



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos



T E S I S

Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Tepalcatepec ante Eventos de Sequía mediante la Aplicación de un Sistema de Modelación Conjunta

Para obtener el grado de
**Maestro en Ingeniería de los Recursos
Hídricos**

Presenta
Ulises Absalom Barajas Madrigal
Ingeniero Civil

Asesor

José Jaime Madrigal Barrera

Doctor en Ingeniería del Agua y Medioambiente

Co-asesor

Giovanni Carlo Flores Fernández

Doctor en Ingeniería Civil

Ulises Absalom Barajas Madrigal: *Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Tepalcatepec ante Eventos de Sequía mediante la Aplicación de un Sistema de Modelación Conjunta*, Mayo 2026

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Programa de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, por la formación académica, el acompañamiento institucional y el espacio para desarrollar esta investigación.

Al SECIHTI, por el financiamiento brindado durante mis estudios de maestría.

Al Dr. Jaime, por su asesoría, orientación y seguimiento durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Giovanni, por su coasesoría y sus aportaciones técnicas para fortalecer la investigación.

A mis sinodales, por su constante revisión y por los comentarios que permitieron mejorar la calidad de este documento.

A mi tutor Dr. Abel Solera, por recibirme y asesorarme durante mi estancia en la Universitat Politècnica de València.

A mis papás y a mis hermanos, por su apoyo incondicional y por acompañarme en cada etapa.

A mi pareja, Sandy, por su paciencia, apoyo y confianza durante todo este proceso.

A mis amigos Luis Alejandro, Ángel y Adrián, por su amistad y por estar presentes a lo largo de este camino.

Resumen

La gestión integrada de los recursos hídricos en México resulta ser de vital importancia debido a la creciente incidencia de sequías y de los recientes cambios en los patrones del clima, siendo imperativo poder contar con herramientas y estrategias para gestionar y mitigar los efectos negativos de estos eventos. La presente investigación propone abordar esta necesidad, en particular en la cuenca del río Tepalcatepec, mediante el uso de modelos hidrológicos y la aplicación de índices de estado para identificar y caracterizar diferentes escenarios de sequía. A partir de estos modelos y análisis, se propondrán medidas de actuación para cada escenario identificado.

Palabras clave: gestión integrada de los recursos hídricos, modelación hidrológica, índices de estado, cuenca del río Tepalcatepec, sequías.

Abstract

Integrated water resources management in Mexico is of vital importance due to the increasing incidence of droughts and recent changes in climate patterns, being imperative to have tools and strategies to manage and mitigate the negative effects of these events. This research proposes to address this need, particularly in the Tepalcatepec river basin, through the use of hydrological models and the application of state indices to identify and characterize different drought scenarios. Based on these models and analyses, action measures will be proposed for each identified scenario.

Keywords: integrated water resources management, hydrological modelling, state indices, Tepalcatepec river basin, droughts.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	MARCO TEÓRICO	2
2.1	Antecedentes	2
2.1.1	Gestión de recursos hídricos	2
2.1.2	Modelación matemática	12
2.2	Gestión de información meteorológica	15
2.2.1	Tratamiento de datos meteorológicos	15
2.2.2	Determinación de evapotranspiración potencial	19
2.3	Modelación hidrológica superficial	22
2.4	Modelación hidrológica subterránea	28
2.5	Modelación conjunta	31
2.6	Evaluación de modelos hidrológicos	32
2.7	Herramientas de modelación hidrológica	35
3	HIPÓTESIS	36
4	OBJETIVOS	37
4.1	Generales	37
4.2	Particulares	37
5	JUSTIFICACIÓN	38
6	METODOLOGÍA	39
6.1	Obtención de datos	40
6.1.1	Información meteorológica	40
6.1.2	Información hidrométrica	40
6.1.3	Información de extracciones	40
6.1.4	Información hidrogeológica	40
6.1.5	Información fisiográfica	41
6.1.6	Información de presas	41
6.1.7	Información de demandas	41
6.2	Caracterización de la zona de estudio	42
6.3	Gestión de datos	42
6.3.1	Homogeneización de datos meteorológicos	42
6.3.2	Cálculo de evapotranspiración potencial	43
6.3.3	Restitución de régimen	43
6.4	Modelación superficial	43

6.4.1	Montaje y calibración del modelo	43
6.4.2	Evaluación del modelo	43
6.4.3	Traslado de parámetros y obtención de infiltraciones	44
6.5	Modelación subterránea	44
6.5.1	Discretización espacial de la zona de estudio	44
6.5.2	Montaje y calibración del modelo	44
6.5.3	Evaluación del modelo	44
6.5.4	Traslado de parámetros y obtención de niveles piezométricos	44
6.6	Modelación conjunta	45
6.6.1	Definición de la topología del modelo	45
6.6.2	Montaje y calibración del modelo	45
6.6.3	Evaluación del modelo	46
6.7	Determinación de índices de estado	46
6.8	Propuesta y evaluación de acciones ante eventos de sequía	47
6.8.1	Diagnóstico estructural y selección de reglas	47
6.8.2	Derivación de reglas mediante optimización	47
6.8.3	Evaluación de reglas de operación	47
6.8.4	Propuesta de acciones ante eventos de sequía	48
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
7.1	Obtención de datos	49
7.1.1	Información meteorológica	49
7.1.2	Información hidrométrica	49
7.1.3	Información de extracciones	49
7.1.4	Información hidrogeológica	50
7.1.5	Información fisiográfica	52
7.1.6	Información de presas	52
7.1.7	Información de demandas	53
7.2	Caracterización de la zona de estudio	54
7.3	Gestión de datos	67
7.3.1	Homogeneización de datos meteorológicos	67
7.3.2	Cálculo de evapotranspiración potencial	67
7.3.3	Restitución de régimen	68
7.4	Modelación superficial	69
7.4.1	Montaje y calibración del modelo	69
7.4.2	Evaluación del modelo	70
7.4.3	Traslado de parámetros y obtención de infiltraciones	72
7.5	Modelación subterránea	73
7.5.1	Discretización espacial de la zona de estudio	73
7.5.2	Montaje y calibración del modelo	74
7.5.3	Evaluación del modelo	77
7.5.4	Traslado de parámetros y obtención de niveles piezométricos	78
7.6	Modelación conjunta	78

7.6.1	Definición de la topología del modelo	78
7.6.2	Montaje y calibración del modelo	81
7.6.3	Evaluación del modelo	87
7.7	Determinación de índices de estado	87
7.7.1	Presa Vicente Villaseñor	88
7.7.2	Presa San Juanico	89
7.7.3	Presa Chilatán	90
7.7.4	Presa Los Olivos	91
7.7.5	Sistema de la Cuenca del Río Tepalcatepec (CRT)	92
7.8	Propuesta y evaluación de acciones ante eventos de sequía	93
7.8.1	Diagnóstico estructural y selección de reglas	93
7.8.2	Derivación de reglas mediante optimización	94
7.8.3	Evaluación de reglas de operación	111
7.8.4	Propuesta de acciones ante eventos de sequía	113
8	CONCLUSIONES	116
	REFERENCIAS	118
A	RESULTADOS DE LOS MODELOS LLUVIA-ESCURRIMIENTO	127
A.0.1	Escurrecimientos mensuales	127
A.0.2	Escurrecimientos anuales	132
A.0.3	Escurrecimientos medios mensuales	137
B	DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DEL MODELO SUBTERRÁNEO	143
B.0.1	Ejemplos de mallas utilizadas	143

Lista de Figuras

Figura 2.1	Discretización espacial de los modelos hidrológicos: agregado (A), semi-distribuido (B) y distribuido (C). Modificado de Sitterson et al. (2018).	15
Figura 2.2	Diagramas unificados que ilustran los almacenamientos y flujos conceptuales de los modelos HBV (a) y SAC-SMA (b). Modificado de Astagneau et al. (2020).	23
Figura 2.3	Representación espacial de un acuífero discretizado en celdas. Modificado de Harbaugh (2005).	30
Figura 2.4	Designación de celdas para el acuífero discretizado espacialmente. Modificado de Harbaugh (2005).	31
Figura 6.1	Esquema general de la metodología utilizada.	39
Figura 7.1	Ubicación geográfica de la zona de estudio y su red de drenaje.	55
Figura 7.2	División política municipal en relación con la zona de estudio.	56
Figura 7.3	Elevaciones del terreno de la zona de estudio.	57
Figura 7.4	Estaciones meteorológicas en la zona de estudio.	58
Figura 7.5	Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.	59
Figura 7.6	Pozos de aprovechamientos subterráneos en la zona de estudio.	60
Figura 7.7	Pozos piezométricos en la zona de estudio.	61
Figura 7.8	Temperatura media anual en la zona de estudio.	62
Figura 7.9	Precipitación media anual en la zona de estudio.	63
Figura 7.10	Uso de suelo en la zona de estudio.	64
Figura 7.11	Tipo de suelo en la zona de estudio.	65
Figura 7.12	Tipo de litología en la zona de estudio.	66
Figura 7.13	Resultados de la homogeneización en la estación C14348.	67
Figura 7.14	Series temporales de Evapotranspiración Potencial (ETP) en la cuenca de la estación B18494.	68
Figura 7.15	Restitución a régimen natural de los datos de la presa Chilatán.	68
Figura 7.16	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18494.	69
Figura 7.17	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18494.	70
Figura 7.18	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18494.	70
Figura 7.19	Índice de bondad de ajuste medio de cada cuenca de calibración, de cada modelo.	71
Figura 7.20	Infiltraciones medias mensuales de las microcuencas de la CRT, en mm.	73
Figura 7.21	Comparación de niveles piezométricos observados y simulados.	74
Figura 7.22	Evolución de los niveles piezométricos en las celdas 234 y 269.	75
Figura 7.23	Evolución de los niveles piezométricos en las celdas 96 y 201.	75
Figura 7.24	Anomalía estacional de los niveles piezométricos en la CRT.	76
Figura 7.25	Anomalía del nivel piezométrico en el año 2020.	77

Figura 7.26	Topología del modelo conjutno de la CRT.	80
Figura 7.27	Volúmenes mensuales almacenados en la presa Vicente Villaseñor. . .	81
Figura 7.28	Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa Vicente Villa- señor.	82
Figura 7.29	Volúmenes mensuales almacenados en la presa San Juanico.	83
Figura 7.30	Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa San Juanico. .	83
Figura 7.31	Volúmenes mensuales almacenados en la presa Chilatán.	84
Figura 7.32	Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa Chilatán. . . .	84
Figura 7.33	Volúmenes mensuales almacenados en la presa Los Olivos.	85
Figura 7.34	Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa Los Olivos. . .	85
Figura 7.35	Aportaciones superficiales mensuales en la salida de la CRT.	86
Figura 7.36	Aportaciones superficiales medias mensuales en la salida de la CRT. .	86
Figura 7.37	Índice de Estado de Escasez (IEE), en la presa Vicente Villaseñor. . . .	88
Figura 7.38	IEE, en la presa San Juanico.	89
Figura 7.39	IEE, en la presa Chilatán.	90
Figura 7.40	IEE, en la presa Los Olivos.	91
Figura 7.41	Índice de estado de escasez, IEE, del sistema de la CRT.	92
Figura 7.42	Envolverte de desempeño para el escenario de asignación adaptativa en Vicente Villaseñor.	95
Figura 7.43	Regla de asignación anual en octubre y umbrales del IEE.	95
Figura 7.44	Suministro mensual en año agrícola: observado, SIMGES y demanda adaptativa.	96
Figura 7.45	Patrones de demanda mensual por estado y promedio histórico. . . .	97
Figura 7.46	Envolverte de desempeño para el escenario RAC.	98
Figura 7.47	Curvas del IEE y umbral de conservación del escenario RAC.	99
Figura 7.48	Envolverte de desempeño para el escenario EXC.	100
Figura 7.49	Curvas del IEE y umbral de excedencias del escenario EXC.	100
Figura 7.50	Envolverte de desempeño para el escenario OPT.	101
Figura 7.51	Curvas del IEE y umbrales optimizados del escenario OPT.	102
Figura 7.52	Suministro y déficit de la demanda en el evento 2006 en el escenario base, RAC, EXC y OPT.	103
Figura 7.53	Suministro y déficit de la demanda en el evento 2013 en el escenario base, RAC, EXC y OPT.	104
Figura 7.54	Mapa de calor de garantía y duración de fallas en el escenario base, RAC, EXC y OPT.	105
Figura 7.55	Volumen almacenado durante los eventos 2006 y 2013 en el escenario base, RAC, EXC y OPT.	106
Figura 7.56	Excedencias anuales disponibles en EXC y OPT para sustituir bombeo.	107
Figura 7.57	Envolverte de desempeño para el escenario de asignación adaptativa en Los Olivos.	108
Figura 7.58	Regla de asignación anual en octubre y umbrales del IEE.	108
Figura 7.59	Suministro mensual en año agrícola: observado, SIMGES y demanda adaptativa.	110

Figura 7.60	Patrones de demanda mensual por estado y promedio histórico. . . .	111
Figura A.1	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18201. . . .	127
Figura A.2	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18202. . . .	128
Figura A.3	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18452. . . .	128
Figura A.4	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18496. . . .	129
Figura A.5	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18095. . . .	129
Figura A.6	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18280. . . .	130
Figura A.7	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18281. . . .	130
Figura A.8	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18531. . . .	131
Figura A.9	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación B18532. . . .	131
Figura A.10	Escurrecimientos mensuales en la cuenca de la estación CHLMC. . . .	132
Figura A.11	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18201.	132
Figura A.12	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18202.	133
Figura A.13	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18452.	133
Figura A.14	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18496.	134
Figura A.15	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18095.	134
Figura A.16	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18280.	135
Figura A.17	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18281.	135
Figura A.18	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18531.	136
Figura A.19	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación B18532.	136
Figura A.20	Escurrecimientos anuales en la cuenca de la estación CHLMC.	137
Figura A.21	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18201. . . .	137
Figura A.22	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18202. . . .	138
Figura A.23	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18452. . . .	138
Figura A.24	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18496. . . .	139
Figura A.25	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18095. . . .	139
Figura A.26	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18280. . . .	140
Figura A.27	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18281. . . .	140
Figura A.28	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18531. . . .	141
Figura A.29	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18532. . . .	141
Figura A.30	Escurrecimientos medios mensuales en la cuenca de la estación CHLMC. . . .	142
Figura B.1	Celdas activas e inactivas en la zona de estudio.	144
Figura B.2	Celdas de elevaciones de la superficie en la zona de estudio, en m.s.n.m. . . .	145
Figura B.3	Celdas del nivel estático inicial de simulación en la zona de estudio, en m.s.n.m.	146
Figura B.4	Celdas de conductividades hidráulicas en la zona de estudio, en m mes^{-1}	147
Figura B.5	Celdas de coeficientes de almacenamiento en la zona de estudio. . . .	148
Figura B.6	Celdas de recarga en el mes de julio del año 2020, en m mes^{-1}	149
Figura B.7	Celdas de extracciones en el mes de mayo del año 2020, en m mes^{-1}	150

Lista de Tablas

Tabla 2.1	Los diferentes tipos de sequías y su definición.	2
Tabla 2.2	Tipología de medidas de actuación en función del escenario de sequía diagnosticado. Modificado de CHJ (2018).	6
Tabla 2.3	Reseña de trabajos que emplean la GIRH para la determinación de medidas de actuación ante distintas problemáticas asociadas con la gestión del agua.	9
Tabla 2.4	Comparación de la estructura de los modelos hidrológicos. Modificado de Sitterson et al. (2018).	14
Tabla 2.5	Resumen de las características de las herramientas de homogeneización.	16
Tabla 2.6	Métodos para la determinación de la ETP.	20
Tabla 2.7	Comparación técnica entre los modelos HBV y SAC-SMA para su uso en calibración y simulación lluvia–escorrentía.	28
Tabla 2.8	Descripción general del uso de los SSD más utilizados para la gestión de recursos hídricos. Modificado de Alamanos et al. (2021)	32
Tabla 2.9	Resumen de las características de los índices de bondad de ajuste considerados. Modificado de Althoff & Rodrigues (2021).	34
Tabla 2.10	Clasificación general del rendimiento de un modelo en función de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Modificado de Moriasi et al. (2007).	35
Tabla 7.1	Volumen concesionado y porcentaje por tipo de uso.	49
Tabla 7.2	Tipo de material en la zona de estudio y sus rangos de valores de conductividad hidráulica, en m mes^{-1}	50
Tabla 7.3	Tipo de material y acuífero en la zona de estudio y sus rangos de valores de coeficiente de almacenamiento.	51
Tabla 7.4	Volúmenes característicos y capacidad de obra de toma de las presas en la zona de estudio.	53
Tabla 7.5	Consumo de agua per cápita diario. Modificado de CONAGUA (2019a)	53
Tabla 7.6	Volúmenes entregados mensuales por distrito de riego (hm^3).	54
Tabla 7.7	Índices de bondad de ajuste de los modelos Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) y Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) para cada cuenca de calibración.	71
Tabla 7.8	Estadísticos de ajuste del modelo subterráneo.	78
Tabla 7.9	Índices de ajuste entre volúmenes observados y simulados en presas y en la salida de la CRT.	87
Tabla 7.10	Diagnóstico estructural y selección preliminar de reglas por presa.	93
Tabla 7.11	Indicadores Reliability, Resilience y Vulnerability (RRV) y Sustainability Index (SI) para la presa Vicente Villaseñor.	111
Tabla 7.12	Indicadores RRV y SI por escenario en la presa Chilatán.	112
Tabla 7.13	Indicadores RRV y SI para la presa Los Olivos.	113
Tabla 7.14	Matriz de acciones por estado del IEE en la presa Vicente Villaseñor.	114

Tabla 7.15	Matriz de acciones por estado del IEE en la presa San Juanico.	114
Tabla 7.16	Matriz de acciones por estado del IEE en la presa Chilatán.	115
Tabla 7.17	Matriz de acciones por estado del IEE en la presa Los Olivos.	115

Abreviaciones

CONAGUA Comisión Nacional del Agua

MITECO Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

ETP Evapotranspiración Potencial

GIRH Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

HBV Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning

KGE Kling-Gupta Efficiency

RRV Reliability, Resilience y Vulnerability

MAE Mean Absolute Error

MLE Modelos Lluvia Esguerrimiento

MODFLOW MODular Finite-Difference FLOW Model

SOP Standard Operating Policy

MSM Monitor de Sequía en México

NSE Nash-Sutcliffe Efficiency

NSE_{ln} Logarithmic Nash-Sutcliffe Efficiency

PBIAS Percent Bias

RMSE Root Mean Square Error

PES Planes Especiales de Sequía

IES Índice de Estado de Sequía

IEE Índice de Estado de Escasez

UTE Unidad Territorial de Escasez

PMPMS Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía

PRONACOSE Programa Nacional Contra la Sequía

R^2 coeficiente de determinación

SI Sustainability Index

SAC-SMA Sacramento Soil Moisture Accounting

SDI	Streamflow Drought Index
SNHT	Standard Normal Homogeneity Test
SPI	Standardized Precipitation Index
SSD	Sistemas de Soporte a la Decisión
Hydromad	Hydrological Model Assessment and Development
SIMGES	Simulación de la Gestión de Cuencas
MAR	Managed Aquifer Recharge
CRT	Cuenca del Río Tepalcatepec
CHJ	Confederación Hidrográfica del Júcar
SIH	Sistema de Información Hidrológica
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
SGM	Servicio Geológico Mexicano
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
ODRI	Operational Drought Risk Index
NAME	Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias
NAMO	Nivel de Aguas Máximas Ordinarias
NAMINO	Nivel de Aguas Mínimas de Operación
MAPAS	Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Introducción

La gestión de los recursos hídricos es un desafío crítico en muchas regiones del mundo, y México no es la excepción. La variabilidad climática, caracterizada por periodos prolongados de sequía y eventos de precipitaciones extremas, ha puesto en riesgo la disponibilidad y calidad del agua en diversas zonas del país. La gestión del agua a nivel nacional se enfrenta a múltiples retos, incluyendo la distribución desigual de los recursos hídricos, la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación y la falta de infraestructuras adecuadas para el almacenamiento y distribución del agua. Estos problemas se agravan en tiempos de sequía, cuando la disponibilidad de agua disminuye drásticamente, afectando no solo a las actividades agrícolas, sino también al suministro urbano e industrial.

El cambio climático y el aumento de la demanda de agua han intensificado la frecuencia y severidad de las sequías en Michoacán, haciendo urgente la necesidad de estrategias efectivas para la gestión del agua. Las autoridades locales y nacionales han reconocido esta necesidad y han promovido iniciativas para mejorar la resiliencia hídrica, pero aún existen brechas significativas en el conocimiento y en la implementación de soluciones efectivas.

Para abordar estos desafíos, es crucial contar con herramientas que permitan simular y gestionar los recursos hídricos de manera eficiente. Los modelos hidrológicos son fundamentales en este sentido, ya que permiten comprender la evolución de la disponibilidad del agua en diferentes escenarios. Estos modelos pueden ofrecer una visión cuantitativa de las condiciones actuales y futuras del agua, permitiendo a los tomadores de decisiones actuar de manera informada y proactiva.

Esta investigación se centra en el desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico conjunto que permita simular la evolución de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Tepalcatepec (CRT). Con el fin de identificar escenarios de sequía y proponer, mediante el modelo conjunto, medidas de actuación ante dichos escenarios.

Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Gestión de recursos hídricos

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (**GIRH**) es un enfoque comprensivo que busca el desarrollo y manejo coordinado del agua, la tierra y otros recursos relacionados para maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa y sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. Este enfoque incluye la creación de políticas y regulaciones coordinadas, arreglos de gestión y financiación que involucran a todas las partes interesadas para equilibrar las demandas competitivas de agua de la sociedad y la economía (UNEP, 2021).

Uno de los aspectos de mayor interés de la **GIRH** es la planificación de estrategias ante eventos de sequía, los cuales tienen severos efectos negativos en el desarrollo socioeconómico de una sociedad. Por definición, entendemos una sequía como un periodo de tiempo prolongado de escasez de agua, debido a la falta de lluvia. Sin embargo, esta definición resulta ser muy general, al no poder representar el impacto que tienen las sequías en diferentes contextos, es por ello que, a lo largo del tiempo se ha debatido respecto a las diferentes maneras en que se pueden clasificar las sequías, llegando a un consenso general de que existen sequías meteorológicas, hidrológicas, agrícolas y socioeconómicas (Wilhite & Glantz, 1985), tal como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Los diferentes tipos de sequías y su definición.

Tipo de sequía	Definición
Sequía meteorológica	Se define como un período de tiempo prolongado con precipitaciones por debajo del promedio histórico.
Sequía hidrológica	Se produce cuando los niveles de agua en ríos, embalses, lagos y acuíferos caen por debajo de los promedios históricos.
Sequía agrícola	Ocurre cuando la humedad del suelo no es suficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos durante un período de crecimiento.

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.1: (Continuación)

Tipo de sequía	Definición
Sequía económica	Se refiere a la situación en la que la demanda de agua excede la oferta debido a la falta de disponibilidad de recursos hídricos.

Aunque los distintos tipos de sequías se definan por separado, esto no quiere decir que sus implicaciones sean independientes entre sí, de hecho, es lo opuesto. Por ejemplo, una sequía meteorológica prolongada puede llevar a una sequía hidrológica si las fuentes de agua superficiales y subterráneas no se recuperan adecuadamente. Esto, a su vez, puede resultar en una sequía agrícola si la falta de agua afecta la humedad del suelo y la disponibilidad de agua para el riego, eventualmente contribuyendo a una sequía socioeconómica si el suministro de agua para la sociedad y la economía se ve comprometido.

Una vez definidos los tipos de sequía que existen, lo importante ahora es definir en qué momento se tiene una sequía para poder caracterizarla, es decir, determinar su severidad, duración y frecuencia de ocurrencia. Realizar dicha tarea resulta complicado dada la compleja naturaleza del ciclo hidrológico, pero, pese a ello, a lo largo del tiempo se han desarrollado metodologías para la identificación de sequías en función de indicadores. Algunos de los más utilizados por su simpleza son el Standardized Precipitation Index ([SPI](#)) y Streamflow Drought Index ([SDI](#)) (Hayes et al., [2011](#); Nalbantis & Tsakiris, [2009](#)), los cuales cuantifican la magnitud de estos eventos de sequía, a su vez que mediante su interpretación y análisis se puede determinar su duración y frecuencia de ocurrencia. Cabe destacar que estos índices por sí mismos no son representativos del estado actual de los sistemas complejos de agua, ya que evalúan las sequías solo desde una perspectiva acerca de ellas, es por ello, que estos comúnmente forman parte de un grupo selecto de indicadores para llegar a tener un horizonte amplio que permita clasificar las sequías en función de su severidad.

Algunas de las metodologías más relevantes para clasificar las sequías se basan en el uso de criterios de expertos a la par de la ponderación de diversos índices de sequía, tal como lo hace el monitor de sequía estadounidense (Svoboda et al., [2002](#)), cuya metodología empleada ha sido adaptada por el Monitor de Sequía en México ([MSM](#)). Dicha metodología clasifica las sequías de acuerdo con su severidad en cinco categorías: D0 (anormalmente seco), D1 (sequía moderada), D2 (sequía severa), D3 (sequía extrema) y D4 (sequía excepcional).

A partir de estas categorías de sequía, las instituciones competentes pueden evaluar estrategias para planificar la gestión ante estos distintos niveles de sequía. En el país, la Comisión Nacional del Agua ([CONAGUA](#)) lanza el Programa Nacional Contra la Sequía ([PRONACOSE](#)), con el objetivo de prevenir y mitigar los impactos de la sequía, tanto ambientales como económicos y sociales (CONAGUA, [2022](#)). El [PRONACOSE](#) tiene tres lineamientos fundamentales, siendo el primero el monitoreo de las sequías para su alerta temprana, como segundo linea-

miento el encargar a cada uno de los veintiséis Consejos de cuenca del país la formulación de Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía (PMPMS) y finalmente la creación de una comisión intersecretarial para atender la sequía.

Dentro de los PMPMS se evalúa el estado de los recursos hídricos en cada una de las cuencas del país, particularizando las condiciones de estas y las medidas de actuación ante cada una de las categorías de sequía. Previo al surgimiento del PRONACOSE en el año 2013, las medidas de actuación ante eventos de sequía eran reactivas y no preventivas, objetivo que instaaura el PRONACOSE en sus lineamientos principales de monitorear, planificar y mitigar los efectos negativos de las sequías. Sin embargo, de acuerdo con Aguilar-Barajas et al. (2016) existe una problemática con ello y es la estructura institucional para la gestión del agua en el país, siendo que existen múltiples actores en los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), lo que ocasiona que las responsabilidades se dispersen, generando grandes desafíos de comunicación y coordinación. Esto se ve reflejado en que los PMPMS carecen de una estructura sistematizada y constante en los procedimientos involucrados para identificar, planificar y gestionar los recursos hídricos ante los eventos de sequía.

Un modelo para seguir en temas de gestión de recursos hídricos es el caso de España, país que ha sufrido frecuentemente las devastadoras consecuencias de intensas sequías y la escasez de agua. En este contexto, en España se han hecho numerosos esfuerzos por mejorar la gestión del agua, que como es el caso de México, pasando de la tradicional gestión reactiva a una gestión preventiva (Hervás-Gámez & Delgado-Ramos, 2019). En España, los organismos de cuenca llamados confederaciones hidrográficas son los responsables de emitir los Planes Especiales de Sequía (PES), los cuales identifican de manera objetiva las sequías prolongadas y situaciones de escasez, para los cuales realizan valoraciones cuantitativas para establecer medidas de actuación ante estos eventos (CHJ, 2018). La principal diferencia entre los PES y los PMPMS radica en la estrecha colaboración y comunicación entre las instituciones en diferentes niveles de gobierno, lo cual se ve reflejado en los procesos involucrados en el desarrollo de estos planes de gestión. En particular, dentro de los PES se aprecia una metodología estructurada, cuyas medidas de actuación se basan en valoraciones cuantitativas fundamentadas en modelos de gestión, donde se simula dicha gestión bajo diferentes escenarios, contrario a lo que se puede encontrar en los PMPMS que, en su mayoría, solo se proponen metas generales de reducciones de demandas donde no se demuestra que dichas metas mejoren las condiciones de los sistemas de agua durante un evento de sequía.

2.1.1.1 Índices de estado en los Planes Especiales de Sequía (PES)

Dentro de los PES, el diagnóstico se estructura como un *sistema doble*: por una parte, la *sequía prolongada*, asociada a déficits persistentes de precipitación y sus efectos hidrológicos, y por otra la *escasez coyuntural*, entendida como la insuficiencia temporal de recursos para atender las demandas con el nivel de garantía establecido (MITECO, 2018, 2025a, 2025b). La distinción es importante porque la escasez puede aparecer aun sin una señal meteorológica extrema, debido a la combinación de demandas, reglas de operación, restricciones ambienta-

les, capacidad de regulación y dependencia de determinadas fuentes (Estrela & Vargas, 2012; European Commission, 2007a; MITECO, 2025a). Este marco se formaliza en la normativa del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y se operacionaliza en documentos técnicos de las confederaciones, p. ej. la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) (CHJ, 2023; MITECO, 2018, 2025a).

En términos instrumentales, ambos diagnósticos se expresan mediante *índices de estado* adimensionales (0–1) que sintetizan variables representativas, permiten clasificar el sistema por escenarios y enlazan de forma trazable con medidas de actuación (CHJ, 2023; European Commission, 2007b; MITECO, 2025b). Para la sequía prolongada se emplea el Índice de Estado de Sequía (IES), basado en indicadores meteorológicos estandarizados (por ejemplo, acumulados a 12 meses), mientras que la escasez coyuntural se representa con el IEE, que captura el desempeño operativo del sistema (MITECO, 2018, 2025a; World Meteorological Organization, 2012).

El IEE se construye por Unidad Territorial de Escasez (UTE), de modo que el indicador sea representativo del subsistema donde se toman decisiones de operación y asignación. Para ello se seleccionan variables hidrológicas y operativas pertinentes (p. ej. series temporales de escurrimientos, niveles piezométricos, volúmenes almacenados en presas, trasvases y precipitación acumulada). Para capturar la persistencia temporal de las condiciones hidrológicas, se emplean acumulados o promedios móviles (como precipitación a 12 meses y aportaciones con promedio móvil de 3 meses); después se reescalan a un índice de estado común y se agregan mediante ponderaciones que reflejan su relevancia en cada unidad (CHJ, 2023, 2025; MITECO, 2018).

Antes del reescalado se elimina la componente estacional de cada variable mediante una estandarización por mes, con el fin de evitar que el diagnóstico dependa de si el mes es típicamente húmedo o seco (CHJ, 2025). La estandarización se expresa como:

$$V_i = \frac{U_{x,y} - \bar{U}_x}{s_{U_x}}, \quad (2.1)$$

donde $U_{x,y}$ es el valor de la variable en el mes x y año y , $\bar{U}_x$ es el promedio del mes x en la serie de referencia y s_{U_x} su desviación estándar.

El reescalado a índice de estado se realiza con una función por tramos basada en percentiles de la serie de referencia, evitando que los valores extremos dominen el diagnóstico (CHJ, 2025). Para una variable $V_{i,t}$, el índice de estado $I_{i,t}$ queda.

$$I_{i,t} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_{i,t} - V_{med}}{V_{p95} - V_{med}} \right), & V_{i,t} \geq V_{med} \\ \frac{V_{i,t} - V_{p5}}{2 (V_{med} - V_{p5})}, & V_{i,t} < V_{med} \end{cases} \quad (2.2)$$

donde V_{med} es la mediana de la serie de referencia y V_{p95} y V_{p5} son los percentiles 95 y 5, respectivamente.

El **IEE** mensual se obtiene mediante agregación ponderada:

$$IEE_t = \sum_{i=1}^n w_i I_{i,t} \quad \text{con} \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (2.3)$$

donde $I_{i,t}$ es el índice de estado de la variable i en el mes t y w_i su peso (definido por relevancia operativa, como volumen regulado, demanda abastecida, aportaciones esperadas o contribución histórica a la garantía del sistema). Este esquema permite reproducir episodios históricos de escasez y contrastar el diagnóstico con déficits simulados en modelos de gestión (CHJ, 2023; Palop-Donat et al., 2020).

Una vez calculado el **IEE**, se traduce a escenarios discretos (normalidad, prealerta, alerta y emergencia) con umbrales guía y reglas explícitas de entrada/salida para evitar cambios espurios por variabilidad de corto plazo (CHE, 2024; CHJ, 2025; CHS, 2023). La Tabla 2.2 resume la correspondencia entre rangos del índice de estado y la tipología de medidas.

En esta investigación se adopta el **IEE** como eje del diagnóstico, ya que conecta de forma directa con el desempeño oferta–demanda y con la activación de acciones. En consecuencia, se privilegia la selección de variables con significado operativo, su estandarización en una escala común y su síntesis en un indicador único por unidad para evaluar la eficacia de los escenarios propuestos (European Commission, 2007b; Palop-Donat et al., 2020).

Tabla 2.2: Tipología de medidas de actuación en función del escenario de sequía diagnosticado. Modificado de CHJ (2018).

Escenario de sequía	Valor del índice de estado (I_e)	Tipología de acciones y medidas a llevar a cabo
Normalidad	$I_e > 0.50$	Planificación hidrológica general y seguimiento.
Prealerta	$0.30 \leq I_e \leq 0.50$	Concienciación, ahorro y seguimiento del consumo (ahorro y demanda), de gestión y seguimiento.
Alerta	$0.15 < I_e < 0.30$	Medidas de restricción (ahorro y demanda), de control y seguimiento.
Emergencia	$0 \leq I_e \leq 0.15$	Intensificación de las medidas consideradas en alerta y posible adopción de medidas excepcionales.

2.1.1.2 Indicadores estructurales para el diagnóstico operativo de presas

Para seleccionar reglas de operación conviene caracterizar cada presa con indicadores sintéticos que describan su capacidad de regulación, su eficiencia física y la presión de la demanda. Un indicador clásico es el *storage ratio* (capacidad de regulación), definido como la

relación entre el volumen útil y la aportación media anual (Langbein, 1959; D. P. Loucks & van Beek, 2017):

$$K = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\overline{Q}_a}, \quad (2.4)$$

donde $V_{\max} - V_{\min}$ es la capacidad útil y $\overline{Q}_a$ la aportación media anual. Valores bajos de K reflejan sistemas de paso (regulación limitada), mientras que valores altos indican regulación anual o multianual.

La *eficiencia del vaso* se aproxima mediante la fracción de entradas no perdida por evaporación, a partir del balance hídrico del embalse (D. P. Loucks & van Beek, 2017):

$$\eta = 1 - \frac{E}{\sum I_t}, \quad (2.5)$$

siendo E la evaporación acumulada del periodo y $\sum I_t$ la suma de aportaciones. Este indicador penaliza presas con grandes superficies expuestas y altas láminas de evaporación, donde el costo de almacenar agua se incrementa.

Finalmente, el *índice de estrés* se expresa como la relación demanda–aportación media anual:

$$S = \frac{\overline{D}_a}{\overline{Q}_a}, \quad (2.6)$$

que es consistente con el enfoque de *water stress* basado en extracción respecto a disponibilidad (Vörösmarty et al., 2000). Estos indicadores no sustituyen a los índices de estado, pero permiten distinguir la viabilidad relativa de ciertas reglas en cada presa.

2.1.1.3 Reglas de operación y estrategias ante sequía

Las reglas de operación traducen el almacenamiento y las aportaciones esperadas en decisiones de liberación. Un enfoque base es la Operación Estándar (Standard Operating Policy (SOP), por sus siglas en inglés), donde se entrega la demanda mientras exista disponibilidad; las curvas guía fijan niveles objetivo de almacenamiento para separar zonas de conservación y control de avenidas, y suelen derivarse de modelos de optimización (D. P. Loucks & van Beek, 2017; Lund & Ferreira, 1996).

En condiciones de escasez, el *hedging* (racionamiento preventivo) introduce recortes anticipados de suministro para reducir el riesgo de fallas severas en el futuro. Su fundamento teórico muestra que aceptar déficits moderados en el presente puede disminuir la vulnerabilidad del sistema cuando el almacenamiento es crítico (Shih & ReVelle, 1994; You & Cai, 2008). Complementariamente, las estrategias de *adaptive operating rules* (demanda adaptativa) ajustan la asignación de agua según el estado del sistema y la información disponible, y han mostrado mejorar el desempeño frente a reglas estáticas (Garrote et al., 2023).

En años húmedos, la *surplus operation* (operación de excedencias) busca aprovechar aportaciones altas y recuperar niveles objetivo sin comprometer la seguridad hidrológica, además

de permitir usos secundarios cuando hay excedentes, por ejemplo Managed Aquifer Recharge (MAR), o recarga gestionada de acuíferos (Maliva & Missimer, 2012). En sistemas con baja eficiencia puede ser preferible evitar almacenamiento prolongado y favorecer reglas más flexibles. En conjunto, estas herramientas permiten adaptar la gestión a la capacidad de regulación, a las pérdidas por evaporación y al nivel de estrés del subsistema.

2.1.1.4 Formulación y optimización de reglas operativas

En la práctica, las reglas se representan mediante parámetros simples (umbrales de almacenamiento, factores de recorte y volúmenes anuales autorizados) y se derivan como un problema de optimización con múltiples objetivos y restricciones (Labadie, 2004; D. P. Loucks & van Beek, 2017; Yeh, 1985). Este tipo de problemas suele ser no lineal y altamente condicionado por límites físicos y operativos, por lo que se emplean enfoques de programación dinámica y métodos heurísticos/evolutivos cuando la dimensión del sistema impide soluciones analíticas (Labadie, 2004). En particular, los algoritmos genéticos han sido ampliamente utilizados para explorar combinaciones de parámetros de reglas operativas y balancear compromisos entre confiabilidad, déficit y aprovechamiento de excedencias (Goldberg, 1989).

En décadas recientes, la optimización ha evolucionado hacia enfoques de simulación-optimización y metaheurísticas multiobjetivo que permiten explorar compromisos entre confiabilidad, déficit y excedencias bajo incertidumbre (Maier et al., 2014). También se han desarrollado marcos de decisión robusta de múltiples objetivos que amplían el análisis de reglas operativas hacia el desempeño en escenarios futuros (Hadka et al., 2015).

2.1.1.5 Evaluación del desempeño de reglas operativas

La comparación de reglas operativas suele basarse en los indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad, conocidos como RRV, propuestos por Hashimoto et al. (1982). La confiabilidad se define como la fracción de tiempo sin falla:

$$\text{Rel} = 1 - \frac{N_f}{N}, \quad (2.7)$$

donde N_f es el número de periodos con déficit y N el total de periodos. La resiliencia mide la capacidad de recuperación después de una falla:

$$\text{Res} = \frac{N_{f \rightarrow s}}{N_f}, \quad (2.8)$$

siendo $N_{f \rightarrow s}$ el número de transiciones de falla a no falla. La vulnerabilidad resume la magnitud media del déficit durante fallas, por ejemplo en forma relativa respecto a la demanda:

$$\text{Vul} = \left(\frac{D_t - S_t}{D_t} \right) \quad \text{para } D_t > S_t. \quad (2.9)$$

donde D_t es la demanda del periodo t y S_t el suministro correspondiente.

Para integrar estos criterios se emplea el Índice de Sustentabilidad, **SI** (Sustainability Index (**SI**), por sus siglas en inglés), definido como la media geométrica de confiabilidad, resiliencia y el complemento de vulnerabilidad (D. P. Loucks & van Beek, 2017; Sandoval-Solis et al., 2011):

$$SI = (\text{Rel} \cdot \text{Res} \cdot (1 - \text{Vul}))^{1/3}. \quad (2.10)$$

Estos indicadores permiten evaluar compromisos entre seguridad del suministro y severidad de las fallas, y son adecuados para comparar reglas en un marco común.

2.1.1.6 Aplicaciones de la GIRH en medidas de actuación

Como se ha mencionado anteriormente, la identificación de la severidad de una sequía permite planificar medidas de actuación que mitiguen sus efectos negativos. Dicha planificación debe estar fundamentada del conocimiento técnico y las particularidades de la zona en estudio, en donde se evalúe el efecto que tendrán las medidas de actuación no sólo en el sistema en consideración, sino también en el contexto socioeconómico. En la Tabla 2.3 se presenta una reseña de trabajos previos donde se aplica lo anteriormente mencionado a fin de plantear acciones ante distintos escenarios que pueden comprometer la garantía del agua.

Tabla 2.3: Reseña de trabajos que emplean la GIRH para la determinación de medidas de actuación ante distintas problemáticas asociadas con la gestión del agua.

Año	Trabajo	Hallazgos y/o conclusiones	Referencia
2012	Evaluación de las fuentes abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de Monterrey	La demanda de agua para 2025 podría satisfacerse al 100 % si el consumo per cápita se reduce a 170 litros por día y la eficiencia del sistema de distribución aumenta al 80 %	Cedillo de Lucas (2012)
2013	Gestión conjunta de recursos hídricos a escala local. Aplicación del modelo Simges al caso de Hellín (Albacete)	Reduciendo la dotación un 10 % y modernizando los sistemas de riego podrían recuperar el manantial de Hellín en 5 a 10 años	Pérez-Sánchez (2013)
2014	Manejo conjunto del agua en la subcuenca Támula-Picachos, Guanajuato, México	El descenso de los niveles piezométricos puede mitigarse si se reduce la demanda en un 30 % y se aumenta la capacidad de filtración de las presas	Hernández et al. (2014)

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.3: (Continuación)

Año	Trabajo	Hallazgos y/o conclusiones	Referencia
2015	Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China	El aumento en un 90 % de la reutilización de agua tratada del sector industrial podría mejorar la satisfacción de la demanda creciente prevista en un 18 % para 2020	Li et al. (2015)
2016	Modeling Water Supply and Demand for Effective Water Management Allocation in Selangor	La instalación de equipos de ahorro de agua en la mitad de las viviendas puede reducir la demanda en un 14 % para un crecimiento poblacional alto para 2050	Firdaus & Talib (2016)
2017	Climate change and water resources management of Oran region	La reutilización de 66.6 millones de m ³ de aguas residuales permitirá que el sector agrícola crezca a una tasa del 6.7 % anual, aliviando el estrés hídrico sobre las aguas subterráneas	Boukilia-Hassane et al. (2017)
2018	Evaluación del Riesgo de Sequía Operativa, en el Sistema de Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Tepalcatepec	Se identificaron periodos críticos con probabilidad mensual de sequía operativa superior al 50 %, aportando un umbral cuantitativo para activar medidas preventivas	González-Arreguín (2018)
2019	Adaptation to Future Water Shortages in the United States Caused by Population Growth and Climate Change	Incrementar la capacidad de almacenamiento de las presas en un 10 %, 25 % y 50 % reduce la escasez media anual de agua en el período futuro medio en un 8 %, 12 % y 16 %, respectivamente	Brown et al. (2019)
2020	Integrating equality in evaluation of water access for irrigation in an Andean community	La satisfacción de la demanda puede aumentar a un 80 % si se aumenta la capacidad de la presa Marquina en un 25 %	Terrazas et al. (2020)

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.3: (Continuación)

Año	Trabajo	Hallazgos y/o conclusiones	Referencia
2021	Integrated hydro-economic modeling for optimal design of development scheme of salinity affected irrigated agriculture in Helleh River Basin	La escasez puede reducirse significativamente mediante la construcción de 3 presas nuevas y mejorando y desarrollando 19,930 hectáreas de área de riego	Aein & Alizadeh (2021)
2022	Water Demand and Supply Analysis using WEAP Model for Veda River Basin Madhya Pradesh (Nimar Region), India	El déficit de satisfacción de agua puede reducirse en un 54 % para 2030 si se ejercen políticas que reduzcan el consumo doméstico e industrial en un 15 % en conjunto con la construcción de estructuras que promuevan la recarga de agua subterránea en un 17 %	Carpenter & Choudhary (2022)
2023	WEAP Model Based Evaluation of Future Scenarios and Strategies for Sustainable Water Management in the Chennai Basin, India	La demanda no satisfecha puede reducirse en un 54 % para 2050 aumentando la recarga de agua subterránea en un 10 % y aumentando la capacidad de desalinización en un 200 %	RaziSadath et al. (2023)
2024	Practical drought risk assessment and management framework: A step toward sustainable modernization in agricultural water management	La modernización operativa del riego puede reducir impactos por sequía entre un 4 y 56 % en escenarios severos, mejorando la confiabilidad de la distribución	Pourmahmoud et al. (2024)

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.3: (Continuación)

Año	Trabajo	Hallazgos y/o conclusiones	Referencia
2025	Integrated Water Allocation Modeling Under Future Development Scenarios in the Juba River Basin, Somalia: A WEAP-Based Approach for Sustainable Water Management	Incrementar la eficiencia de riego (45 % a 60 %) puede reducir de forma sustancial las carencias futuras; la planificación integrada mejora la asignación y amortigua los déficits en 2030–2050	Dhaqane et al. (2025)

Existe un trabajo anterior en la CRT llamado «Evaluación Del Riesgo de Sequía Operativa, En El Sistema de Recursos Hídricos de La Cuenca Del Río Tepalcatepec» (González-Arreguín, 2018), cuyo objetivo es el de la creación de un modelo de gestión para evaluar el riesgo de sequía operativa en la zona de estudio. Dicho trabajo tiene un valioso aporte en el entendimiento de la evolución de los recursos hídricos de la CRT el cual se centra en generar proyecciones mediante series estocásticas que representen escenarios climáticos extremos, con la finalidad de evaluar (A través del modelo de gestión) la probabilidad de ocurrencia de una sequía operativa en la zona de estudio bajo diferentes escenarios de demanda.

El acercamiento para el análisis del riesgo de sequía se basa en caracterizar la sequía meteorológica e hidrológica mediante el SPI y SDI respectivamente, mientras que para evaluar el riesgo de sequía operativa se hace uso del Operational Drought Risk Index (ODRI). Esto representa el punto clave para poder entender y diferenciar la propuesta que se plantea en esta investigación.

Con lo establecido anteriormente, la diferencia principal radica en que el fenómeno de sequía se analiza con los índices mencionados de forma aislada, para lo cual esta investigación propone una perspectiva integral, no sólo considerando los escurrimientos superficiales, sino también los niveles de almacenamiento en las presas y los niveles piezométricos. De esta manera, al unificarse en función de los índices de estado, se puede determinar con mayor claridad la situación histórica y actual de los recursos hídricos, simplificando la interpretación del estado del sistema, haciéndolo accesible para tomadores de decisiones, habilitando la posibilidad de conocer el estado actual y proyectado del sistema si se le introducen datos actuales y proyectados, con la intención de lograr la GIRH.

2.1.2 Modelación matemática

Un modelo, de acuerdo con la Real Academia Española (RAE, 2023), puede definirse como:

Arquetipo o punto de referencia para imitarlo o reproducirlo; esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

Por lo tanto, un modelo matemático es una representación en términos matemáticos del comportamiento de los fenómenos que ocurren en nuestra realidad (Dym, 2004). A través de estos modelos, intentamos entender la naturaleza de lo que nos rodea, con la finalidad de darle solución a un determinado problema.

Un problema particular en el estudio de la hidrología, son las limitaciones técnicas que imposibilitan medir todo lo que nos gustaría saber acerca de los sistemas hidrológicos, donde se dispone de una gama limitada de técnicas de mediciones en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto, es necesario disponer de un medio para extrapolar las mediciones disponibles en el espacio y en el tiempo, en particular a las cuencas no aforadas y al futuro (donde no se dispone de mediciones y donde no es posible realizar mediciones, respectivamente) para evaluar el impacto probable del cambio hidrológico futuro (Beven, 2012).

Es por estas razones, que nace la necesidad de desarrollar medios para comprender la respuesta hidrológica de las cuencas, a fin de estimar la disponibilidad del agua y sus cambios a lo largo del tiempo (Vaze et al., 2012). El estudio de la hidrología, para el entendimiento del manejo del agua, puede remontarse desde el mundo antiguo con sistemas de irrigación en Mesopotamia y Egipto, y los acueductos en Grecia y Roma, hasta complejos modelos matemáticos en el siglo XXI (Rosbjerg & Rodda, 2019). Los denominados modelos hidrológicos han tenido un auge con la llegada de las computadoras en la década de 1950, permitiendo el desarrollo de modelos más avanzados que describen procesos hidrológicos complejos, consolidando la hidrología como una ciencia moderna y de gran importancia (Biswas, 1970).

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse según diferentes criterios, algunos investigadores los clasifican en función de la discretización espacial, del tipo de entradas y salidas, de su simplicidad, entre otros (Sitterson et al., 2018). Sin embargo, algunas de las clasificaciones más relevantes, son en función de la estructura del modelo y de su discretización espacial.

La estructura del modelo determina cómo se calculan los diferentes procesos de un sistema hidrológico, y se clasifican en modelos empíricos, conceptuales y físicos. Los modelos empíricos son simples y usan relaciones observadas en datos históricos para simular procesos como el escurrimiento. Los modelos conceptuales simplifican procesos hidrológicos para representar comportamientos generales, y, los modelos físicos o basados en ecuaciones, se fundamentan en leyes físicas y matemáticas para capturar respuestas hidrológicas reales. Cada una de estas estructuras de modelos tienen sus ventajas y desventajas (ver Tabla 2.4), siendo los modelos empíricos los más simples y los modelos físicos los más complejos, pero que requieren un conocimiento profundo de la física involucrada en el ciclo hidrológico (Srinivasulu & Jain, 2008). De acuerdo con Melsen et al. (2016), el rendimiento de los modelos está principalmente limi-

tado a la elección de la estructura del modelo y no precisamente a la cantidad de parámetros que se utilicen.

Tabla 2.4: Comparación de la estructura de los modelos hidrológicos. Modificado de Sitterson et al. (2018).

	Empírico	Conceptual	Físico
Método	Relación no lineal entre las entradas y salidas, concepto de caja negra	Ecuaciones simplificadas que representan el almacenamiento de agua	Leyes físicas y ecuaciones basadas en respuestas hidrológicas reales
Fortalezas	Utilizan pocos parámetros y tienen un tiempo de ejecución rápido	Fáciles de calibrar y su estructura de modelo es simple	Toman en cuenta la variabilidad espacial y temporal y operan a una escala muy fina
Debilidades	No existe una conexión con el medio físico	No consideran la variabilidad espacial y temporal	Requieren calibrar una gran cantidad de parámetros

La clasificación de los modelos hidrológicos en función de su representación espacial se divide en modelos agregados, semi-distribuidos y distribuidos. Los modelos agregados consideran la cuenca como una entidad única sin detallar la distribución espacial. Los modelos semi-distribuidos incorporan algunas características a nivel de subunidades de la cuenca, brindando una simulación más realista pero aún simplificada, y, finalmente, los modelos distribuidos representan la cuenca con una distribución espacial detallada de características como topografía y uso del suelo, lo que permite una simulación precisa y completa de la respuesta hidrológica. Una representación visual de esta discretización espacial de los modelos se presenta en la Figura 2.1.

