producen por el uso de periodos predominantemente húmedos o secos sobre los parámetros de calibración, se considera el uso de un periodo de calibración que contenga tanto años húmedos como secos.

A continuación, en la Figura N° 12 se observa una representación de los años que comprenden tanto el periodo de calibración como el de validación del modelo:

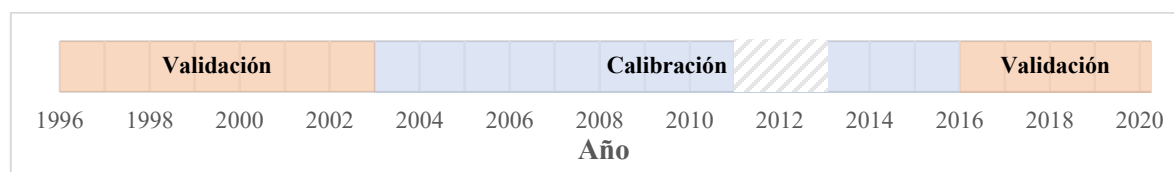


Figura N° 12.- Representación de los periodos de Calibración y Validación utilizados en el modelo hidrológico correspondiente a la cuenca El Yeso Embalse. Fuente: Elaboración propia.

Este periodo abarca un total de 23 años, dentro del cual se han omitido los años 2011 y 2012 según lo señalado anteriormente en la sección Caudales Observados. La calibración se desarrolla en el periodo 2003 al 2015, mientras que la validación comprende desde el año 1996 al 2003 y 2016 al 2020.

Para el caso de la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano, el periodo seleccionado para su estudio es similar, teniendo dos años menos en el periodo de validación debido a que los datos de sedimentos observados entregados por esta estación están disponibles solo hasta el año 2018.

A continuación, en la Figura N° 13 se observa una representación de los años que comprenden tanto el periodo de calibración como el de validación del modelo:

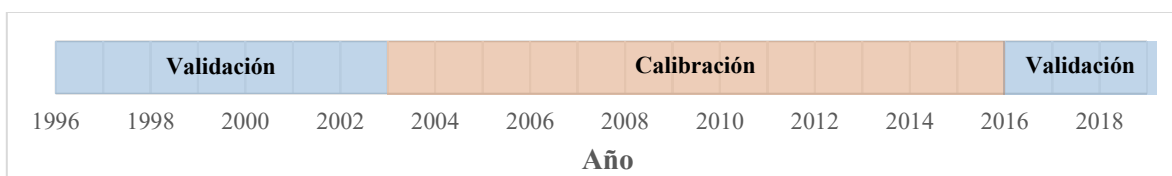


Figura N° 13.- Representación de los periodos de Calibración y Validación utilizados en el modelo hidrológico correspondiente a la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, tanto la cuenca El Yeso Embalse como Río Maipo en El Manzano comparten igual periodo de calibración, con lo cual se busca minimizar la variabilidad que puedan tener los parámetros de calibración.

Capítulo 4: PREPARACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

Para poder realizar el modelo en software SWAT y poder ser contrastado con las mediciones observadas por las estaciones disponibles, se requiere preparar una serie de datos de entrada para poder correr el modelo.

En el caso de los datos observados en la estación Río Maipo en El Manzano, los datos se encuentran disponibles sin necesidad de un mayor análisis, tanto para el caso de caudales como el de sedimentos.

Frente a la necesidad de contar con datos observados en la cuenca El Yeso Embalse, nace como alternativa el uso de caudales inferidos a partir de un balance hidrológico según lo indicado en la sección 3.4.2 *Caudales Observados*. Con esta información, lo que se busca es dar paso a la calibración de caudales que ingresan al embalse, para luego tener una base para modelar los sedimentos que son arrastrados hacia el embalse artificial.

A continuación, se describen los datos de entrada necesarios para realizar el modelo.

4.1 Datos de entrada modelo SWAT

4.1.1 Precipitación y Temperatura

Tal como se señaló en el apartado 3.4.1 *Precipitaciones y temperatura*, los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron desde la plataforma CR2MET para ser utilizados en el programa ingresados como “Estaciones” individuales en la zona de estudio. La cantidad de “Estaciones” utilizadas en el modelo fue seleccionada mediante ensayo y error, cuidando incorporar una red de estaciones lo suficientemente densa para que el programa sea capaz de captar la variabilidad espacial de la precipitación y temperatura, considerando a su vez el tiempo de análisis del programa.

En el caso de la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano, se cuenta con un total de 192 “Estaciones” con información disponible, distribuidos uniformemente sobre la cuenca, de los cuales fueron utilizados 17 puntos, cuidando la distribución para una mejor representatividad. Cabe señalar que para el modelo solo son válidos los puntos o estaciones que están al interior de la cuenca en estudio.

A continuación, en la Figura N° 14 se puede observar la distribución espacial de los puntos que representan la distribución de datos utilizados, tanto para precipitación como de temperatura mínima y máxima:

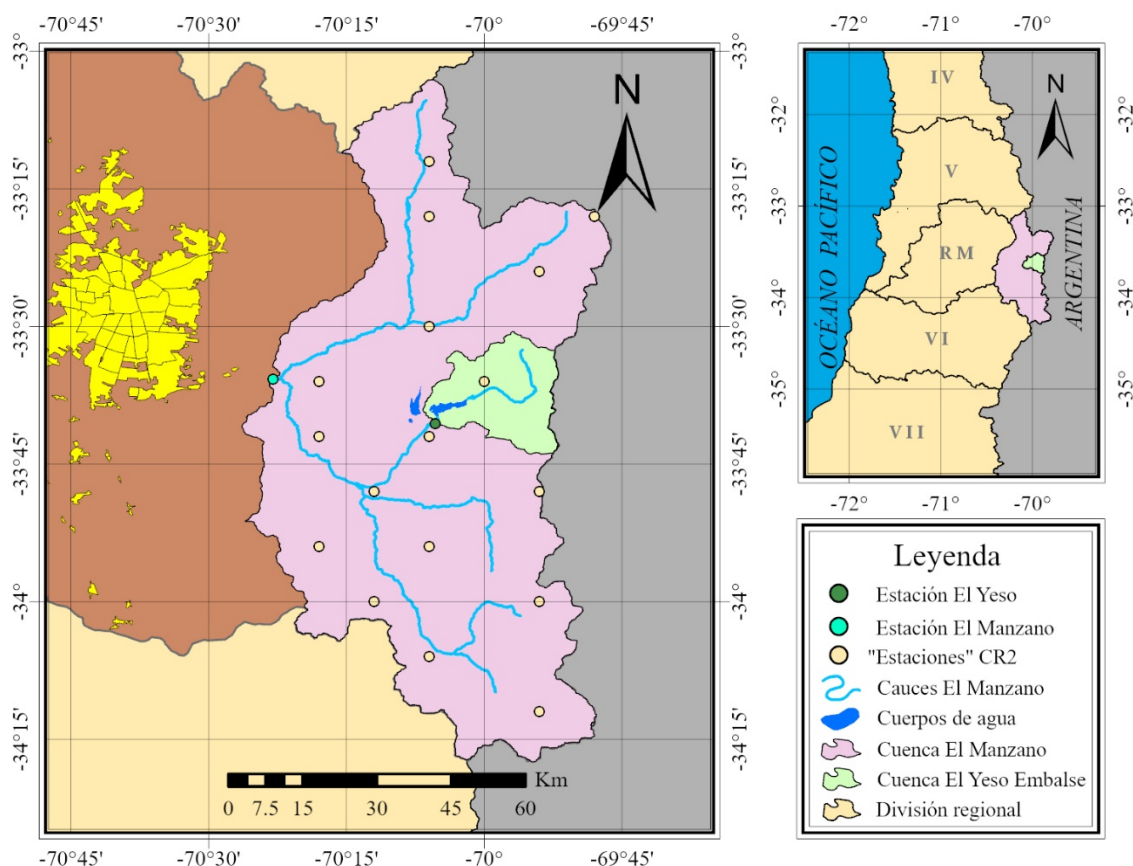


Figura N° 14.- Representación de las estaciones utilizadas en el modelo SWAT para cuenca Río Maipo en El Manzano.
Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

La situación en el modelo desarrollado en la cuenca El Yeso Embalse es similar. Se tienen un total de 12 "Estaciones" con información disponible. A continuación, en la Figura N° 15 se puede observar la distribución de estaciones ingresadas al modelo en la cuenca El Yeso Embalse.

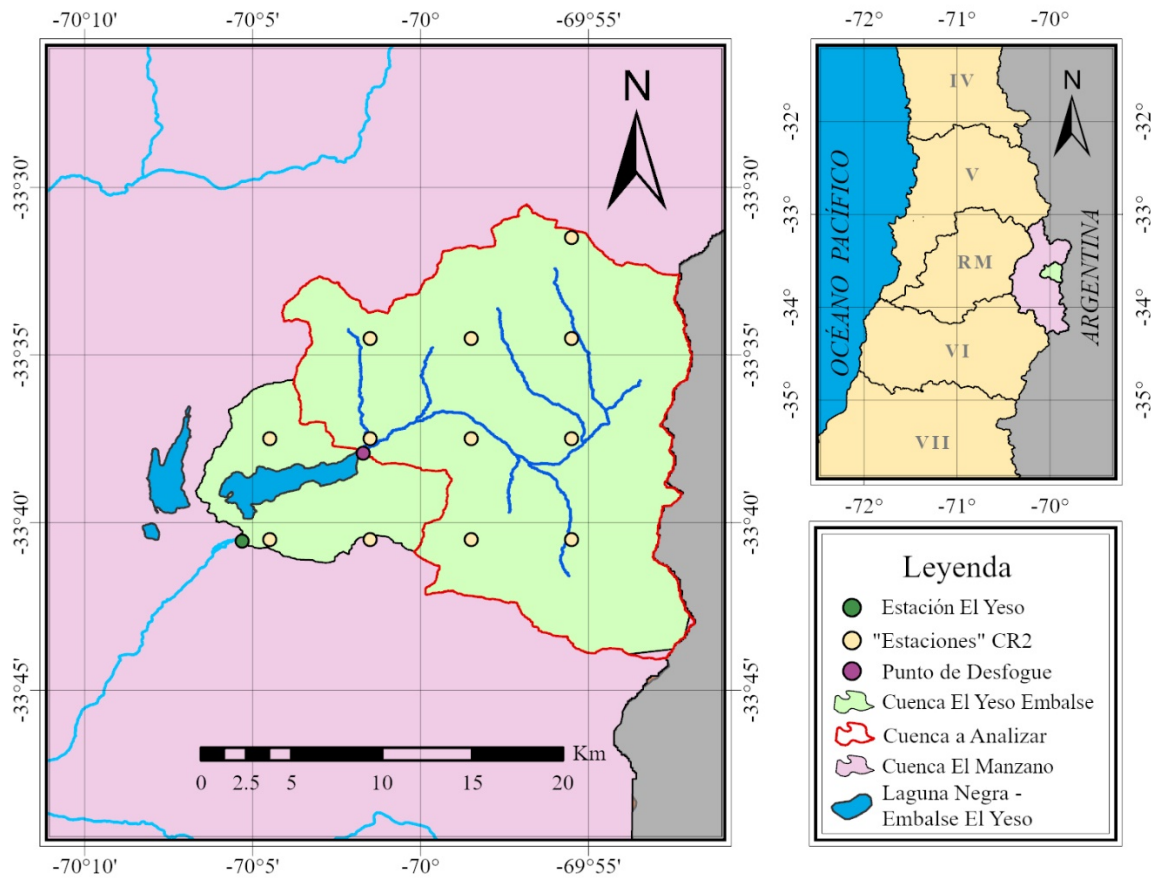


Figura N° 15.- Representación de las estaciones utilizadas en el modelo SWAT para la cuenca El Yeso Embalse. Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

4.1.2 Ráster de elevación

Como dato de entrada fundamental, es necesaria la incorporación de un modelo digital de elevación (DEM). Un archivo de estas características consiste en una matriz de celdas, cuyos valores han sido calculados para representar las distintas alturas de la superficie terrestre.

En este caso, se utilizó un archivo DEM proveniente de la misión STRM, llevada a cabo en febrero del año 2000, con la finalidad de obtener los datos de elevación topográfica de la tierra, utilizando un sistema de radar especialmente modificado, montado sobre el transbordador espacial Endeavour.

La resolución de estos datos es entregada en dos formatos: con una resolución de un (1) arco segundo para el territorio estadounidense y de tres (3) arco segundo para el resto del territorio a nivel mundial, lo cual corresponde aproximadamente a un tamaño de celdas de 90 [m].

La resolución empleada en este tipo de archivos es suficiente, considerando el tamaño de la zona de estudio, facilitando a su vez los procesos de cálculos del programa debido a gran cantidad de información que se debe procesar.

A continuación, en la Figura N° 16 se presenta una imagen ilustrativa del relieve de la zona de estudio, a partir del archivo DEM STRM utilizado en el modelo.

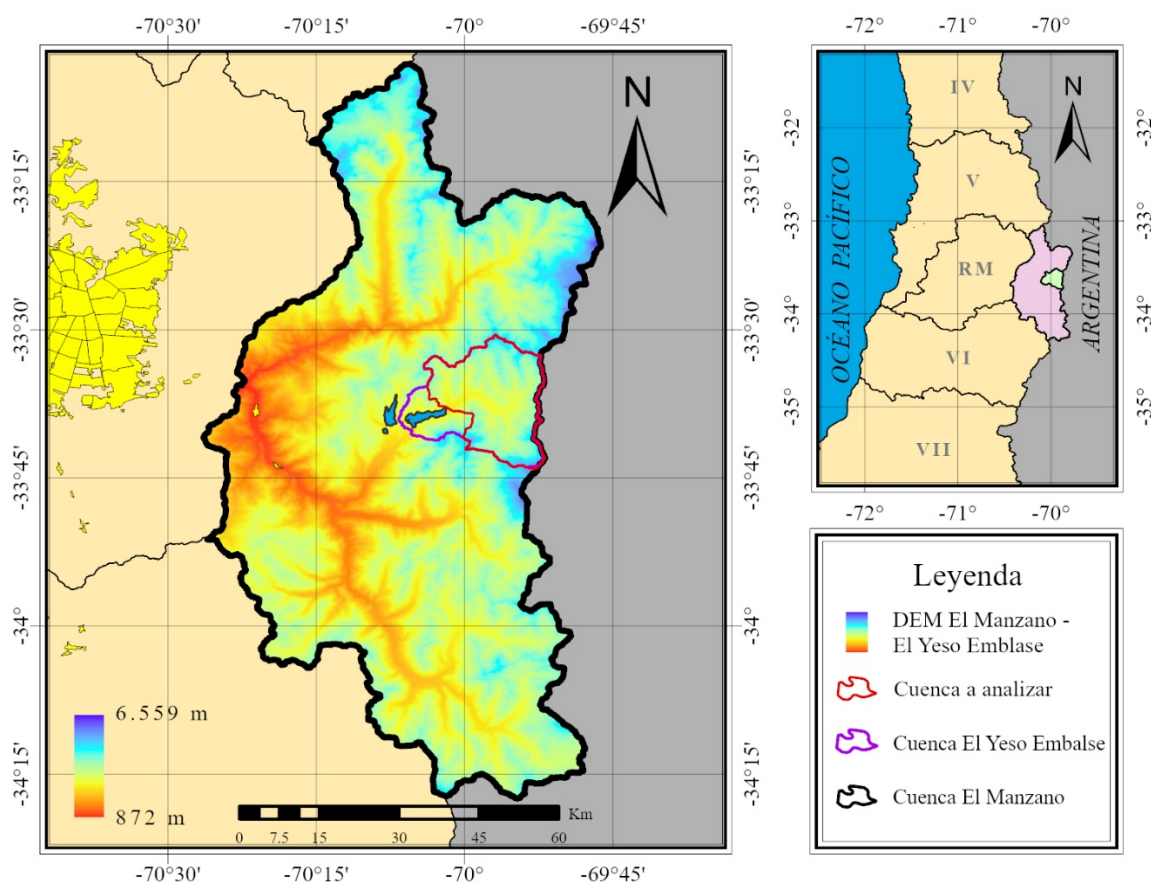


Figura N° 16.- Archivo digital de elevación STRM utilizado en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

4.1.3 Cobertura de Suelos

La cobertura de suelos hace referencia a las coberturas biológicas presentes sobre la superficie de la tierra, por ejemplo: la vegetación arbórea; o también de carácter físicas, que pueden ser: pavimentos o techumbres de viviendas, entre otros.

Para este caso en particular, existe información disponible en todo el territorio nacional, según el *Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014*, el cual se puede encontrar en la página del Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje (GEP). Este mapa fue desarrollado en conjunto por investigadores del laboratorio GEP (Universidad de Chile), UC Berkeley y del Centre for Earth System Science, Universidad de Tsinghua.

Los tipos de cobertura de suelos entregados se relacionaron con SWAT mediante la asignación de códigos que pueden ser interpretados por el programa. A continuación, en la Figura N° 17 se muestra una representación de los diferentes tipos de cobertura de suelos que existen en la zona de estudio.

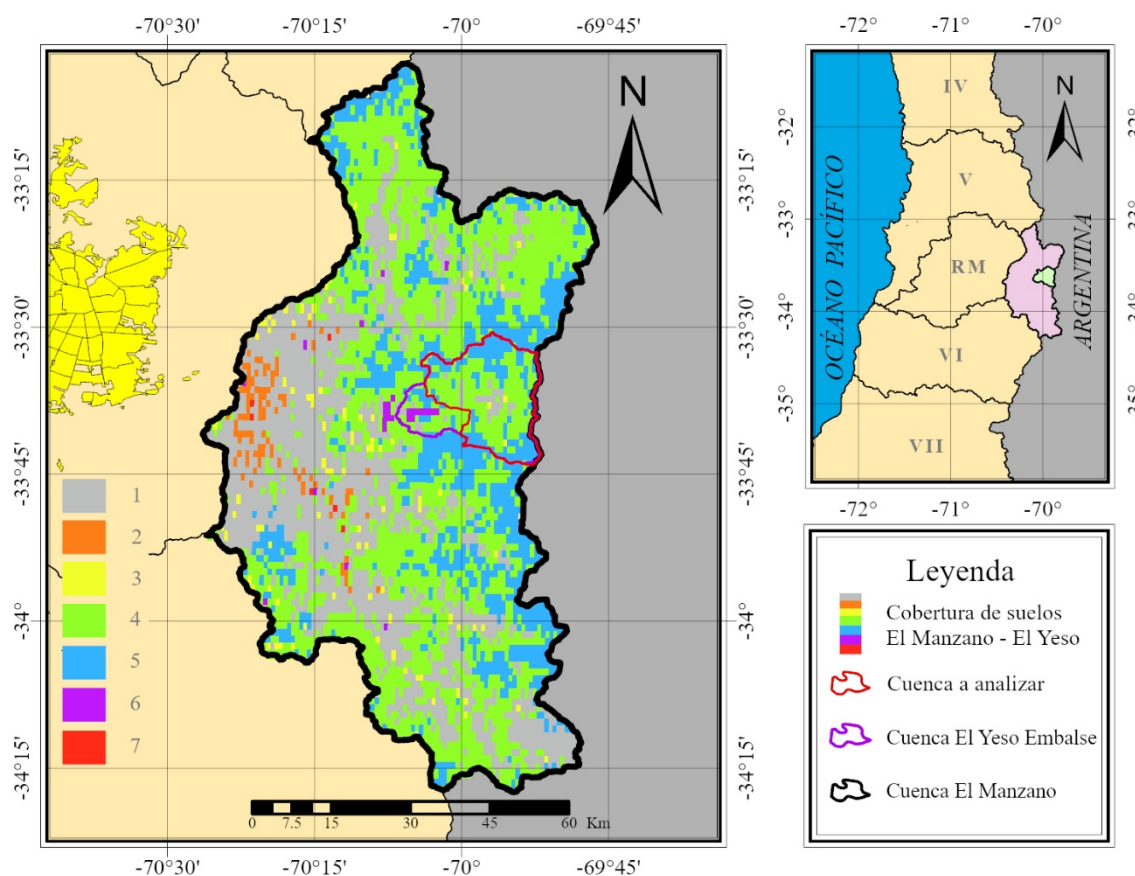


Figura N° 17.- Representación de la cobertura de suelos entregada por GEP para la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

Se pueden observar siete diferentes tipos de suelos, encontrándose la presencia de glaciares dentro de la zona. Estos últimos se clasificaron de igual forma que los ríos o cuerpos de agua al no existir una categoría específica para aquello. A continuación, se detallan en la Tabla N° 5 las clasificaciones asignadas a las coberturas de suelos.

Tabla N° 5.- Coberturas de suelo presentes en la zona de estudio, junto a su clasificación SWAT.

Número	Descripción mapa de cobertura de suelos 2014	Clasificación SWAT asignada	% de ocupación
1	Estepa andina central (praderas y matorrales)	RNGB	35.1%
2	Bosque nativo	FRST	4.6%
3	Vegas y humedales	WETL	1.8%
4	Árido	SWRN	41.2%
5	Glaciares	WATR	16.7%
6	Ríos (cuerpos de agua)	WATR	0.5%
7	Uso agrícola	AGRL	0.1%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 6.- Descripción de códigos que utiliza el software SWAT para la cobertura de suelos.

Nombre	Código SWAT	Tipo de planta
Césped de las praderas, matorrales arbóreos o áridos	RNGB	Perenne
Bosque mixto	FRST	Árboles
Humedales	WETL	Perenne
Suelos arenosos, gravas, rocosos	SWRN	Perenne
Lagos, reservorios, ríos, nieves	WATR	-
Terreno agrícola genérico	AGRL	Anual de temporada cálida

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Tipo de Suelos

Los tipos de suelos entregados al modelo corresponden a los suelos de la FAO/UNESCO, disponibles a través de su plataforma, de forma gratuita a nivel mundial. Este proyecto surge de la necesidad de conocer los suelos a nivel mundial, el cual se llevó a cabo mediante un acuerdo realizado entre la FAO y la UNESCO en 1961, basándose en la compilación del material disponible de reconocimiento de suelos y una correlación complementaria sobre el terreno (FAO-UNESCO, 1971).

A su vez, este mapa contiene los parámetros de suelo utilizados por el modelo SWAT según el tipo de suelo que corresponda al modelo, relacionándose mediante códigos que pueden ser interpretados por la base de datos que contiene el programa, por lo cual su uso resulta conveniente para su ejecución. A continuación, en la Figura N° 18 se presentan los suelos que se ven involucrados en la zona de estudio, la cual corresponde a la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano.

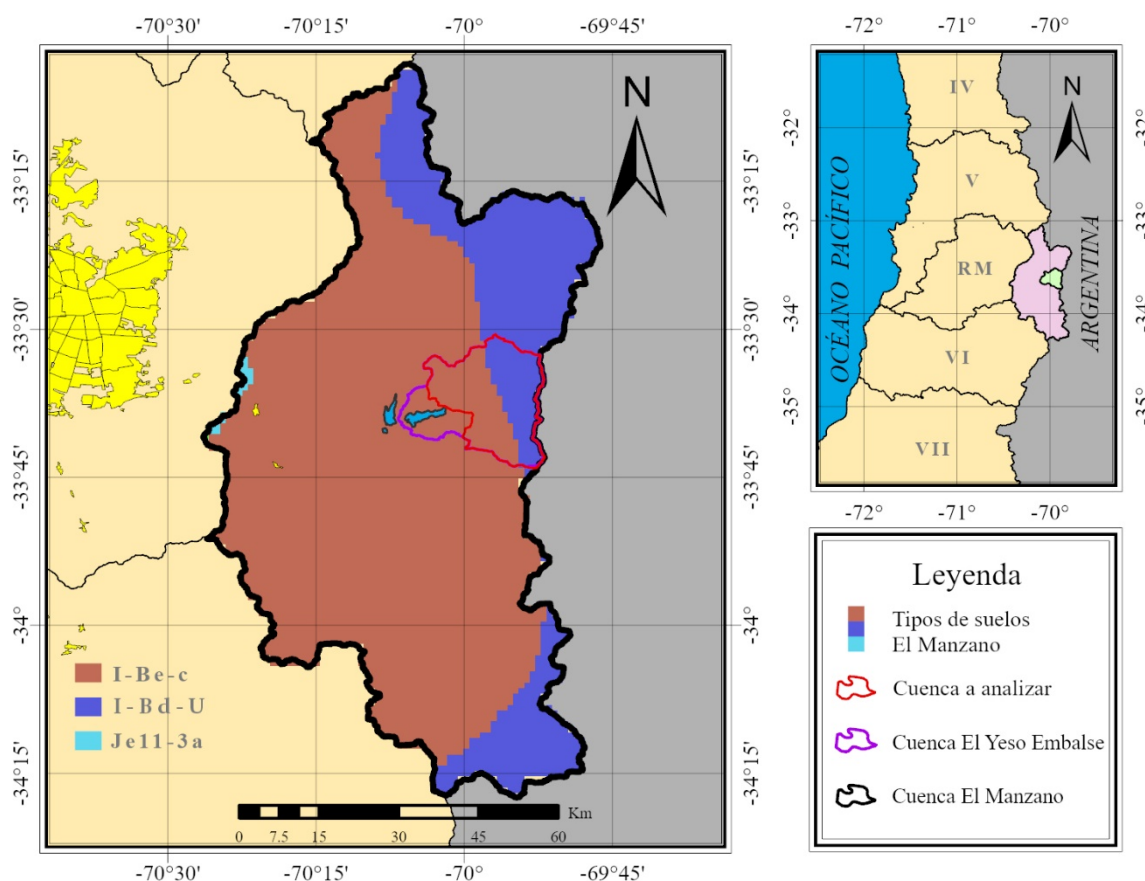


Figura N° 18.- Representación de los tipos de suelos utilizados en la zona de estudio, en base al mapa de suelos mundial FAO/UNESCO. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los suelos utilizados, se distinguen tres tipos principalmente, de los cuales son ampliamente predominantes dos tipos de suelos, de acuerdo con la clasificación realizada por la FAO/UNESCO dentro de la zona de estudio. A continuación, en la Tabla N° 7 se presentan los suelos existentes en la zona de estudio:

Tabla N° 7.- Tipos de suelos según la FAO/UNESCO presentes en la zona de estudio.

Clasificación	% cobertura	Numeración SWAT	Vegetación	Litología
I-Be-c	76.3	5516	Bosques de <i>Nothofagus</i> tropófitos de zona templada en el sur y de monte xerofítico a estepa montana en el norte.	Rocas intrusivas metamórficas paleozoicas y tobas y lavas terciarias y cuaternarias.
I-Bd-U	23.3	5763	De estepa montana a bosque templado montano en el sur.	Rocas clásticas y volcánicas intrusivas mesozoicas y terciarias.
Je11-3a	0.4	5772	Tierras agrícolas, bosque perenne esclerófilo.	Aluvión, con mucho material volcánico.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Criterios para la conformación de HRU's

La creación de Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU) se realiza mediante la consideración de tres parámetros: El uso de suelo, el tipo de suelo y la pendiente del terreno, con lo cual se conforman áreas de terreno que comparten características hídricas.

Tanto para la cuenca El Yeso Embalse como para Río Maipo en El Manzano, la cobertura de suelos utilizados vienen dados por la Tabla N°5 y los usos de suelo por la Tabla N°7. Los rangos de pendientes se clasificaron en 5: 0 – 12 %, 12 – 25 %, 25 – 50 %, 50 – 75 % y 75 – 9999%, con lo cual, unificando estos tres criterios el software SWAT construye los HRU's que serán utilizados en la modelación de cada una de las cuencas.

4.3 Datos para validación del modelo

Junto con los datos señalados anteriormente, es necesario contar con datos reales para poder contrastar los resultados entregados por el modelo. Estos datos se encuentran disponibles a través de las estaciones disponibles en la DGA, como lo es en el caso de los sedimentos y, por otro lado, fue necesario del procesamiento de datos a partir de archivos disponibles en diferentes plataformas, como lo es el caso de la cobertura nival. En tanto que los datos de caudales para El Yeso Embalse fueron obtenidos a través de un balance hidrológico según la operación del embalse. A continuación, se describen los datos usados para la validación del modelo.

4.3.1 Caudales inferidos Embalse El Yeso

Debido a la falta de datos medidos en terreno en el Embalse El Yeso, surge como alternativa la utilización de las mediciones que se tienen respecto de la operación del embalse, los cuales fueron facilitados para los propósitos de esta memoria.

Estos datos se encuentran disponibles desde el año 1996 hasta el año 2020. Dentro del conjunto de datos, existe un periodo de tiempo comprendido entre los años 2011 y 2012 en el cual la información proporcionada no es clara, constatándose la presencia de caudales negativos en algunos periodos, lo cual no tendría sentido físico, siendo descartado para las calibraciones y/o validaciones del modelo.

Estos datos de caudales inferidos serán utilizados como datos de caudales observados para realizar la calibración del modelo SWAT. En la Figura N° 19, se presenta el gráfico de los caudales observados a utilizar.