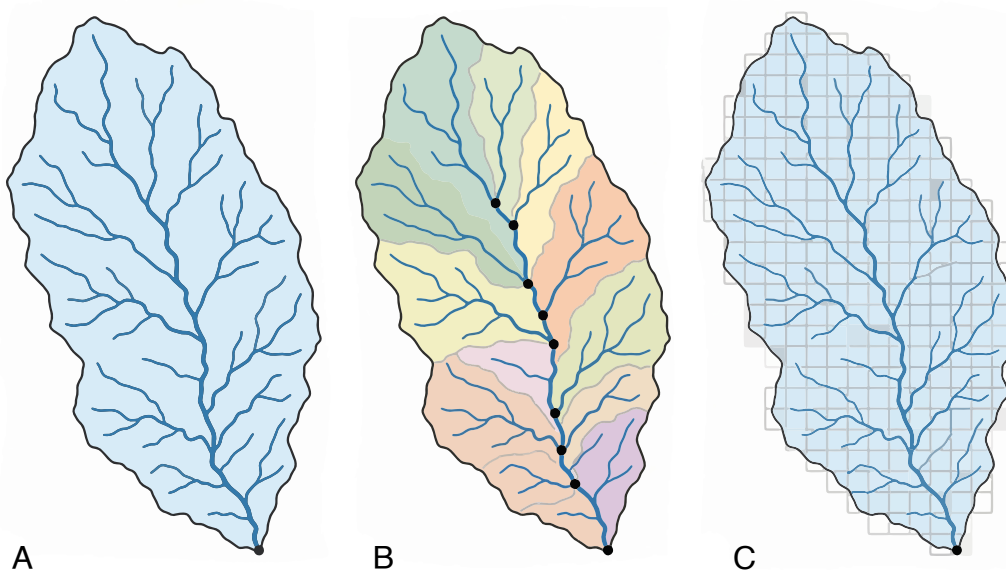


Figura 2.1: Discretización espacial de los modelos hidrológicos: agregado (A), semi-distribuido (B) y distribuido (C). Modificado de Sitterson et al. (2018).

Dada la amplia gama de modelos hidrológicos que existen, la elección de uno u otro depende del propósito de la investigación, de la escala temporal, resolución espacial y de la cantidad de información con la que se cuente.

2.2 Gestión de información meteorológica

Los datos meteorológicos son registros de las condiciones atmosféricas en un lugar y momento específicos. Estos son recogidos por distintos instrumentos, que en su conjunto conforman las denominadas estaciones meteorológicas, las cuales se distribuyen en diferentes ubicaciones geográficas. Entre los datos que recopilan las estaciones, se incluyen variables como temperatura, precipitación, humedad, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, radiación solar, entre otros.

Una tarea básica y fundamental para cualquier estudio que requiera de la utilización de esta información, es darle un tratamiento previo para que estos datos puedan ser utilizados de acuerdo con el propósito de la investigación. A dicha tarea se le conoce comúnmente como gestión de datos, que involucra la recolección y procesamiento de estos datos.

2.2.1 Tratamiento de datos meteorológicos

Los datos meteorológicos son de vital importancia para el estudio del comportamiento del clima, el cual tiene influencia directa en la gran mayoría de las actividades humanas. Algunos trabajos como lo son los de gestión del agua, control de inundaciones, análisis de sequías y sobre todo de cambio climático, dependen de la cantidad y calidad de datos con los que se

cuenta. En particular, es fundamental que dichos datos sean homogéneos, es decir, que su variabilidad se deba únicamente a variaciones climáticas (Aguilar-Barajas et al., 2016).

De acuerdo con Aguilar-Barajas et al. (2016) la mayoría de las series de datos meteorológicos en el largo plazo se han visto afectadas por una serie de factores no climáticos que repercute en que estos datos no sean representativos. Algunos de los factores más frecuentes incluyen cambios en la instrumentación, en la ubicación de la estación meteorológica, en la formulación para calcular medias y en la operación de los equipos. Algunos de estos cambios pueden ocasionar ligeras discontinuidades en la información, mientras que otros (especialmente los cambios en el entorno alrededor de la estación) pueden ir introduciendo sesgos en la información con el paso del tiempo. Finalmente, la acumulación de estas inhomogeneidades puede dar lugar a conclusiones erróneas cuando se estudia el clima, es por esto, que nace la necesidad de corregir las inhomogeneidades en la mayor medida posible, o al menos, detectar el origen de estas.

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2020), existen diversas metodologías para la homogeneización de datos meteorológicos, diferenciándose principalmente entre métodos manuales y automáticos. Los métodos manuales son aquellos que dependen del criterio de expertos en el entendimiento del clima para evaluar y ajustar las series de datos. Por otro lado, los métodos automáticos se basan en la utilización de pruebas estadísticas para la detección y ajuste de puntos de cambio en las series temporales. Ambos enfoques tienen sus ventajas y desventajas, en los métodos manuales, el ajuste de los datos puede verse beneficiado por el criterio de un experto con un fuerte entendimiento de las condiciones climáticas particulares de una zona determinada, pero dichos criterios pueden introducir subjetividad al análisis, llevando a que este carezca de fundamentos. Por otro lado, en los métodos automáticos, se pueden homogeneizar grandes conjuntos de datos de forma eficiente, con ajustes estadísticamente fundamentados, pero, aun así, pueden presentar desafíos a la hora de identificar puntos de cambio, aumentando el riesgo de sobrehomogeneización.

Actualmente, existen múltiples metodologías y herramientas computacionales que permiten el proceso de homogeneización de datos de variables meteorológicas. En la Tabla 2.5 se presentan algunas de las herramientas más relevantes que se han desarrollado en los últimos años.

Tabla 2.5: Resumen de las características de las herramientas de homogeneización.

Nombre	Método de corrección	Variables meteorológicas*	Referencias
ACMANT	Análisis de la varianza	Temperatura y precipitación	Domonkos & Coll (2017)
AnClim	Diversos	Cualquiera	Štěpánek et al. (2009)

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.5: (Continuación)

Nombre	Método de corrección	Variables meteorológicas	Referencias
Climatol	Llenado de datos faltantes	Cualquiera	Guijarro (2004)
HOMER	Análisis de la varianza	Cualquiera	Mestre et al. (2013)
MASH	Comparaciones múltiples	Cualquiera	Szentimrey (2018)
RHtests	Regresión multifase	Cualquiera	Wang & Feng (2013)

* Siendo precipitación, temperatura, evaporación, humedad relativa y velocidad del viento las variables meteorológicas consideradas.

El proyecto español MULTITEST es una iniciativa que tiene el propósito de evaluar el rendimiento de las distintas metodologías de homogeneización de datos meteorológicos. Por medio de dicho proyecto, Guijarro et al. (2023) concluyen que si bien la mayoría de las herramientas evaluadas tuvieron un buen desempeño, ACMANT, seguido por Climatol, fueron los que destacaron sobre los demás.

En particular, Climatol, al ser una herramienta que funciona como un paquete dentro del lenguaje de programación R (R Core Team, 2021), facilita su integración con bases de datos meteorológicos para su procesamiento, siendo una herramienta ampliamente utilizada incluso en distintas investigaciones dentro del país. A pesar de las limitaciones que presentan las bases de datos meteorológicos nacionales, Climatol ha sido una herramienta esencial en la realización de diversas investigaciones en torno al cambio climático en diferentes regiones del país (Montero-Martínez et al., 2018; Pita-Díaz & Ortega-Gaucin, 2020; Soares & Peña, 2018). Por todo lo anterior, para la presente investigación, se decide utilizar y profundizar en la herramienta Climatol para el tratamiento de datos meteorológicos.

Climatol opera con los datos observados de las estaciones meteorológicas, incluyendo los metadatos de las estaciones (nombre y clave de la estación, su longitud, latitud y altitud). El procedimiento de homogeneización comienza con el cálculo de las medias y desviaciones estándar de los datos disponibles, estos son provisionales solo para proceder a la normalización de dichos datos disponibles.

Para la normalización, existen tres alternativas, tal como se muestra en las ecuaciones 2.11; 2.12; 2.13, cada una siendo más adecuada para diferentes variables meteorológicas (por ejemplo, de acuerdo con Guijarro (2004), la ecuación 2.12 se adecúa mejor para precipitación, mientras que la ecuación 2.13 funciona mejor para temperatura y velocidad del viento).

$$x = X - m_x \quad (2.11)$$

$$x = \frac{X}{m_x} \quad (2.12)$$

$$x = \frac{X - m_x}{s_x} \quad (2.13)$$

Donde x es el dato normalizado; X es el dato original; m_x es la media de la serie original de X y s_x es la desviación estándar de la serie original X . La ecuación 2.11 consiste en simplemente restar la media, la ecuación 2.12 en dividir por la media y la ecuación 2.13 en estandarizar.

Una vez teniendo los datos normalizados, se procede a la estimación de los datos faltantes, para ello se utiliza el método de Paulhus & Kohler (1952), presentado en la ecuación 2.14.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j x_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (2.14)$$

Donde $\hat{y}$ es el dato estimado; x_j es el dato disponible de la estación vecina; w_j es el peso de la estación vecina (determinado en función de su cercanía con la estación con el valor a estimar) y n es el número de datos disponibles a utilizar.

Con los datos faltantes estimados, se deshace la normalización para obtener las series temporales completas. Sin embargo, ya que la normalización se realizó con medias y desviaciones provisionales, con estas series temporales completas se deben calcular nuevas medias y desviaciones, volver a normalizar, estimar los datos faltantes, deshacer la normalización y calcular nuevamente las medias y desviaciones. Este proceso es iterativo, ya que no para hasta que las medias y desviaciones se estabilicen, es decir, que no cambien significativamente. Llegado este punto, se realiza una última ronda para estimar los datos faltantes en todas las series, tanto si presentan faltantes como si no.

A partir de las series completas, se calculan las series de anomalías, definidas como la diferencia de los datos estimados y los observados, basado en un modelo de regresión lineal. Estas series de anomalías son muy útiles ya que permiten detectar datos anómalos (por defecto, se consideran sospechosos entre 7 y 9 desviaciones estándar, y se rechazan por encima de 9 desviaciones estándar). Si se rechazan datos anómalos, estos se estiman como anteriormente se explicó: iterando hasta que las medias y desviaciones se estabilicen. A esta fase también se le denomina fase de control de calidad, previa a la fase de detección de inhomogeneidades.

La prueba de homogeneidad utilizada es el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) (Alexandersson, 1986), o prueba de homogeneidad normal estándar, la cual fue desarrollada para identificar cambios abruptos en la media de una serie temporal y es ampliamente utilizada para evaluar la homogeneidad de series meteorológicas.

La prueba consiste en dividir la serie en un punto de cambio, obteniendo así subseries. Se calcula la media y desviación de la serie, luego, dicha serie se estandariza mediante la ecuación 2.15. A partir de las subseries, se calculan las medias de las subseries mediante las ecuaciones 2.16; 2.17, y, con ellas se determina el estadístico de la prueba con la ecuación 2.18 y se compara con sus niveles críticos asociados a los niveles de significancia. De esta manera se decide si se acepta la hipótesis nula (es decir, considerar la serie como homogénea bajo los términos de la prueba).

$$z_i = \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \quad (2.15)$$

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a z_i \quad (2.16)$$

$$\bar{z}_2 = \frac{1}{n-a} \sum_{i=a+1}^n z_i \quad (2.17)$$

$$T_0 = \max_{1 < a < n} (T_a) = \max_{1 < a < n} [a\bar{z}_1^2 + (n-a)\bar{z}_2^2] \quad (2.18)$$

Donde T_0 es el estadístico de la prueba, y_i , $\bar{y}$ y s_y son el dato, la media y la desviación de la serie completa respectivamente; $\bar{z}_1$ y $\bar{z}_2$ son las medias de las subseries antes y después del punto de cambio a .

El principal problema del SNHT es que no determina la ubicación de los puntos de cambio. Por ello, para minimizar este problema, la serie temporal se divide en ventanas solapadas de un intervalo fijo en donde se evalúa la homogeneidad y así detectar estos puntos de cambio. Mientras se aplique la prueba lo largo de las ventanas solapadas, si se alcanza un cierto umbral máximo de inhomogeneidades permitidas (definidas en 25 por defecto), se cortan las series en el punto de máxima inhomogeneidad, generando así una nueva subserie. A partir de este momento, se regresa a la primera fase, donde se vuelven a calcular y estabilizar las medias y desviaciones de las series fragmentadas, estimando nuevos valores, para volver a aplicar la prueba en los fragmentos de las series, siendo este un proceso iterativo que termina hasta que no se detecten inhomogeneidades, obteniendo finalmente, las series temporales completas y corregidas.

2.2.2 Determinación de evapotranspiración potencial

El Soil Science Society of America (2023) define la evapotranspiración como la pérdida combinada de agua de un área determinada, y durante un periodo de tiempo específico, por evaporación de la superficie del suelo y por transpiración de las plantas. La evaporación y transpiración del agua son fenómenos que ocurren simultáneamente, y dada su compleja naturaleza, resulta complicado el poder cuantificarlos con precisión. Sin embargo, esto no ha limitado el desarrollo de metodologías para la estimación de la evapotranspiración, en términos de la Evapotranspiración Potencial (ETP).

De acuerdo con Kirkham (2014), el término **ETP** fue acuñado por Thornthwaite (1948) y Penman (1948). La definición de Thornthwaite tiene un enfoque mayormente empírico y centrado en el uso observado del agua por la vegetación, mientras que Penman se basa en principios físicos y termodinámicos para calcular la **ETP** a partir de datos meteorológicos.

Una definición general que englobe el enfoque de ambos investigadores sería que la **ETP** es la cantidad máxima de agua que se puede evaporar y transpirar desde una superficie cubierta de vegetación, dada una disponibilidad de agua ilimitada y bajo condiciones climáticas ideales. Esta tasa de evapotranspiración depende de factores climáticos como la temperatura, radiación solar, humedad y velocidad del viento, y se asume un suministro de agua suficiente en el suelo o una superficie saturada.

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes métodos con el objetivo de estimar la **ETP**, siendo algunos de los más relevantes los que se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Métodos para la determinación de la **ETP**.

Método	Ecuación
Thornthwaite (1948)	$ETP = 16c \left(\frac{10T_{med}}{I} \right)^a \quad (2.19)$
Penman (1948)	$ETP = 0.35 \left(\frac{1 + 0.98}{100U_2} \right) (e_s - e_a) \quad (2.20)$
Blaney & Criddle (1950)	$ETP = KP(0.46T_{med} + 8.13) \quad (2.21)$

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.6: (Continuación)

Método	Ecuación
Turc (1961)	$ETP = 0.40 \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \times (R_s + 50) \quad (2.22)$
Hargreaves (1994)	$ETP = 0.0023 R_s \times (T_{med} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (2.23)$
Penman & Monteith (Allen et al., 1998)	$ETP = \frac{0.408 \Delta (R_n - G)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \times \frac{\gamma \left(\frac{900}{T_{med} + 273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (2.24)$

Donde ETP [mm día^{-1}] ($[\text{mm mes}^{-1}]$ en la ecuación 2.19) es la evapotranspiración potencial; T_{med} , T_{max} y T_{min} son la temperatura media, máxima y mínima respectivamente; c , I y a son constantes que dependen del número de días, de T_{med} del mes considerado y las horas máximas de sol según la latitud; U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura [m s^{-1}]; e_s es la presión de vapor de saturación en T_{med} [kPa]; e_a es la presión del vapor en T_{med} [kPa]; K es una constante que depende del tipo de vegetación y el grado de su desarrollo; P es el porcentaje máximo de horas de sol respecto del total anual; R_s es la radiación extraterrestre de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]; R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]; Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]; γ es una constante de temperatura [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$] y G es el flujo del calor del suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$].

Como se pudo observar, existen métodos que requieren de un gran número de variables meteorológicas y otros que son justo lo opuesto (siendo el método de Thornthwaite el más

sencillo, y el método de Penman & Monteith el más complejo de utilizar). Por lo tanto, la elección de un método u otro depende principalmente del objetivo y alcances de la investigación, así como de la información con la que se pueda contar.

En particular, método de Hargreaves (1994) para calcular la ETP ha sido altamente valorado por su eficacia y simplicidad de uso, especialmente en situaciones donde la disponibilidad de datos es limitada (Almorox & Grieser, 2016; Jung et al., 2016; Ravazzani et al., 2012). Es por ello, que se considera el uso de este método para el desarrollo de la investigación.

2.3 Modelación hidrológica superficial

El ciclo hidrológico tiene múltiples componentes interconectados, donde el escurrimiento conecta la precipitación con cuerpos de agua. El escurrimiento superficial es la precipitación que no se infiltra en el suelo y fluye sobre la superficie terrestre hacia aguas superficiales (ríos, lagos, mares, entre otros) (Perlman, 2016). El escurrimiento es crucial para balancear el ciclo hidrológico, influenciado por propiedades del suelo, cobertura del suelo, pendiente del terreno, vegetación y características de la tormenta como la duración y la intensidad de la lluvia.

El escurrimiento se genera a partir de la combinación de dos mecanismos, siendo el exceso de saturación (cuando el suelo está completamente saturado y no puede absorber más agua) y el exceso de infiltración (cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo) (Yang et al., 2015).

Conocer el comportamiento del ciclo hidrológico, y como este produce el escurrimiento es de gran importancia. El agua que escurre fluye sobre la tierra, recogiendo a su paso residuos que pueden contener sedimentos, materia orgánica, nutrientes, pesticidas y otras sustancias que pueden afectar la calidad de los cuerpos de agua que reciben el agua superficial (Huffman et al., 2013). Lo anteriormente dicho hace el estudio del escurrimiento de gran interés para resolver problemas de calidad y cantidad de agua como la previsión de inundaciones y las relaciones ecológicas y biológicas en el medio acuático (Kokkonen et al., 2001) y para entender la relación del agua superficial con el agua subterránea para así estimar la recarga del agua subterránea (Weatherl et al., 2021).

Anteriormente se abordó el origen, evolución y clasificación de los modelos hidrológicos. Por lo que, basado en el interés por simular el proceso de generación del escurrimiento, a lo largo del tiempo se han desarrollado numerosos modelos hidrológicos enfocados en simular las distintas fases del ciclo hidrológico en la superficie, con los denominados Modelos Lluvia Escurrimiento (MLE).

Para esta investigación, se propone utilizar los modelos HBV y SAC-SMA, los cuales se encuentran entre los MLE más utilizados (Addor & Melsen, 2019) por su gran versatilidad y poca información que requiere para su utilización.

En la Figura 2.2 se presenta un diagrama que representa visualmente los procesos considerados por cada uno de estos MLE.

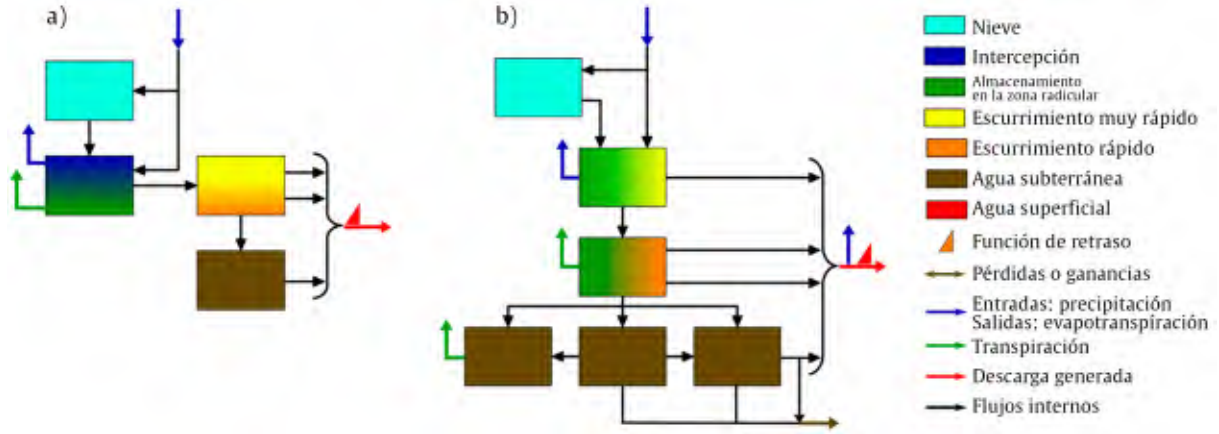


Figura 2.2: Diagramas unificados que ilustran los almacenamientos y flujos conceptuales de los modelos HBV (a) y SAC-SMA (b). Modificado de Astagneau et al. (2020).

El modelo **HBV** (Bergström, 1976) se clasifica como un modelo conceptual determinístico que simplifica los procesos de humedad del suelo representándolos como un reservorio que debe llenarse a un cierto nivel (capacidad de campo) antes de que cualquier agua pueda pasar a través de él. El modelo **HBV** incluye una zona de humedad del suelo que se considera un reservorio que se llena hasta cierta capacidad, representando la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Una vez que este almacenamiento de humedad del suelo se ha llenado a su capacidad, el área de contribución se define como la proporción del área de la cuenca que contribuye al esguerrimiento.

HBV se estructura en módulos de: (i) nieve (opcional), (ii) humedad del suelo, (iii) evapotranspiración y (iv) respuesta por dos reservorios lineales (Bergström, 1976; Paredes et al., 2017). Para la parte lluvia–esguerrimiento, la filtración efectiva se calcula como:

$$\text{Inf}_t = \left(\frac{SM_{t-1}}{FC} \right)^\beta P_t, \quad (2.25)$$

donde Inf_t [L T^{-1}], SM_t [L], FC [L], P_t [L T^{-1}] y β [-].

La evapotranspiración real se estima en función de la humedad del suelo y del umbral *PWP*:

$$ET_{r,t} = \begin{cases} ET_{p,t} \frac{SM_t}{PWP}, & SM_t < PWP, \\ ET_{p,t}, & SM_t \geq PWP. \end{cases} \quad (2.26)$$

donde $ET_{r,t}$ y $ET_{p,t}$ [L T^{-1}], y PWP [L].

Con ello, el balance de humedad del suelo queda:

$$SM_t = SM_{t-1} + P_t - ET_{r,t} - \text{Inf}_t, \quad (2.27)$$

y, si $SM_t > FC$, el exceso se transforma en escorrentía directa:

$$Q_{s,t} = SM_t - FC, \quad SM_t \leftarrow FC. \quad (2.28)$$

donde $Q_{s,t}$ [L] por paso de tiempo.

Para la celda subsuperficial ($S1$), la descarga rápida, la descarga lenta y la percolación se calculan como:

$$Q_{0,t} = \begin{cases} K_0 (S1_{t-1} - L_m), & S1_{t-1} > L_m, \\ 0, & S1_{t-1} \leq L_m, \end{cases} \quad (2.29)$$

$$Q_{1,t} = K_1 S1_{t-1}, \quad Q_{perc,t} = K_{perc} S1_{t-1}, \quad (2.30)$$

donde $Q_{0,t}$, $Q_{1,t}$ y $Q_{perc,t}$ [$L T^{-1}$], K_0 , K_1 y K_{perc} [T^{-1}], $S1_t$ [L] y L_m [L]. y el balance de esa celda:

$$S1_t = S1_{t-1} + Inf_t - Q_{0,t} - Q_{1,t} - Q_{perc,t}. \quad (2.31)$$

Para la celda profunda ($S2$):

$$Q_{2,t} = K_2 S2_{t-1}, \quad S2_t = S2_{t-1} + Q_{perc,t} - Q_{2,t}. \quad (2.32)$$

donde $Q_{2,t}$ [$L T^{-1}$], K_2 [T^{-1}] y $S2_t$ [L].

La escorrentía total (en volumen) se obtiene como:

$$Q_t = (Q_{s,t} + Q_{0,t} + Q_{1,t} + Q_{2,t}) A, \quad (2.33)$$

donde Q_t [$L^3 T^{-1}$] y A [L^2]. Cuando se activa el enrutamiento, la salida se suaviza por una función triangular (parámetro MAXBAS) mediante convolución discreta:

$$Q_t^{out} = \sum_{j=1}^n w_j Q_{t-j+1}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (2.34)$$

donde Q_t^{out} [$L^3 T^{-1}$], w_j [-], n [-] y MAXBAS [-].

Por otro lado, el modelo [SAC-SMA](#) (Burnash, 1995) es un modelo conceptual que se enfoca en la parametrización de las características de humedad del suelo. Su objetivo principal es distribuir lógicamente la humedad aplicada en varias profundidades y estados energéticos en el suelo, permitiendo una simulación efectiva del escurrimiento. El modelo se basa en la identificación de dos tipos de agua en el suelo: el agua de tensión y el agua libre. El agua de tensión se refiere a la humedad del suelo que está fuertemente atraída a las partículas del suelo y sólo puede ser removida por evapotranspiración, mientras que el agua libre llena los espacios intersticiales entre las partículas del suelo y puede drenar libremente. El [SAC-SMA](#) incluye dos zonas principales de almacenamiento: la zona superior y la zona inferior. La zona superior

incluye tanto el agua de tensión como el agua libre, siendo esta última responsable del escurrimiento intermedio y la percolación. La zona inferior también está dividida de manera similar, pero abarcando capas más profundas del suelo. Además, el modelo considera parámetros que representan áreas permanentemente impermeables y características específicas de percolación y drenaje.

SAC-SMA sigue el esquema de balances por celdas, incorporando evapotranspiración por etapas, escorrentía en áreas impermeables, percolación no lineal y dos reservorios de flujo base (Burnash, 1995; Paredes et al., 2017). La evapotranspiración en la zona alta comienza con:

$$E_1 = EDMD \frac{UZTWC}{UZTWM}, \quad RED = EDMD - E_1, \quad UZTWC \leftarrow UZTWC - E_1, \quad (2.35)$$

donde E_1 , $EDMD$ y RED [$L T^{-1}$], y $UZTWC$, $UZTWM$ [L]. y continúa con:

$$E_2 = \min(RED, UZFWC), \quad REDLZ = RED - E_2, \quad UZFWC \leftarrow UZFWC - E_2. \quad (2.36)$$

donde E_2 y $REDLZ$ [$L T^{-1}$], y $UZFWC$ [L].

Si hay desbalance relativo entre almacenamiento en tensión y libre en la zona alta, se redistribuye:

$$\begin{aligned} UZRAT &= \frac{UZTWC + UZFWC}{UZTWM + UZFWM}, \\ UZTWC &\leftarrow UZTWM \cdot UZRAT, \\ UZFWC &\leftarrow UZFWM \cdot UZRAT. \end{aligned} \quad (2.37)$$

donde $UZRAT$ [-] y $UZFWM$ [L].

La evapotranspiración en la zona baja se estima como:

$$E_3 = REDLZ \frac{LZTWC}{UZTWM + LZTWM}, \quad LZTWC \leftarrow LZTWC - E_3. \quad (2.38)$$

donde E_3 [$L T^{-1}$], $LZTWC$ [L] y $LZTWM$ [L].

Definiendo

$$SAVED = RSERV(LZFSM + LZFPM), \quad (2.39)$$

se evalúan los cocientes relativos:

$$RATLZT = \frac{LZTWC}{LZTWM}, \quad RATLZ = \frac{LZTWC + LZFPC + LZFSC - SAVED}{LZTWM + LZFPM + LZFSM - SAVED}, \quad (2.40)$$

y, si $RATLZT < RATLZ$, se transfiere:

$$DEL = (RATLZ - RATLZT)LZTWM, \quad LZTWC \leftarrow LZTWC + DEL. \quad (2.41)$$

donde $SAVED$ y DEL [L], $RSERV$ [-], $RATLZT$ y $RATLZ$ [-], y $LZFSM$, $LZFPM$ [L].

La evapotranspiración de ribera y de área impermeable temporal se calcula como:

$$E_4 = (EDMD - E_1 - E_2 - E_3) RIVA, \quad (2.42)$$

$$E_5 = \left[E_1 + (RED + E_2) \frac{ADIMC - (UZTWC + E_1)}{UZTWM + LZTWM} \right] ADIMP. \quad (2.43)$$

donde E_4 y E_5 [$L T^{-1}$], $RIVA$ y $ADIMP$ [-], y $ADIMC$ [L].

La evapotranspiración total del sistema se resume como:

$$EUSED = (E_1 + E_2 + E_3)(1 - PCTIM - ADIMP) + E_4 RIVA + E_5 (PCTIM + ADIMP). \quad (2.44)$$

donde $EUSED$ [$L T^{-1}$] y $PCTIM$ [-].

Para la lluvia disponible PXV , la escorrentía directa en áreas impermeables permanentes es:

$$ROIMP = PXV \cdot PCTIM, \quad PXV \leftarrow PXV - ROIMP. \quad (2.45)$$

donde $ROIMP$ y PXV [$L T^{-1}$].

La zona superior en tensión se actualiza como:

$$UZTWC \leftarrow \min(PXV + UZTWC, UZTWM), \quad (2.46)$$

y se propaga el almacenamiento total en área adicional impermeable:

$$ADIMC \leftarrow ADIMC + (PXV - TWX). \quad (2.47)$$

donde TWX [$L T^{-1}$].

El flujo base primario y suplementario son:

$$Q_{bf,p} = LZPK \cdot LZFP, \quad Q_{bf,s} = LZSK \cdot LZFS, \quad Q_{bf} = Q_{bf,p} + Q_{bf,s}. \quad (2.48)$$

donde $Q_{bf,p}$, $Q_{bf,s}$ y Q_{bf} [$L T^{-1}$], $LZPK$ y $LZSK$ [T^{-1}], y $LZFP$, $LZFS$ [L].

El déficit relativo de humedad en zona baja y la demanda de percolación son:

$$DEFR = 1 - \frac{LZTWC + LZFP + LZFS}{LZTWM + LZFPM + LZFSM}, \quad (2.49)$$

$$PERCM = LZFPM \cdot LZPK + LZFSM \cdot LZSK, \quad (2.50)$$

$$PERC = PERCM \left(\frac{UZFWC}{UZFWM} \right) (1 + ZPERC \cdot DEFR)^{REXP}, \quad (2.51)$$

donde $DEFR$ [-], $PERCM$ y $PERC$ [$L T^{-1}$], y $ZPERC$, $REXP$ [-]. con restricciones:

$$PERC \leq UZFWC, \quad PERC \leq (LZTWM + LZFPM + LZFSM) - (LZTWC + LZFP + LZFS). \quad (2.52)$$

La porción hacia tensión en zona baja se calcula como:

$$PERCT = \min(PERC(1 - PFREE), LZTWM - LZTWC), \quad LZTWC \leftarrow LZTWC + PERCT. \quad (2.53)$$

El remanente $PERCF = PERC - PERCT$ se reparte entre almacenamiento libre primario y suplementario:

$$LZFPC \leftarrow \min(LZFPM, LZFPC + FRACP \cdot PERCF), \quad (2.54)$$

$$LZFSC \leftarrow \min(LZFSM, LZFSC + (1 - FRACP) \cdot PERCF). \quad (2.55)$$

donde $PERCT$ y $PERCF$ [$L T^{-1}$], $PFREE$ y $FRACP$ [-], y $LZFSM$ [L].

El flujo intermedio y la actualización de la celda libre superior se expresan como:

$$Q_{int} = UZK \cdot UZFWC, \quad UZFWC \leftarrow \min(UZFSM, UZFWC + TWX). \quad (2.56)$$

donde Q_{int} [$L T^{-1}$] y UZK [T^{-1}].

La fracción de flujo subterráneo que retorna al río es:

$$Q_{subt,rio} = \frac{Q_{subt,total}}{1 + SIDE}, \quad SIDE = \frac{Q_{base, no\ obs}}{Q_{base, obs}}. \quad (2.57)$$

donde $Q_{subt,rio}$ y $Q_{subt,total}$ [$L T^{-1}$], y $SIDE$ [-].

Finalmente, la escorrentía total se obtiene como:

$$Q_t = Q_{dir,t} + Q_{sup,t} + Q_{int,t} + Q_{subt,rio,t}. \quad (2.58)$$

donde Q_t , $Q_{dir,t}$ y $Q_{sup,t}$ [$L T^{-1}$].

Ambos modelos conceptualizan el proceso de generación de escurrimiento de distintas maneras, pero a pesar de estas diferencias, existen similitudes entre ellos, tal como se muestra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Comparación técnica entre los modelos [HBV](#) y [SAC-SMA](#) para su uso en calibración y simulación lluvia–escurrimiento.

Aspecto	HBV	SAC-SMA	Implicación práctica
Estructura de almacenamiento	Reservorio de humedad del suelo y dos reservorios lineales de respuesta.	Múltiples almacenes de agua libre y de tensión en zonas superior e inferior.	SAC-SMA permite mayor detalle físico, mientras HBV prioriza parsimonia.
Parametrización	Menor número de parámetros efectivos para ajuste.	Mayor número de parámetros con significado físico específico.	HBV facilita calibración rápida; SAC-SMA exige mayor control de identificabilidad.
Sensibilidad hidrológica	Respuesta robusta para análisis regional y series largas con datos limitados.	Respuesta más flexible ante cambios en percolación, baseflow e interflow.	SAC-SMA mejora el ajuste por procesos; HBV reduce riesgo de sobreajuste en datos escasos.
Requisitos de información	Compatible con esquemas de datos meteorológicos básicos.	Requiere series más consistentes para discriminar procesos internos.	La selección depende de la calidad/longitud de datos disponibles.
Complejidad operativa	Implementación y mantenimiento más simples.	Mayor complejidad matemática y de interpretación de parámetros.	HBV es conveniente para etapas exploratorias; SAC-SMA para diagnóstico detallado.
Uso recomendado en esta investigación	Referencia para comparación de desempeño.	Modelo detallado para capturar dinámica de humedad y escurrimiento.	El uso conjunto permite comparar robustez frente a incertidumbre paramétrica.

2.4 Modelación hidrológica subterránea

Uno de los procesos más importantes y complejos del ciclo hidrológico es lo que ocurre con el agua que se infiltra en el subsuelo. Esta se comporta de una manera muy diferente al agua que se encuentra en la superficie, ya que esta fluye a través de un medio poroso, cuyo movimiento se rige por las características del medio en el que se encuentra. El estudio del

agua subterránea es de gran interés, ya que la disponibilidad de esta juega un rol importante en la gestión de los recursos hídricos (Bear et al., 1992). Es por ello que surge la necesidad de conceptualizar el comportamiento del flujo subterráneo, para su modelización y aplicación para poder estudiar, planificar y aplicar estrategias para la conservación de este recurso y su aprovechamiento sostenible (Anderson et al., 2015a).

El modelo hidrológico más relevante para simular el flujo subterráneo es el MODular Finite-Difference FLOW Model (**MODFLOW**) (Harbaugh, 2005). Dicho modelo se clasifica como físicamente basado y espacialmente distribuido, resolviendo el flujo en cada celda de una malla tridimensional mediante balances de masa y relaciones de flujo tipo Darcy. Para determinar el flujo subterráneo, el modelo parte de la ecuación diferencial del movimiento tridimensional del agua en medios porosos, expresada en la ecuación 2.59.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.59)$$

Donde: K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} [$L T^{-1}$], h [L], W [T^{-1}], S_s [L^{-1}] y t [T].

Las componentes de flujo específico siguen la ley de Darcy:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}. \quad (2.60)$$

En el caso de acuíferos multicapa, MODFLOW trabaja con transmisividades y conductancias intercelda:

$$T_x = K_x b, \quad C_{x,i+\frac{1}{2}} = \frac{K_{x,i+\frac{1}{2}} A_{yz}}{\Delta x}, \quad (2.61)$$

donde: T_x [$L^2 T^{-1}$], K_x [$L T^{-1}$], b [L], $C_{x,i+\frac{1}{2}}$ [$L^2 T^{-1}$], A_{yz} [L^2] y Δx [L].

Con discretización en diferencias finitas, el balance en una celda (i, j, k) para un paso de tiempo Δt puede escribirse como:

$$\sum C_n (h_n - h_{i,j,k}) + Q_{i,j,k} = \frac{S_{s,i,j,k} \Delta V}{\Delta t} (h_{i,j,k}^t - h_{i,j,k}^{t-\Delta t}), \quad (2.62)$$

donde: C_n [$L^2 T^{-1}$], h_n y $h_{i,j,k}$ [L], $Q_{i,j,k}$ [$L^3 T^{-1}$], ΔV [L^3] y Δt [T].

Esta formulación conduce a un sistema lineal para cada periodo:

$$\mathbf{A} \mathbf{h} = \mathbf{b}, \quad (2.63)$$

que se resuelve iterativamente hasta cumplir un criterio de convergencia en cargas y balance. Las condiciones de frontera más usadas son: carga constante ($h = \bar{h}$), no flujo ($\frac{\partial h}{\partial n} = 0$) y flujo dependiente de carga:

$$Q_b = C_b (h_b - h). \quad (2.64)$$

con Q_b [$L^3 T^{-1}$], C_b [$L^2 T^{-1}$], h_b y h [L]. En toda la sección de modelación se mantiene este formato uniforme de unidades en corchetes. Estas expresiones permiten representar interacción río-acuífero, drenaje y transferencias laterales dentro del esquema de gestión integrada (Anderson et al., 2015a; Harbaugh, 2005).

Sin embargo, para resolver numéricamente dicha ecuación, es necesario discretizar el medio poroso en grupos de bloques, también denominadas celdas. Estas celdas pueden variar en sus dimensiones, y se pueden añadir unas sobre otras a fin de representar las variaciones en la estratigrafía del medio. También se pueden definir las celdas activas e inactivas, siendo las activas aquellas donde se resolverán las ecuaciones para determinar el flujo subterráneo. Una representación visual de esto se observa en la Figura 2.3.

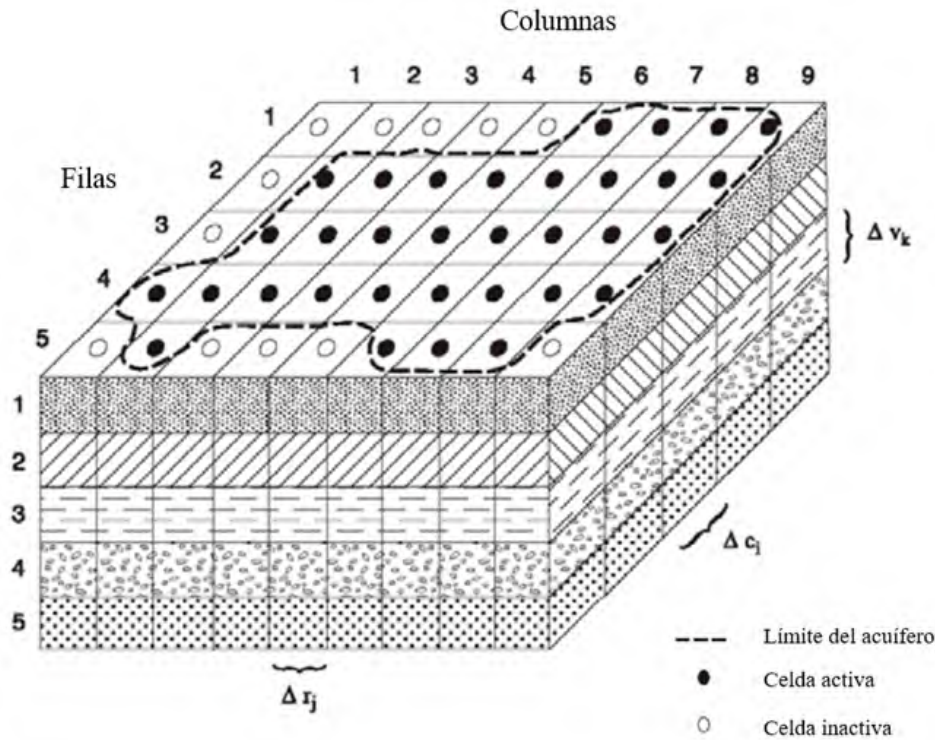


Figura 2.3: Representación espacial de un acuífero discretizado en celdas. Modificado de Harbaugh (2005).

La resolución de las ecuaciones de flujo que considera el modelo se realiza no sólo discretizando el acuífero en celdas, sino que también diferenciando entre diferentes tipos de celdas. Siendo las celdas sin flujo, es decir, aquellas que se encuentran fuera de los límites del acuífero, las celdas de altura constante que son aquellas que mantienen una altura piezométrica a lo largo del tiempo y celdas de altura variable, que son aquellas donde se realiza el balance hídrico y donde las alturas pueden variar dependiendo de la interacción entre las recargas y extracciones (ver Figura 2.4).

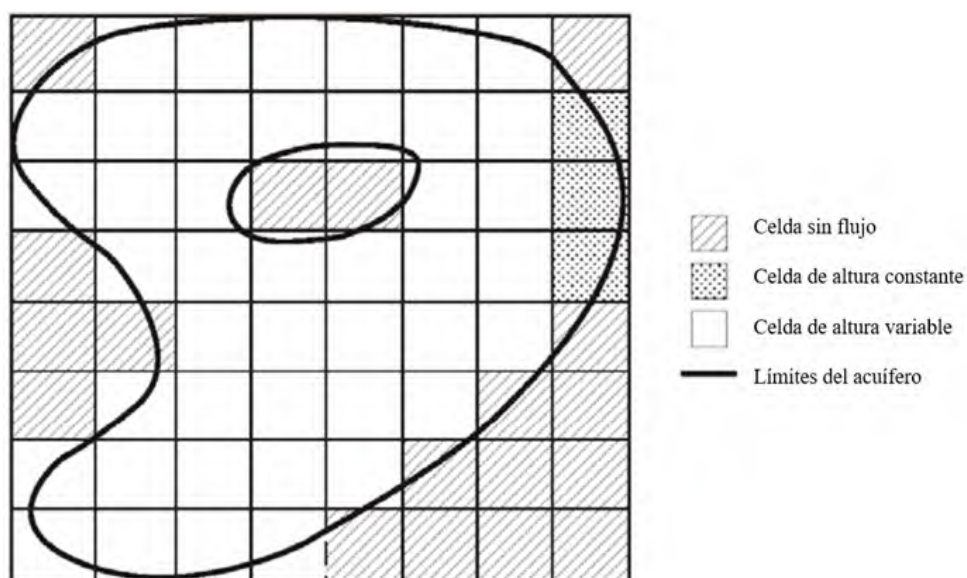


Figura 2.4: Designación de celdas para el acuífero discretizado espacialmente. Modificado de Harbaugh (2005).

2.5 Modelación conjunta

Anteriormente se abordó el tema relacionado con la modelación hidrológica en los procesos del ciclo hidrológico del agua superficial y subterránea. Sin embargo, estos modelos comúnmente operan por separado, es decir, sin considerar la influencia de uno sobre el otro. Para lograr la [GIRH](#), es sumamente importante que estos modelos trabajen de manera conjunta, considerando a su vez, diferentes condiciones antropogénicas, para así poder evaluar la disponibilidad del agua ante distintas condiciones y escenarios.

Es por ello, que a lo largo del tiempo se han desarrollado numerosas herramientas que tienen como propósito el integrar los aspectos más relevantes y necesarios para la [GIRH](#). Estas herramientas son denominadas Sistemas de Soporte a la Decisión ([SSD](#)). Cada [SSD](#) está diseñado para cumplir con diferentes propósitos, algunos se centran en evaluar aspectos socioeconómicos, calidad del agua y/o gestión de la demanda, algunos de los [SSD](#) más utilizados son los que se muestran en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Descripción general del uso de los SSD más utilizados para la gestión de recursos hídricos. Modificado de Alamanos et al. (2021)

Nombre	Propósito principal	Referencia
Iras	Sistema interactivo río-acuífero y calidad del agua	D. Loucks et al. (1994)
Waterware	Evaluación de los límites y escenarios de explotación según las legislaciones	Fedra & Jamieson (1996)
Aquatool	Planes hidrológicos y gestión de los recursos hídricos, proporcionando evaluaciones de riesgos	Andreu et al. (1996)
Ribasim	Representación del comportamiento de las cuencas hidrográficas en condiciones hidrológicas y evaluación de medidas de gestión	Delft Hydraulics (2006)
WEAP	Modelo de balance hídrico, que evalúa el rendimiento de los escenarios de gestión	Yates et al. (2005)
MIKE Hydro Basin	Simulación de aguas superficiales y subterráneas, calidad del agua, demanda de agua y optimización del sistema	DHI (2017)

En particular, Aquatool funciona como un ecosistema que integra múltiples módulos que en su conjunto funcionan como un sistema unificado para la GIRH. El módulo Simulación de la Gestión de Cuencas (SIMGES) (Andreu et al., 2007) es un modelo general para la simulación de la gestión de cuencas, el cual dispone la capacidad de considerar elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. Lo anteriormente mencionado se logra incorporando los módulos Evalhid (Paredes et al., 2017) y Aquival (Capilla & Andreu, 1996), los cuales corresponden a los modelos hidrológicos superficial y subterráneo respectivamente.

2.6 Evaluación de modelos hidrológicos

La evaluación de los modelos hidrológicos es importante para el desarrollo, calibración y uso de estos (Althoff & Rodrigues, 2021), ya que el principal objetivo de la modelación hidrológica es la predicción de una variable en el tiempo y/o en el espacio a partir de un conjunto determinado de datos de entrada (Legates & McCabe, 1999). Es por ello, que, para lograr dicho cometido, a lo largo del tiempo se han propuesto la utilización de diferentes índices de bondad de ajuste, que permiten cuantificar el grado de ajuste que tienen las predicciones hechas por los modelos respecto con los datos reales observados.

El uso de los índices depende del tipo de modelo y de la variable comparada. En modelos lluvia-escorrentamiento se emplean con frecuencia coeficiente de determinación (R^2), NSE , Logarithmic Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE_{ln}) y Kling-Gupta Efficiency (KGE); en modelos subterráneos, donde se contrastan alturas piezométricas, es habitual complementar con métricas de error absoluto (Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error ($RMSE$)) por su interpretación directa en unidades; y en modelos de embalses o del sistema conjunto, Percent Bias ($PBIAS$) ayuda a identificar sobreestimación o subestimación sistemática de los volúmenes (Anderson et al., 2015b; Chai & Draxler, 2014; Hill & Tiedeman, 2007; Moriasi et al., 2007; Willmott & Matsuura, 2005).

En conjunto, los índices considerados se expresan como:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})(X_{sim,i} - \bar{X}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - \bar{X}_{sim})^2}} \right)^2 \quad (2.65)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (2.66)$$

$$NSE_{ln} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(X_{obs,i}) - \ln(X_{sim,i}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(X_{obs,i}) - \ln(\bar{X}_{obs}))^2} \quad (2.67)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (2.68)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{obs,i} - X_{sim,i}| \quad (2.69)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2} \quad (2.70)$$

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n X_{obs,i}} \quad (2.71)$$

donde X representa la variable comparada (por ejemplo, Q para caudales, alturas piezométricas o volúmenes almacenados). r es el coeficiente de correlación lineal y α y β son las razones entre desviaciones estándar y medias simuladas y observadas.

Para sintetizar ventajas y limitaciones, en la Tabla 2.9 se resume el uso esperado de cada métrica en términos de rango, valor ideal e interpretación.

Tabla 2.9: Resumen de las características de los índices de bondad de ajuste considerados. Modificado de Althoff & Rodrigues (2021).

Índice	Rango de valores	de	Valor ideal	Ventajas (+) y/o desventajas (-)
R^2	(0, 1)	1		(+) Indica la proporción de varianza explicada por el modelo. (-) No tiene en cuenta el sesgo. (-) Puede ser engañoso si se utiliza solo.
NSE	$(-\infty, 1)$	1		(-) Muy sensible ante caudales máximos. (-) Subestima la variabilidad.
NSE_{ln}	$(-\infty, 1)$	1		(+) Reduce la variabilidad de los datos y, en general, hace un mayor hincapié en las condiciones de bajo caudal. (-) Puede ocultar errores en eventos altos por el efecto de la transformación logarítmica.
KGE	$(-\infty, 1)$	1		(+) Más equilibrado para el sesgo en condiciones de caudales máximos y mínimos. (-) Su interpretación no siempre es directa cuando cambian simultáneamente correlación, sesgo y variabilidad.
MAE	$(0, \infty)$	0		(+) Interpretable en unidades de la variable; robusto a valores extremos. (-) No penaliza fuertemente errores grandes.
$RMSE$	$(0, \infty)$	0		(+) Penaliza errores grandes. (-) Sensible a valores atípicos.
$PBIAS$	$(-\infty, \infty)$	0		(+) Indica sesgo global (sobre/subestimación). (-) No describe dispersión.

A pesar de sus limitaciones, cada índice ofrece distintas perspectivas acerca del ajuste: R^2 resume la relación lineal; NSE y NSE_{ln} priorizan extremos altos y bajos, respectivamente; KGE busca balancear correlación, sesgo y variabilidad; $MAE/RMSE$ cuantifican errores en unidades; y $PBIAS$ aporta la dirección del sesgo.

Si bien existe una amplia variedad de índices diseñados para diferentes propósitos, aún falta establecer un criterio que permita clasificar el rendimiento de los modelos hidrológicos. Este ha sido un tema de debate entre los investigadores, y a pesar de que no existe un proceso estandarizado establecido (Ritter & Muñoz-Carpena, 2013), se tiene el consenso de que este debe ser multiobjetivo. Para modelos lluvia–escurrimiento, uno de los criterios más utilizados es el propuesto por Moriasi et al. (2007), el cual clasifica el rendimiento de un modelo en función de NSE (ver Tabla 2.10). En modelos subterráneos o de regulación, los umbrales de aceptación

suelen definirse caso por caso según objetivos, escala y disponibilidad de datos (Anderson et al., 2015b; Hill & Tiedeman, 2007).

Tabla 2.10: Clasificación general del rendimiento de un modelo en función de *NSE*. Modificado de Moriasi et al. (2007).

Clasificación de rendimiento	Rango de NSE
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$
No satisfactorio	$NSE \leq 0.50$

Dicho criterio se puede aplicar para el resto de los índices de bondad de ajuste considerados, permitiendo así, el poder evaluar los distintos aspectos de los modelos.

2.7 Herramientas de modelación hidrológica

Existe una amplia variedad de herramientas dedicadas a lograr los distintos tipos de modelos descritos en los apartados anteriores. Las herramientas seleccionadas para el desarrollo de esta investigación se describen a continuación.

Para la creación del modelo hidrológico superficial, se decide utilizar la herramienta Hydrological Model Assessment and Development (*Hydromad*) (Andrews et al., 2011), el cual es un paquete para el lenguaje de programación R. Este ofrece un conjunto de funciones que permiten construir, calibrar, analizar y comparar distintos *MLE* aprovechando las grandes capacidades de R. Dicha herramienta es muy útil y conveniente considerando que la preparación de los datos de entrada pueden ser vinculados desde la fase de gestión de datos, que dicha fase opera en este mismo entorno de programación.

Para el modelo hidrológico subterráneo, se decide utilizar Modelmuse (Winston, 2024), el cual es un software de uso libre que permite el uso de *MODFLOW*. Este software ofrece funciones que permiten el montaje, calibración y visualización de los resultados de las simulaciones.

Para el modelo conjunto, se decide utilizar el módulo *SIMGES*. Sin embargo, como previamente se ha descrito acerca de esta herramienta, esta funciona dentro del ecosistema de módulos que contiene Aquatool. Es por ello, que una vez contruidos, calibrados y evaluados los modelos en *Hydromad* y Modelmuse, se trasladan los parámetros y datos de entrada de dichos modelos a los módulos Evalhid y Aquival.

Hipótesis

La creación y aplicación de un modelo hidrológico conjunto permitirá determinar acciones para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Tepalcatepec ante eventos de sequía, mediante la identificación de umbrales de normalidad, prealerta, alerta y emergencia.

Objetivos

4.1 Generales

- Crear un modelo hidrológico conjunto que permita determinar acciones para la gestión de los recursos hídricos en la zona de estudio, ante escenarios de normalidad, prealerta, alerta y emergencia de eventos de sequía.

4.2 Particulares

- Crear un modelo hidrológico superficial, evaluando diferentes modelos lluvia-escurrimiento a fin de lograr la mejor representación posible de las fases del ciclo hidrológico en la superficie. Esto permitirá determinar las infiltraciones que alimenten el modelo conjunto.
- Crear un modelo hidrológico subterráneo que logre la mejor representación posible del flujo subterráneo, información esencial para introducir al modelo conjunto.
- Construir el modelo hidrológico conjunto, el cual sea capaz de representar la evolución de la disponibilidad del agua superficial y subterránea ante la influencia de las condiciones antropogénicas de la zona de estudio.
- Calcular y aplicar índices de estado que permitan cuantificar la situación actual de la zona de estudio en relación con la proximidad o gravedad de un evento de sequía. Logrando así, la obtención de umbrales de normalidad, prealerta, alerta y emergencia.
- Proponer acciones que mitiguen los efectos de los eventos de sequía, ante los umbrales definidos por los índices de estado.