El método para obtener los caudales inferidos en el embalse se basa en un balance hidrológico que se puede describir en términos prácticos de la siguiente manera:

$$\text{Entrada Embalse} = \text{Salidas} + \text{Variación diaria} \quad (6)$$

Donde:

$$\text{Salidas} = \text{Evaporación} + \text{Descarga válvula} + \text{Descarga aliviadero} + \text{Filtraciones} \quad (7)$$

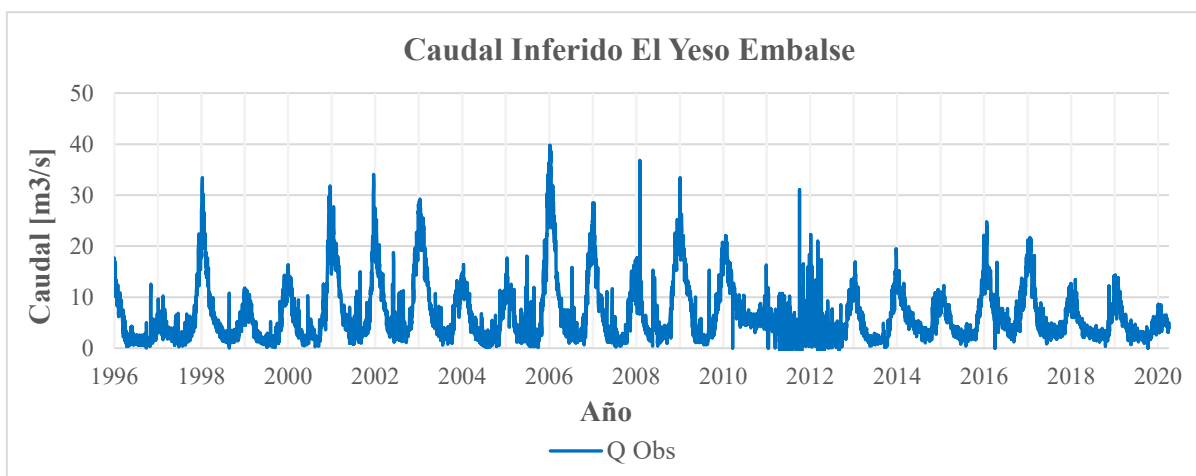


Figura N° 19.- Caudales inferidos mediante balance hídrico sobre el embalse El Yeso, proporcionados por Aguas Andinas. Fuente: Elaboración propia.

Para este caso, la evaporación y las filtraciones corresponden a valores estimados según los datos históricos recopilados en terreno, mientras que la descarga de válvula y aliviadero son datos conocidos según las operaciones del embalse, obteniéndose como resultado el volumen entrante de agua al embalse, el cual se traduce posteriormente en un caudal de entrada diario.

4.3.2 Sedimentos observados Río Maipo en El Manzano

Los sedimentos utilizados para la validación del modelo SWAT en cuanto al arrastre de sedimentos, corresponden a los entregados por la estación Río Maipo en El Manzano. Estos datos se encuentran disponibles desde el año 1968 hasta el 2018, con periodos de tiempo intermitentes dentro de los cuales no se registran observaciones. El periodo de estudio seleccionado permite su análisis en la calibración de sedimentos para dicha cuenca.

4.3.3 Cobertura nival MODIS

La cobertura nival que se puede obtener a través de la plataforma MODIS, sirve como una alternativa ante la ausencia de datos de cobertura nival medidos en estaciones de monitoreo. Estos datos pueden ser aprovechados para realizar comparaciones entre los modelos desarrollados en SWAT en cuanto a la cobertura nival entregada por el programa, los cuales pueden ser utilizados en la validación del modelo en términos de la simulación de la cobertura del manto nival.

Para la obtención de los porcentajes de cobertura, se utilizó el software R con el fin de poder leer los datos entregados en la plataforma MODIS. El procedimiento consiste básicamente en contar los píxeles de la zona de estudio que han sido identificados con algún tipo de cobertura nival, para luego hacer una contabilización general y establecer el grado de cobertura para un día o conjunto de días en particular. Este procedimiento se realiza durante el periodo en el que están disponibles los datos, es decir, desde febrero del año 2000 hasta marzo del año 2020, con lo cual se puede crear una serie de tiempo de coberturas nivales para la zona en cuestión.

Como se señaló en el apartado 2.1.2, existen datos disponibles a escala diaria y en su forma compuesta, donde se entrega un mapa con valores de cobertura en base a la observación de 8 días, siendo esta última la utilizada para obtener la serie temporal de cobertura nival, debido a que existe un trabajo previo que facilita el trabajo con dichos datos, puesto que contiene las mejores observaciones dentro del periodo señalado.

Al tomar como límites la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano, se puede acotar la zona para realizar un recuento de las zonas con y sin nieve, lo cual puede ser traducido finalmente a un porcentaje de cobertura nival, para un día en particular.

A continuación, en la Figura N° 20 se puede observar la serie de tiempo obtenida luego de procesar los valores de cobertura nival por píxel en la zona de estudio durante el periodo disponible de datos.

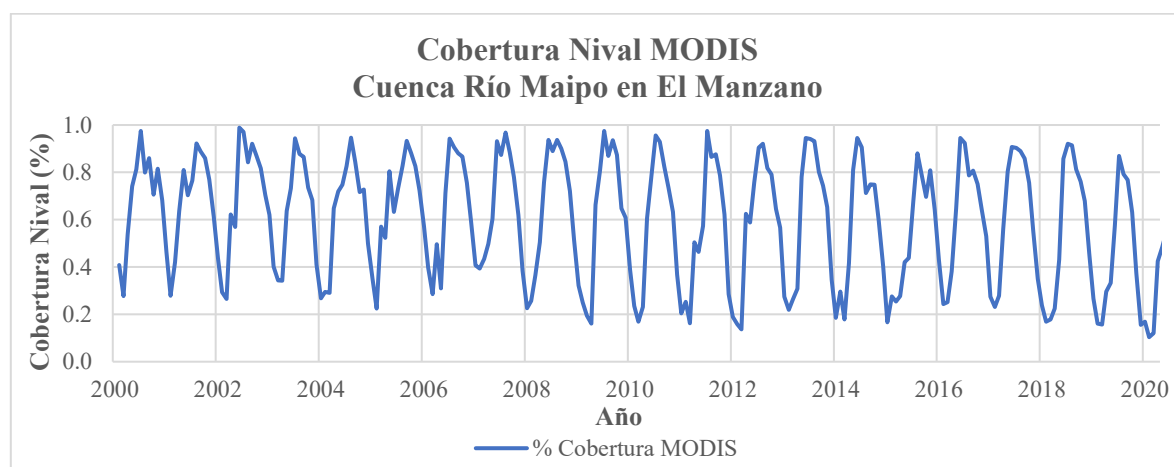


Figura N° 20.- Serie de tiempo obtenida a partir de la interpretación de cobertura nival entregada por plataforma MODIS. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Representación del modelo

Después de obtener y preparar todos los datos necesarios para el modelo, se procede a la incorporación de cada uno de ellos al modelo SWAT. El objetivo es crear un modelo que represente lo más cercanamente posible las condiciones del entorno en el que se trabajará. Cada capa del modelo aporta información valiosa para poder desarrollar en última instancia el cálculo del ciclo hidrológico. A continuación, en la Figura N° 21 se presenta una simplificación del modelo y las capas utilizadas, mediante las cuales se estructura el modelo:

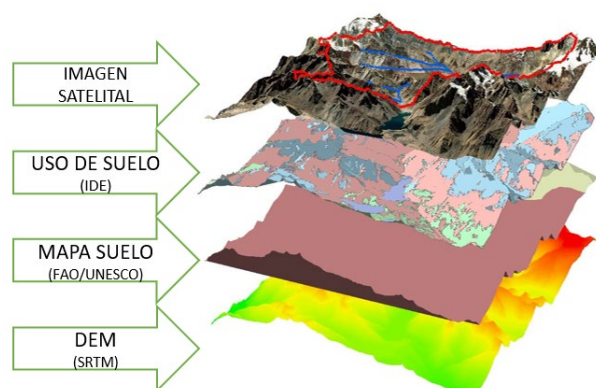


Figura N° 21.- Representación de la información requerida por el modelo SWAT. Las capas Uso de Suelo, Mapa de Suelo y DEM conforman la base para simular los procesos que ocurren en la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el número total de subcuencas creadas en la cuenca Río Maipo en El Manzano asciende a un total de 27 subcuencas; mientras que para la cuenca El Yeso Embalse, el número de subcuencas es de 16, tal como se muestran a continuación, en la Figura N° 22:

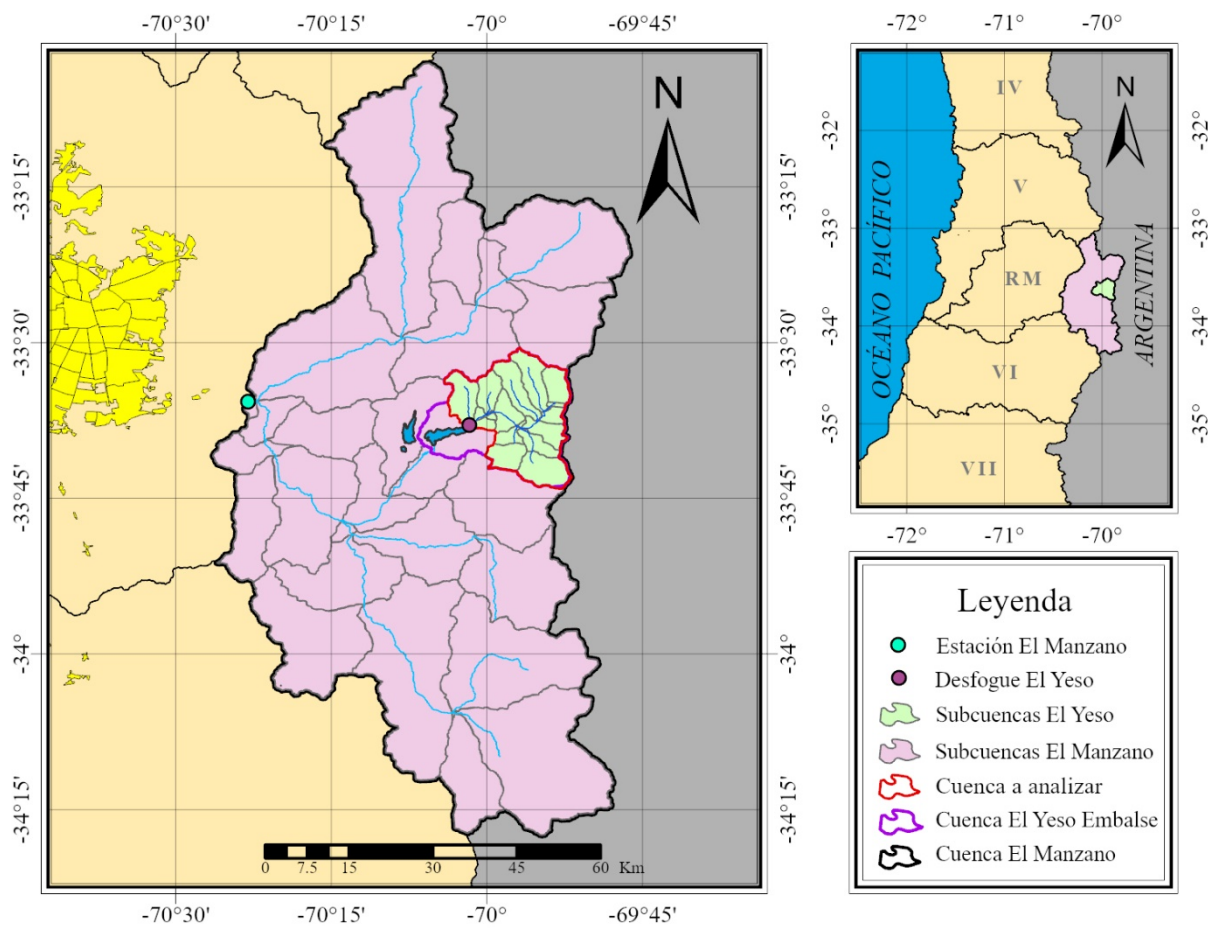


Figura N° 22.- Representación de las subcuencas Río Maipo en El Manzano y El Yeso Embalse utilizadas en el modelo.
Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS Pro.

Capítulo 5: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica construida en base a los archivos y criterios señalados en los capítulos anteriores, también se presentan los resultados obtenidos para la cobertura nival obtenida del procesamiento de las imágenes satelitales MODIS y la entrega por el software SWAT.

5.1 Resultados modelación Cuenca Río Maipo en El Manzano

Tal como se señaló anteriormente, el propósito de construir un modelo para esta cuenca es tener una base de parámetros sedimentométricos para ser extrapolados, que sirvan como una aproximación a la modelación de sedimentos en la cuenca delimitada aguas arriba del Embalse El Yeso.

5.1.1 Caudales

Los resultados obtenidos en cuanto a caudales en la estación Río Maipo en El Manzano, se presentan a continuación en la Figura N° 23 junto con los indicadores de eficiencia en la Tabla N° 8.

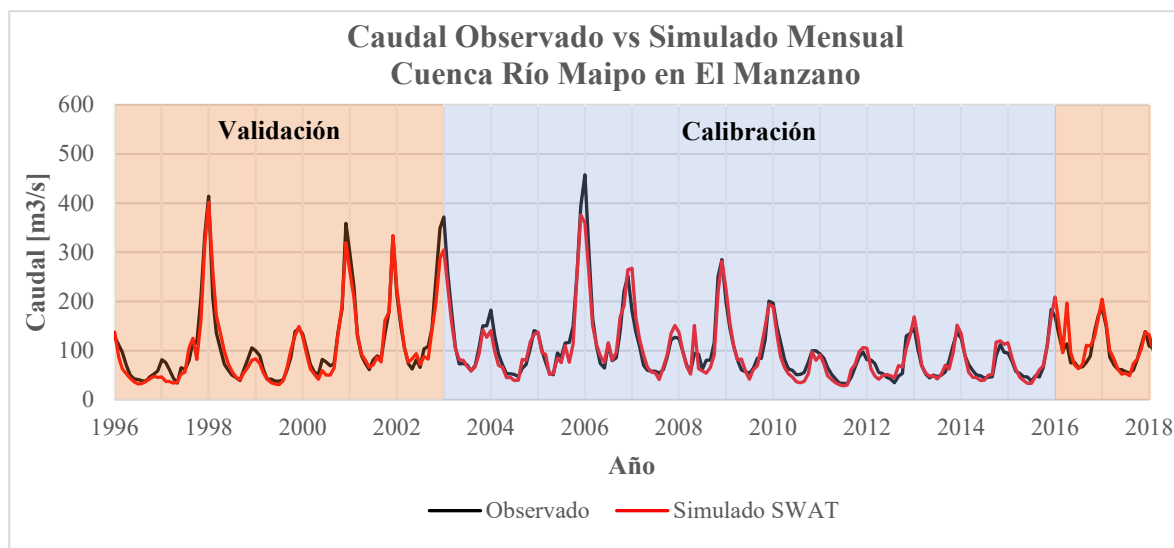


Figura N° 23.- Gráfico de caudal observado versus simulado en la estación Río Maipo en El Manzano. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 8.- Indicadores de eficiencia para el modelo realizado en la estación Río Maipo en El Manzano en cuanto a caudales, para los periodos de calibración y validación a escala mensual.

Indicador de eficiencia:	NSE	KGE
Calibración	0.914	0.917
Validación	0.924	0.953

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados se obtuvieron para un modelo realizado a escala mensual, bajo las condiciones descritas en los apartados anteriores. Según la sección 2.5.1, los indicadores de eficiencia obtenidos tanto para la calibración como para la validación se pueden clasificar como “Muy Buenos”.

A su vez, mediante una iteración manual se estableció un volumen base mensual de 1.8 [Mm³/mes], que deriva en un caudal base diario de 0.7 [m³/s] el cual mejoró el ajuste previo.

5.1.2 Sedimentos

Al igual que el caso anterior, en la Figura N° 24 se presenta el ajuste del flujo de sedimentos modelado, junto con sus indicadores de eficiencia en la Tabla N° 9.

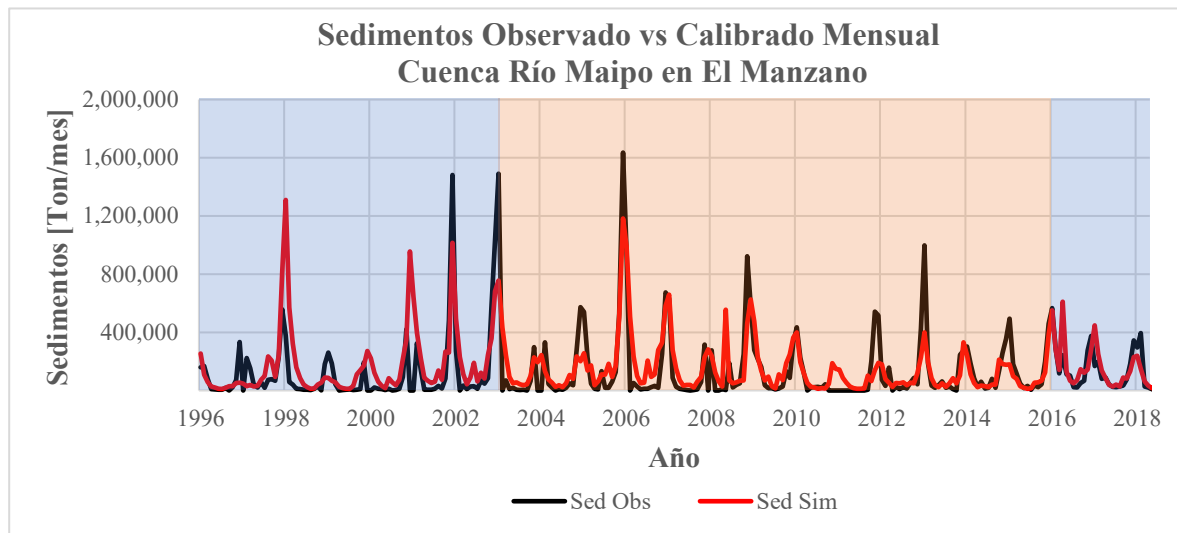


Figura N° 24.- Gráfico de sedimentos observado versus simulado en la estación Río Maipo en El Manzano. El achurado naranjo representa el periodo utilizado en la calibración y el sector azul, utilizado en la validación del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 9.- Indicadores de eficiencia para el modelo realizado en la estación Río Maipo en El Manzano en cuanto a sedimentos, para los periodos de calibración y validación a escala mensual.

Indicador de eficiencia:	NSE	KGE
Calibración	0.682	0.648
Validación	0.445	0.636

Fuente: Elaboración propia.

Según la sección 2.5.1, los indicadores de eficiencia obtenidos tanto para la calibración como para la validación oscilan entre “Aceptables e Insatisfactorios”.

5.2 Resultados modelación Cuenca El Yeso Embalse

Con la realización de un modelo del cual se pueden obtener datos acerca de los parámetros sedimentométricos, se continúa con la elaboración del modelo referente al Embalse El Yeso, primero con la calibración y validación de caudales y finalmente, creando una serie temporal de sedimentos con los parámetros obtenidos de la cuenca Río Maipo en El Manzano.

5.2.1 Caudales

Los resultados de calibración y validación de caudales obtenidos aguas arriba del Embalse El Yeso se presentan a continuación, en la Figura N° 25 junto con los indicadores de eficiencia a escala mensual en la Tabla N° 10.

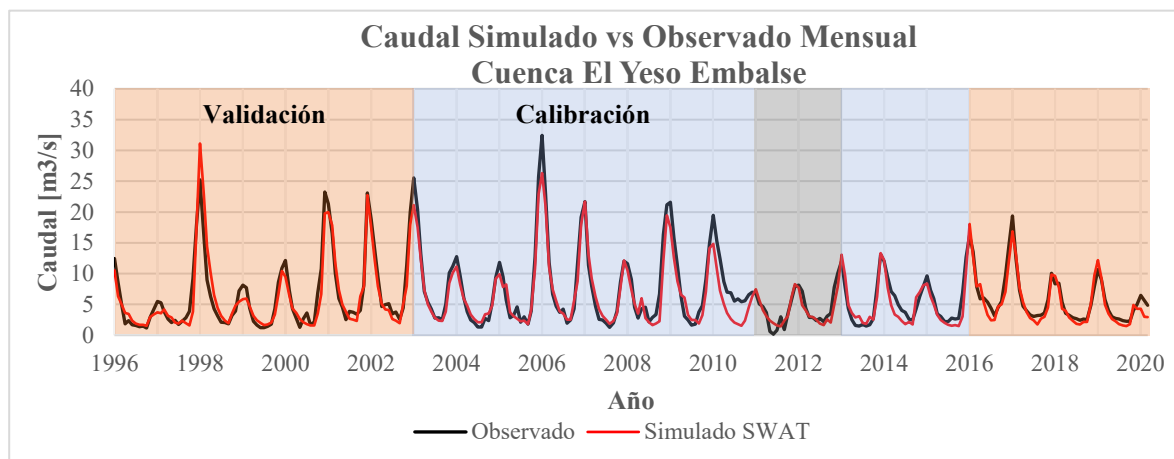


Figura N° 25.- Gráfico de caudal observado versus simulado El Yeso Embalse a escala mensual. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 10.- Indicadores de eficiencia para el modelo realizado en El Yeso Embalse en cuando a caudales, para los periodos de calibración y validación a escala mensual.

Indicador de eficiencia:	NSE	KGE
Calibración	0.893	0.824
Validación	0.891	0.924

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que el modelo realizado para la cuenca Río Maipo en El Manzano, estos resultados son calculados en base a la elaboración de un modelo a escala mensual.

Según la sección 2.5.1, los indicadores de eficiencia obtenidos tanto para la calibración como para la validación se pueden clasificar dentro del rango “Bueno” a “Muy Bueno”.

A su vez, mediante una iteración manual se estableció un volumen base mensual de 0.1 [Mm³/mes], que deriva en un caudal base diario de 0.04 [m³/s] el cual mejoró el ajuste previo.

5.2.2 Sedimentos

Con los resultados obtenidos de la calibración de los sedimentos de la cuenca Río Maipo en El Manzano, y los caudales de la cuenca El Yeso Embalse, se extrapolan los parámetros y se construye la serie de tiempo referente a los sedimentos afluentes al Embalse, los cuales se presentan a continuación, en la Figura N° 26.

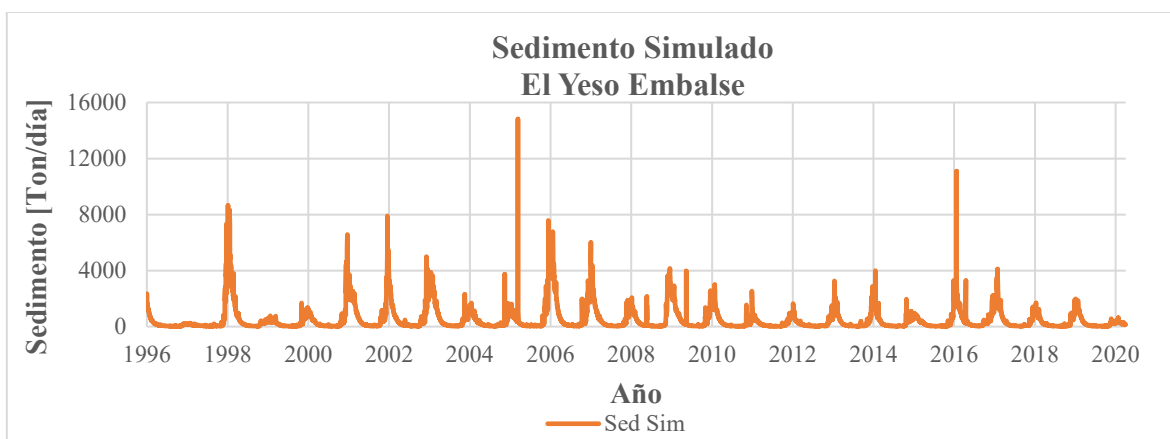


Figura N° 26.- Representación de la serie de tiempo construida en base a los parámetros de sedimentos obtenidos desde la cuenca Río Maipo en El Manzano, antes y después de la extrapolación de parámetros sedimentométricos. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Relación de sedimentos en cuencas vecinas

Con la finalidad de poder comparar los órdenes de magnitud obtenidos en la simulación de sedimentos en El Yeso Embalse, se lleva a cabo una recopilación de datos sedimentométricos en cuencas aledañas. La comparación se realiza normalizando los sedimentos por los caudales asociados a sus respectivas estaciones. A continuación, en la Figura N° 27 se muestran una comparación con los sedimentos disponibles por estación:

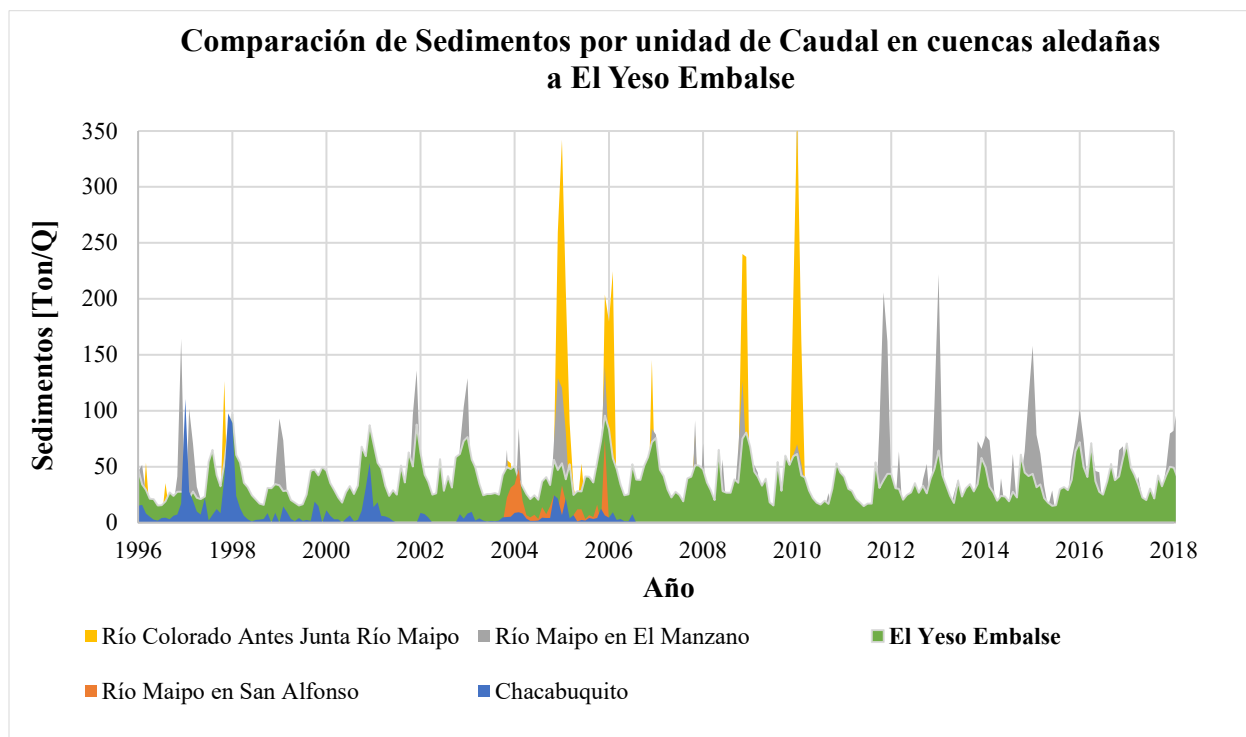


Figura N° 27.- Comparación de sedimentos por unidad de caudal en cuencas aledañas a El Yeso Embalse. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 11.- Superficie de las cuencas utilizadas en la comparación de sedimentos.

Estación	Superficie (km ²)
Río Colorado Antes Junta Río Maipo	1663
Río Maipo en San Alfonso	2787
Río Maipo en El Manzano	4839
Chacabuquito	2113
El Yeso Embalse	289

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1 Comparación de la cobertura nival

La cobertura nival en SWAT es entregada como una altura equivalente de agua almacenada, la cual aumentará o disminuirá según existan nevadas y derretimiento o sublimación, respectivamente. Este valor se calcula para cada banda de elevación y se reporta mediante el parámetro SNO para cada subcuenca del modelo. Para obtener la cobertura nival, se emplea la Ecuación N° (3), obteniéndose los resultados indicados a continuación, en la Figura N° 28.

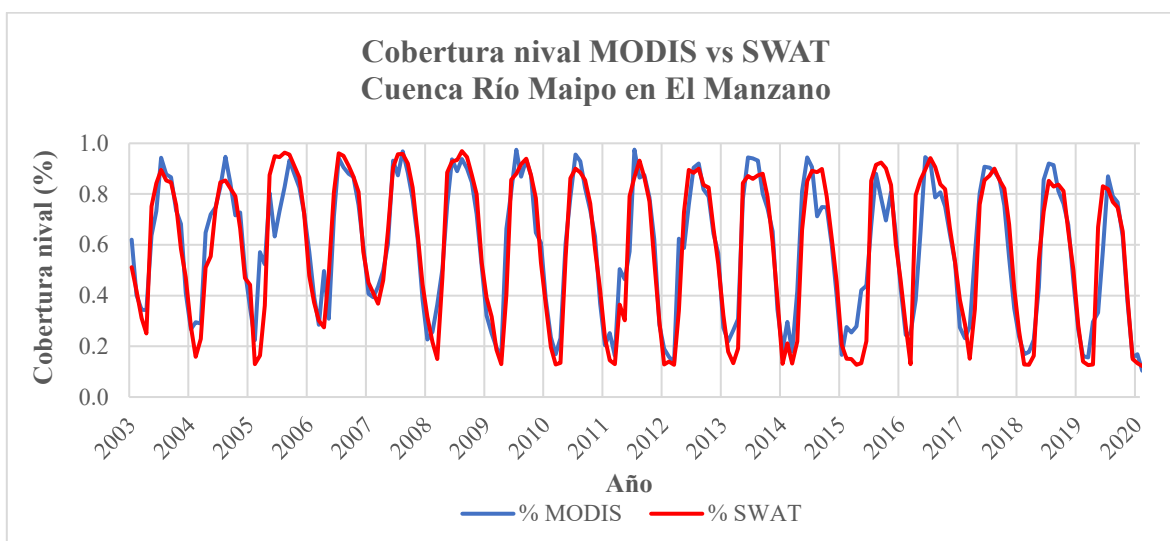


Figura N° 28.- Comparación de la Cobertura nival SWAT y MODIS, cuenca Río Maipo en El Manzano. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 12.- Indicadores de eficiencia para la cobertura nival obtenida en SWAT y MODIS.