Justificación

La gestión de los recursos hídricos es esencial por diversas razones críticas. En primer lugar, la escasez de agua constituye un desafío global que impacta a numerosas regiones debido al aumento de la población, la urbanización y el cambio climático. La implementación de una gestión eficaz resulta imperativa para garantizar que exista suficiente agua para cubrir las necesidades básicas tanto de las personas como del medio ambiente.

De acuerdo con datos del MSM (2024) en el periodo 2003-2024, en promedio, el 47 % del territorio mexicano ha tenido algún grado de sequía, llegando a extensiones máximas del 95 % en el año 2011, y en años recientes, en el año 2023, del 89 %. Evidenciando así, que México es muy susceptible a que surjan estos eventos de sequía que pueden prolongarse por largos periodos de tiempo, dejando a su paso grandes consecuencias negativas en el desarrollo socioeconómico del país.

El estado de Michoacán es uno de los estados que en los últimos años ha presentado una tendencia negativa en cuanto a la ocurrencia de eventos de sequía, siendo que en el mes de mayo del 2024 se cuantificó un 100 % del territorio estatal con algún grado de sequía.

En particular, en la CRT, en el periodo 2003-2024 se contabilizan al menos 18 años (83 % del periodo) en donde al menos uno de los municipios que conforman la cuenca, ha tenido algún grado de sequía. De acuerdo con el último censo de población realizado en el año 2020 (INEGI, 2020), en las localidades que se encuentran dentro del parteaguas de la cuenca viven más de 468 mil habitantes, es hogar de una gran cantidad de ecosistemas de una rica biodiversidad, destacando también su vasta producción agrícola, la cual alberga la región con mayor producción de limón y aguacate del país, sin olvidar la industria que gira alrededor de este sector. Esto denota una gran preocupación, ya que la insatisfacción de la demanda doméstica, industrial y agrícola puede poner en riesgo el desarrollo socioeconómico de la región.

Metodología

La metodología propuesta para esta investigación es la que se muestra en la Figura 6.1.

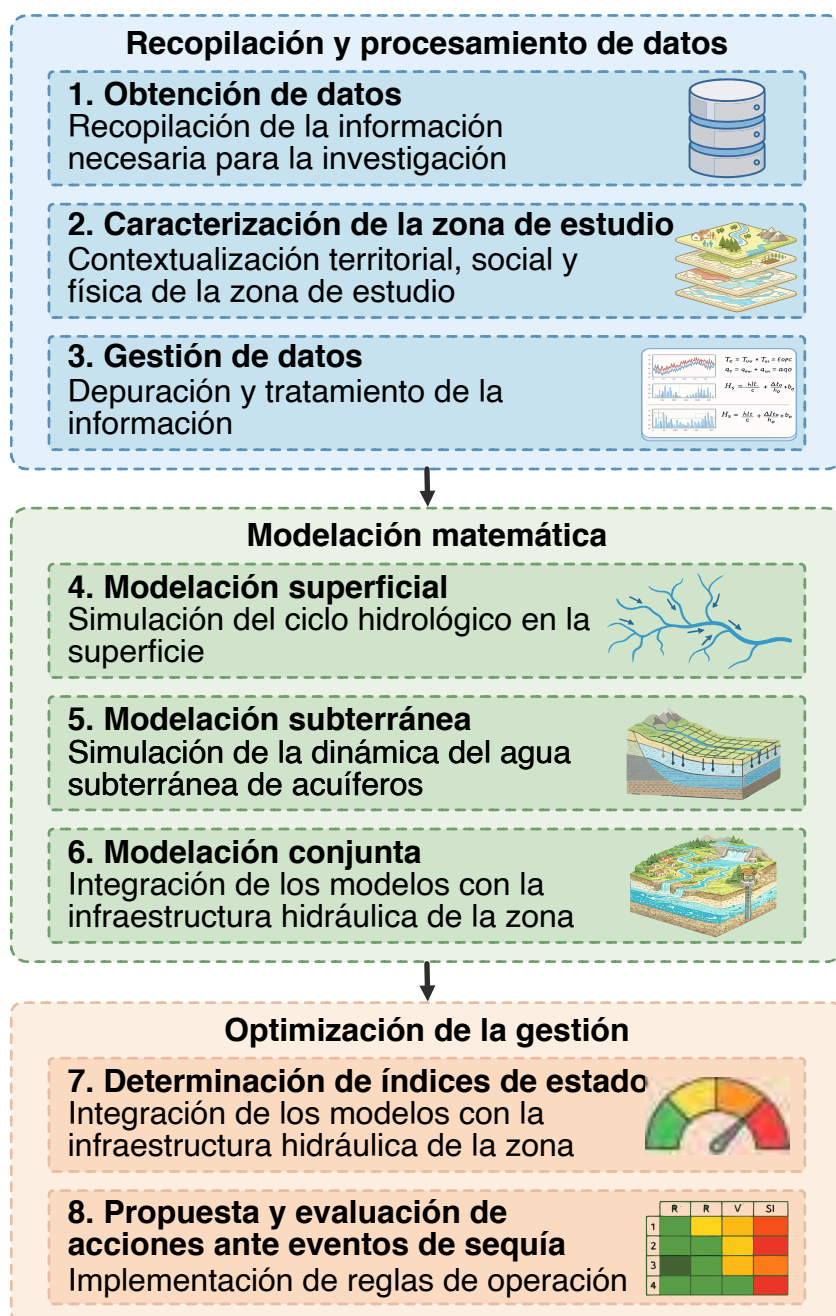


Figura 6.1: Esquema general de la metodología utilizada.

6.1 Obtención de datos

6.1.1 Información meteorológica

La información meteorológica se obtiene del Sistema de Información Hidrológica ([SIH](#)) (CONAGUA, [2019b](#)), el cual contiene un catálogo de estaciones meteorológicas disponibles en el territorio nacional. La selección de las estaciones está condicionada a aquellas cuya distribución espacial tengan la mayor cobertura posible sobre la zona de estudio. Los datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima son las variables de interés para la metodología utilizada.

6.1.2 Información hidrométrica

La información hidrométrica se obtiene, nuevamente, del [SIH](#). Esta base de datos contiene un catálogo de estaciones hidrométricas disponibles en diferentes corrientes de agua aforadas del territorio nacional, que registran los volúmenes de agua que fluyen a través de dichas corrientes.

La selección de las estaciones está condicionada no sólo por su influencia sobre la zona de estudio, sino también por la presencia de infraestructura hidráulica y condiciones antropogénicas que alteren su régimen. Por lo tanto, se busca que la información recopilada represente las condiciones naturales de la corriente. A partir de la ubicación de las estaciones hidrométricas seleccionadas, se delimitan las cuencas drenadas por las mismas.

6.1.3 Información de extracciones

La información de extracciones corresponde a las concesiones de aprovechamientos subterráneos para distintos usos (doméstico, agrícola e industrial). Esta información proviene del Registro Público de Derechos de Agua ([REPD](#)) (CONAGUA, [2024f](#)). Para la metodología utilizada, de esta base de datos es de interés recopilar los volúmenes de extracción concesionados, la ubicación de estos puntos de aprovechamientos y el tipo de uso.

6.1.4 Información hidrogeológica

La información hidrogeológica corresponde a los registros de niveles piezométricos y parámetros hidrogeológicos (transmisividad hidráulica, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) en la zona de estudio.

Dada la poca disponibilidad de este tipo de información en el territorio nacional, los registros de niveles piezométricos pueden provenir de múltiples fuentes, tales como estudios y

trabajos previamente realizados en la zona de estudio, así como de la red piezométrica nacional (CONAGUA, 2021).

El mismo caso aplica para los parámetros hidrogeológicos, que pueden provenir de estudios y trabajos previamente realizados en la zona de estudio, así como de los informes de disponibilidad de agua subterránea emitidos por CONAGUA (2023), e incluso de diversos autores que describen diferentes rangos de valores para dichos parámetros basado en el tipo de roca que se contemple.

6.1.5 Información fisiográfica

La información fisiográfica es aquella que representa diferentes características de la superficie terrestre, que permite contextualizar la zona de estudio para posibles consideraciones particulares que se requieran a lo largo del desarrollo de la investigación. La información requerida en particular, son las elevaciones del terreno, geología, uso y tipo de suelo, división política y climatología de la zona de estudio.

Las elevaciones del terreno pueden obtenerse de los modelos digitales de elevación almacenados en la base de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (INEGI, 2013).

La geología proviene de cartas geológicas emitidas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) (SGM, 2023). Dichas cartas contienen información de litología, formaciones geológicas, y, otros datos de interés.

La información de uso y tipo de suelo, división política y climatología puede obtenerse de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (CONABIO, 2024). Esta base de datos contiene una amplia variedad de capas temáticas para elegir en caso de requerirse aparte de las capas temáticas de los aspectos fisiográficos previamente mencionados.

6.1.6 Información de presas

La información de presas corresponde a la ubicación de las diferentes presas existentes en la zona de estudio. Dicha información puede consultarse en la base de datos del SIH, siendo de interés recopilar los datos físicos de la presas (curvas cota-superficie-volumen, niveles del vaso, obras de toma, etc.) y los registros de sus volúmenes almacenados.

6.1.7 Información de demandas

La información de demandas depende del contexto socioeconómico de la zona de estudio y de su conocimiento, por lo tanto, se han de recopilar y/o estimar. Algunos de los tipos de

demandas más frecuentes que suelen existir corresponden a demandas para uso doméstico, agrícola, trasvases, generación eléctrica, entre otros. Además de la obtención de dichas demandas, es importante conocer los retornos de estas, información esencial para el modelo conjunto.

6.2 Caracterización de la zona de estudio

La caracterización de la zona de estudio concede un marco de referencia con el cual se pueden conocer las condiciones particulares de dicha zona, conocimiento necesario para llevar a cabo posibles consideraciones durante la realización de las siguientes etapas de la investigación.

Esto se logra mediante la elaboración de mapas temáticos que permitan caracterizar la zona de estudio. Esto a fin de poder contextualizarla en diferentes aspectos tanto sociales como físicos.

6.3 Gestión de datos

6.3.1 Homogeneización de datos meteorológicos

Como previamente se mencionó, Climatol es una herramienta automática para la homogeneización de datos meteorológicos. Sin embargo, para mejorar el rendimiento de este, es necesario plantear una estrategia al momento de comenzar el proceso de homogeneización.

Una vez recopilados los datos meteorológicos, se ingresan en el formato requerido por Climatol. Este tiene una función que agrega los datos a escala mensual, y permite realizar un control de calidad inicial, el cual evalúa inicialmente los datos anómalos detectados, la correlación lineal de los datos de las estaciones y la agrupación de estas con base en algoritmos de clasificación. Las agrupaciones de las estaciones permiten visualizar regiones climáticas en la zona de estudio, por lo tanto, la homogeneización debe realizarse a escala mensual por separado para cada grupo y por cada variable meteorológica considerada.

Una vez terminado el proceso de homogeneización, es importante revisar los resultados, prestando especial atención en las correcciones realizadas y los datos anómalos eliminados. De esta manera, se tiene un punto de referencia para poder hacer los ajustes pertinentes en los parámetros de la herramienta y volver a realizar el proceso. Un ejemplo de cambio de parámetros que puede considerarse es el aumentar los umbrales de detección de anomalías, si es que se eliminaron datos anómalos, que por las condiciones climáticas particulares de la zona de estudio se sabe que estos son correctos.

Finalmente, Climatol ofrece una herramienta que permite interpolar datos a ciertos puntos definidos. De esta manera, se interpolan los datos meteorológicos al centro de gravedad de las cuencas drenadas por las estaciones hidrométricas para su posterior utilización.

6.3.2 Cálculo de evapotranspiración potencial

A partir de los datos interpolados de temperatura máxima y mínima, se calcula la [ETP](#), utilizando el método de Hargreaves como previamente se describió, mediante la ecuación [2.23](#).

6.3.3 Restitución de régimen

En dado caso que la información hidrométrica recopilada no se encuentre en su régimen natural debido a condiciones antropogénicas, es necesario establecer una ecuación de balance de masa. En dicha ecuación se suma o se resta el agua que ha sido extraída o aportada para obtener una serie temporal que represente las condiciones del cauce aforado como si no existieran dichas condiciones antropogénicas. Para el caso de embalses se utiliza la ecuación [6.1](#).

$$V_f = V_i + A - P_f - E - S_c - S_v \quad (6.1)$$

Donde V_i y V_f son los volúmenes iniciales y finales del mes respectivamente; A es la aportación al embalse aguas arriba; P_f son las pérdidas por filtración; E son las pérdidas por evaporación; S_c y S_v son las extracciones por obra de toma y vertedor respectivamente.

6.4 Modelación superficial

6.4.1 Montaje y calibración del modelo

Con las series temporales de precipitación y [ETP](#) de las cuencas drenadas por las estaciones hidrométricas, es decir, las cuencas de calibración, se procede a montar los modelos [HBV](#) y [SAC-SMA](#) en [Hydromad](#). Dentro de dicha herramienta existe una función que permite realizar una calibración automática, dicho procedimiento consiste en variar los parámetros de los modelos hasta maximizar el rendimiento de las simulaciones del modelo, utilizando los datos observados de las estaciones hidrométricas como referencia, mediante algoritmos de optimización.

6.4.2 Evaluación del modelo

Una vez calibrados los modelos, se procede a evaluar el rendimiento de estos mediante el criterio presentado en la Tabla [2.10](#), aplicado a los índices de bondad de ajuste explicados anteriormente, a fin de poder decidir cuál de los dos modelos se utilizará para las simulaciones posteriores. También es pertinente realizar una inspección visual de las simulaciones, a fin de detectar posibles inconsistencias que requieran de algún tipo de corrección y/o ajuste.

6.4.3 Traslado de parámetros y obtención de infiltraciones

Se generan microcuencas dentro de la zona de estudio, a las cuales se les interpolan espacialmente datos de precipitación y ETP, tal como se realizó inicialmente para las cuencas de calibración. En Evalhid, se ingresan dichos datos de entrada, trasladando los parámetros calibrados del modelo elegido a las microcuencas que se encuentren dentro de las cuencas de calibración.

De esta manera, al correr las simulaciones en Evalhid, este genera los escurrimientos de cada microcuenca, así como las series temporales de recarga.

6.5 Modelación subterránea

6.5.1 Discretización espacial de la zona de estudio

Dado que el modelo subterráneo es espacialmente distribuido, la zona de estudio debe discretizarse en una malla de celdas, de tal manera que los datos de entrada siendo las elevaciones de superficie, elevación del nivel estático inicial, parámetros hidrogeológicos, recargas y extracciones se transformen a este formato celda.

6.5.2 Montaje y calibración del modelo

A partir de los datos de entrada en formato celda, estos se ingresan a Modelmuse para así montar el modelo. Con el modelo montado se corre una primera simulación, siendo el punto de partida para comparar los niveles piezométricos simulados respecto a los observados, de esta manera, y con los umbrales máximos y mínimos para cada uno de los parámetros hidrogeológicos, se varían dentro de estos límites hasta lograr la mejor calibración posible.

6.5.3 Evaluación del modelo

Los modelos subterráneos comúnmente se evalúan comparando los residuales de las diferencias entre los niveles piezométricos observados y simulados. Sin embargo, no existe un criterio definido que permita aceptar o rechazar las simulaciones de estos modelos, quedando a criterio del modelador basado en las condiciones particulares de la zona de estudio, pero buscando minimizar estos residuales en la mayor medida posible.

6.5.4 Traslado de parámetros y obtención de niveles piezométricos

Con el modelo calibrado, se introducen los datos de entrada en Aquival, así como los parámetros hidrogeológicos calibrados para así hacer una equivalencia del modelo de Modelmuse en Aquival.

De esta manera, al correr las simulaciones en Aquival, este genera las series espaciotemporales de niveles piezométricos en la zona de estudio.

6.6 Modelación conjunta

6.6.1 Definición de la topología del modelo

El primer paso consiste en la representación gráfica del sistema de recursos hídricos mediante un esquema de nudos y conducciones que refleje la estructura física y operativa de la zona de estudio. En este esquema se incorporan los siguientes elementos:

- **Embalses:** representan las presas y almacenamientos principales.
- **Demandas consuntivas:** agrícolas, urbanas o industriales.
- **Acuíferos:** modelos simplificados o detallados de almacenamiento subterráneo.
- **Conducciones:** canales, ríos o infraestructuras de transferencia de agua.
- **Tomas y retornos:** puntos de extracción y reintegración de agua al sistema superficial.
- **Aportaciones:** entradas de caudales naturales o artificiales.

6.6.2 Montaje y calibración del modelo

Una vez definido el esquema, se procede a la asignación de información cuantitativa a cada elemento del modelo. Los insumos necesarios incluyen:

- **Embalses:** curvas cota-superficie-volumen, volúmenes máximos, mínimos y objetivos, así como coeficientes de evaporación y filtración.
- **Demandas:** series mensuales de volumen requerido, coeficientes de consumo y de retorno superficial.
- **Aportaciones:** series hidrológicas mensuales de caudal en régimen natural o alterado (acople del módulo Evalhid).
- **Acuíferos:** parámetros físicos, coeficientes de intercambio, volumen inicial y datos de recarga (acople del módulo Aquival).
- **Conducciones y tomas:** capacidades máximas, prioridades de uso y posibles reglas de operación.

El proceso de calibración de un modelo conjunto, de manera análoga a los modelos anteriormente descritos, consiste en buscar el mayor grado de ajuste posible en las variables de interés, siendo en este caso, en las simulaciones de los escurrimientos y volúmenes almacenados en las presas respecto de los valores observados. A diferencia de los modelos anteriores, en este caso, implica un proceso más complejo y dependiente de múltiples factores. El proceso de calibración no se limita únicamente a parámetros físicos del sistema, sino que también requiere ajustes en los datos de entrada, en los parámetros de operación de presas, en las pérdidas por filtración, en los coeficientes de retorno de las demandas y en otros elementos representativos del sistema de recursos hídricos.

Es importante señalar que en un modelo conjunto, algunos parámetros deben ser definidos aun cuando no se disponga de información precisa o representativa del sistema real, lo que introduce un grado de incertidumbre inherente al modelo. Por ello, la calibración se convierte en un proceso iterativo donde se ajustan diversos parámetros operativos y físicos.

6.6.3 Evaluación del modelo

El rendimiento del modelo conjunto puede realizarse siguiendo los criterios previamente presentados en la Tabla 2.10. Donde se comparan los escurrimientos y volúmenes almacenados en las presas.

6.7 Determinación de índices de estado

En esta investigación se adopta el IEE como indicador principal de escasez coyuntural, dado que es el que conecta con el desempeño oferta–demanda del sistema. Las expresiones se detallan en la Sección 2.1.1.1. Con base en ello, la metodología operativa es la siguiente:

1. **Delimitación de unidades de análisis:** definir las UTE que representan los subsistemas de decisión y asignación.
2. **Selección de variables representativas:** identificar, para cada UTE, variables hidrológicas y operativas con series consistentes (p. ej., aportaciones, niveles piezométricos, volúmenes embalsados, precipitaciones). Cuando aplique, trabajar con ventanas de acumulación o promedios móviles para incorporar persistencia temporal de las condiciones hidrológicas, por ejemplo, precipitación acumulada a 12 meses y aportaciones con promedio móvil de 3 meses.
3. **Estandarización estacional:** eliminar la componente estacional mediante una estandarización por mes en la serie de referencia.
4. **Reescalado a índice de estado:** transformar cada variable estandarizada a un índice adimensional (0–1) usando percentiles de referencia (p. ej., 5 y 95).

5. **Agregación ponderada:** combinar los índices parciales con pesos por UTE para obtener el IEE mensual.
6. **Clasificación de escenarios:** traducir el IEE a escenarios (normalidad, prealerta, alerta, emergencia).

6.8 Propuesta y evaluación de acciones ante eventos de sequía

Una vez caracterizada la situación con los índices de estado, se pasa a la definición de reglas de operación y a su evaluación. El punto de partida es el diagnóstico estructural de cada UTE, sustentado en los indicadores K , η y S definidos en el marco teórico (secciones 2.1.1.2 y 2.1.1.3).

6.8.1 Diagnóstico estructural y selección de reglas

Con los balances mensuales se estiman K , η y S para cada UTE y se define un estado de referencia (por ejemplo regulada, estresada, de paso o ineficiente). A partir de este diagnóstico se seleccionan las reglas de operación a evaluar, priorizando operación estándar cuando la regulación es suficiente, racionamiento preventivo cuando el estrés es alto, demanda adaptativa cuando la regulación es limitada y operación de excedencias cuando existen periodos de almacenamiento alto y capacidad hidráulica disponible.

6.8.2 Derivación de reglas mediante optimización

Cada regla se parametriza con un conjunto reducido de variables de decisión y se formula un problema de optimización con función objetivo a maximizar y restricciones. Entre las variables de diseño más comunes están los umbrales de activación, los factores de recorte, los volúmenes anuales autorizados y los límites de entrega. En general, la función objetivo busca maximizar el suministro y/o las entregas en excedencia, penalizando déficits e incumplimientos de demanda autorizada, y respetando límites físicos de almacenamiento y de operación de la infraestructura. La estimación de parámetros se realiza con algoritmos de optimización sobre la simulación histórica (algoritmos evolutivos, por ejemplo).

6.8.3 Evaluación de reglas de operación

Para cada UTE y escenario se construyen series de suministro, demanda y déficit y se calculan los indicadores RRV descritos en el marco teórico. La confiabilidad corresponde a la fracción de meses sin falla; la resiliencia se estima con las transiciones de falla a no falla; y la vulnerabilidad se define como el déficit relativo medio durante fallas. Con estos valores se obtiene el SI y se comparan escenarios en un marco homogéneo. La evaluación se completa

con un análisis cualitativo de implicaciones técnicas, sociales y económicas derivadas de los cambios en la magnitud, la duración y la frecuencia de las fallas.

6.8.4 Propuesta de acciones ante eventos de sequía

Con base en los indicadores y en la evaluación de desempeño, se selecciona la regla más adecuada por UTE y se formaliza como un conjunto de acciones por estado del IEE. Esta propuesta traduce las curvas optimizadas en medidas de operación concretas (entregas completas, recortes graduales o suspensión de excedencias). Además, permite definir criterios de activación transparentes para los usuarios. El resultado final es una matriz de acciones que vincula Normalidad, Prealerta, Alerta y Emergencia con la regla adoptada en cada UTE.

Resultados y Discusión

7.1 Obtención de datos

7.1.1 Información meteorológica

Del [SIH](#) se localizaron 40 estaciones meteorológicas en la zona de estudio (ver Figura 7.4), recopilando datos diarios de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas para el periodo 1960-2020.

7.1.2 Información hidrométrica

Del [SIH](#) se localizaron 11 estaciones hidrométricas en la zona de estudio (ver Figura 7.5), recopilando datos diarios de escurrimientos de las cuencas drenadas por dichas estaciones para el periodo 1960-2020.

7.1.3 Información de extracciones

Del [REPD](#) se localizaron 2125 títulos de concesiones de extracciones de agua subterránea en la zona de estudio (ver Figura 7.7), con diferentes usos, tal como se muestra en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Volumen concesionado y porcentaje por tipo de uso.

Uso	Volumen concesionado (miles de m ³)	% Del volumen con- cesionado
Agrícola	309381	89.67 %
Agroindustrial	15	0.004 %
Diferentes usos	18993	5.50 %
Doméstico	1983	0.57 %
Industrial	945	0.27 %

Continúa en la siguiente página

Tabla 7.1: Continuación

Uso	Volumen conce- sionado (miles m3)	% Del volumen con- cesionado
Pecuario	64	0.02 %
Público urbano	12761	3.70 %
Servicios	892	0.26 %

7.1.4 Información hidrogeológica

A partir de los acuíferos que conforman la zona de estudio, se obtuvieron sus correspondientes informes de disponibilidad de agua subterránea (CONAGUA, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e). En dichos informes, a pesar de que no contienen datos específicos de parámetros hidrogeológicos, se describen las particularidades geológica que ayudan a entender la dinámica del flujo subterráneo.

Basado en la información presentada en los informes de disponibilidad y en la distribución espacial de los diferentes tipos de materiales en la zona de estudio (ver Figura 7.12), se propusieron los rangos de valores de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento.

Para la conductividad hidráulica, se propusieron los rangos de valores (ver Tabla 7.2), comparando el tipo de material existente en la zona de estudio y los valores que considera Earle & Panchuk (2019).

Tabla 7.2: Tipo de material en la zona de estudio y sus rangos de valores de conductividad hidráulica, en m mes^{-1} .

Tipo de material	Mín	Máx	Promedio
Arena, grava	2594.04	1055307.99	528951.01
Arenisca	0.00	25.92	12.96
Arenisca caliza	0.01	29.28	14.64
Arenisca, conglomerado	2585.86	1029462.35	516024.11
Arenisca, lutita	0.00	12.97	6.49
Arenisca, toba andesítica	1.30	25871.56	12936.43

Continúa en la siguiente página

Tabla 7.2: Continuación

Tipo de material	Mín	Máx	Promedio
Caliza	0.01	32.63	16.32
Roca volcánica fracturada	2.59	51717.20	25859.90
Roca ígnea	0.04	409.83	204.94
Toba andesítica	2.59	51717.20	25859.90

Para el coeficiente de almacenamiento, se propusieron los rangos de valores (ver Tabla 7.3), comparando el tipo de material existente en la zona de estudio y los valores que considera Iglesias (1984).

Tabla 7.3: Tipo de material y acuífero en la zona de estudio y sus rangos de valores de coeficiente de almacenamiento.

Tipo de material	Tipo de acuífero	Mín	Máx	Promedio
Aluvial	Libre	0.05	0.15	0.1
Andesita-Caliza	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Andesita-Brecha volcánica andesítica	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Granito	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Andesita-Dacita	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Toba riolítica	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Andesita-Basalto	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Toba andesítica	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Meta-arenisca-Filita	Semiconfinado	0.0005	0.001	0.00075
Arenisca-Conglomerado poligénico	Libre	0.05	0.15	0.1
Toba andesítica-Arenisca	Libre	0.05	0.15	0.1

Continúa en la siguiente página

Tabla 7.3: Continuación

Tipo de material	Tipo de acuífero	Mín	Máx	Promedio
Piroclástico	Confinado	0.00005	0.0001	0.000075
Lahar-Piroclástico	Confinado	0.00005	0.0001	0.000075
Arenisca-Lutita	Semiconfinado	0.001	0.0005	0.00075
Caliza	Semiconfinado	0.001	0.0005	0.00075
Arenisca-Caliza	Semiconfinado	0.001	0.0005	0.00075
Conglomerado poligénico-Arenisca	Libre	0.05	0.15	0.1
Cuarcita	Semiconfinado	0.001	0.0005	0.00075

Por otro lado, de la red piezométrica nacional (CONAGUA, 2021) se recopilaron registros de las profundidades del nivel estático en diferentes pozos de la zona de estudio para los años 2001 y 2004 (ver Figura 7.7).

7.1.5 Información fisiográfica

Del INEGI se obtuvo el modelo digital de elevaciones para la zona de estudio, en formato ráster con una resolución espacial de 15 m.

Del portal de CONABIO se obtuvieron datos geoespaciales de división política, localidades y climatología.

7.1.6 Información de presas

Del SIH se localizaron 4 presas (cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 7.5), recopilando datos diarios de volúmenes almacenados y extracciones por obra de toma y vertedor para el periodo 1960-2020. En la Tabla 7.4 se describe en términos generales las presas anteriormente mencionadas.

Tabla 7.4: Volúmenes característicos y capacidad de obra de toma de las presas en la zona de estudio.

Nombre de la presa	Volúmenes del vaso* (hm ³)			Capacidad de obra de toma (m ³ /s)
	NAME	NAMO	NAMINO	
Vicente Villaseñor	22.5	19	3	4
San Juanico	71.69	60.54	14.6	4.8
Chilatán	817.09	590.04	112.44	100
Los Olivos	22	20	1.5	5.4

*Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME); Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO); Nivel de Aguas Mínimas de Operación (NAMINO).

7.1.7 Información de demandas

7.1.7.1 Demanda urbana

De acuerdo con el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) (CONAGUA, 2019a), la dotación de agua por habitante es estimada en función del tipo de clima y del nivel socioeconómico, tal como se muestra en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5: Consumo de agua per cápita diario. Modificado de CONAGUA (2019a)

Clima	Consumo (l/hab/d)			Subtotal por clima (l/hab/d)
	Bajo	Medio	Alto	
Cálido Húmedo	198	206	243	201
Cálido Subhúmedo	175	203	217	191
Seco o Muy Seco	184	191	202	190
Templado o Frío	140	142	145	142

Con base en el último censo poblacional, dentro de la zona de estudio habitan 468,190 personas, por lo tanto, considerando el tipo de clima para las localidades y la población de la zona de estudio, la demanda anual resulta de 35.16 hm³.

7.1.7.2 Demanda agrícola

Dentro de la zona de estudio se encuentran los distritos de riego 097 Lázaro Cárdenas y 099 Quitupan - La Magdalena, conformados por 13 y 2 módulos de riego respectivamente, los cuales se abastecen por las presas anteriormente mencionadas.

Basado en la información de las oficinas regionales de los distritos de riego, las demandas medias mensuales son las que se presentan en la Tabla .

Tabla 7.6: Volúmenes entregados mensuales por distrito de riego (hm³).

Mes	Demanda (hm ³)	
	097	099
Octubre	23.66	0.02
Noviembre	64.01	0.08
Diciembre	115.42	0.34
Enero	107.26	0.88
Febrero	114.27	1.02
Marzo	98.49	1.87
Abril	112.21	2.08
Mayo	112.75	1.54
Junio	90.56	0.30
Julio	57.98	0.01
Agosto	90.56	0.30
Septiembre	44.68	0.06

7.2 Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio es la CRT, ubicada en su mayor parte dentro del estado de Michoacán, y el estado de Jalisco, tal como se muestra en la Figura 7.1.



Figura 7.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio y su red de drenaje.

La CRT tiene un área drenada de 11641 km², perímetro de 850 km y su punto de salida se encuentra ubicado en las coordenadas 102.2204°W, 18.8841°N.



Figura 7.2: División política municipal en relación con la zona de estudio.

Como se mencionó previamente, la CRT se encuentra ubicada entre los estados de Michoacán y Jalisco, siendo los porcentajes de participación de 67 % y 33 % respectivamente. En la CRT se tienen 28 municipios que tienen influencia sobre ella, donde se contabilizan 329 localidades dentro de la zona de estudio sumando 468,190 habitantes en 2020.

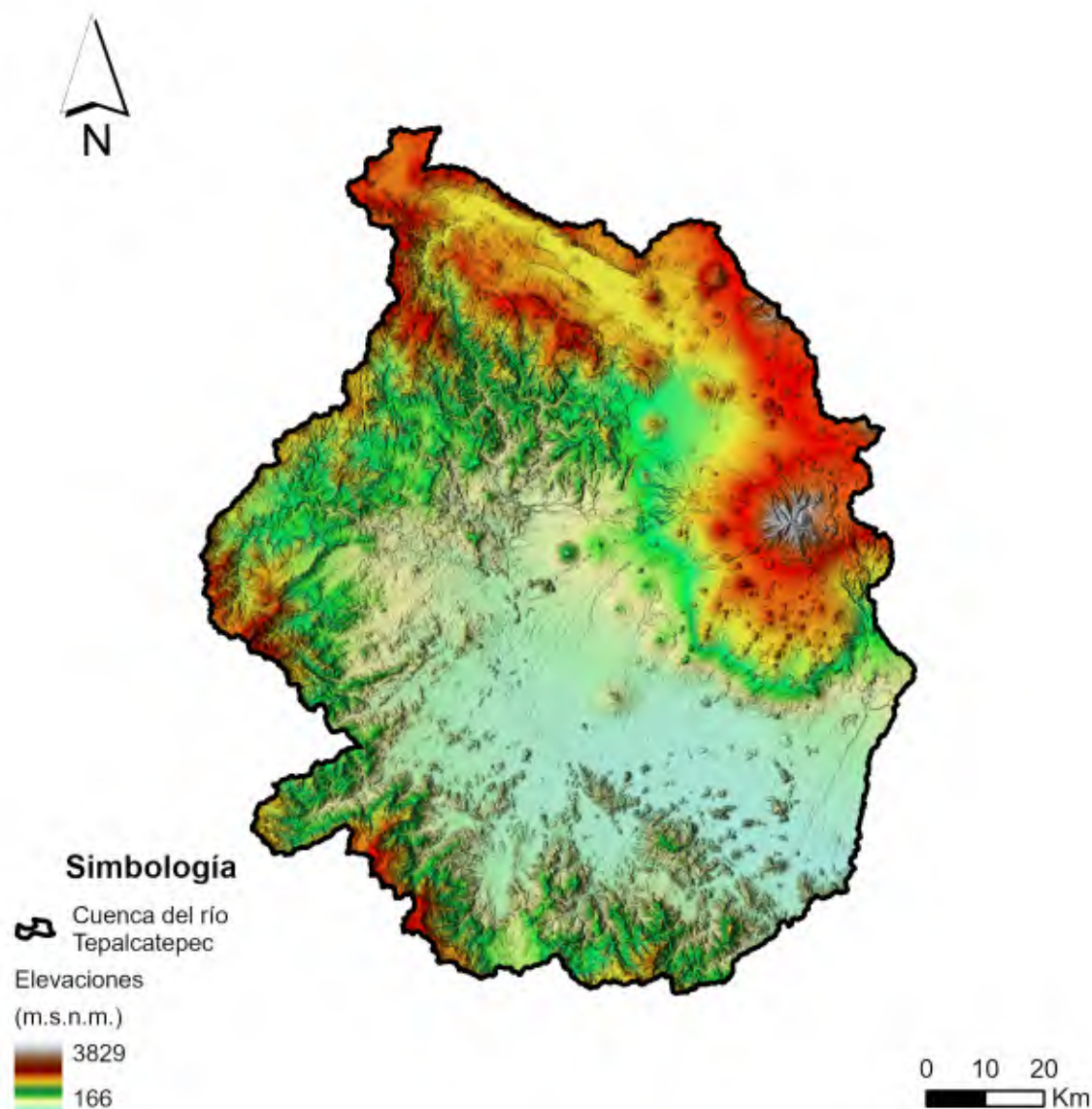


Figura 7.3: Elevaciones del terreno de la zona de estudio.

Las elevaciones del terreno en la zona de estudio varían considerablemente, teniendo una elevación máxima de 3829 m.s.n.m. en el Pico de Tancítaro y elevaciones bajas en el valle que llegan hasta 166 m.s.n.m.

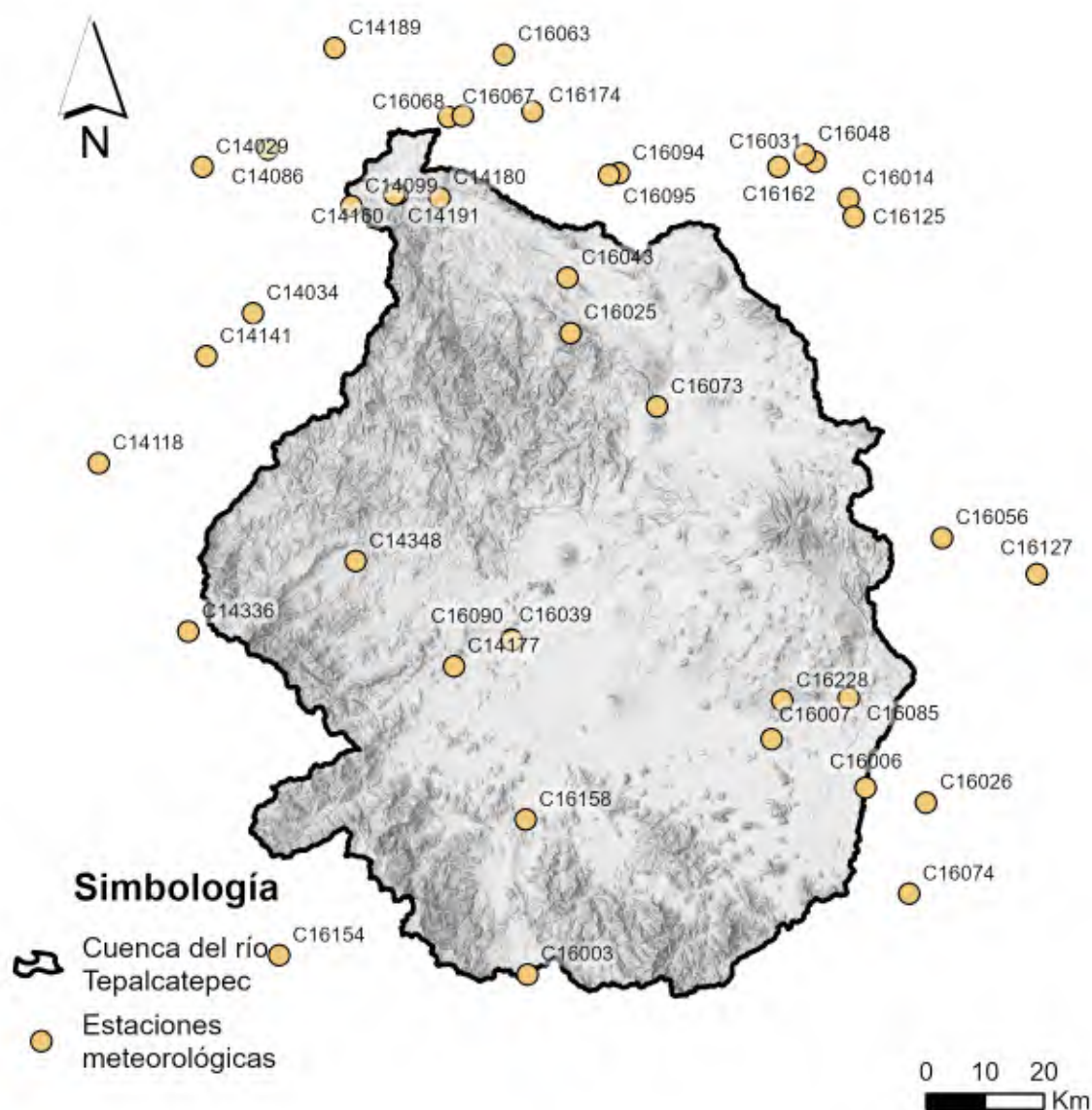


Figura 7.4: Estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

Como se mencionó en apartados anteriores, en la zona de estudio se localizaron 40 estaciones meteorológicas, cuya distribución espacial se muestra en la Figura 7.4.



Figura 7.5: Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.

Como se mencionó en apartados anteriores, en la zona de estudio se localizaron 11 estaciones hidrométricas, cuya distribución espacial se muestra en la Figura 7.5, presentando también las cuencas drenadas por las estaciones hidrométricas y la existencia de 4 presas.

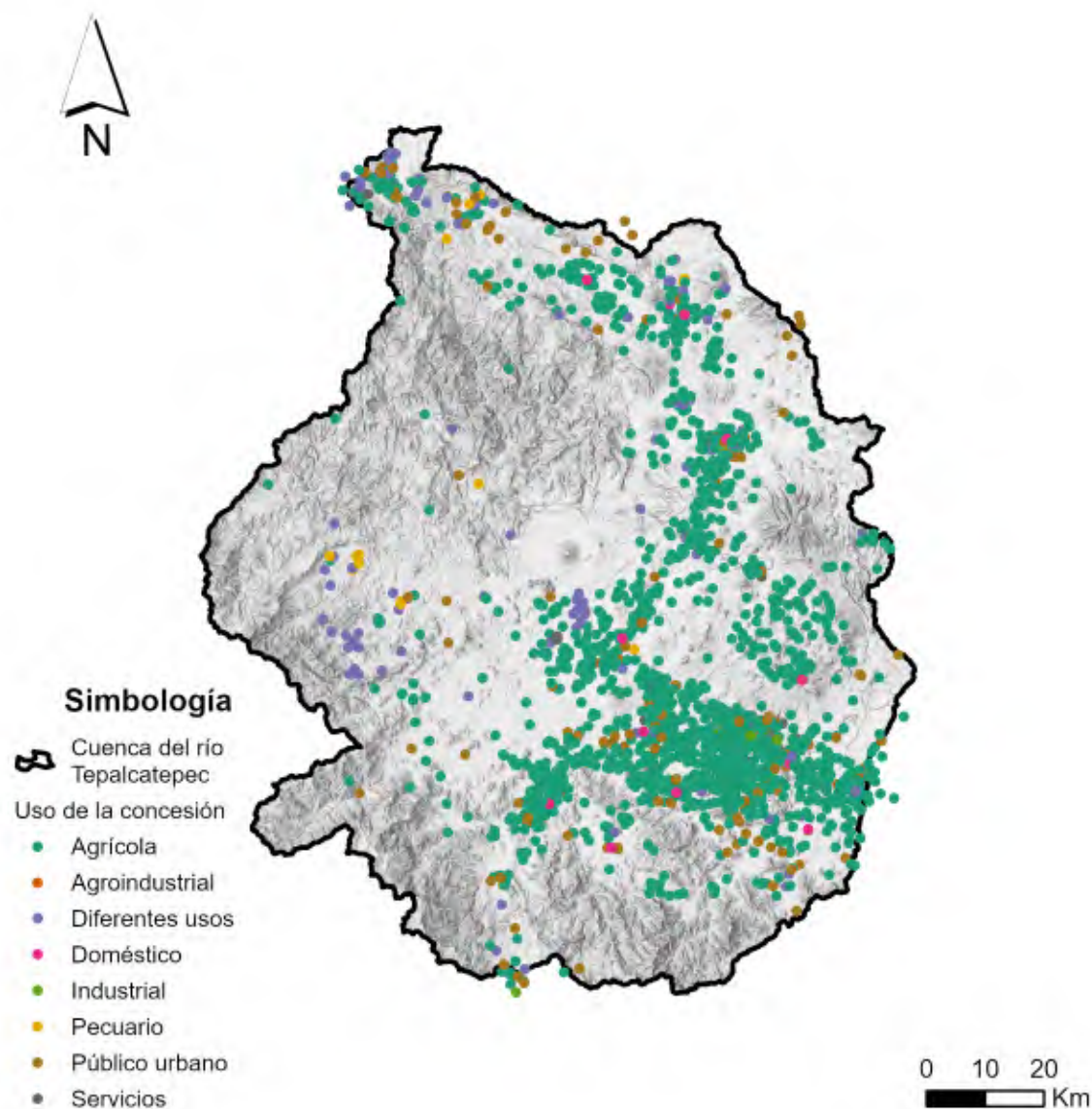


Figura 7.6: Pozos de aprovechamientos subterráneos en la zona de estudio.

La distribución espacial de los pozos concesionados revelan que la gran mayoría se concentran en las partes bajas de la cuenca. También otro gran grupo de pozos se concentra en las zonas aledañas al municipio de Cotija.

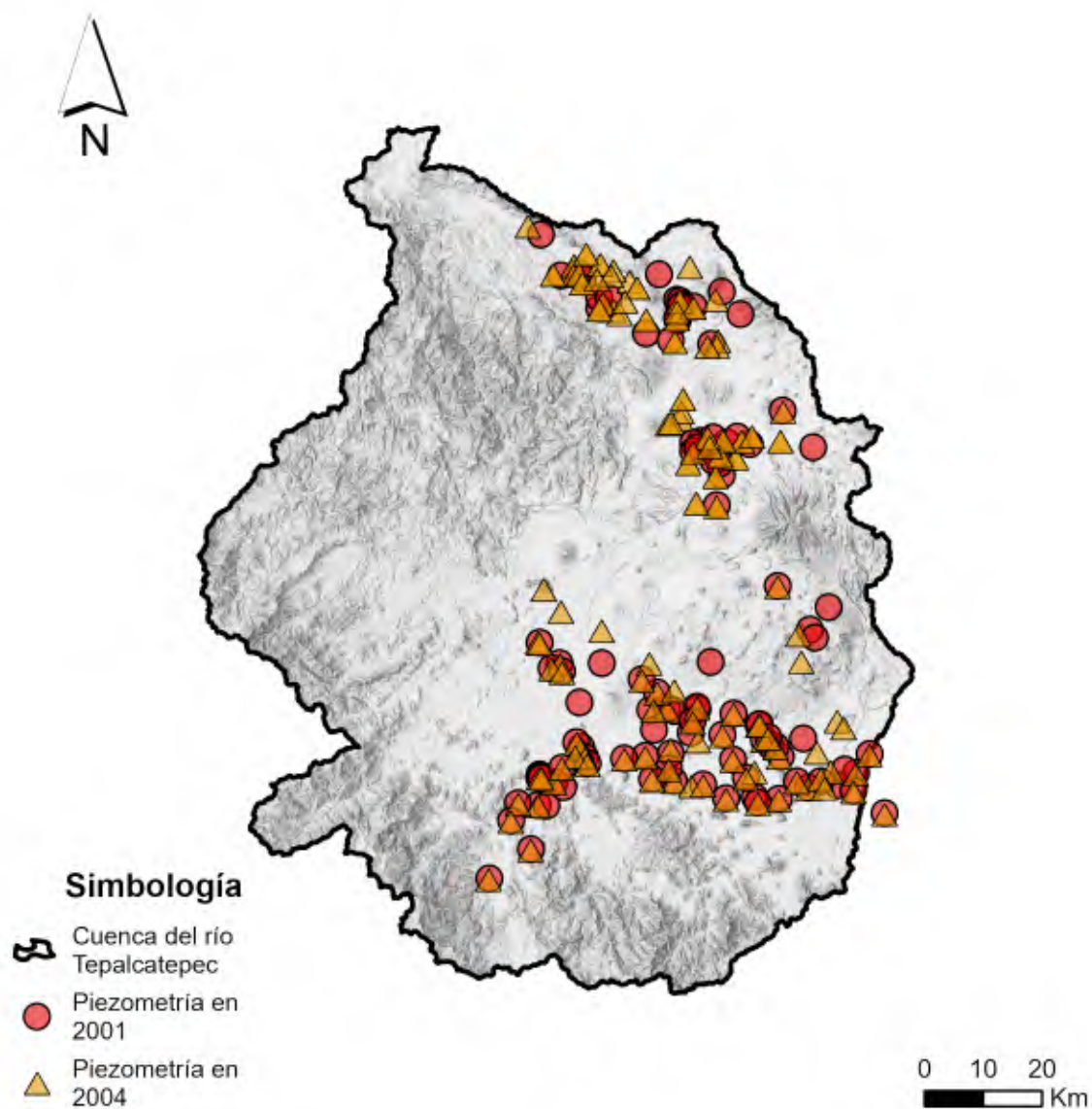


Figura 7.7: Pozos piezométricos en la zona de estudio.

Se puede observar que la distribución espacial de los pozos con registros piezométricos sigue la tendencia marcada por la ubicación de los pozos concesionados.

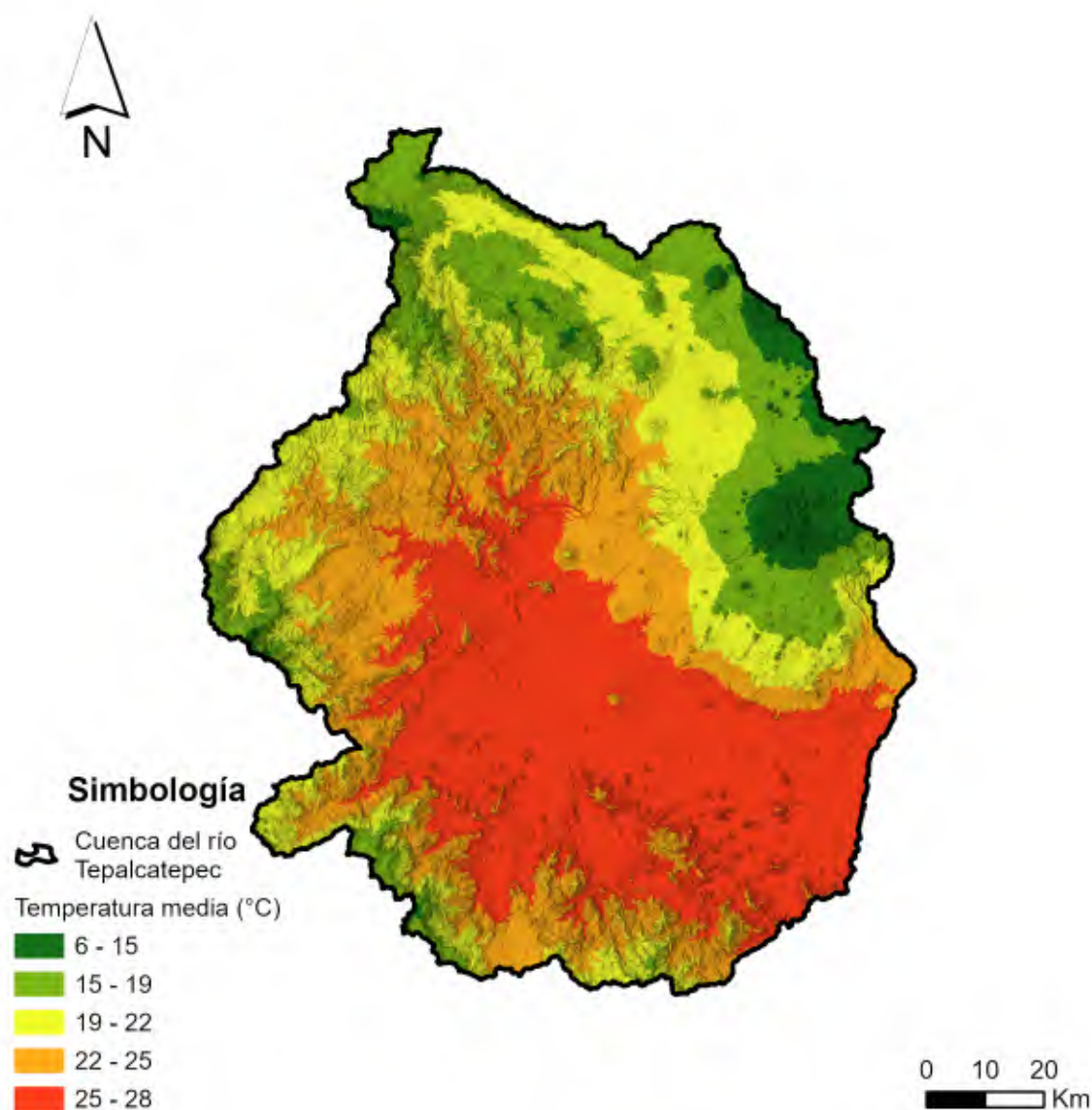


Figura 7.8: Temperatura media anual en la zona de estudio.

El rango de temperaturas en la zona de estudio varía considerablemente, así como lo hacen las elevaciones del terreno. Teniendo rangos de temperatura media anual de 6 a 15 °C en las zonas más altas y 25 a 28 °C en las zonas bajas. La temperatura media anual en la zona de estudio es de 28.4 °C.