Indicador de eficiencia:	NSE	KGE
Calibración 2003-2015	0.835	0.841
Validación 2016-2020	0.830	0.898

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6: DISCUSIÓN

6.1 Modelo SWAT

La cantidad de inputs necesarias para poder utilizar el software SWAT no es demasiada y depende en gran medida del país donde se realice el modelo. Los datos de entrada suelen ser de carácter público, provistos por alguna entidad del Estado, y en el caso de Chile, se encuentran disponibles de libre acceso, ya sea información del tipo de suelo o información meteorológica. En el caso del archivo digital de elevación (DEM), existen diferentes organismos que cuentan con esta información a nivel global, en distintas resoluciones. Respecto de los datos referentes al tipo de suelo, existe información a nivel mundial, de libre acceso y compatible con los códigos utilizados en SWAT. Si bien no cuenta con gran resolución, es de utilidad para lograr correr el modelo.

Este programa representa una herramienta útil para la creación de modelos hidrológicos a gran escala que puede ser utilizada en los entornos de *QGIS* o *ArcGIS* mediante sus respectivas extensiones (*QSWAT* y *ArcSWAT*). Sin embargo, la interfaz para calibrar los modelos no está automatizada dentro del software, por lo que se debe utilizar el software *SWAT-cup* en los procesos de calibración de los parámetros del modelo. Este software realiza la labor de iterar los parámetros seleccionados por el usuario dentro de los rangos seleccionados.

6.2 Uso de datos DGA y CR2

Dentro de la creación del modelo, se utilizaron las precipitaciones y temperaturas provenientes desde las estaciones disponibles de la DGA y de los datos grillados entregados por CR2. Es posible lograr correr el modelo con ambas fuentes de datos, sin embargo, la principal diferencia se hace evidente a la hora de realizar la calibración del modelo, existiendo un gran contraste tanto en la velocidad como en la calidad de estas. Los datos disponibles desde la DGA se encuentran distribuidos sobre un área considerablemente menor, por lo cual se necesitaron muchas más iteraciones para lograr calibrar el modelo, mientras que los datos grillados CR2, al estar distribuidos sobre un área mayor, contribuyen de forma positiva en la disminución de la cantidad de iteraciones y en la mejora de las calibraciones, optándose finalmente esta fuente de datos para el modelo, tanto en precipitaciones como en temperatura.

6.3 Calibración y Validación de los modelos

Dentro del periodo de calibración del modelo hidrológico desarrollado en la cuenca Río Maipo en El Manzano, existe la presencia de caudales que son subestimados por el modelo, en especial dentro de los primeros años de calibración, correspondientes a los años “húmedos” del periodo; mientras que, para los años correspondientes al tramo final de calibración, existe una tendencia a la sobreestimación de los caudales, correspondientes a los años “secos” del periodo. En términos generales, para la validación se observa un ajuste “Bueno”, tanto para años húmedos, como secos.

Para el caso de la calibración y validación de caudales en las cuencas Río Maipo en El Manzano y El Yeso Embalse, se lograron indicadores de eficiencia “Buenos”, tanto en el NSE como en el KGE. En el caso de la calibración y validación de sedimentos en la cuenca Río Maipo en El Manzano, se observaron indicadores de eficiencia menores, considerándose “Aceptables” para el modelo. Se estima que esto se produce en gran medida por el hecho de la realización de una calibración manual en cuanto a los parámetros de sedimentos, introduciendo un mayor grado de error.

6.4 Aporte Glaciar

Una de las limitaciones observadas en la realización del modelo hidrológico en SWAT es que no se permite la incorporación de glaciares para ser considerados dentro del ciclo hidrológico de la cuenca. De las estadísticas de glaciares obtenidas en el año 2002 se puede observar que estos alcanzan un 7.6% y 16.7% de la cobertura total en las cuencas Río Maipo en El Manzano y El Yeso Embalse respectivamente. Durante la etapa de calibración, se incorporaron caudales bases en ambas cuencas, atribuidos al aporte debido al derretimiento de los glaciares en la zona y que terminan finalmente contribuyendo a la escorrentía superficial, no siendo cuantificados en el modelo. Su incorporación demostró ser positiva para los indicadores de eficiencia, los cuales se vieron incrementados en ambos casos, tanto para la calibración como para la validación.

6.5 Cobertura nival SWAT

La comparación de la cobertura nival simulada por el software SWAT con los datos extraídos desde la plataforma MODIS, puede ser ajustada mediante una adecuada selección del parámetro *SNO100* el cual hace referencia a la altura de nieve límite sobre la cual existe un 100% de cobertura. Este parámetro es quien controla el porcentaje de cobertura nival sobre cada HRU del modelo.

Los resultados obtenidos indican un buen ajuste para el *SNO100* obtenido en el proceso de calibración de caudales. Cabe señalar que las zonas que poseen glaciares en el modelo fueron clasificadas como cuerpos de agua ante la carencia en el modelo para su incorporación. Esto significa que en estas zonas el programa no considera acumulación de nieve y, por lo tanto, no contribuyen a la cobertura nival de la cuenca. Bajo estos términos, la incorporación de los glaciares al modelo conduciría a valor más bajos del parámetro *SNO100*.

6.6 Comparación de Sedimentos obtenidos en El Yeso Embalse

Los resultados planteados respecto del flujo de sedimentos por unidad de caudal en la cuenca El Yeso Embalse indica coherencia entre los flujos obtenidos en cuencas contiguas. Si bien la cantidad de datos disponibles en otras estaciones es reducida, se logran contrastar los peaks respecto de la cuenca Río Maipo en El Manzano. Es de esperar que los flujos de sedimentos sean mayores en esta cuenca, debido a su gran tamaño, en comparación a la cuenca en estudio.

Otro punto que señalar es el hecho de que los sedimentos simulados en El Yeso Embalse están siendo retenidos en el propio embalse, por lo tanto, hay parte del flujo de sedimentos generados en alta montaña que no se transporta aguas abajo y que no se ve reflejado por la estación Río Maipo en El Manzano.

En líneas generales, a la cuenca El Yeso Embalse confluyen un promedio diario de 489 [Ton/día]. Si la capacidad del embalse es de 220 [Mm³] y considerando que se encuentra en funcionamiento desde 1964, el volumen actual ocupado por sedimentos asciende a un 1.7 % de la capacidad total del embalse, para una densidad de sedimentos de 2.65 [Ton/m³]

Capítulo 7: CONCLUSIONES

En esta memoria se estimó un flujo de sedimentos afluente al embalse El Yeso de forma aproximada, mediante la calibración y validación de un modelo hidrológico realizado en el software SWAT.

Se logró calibrar el modelo hidrológico referente a la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en El Manzano, tanto para la escorrentía superficial como para los sedimentos, obteniéndose indicadores de eficiencia NSE y KGE clasificados como “Buenos” para la escorrentía superficial y “Aceptables” para el caso de los sedimentos. De igual forma, se calibró la escorrentía superficial referente a la cuenca delimitada por la estación El Yeso Embalse, obteniéndose indicadores de eficiencia clasificados como “Muy Buenos”. Los parámetros de sedimentos obtenidos desde la cuenca Río Maipo en El Manzano se extrapolaron a la cuenca delimitada por un punto aguas arriba del Embalse El Yeso, generándose una serie temporal de sedimentos.

El efecto en la variación de los parámetros que controlan el modelo hidrológico depende de la variable seleccionada, siendo los principales controladores los parámetros referentes al derretimiento nival, por ejemplo, la temperatura media del aire en la cual la precipitación se comporta indistintamente como nieve o lluvia helada, factores que controlan el derretimiento de la nieve, así como también la tasa de cambio de la temperatura respecto de la altura. En el caso de los parámetros de escorrentía superficial, son preponderantes los parámetros relacionados a la condición de humedad del suelo y el retraso en la recarga de los acuíferos.

Se comparó la cobertura nival simulada por el modelo y la cobertura observada a través de las imágenes satelitales entregadas por la plataforma MODIS, obteniéndose indicadores de eficiencia clasificados como “Buenos” para el caso de la cuenca Río Maipo en El Manzano. En el caso del ajuste en la cobertura nival simulada, el parámetro que controla el modelo resultó ser la profundidad límite de nieve a la cual existe una cobertura del 100%.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbaspour, K., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Mieleitner, J., Zobrist, J. y Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 413-430. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.014
- Ahl, R., Woods, S. W. y Zuuring, H. R. (2008). Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated rocky mountain watershed, Montana, U.S.A. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(6), 1411-1430. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2008.00233.x.
- Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R. y Urquidi, J. (2006). *Glaciares Chilenos, Reservas Estratégicas de Agua Dulce para la Sociedad, los Ecosistemas y la Economía*. Santiago, Chile: LOM Ediciones.
- Bravo, C., & Garreaud, R. D. (2011). El Régimen Nival en Cuencas Andinas de Chile Central. Trabajo presentado en el 2do Congreso de Oceanografía y Meteorología, Santiago, Chile.
- Cade-Idepe. (2004). *Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Maipo*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.
- Cortés, G., Vargas, X. y McPhee, J. (2011). Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western. *Journal of Hydrology*, 405(1-2), 93-109. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.013
- Dionizis Rojo, D. (2018). *Análisis de las proyecciones de recursos hídricos aportantes a los sistemas Embalse El Yeso y Laguna Negra bajo el escenario de cambio climatico RCP8.5* (Tesis de Grado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- FAO-UNESCO. (1971). *FAO - UNESCO Mapa mundial de suelos 1: 5000000, Volumen IV América del Sur*. Unesco - París.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. y Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- IDEPE, C. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Choapa*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.
- Liu, Y., Cui, G. y Li, H. (2020). Optimization and Application of Snow Melting Modules in SWAT Model for the Alpine Regions of Northern China. *Water*, 12(3), 636. doi:10.3390/w12030636

- Nash, J. y Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. y Williams, J. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas: Texas Water Resources Institute.
- Ritter, A. y Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.004
- Serrano, R. (2014). *Proyecciones de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del Maipo, bajo escenarios recientes de cambio climático* (Tesis de Grado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Stther, A., Debels, P., Romero, F. y Alcayaga, H. (2008). Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), 588-601. doi:10.1623/hysj.53.3.588
- Uribe, F. A. (2015). *Comparación de la cobertura nival e hidrogramas simulados a distintas escalas temporales en la cuenca alta del Río Maipo, por distintas conceptualizaciones del proceso nival* (Tesis de Grado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Videla, Y. A. (2013). *Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Maipo mediante la aplicación del software CRHM 2008-2012* (Tesis de Grado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

ANEXOS

A. Coordenadas de “Estaciones” CR2 utilizadas

Tabla A 1.- Coordenadas utilizadas en la cuenca Río Maipo en El Manzano.

Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
Manzano196	-33.2	-70.1	3331
Manzano219	-33.3	-70.1	3476
Manzano344	-33.3	-69.8	4312
Manzano317	-33.4	-69.9	3863
Manzano215	-33.5	-70.1	1648
Manzano114	-33.6	-70.3	2304
Manzano263	-33.6	-70	2846
Manzano112	-33.7	-70.3	2060
Manzano211	-33.7	-70.1	2986
Manzano159	-33.8	-70.2	1527
Manzano284	-33.8	-69.9	5439
Manzano108	-33.9	-70.3	3058
Manzano155	-34	-70.2	3628
Manzano207	-33.9	-70.1	3892
Manzano280	-34	-69.9	3774
Manzano179	-34.1	-70.1	2939
Manzano301	-34.2	-69.9	2922

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 2.- Coordenadas utilizadas en la cuenca El Yeso Embalse.

Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
Yeso2	-33.675	-70.075	2899
Yeso3	-33.625	-70.075	2966
Yeso8	-33.625	-70.025	2573
Yeso9	-33.575	-70.025	3134
Yeso12	-33.675	-69.975	4166
Yeso13	-33.625	-69.975	3167
Yeso14	-33.575	-69.975	3874
Yeso16	-33.725	-69.925	4893
Yeso17	-33.675	-69.925	3237
Yeso18	-33.625	-69.925	3028
Yeso19	-33.575	-69.925	3707
Yeso20	-33.525	-69.925	4577
Yeso23	-33.625	-69.875	4086
Yeso24	-33.575	-69.875	4062

Fuente: Elaboración propia.

B. Comparación precipitaciones estaciones y CR2

Se presenta a continuación, una comparativa entre las estaciones presentes en la cuenca Río Maipo en El Manzano respecto de la información grillada presentada por el CR2. Las estaciones CR2 comparadas corresponden a los puntos más cercanos a las estaciones DGA existentes.

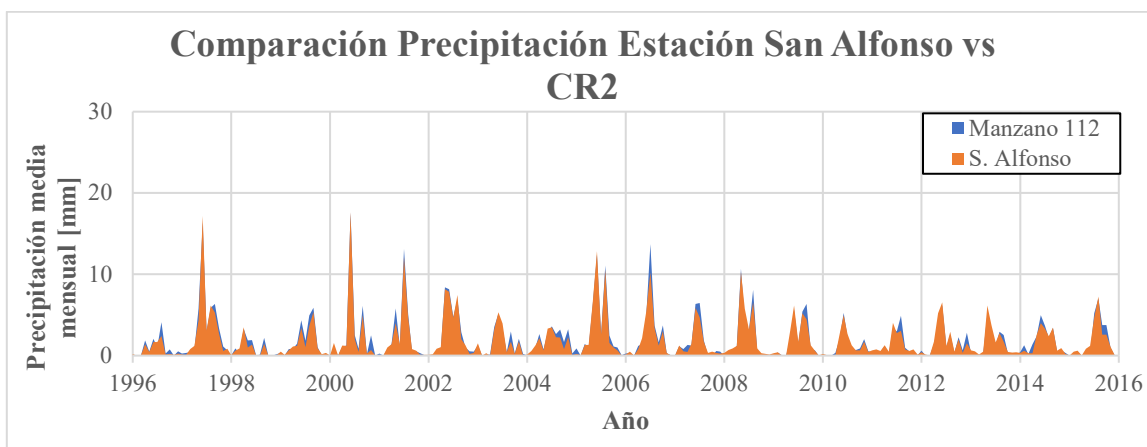


Figura B 1.- Comparación de las precipitaciones medias mensuales entre la estación Río Maipo en San Alfonso y punto grillado CR2 más cercano. Fuente: Elaboración propia.