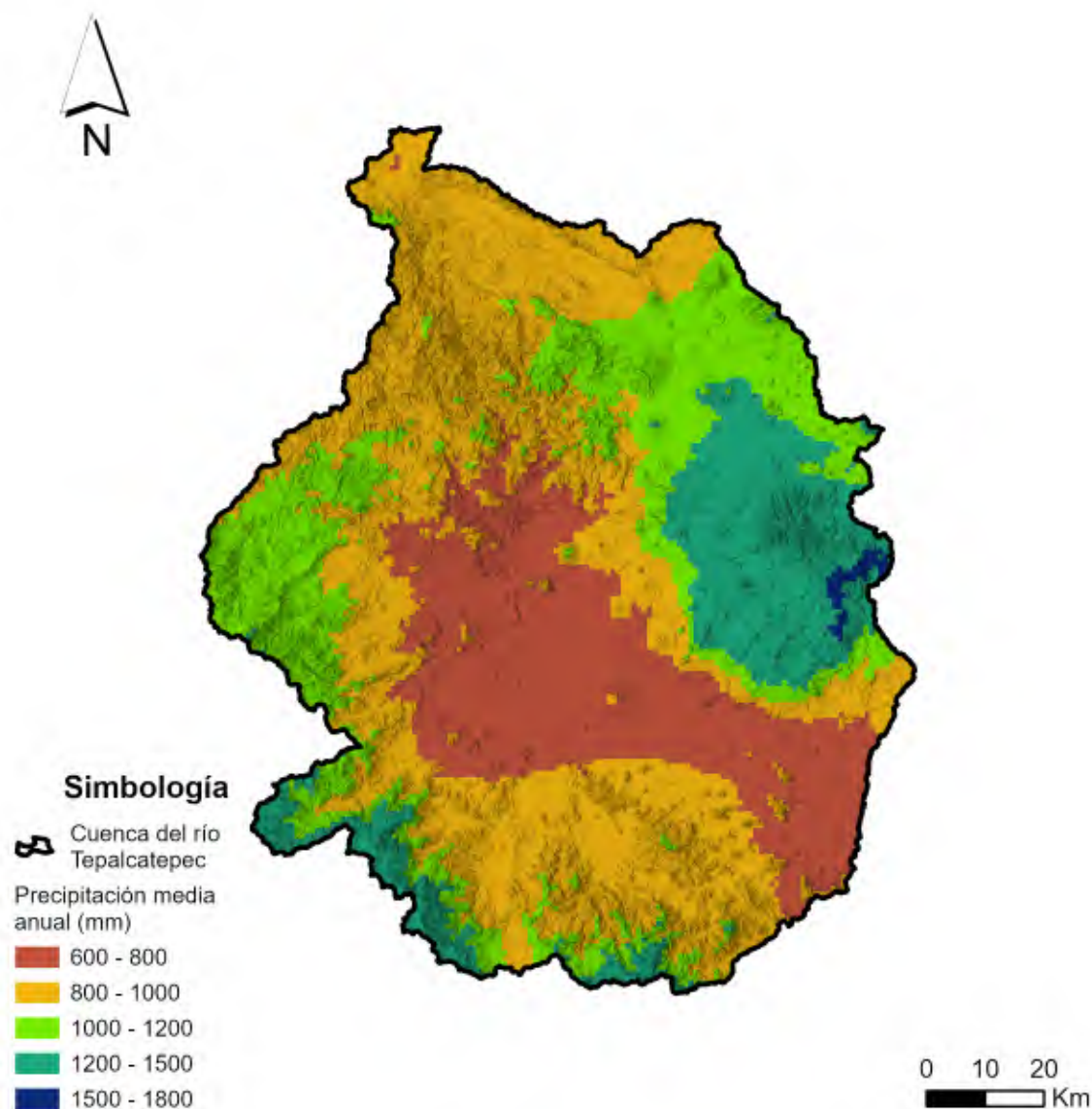


Figura 7.9: Precipitación media anual en la zona de estudio.

El rango de precipitaciones medias anuales se ve influenciado en parte por las elevaciones del terreno, donde se pueden identificar rangos de 1200 a 1500 y 1500 a 1800 mm en las zonas altas que rodean el Pico de Tancítaro, con rangos de 600 a 800 mm en las zonas bajas. La precipitación media anual en la zona de estudio es de 965 mm.

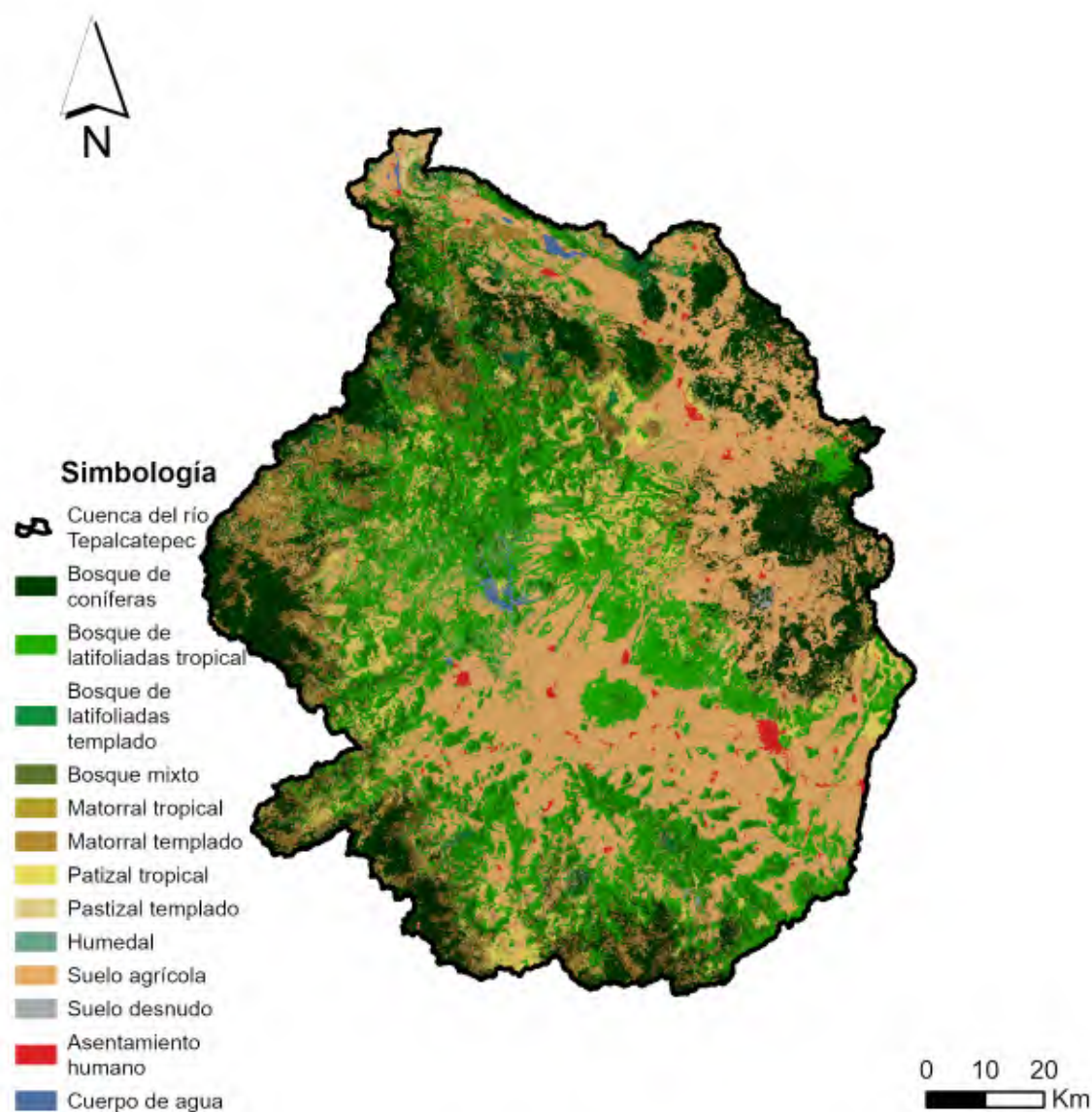


Figura 7.10: Uso de suelo en la zona de estudio.

El uso de suelo predominante en la zona de estudio es el suelo agrícola en un 33 %, seguido de bosques de latifoliadas en un 31 % y bosque de coníferas en 18 %. Otros aspectos relevantes es que el uso de suelo por asentamientos humanos representa solo un 1.4 %, y la superficie de almacenamiento de las presas un 0.37 %.

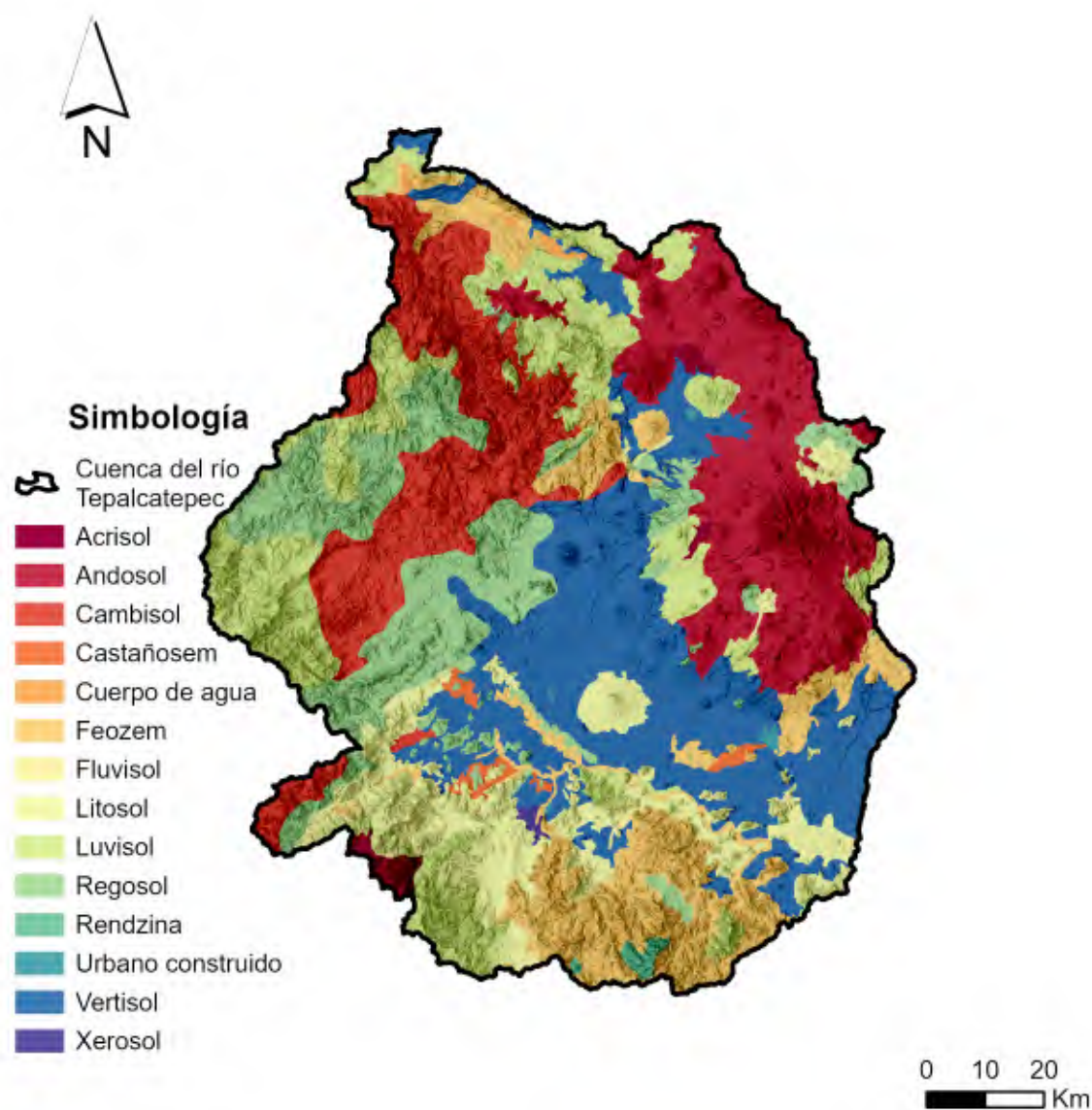


Figura 7.11: Tipo de suelo en la zona de estudio.

Existen diversos tipos de suelo en la zona de estudio, la distribución y proporción de estos es muy variada, destacando los vertisoles, andosoles y luvisoles, en un 20, 15 y 15 % respectivamente.

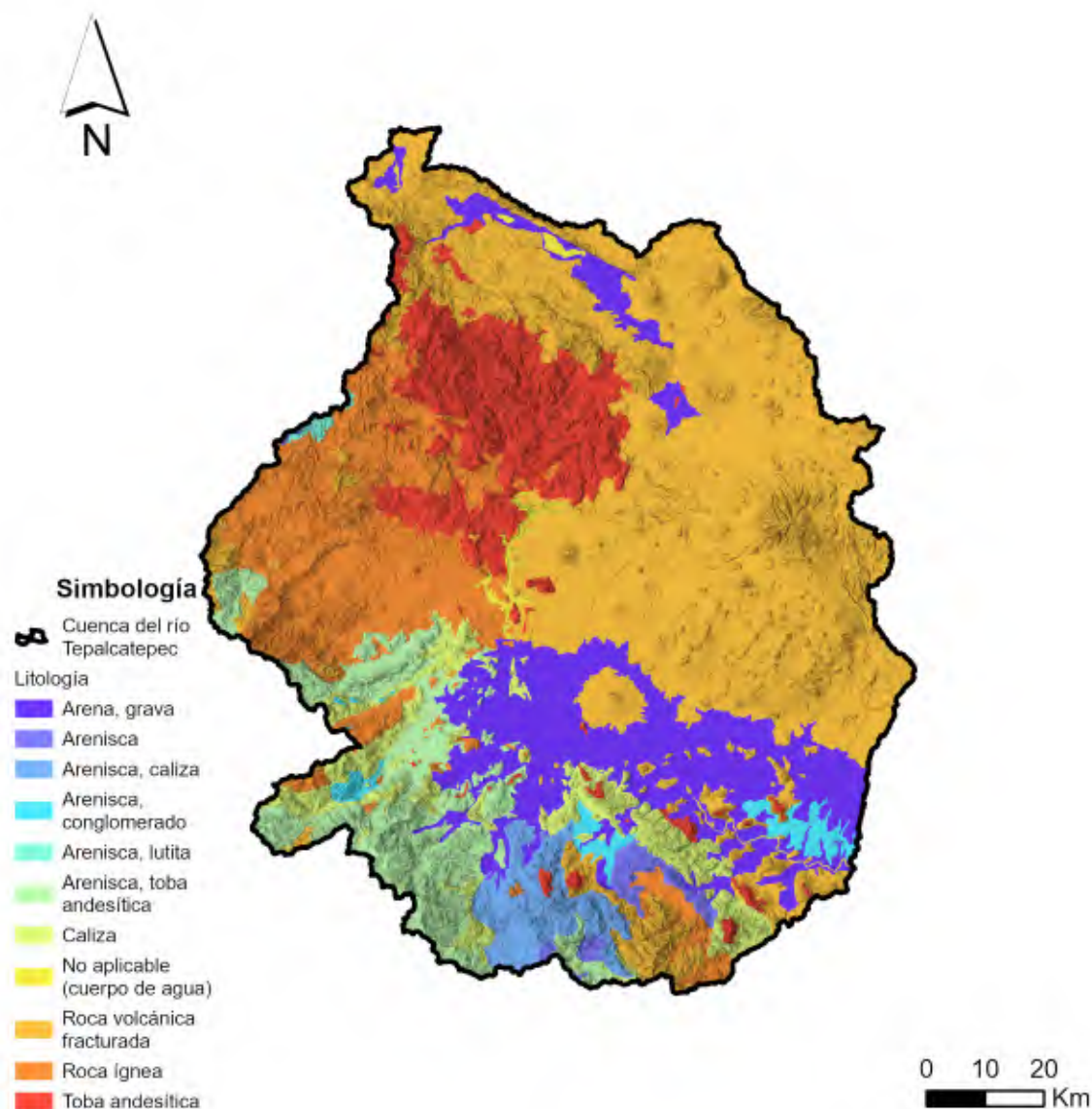


Figura 7.12: Tipo de litología en la zona de estudio.

La geología en la zona de estudio es diversa, destacando la presencia de andesita-basalto y granito en las partes altas de la cuenca, y aluviales en las partes bajas de la cuenca, en un 30, 15 y 14 % respectivamente en relación con el área total.

7.3 Gestión de datos

7.3.1 Homogeneización de datos meteorológicos

Los datos meteorológicos fueron introducidos a Climatol, completando y homogeneizando los datos en el periodo 1960-2020. En la Figura 7.13 se presenta un caso de ejemplo de los resultados obtenidos de la homogeneización.

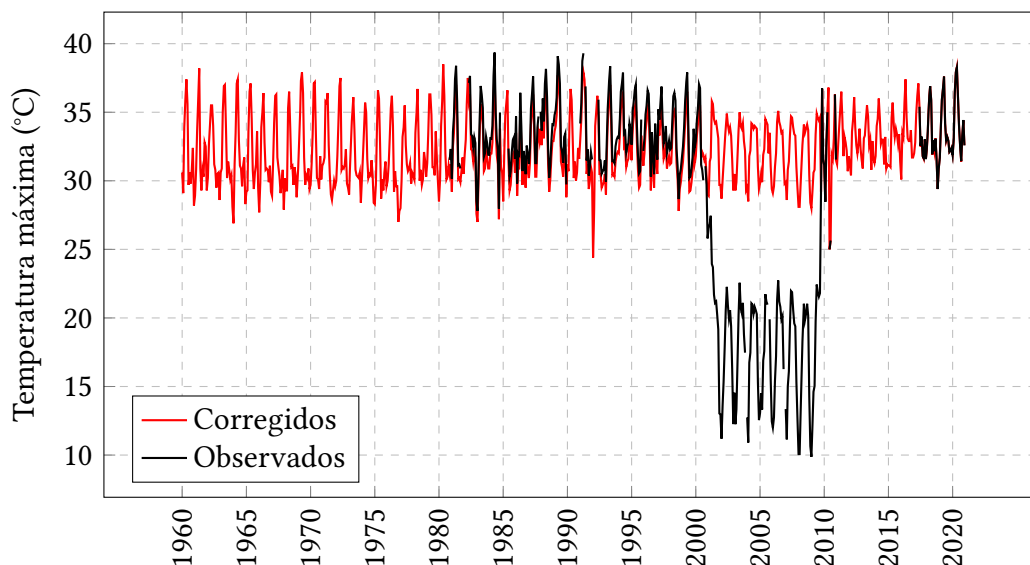


Figura 7.13: Resultados de la homogeneización en la estación C14348.

En la figura previamente mostrada se puede apreciar como los datos observados tienen un claro punto de quiebre en la tendencia de estos, los cuales fueron identificados y corregidos, así mismo se reconstruyó la serie estimando sus datos faltantes. Para el resto de las estaciones, en la gran mayoría de casos no se requirieron grandes correcciones.

7.3.2 Cálculo de evapotranspiración potencial

La **ETP** fue calculada para el periodo 1960-2020 a partir de los datos de temperatura máxima y mínima interpolados para las cuencas de calibración. En la Figura 7.14 se presentan los datos de **ETP** para la cuenca B18494.

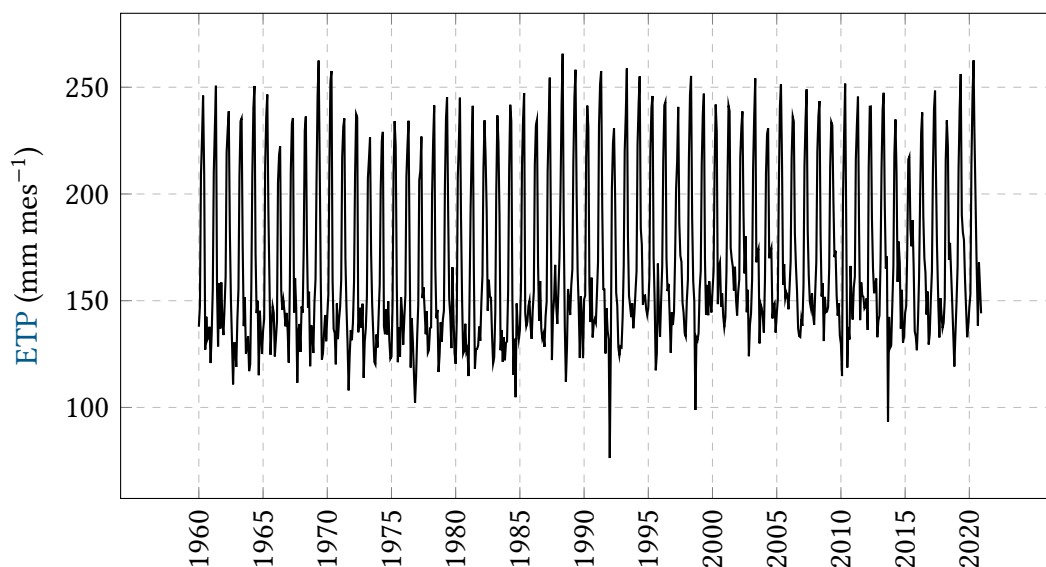


Figura 7.14: Series temporales de ETP en la cuenca de la estación B18494.

7.3.3 Restitución de régimen

Para el caso de la estación Chilatán se puede observar la presencia de la presa Chilatán, por lo tanto, ya que se tienen los volúmenes almacenados acumulados, se restaron los volúmenes en cada paso de tiempo y se sumaron las extracciones por obra de toma y por vertedor. De esta manera se restituyeron los datos de dicha estación a su régimen natural, tal como se muestra en la Figura 7.15.

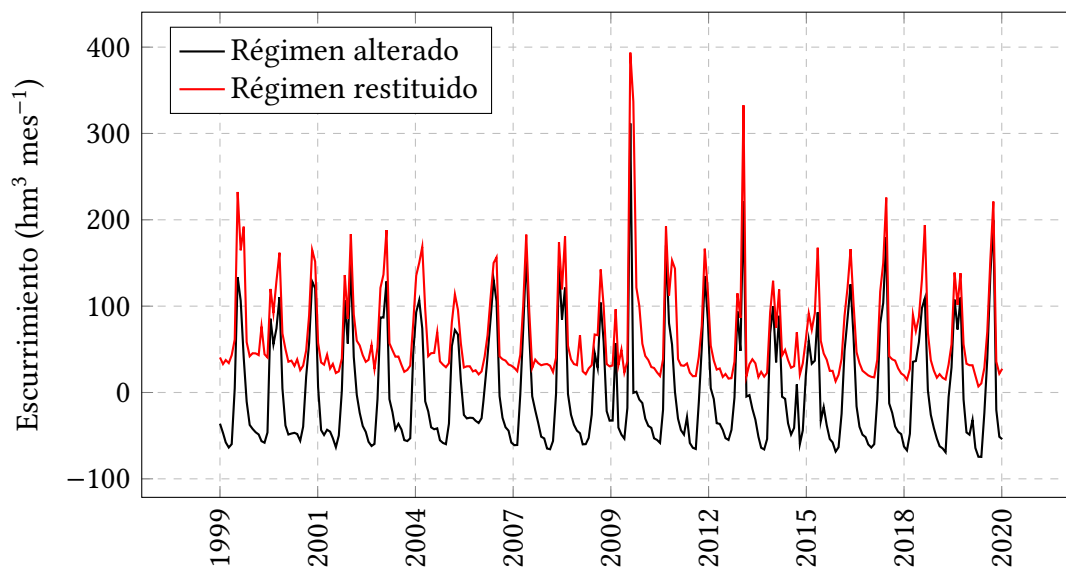


Figura 7.15: Restitución a régimen natural de los datos de la presa Chilatán.

7.4 Modelación superficial

7.4.1 Montaje y calibración del modelo

Los datos de precipitación, [ETP](#) y escurrimientos observados fueron introducidos a [Hydromad](#), montando así los modelos [HBV](#) y [SAC-SMA](#), calibrándolos y obteniendo las simulaciones de cada cuenca de calibración.

En la Figura 7.16 se muestran las simulaciones de los escurrimientos mensuales en la estación B18494 que corresponde a los de la [CRT](#). Los resultados del resto de cuencas de calibración pueden consultarse en el apéndice [A](#).

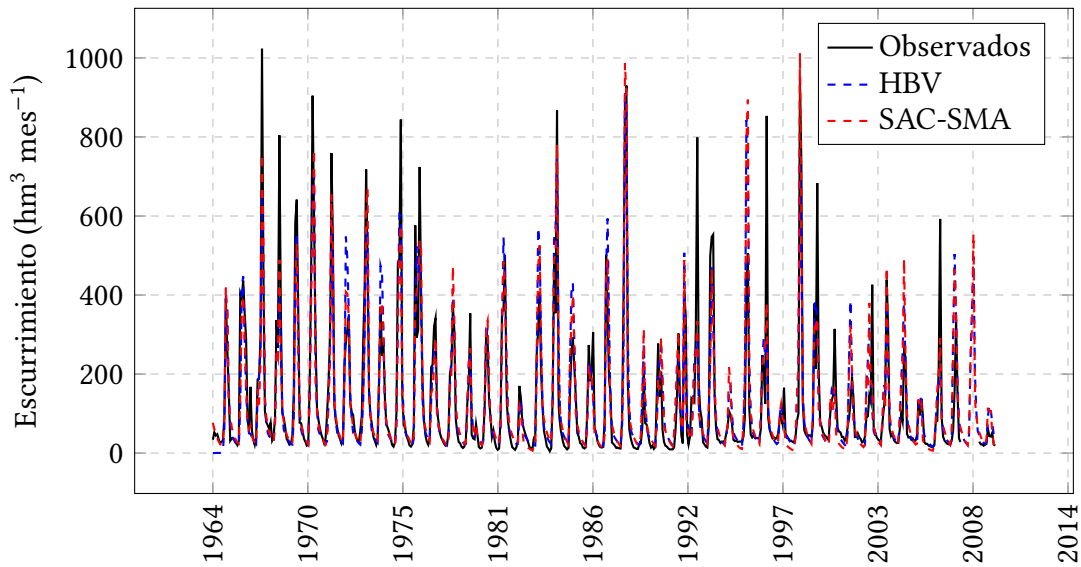


Figura 7.16: Escurrimientos mensuales en la cuenca de la estación B18494.

A su vez, en las Figuras 7.17 y 7.18 se presentan los escurrimientos medios anuales y medios mensuales, respectivamente.

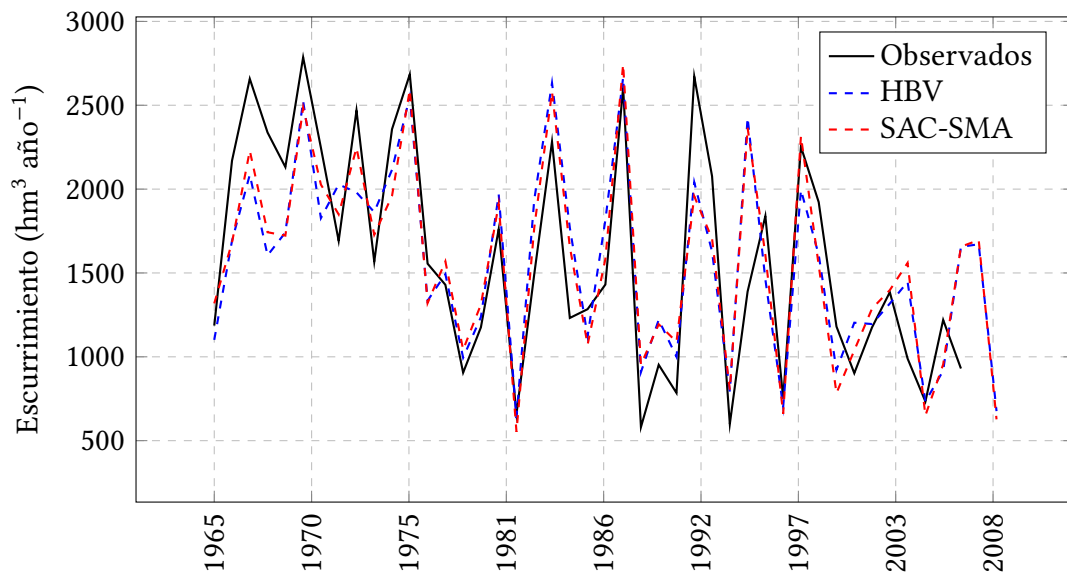


Figura 7.17: Esgurrimientos anuales en la cuenca de la estación B18494.

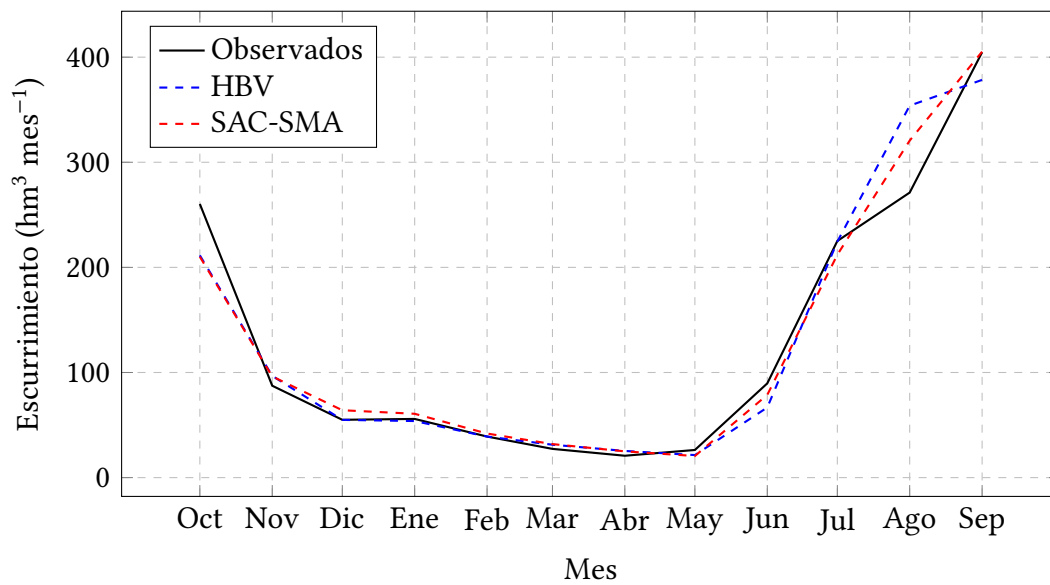


Figura 7.18: Esgurrimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18494.

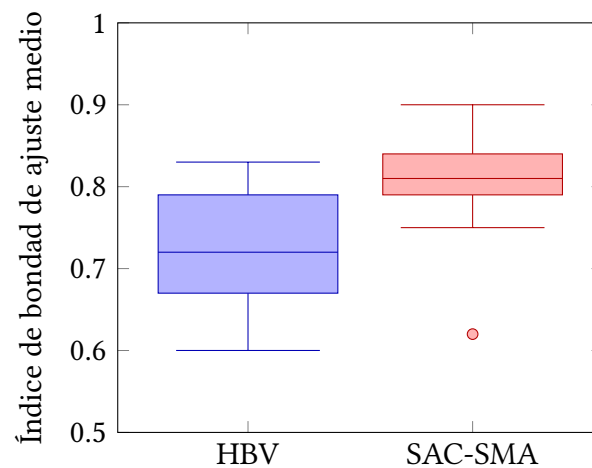
7.4.2 Evaluación del modelo

Se calcularon y agruparon los índices de bondad de ajuste de cada modelo para cada cuenca de calibración (ver Tabla 7.7), donde se puede observar que en ningún caso se tiene un índice menor a 0.50, obteniendo modelos que van desde satisfactorios hasta muy buenos.

Tabla 7.7: Índices de bondad de ajuste de los modelos **HBV** y **SAC-SMA** para cada cuenca de calibración.

Clave	HBV				SAC-SMA			
	NSE	NSE _{ln}	R ²	KGE	NSE	NSE _{ln}	R ²	KGE
18201	0.53	0.87	0.54	0.56	0.55	0.80	0.56	0.55
18202	0.80	0.90	0.80	0.79	0.73	0.85	0.74	0.85
18452	0.72	0.83	0.72	0.75	0.84	0.84	0.84	0.85
18494	0.76	0.81	0.76	0.84	0.81	0.82	0.81	0.87
18496	0.74	0.84	0.75	0.76	0.78	0.84	0.78	0.85
18095	0.67	0.85	0.67	0.72	0.69	0.88	0.70	0.75
18280	0.85	0.74	0.85	0.87	0.81	0.82	0.84	0.73
18281	0.71	0.62	0.79	0.80	0.88	0.85	0.88	0.92
18531	0.63	0.31	0.65	0.81	0.83	0.86	0.83	0.86
18532	0.61	0.59	0.69	0.80	0.90	0.88	0.90	0.92
CHLMC	0.65	0.49	0.77	0.74	0.74	0.80	0.76	0.87

Para tener una visión con mayor claridad acerca del rendimiento obtenido de los modelos, se promediaron los índices de bondad de ajuste de cada modelo de cada cuenca de calibración, a fin de compararlos, tal como se aprecia en la Figura 7.19.

**Figura 7.19:** Índice de bondad de ajuste medio de cada cuenca de calibración, de cada modelo.

De acuerdo con la evaluación gráfica de las simulaciones y los índices de bondad de ajuste de cada modelo, se puede concluir que ambos tienen una buena representación de los escurrimientos de las cuencas aforadas de la zona de estudio. Sin embargo, el modelo [SAC-SMA](#) demuestra ser superior, teniendo un mejor rendimiento en 8 de las 11 cuencas calibradas. Por todo lo anteriormente mencionado, se elige el modelo [SAC-SMA](#) para su utilización en las simulaciones.

7.4.3 Traslado de parámetros y obtención de infiltraciones

Se generaron 80 microcuencas con cobertura espacial sobre toda la [CRT](#), a las cuales se les fueron transferidas los parámetros de las cuencas de calibración, a su vez como series meteorológicas. De esta manera, se crearon los modelos [SAC-SMA](#) para dichas microcuencas, obteniendo así las series de infiltraciones para el periodo 1960-2020.

En la Figura [7.20](#) se presenta la distribución espacial de las infiltraciones medias mensuales en la [CRT](#), en función de las microcuencas consideradas.

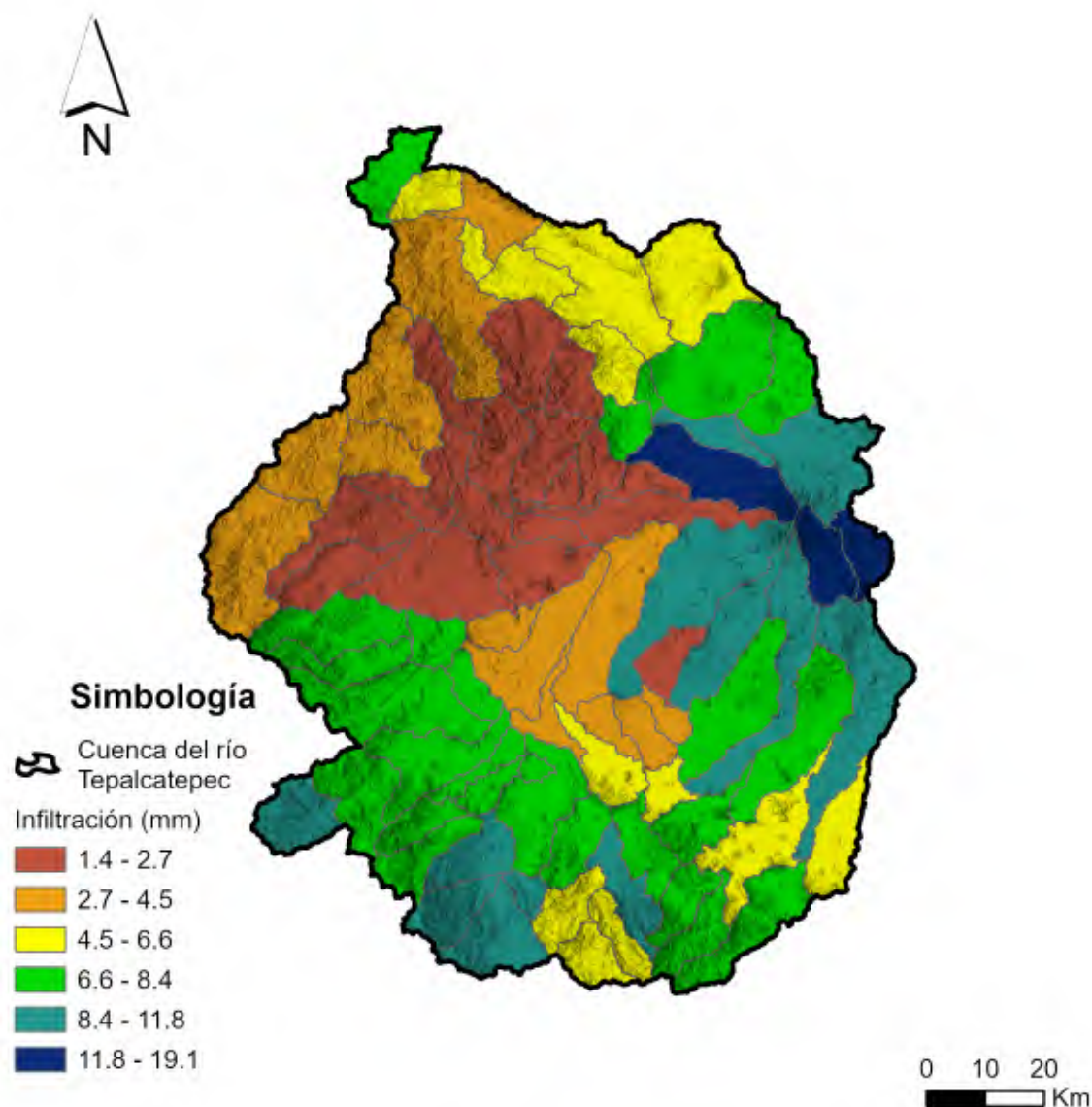


Figura 7.20: Infiltraciones medias mensuales de las microcuencas de la CRT, en mm.

7.5 Modelación subterránea

7.5.1 Discretización espacial de la zona de estudio

La zona de estudio se discretizó en una malla de 17 columnas y 20 filas, resultando 340 celdas, cada una con un tamaño de 7.5×7.5 km. A partir de esta malla, la información requerida para montar el modelo subterránea se transformó a este formato de malla.

Con base en esta discretización, las mallas de celdas activas/inactivas, elevaciones, nivel estático inicial, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, recarga y extracciones se prepararon en formato celda para su uso en el modelo subterráneo. Los ejemplos gráficos de dichas mallas se presentan en el apéndice B.

7.5.2 Montaje y calibración del modelo

Con la información previamente mencionada en formato celda, se introdujeron a Modelmuse para así montar el modelo hidrológico subterráneo.

Para comenzar el proceso de calibración del modelo, se realizaron numerosas simulaciones, probando diferentes combinaciones en los valores de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. En cada simulación se calculó el error absoluto medio (comparando niveles piezométricos simulados y observados en las celdas con registro para 2001 y 2004), a fin de poder comparar la evolución del error a lo largo de las simulaciones; de esta manera, se puede plantear una estrategia orientada a reducir el error en la mayor medida posible.

En la Figura 7.21 se muestra el resultado de la mejor simulación, en la cual se pudo minimizar el error, diferenciado entre los distintos de materiales.

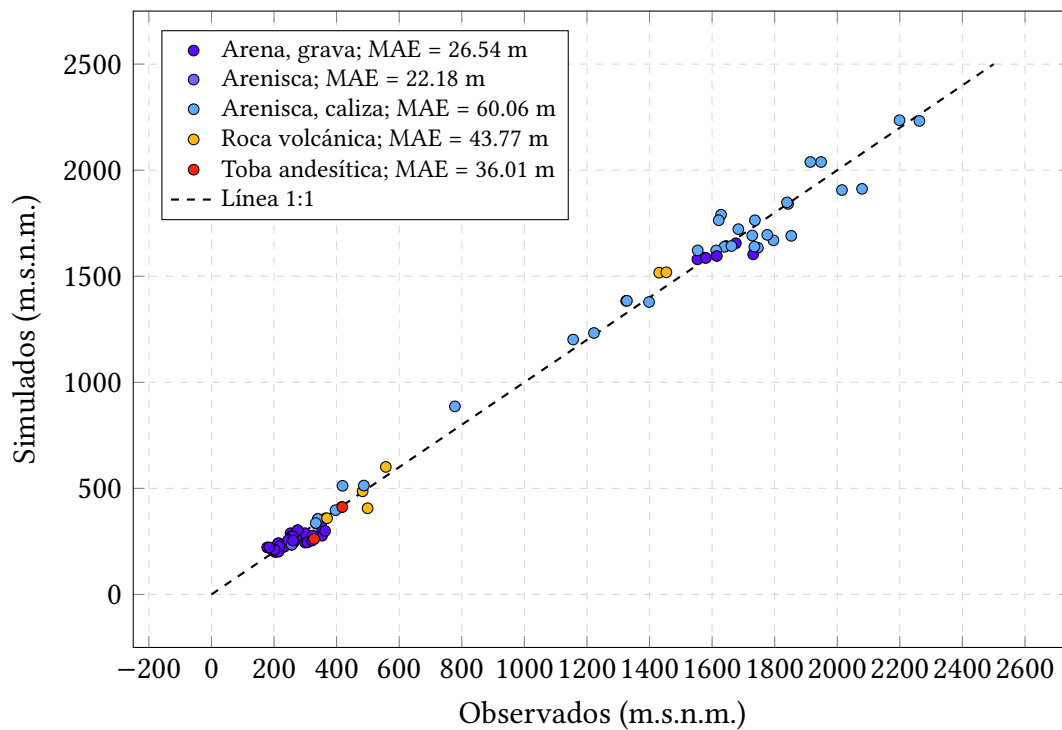


Figura 7.21: Comparación de niveles piezométricos observados y simulados.

Visualmente se pudo observar que el grado de ajuste varía no solo en función del tipo de material existente, sino también en función de la topografía, las zonas con altitudes menores

a 1000 m.s.n.m. corresponden a la zona baja de la cuenca, en donde se tiene mayor actividad agrícola, notándose una mayor densidad de mediciones, ayudando a mejorar el grado de ajuste del modelo en dicha zona. Por otro lado, en la zona alta, con altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., las mediciones escasean, y, dada la gran variación topográfica, resulta complicado mejorar el grado de ajuste del modelo en dicha zona.

A su vez, se tomaron diferentes celdas pertenecientes a las zonas bajas y altas de la cuenca, a fin de visualizar la variación de los niveles piezométricos a lo largo de la simulación, tal como se muestran en las Figuras 7.22 y 7.23.

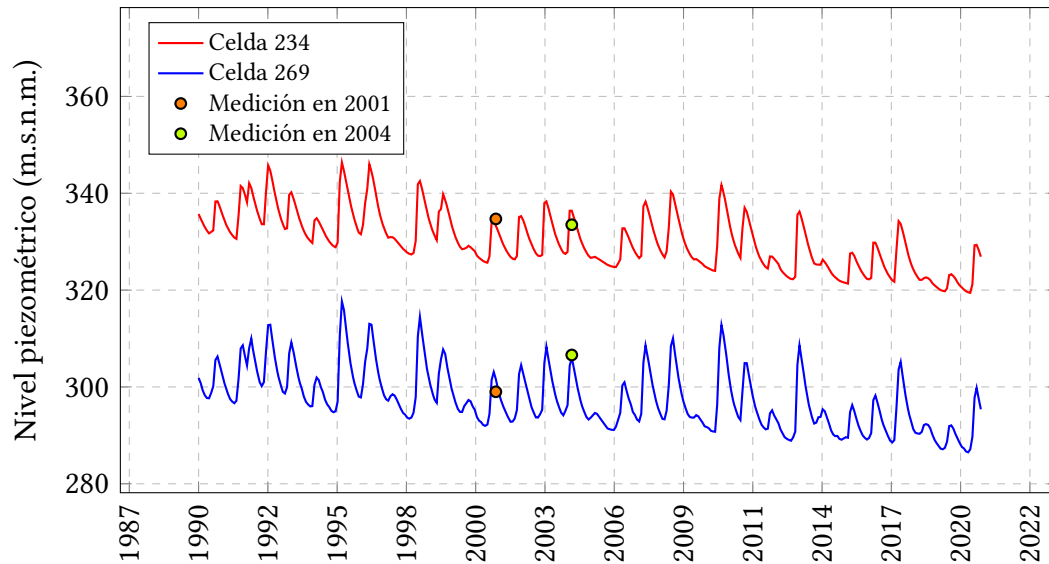


Figura 7.22: Evolución de los niveles piezométricos en las celdas 234 y 269.

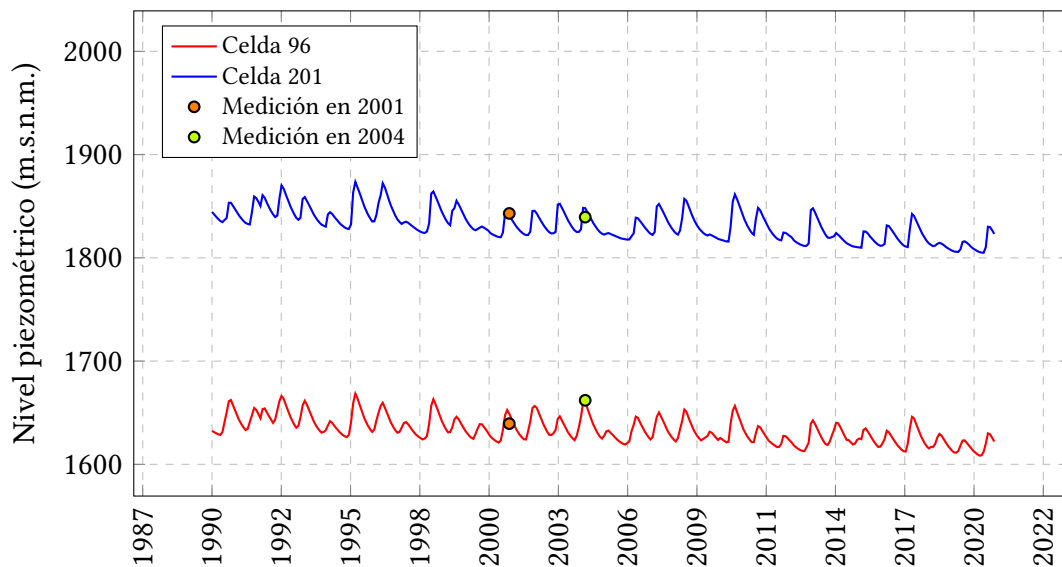


Figura 7.23: Evolución de los niveles piezométricos en las celdas 96 y 201.

A fin de poder visualizar la tendencia de la evolución de los niveles piezométricos, se determinó la anomalía estacional por cada celda del modelo, promediándose para obtener una serie temporal equivalente de toda la cuenca, tal como se puede apreciar en la Figura 7.24. De esta manera, se pudo evidenciar una tendencia descendente de los niveles piezométricos, en particular, una anomalía promedio de -4 m y máximas de hasta -24 m en 2020. los cuales pueden estar asociados al incremento del volumen concesionado de aprovechamientos subterráneos, ya que los volúmenes de recarga natural no presentaron grandes variaciones que afectaran en tal medida los niveles piezométricos.

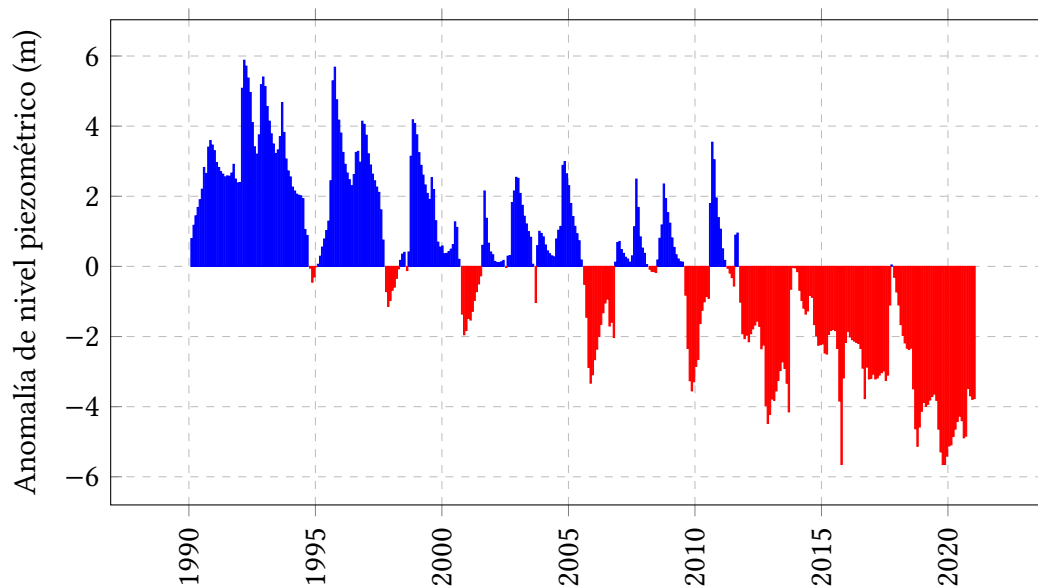


Figura 7.24: Anomalía estacional de los niveles piezométricos en la CRT.

Además, para complementar el análisis temporal, en la Figura 7.25 se presenta un mapa con la distribución espacial de la anomalía estacional en el año 2020. En dicho mapa, se pudieron observar grandes anomalías en la zona baja de la cuenca, caracterizada por ser la que concentra la mayor cantidad de pozos de aprovechamientos subterráneos (ver Figura 7.6), notándose un posible descenso de los niveles en la zona montañosa aledaña producto de la gran explotación en la zona baja. También se destacan anomalías considerables en la zona norte de la cuenca, zona la cual es reconocida por su actividad agrícola. Finalmente, en la región centro-oeste de la cuenca se observaron anomalías muy bajas que se mantienen cercanas a la media estacional, que a su vez es una región montañosa mayormente inhabitada en donde existen pocas concesiones de aprovechamientos subterráneos a comparación de las demás zonas descritas.

Tabla 7.8: Estadísticos de ajuste del modelo subterráneo.

Tipo de material	MAE (m)	RMSE (m)	R ²
Arena, grava	26.54	36.94	0.9951
Arenisca	22.18	22.18	1.0000
Arenisca, caliza	60.06	79.67	0.9824
Roca volcánica	43.77	56.40	0.9940
Toba andesítica	36.01	47.26	0.9997

De la tabla anterior se pudo observar que los materiales que se encuentran en la zona baja de la cuenca tienen los menores errores y viceversa con aquellos de la zona alta (arena, grava y arenisca en la zona baja; arenisca-caliza y roca volcánica en la zona alta).

A pesar de las limitaciones del modelo producto de la escasa información existente en la zona, la calibración lograda es suficiente para capturar la tendencia de la evolución de los niveles piezométricos ante la influencia de los bombeos de agua subterránea.

7.5.4 Traslado de parámetros y obtención de niveles piezométricos

Finalmente, los parámetros calibrados se trasladaron al módulo Aquivál, obteniendo así las series espaciotemporales finales de niveles piezométricos de la zona de estudio.

7.6 Modelación conjunta

7.6.1 Definición de la topología del modelo

Con base en los elementos existentes en la CRT, se definieron los siguientes:

- **Embalses:** se definieron 4 nodos de embalse, siendo las presas presentadas en la Tabla 7.4.
- **Demandas consuntivas:** se definieron 15 nodos de demandas, que incluyen demandas tanto agrícolas como urbanas.
- **Acuíferos:** se definió un único módulo de acuífero, ya que el modelo subterráneo fue montado y calibrado como una única unidad considerando todas sus heterogeneidades espaciotemporales.

- **Conducciones:** se definieron 55 conducciones que interconectan los nodos y definen la dirección del flujo.
- **Tomas y retornos:** se definieron 15 tomas y retornos de manera análoga a los 15 nodos de demanda.
- **Aportaciones:** a partir de las microcuencas modeladas, tal como se mostró en la Figura 7.20, se definieron 80 aportaciones superficiales.

Con todos estos elementos, se dibujó la topología del modelo, donde se indican las interacciones que ocurren en el sistema de recursos hídricos, es decir, las aportaciones por escurrimiento superficial, las presas que retienen dichas aportaciones, las tomas y bombeos que retiran esa agua y sus correspondientes retornos. La topología del modelo se presenta en la Figura 7.26.

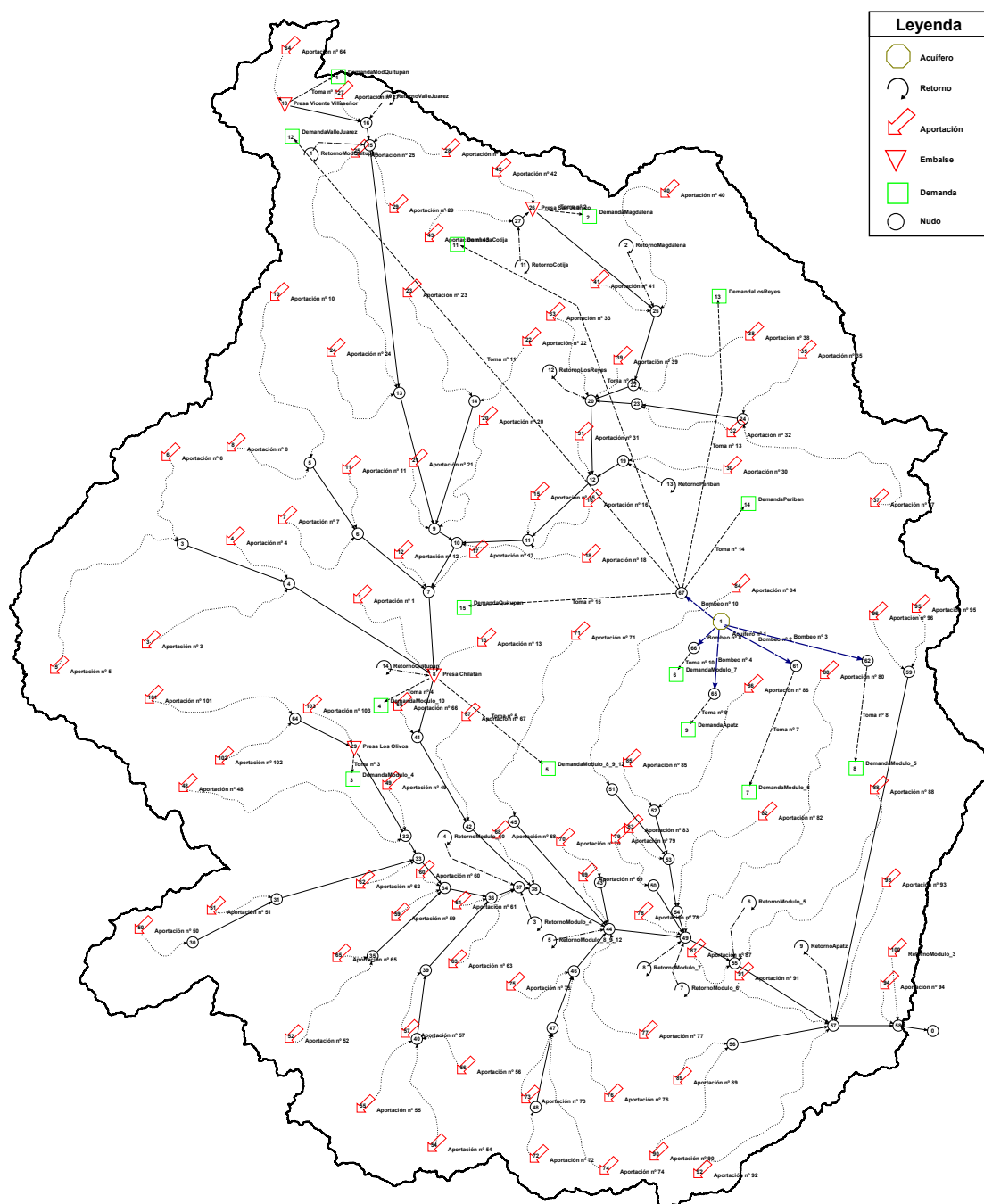


Figura 7.26: Topología del modelo conjunto de la CRT.

7.6.2 Montaje y calibración del modelo

Una vez definida la topología del modelo, se procedió a la entrada de los datos necesarios para cada elemento para su configuración, lo que permitió ejecutar las primeras simulaciones del modelo conjunto.

A continuación, se presentan los resultados de la calibración del modelo conjunto, en función de los volúmenes almacenados en las presas y del escurrimiento superficial en la salida de la cuenca. Es importante mencionar, que a lo largo del tiempo, diferentes factores como la degradación del suelo de la cuenca, los cambios en las concesiones y del propósito de las presas han cambiando la operación de las mismas. Ante esta cuestión, se consideró un periodo de calibración para cada presa que fuese el más extenso y reciente posible que refleje las condiciones actuales de dichas presas.

7.6.2.1 Presa Vicente Villaseñor

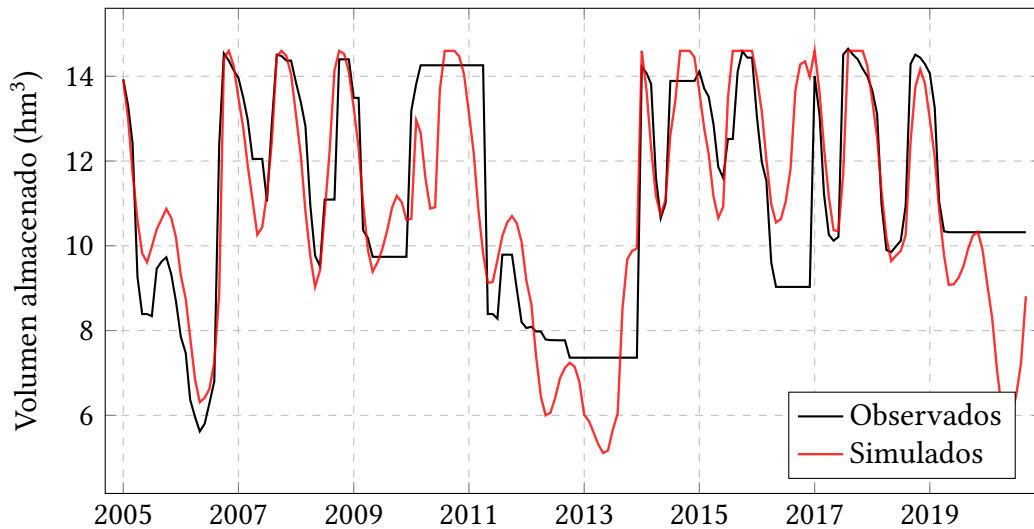


Figura 7.27: Volúmenes mensuales almacenados en la presa Vicente Villaseñor.

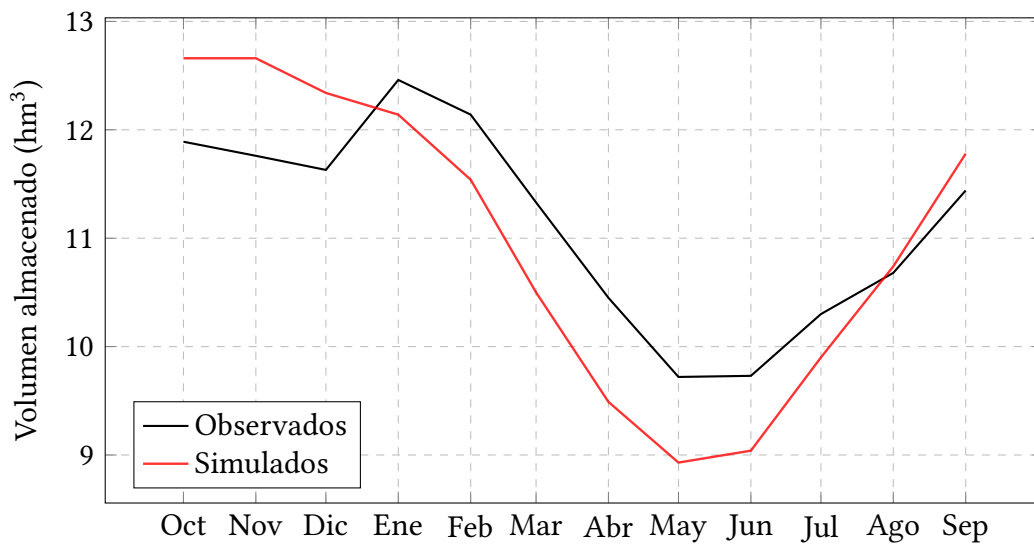


Figura 7.28: Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa Vicente Villaseñor.

La cuenca que aporta a esta presa es de cabecera, lo cual la hace más sensible ante las variaciones en la lluvia, afectando en la disponibilidad del agua para satisfacer las demandas. Dadas estas condiciones, es posible ver variaciones importantes en la representación del recurso disponible, tal como se mostró en la Figura 7.27. Asimismo, en 2011–2014 y 2019–2020 los registros observados muestran una variación casi nula del almacenamiento; mantener volúmenes constantes por años es poco verosímil porque el sistema sigue teniendo pérdidas y entradas (evaporación, escurrimiento y extracción), por lo que se consideran inconsistencias de medición. A pesar de ello, en el año medio, el modelo logra capturar de mejor manera las tendencias, como se presentó en la Figura 7.28.

7.6.2.2 Presa San Juanico

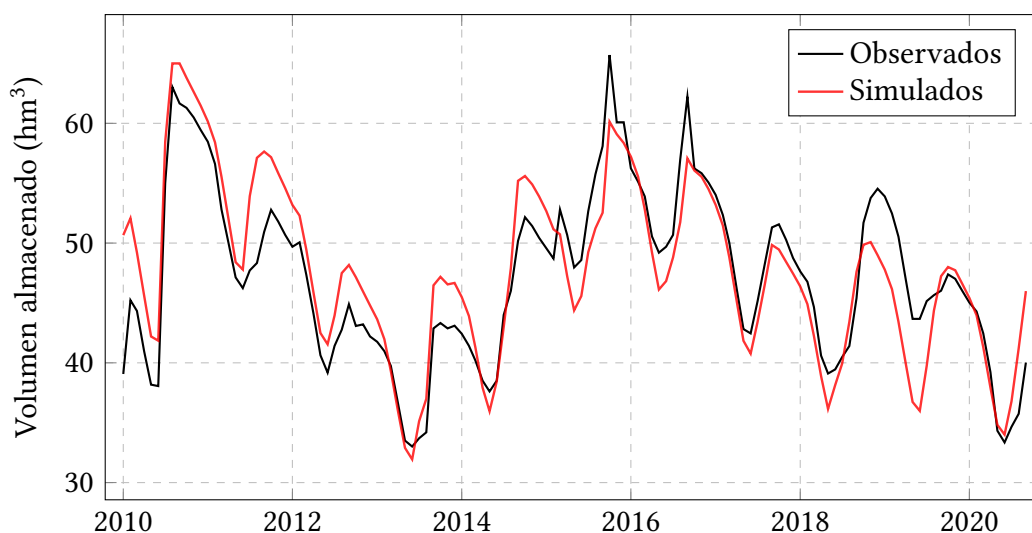


Figura 7.29: Volúmenes mensuales almacenados en la presa San Juanico.

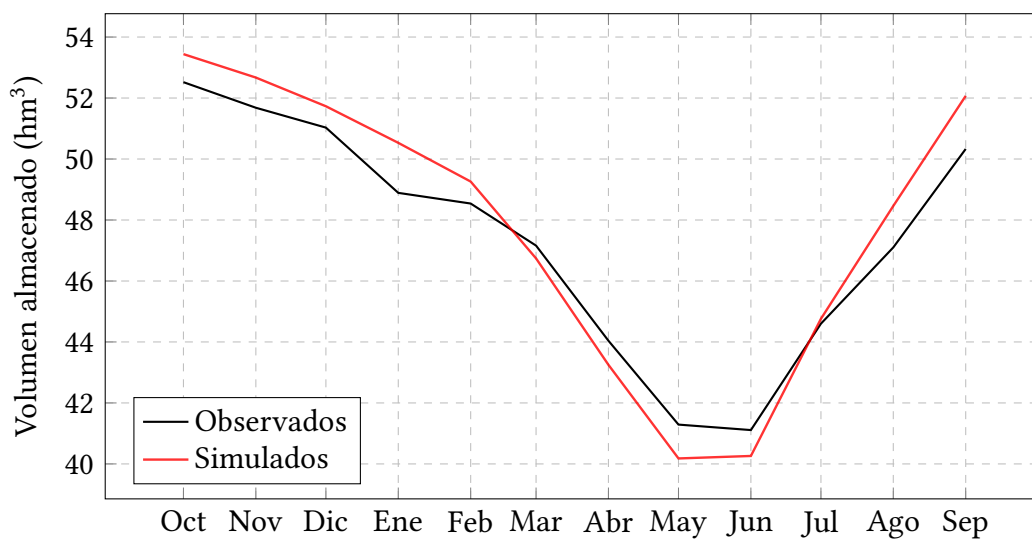


Figura 7.30: Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa San Juanico.

El estado de la calibración de esta presa es similar al de la anteriormente mencionada, la cuenca que aporta a esta presa es de cabecera, limitando el grado de ajuste dadas las variaciones en las aportaciones. Pese a ello, las Figuras 7.29 y 7.30 mostraron una buena representación de la tendencia de los volúmenes almacenados.

7.6.2.3 Presa Chilatán

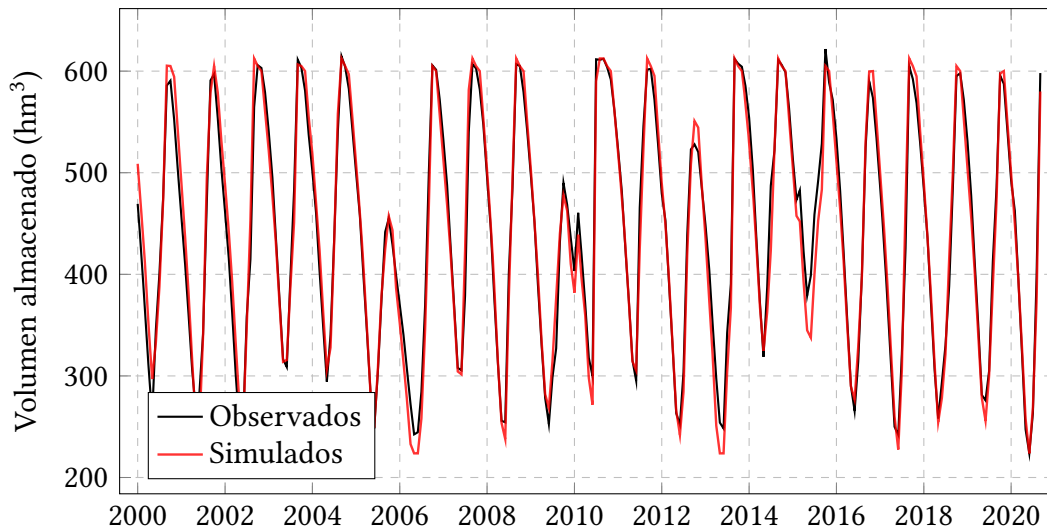


Figura 7.31: Volúmenes mensuales almacenados en la presa Chilatán.

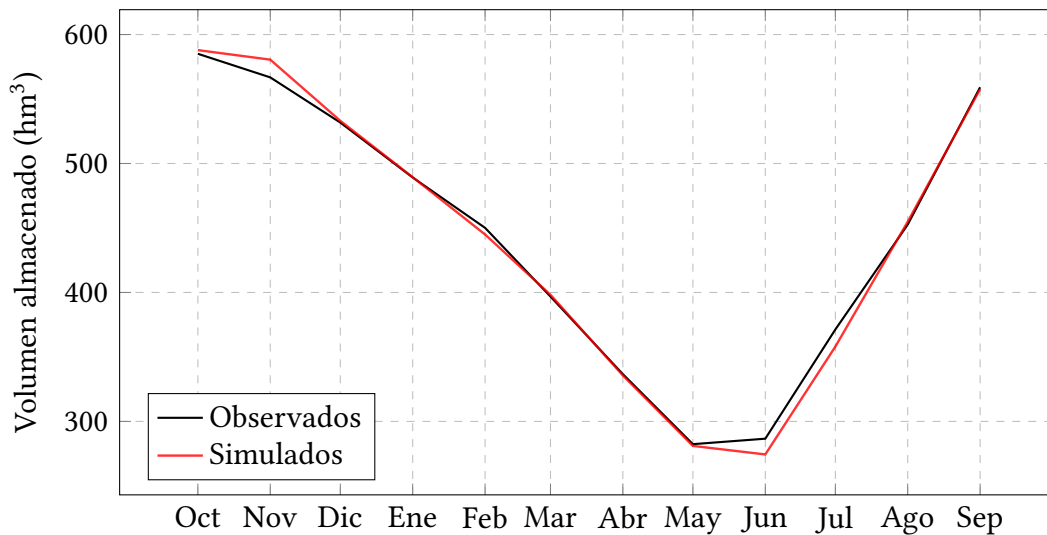


Figura 7.32: Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa Chilatán.

Como se mencionó anteriormente, las dos primeras presas se encuentran aguas arriba de esta presa, por otro lado, la cuenca que le aporta es de un gran tamaño y recibe grandes aportaciones de numerosas subcuencas permitiendo tener un escurrimiento constante hacia la presa. Esta relativa estabilidad resulta en un grado de ajuste notable, tal como se mostró en la Figura 7.31, así como también se lograron capturar las tendencias como lo mostrado en la Figura 7.32.

7.6.2.4 Presa Los Olivos

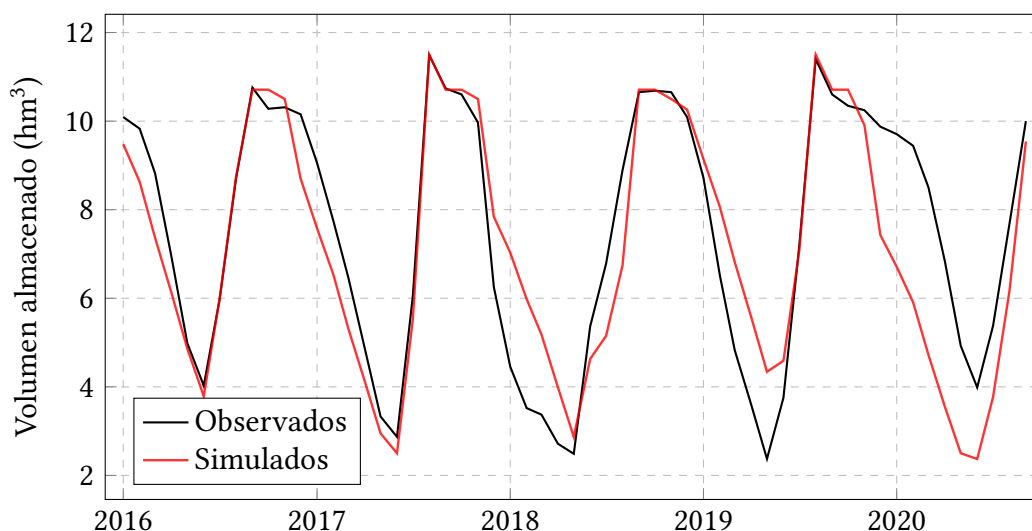


Figura 7.33: Volúmenes mensuales almacenados en la presa Los Olivos.

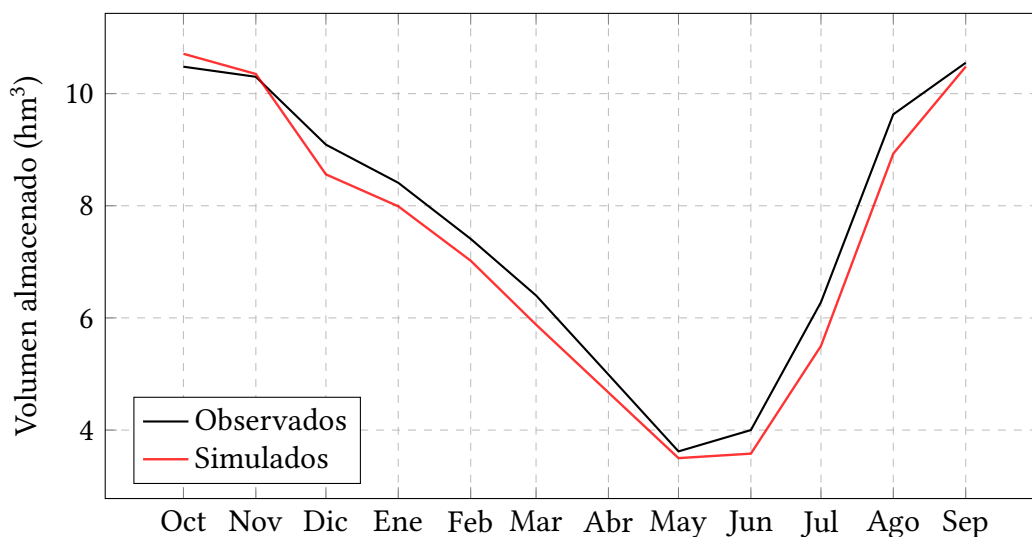


Figura 7.34: Volúmenes medios mensuales almacenados en la presa Los Olivos.

Una particularidad a destacar de esta presa es la gran pérdida de su capacidad de almacenamiento, a causa del acelerado azolvamiento en la última década provocado por diversos factores como la degradación de la subcuenca por cambios de uso de suelo, deforestaciones y eventos meteorológicos extremos. La batimetría más reciente para esta presa corresponde al año 2015, alterando enormemente su operación, que, pese a ello, las Figuras 7.33 y 7.34 mostraron una adecuada representación del modelo de la operación de la presa en condiciones actuales.

7.6.2.5 Aportaciones en la CRT

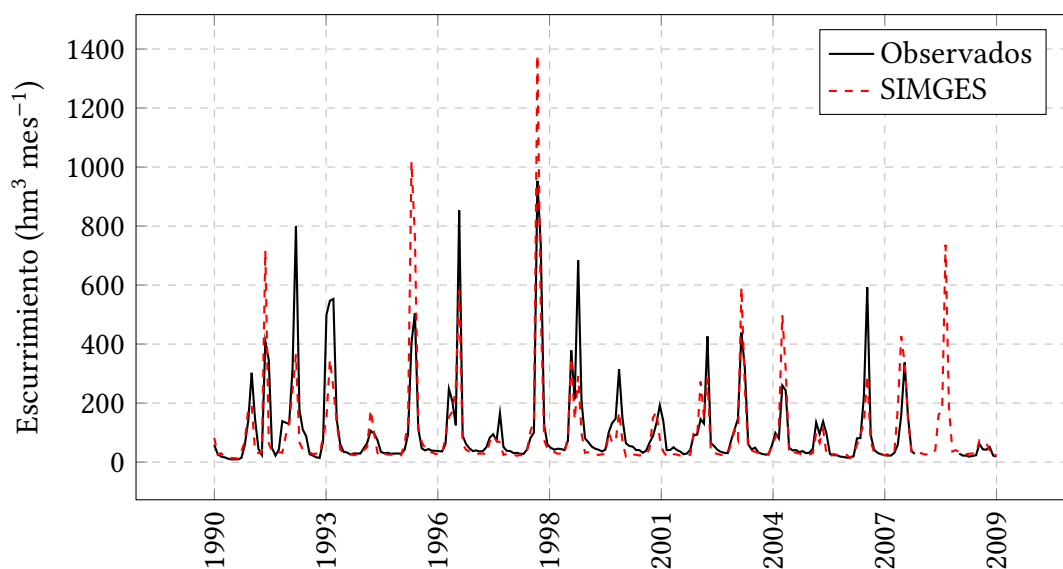


Figura 7.35: Aportaciones superficiales mensuales en la salida de la CRT.

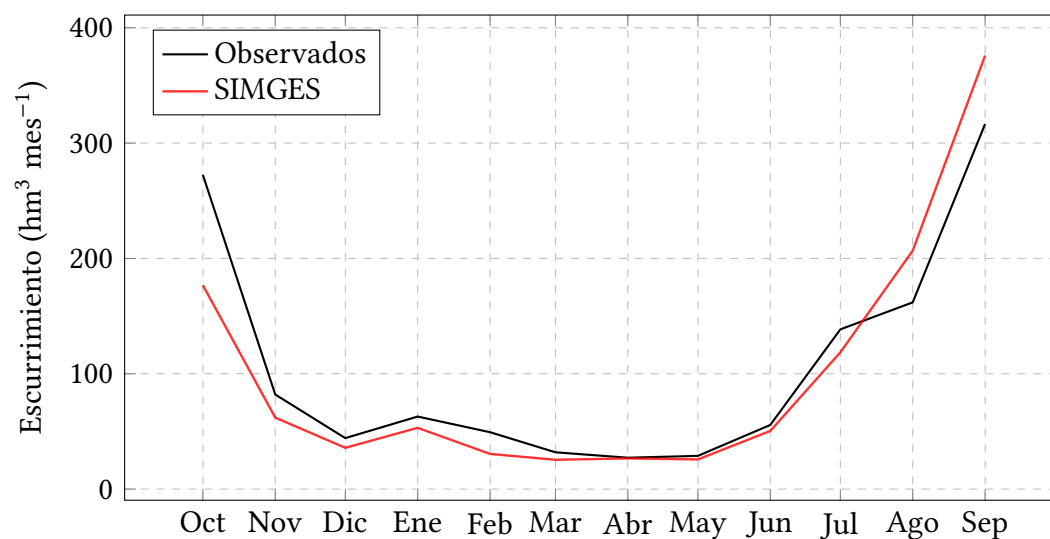


Figura 7.36: Aportaciones superficiales medias mensuales en la salida de la CRT.

De la Figura 7.35 se observó que las aportaciones simuladas en la salida de la cuenca representa en buena medida los escurrimientos, sobretodo en época de estiaje. Sin embargo, se destacan grandes diferencias en algunos eventos extremos donde el modelo tiende a sobreestimar. También, de la Figura 7.36 se destaca la buena representación del modelo de las aportaciones en condiciones medias, pero, notando una gran subestimación en el comienzo del año hidrológico.

7.6.3 Evaluación del modelo

Para evaluar el ajuste entre volúmenes observados y simulados de las cuatro presas y de las aportaciones en la salida de la CRT, se calcularon los índices NSE , NSE_{ln} , R^2 , KGE , y $PBIAS$. La Tabla 7.9 resume los resultados.

Tabla 7.9: Índices de ajuste entre volúmenes observados y simulados en presas y en la salida de la CRT.

Presa / sistema	NSE	NSE_{ln}	R^2	KGE	$PBIAS$ (%)
Vicente Villaseñor	0.61	0.54	0.67	0.81	-1.49
San Juanico	0.77	0.77	0.79	0.89	0.87
Chilatán	0.97	0.96	0.97	0.96	-0.26
Los Olivos	0.73	0.64	0.75	0.86	-4.62
Sistema de la CRT	0.59	0.75	0.65	0.77	-11.89

Comparando con el criterio de Moriasi et al. (2007), los resultados de NSE indican un desempeño muy bueno para Chilatán y San Juanico, bueno para Los Olivos y satisfactorio para Vicente Villaseñor y el sistema de la CRT. El NSE_{ln} confirma un buen comportamiento en condiciones de bajos volúmenes, especialmente en Chilatán y en la CRT, mientras que Vicente Villaseñor y Los Olivos permanecen en el rango satisfactorio. Los valores de KGE (0.77–0.96) y R^2 (0.65–0.97) respaldan la consistencia lineal de las series, y el $PBIAS$ es bajo en todas las presas ($|PBIAS| < 5\%$) indicando una subestimación en los recursos hídricos disponibles, con una subestimación moderada también en la salida de la CRT (-11.9 %) que aún se mantiene en un rango bueno.

Los resultados obtenidos de la modelación conjunta revelan una adecuada representación de la dinámica del agua superficial y subterránea con la infraestructura hidráulica presente en el sistema de la CRT, pese a las limitaciones de la información descritas en secciones previas.

7.7 Determinación de índices de estado

Con base en el enfoque descrito en la metodología, los IEE se evaluaron a escala mensual para las cuatro presas de interés: Vicente Villaseñor, San Juanico, Chilatán y Los Olivos. Ya que concentran la atención sobre la demanda agrícola en la zona de estudio, las UTE se consideran equivalentes a cada presa, por lo que la interpretación se presenta directamente en términos de las presas. En cada caso se seleccionaron variables representativas del estado operativo de la presa: para Vicente Villaseñor, San Juanico y Los Olivos se emplearon aportaciones y volumen almacenado, mientras que para Chilatán se utilizó únicamente el volumen almacenado debido a que su cuenca de aporte es amplia y su capacidad de regulación permite representar adecuadamente su estado con esa variable.

En el indicador del sistema de la CRT se asignaron pesos equitativos a las cuatro presas, ya que ponderar por demanda habría concentrado el peso casi por completo en la presa Chilatán y el indicador del sistema se volvería redundante. La Figura 7.41 presenta el comportamiento del IEE del sistema de la CRT.

7.7.1 Presa Vicente Villaseñor

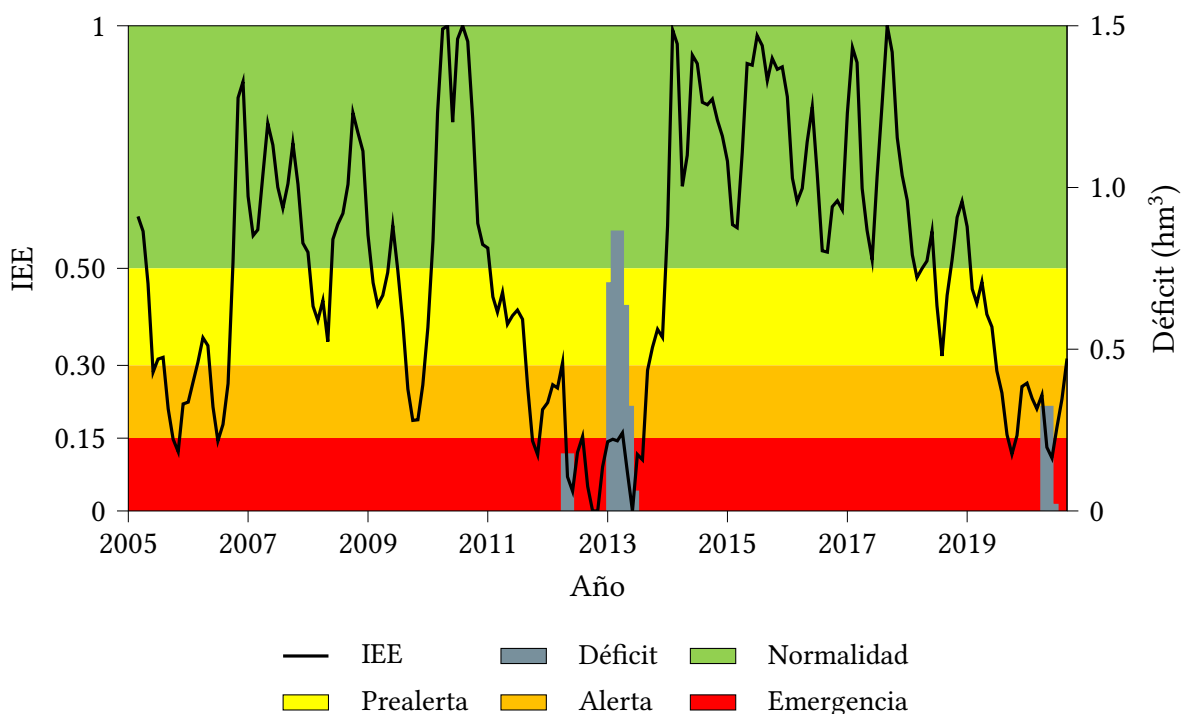


Figura 7.37: IEE, en la presa Vicente Villaseñor.

La distribución de estados en la presa Vicente Villaseñor muestra normalidad, 50.8 % de los meses; prealerta, 20.9 %; alerta, 16.6 %; y emergencia, 11.8 %. Los déficits aparecen en 8 meses, con 3.12 hm^3 en total y un máximo mensual de 0.87 hm^3 , concentrados en mayo de 2012, febrero–junio de 2013 y mayo–junio de 2020. En esos episodios la garantía media cae a 49 %, con un mínimo de 0 %, por lo que fallos relativamente pequeños se traducen en afectaciones severas. La correspondencia con el IEE es clara: 7 de 8 déficits ocurren en emergencia y 1 en alerta. Los periodos 2012–2013 y 2020 son consistentes con la sequía 2011–2012 y con el evento 2020–2021 reportados por el MSM y CONAGUA (CONAGUA, 2012; ICAyCC-UNAM, 2021; MSM, 2024).

7.7.2 Presa San Juanico

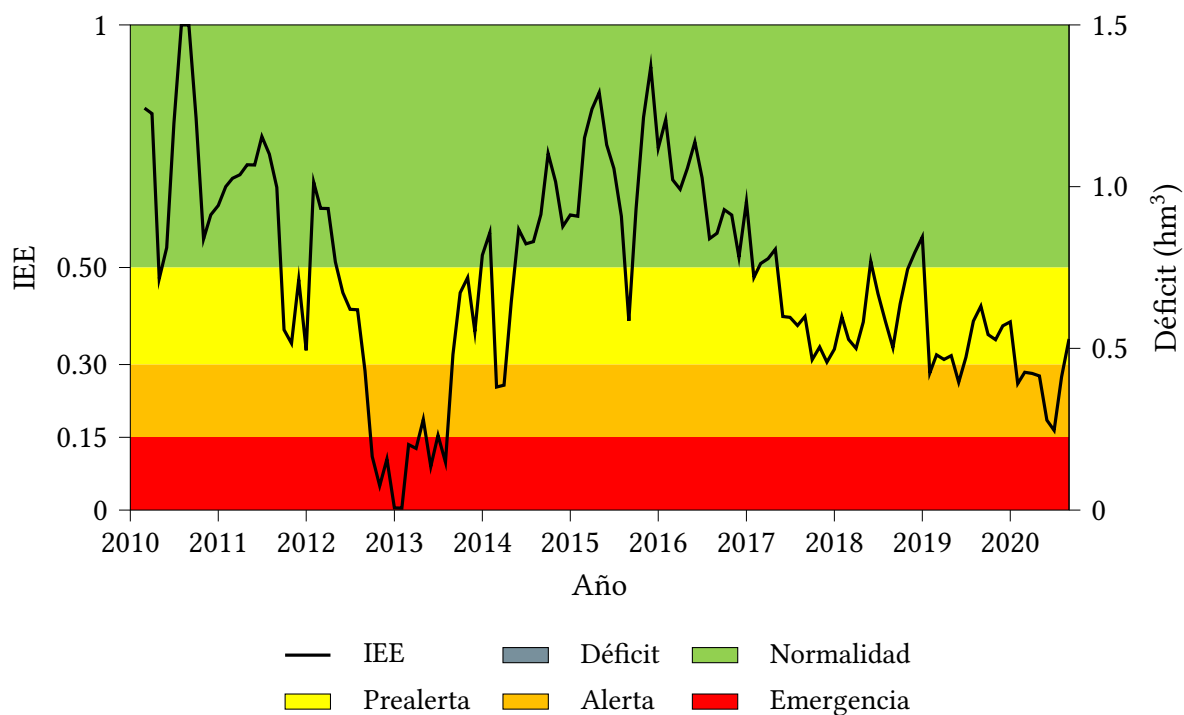


Figura 7.38: IEE, en la presa San Juanico.

La distribución de estados en la presa San Juanico muestra normalidad, 48.0 % de los meses; prealerta, 33.9 %; alerta, 11.0 %; y emergencia, 7.1 %. No se registran déficits en la simulación y la garantía es 100 % en todo el periodo, lo que sugiere que el sistema mantiene la atención de la demanda aun cuando el IEE entra en alerta o emergencia.

7.7.3 Presa Chilatán

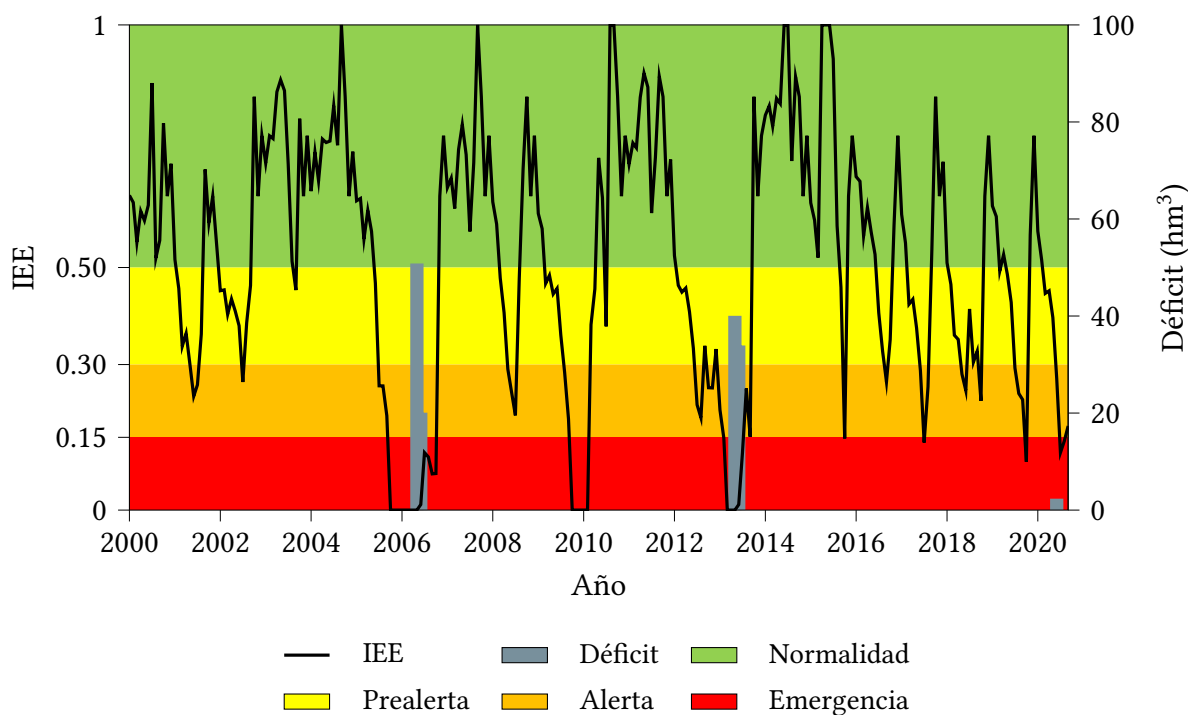


Figura 7.39: IEE, en la presa Chilatán.

La distribución de estados en la presa Chilatán muestra normalidad, 55.8 % de los meses; prealerta, 20.9 %; alerta, 11.6 %; y emergencia, 11.6 %. Los déficits aparecen en 5 meses, con 147.23 hm³ en total y un máximo mensual de 50.83 hm³, concentrados en mayo–junio de 2006, mayo–junio de 2013 y junio de 2020. A pesar de la magnitud absoluta, la garantía media durante fallos es 60 %, con un mínimo de 37 %, lo que sugiere que la regulación amortigua parcialmente el impacto. La relación con el IEE es consistente: 4 de 5 déficits ocurren en emergencia y 1 en alerta, y los episodios 2013 y 2020 son coherentes con periodos de sequía documentados a escala nacional (CONAGUA, 2012; ICAyCC-UNAM, 2021; MSM, 2024).

7.7.4 Presa Los Olivos

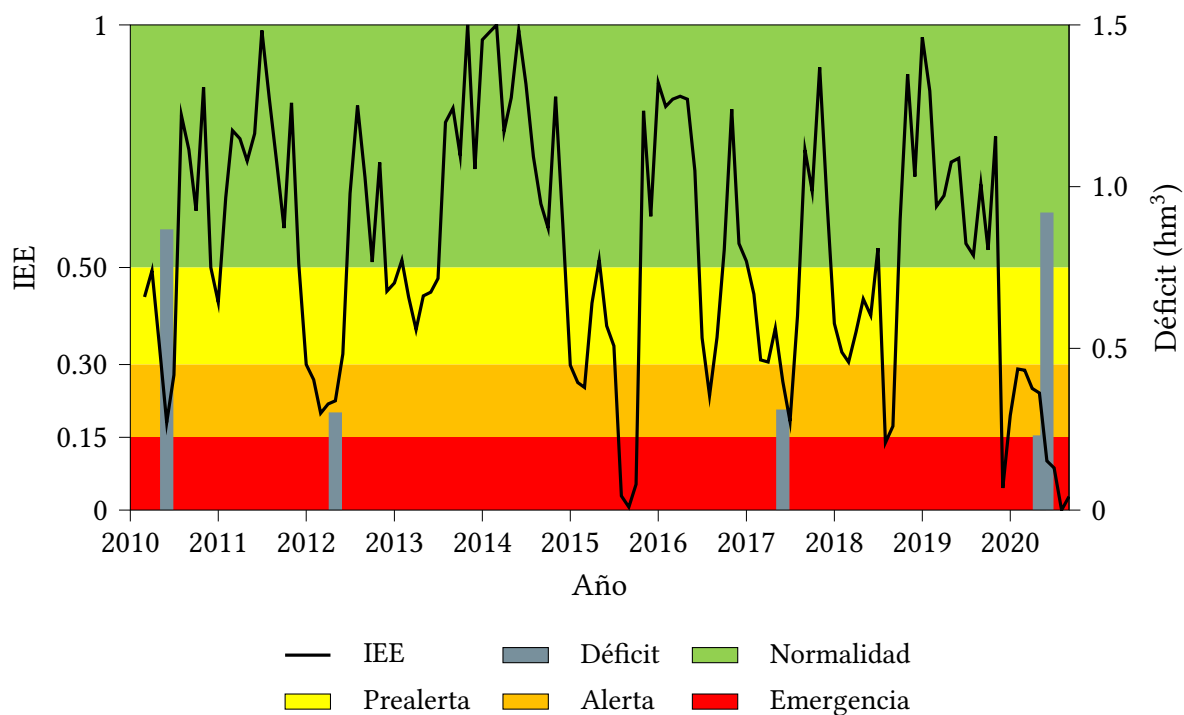


Figura 7.40: IEE, en la presa Los Olivos.

La distribución de estados en la presa Los Olivos muestra normalidad, 55.9% de los meses; prealerta, 22.8%; alerta, 14.2%; y emergencia, 7.1%. Los déficits aparecen en 5 meses, con 2.63 hm^3 en total y un máximo mensual de 0.92 hm^3 , concentrados en junio de 2010, mayo de 2012, junio de 2017 y mayo-junio de 2020. Aunque los volúmenes faltantes son menores que en la presa Chilatán, la garantía media durante fallos cae a 40%, con un mínimo de 0%, lo que indica mayor sensibilidad relativa. La correspondencia con el IEE es alta: 4 de 5 déficits ocurren en alerta y 1 en emergencia, y los eventos de 2012 y 2020 coinciden con periodos de sequía a escala nacional (CONAGUA, 2012; ICAYCC-UNAM, 2021; MSM, 2024).

7.7.5 Sistema de la CRT

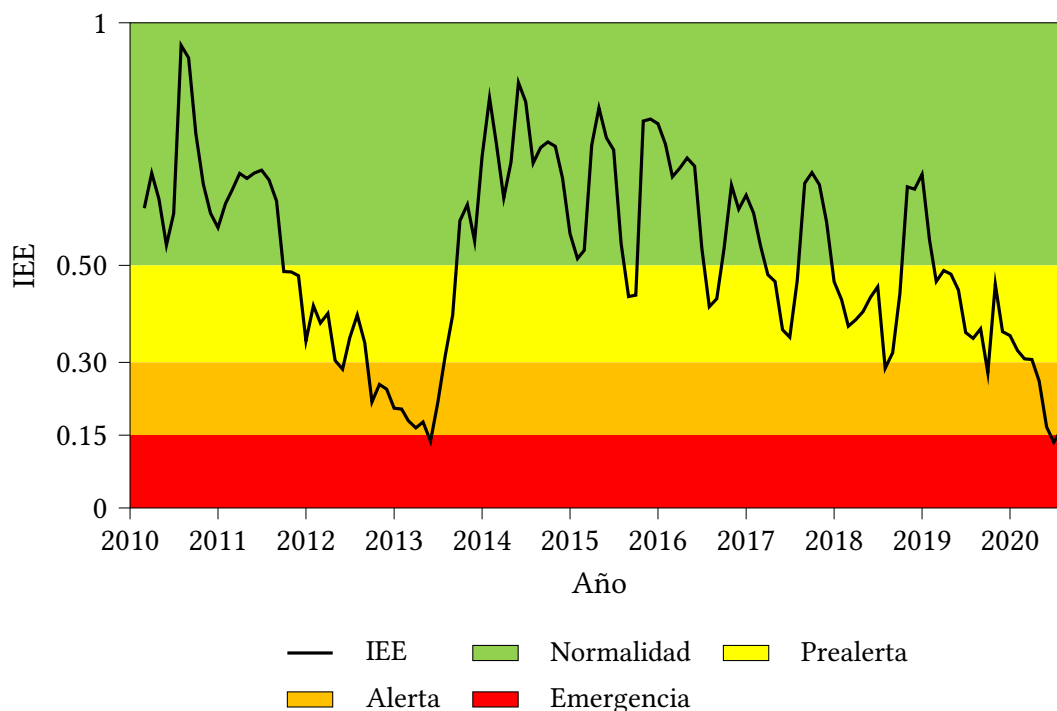


Figura 7.41: Índice de estado de escasez, **IEE**, del sistema de la CRT.

La distribución de estados en el **IEE** del sistema de la CRT muestra normalidad, 51.2 % de los meses; prealerta, 34.6 %; alerta, 12.6 %; y emergencia, 1.6 %. Como este indicador agrega presas con condiciones distintas, su valor es principalmente informativo para monitoreo y comparación temporal. En la serie temporal se aprecia el deterioro 2011–2012 asociado a un episodio de sequía meteorológica ampliamente documentado como uno de los más severos en décadas (CONAGUA, 2012; MSM, 2024); el indicador alcanza su mínimo en 2013, coherente con la inercia del almacenamiento y la propagación hidrológica. Después de una recuperación clara en 2014, se observa una tendencia descendente desde 2015 hasta el mínimo mensual de 2020, con $\text{IEE} \approx 0.14$. Aunque no necesariamente corresponde a un pico nacional equivalente al de 2011–2012, reportes recientes describen condiciones de sequía generalizada en 2020–2021, lo que resulta consistente con este deterioro (ICAyCC-UNAM, 2021; MSM, 2024). Este comportamiento se interpreta como señal de deterioro estructural y se propone como hipótesis a contrastar con análisis hidroclimáticos regionales.

7.8 Propuesta y evaluación de acciones ante eventos de sequía

El diagnóstico estructural sintetizado en la Tabla 7.10 permite justificar la selección inicial de reglas por presa. En función de K , η y S , se prioriza el racionamiento preventivo y la operación de excedencias cuando el estrés es alto; se favorece la demanda adaptativa en sistemas de baja regulación; y se mantiene la operación estándar cuando la regulación es alta pero la eficiencia del vaso es reducida. Este marco orienta los escenarios a evaluar y establece un punto de partida coherente con el desempeño observado.

7.8.1 Diagnóstico estructural y selección de reglas

La Tabla 7.10 resume los indicadores y la regla sugerida en cada presa. Chilatán combina estrés elevado con alta eficiencia, por lo que se recomienda racionamiento preventivo y operación de excedencias; estas excedencias se refieren a liberaciones por la obra de toma para sustituir parte de la demanda atendida con concesiones de bombeo y apoyar la recuperación del acuífero. Vicente Villaseñor presenta regulación multianual y estrés moderado, por lo que se mantiene la operación estándar con demanda adaptativa. Los Olivos muestra regulación casi inexistente, de modo que la demanda adaptativa es la opción más consistente. San Juanico tiene regulación hiperanual pero eficiencia muy baja, por lo que se privilegia la operación estándar para evitar sobrealmacenamientos.

Tabla 7.10: Diagnóstico estructural y selección preliminar de reglas por presa.

Presa	K	η (%)	S	Diagnóstico	Reglas sugeridas
Vicente Villaseñor	0.91	52.5	0.40	Regulación multianual, eficiencia media-baja y estrés moderado	Operación estándar; demanda adaptativa
San Juanico	1.39	12.2	0.13	Regulación hiperanual con eficiencia muy baja y estrés bajo	Operación estándar
Chilatán	0.41	95.2	0.74	Regulación anual y alta eficiencia, con estrés elevado	Racionamiento preventivo; operación de excedencias
Los Olivos	0.10	96.8	0.14	Regulación casi inexistente, alta eficiencia y estrés bajo	Demanda adaptativa

7.8.2 Derivación de reglas mediante optimización

En función del diagnóstico, se plantea derivar reglas de operación por presa mediante optimización. Las variables de decisión son mensuales o anuales según el esquema operativo (curvas umbral y factores de ajuste en escala mensual; volumen autorizado en octubre en escala anual). Se evalúa el desempeño mediante simulación mensual del balance, con objetivos que reducen déficits y, cuando corresponde, aprovechan excedencias sin rebasar el límite histórico de déficit total. Las liberaciones para sustituir bombeo se acotan por la demanda concesionada de agua subterránea. Para asegurar reglas aplicables, se incorpora una penalización a cambios abruptos entre meses y se imponen transiciones suaves en los parámetros.

La búsqueda de parámetros se resolvió con algoritmos genéticos en todos los escenarios, siempre sobre la misma simulación mensual del balance hídrico. De este modo, los cambios entre presas no provienen del método de búsqueda, sino de la definición de variables de decisión, restricciones y función objetivo de cada caso. Además, los pesos de penalización y los límites operativos pueden ajustarse según los criterios de gestión acordados con los usuarios (por ejemplo, agricultores), para priorizar seguridad de suministro, reducción de picos de déficit o aprovechamiento de excedencias.

7.8.2.1 Presa Vicente Villaseñor

En esta presa se adopta la demanda adaptativa porque la regulación anual permite ajustar el volumen autorizado al almacenamiento disponible al inicio del año agrícola, reduciendo el riesgo de déficit en años secos sin imponer recortes innecesarios en condiciones favorables.

Se optimiza una curva continua nivel–asignación: cada octubre se lee el volumen almacenado y se obtiene, por interpolación, el volumen anual autorizado. La curva se define con cinco puntos monótonos y se evalúa con simulación mensual del balance. La función objetivo maximiza el suministro anual y penaliza tanto el déficit total como los incumplimientos severos (meses en que el déficit supera 10 % de la demanda ajustada):

$$J_{VCVJL} = \sum_{t=1}^T S_t - 5 \sum_{t=1}^T D_t - 50 N_{\text{crit}}, \quad (7.1)$$

donde S_t es el suministro mensual, D_t el déficit mensual y N_{crit} el número de meses con falla crítica. Así, la regla privilegia entregar más volumen, pero evita prometer asignaciones que no puedan sostenerse durante el ciclo agrícola.

La Figura 7.42 presenta la nube de soluciones evaluadas durante la optimización y su envolvente de desempeño en el plano suministro total–déficit acumulado. En este caso, el déficit acumulado converge a valores nulos y la envolvente se concentra en maximizar el suministro autorizado. A partir de esa envolvente se selecciona la alternativa más equilibrada para definir la regla de asignación anual mostrada en la Figura 7.43.

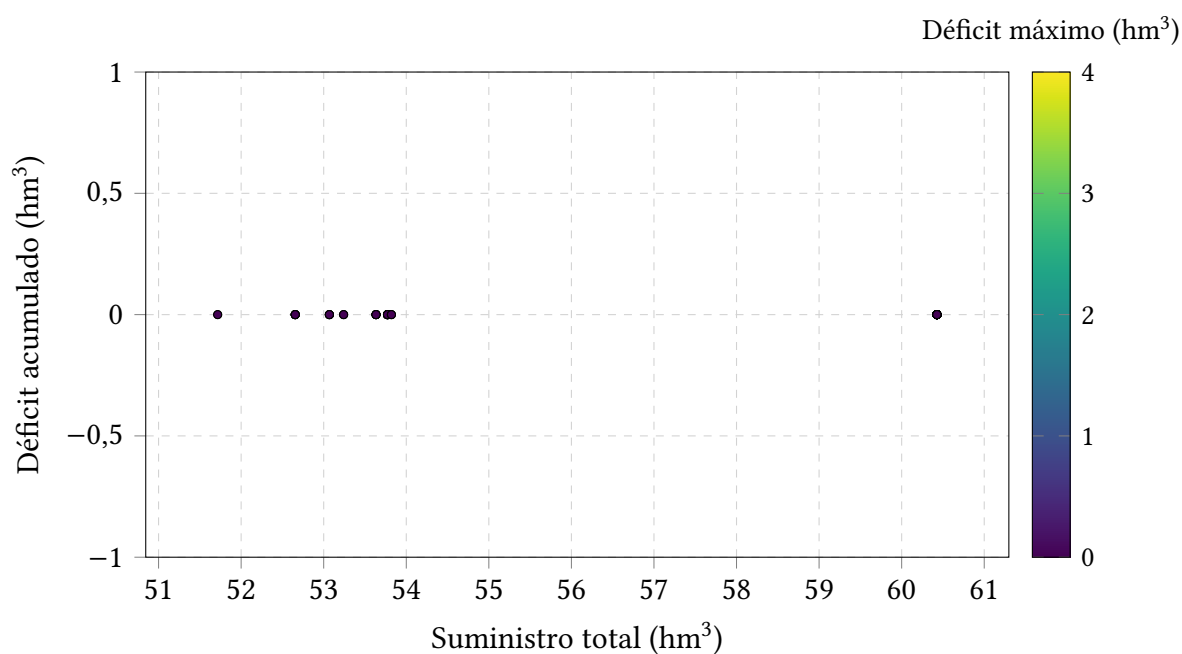


Figura 7.42: Envolvente de desempeño para el escenario de asignación adaptativa en Vicente Villaseñor.