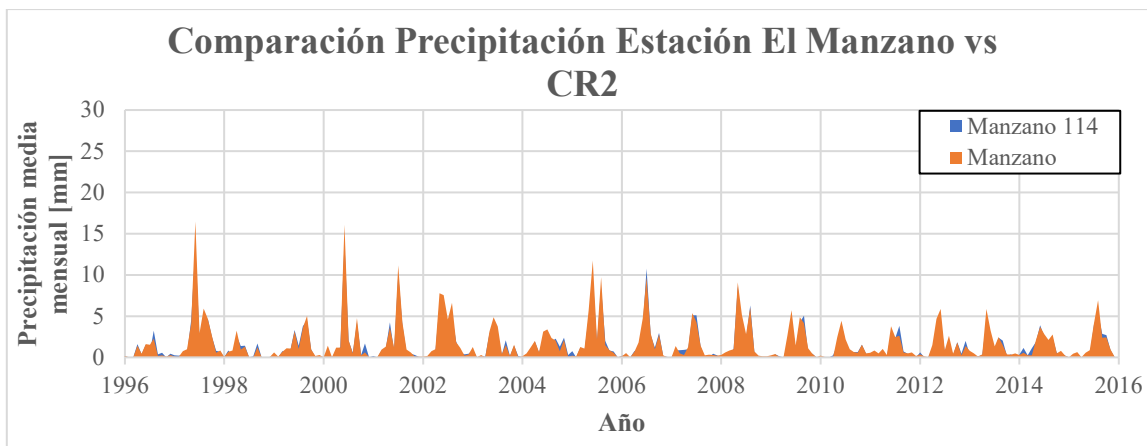


Figura B 2.- Comparación de las precipitaciones medias mensuales entre la estación Río Maipo en El Manzano y punto grillado CR2 más cercano. Fuente: Elaboración propia.

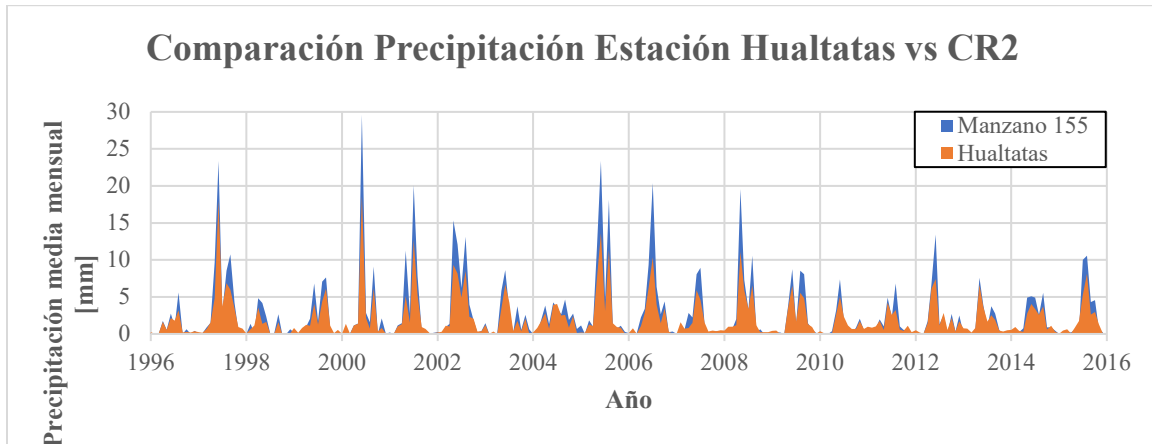


Figura B 3.- Comparación de las precipitaciones medias mensuales entre la estación Río Maipo en Las Hualtatas y punto grillado CR2 más cercano. Fuente: Elaboración propia.

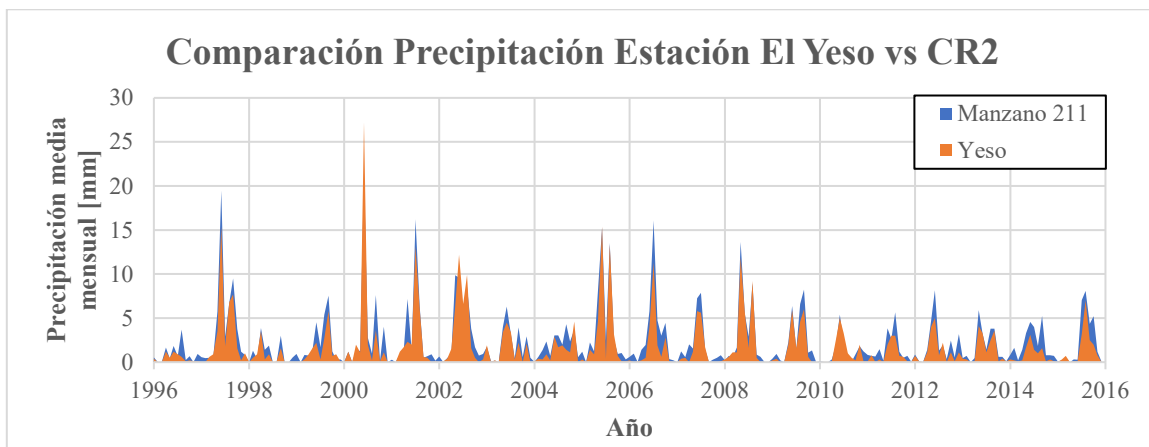


Figura B 4.- Comparación de las precipitaciones medias mensuales entre la estación El Yeso Embalse y punto grillado CR2 más cercano. Fuente: Elaboración propia.

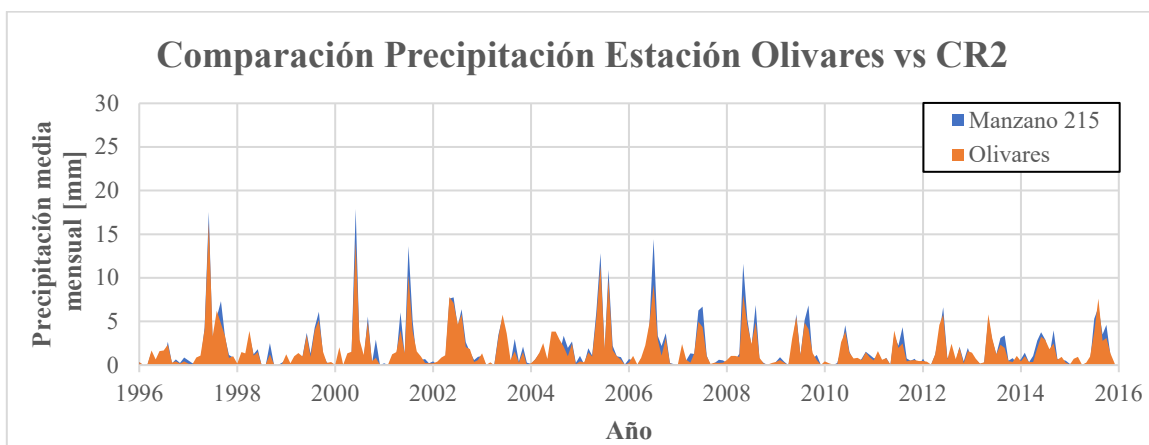


Figura B 5.- Comparación de las precipitaciones medias mensuales entre la estación Río Maipo en San Alfonso y punto grillado CR2 más cercano. Fuente: Elaboración propia.

C. Parámetros seleccionados para el modelo

Cuenca El Yeso Embalse

Tabla C 1- Rango de parámetros seleccionados para la calibración Hidrológica en SWAT, cuenca El Yeso Embalse.

Parámetro	Mín	Máx	Defecto	Utilizado
PLAPS	-100	500	0	13,50
TLAPS	-10	10	-6	-0,20
TIMP	0	1	1	0,32
SMFMX	0	20	1	3,28
SMFMN	0	20	0,5	2,61
SFTMP	-10	10	4,5	2,77
ALPHA_BF	0	1	0.048	0,11
GW_REVAP	0,02	0,2	0,02	0,02
GWQMN	0	5000	1000	43,01
REVAPMN	0	500	0	62,51
RCHRG_DP	0	1	0,05	0,06
GWHT	0	25	1	1,88
GW_SPYLD	0	0,4	0,003	0,25

Fuente: Elaboración propia.

Cuenca Río Maipo en El Manzano

Tabla C 2- Rango de parámetros seleccionados para la calibración Hidrológica en SWAT, cuenca Río Maipo en El Manzano.

Parámetro	Mín	Máx	Defecto	Utilizado
PLAPS	-100	500	0	98.50
TLAPS	-10	10	-6	-2.82
TIMP	0	1	1	0.71
SMFMX	0	20	1	2.35
SMFMN	0	20	0,5	2.26
SFTMP	-10	10	4,5	4.42
ALPHA_BF	0	1	0.048	0.03
GW_REVAP	0,02	0,2	0,02	0.13
GWQMN	0	5000	1000	375.00
REVAPMN	0	500	0	337.50
RCHRG_DP	0	1	0,05	0.68
GWHT	0	25	1	24.38
GW_SPYLD	0	0,4	0,003	0.33

Fuente: Elaboración propia.

Tabla C 3.- Rangos de parámetros seleccionados para la calibración Sedimentométrica en SWAT, cuenca Río Maipo en El Manzano.

Parámetro	Mín	Máx	Defecto	Utilizado
PRF	0	2	1	0.90
SPEXP	1	1.5	1	1.20
SPCON	0.0001	0.01	0.0001	0.00025

Fuente: Elaboración propia.

D. Bandas de Elevación

Se presentan a continuación, la altura media correspondiente a cada banda de elevación creada en el modelo.

Cuenca Río Maipo en El Manzano

Para el caso de la cuenca Río Maipo en El Manzano, se crea un total de 8 Bandas de Elevación para cada una de sus 27 subcuencas.

Tabla D 1 - Altura central en metros de cada una de las bandas de elevación creadas para cada una de las subcuencas del modelo SWAT, cuenca Río Maipo en El Manzano.

Sub Cuenca	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	2707.8	3221.3	3734.8	4248.3	4761.8	5275.3	5788.8	6302.3
2	2683.0	3141.0	3599.0	4057.0	4515.0	4973.0	5431.0	5889.0
3	2330.3	2726.9	3123.6	3520.2	3916.8	4313.4	4710.1	5106.7
4	2266.1	2606.4	2946.6	3286.9	3627.1	3967.4	4307.6	4647.9
5	1844.3	2404.9	2965.6	3526.2	4086.8	4647.4	5208.1	5768.7
6	1760.8	2194.4	2628.1	3061.7	3495.3	3928.9	4362.6	4796.2
7	1097.3	1507.8	1918.3	2328.8	2739.3	3149.8	3560.3	3970.8
8	935.8	1063.4	1191.1	1318.7	1446.3	1573.9	1701.6	1829.2
9	987.1	1189.2	1391.3	1593.4	1795.6	1997.7	2199.8	2401.9
10	1161.2	1543.6	1925.9	2308.3	2690.7	3073.1	3455.4	3837.8
11	1065.4	1260.1	1454.9	1649.6	1844.4	2039.1	2233.9	2428.6
12	1163.3	1483.9	1804.6	2125.2	2445.8	2766.4	3087.1	3407.7
13	1882.7	2248.1	2613.4	2978.8	3344.2	3709.6	4074.9	4440.3
14	1975.0	2523.0	3071.0	3619.0	4167.0	4715.0	5263.0	5811.0
15	1177.1	1529.4	1881.6	2233.9	2586.1	2938.4	3290.6	3642.9
16	1421.0	1789.0	2157.0	2525.0	2893.0	3261.0	3629.0	3997.0
17	1313.8	1469.4	1625.1	1780.7	1936.3	2091.9	2247.6	2403.2
18	2438.4	2923.1	3407.9	3892.6	4377.4	4862.1	5346.9	5831.6
19	1488.6	1869.9	2251.1	2632.4	3013.6	3394.9	3776.1	4157.4
20	2410.7	2860.1	3309.4	3758.8	4208.2	4657.6	5106.9	5556.3
21	1446.8	1750.4	2054.1	2357.7	2661.3	2964.9	3268.6	3572.2
22	1739.5	2102.5	2465.5	2828.5	3191.5	3554.5	3917.5	4280.5
23	2283.3	2681.9	3080.6	3479.2	3877.8	4276.4	4675.1	5073.7
24	1756.4	2161.3	2566.2	2971.1	3375.9	3780.8	4185.7	4590.6
25	2099.7	2131.1	2162.4	2193.8	2225.2	2256.6	2287.9	2319.3
26	2295.3	2677.9	3060.6	3443.2	3825.8	4208.4	4591.1	4973.7
27	2296.1	2690.4	3084.6	3478.9	3873.1	4267.4	4661.6	5055.9

Fuente: Elaboración propia.

Cuenca El Yeso Embalse

Para el caso de la cuenca El Yeso Embalse, se crea un total de 8 Bandas de elevación, para cada una de sus 19 Subcuencas.

Tabla D 2- Altura central en metros de cada una de las bandas de elevación creadas para cada una de las subcuencas del modelo SWAT, cuenca El Yeso Embalse.

Sub Cuenca	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	3500.8	3764.4	4028.1	4291.7	4555.3	4818.9	5082.6	5346.2
2	3137.6	3408.9	3680.1	3951.4	4222.6	4493.9	4765.1	5036.4
3	3090.3	3256.9	3423.6	3590.2	3756.8	3923.4	4090.1	4256.7
4	2731.1	2979.4	3227.6	3475.9	3724.1	3972.4	4220.6	4468.9
5	2708.2	2916.6	3124.9	3333.3	3541.7	3750.1	3958.4	4166.8
6	3027.4	3270.1	3512.9	3755.6	3998.4	4241.1	4483.9	4726.6
7	3001.1	3189.2	3377.3	3565.4	3753.6	3941.7	4129.8	4317.9
8	2688.7	2946.1	3203.4	3460.8	3718.2	3975.6	4232.9	4490.3
9	2634.1	2774.4	2914.6	3054.9	3195.1	3335.4	3475.6	3615.9
10	2664.7	2870.1	3075.4	3280.8	3486.2	3691.6	3896.9	4102.3
11	2803.8	2879.3	2954.8	3030.3	3105.8	3181.3	3256.8	3332.3
12	2915.6	3146.9	3378.1	3609.4	3840.6	4071.9	4303.1	4534.4
13	2601.1	2697.2	2793.3	2889.4	2985.6	3081.7	3177.8	3273.9
14	2718.8	3046.4	3374.1	3701.7	4029.3	4356.9	4684.6	5012.2
15	2872.2	3084.6	3296.9	3509.3	3721.7	3934.1	4146.4	4358.8
16	3299.6	3574.9	3850.1	4125.4	4400.6	4675.9	4951.1	5226.4
17	2934.3	3196.9	3459.6	3722.2	3984.8	4247.4	4510.1	4772.7
18	3397.2	3755.6	4113.9	4472.3	4830.7	5189.1	5547.4	5905.8
19	2630.1	2974.4	3318.6	3662.9	4007.1	4351.4	4695.6	5039.9

Fuente: Elaboración propia.