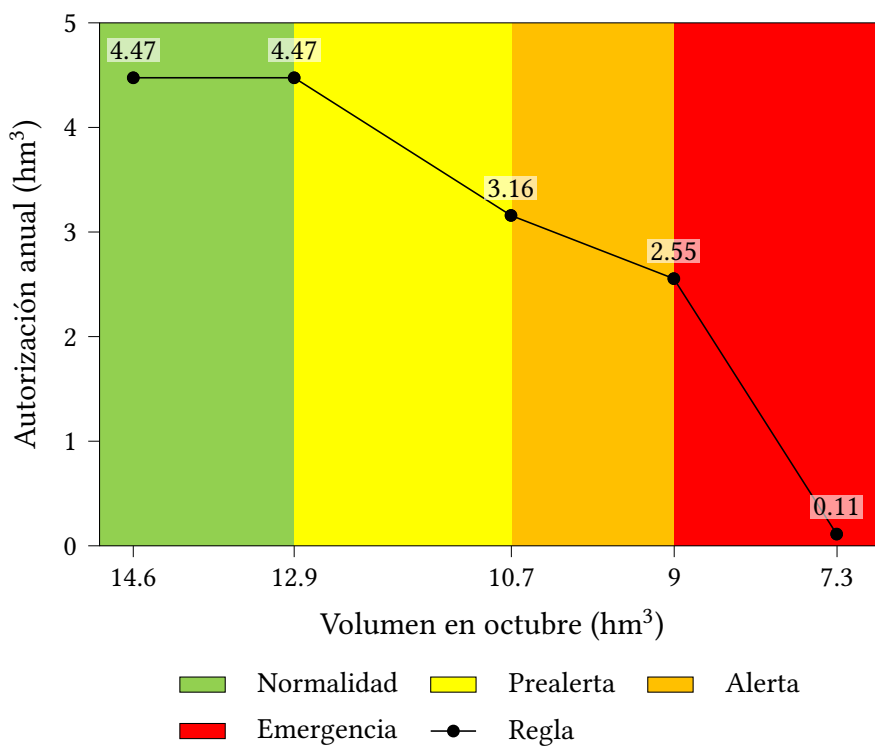


Figura 7.43: Regla de asignación anual en octubre y umbrales del IEE.

La regla optimizada asigna volúmenes anuales entre 0.11 y 4.47 hm³, con saturación en los estados de prealerta y normalidad, lo que es consistente con su capacidad de regulación multi-anual. La Figura 7.43 muestra la transición entre umbrales y la estabilización de la autorización cuando el almacenamiento de octubre es alto.

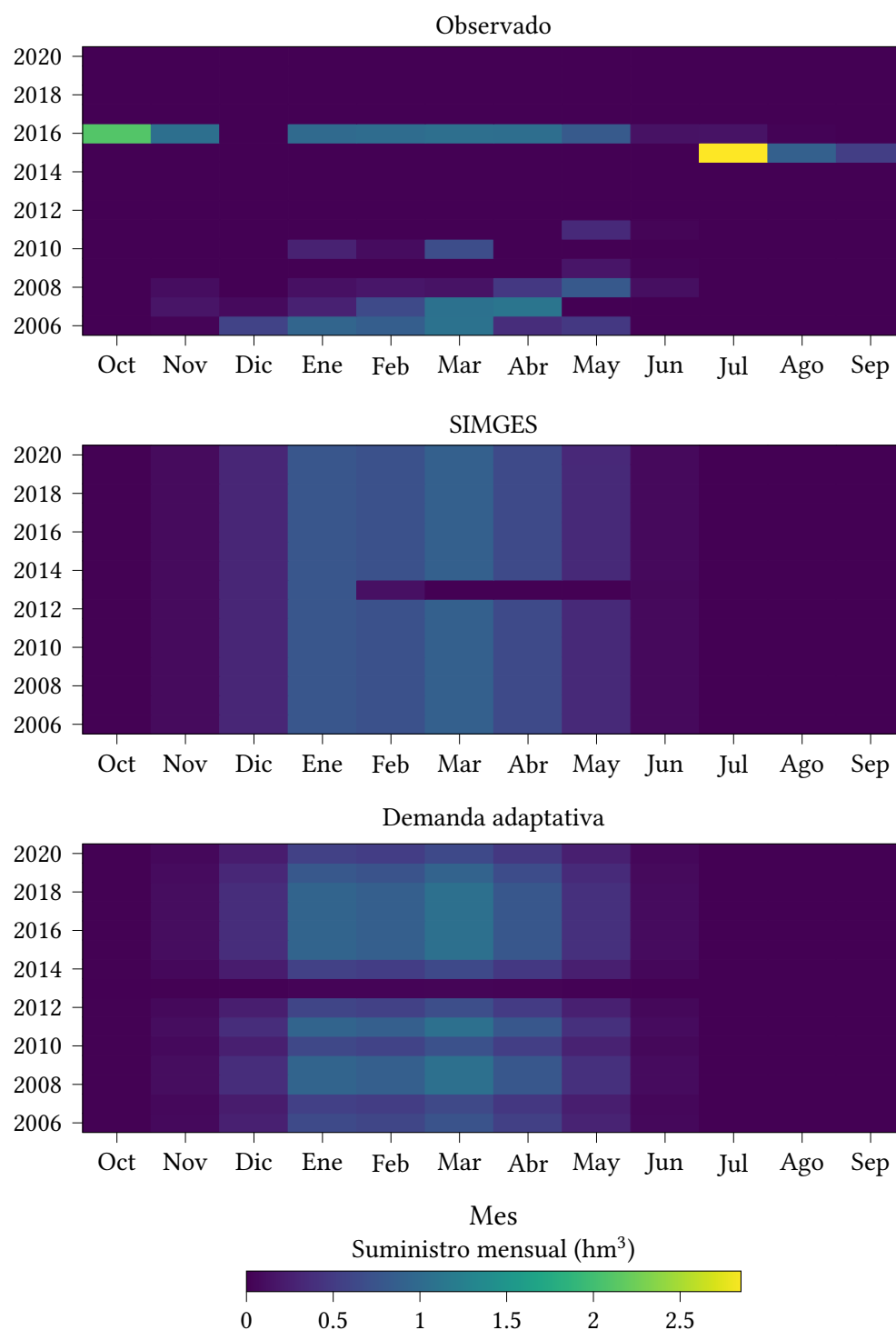


Figura 7.44: Suministro mensual en año agrícola: observado, SIMGES y demanda adaptativa.

En la Figura 7.44 se aprecia que, bajo demanda adaptativa, el suministro se concentra en los meses de mayor disponibilidad y se reduce con claridad en los años secos; en contraste, el suministro observado se vuelve casi nulo en los años recientes y SIMGES muestra entregas más irregulares. La regla adaptativa suaviza la variabilidad interanual sin eliminar la estacionalidad del riego, lo que permite mantener entregas en periodos favorables y recortes explícitos en periodos críticos.

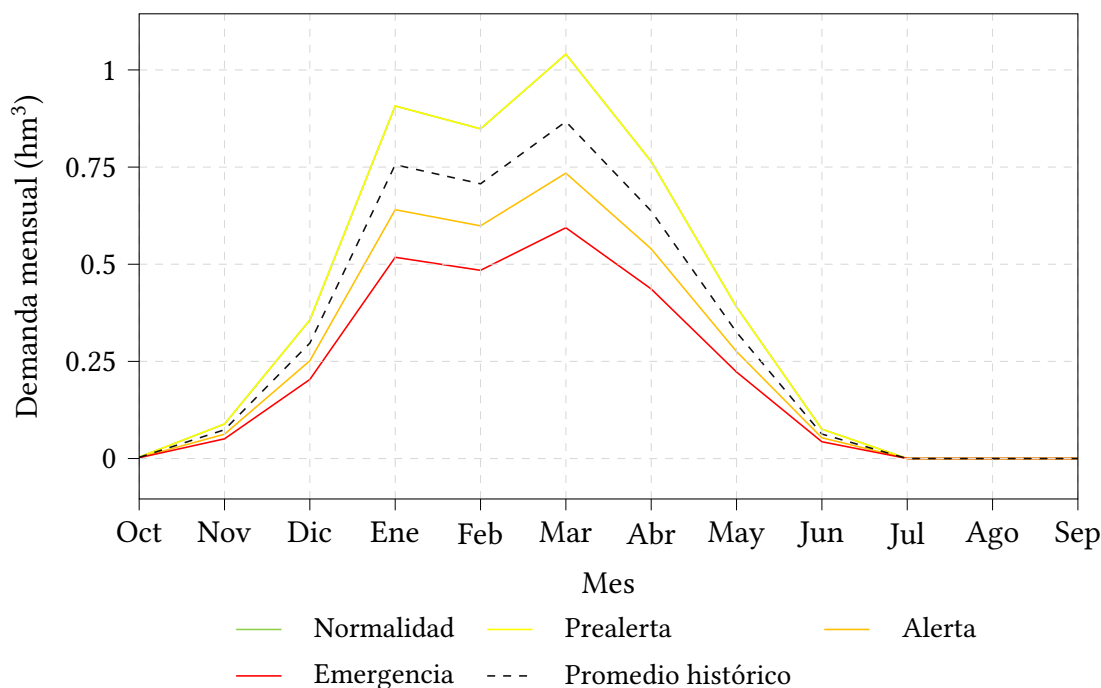


Figura 7.45: Patrones de demanda mensual por estado y promedio histórico.

La Figura 7.45 muestra que el patrón mensual se ajusta progresivamente por estado, con reducciones más marcadas en los meses de menor disponibilidad durante alerta y emergencia. Este esquema mantiene la estacionalidad del riego, pero introduce recortes anticipados y graduales que facilitan la planificación del ciclo agrícola.

7.8.2.2 Presa San Juanico

En esta presa no se evaluaron escenarios alternativos debido a la baja eficiencia del vaso y el reducido nivel de estrés; por ello se mantiene la operación base, reforzando el seguimiento hidrológico y la revisión de entregas según el estado del sistema.

Se mantiene la operación estándar como escenario base, dado el bajo estrés del sistema y la alta pérdida por evaporación asociada a sobrealmacenamientos.

7.8.2.3 Presa Chilatán

Se selecciona el escenario OPT porque equilibra el racionamiento preventivo con la liberación de excedencias, manteniendo la seguridad del suministro y aportando agua para sustituir bombeo en períodos de mayor disponibilidad.

Se plantean tres esquemas de operación:

Racionamiento preventivo, RAC. Se define una curva mensual t_h entre los umbrales de Emergencia y Alerta del IEE y se aplican factores α de reducción de demanda cuando $S \leq t_h$. La optimización (24 variables: 12 para t_h y 12 para α) se formuló para minimizar picos y acumulación de déficit, con restricción de déficit total y suavidad temporal:

$$J_{\text{RAC}} = -50 \left(\max_t D_t \right)^2 - 15 \sum_{t=1}^T D_t - 100 (R_h + R_\alpha), \quad \sum_{t=1}^T D_t \leq D_{\text{máx}}, \quad (7.2)$$

donde R_h y R_α son penalizaciones por cambios bruscos mes a mes (diferencias circulares al cuadrado). Tras la optimización se obtiene una curva de conservación ubicada entre P5 y el límite superior de Emergencia, con mayor resguardo en los meses de menor disponibilidad, como se aprecia en la Figura 7.47. La curva mostrada corresponde a la solución más equilibrada dentro de la envolvente de desempeño de RAC, privilegiando reducción del pico de déficit sin aumentar de forma desproporcionada el déficit acumulado. La envolvente para este objetivo (Figura 7.46) confirma esa tendencia.

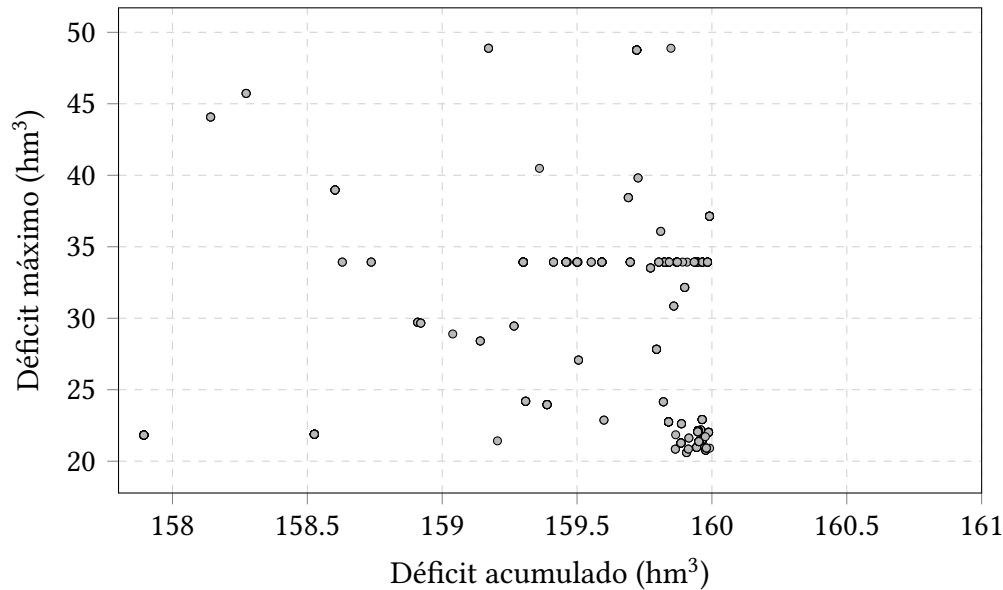


Figura 7.46: Envolvente de desempeño para el escenario RAC.

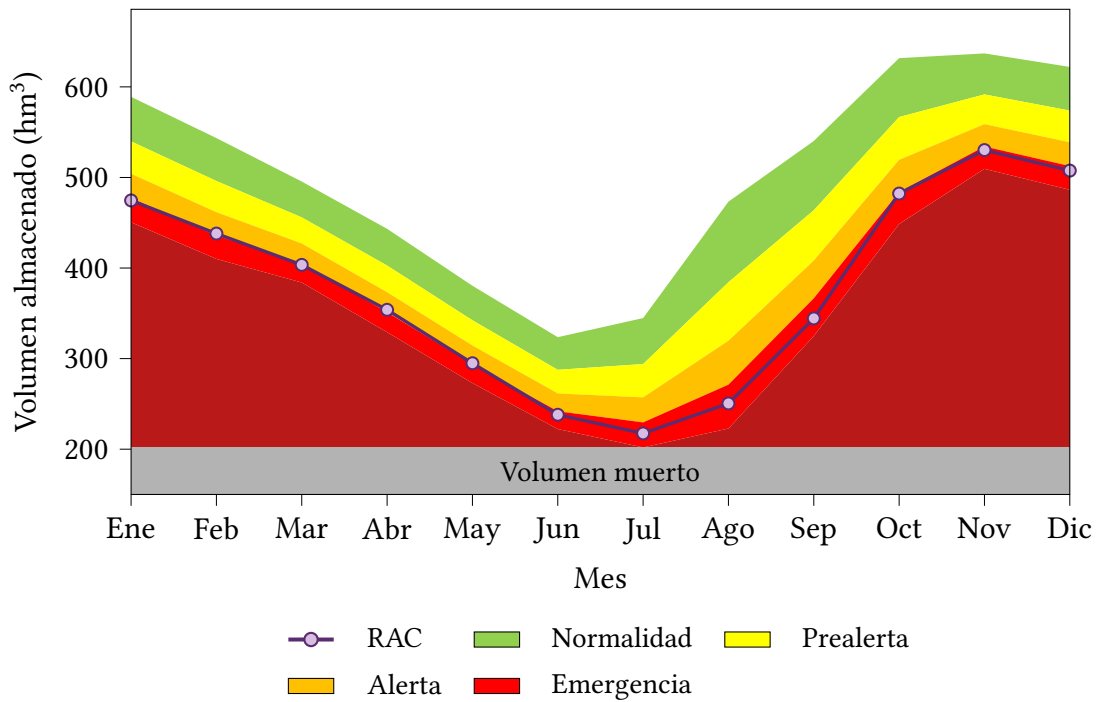


Figura 7.47: Curvas del IEE y umbral de conservación del escenario RAC.

Operación de excedencias, EXC. Mantiene la operación estándar para la demanda y optimiza la curva mensual t_s entre Prealerta y Normalidad para liberar excedencias destinadas a sustituir bombeo. La optimización (12 variables mensuales de t_s) maximiza excedencias y penaliza curvas irregulares, bajo restricción de déficit total:

$$J_{\text{EXC}} = \sum_{t=1}^T E_t - 5 R_s, \quad \sum_{t=1}^T D_t \leq D_{\text{máx}}, \quad (7.3)$$

donde E_t es la excedencia mensual liberada y R_s es la penalización de suavidad de la curva t_s . La optimización genera una curva de excedencias alineada con los meses de mayor disponibilidad y por encima de Prealerta, como se muestra en la Figura 7.49. La curva presentada se seleccionó como la alternativa más equilibrada dentro de la envolvente de desempeño de EXC, al mantener liberaciones adicionales con incremento controlado del déficit acumulado. En dicha envolvente (Figura 7.48) se observa que los escenarios con mayor excedencia tienden a incrementar el déficit acumulado.

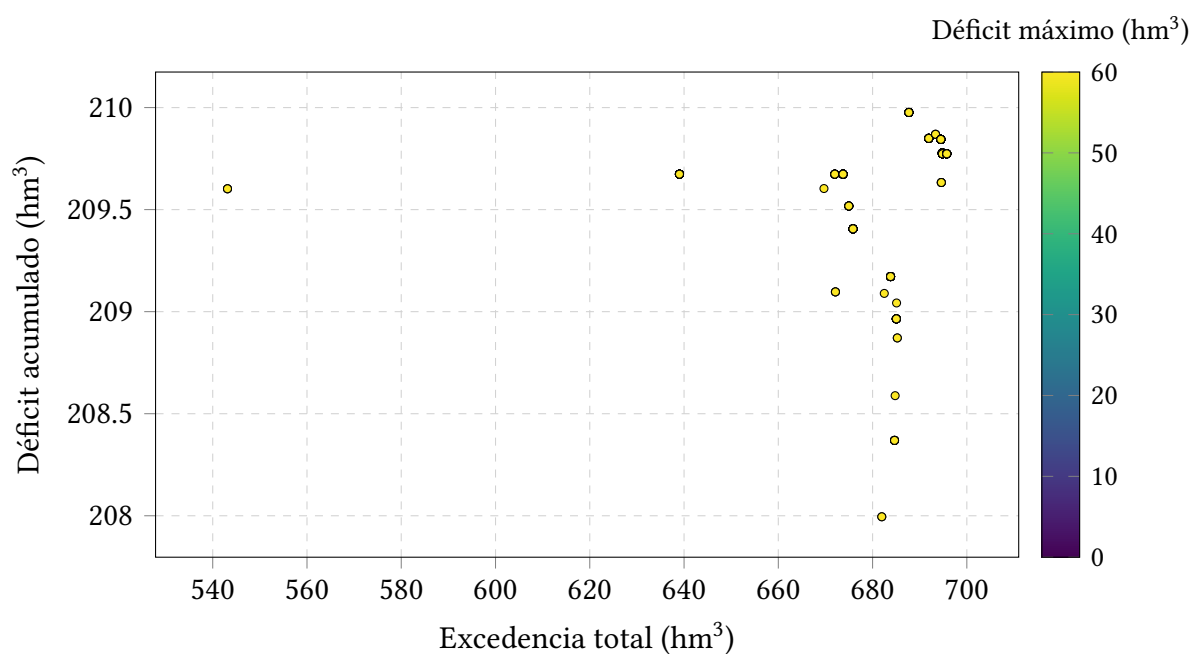


Figura 7.48: Envolvente de desempeño para el escenario EXC.

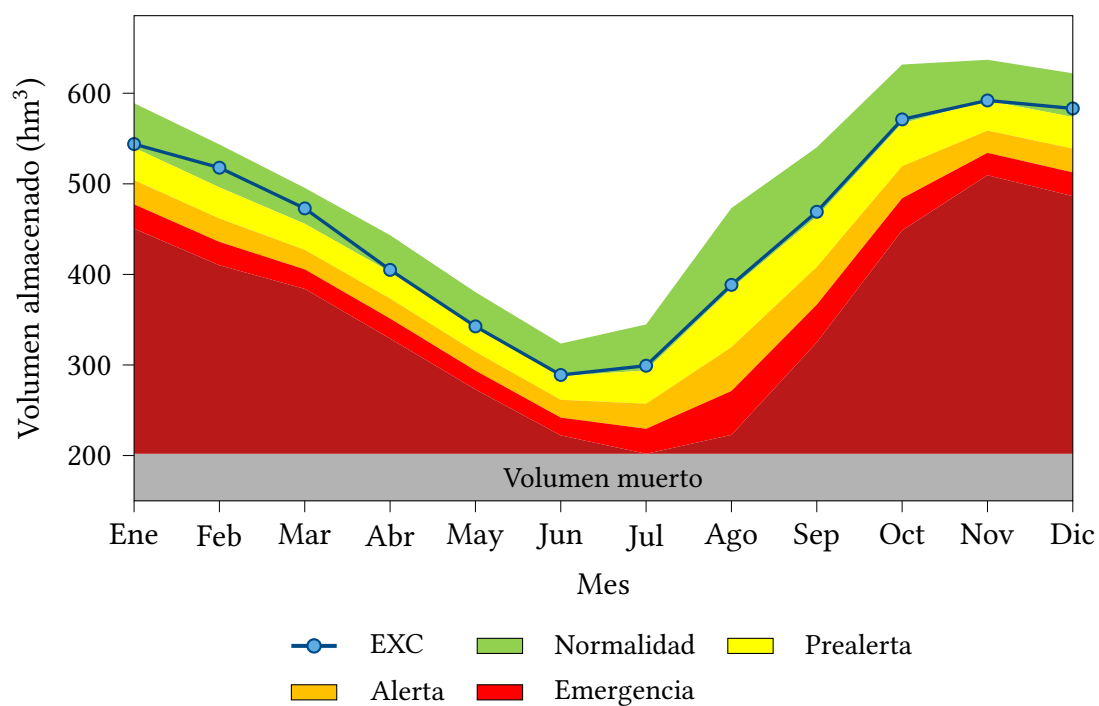


Figura 7.49: Curvas del IEE y umbral de excedencias del escenario EXC.

Combinado, OPT. Optimiza de forma conjunta t_h , t_s y α (36 variables) para balancear racionamiento preventivo y liberación de excedencias. La formulación impone restricción de déficit total, penalización fuerte al déficit máximo y penalización de suavidad:

$$J_{\text{OPT}} = 1.5 \sum_{t=1}^T E_t - P_{\text{máx}}(D_{\text{máx}}^m) - 150 (R_h + R_s + R_\alpha), \quad \sum_{t=1}^T D_t \leq D_{\text{máx}}, \quad (7.4)$$

con

$$P_{\text{máx}}(D_{\text{máx}}^m) = \begin{cases} 15 D_{\text{máx}}^m, & D_{\text{máx}}^m \leq 22.5 \\ 15(22.5) + 500 (D_{\text{máx}}^m - 22.5), & D_{\text{máx}}^m > 22.5 \end{cases} \quad (7.5)$$

donde $D_{\text{máx}}^m$ es el déficit mensual máximo. La optimización conjunta produce curvas de conservación y excedencias coherentes con los umbrales del IEE y con el balance operativo entre seguridad y aprovechamiento, como se observa en la Figura 7.51. La configuración mostrada corresponde a la solución más equilibrada de la envolvente de desempeño de OPT. Esta envolvente (Figura 7.50) muestra que la solución conjunta desplaza el sistema hacia una zona intermedia: mantiene excedencias relevantes con picos de déficit mucho menores que EXC.

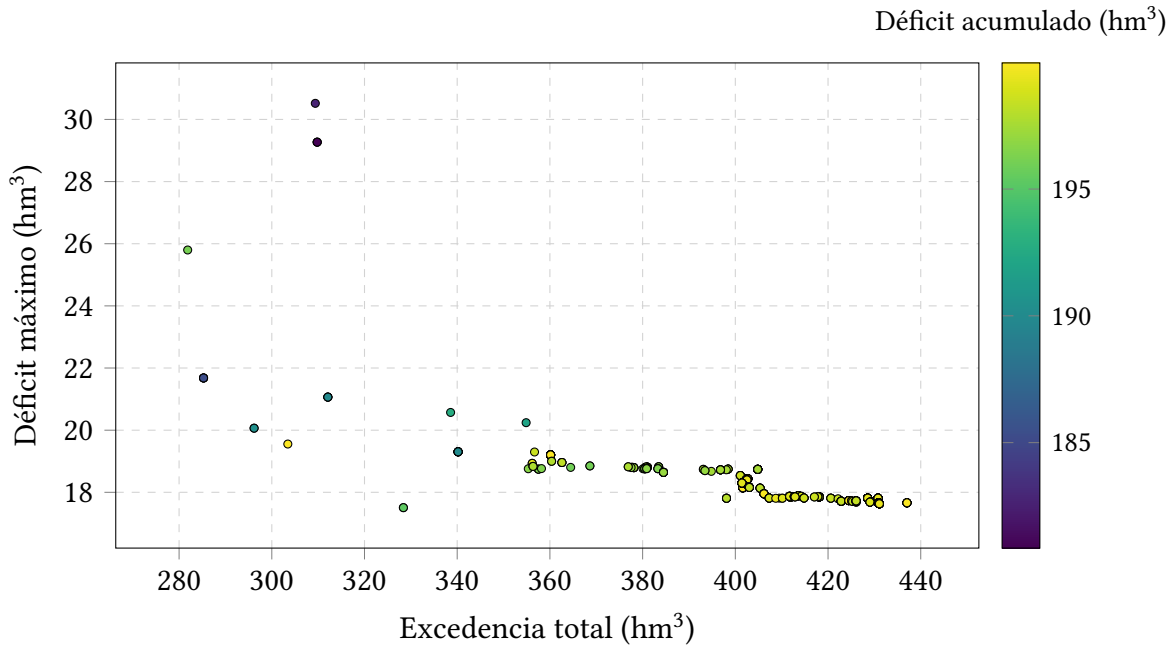


Figura 7.50: Envolvente de desempeño para el escenario OPT.

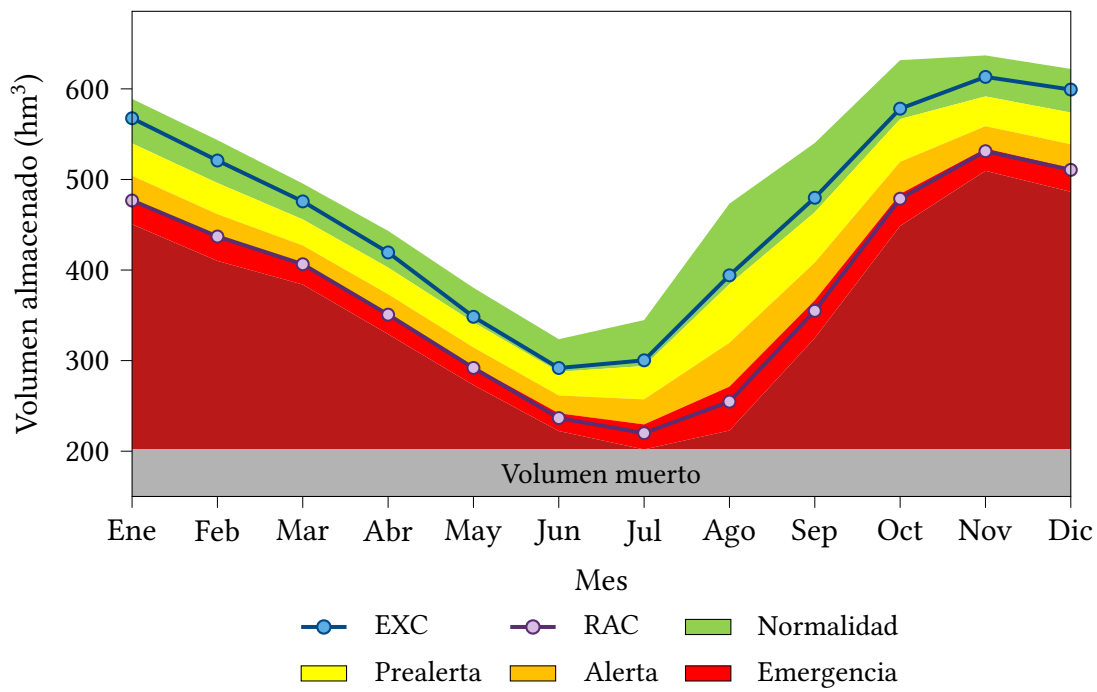


Figura 7.51: Curvas del IEE y umbrales optimizados del escenario OPT.

A continuación se presenta la comparación de desempeño entre el escenario base, RAC, EXC y OPT. En el periodo 2000–2020 el déficit acumulado es 153.37 hm^3 en el escenario base, 184.08 hm^3 en RAC, 209.55 hm^3 en EXC y 199.18 hm^3 en OPT. El déficit máximo mensual alcanza 52.91 hm^3 en el escenario base, 15.52 hm^3 en RAC, 59.87 hm^3 en EXC y 17.37 hm^3 en OPT. En términos generales, RAC y OPT reducen el pico mensual respecto al escenario base, mientras EXC incrementa tanto el déficit acumulado como el máximo. Para observar la operación bajo cada regla se analizan los eventos de sequía de 2006 y 2013; las Figuras 7.52 y 7.53 muestran demanda, suministro y déficit en esos periodos.

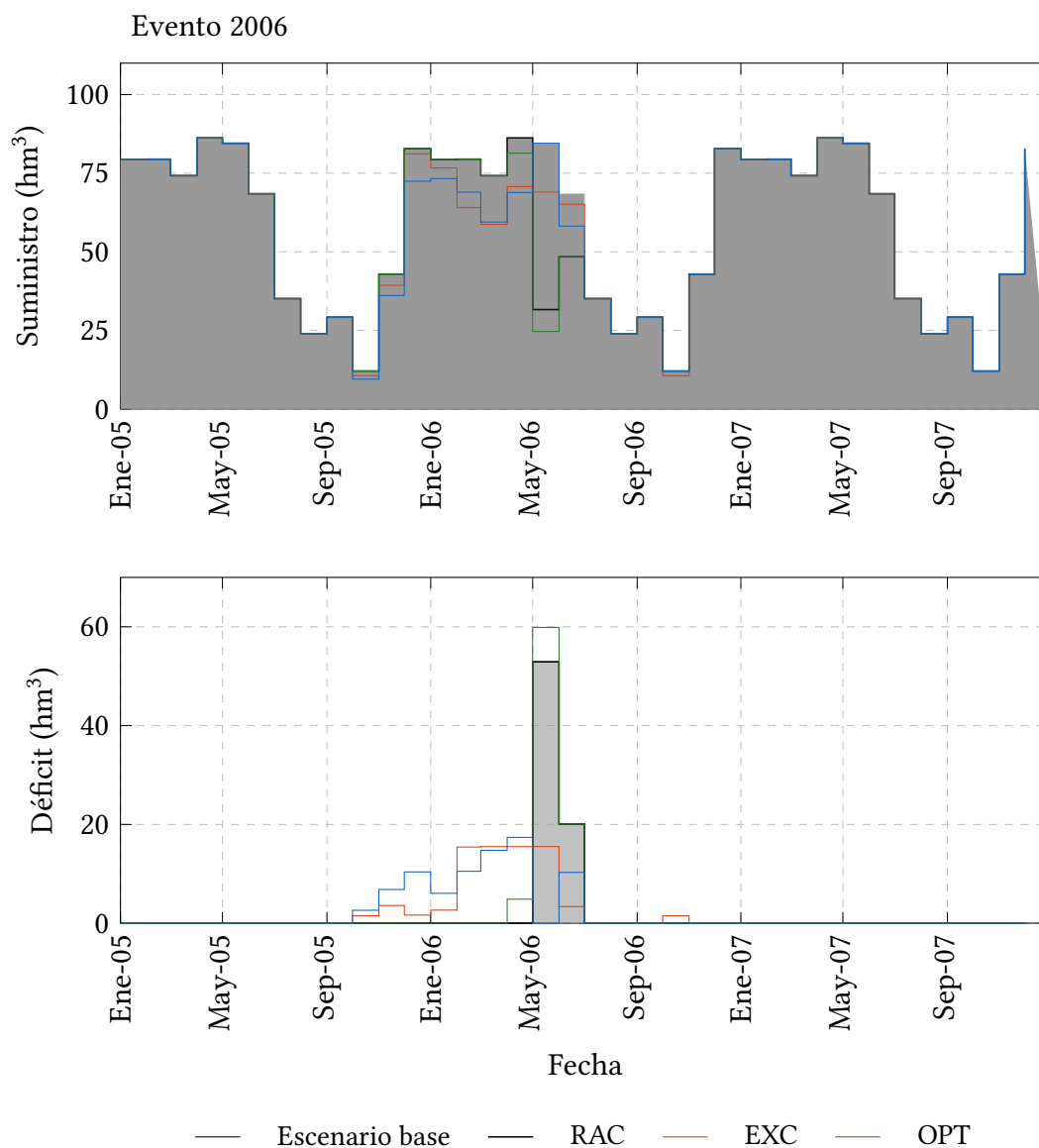


Figura 7.52: Suministro y déficit de la demanda en el evento 2006 en el escenario base, RAC, EXC y OPT.

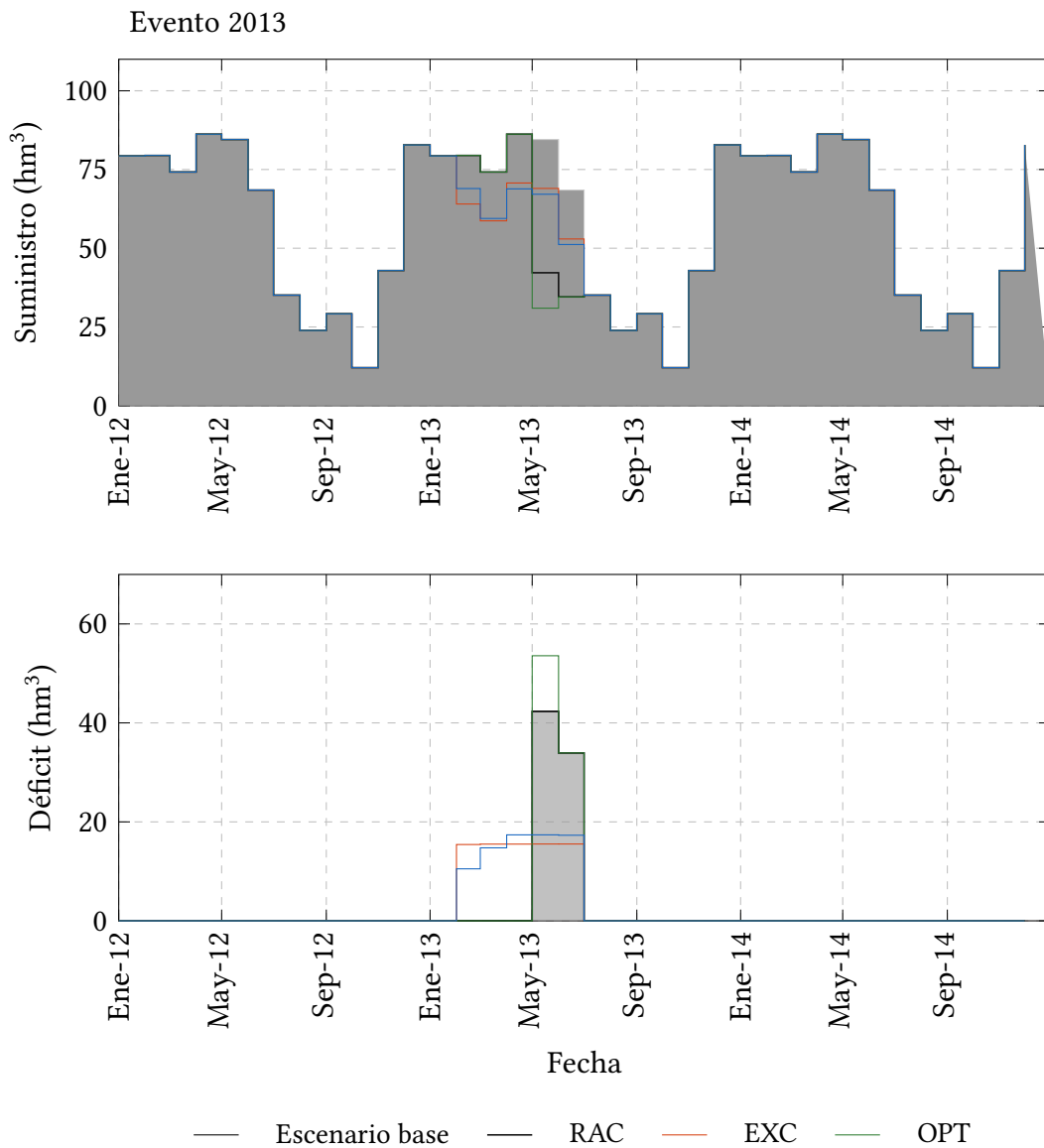


Figura 7.53: Suministro y déficit de la demanda en el evento 2013 en el escenario base, RAC, EXC y OPT.

En los eventos de 2006 y 2013 el escenario base concentra los déficits en dos meses y presenta picos de 52.9 hm^3 y 42.3 hm^3 . RAC y OPT redistribuyen los déficits en periodos más largos y reducen los picos a 15.5 hm^3 y 17.4 hm^3 , mientras EXC mantiene la concentración del déficit y aumenta los picos a 59.9 hm^3 y 53.6 hm^3 . Este patrón confirma el objetivo del racionamiento preventivo al aceptar fallas más pequeñas y planificadas para evitar déficits severos, como se aprecia en las Figuras 7.52 y 7.53. La garantía durante fallas complementa la lectura del déficit. En el escenario base la garantía media es del 60 % y el mínimo del 37 %; en RAC 87 % y 77 %; en EXC 66 % y 29 %; y en OPT 84 % y 75 %. El mapa de calor de la Figura 7.54 muestra que RAC y OPT reducen la severidad y dispersan las fallas, mientras EXC incrementa la intensidad en la cola de fallas.

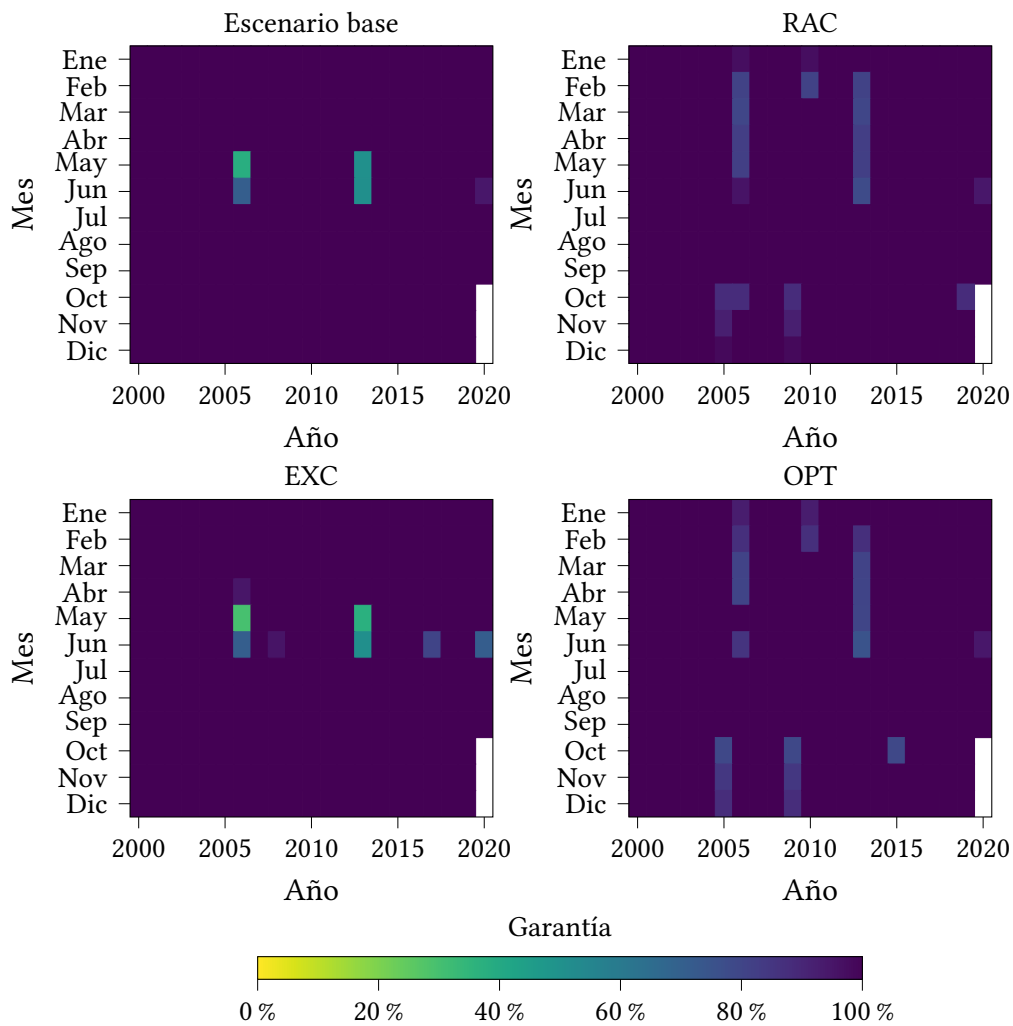


Figura 7.54: Mapa de calor de garantía y duración de fallas en el escenario base, RAC, EXC y OPT.

Al observar el volumen almacenado se confirma el efecto de conservación de RAC y OPT. En 2006 el volumen medio pasa de 344 hm^3 en el escenario base a 362 hm^3 en RAC y 369 hm^3 en OPT, con mínimos de 223.8 hm^3 en el escenario base frente a 240.6 hm^3 y 237.2 hm^3 . En 2013 el volumen medio aumenta de 320 hm^3 en el escenario base a 342 hm^3 en RAC y 339 hm^3 en OPT, con mínimos de 223.8 hm^3 frente a 242.3 hm^3 y 240.5 hm^3 . Este comportamiento explica la reducción de picos de déficit en los escenarios con racionamiento preventivo y se observa en la Figura 7.55.

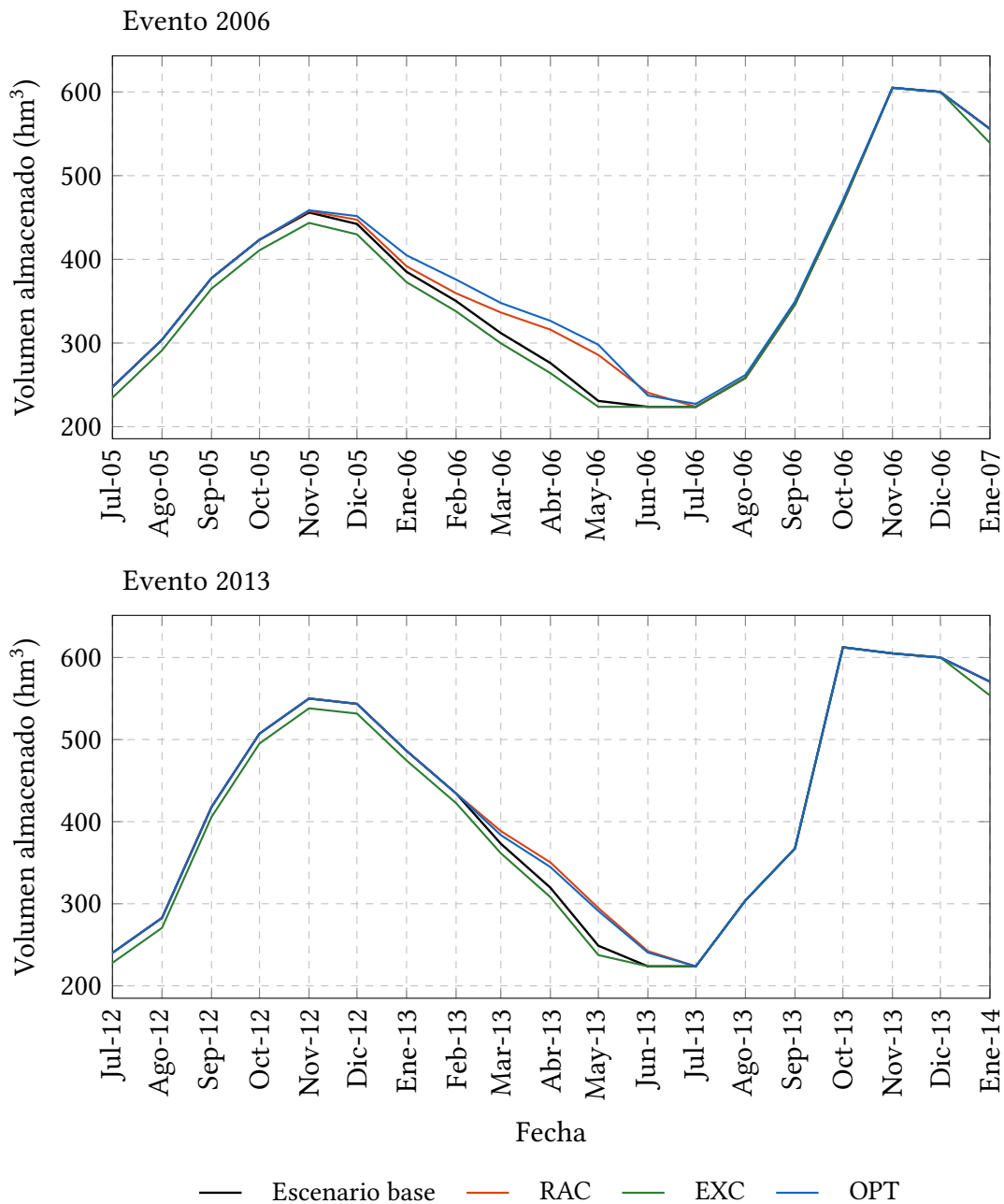


Figura 7.55: Volumen almacenado durante los eventos 2006 y 2013 en el escenario base, RAC, EXC y OPT.

EXC libera 689.10 hm^3 de excedencias en 68 meses, con un promedio anual de 33.3 hm^3 y un máximo mensual de 30.0 hm^3 . OPT libera 454.88 hm^3 en 46 meses, con un promedio anual de 22.0 hm^3 y un máximo mensual de 32.9 hm^3 . Además, en algunos meses relativamente secos el almacenamiento sobrepasa la curva de excedencias, lo que permite sustituir bombeo también en esos periodos; de forma consistente, el esquema aprovecha los meses húmedos para apoyar el acuífero sin comprometer el suministro. Estos volúmenes permiten sustituir bombeo

en periodos con abundancia y se alinean con la necesidad de aliviar la sobreexplotación del acuífero observada en el análisis del modelo subterráneo, como se muestra en la Figura 7.56.

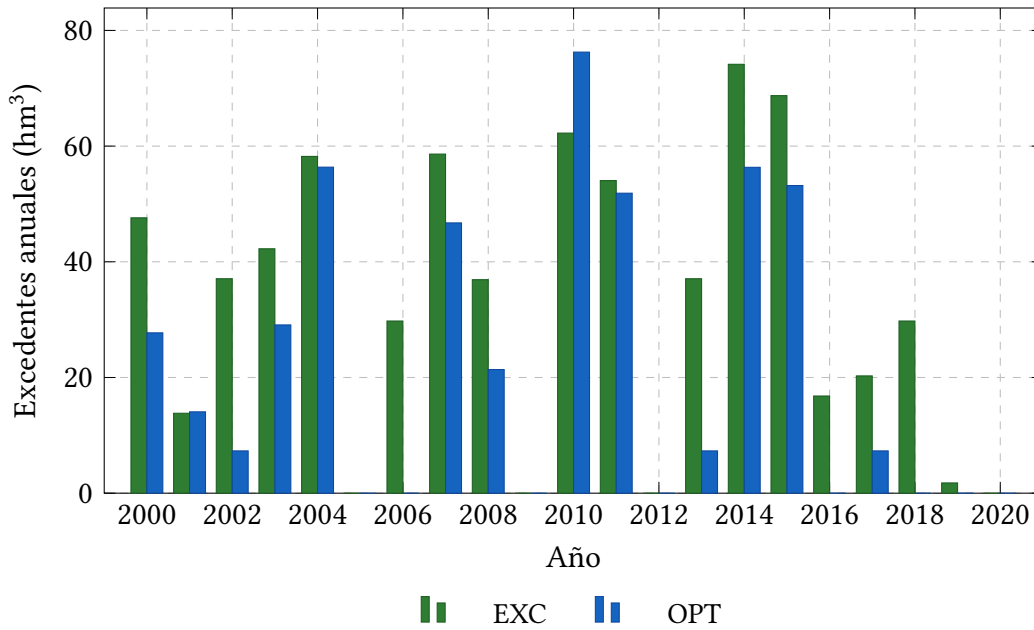


Figura 7.56: Excedencias anuales disponibles en EXC y OPT para sustituir bombeo.

7.8.2.4 Presa Los Olivos

En esta presa se adopta la demanda adaptativa porque la regulación es muy limitada y la asignación anual debe ajustarse estrictamente al almacenamiento disponible en octubre para evitar fallas severas del riego.

Se plantea un esquema de demanda adaptativa con asignación anual. Cada octubre se lee el volumen almacenado y se autoriza un volumen anual por interpolación entre cinco puntos asociados a los umbrales del IEE de Normalidad, Prealerta, Alerta y Emergencia. Ese volumen anual se distribuye con un patrón mensual de riego y se evalúa con simulación mensual del balance. La optimización (cinco variables de asignación anual ordenadas de menor a mayor) maximiza suministro y penaliza fallas de promesa mayores a 10 %:

$$J_{LOLMC} = \sum_{t=1}^T S_t - 50 \sum_{t=1}^T \max(0, F_t - 0.1 \hat{D}_t), \quad (7.6)$$

donde $\hat{D}_t$ es la demanda mensual autorizada y $F_t = \max(0, \hat{D}_t - S_t)$ la falla mensual. Esta formulación favorece asignaciones altas cuando hay disponibilidad, pero evita interrupciones a mitad del ciclo agrícola.

La Figura 7.57 muestra la nube de iteraciones y la envolvente de desempeño de la optimización para Los Olivos. Esta envolvente evidencia la relación entre aumentar el suministro

anual y contener el déficit acumulado. A partir de esa envolvente se selecciona la alternativa más equilibrada para definir la regla de asignación anual mostrada en la Figura 7.58.

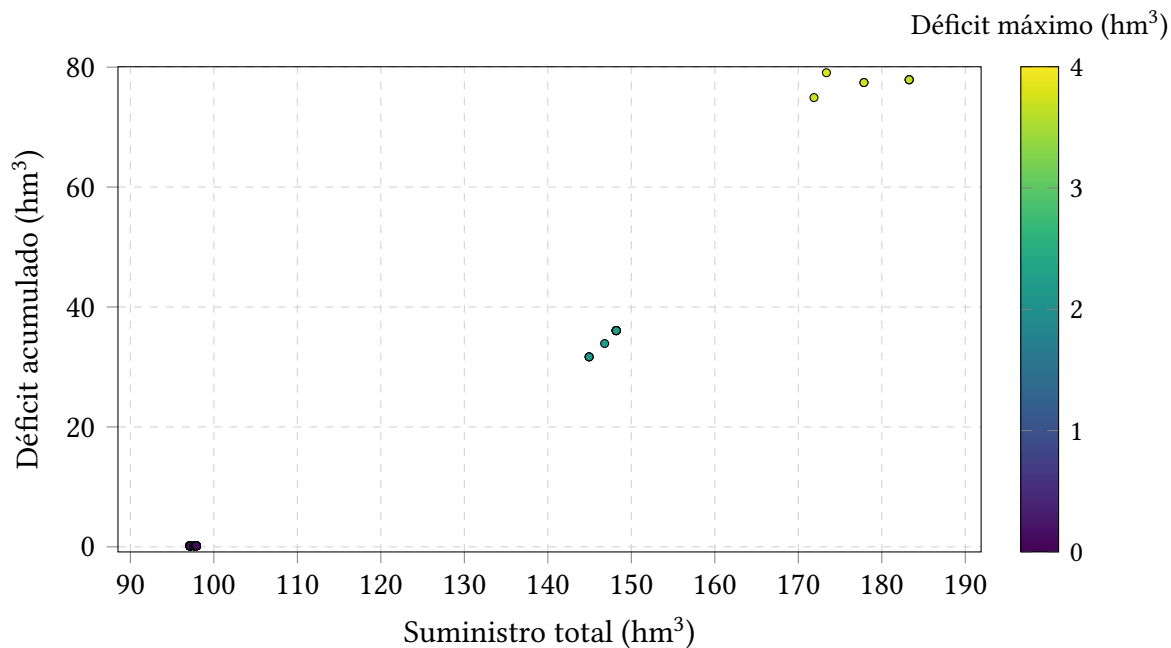


Figura 7.57: Envolvente de desempeño para el escenario de asignación adaptativa en Los Olivos.

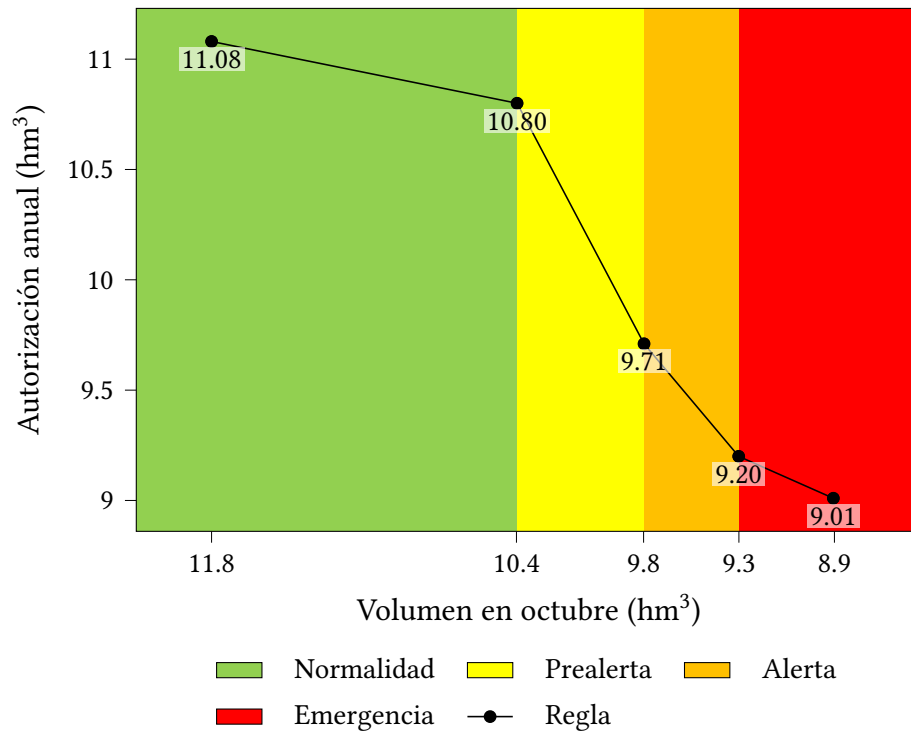


Figura 7.58: Regla de asignación anual en octubre y umbrales del IEE.

La regla optimizada asigna volúmenes anuales entre 9.0 y 11.1 hm³, incrementando la autorización conforme mejora el nivel en octubre, como se observa en la Figura 7.58. Dada la baja regulación, incluso en emergencia se autorizan volúmenes considerables y con poca diferencia respecto a normalidad, por lo que se busca utilizar al máximo el almacenamiento disponible sin comprometer la continuidad del suministro.

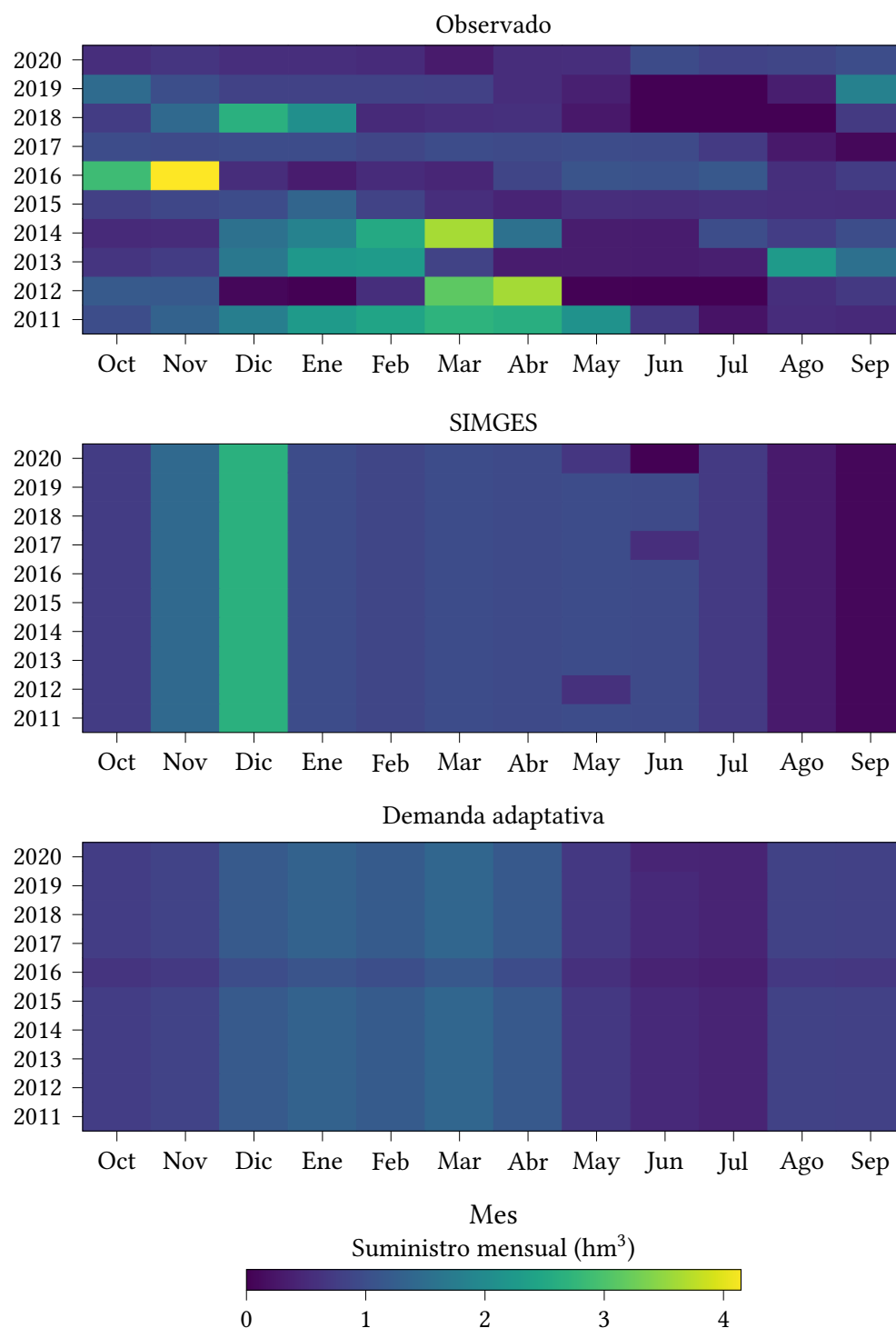


Figura 7.59: Suministro mensual en año agrícola: observado, SIMGES y demanda adaptativa.

El mapa de calor muestra que la demanda adaptativa mantiene la estacionalidad del riego, pero reduce los meses con entregas nulas y atenúa los contrastes respecto al suministro observado y al promedio de [SIMGES](#). Esto se traduce en un desempeño más estable en los años agrícolas con menor disponibilidad. La Figura 7.59 sintetiza esta evolución del suministro.

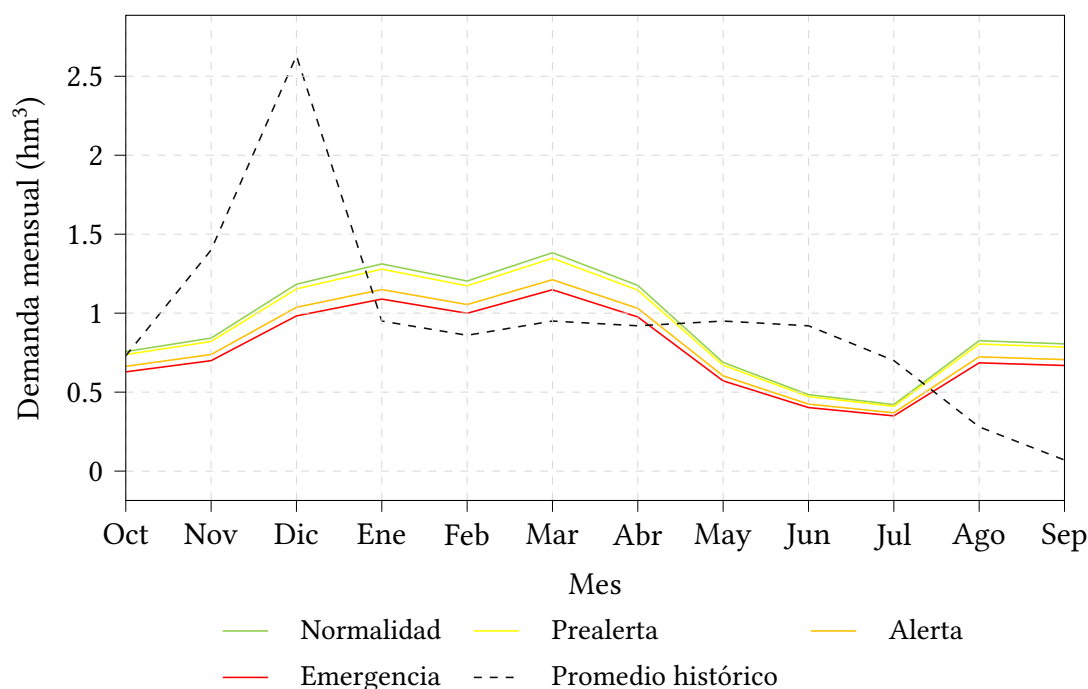


Figura 7.60: Patrones de demanda mensual por estado y promedio histórico.

La Figura 7.60 muestra cómo el patrón mensual propuesto reduce los picos en alerta y emergencia, pero mantiene volúmenes mínimos de riego para sostener el ciclo agrícola. El ajuste por estados preserva la estacionalidad y facilita que la asignación anual se traduzca en entregas mensuales coherentes con el estado del sistema.

7.8.3 Evaluación de reglas de operación

La evaluación de las reglas de operación se apoya en los indicadores **RRV** y en el **SI**, calculados a partir de las series de suministro y demanda. Estos indicadores permiten comparar el desempeño entre confiabilidad, capacidad de recuperación y severidad de los déficits.

7.8.3.1 Presa Vicente Villaseñor

En esta presa se adopta la demanda adaptativa porque la regulación anual permite ajustar el volumen autorizado al almacenamiento disponible al inicio del año agrícola, reduciendo el riesgo de déficit en años secos sin imponer recortes innecesarios en condiciones favorables.

Tabla 7.11: Indicadores **RRV** y **SI** para la presa Vicente Villaseñor.

Escenario	Rel	Res	Vul	SI
Base	0.97	0.33	0.67	0.47
Demanda adaptativa	1.00	1.00	0.00	1.00

La regla de demanda adaptativa elimina fallas en la serie histórica y maximiza los indicadores, lo que refleja un ajuste estricto entre autorización anual y almacenamiento disponible. Este resultado sugiere una mejora técnica clara en la seguridad del suministro, pero implica aceptar asignaciones más conservadoras en años secos, con efectos económicos directos en la superficie de riego autorizada. En términos sociales, el beneficio principal es la reducción de la incertidumbre para los usuarios, a cambio de recortes planificados y transparentes.

7.8.3.2 Presa San Juanico

En esta presa no se evaluaron escenarios alternativos debido a la baja eficiencia del vaso y el reducido nivel de estrés; por ello se mantiene la operación base, reforzando el seguimiento hidrológico y la revisión de entregas según el estado del sistema.

Se mantiene la operación estándar como referencia, dado que no se definieron reglas alternativas por la baja presión de demanda y la alta pérdida por evaporación. La evaluación con [RRV](#) y [SI](#) queda reservada para escenarios futuros en los que se propongan modificaciones operativas.

7.8.3.3 Presa Chilatán

Se selecciona el escenario OPT porque equilibra el racionamiento preventivo con la liberación de excedencias, manteniendo la seguridad del suministro y aportando agua para sustituir bombeo en períodos de mayor disponibilidad.

Tabla 7.12: Indicadores [RRV](#) y [SI](#) por escenario en la presa Chilatán.

Escenario	Rel	Res	Vul	SI
Base	0.98	0.60	0.40	0.71
RAC	0.91	0.27	0.13	0.60
EXC	0.97	0.63	0.34	0.74
OPT	0.92	0.30	0.16	0.61

La Tabla 7.12 muestra que el escenario base tiene la mayor confiabilidad, mientras EXC registra la mayor resiliencia y el mayor [SI](#). Ese incremento de resiliencia en EXC se explica porque la operación estándar y las liberaciones adicionales generan fallas cortas y aisladas; matemáticamente se recupera rápido, pero ello no implica un mejor desempeño físico, pues los eventos se intensifican respecto al escenario base, como se observó en el mapa de calor. En consecuencia, EXC no debe interpretarse como la mejor regla integral. RAC y OPT reducen la vulnerabilidad y los picos de déficit, aunque disminuyen la resiliencia por restricciones más prolongadas. La operación de excedencias podría requerir infraestructura de conducción para sustituir bombeo, dado que los usuarios con concesiones subterráneas no necesariamente cuentan con redes desde la presa; esto introduce implicaciones sociales e institucionales

asociadas a derechos de agua y coordinación entre usuarios. Por su parte, el racionamiento preventivo implica aceptar recortes planificados, lo que exige procesos de comunicación y gobernanza para su implementación.

7.8.3.4 Presa Los Olivos

En esta presa se adopta la demanda adaptativa porque la regulación es muy limitada y la asignación anual debe ajustarse estrictamente al almacenamiento disponible en octubre para evitar fallas severas del riego.

Tabla 7.13: Indicadores [RRV](#) y [SI](#) para la presa Los Olivos.

Escenario	Rel	Res	Vul	SI
Base	0.97	0.75	0.53	0.70
Demanda adaptativa	0.99	1.00	0.10	0.96

La demanda adaptativa incrementa la confiabilidad y elimina la persistencia de fallas, con una vulnerabilidad significativamente menor y un [SI](#) cercano a 1. Esto indica que la regla anual logra ajustar la asignación a la baja regulación de la presa y mejora la estabilidad del suministro. En la práctica, el esquema favorece la planeación agrícola al reducir la incertidumbre interanual y evitar interrupciones severas del riego. Su implementación es relativamente directa, pero requiere un vínculo estrecho de comunicación con los usuarios para ajustar expectativas y calendarios de siembra.

7.8.4 Propuesta de acciones ante eventos de sequía

Para cada presa se formaliza una matriz de acciones por cada estado del [IEE](#).

7.8.4.1 Presa Vicente Villaseñor

En esta presa se adopta la demanda adaptativa porque la regulación anual permite ajustar el volumen autorizado al almacenamiento disponible al inicio del año agrícola, reduciendo el riesgo de déficit en años secos sin imponer recortes innecesarios en condiciones favorables.

Tabla 7.14: Matriz de acciones por estado del IEE en la presa Vicente Villaseñor.

Estado	Acciones propuestas
Normalidad	Se autoriza un volumen anual de 4.47 hm ³ para riego, posibilitando el superar el histórico si el almacenamiento de octubre es alto.
Prealerta	Se autoriza un volumen anual entre 3.16 y 4.47 hm ³ para riego, cercano al histórico y condicionado al llenado de octubre.
Alerta	Se autoriza un volumen anual entre 2.55 y 3.16 hm ³ para riego, reflejando un cierre de lluvias insuficiente.
Emergencia	Se autoriza un volumen anual entre 0.11 y 2.55 hm ³ para riego, propio de un inicio en octubre con almacenamiento muy bajo.

7.8.4.2 Presa San Juanico

En esta presa no se evaluaron escenarios alternativos debido a la baja eficiencia del vaso y el reducido nivel de estrés; por ello se mantiene la operación base, reforzando el seguimiento hidrológico y la revisión de entregas según el estado del sistema.

Tabla 7.15: Matriz de acciones por estado del IEE en la presa San Juanico.

Estado	Acciones propuestas
Normalidad	Seguimiento rutinario de aportaciones, evaporación y almacenamiento.
Prealerta	Revisión mensual del balance hídrico y comunicación preventiva con usuarios.
Alerta	Ajuste del calendario de entregas con prioridad a usos esenciales y control de pérdidas.
Emergencia	Restricción temporal de entregas no esenciales y vigilancia intensiva del almacenamiento.

7.8.4.3 Presa Chilatán

Se selecciona el escenario OPT porque equilibra el racionamiento preventivo con la liberación de excedencias, manteniendo la seguridad del suministro y aportando agua para sustituir bombeo en períodos de mayor disponibilidad.

Tabla 7.16: Matriz de acciones por estado del IEE en la presa Chilatán.

Estado	Acciones propuestas
Normalidad	Suministro completo y liberación de excedencias para sustituir bombeo y apoyar al acuífero.
Prealerta	Suministro completo, se suspende la liberación de excedencias y se refuerza el monitoreo.
Alerta	Estado de transición: vigilancia intensiva y maximizar el ahorro de agua.
Emergencia	Recortes de suministro conforme a la curva de racionamiento preventivo.

7.8.4.4 Presa Los Olivos

En esta presa se adopta la demanda adaptativa porque la regulación es muy limitada y la asignación anual debe ajustarse estrictamente al almacenamiento disponible en octubre para evitar fallas severas del riego.

Tabla 7.17: Matriz de acciones por estado del IEE en la presa Los Olivos.

Estado	Acciones propuestas
Normalidad	Se autoriza un volumen anual entre 10.80 y 11.08 hm ³ para riego, aprovechando casi todo el volumen útil.
Prealerta	Se autoriza un volumen anual entre 9.71 y 10.80 hm ³ para riego, ajustado al volumen útil disponible en octubre.
Alerta	Se autoriza un volumen anual entre 9.20 y 9.71 hm ³ para riego, manteniendo asignaciones altas pese a la baja regulación.
Emergencia	Se autoriza un volumen anual entre 9.01 y 9.20 hm ³ para riego, lo máximo aprovechable ante la baja regulación.

Conclusiones

La disponibilidad limitada de información obligó a depurar, integrar y tratar las series con el fin de maximizar su aprovechamiento. Este esfuerzo permitió construir insumos operativos, pero también introduce incertidumbre inherente a la representación de la realidad. Por ello, se refuerza la importancia de fortalecer el monitoreo y de construir bases de datos sólidas, con mayor cantidad y calidad de información, pues los retos actuales de la gestión del agua demandan evidencia continua y confiable.

En la modelación hidrológica, aun con datos limitados, se logró representar de manera adecuada los procesos clave del ciclo hidrológico. El modelo subterráneo evidenció un descenso de niveles piezométricos, probablemente asociado a la intensificación de los bombeos a lo largo del tiempo. La calibración permitió reproducir patrones esenciales de escurrimiento y almacenamiento, con un nivel de desempeño suficiente para el análisis de escenarios y la evaluación de reglas de operación.

En el modelo conjunto, el sistema de recursos hídricos de la CRT se representó de forma consistente, integrando la dinámica superficial y subterránea bajo un marco operativo. A pesar de las incertidumbres acumuladas, el comportamiento global del sistema pudo ser reproducido con fidelidad razonable, permitiendo explorar condiciones de escasez y su respuesta operativa.

Los IEE capturaron de manera satisfactoria los episodios históricos críticos de sequía y resultaron adecuados para el monitoreo del estado del sistema. El IEE global muestra una tendencia de deterioro a partir de 2015, lo que sugiere una condición más crónica de estrés, posiblemente asociada a cambios en los patrones climáticos. Esta señal refuerza la necesidad de contar con instrumentos de diagnóstico y alerta temprana.

En cuanto a las reglas de operación, el diagnóstico estructural permitió definir estrategias diferenciadas por presa y la optimización logró reglas funcionales coherentes con el IEE. En Chilatán, el racionamiento preventivo redujo la severidad de los déficits y el escenario combinado permitió liberar excedencias para sustituir bombeo y apoyar al acuífero sin comprometer la garantía de la demanda prioritaria. En Vicente Villaseñor, la demanda adaptativa ajustó la asignación anual de agua al almacenamiento inicial en octubre, mejorando la estabilidad del suministro; en Los Olivos, la optimización de la asignación anual resultó clave para operar con baja regulación. En San Juanico, las limitaciones del vaso justifican mantener la operación estándar con monitoreo reforzado. Sin embargo, los resultados muestran que no siempre es posible mejorar el desempeño si las limitaciones son estructurales; tal es el caso de San Juanico o la baja regulación de Los Olivos, donde se requieren medidas estructurales para elevar el margen de gestión.

Finalmente, el trabajo evidencia que las herramientas de modelación conjunta son esenciales para comprender el funcionamiento de sistemas complejos y para evaluar escenarios de mejora en la gestión. Los desafíos actuales sólo pueden abordarse con una visión integral, donde cada componente se analiza en relación con el resto del sistema y no de forma aislada, con el objetivo de lograr un uso óptimo y sustentable del agua.

Referencias

- Addor, N., & Melsen, L. A. (2019). Legacy, Rather Than Adequacy, Drives the Selection of Hydrological Models. *Water Resources Research*, 55(1), 378-390. <https://doi.org/10.1029/2018WR022958>
- Aein, R., & Alizadeh, H. (2021). Integrated hydro-economic modeling for optimal design of development scheme of salinity affected irrigated agriculture in Helleh River Basin. *Agricultural Water Management*, 243, 106505. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106505>
- Aguilar-Barajas, I., Sisto, N. P., Magaña-Rueda, V., Ramírez, A. I., & Mahlknecht, J. (2016). Drought policy in Mexico: A long, slow march toward an integrated and preventive management model. *Water Policy*, 18(S2), 107-121. <https://doi.org/10.2166/wp.2016.116>
- Alamanos, A., Rolston, A., & Papaioannou, G. (2021). Development of a Decision Support System for Sustainable Environmental Management and Stakeholder Engagement. *Hydrology*, 8(1), 40. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010040>
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661-675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., & Smith, M. (Eds.). (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Almorox, J., & Grieser, J. (2016). Calibration of the Hargreaves–Samani method for the calculation of reference evapotranspiration in different Köppen climate classes. *Hydrology Research*, 47(2), 521-531. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.091>
- Althoff, D., & Rodrigues, L. N. (2021). Goodness-of-fit criteria for hydrological models: Model calibration and performance assessment. *Journal of Hydrology*, 600, 126674. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126674>
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015a). *Applied Groundwater Modeling*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015b). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport* (2.^a ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-21563-7>
- Andreu, J., Capilla, J., & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3-4), 269-291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)
- Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer, J. (2007). *Modelo SIMGES para simulación de cuencas: manual de usuario V3.0*. Editorial UPV. OCLC: 433498757.

- Andrews, F., Croke, B., & Jakeman, A. (2011). An open software environment for hydrological model assessment and development. *Environmental Modelling & Software*, 26(10), 1171-1185. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.006>
- Astagneau, P. C., Thirel, G., Delaigue, O., Guillaume, J. H. A., Parajka, J., Brauer, C. C., Viglione, A., Buytaert, W., & Beven, K. J. (2020, octubre). Hydrology Modelling R Packages: A Unified Analysis of Models and Practicalities from a User Perspective. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-498>
- Bear, J., Beljin, M. S., & Ross, R. R. (1992). Ground Water Issue: Fundamentals of Ground-Water Modeling.
- Bergström, S. (1976). *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*. SMHI.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2. ed). Wiley-Blackwell.
- Biswas, A. K. (1970). *History of hydrology*. North-Holland Publ.
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1950). Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data.
- Bouklia-Hassane, R., Yebdri, D., & Tidjani, A. E.-B. (2017). Climate change and water resources management of Oran region. *Journal of Water and Climate Change*, 8(2), 348-361. <https://doi.org/10.2166/wcc.2016.037>
- Brown, T. C., Mahat, V., & Ramirez, J. A. (2019). Adaptation to Future Water Shortages in the United States Caused by Population Growth and Climate Change. *Earth's Future*, 7(3), 219-234. <https://doi.org/10.1029/2018EF001091>
- Burnash, J. R. C. (1995). The NWS River Forecast System – Catchment Modeling. En V. P. Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology* (pp. 311-366). Water Resources Publications.
- Capilla, J., & Andreu, J. (1996). AQUIVAL: A GUI for Groundwater Modelling Incorporated into the Simulation of Complex Water Resources Systems. *Transactions on Ecology and the Environment*, 12, 72-80.
- Carpenter, A., & Choudhary, M. K. (2022). Water Demand and Supply Analysis Using WEAP Model for Veda River Basin Madhya Pradesh (Nimar Region), India. *Trends in Sciences*, 19(6), 3050. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.3050>
- Cedillo de Lucas, L. L. (2012). *Evaluación de Las Fuentes Abastecimiento de Agua Para La Zona Metropolitana de Monterrey* [Tesis de Maestría]. Tecnológico de Monterrey.
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae)? – arguments against avoiding rmse in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- CHE. (2024, 9 de diciembre). *Informe de la Dirección General del Agua sobre el Plan Especial de Sequía (PES) de la Demarcación Hidrográfica del Ebro*. CHE. Consultado el 4 de enero de 2026, desde https://www.chebro.es/documents/20121/2462579/20241223%2BInforme%2BDGA%2Bde%2BPES%2BEbro_paraWeb.pdf
- CHJ. (2018). *Plan Especial de Sequía: Demarcación Hidrográfica Del Júcar* (inf. téc.). Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ. (2023, 30 de marzo). *Plan Especial de Sequía: Propuesta de Proyecto de Revisión del Plan Especial de Sequía. Demarcación Hidrográfica del Júcar (Memoria)*. Confederación Hidro-

- gráfica del Júcar, O.A. Consultado el 4 de enero de 2026, desde https://www.chj.es/es-es/medioambiente/gestionsequia/Documents/Plan%20Especial%20Sequia%202023/PES_2023_DHJ.pdf
- CHJ. (2025, 3 de diciembre). *Informe de seguimiento de la sequía y la escasez (noviembre 2025). Demarcación Hidrográfica del Júcar*. Confederación Hidrográfica del Júcar, O.A. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://www.chj.es/es-es/medioambiente/gestionsequia/Documents/Informes%20Seguimiento/InformeSequia.pdf>
- CHS. (2023, 24 de mayo). *Aspectos básicos de la revisión del Plan Especial de Sequía (PES): sistemas de indicadores y umbrales*. CHS. Consultado el 4 de enero de 2026, desde https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/cuenca/sequias/revision2023/docsdescarga/OPH_aspectos-basicos-PES-jornada-22-mayo.pdf
- CONABIO. (2024). Portal de Geoinformación. Consultado el 19 de agosto de 2024, desde <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2012). *Water and climate change in mexico: 2007–2012*. CONAGUA. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/wandccmex2007-2012.pdf>
- CONAGUA. (2019a). *Datos Básicos Para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* (Vol. 4). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2019b). Sistema de Información Hidrológica.
- CONAGUA. (2021). Redes de Monitoreo Piezométrico, Subgerencia de Exploración y Monitoreo Geohidrológico.
- CONAGUA. (2022). Programa Nacional Contra La Sequía.
- CONAGUA. (2023). Disponibilidad Por Acuíferos.
- CONAGUA. (2024a). *Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Apatzingán (1620), Estado de Michoacán* (inf. téc.). Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2024b). *Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Colomos (1438), Estado de Jalisco* (inf. téc.). Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2024c). *Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Cotija (1622), Estado de Michoacán* (inf. téc.). Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2024d). *Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Quitupán (1439), Estado de Jalisco* (inf. téc.). Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2024e). *Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Valle de Juárez (1440), Estado de Jalisco* (inf. téc.). Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2024f). Registro Público de Derechos de Agua.
- Delft Hydraulics. (2006). Delft Hydraulics River Basin Planning and Management Simulation Program. *Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software"*.
- Dhaqane, A. I., Murshed, M. F., Mourad, K. A., Almazroui, M., Rashid, I. U., Arshad, A., & Ali, R. (2025). Integrated water allocation modeling under future development scenarios in the juba river basin, somalia: A weap-based approach for sustainable water management. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00763-3>
- DHI. (2017). *MIKE HYDRO Basin User Guide* (inf. téc.). Danish Hydrological Institute. Hørsholm, Denmark.

- Domonkos, P., & Coll, J. (2017). Homogenisation of temperature and precipitation time series with ACMANT3 : Method description and efficiency tests. *International Journal of Climatology*, 37(4), 1910-1921. <https://doi.org/10.1002/joc.4822>
- Dym, C. L. (2004). *Principles of Mathematical Modeling* (2nd ed). Elsevier Academic Press.
- Earle, S., & Panchuk, K. (2019). *Physical geology* (2nd edition). BCcampus, BC Open Textbook Project.
- Estrela, T., & Vargas, E. (2012). Drought management plans in the european union. the case of spain. *Water Resources Management*, 26(6), 1537-1553. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9971-2>
- European Commission. (2007a, 18 de julio). *Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the european union (com(2007) 414 final)*. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52007DC0414>
- European Commission. (2007b, noviembre). *Drought management plan report: Including agricultural drought indicators and climate change aspects* (inf. téc. N.º Technical Report 2008–023). European Commission. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://circabc.europa.eu/sd/a/351a7c76-54d3-4b22-9aaf-93b32b2e6a77/Drought%20Management%20Plan%20Report.pdf>
- Fedra, K., & Jamieson, D. (1996). An Object-Oriented Approach to Model Integration: A River Basin Information System Example. *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, 235, 669-676.
- Firdaus, N. N. M., & Talib, S. A. (2016). Modeling Water Supply and Demand for Effective Water Management Allocation in Selangor. *Jurnal Teknologi*, 78(5-5). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8569>
- Garrote, L., Granados, A., Spiliotis, M., & Martin-Carrasco, F. (2023). Effectiveness of adaptive operating rules for reservoirs. *Water Resources Management*, 37, 2527-2542. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03386-9>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-7781-5>
- González-Arreguín, I. (2018). *Evaluación Del Riesgo de Sequía Operativa, En El Sistema de Recursos Hídricos de La Cuenca Del Río Tepalcatepec* [Tesis de Maestría]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Guijarro, J. A. (2004, diciembre). Climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.climatol>
- Guijarro, J. A., López, J. A., Aguilar, E., Domonkos, P., Venema, V. K. C., Sigró, J., & Brunet, M. (2023). Homogenization of monthly series of temperature and precipitation: Benchmarking results of the MULTITEST project. *International Journal of Climatology*, 43(9), 3994-4012. <https://doi.org/10.1002/joc.8069>
- Hadka, D., Herman, J., Reed, P., & Keller, K. (2015). An open source framework for many-objective robust decision making. *Environmental Modelling & Software*, 74, 114-129. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.014>
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process* (Techniques and Methods).

- Hargreaves, G. H. (1994). Defining and Using Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6), 1132-1139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1994\)120:6\(1132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:6(1132))
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14-20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485-488. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>
- Hernández, M. A., Amador, A., Sánchez, S. T., & Solera, A. (2014). Manejo Conjunto Del Agua En La Subcuenca Támula-Picachos, Guanajuato, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), 159-165.
- Hervás-Gámez, C., & Delgado-Ramos, F. (2019). Drought Management Planning Policy: From Europe to Spain. *Sustainability*, 11(7), 1862. <https://doi.org/10.3390/su11071862>
- Hill, M. C., & Tiedeman, C. R. (2007). *Effective groundwater model calibration: With analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470041080>
- Huffman, R. L., Fangmeier, D. D., Elliot, W. J., & Workman, S. R. (2013). *Soil and water conservation engineering* (Seventh edition). American Society of Agricultural and Biological Engineers. OCLC: 868180476.
- ICAyCC-UNAM. (2021, 14 de mayo). *Sequía 2020–2021: La segunda más severa del registro reciente*. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://www.atmosfera.unam.mx/sequia-2020-2021-la-segunda-mas-severa-del-registro-reciente/>
- Iglesias, A. (1984). Hidrogeología. En L. I. Gonzáles de Vallejo, M. Ferrer-Gijón, L. Ortuño-Abad & C. Oteo-Mazo (Eds.), *Ingeniería Geológica* (pp. 264-308). Prentice Hall.
- INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano.
- INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020.
- Jung, C.-G., Lee, D.-R., & Moon, J.-W. (2016). Comparison of the Penman-Monteith method and regional calibration of the Hargreaves equation for actual evapotranspiration using SWAT-simulated results in the Seolma-cheon basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, 61(4), 793-800. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943231>
- Kirkham, M. B. (2014). *Principles of Soil and Plant Water Relations* (2.^a ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12871-1>
- Kokkonen, T., Koivusalo, H., & Karvonen, T. (2001). A semi-distributed approach to rainfall-runoff modelling—a case study in a snow affected catchment. *Environmental Modelling & Software*, 16(5), 481-493. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00028-7)
- Labadie, J. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93-111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93))
- Langbein, W. B. (1959). *Water yield and reservoir storage in the united states* (N.º 409). U.S. Geological Survey. Washington, D.C. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://pubs.usgs.gov/circ/1959/0409/report.pdf>

- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Li, X., Zhao, Y., Shi, C., Sha, J., Wang, Z.-L., & Wang, Y. (2015). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. *Ocean & Coastal Management*, 106, 97-109. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.01.016>
- Loucks, D., French, P., & Taylor, M. (1994). *IRAS—Interactive River-Aquifer Simulation: Program Description and Operation* (inf. téc.). Cornell University and Resources Planning Associates.
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Lund, J. R., & Ferreira, I. (1996). Operating rule optimization for missouri river reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(4), 287-295. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:4\(287\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:4(287))
- Maier, H. R., Kapelan, Z., Kasprzyk, J., Kollat, J., Matott, L. S., Cunha, M. C., Dandy, G. C., Gibbs, M. S., Keedwell, E., Marchi, A., Ostfeld, A., Savic, D., Solomatine, D. P., Vrugt, J. A., Zecchin, A. C., Minsker, B. S., Barbour, E. J., Kuczera, G., Pasha, F., ... Reed, P. M. (2014). Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Current status, research challenges and future directions. *Environmental Modelling & Software*, 62, 271-299. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.013>
- Maliva, R., & Missimer, T. (2012). Managed aquifer recharge. En *Arid lands water evaluation and management*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_23
- Melsen, L., Teuling, A., Torfs, P., Zappa, M., Mizukami, N., Clark, M., & Uijlenhoet, R. (2016). Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: Case study for a mesoscale pre-Alpine basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2207-2226. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2207-2016>
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Boehm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Dubuisson, B., & Stepanek, P. (2013). HOMER: A Homogenization Software - Methods and Applications. *IDOJARAS*, 117(1), 47-67.
- MITECO. (2018, 28 de noviembre). *Orden TEC/1399/2018, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la revisión de los planes especiales de sequía (incluye la Demarcación Hidrográfica del Júcar)* [Boletín Oficial del Estado (BOE-A-2018-17752)]. Consultado el 4 de enero de 2026, desde https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-17752
- MITECO. (2025a, noviembre). *Anexo 3. Evolución de indicadores de sequía y escasez por Demarcación Hidrográfica*. MITECO. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/2511-Anexo%203-Indicadores%20por%20DH.pdf>
- MITECO. (2025b). *Informes y mapas de seguimiento (Observatorio Nacional de la Sequía): situación de sequía prolongada y escasez coyuntural*. Consultado el 4 de enero de 2026, desde <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/informes-mapas-seguimiento.html>

- Montero-Martínez, M. J., Santana-Sepúlveda, J. S., Pérez-Ortiz, N. I., Pita-Díaz, Ó., & Castillo-Liñan, S. (2018). Comparing climate change indices between a northern (arid) and a southern (humid) basin in Mexico during the last decades. *Advances in Science and Research*, 15, 231-237. <https://doi.org/10.5194/asr-15-231-2018>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. V., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- MSM. (2024). Monitor de Sequía En México. Consultado el 7 de octubre de 2024, desde <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>
- Palop-Donat, C., Paredes-Arquiola, J., & Andreu Álvarez, J. (2020). Optimization of the scarcity state indicator in the jucar river basin. *Ingeniería del Agua*, 24(2), 129-140. <https://doi.org/10.4995/ia.2020.12275>
- Paredes, J., Solera, A., Andreu, J., & Lerma, N. (2017). *Herramienta Evalhid Para La Evaluación de Recursos Hídricos*. Manual Técnico V1.1. Valencia.
- Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). Interpolation of Missing Precipitation Records. *Monthly Weather Review*, 80(8), 129-133. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2)
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Pérez-Sánchez, J. (2013). *Gestión Conjunta de Recursos Hídricos a Escala Local. Aplicación Del Modelo Simges al Caso de Hellín (Albacete)* [Tesis de Doctorado]. Universidad de Murcia.
- Perlman, H. (2016). The Water Cycle - USGS Water Science School.
- Pita-Díaz, O., & Ortega-Gaucin, D. (2020). Analysis of Anomalies and Trends of Climate Change Indices in Zacatecas, Mexico. *Climate*, 8(4), 55. <https://doi.org/10.3390/cli8040055>
- Pourmahmoud, J., Hashemy Shahdany, S. M., & Roozbahani, A. (2024). Practical drought risk assessment and management framework: A step toward sustainable modernization in agricultural water management. *Journal of Hydrology*, 644, 132121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132121>
- R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Manual. Vienna, Austria.
- RAE. (2023). Real Academia Española. Consultado el 15 de noviembre de 2024, desde <https://www.rae.es/>
- Ravazzani, G., Corbari, C., Morella, S., Gianoli, P., & Mancini, M. (2012). Modified Hargreaves-Samani Equation for the Assessment of Reference Evapotranspiration in Alpine River Basins. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(7), 592-599. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000453](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000453)
- RaziSadath, P. V., RinishaKartheshwari, M., & Elango, L. (2023). WEAP Model Based Evaluation of Future Scenarios and Strategies for Sustainable Water Management in the

- Chennai Basin, India. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(11), 2062-2080. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.144>
- Ritter, A., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Rosbjerg, D., & Rodda, J. (2019). IAHS: A brief history of hydrology. *History of Geo- and Space Sciences*, 10(1), 109-118. <https://doi.org/10.5194/hgss-10-109-2019>
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., & Loucks, D. P. (2011). Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5), 381-390. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000164)
- SGM. (2023). Servicio Geológico Mexicano.
- Shih, J.-S., & ReVelle, C. (1994). Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 613-629. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:5\(613\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:5(613))
- Sitterson, J., Knightes, C. D., Parmar, R., Wolfe, K., Avant, B., & Muche, M. E. (2018). An Overview of Rainfall-Runoff Model Types.
- Soares, D., & Peña, A. (2018). *Impacto Del Cambio Climático Para La Gestión Integral de La Cuenca Hidrológica Del Río Apatlaco*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Soil Science Society of America. (2023). Glossary of Soil Science Terms.
- Srinivasulu, S., & Jain, A. (2008). Rainfall-Runoff Modelling: Integrating Available Data and Modern Techniques. En R. J. Abrahart, L. M. See & D. P. Solomatine (Eds.), *Practical Hydroinformatics* (pp. 59-70, Vol. 68). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79881-1_5
- Štěpánek, P., Zahradníček, P., & Skalák, P. (2009). Data quality control and homogenization of air temperature and precipitation series in the area of the Czech Republic in the period 1961–2007. *Advances in Science and Research*, 3(1), 23-26. <https://doi.org/10.5194/asr-3-23-2009>
- Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (2002). THE DROUGHT MONITOR. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1181-1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>
- Szentimrey, T. (2018). New Version MASHv4.01 for Joint Homogenization of Mean and Standard Deviation.
- Terrazas, L. G., Forni, L., & Escobar, M. (2020). Integrating Equality in Evaluation of Water Access for Irrigation in an Andean Community. *Aqua-LAC*, 12(1), 42-58. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2020-v12-1-04>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Turc, L. (1961). Evolution Des Besoins En Eau D'Irrigation. Evapotranspiration Potentielle. Formule Climatique Sim- Plifiée et Mise à Jour. *Annuaire Agronomique*, 12, 13-49.
- UNEP. (2021). *Progress on Integrated Water Resources Management. Tracking SDG 6 Series: Global Indicator 6.5.1 Updates and Acceleration Needs*. United Nations Environment Programme.

- Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., & Summerell, G. (2012). *Guidelines for rainfall-runoff modelling: Towards best practice model application*. eWater CRC.
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
- Wang, X. L., & Feng, Y. (2013). *RHtestsV4 User Manual* (inf. téc.). Climate Data and Analysis Section - Environment and Climate Change Canada.
- Weatherl, R. K., Henao Salgado, M. J., Ramgraber, M., Moeck, C., & Schirmer, M. (2021). Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach. *Hydrogeology Journal*, 29(7), 2411-2428. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02385-1>
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (mae) over the root mean square error (rmse) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Winston, R. B. (2024). ModelMuse Version 5.2. <https://doi.org/10.5066/P13WCNEZ>
- WMO. (2020). *Guidelines on Homogenization*. World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization. (2012). *Standardized precipitation index user guide* (WMO-No. 1090). World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. Consultado el 4 de enero de 2026, desde https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7768
- Yang, W.-Y., Li, D., Sun, T., & Ni, G.-H. (2015). Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs. *Ecological Engineering*, 74, 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.023>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 1: Model Characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500. <https://doi.org/10.1080/02508060508691893>
- Yeh, W. W.-G. (1985). Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818. <https://doi.org/10.1029/WR021i012p01797>
- You, J.-Y., & Cai, X. (2008). Hedging rule for reservoir operations: 1. a theoretical analysis. *Water Resources Research*, 44(1). <https://doi.org/10.1029/2006WR005481>

Resultados de los Modelos Lluvia-Escurrimiento

A.0.1 Escurrimientos mensuales

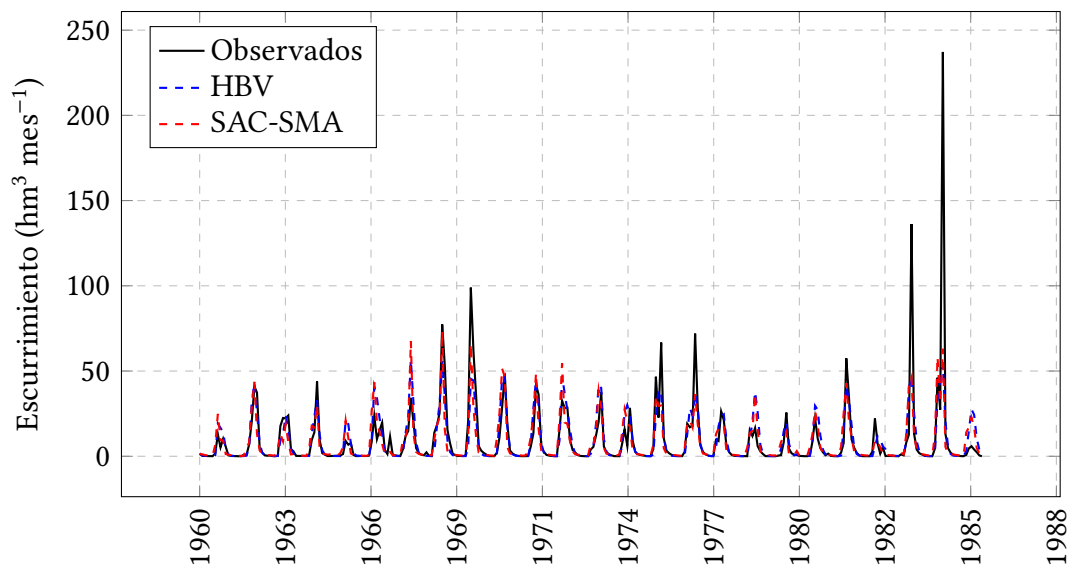


Figura A.1: Escurrimientos mensuales en la cuenca de la estación B18201.

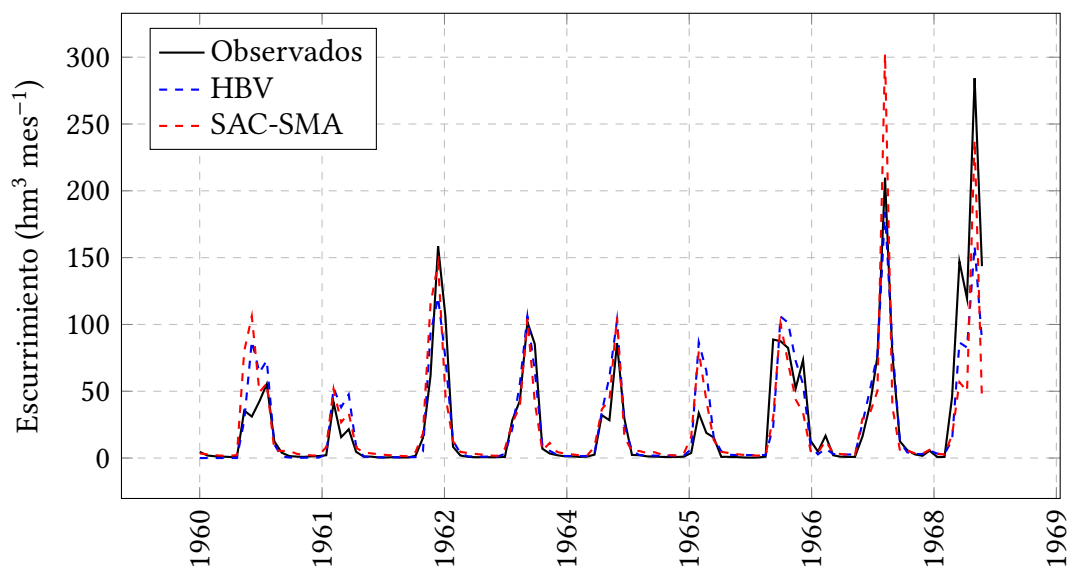


Figura A.2: Escurrencios mensuales en la cuenca de la estación B18202.

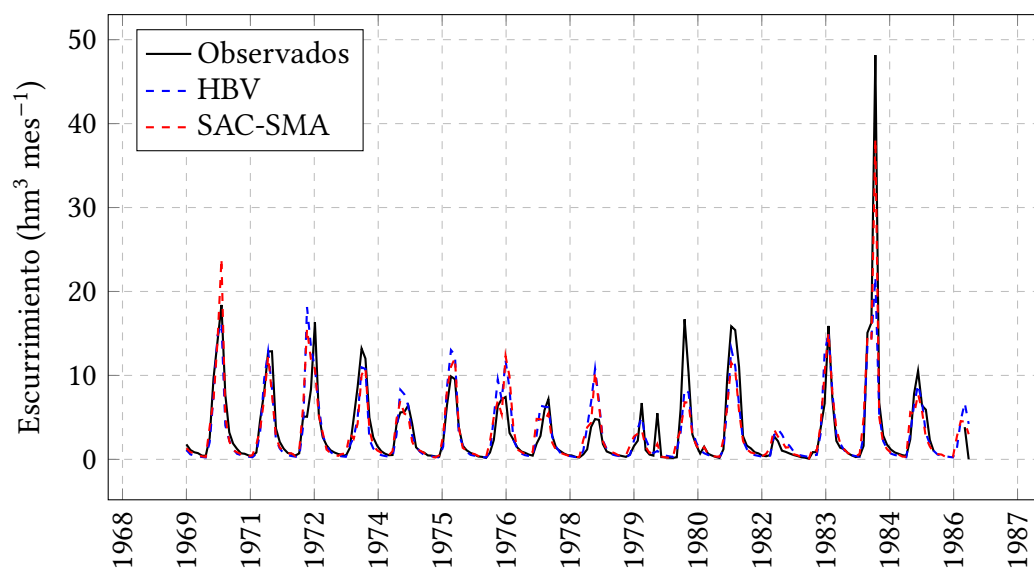


Figura A.3: Escurrencios mensuales en la cuenca de la estación B18452.

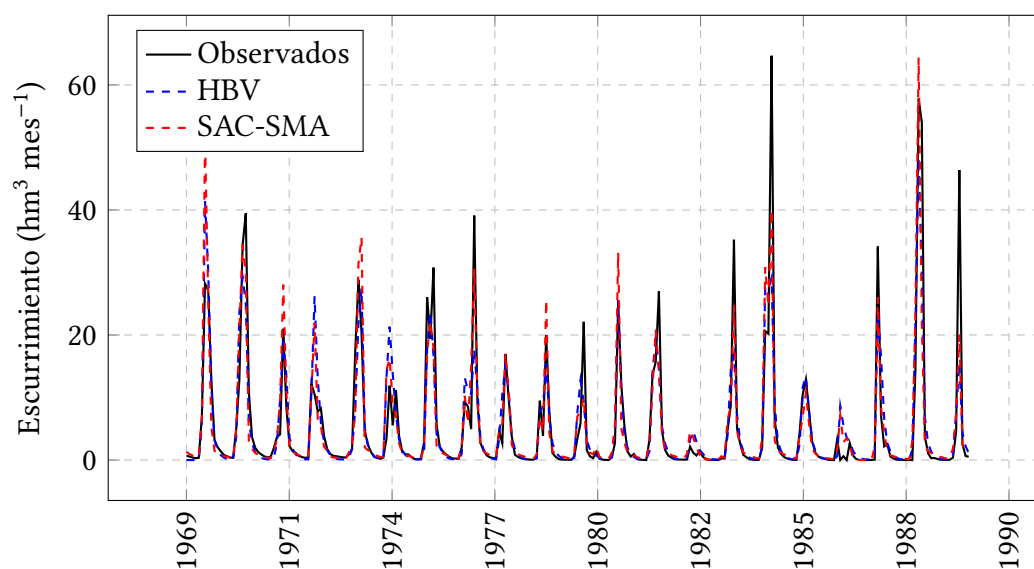


Figura A.4: Ecurrimientos mensuales en la cuenca de la estación B18496.