E. Sensibilidad de parámetros

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la variación de los parámetros seleccionados, según sus rangos predefinidos por el usuario.

Parámetros relativos al derretimiento nival

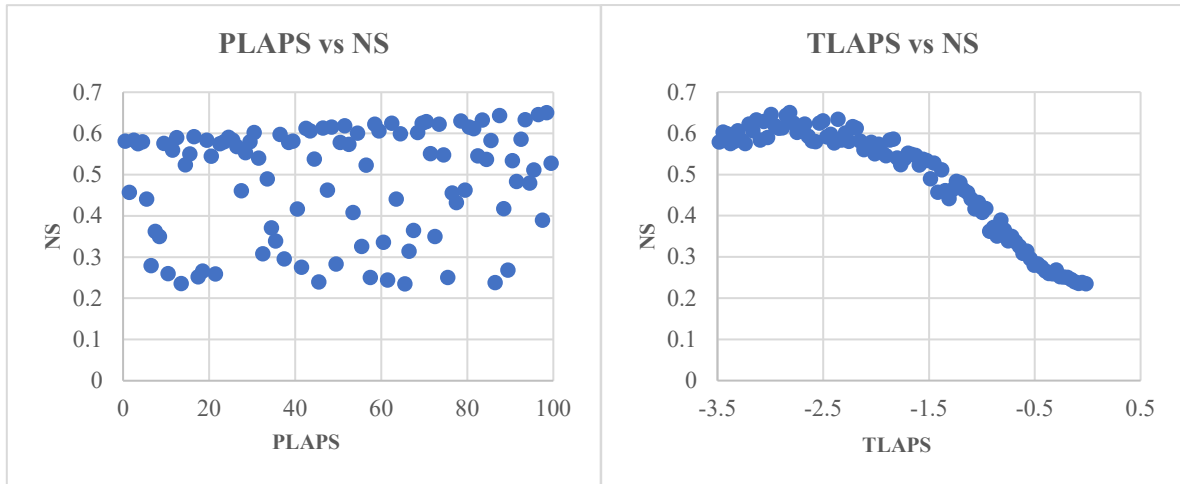


Figura E 1.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con los parámetros PLAPS (izquierda) y TLAPS (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

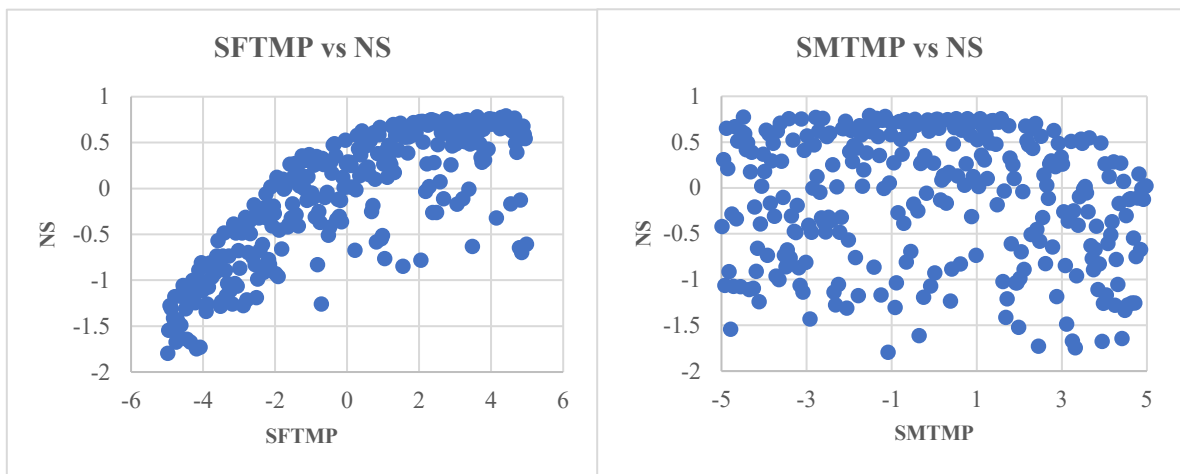


Figura E 2.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con los parámetros SFTMP (izquierda) y SMTMP (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

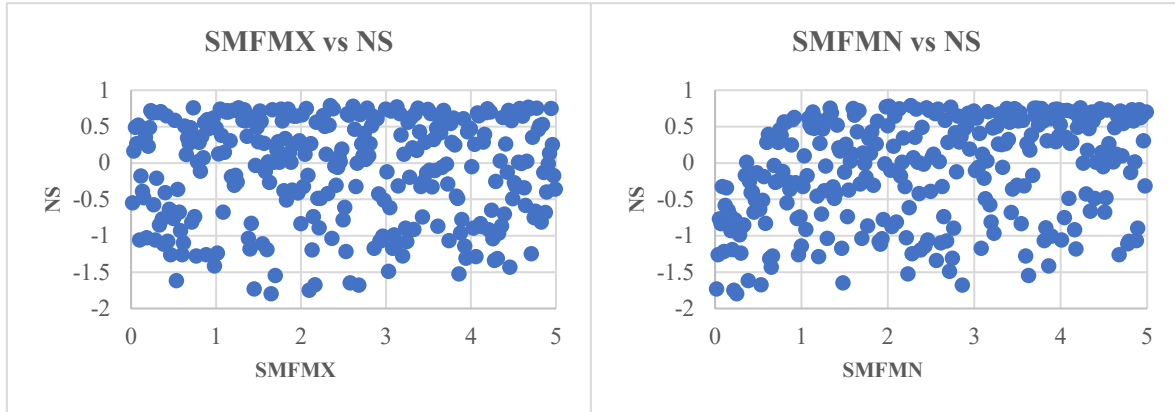


Figura E 3.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con los parámetros SMFMX (izquierda) y SMFMN (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

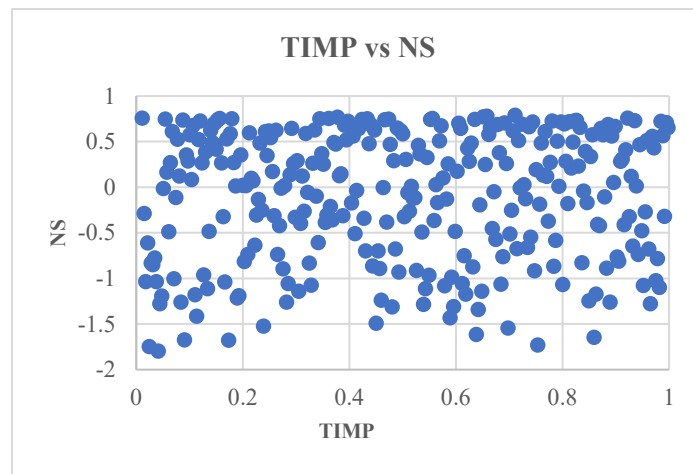


Figura E 4.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con el parámetro TIMP. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros relativos al escurrimiento de aguas

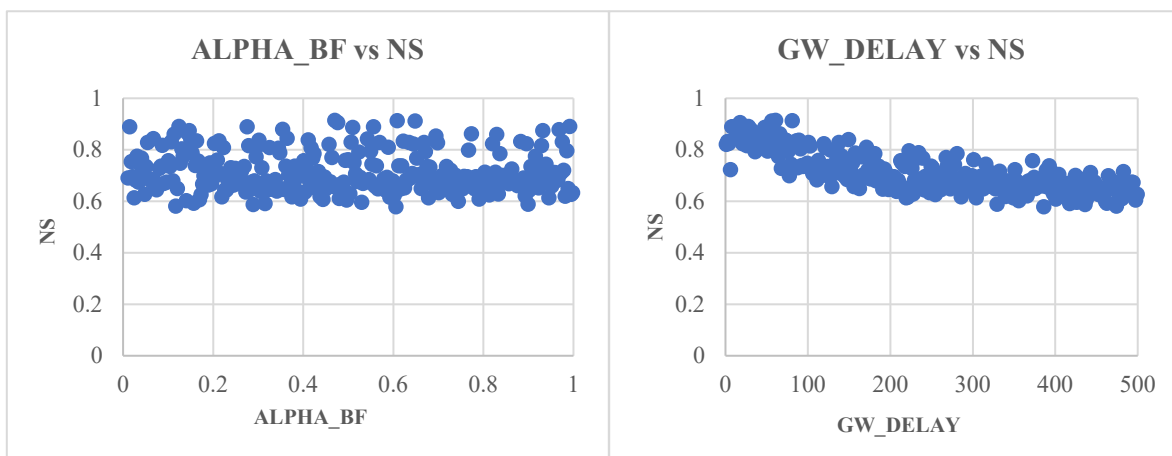


Figura E 5.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con los parámetros ALPHA_BF (izquierda) y GW_DELAY (derecha). Fuente: Elaboración propia.

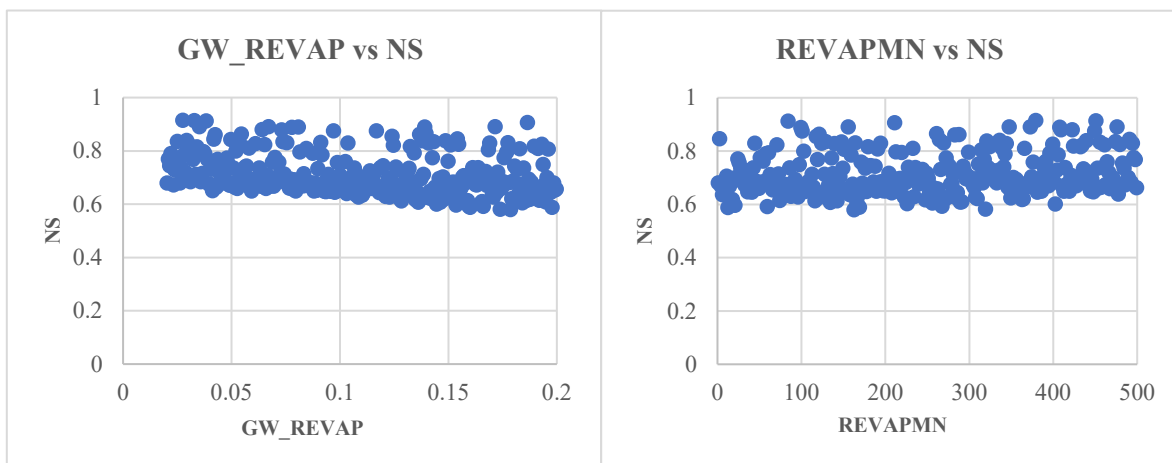


Figura E 6.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con los parámetros GW_REVAP (izquierda) y REVAPMN (derecha). Fuente: Elaboración propia.

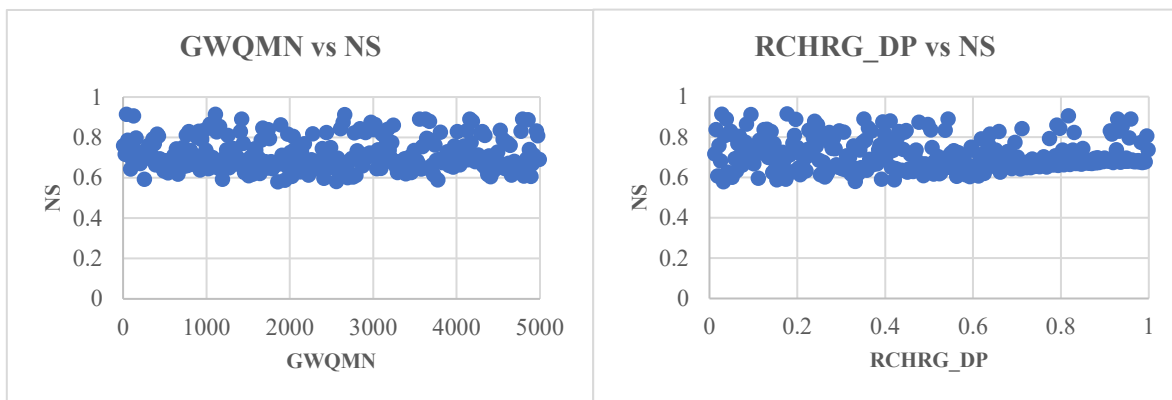


Figura E 7.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con los parámetros GWQMN (izquierda) y RCHRG_DP (derecha). Fuente: Elaboración propia.

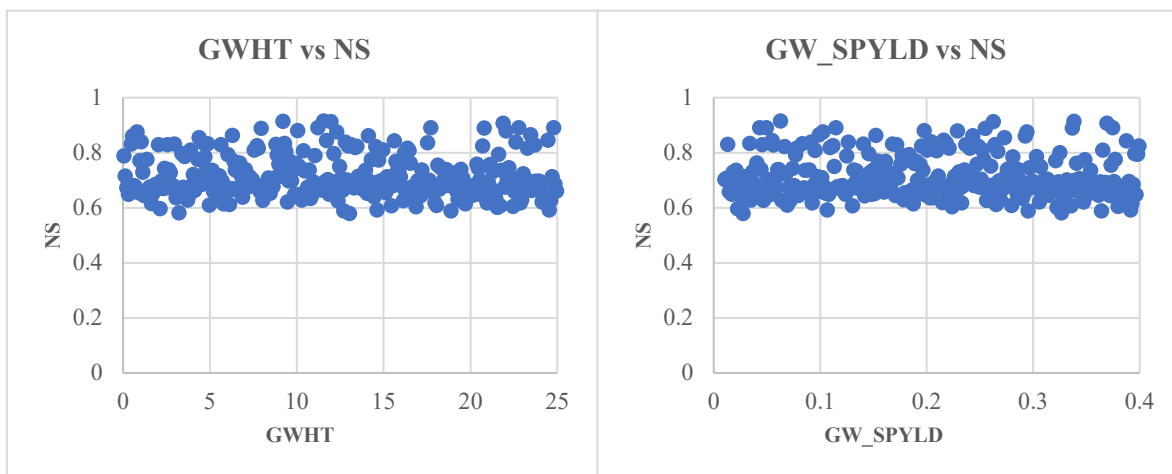


Figura E 8.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con los parámetros GWHT (izquierda) y GW_SPYLD (derecha). Fuente: Elaboración propia.

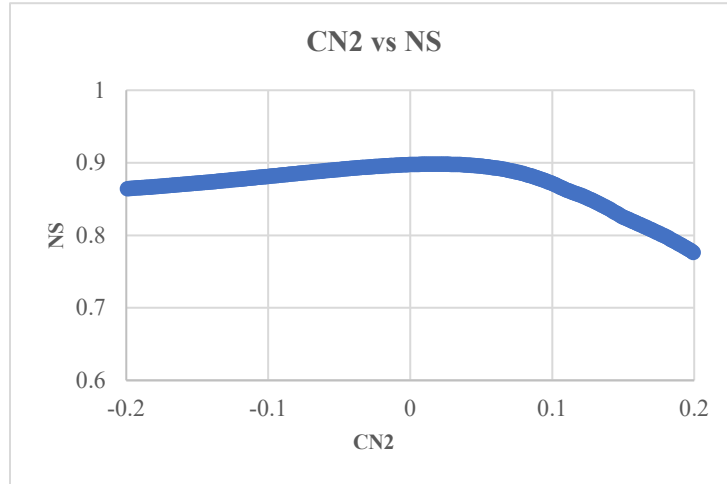
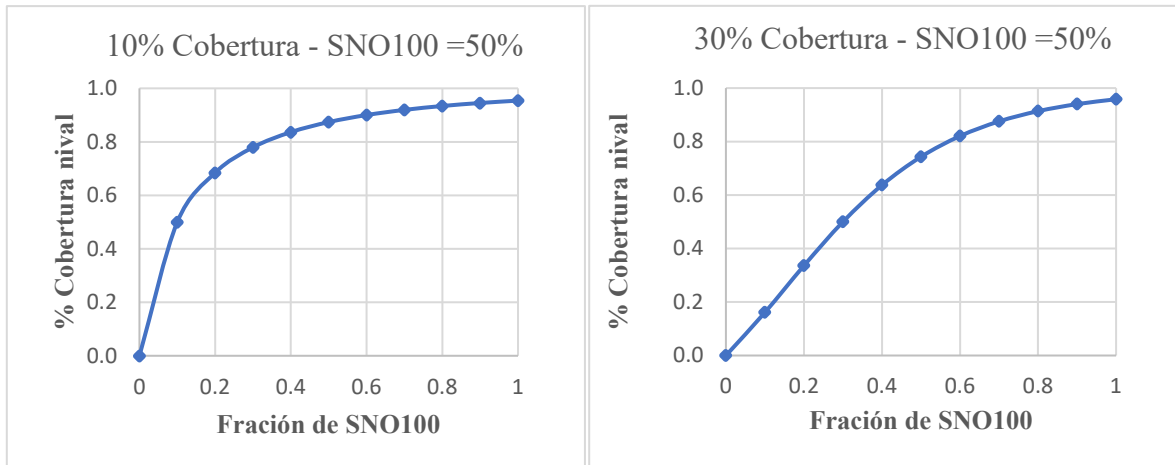


Figura E 9.- Variación de la función objetivo Nash Sutcliffe con el parámetro CN2. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros relativo a la cobertura nival

En el caso de la cobertura nival, existen diferentes formas de representar el derretimiento del manto nival, la cual se ve influenciada por las características topográficas del terreno, acumulación sectorizada, efectos del viento, entre otros. Esto se cuantifica mediante las curvas de deflexión de la cobertura nival obtenidas mediante la aplicación de la Ecuación N°3. A continuación, se muestran cinco diferentes curvas obtenidas al variar el por



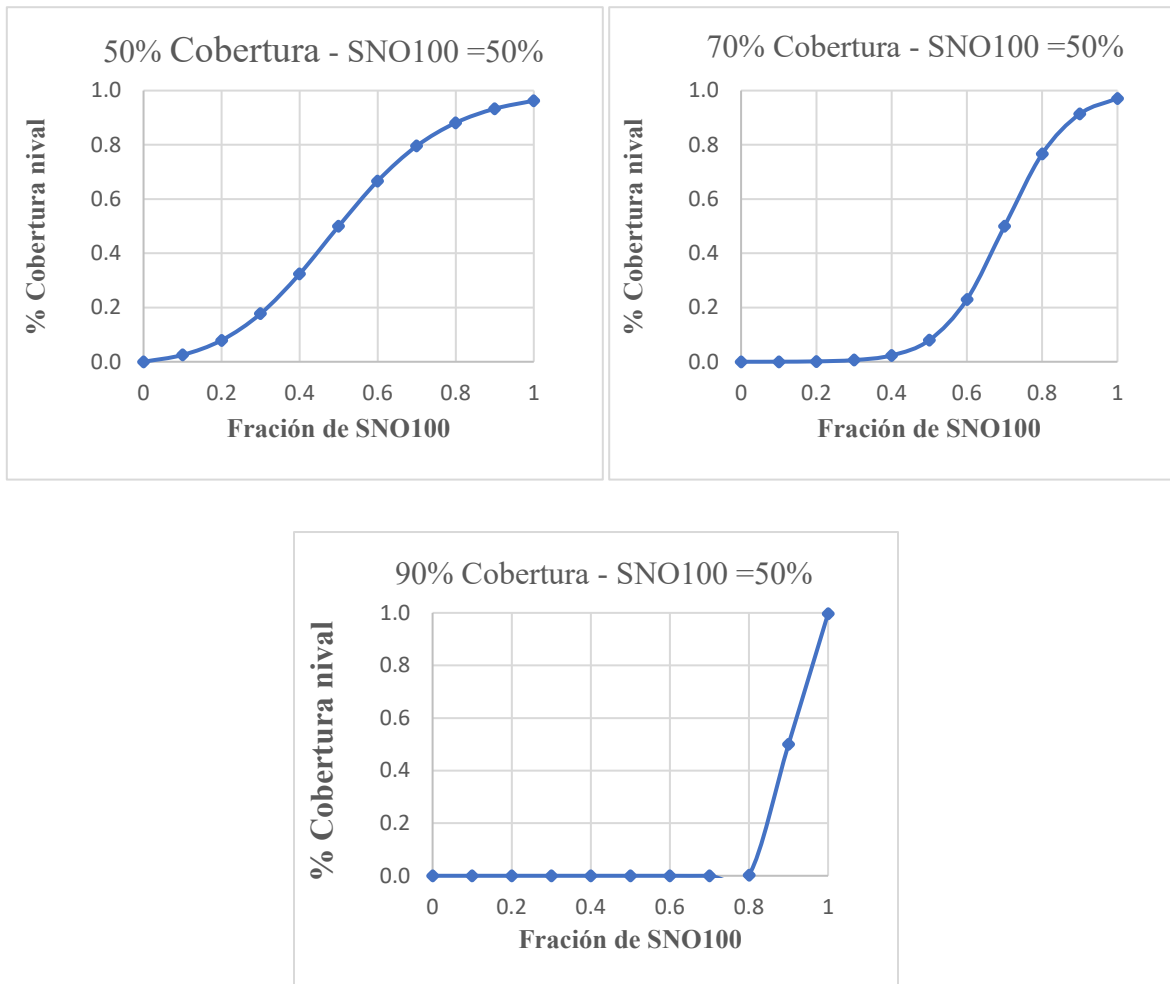


Figura E 10.- Curvas de deflexión de la cobertura nival para diferentes porcentajes de cobertura al 50% de SNO100.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla E 1.- Valores de Cov1 y Cov2 utilizados en la construcción de las curvas de deflexión de la cobertura nival.

% SNO100	Cov1	Cov2
10	-2.221	0.815
30	-0.377	2.757
50	1.865	5.117
70	7.033	10.556
90	51.921	57.807

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Figura E 11 se muestran las variaciones de la cobertura nival utilizando diferentes valores de *SNO100*, tomando como base un 50% de cobertura para un 50% de *SNO100*:

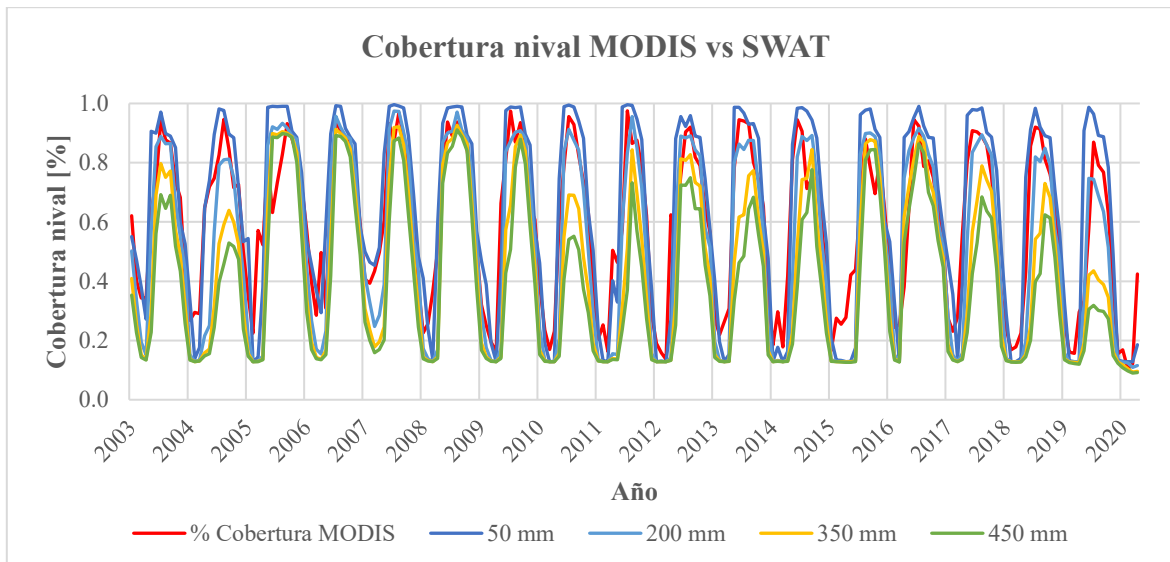


Figura E 11.- Variación de la cobertura nival usando diferentes valores de SON100. Fuente: Elaboración propia.

F. Gráficos de Calibración – Validación a nivel Diario

A continuación, en la Figura F 1 y Figura F 2 se presentan los gráficos obtenidos a nivel diario respecto de los caudales para las cuencas Río Maipo en el Manzano y El Yeso Embalse, así como sus indicadores de eficiencia.

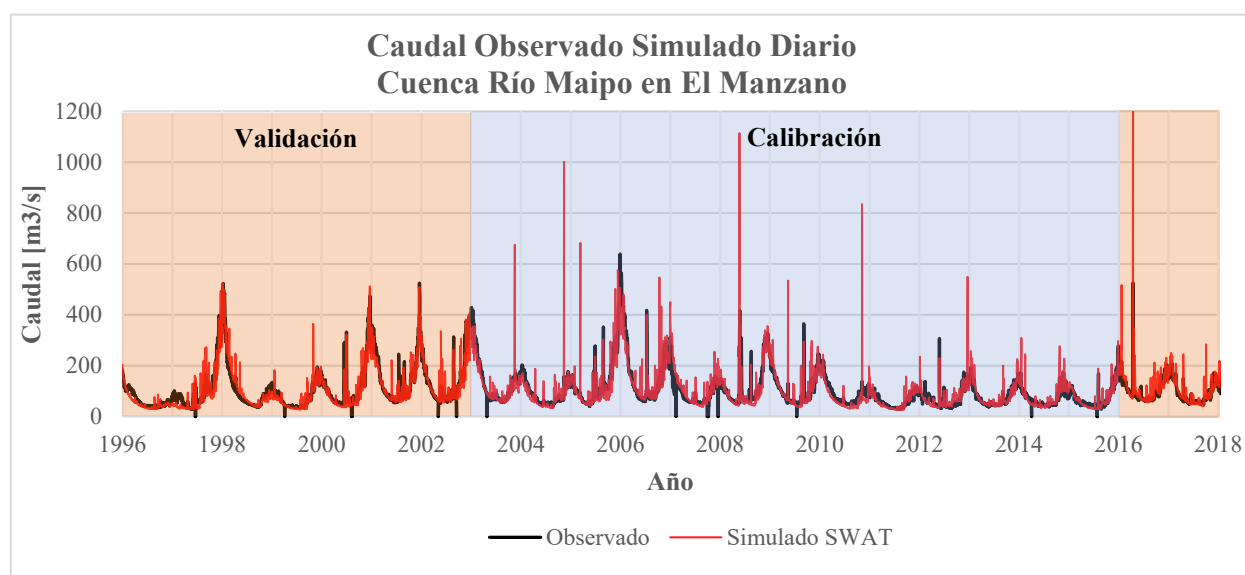


Figura F 1.- Gráfico de caudal observado versus simulado Río Maipo en El Manzano a escala diaria. Fuente: Elaboración propia.

Tabla F 1.- Indicadores de eficiencia para el modelo realizado en la estación Río Maipo en El Manzano en cuanto a caudales, tanto para el periodo de calibración como el de validación a escala diaria.

Indicador de eficiencia:	NSE	KGE
Calibración	0.641	0.822
Validación	0.740	0.862

Fuente: Elaboración propia.

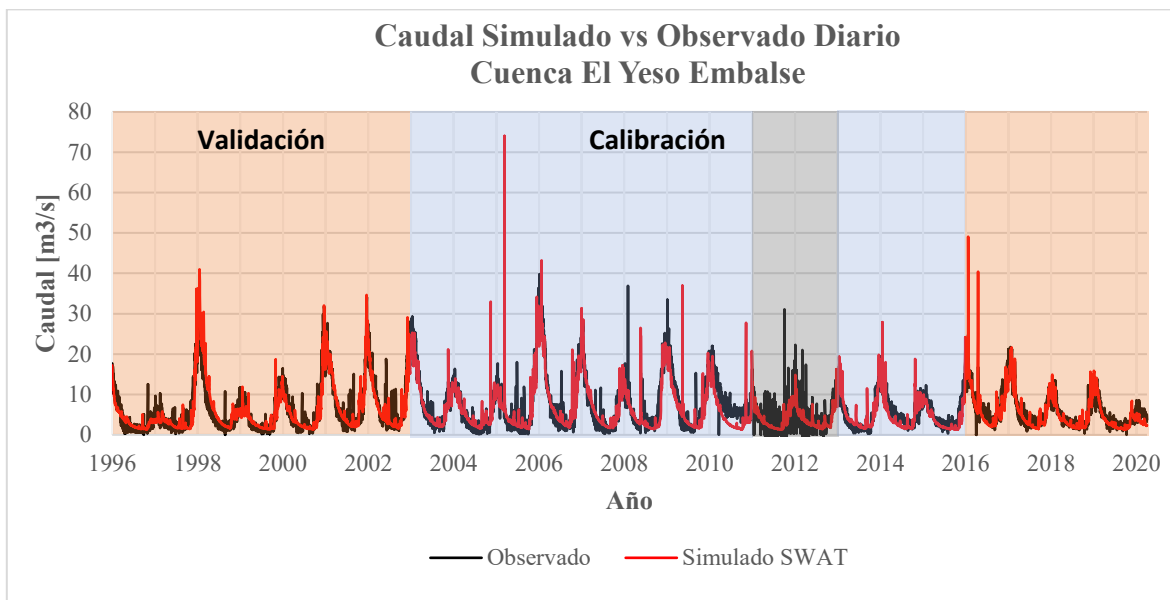


Figura F 2.- Gráfico de caudal observado versus simulado El Yeso Embalse a escala diaria. Fuente: Elaboración propia.

Tabla F 2.- Indicadores de eficiencia para el modelo realizado en la estación El Yeso Embalse en cuanto a caudales, tanto para el periodo de calibración como el de validación a escala diaria.

Indicador de eficiencia:	NSE	KGE
Calibración	0.778	0.812
Validación	0.801	0.891

Fuente: Elaboración propia.