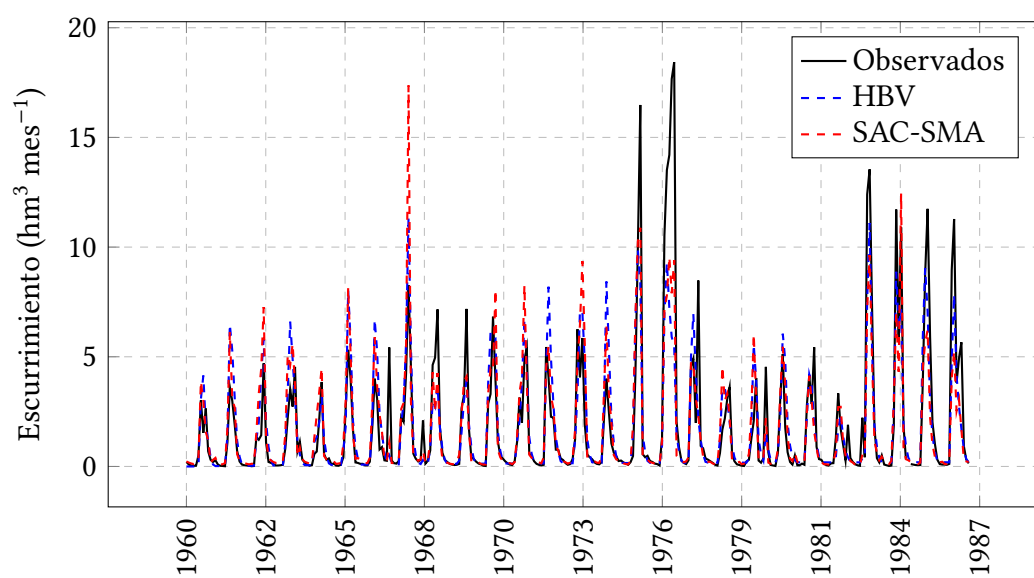


Figura A.5: Ecurrimientos mensuales en la cuenca de la estación B18095.

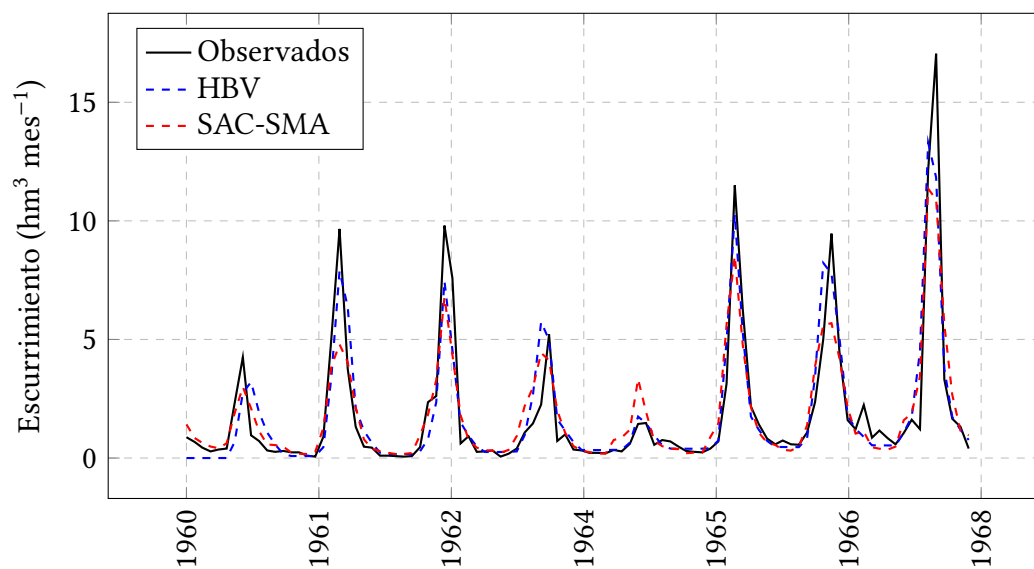


Figura A.6: Escurrencios mensuales en la cuenca de la estación B18280.

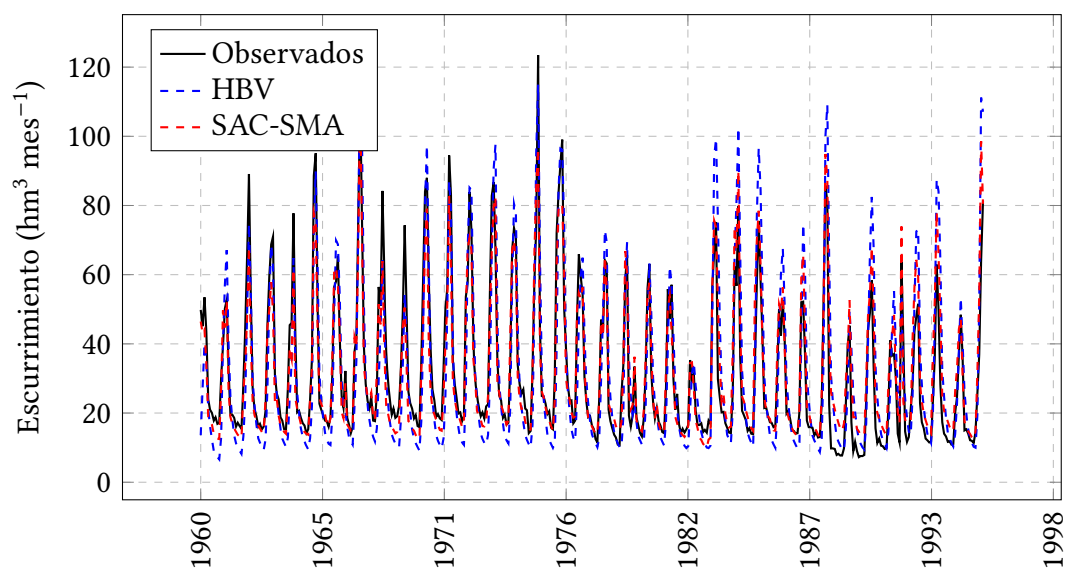


Figura A.7: Escurrencios mensuales en la cuenca de la estación B18281.

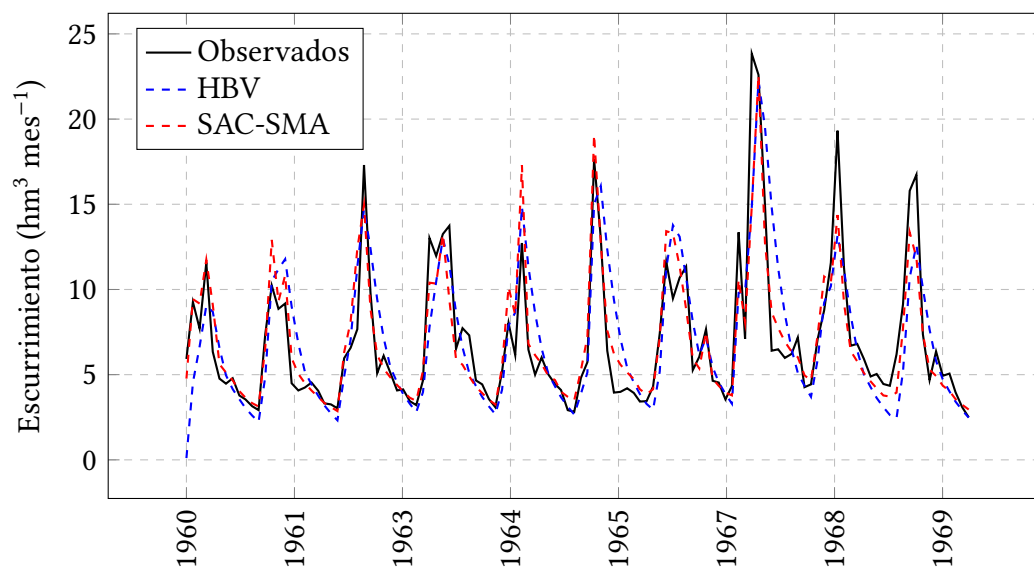


Figura A.8: Escurrencios mensuales en la cuenca de la estación B18531.

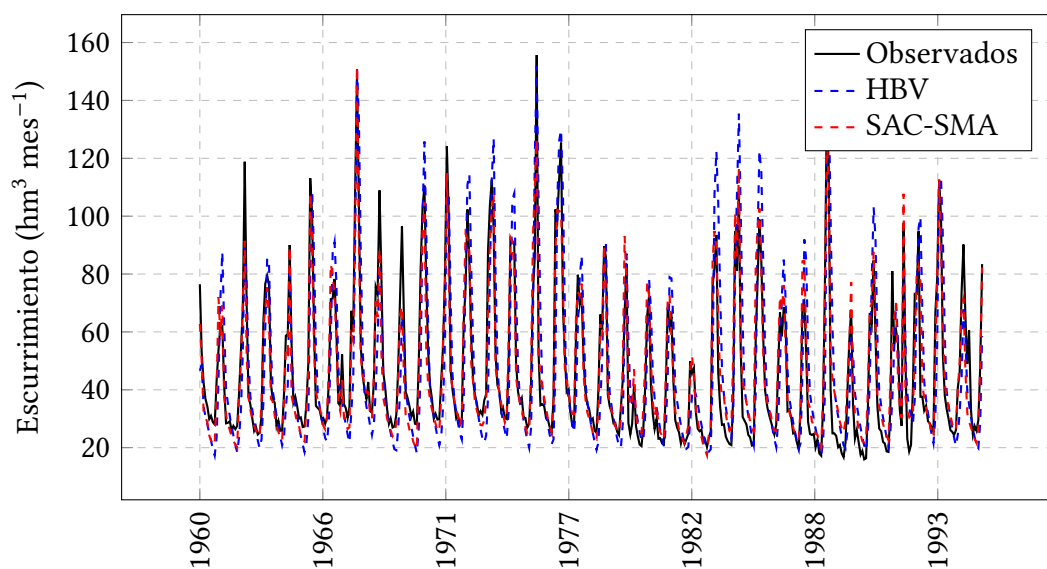


Figura A.9: Escurrencios mensuales en la cuenca de la estación B18532.

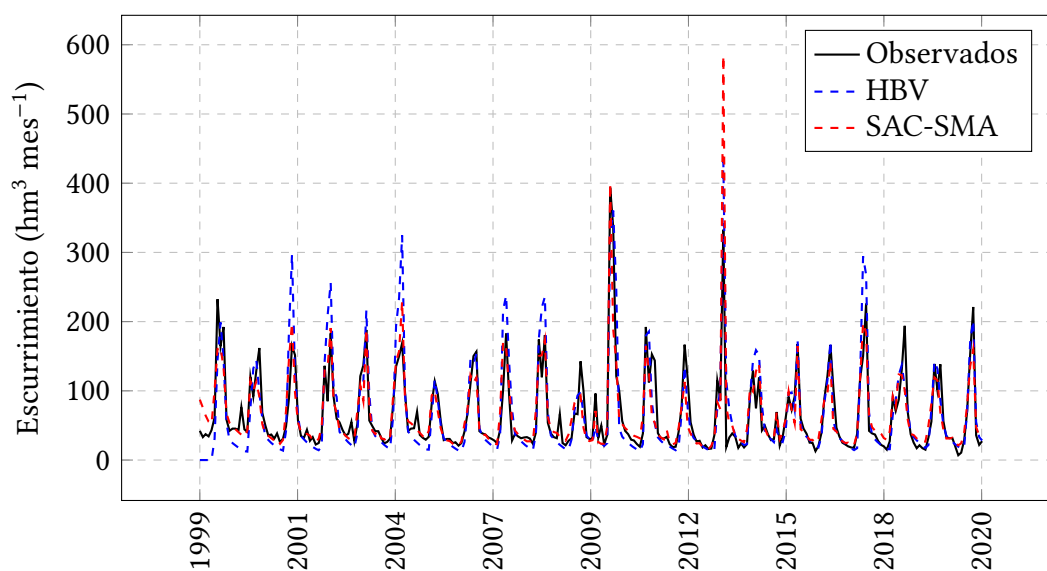


Figura A.10: Escurrencios mensuales en la cuenca de la estación CHLMC.

A.0.2 Escurrencios anuales

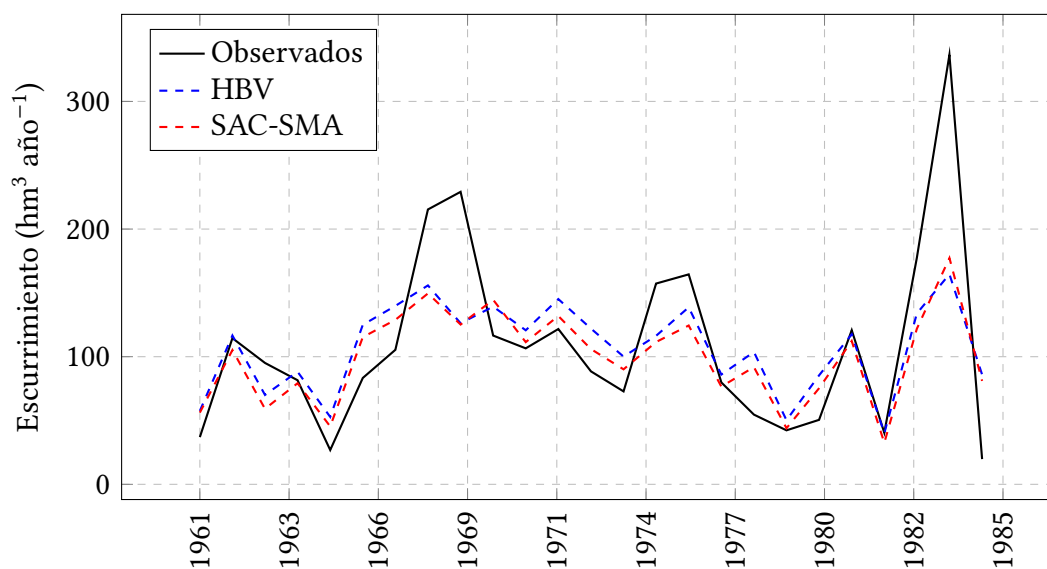


Figura A.11: Escurrencios anuales en la cuenca de la estación B18201.

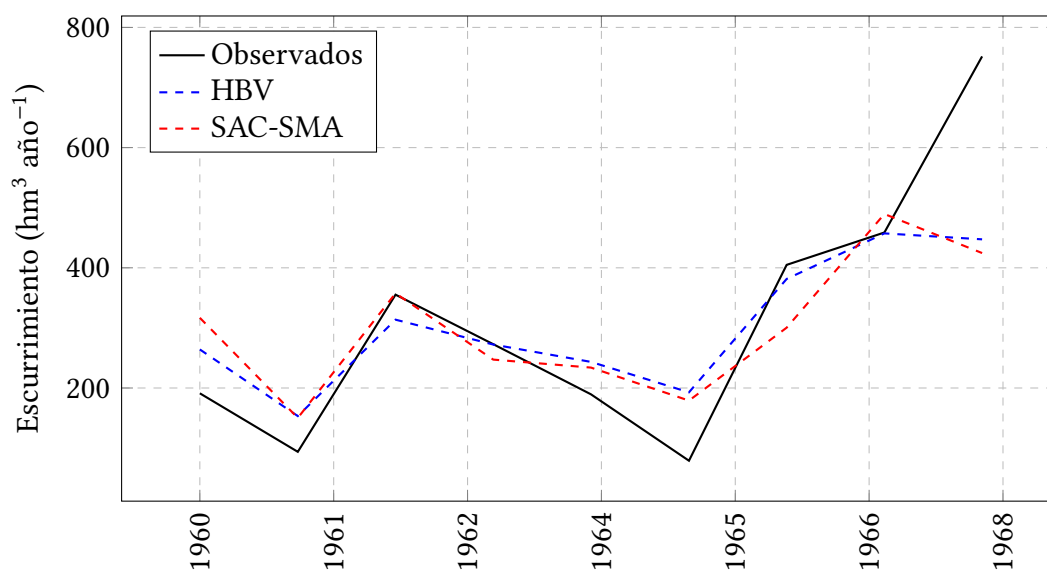


Figura A.12: Escurrencimientos anuales en la cuenca de la estación B18202.

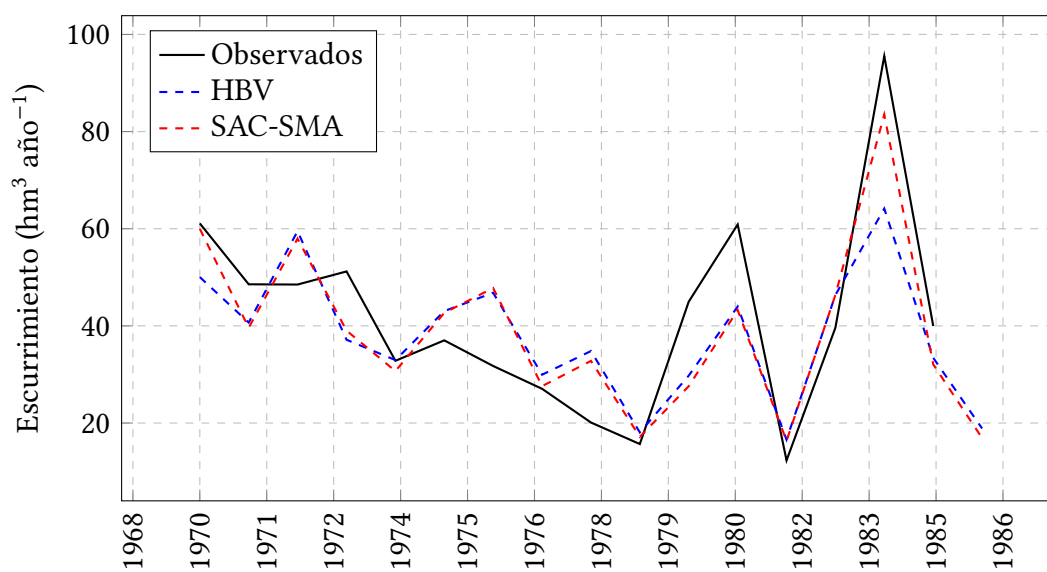


Figura A.13: Escurrencimientos anuales en la cuenca de la estación B18452.

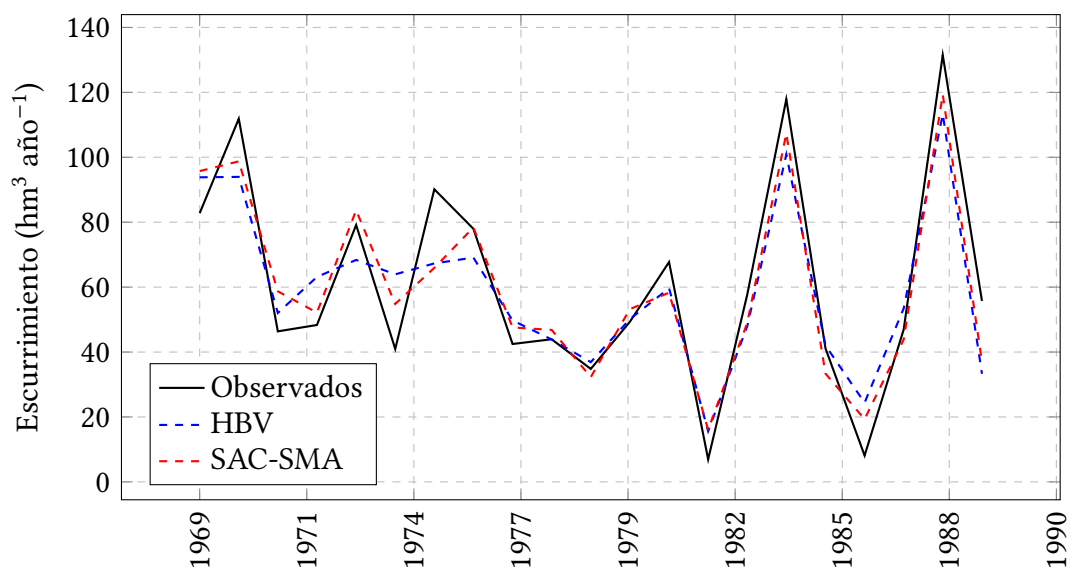


Figura A.14: Escurrencios anuales en la cuenca de la estación B18496.

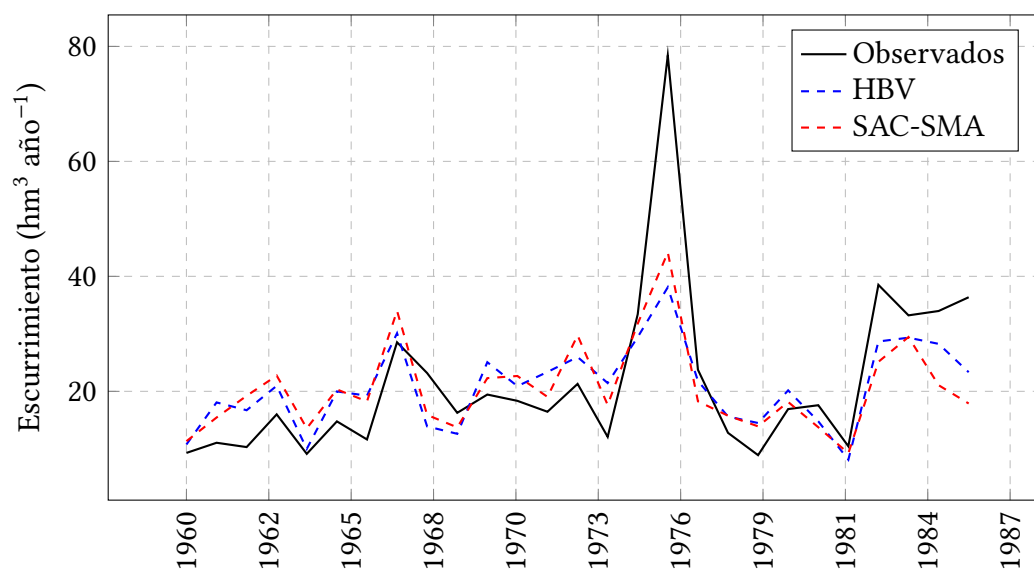


Figura A.15: Escurrencios anuales en la cuenca de la estación B18095.

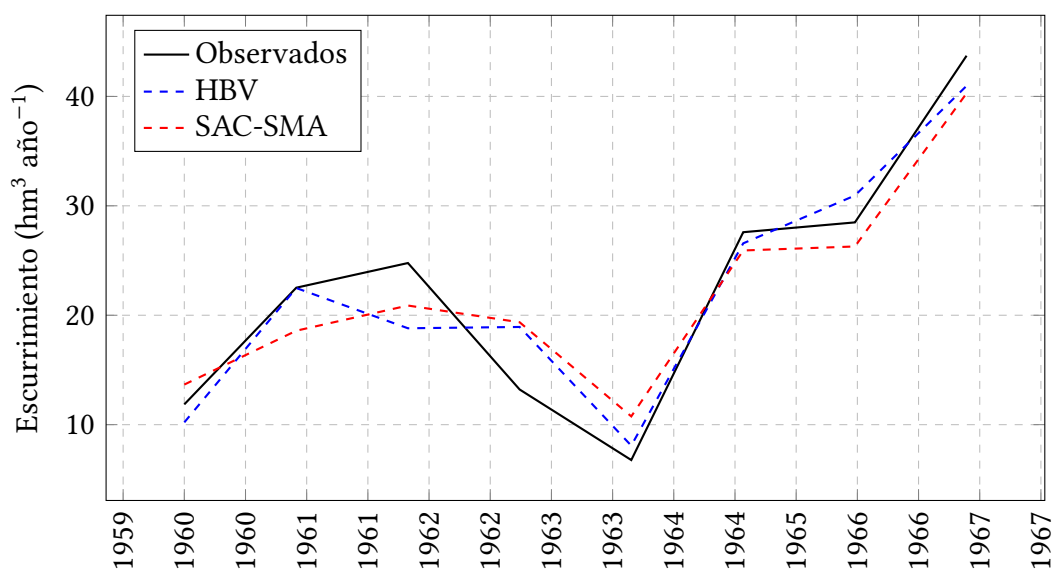


Figura A.16: Escurrencios anuales en la cuenca de la estación B18280.

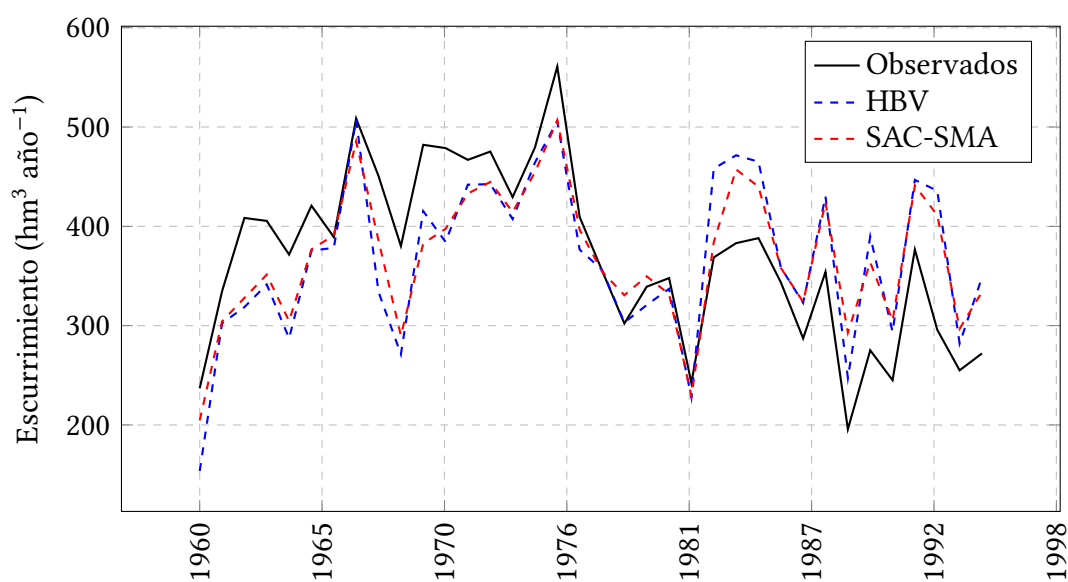


Figura A.17: Escurrencios anuales en la cuenca de la estación B18281.

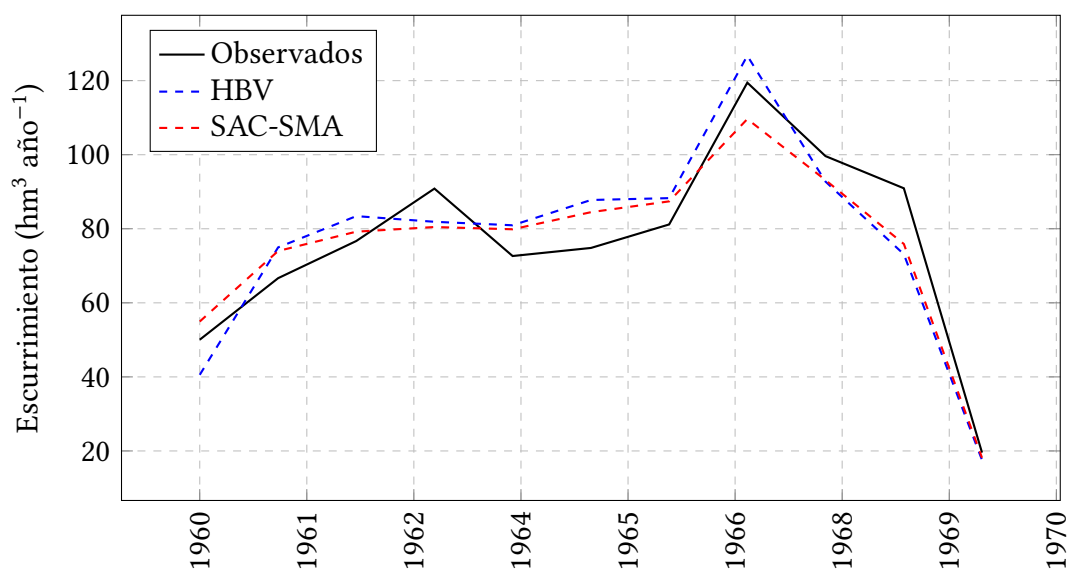


Figura A.18: Escorrentamientos anuales en la cuenca de la estación B18531.

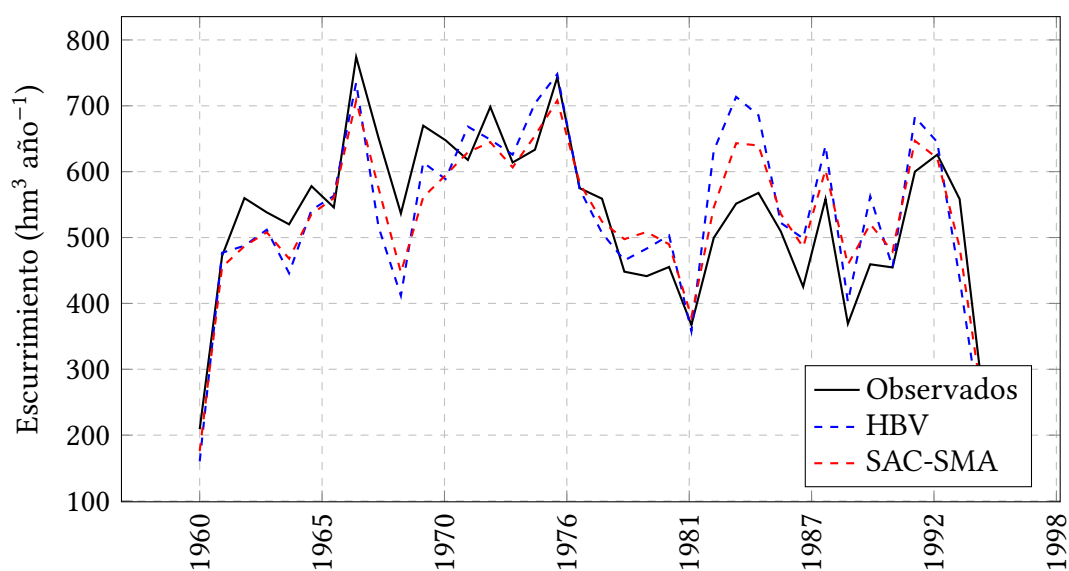


Figura A.19: Escorrentimientos anuales en la cuenca de la estación B18532.

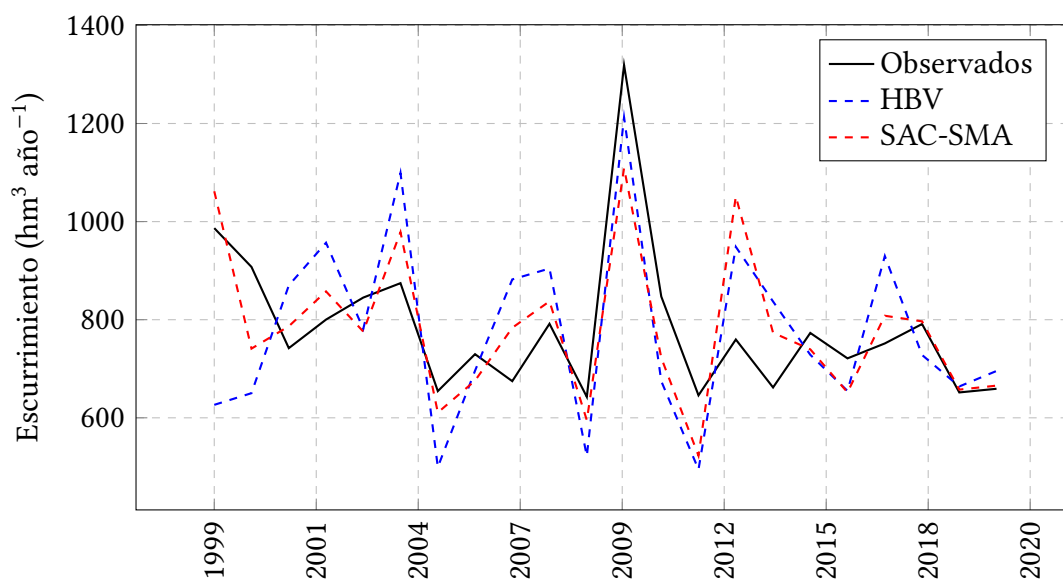


Figura A.20: Ecurrimientos anuales en la cuenca de la estación CHLMC.

A.0.3 Ecurrimientos medios mensuales

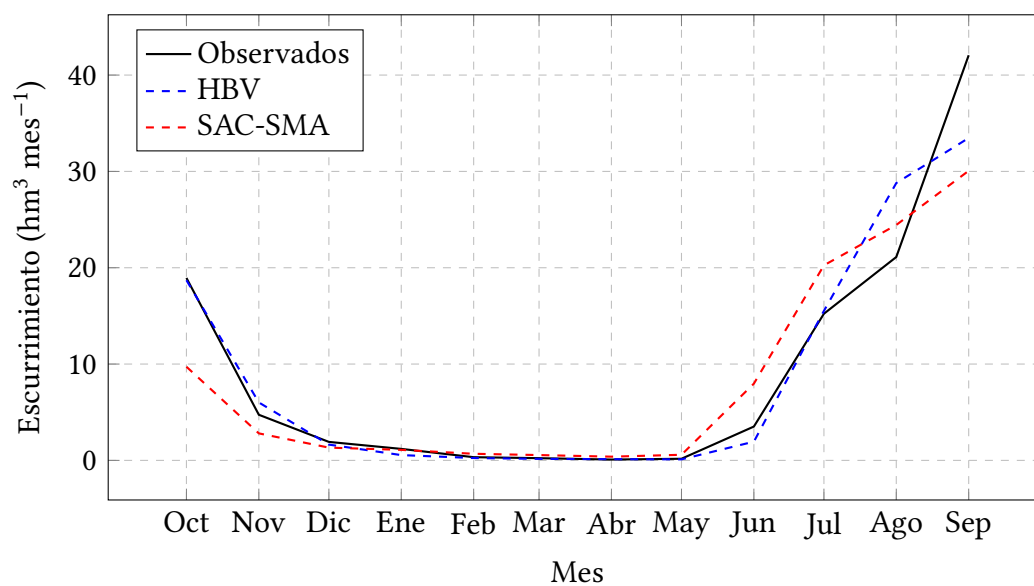


Figura A.21: Ecurrimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18201.

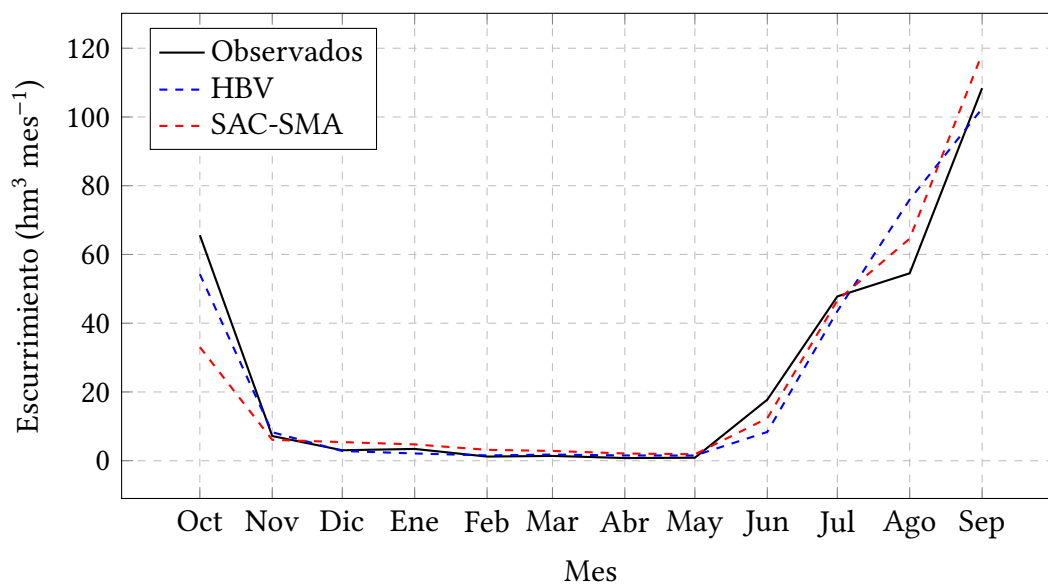


Figura A.22: Ecurrimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18202.

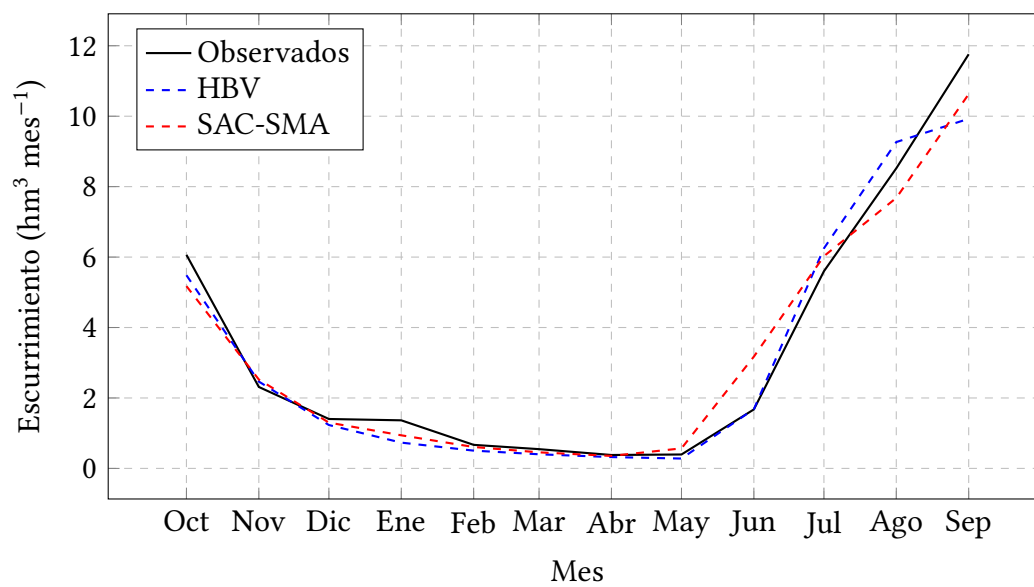


Figura A.23: Ecurrimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18452.

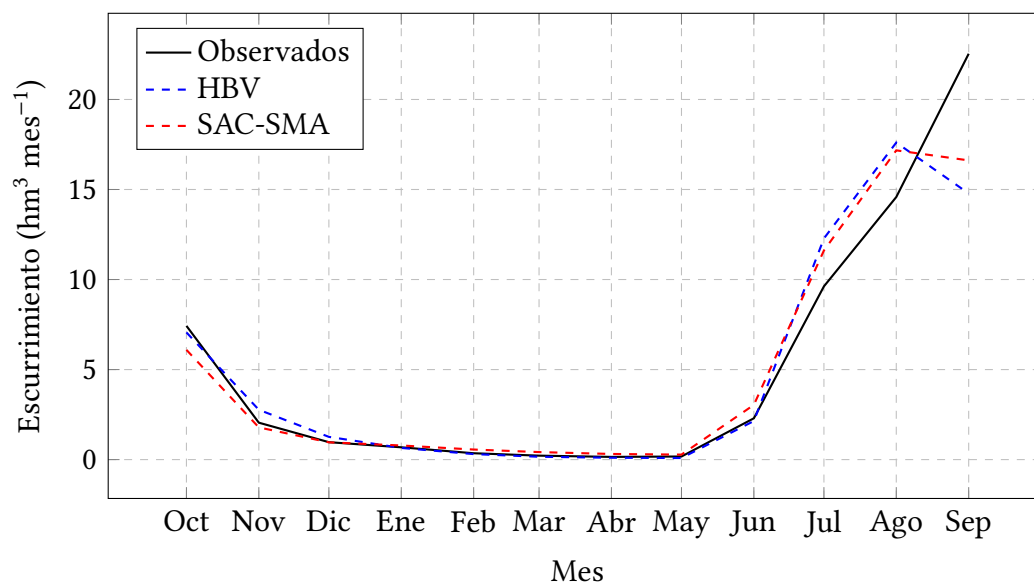


Figura A.24: Ecurrimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18496.

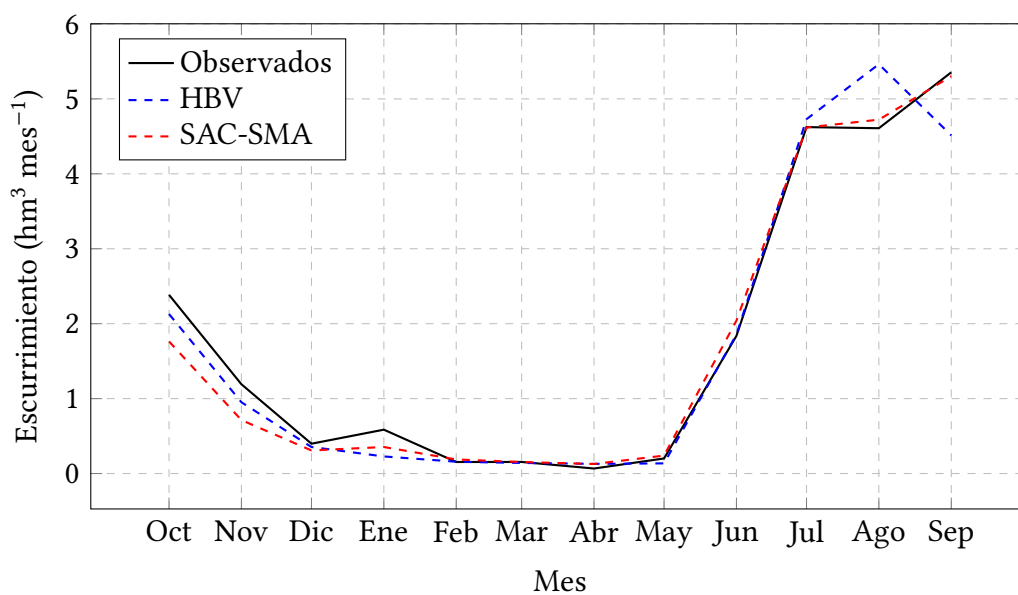


Figura A.25: Ecurrimientos medios mensuales en la cuenca de la estación B18095.

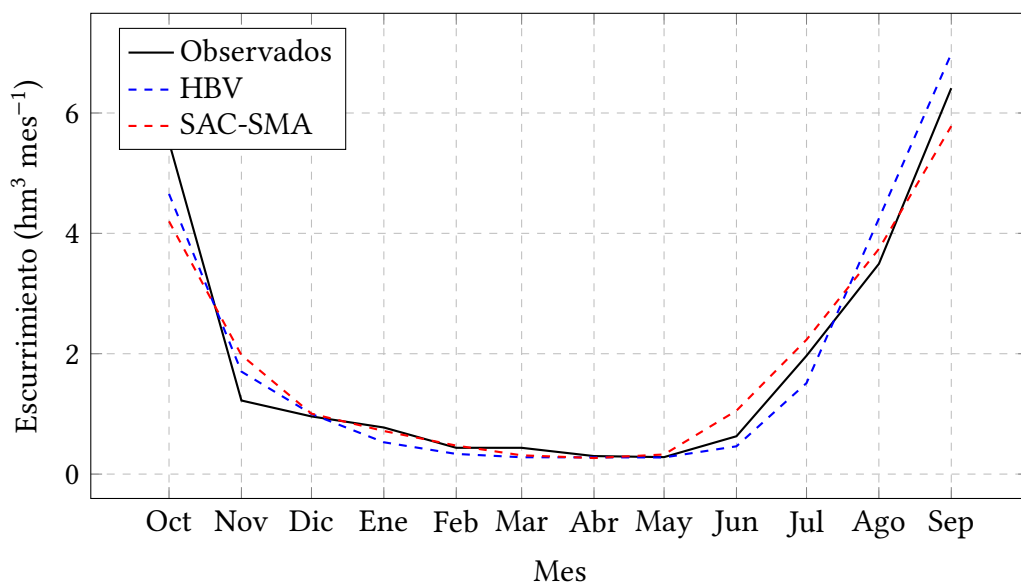


Figura A.26: Escurrencios medios mensuales en la cuenca de la estación B18280.

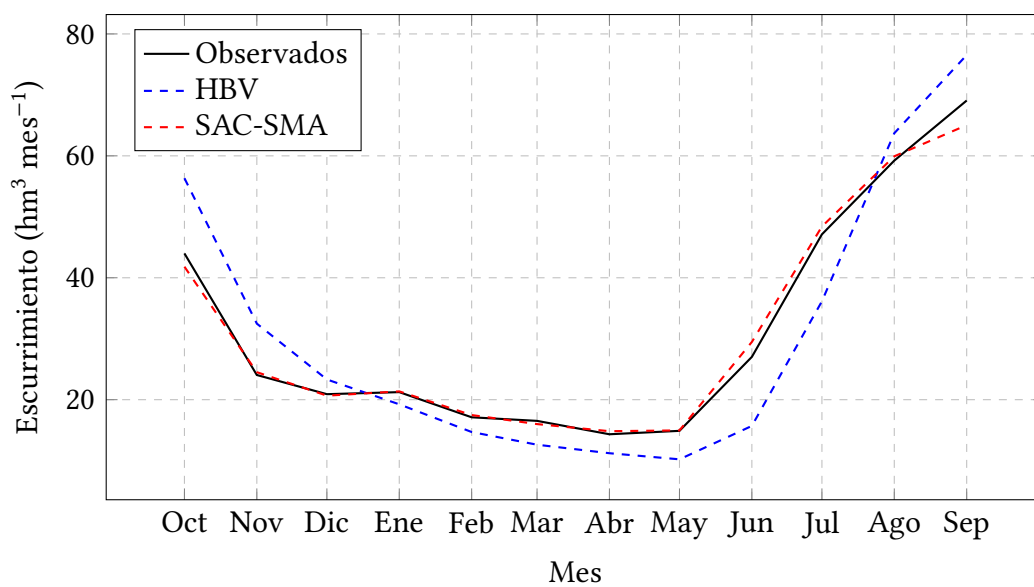


Figura A.27: Escurrencios medios mensuales en la cuenca de la estación B18281.

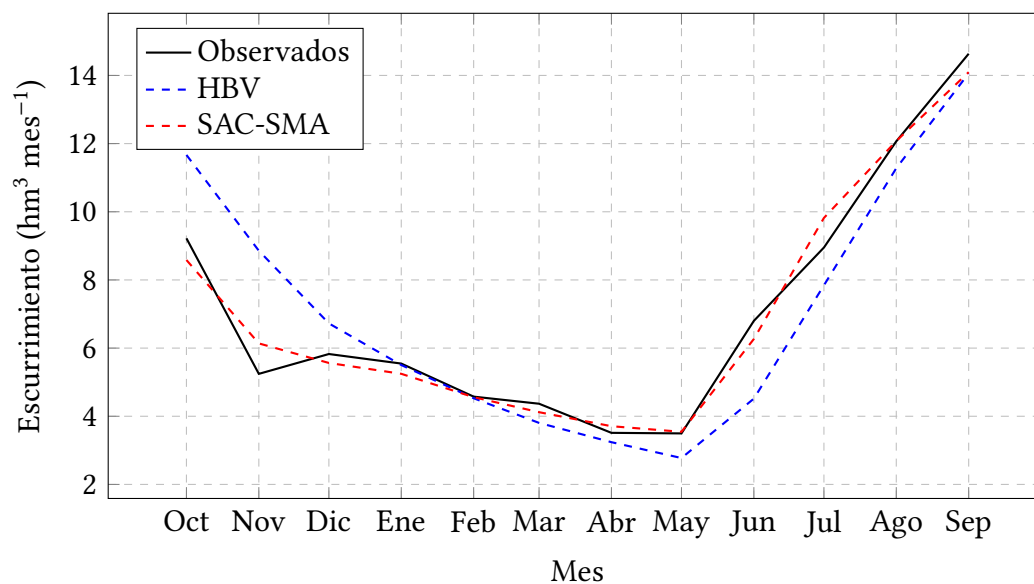


Figura A.28: Escurrencios medios mensuales en la cuenca de la estación B18531.

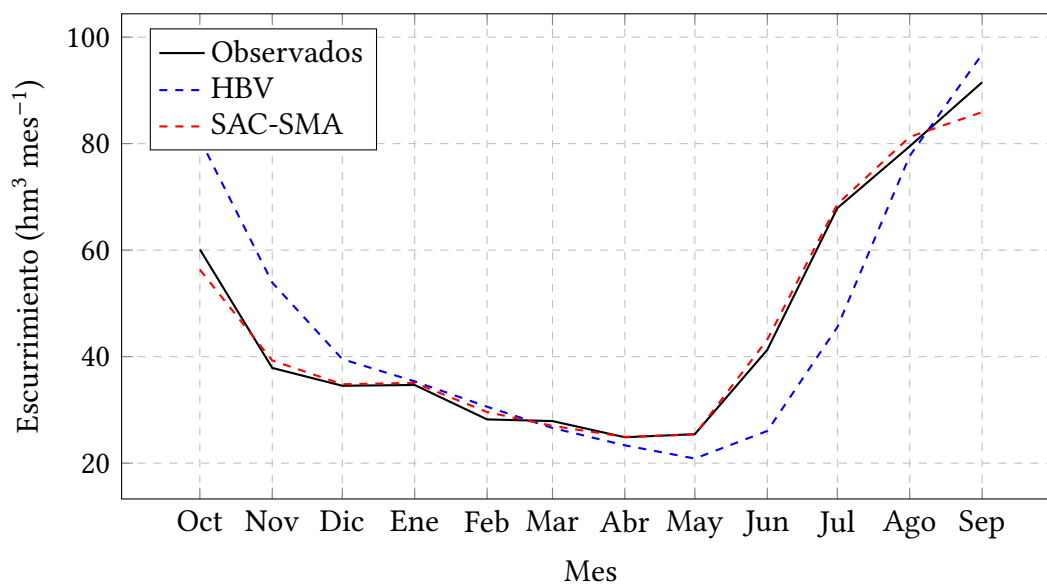


Figura A.29: Escurrencios medios mensuales en la cuenca de la estación B18532.

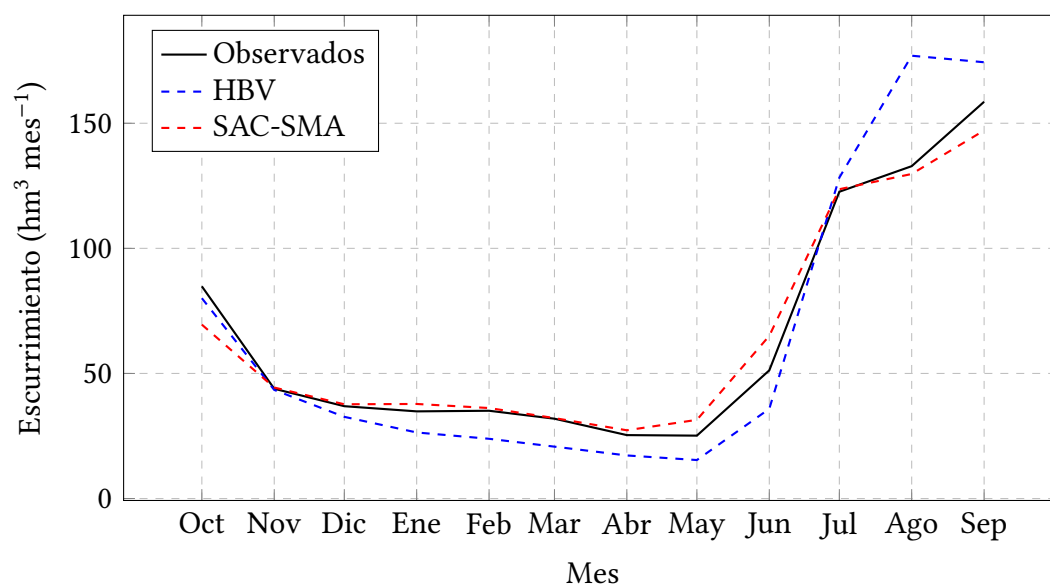


Figura A.30: Escorrentamientos medios mensuales en la cuenca de la estación CHLMC.

Discretización Espacial del Modelo Subterráneo

B.0.1 Ejemplos de mallas utilizadas

La definición de las celdas activas e inactivas se denotó por 1 y 0, respectivamente, tal como se muestra en la Figura [B.1](#).

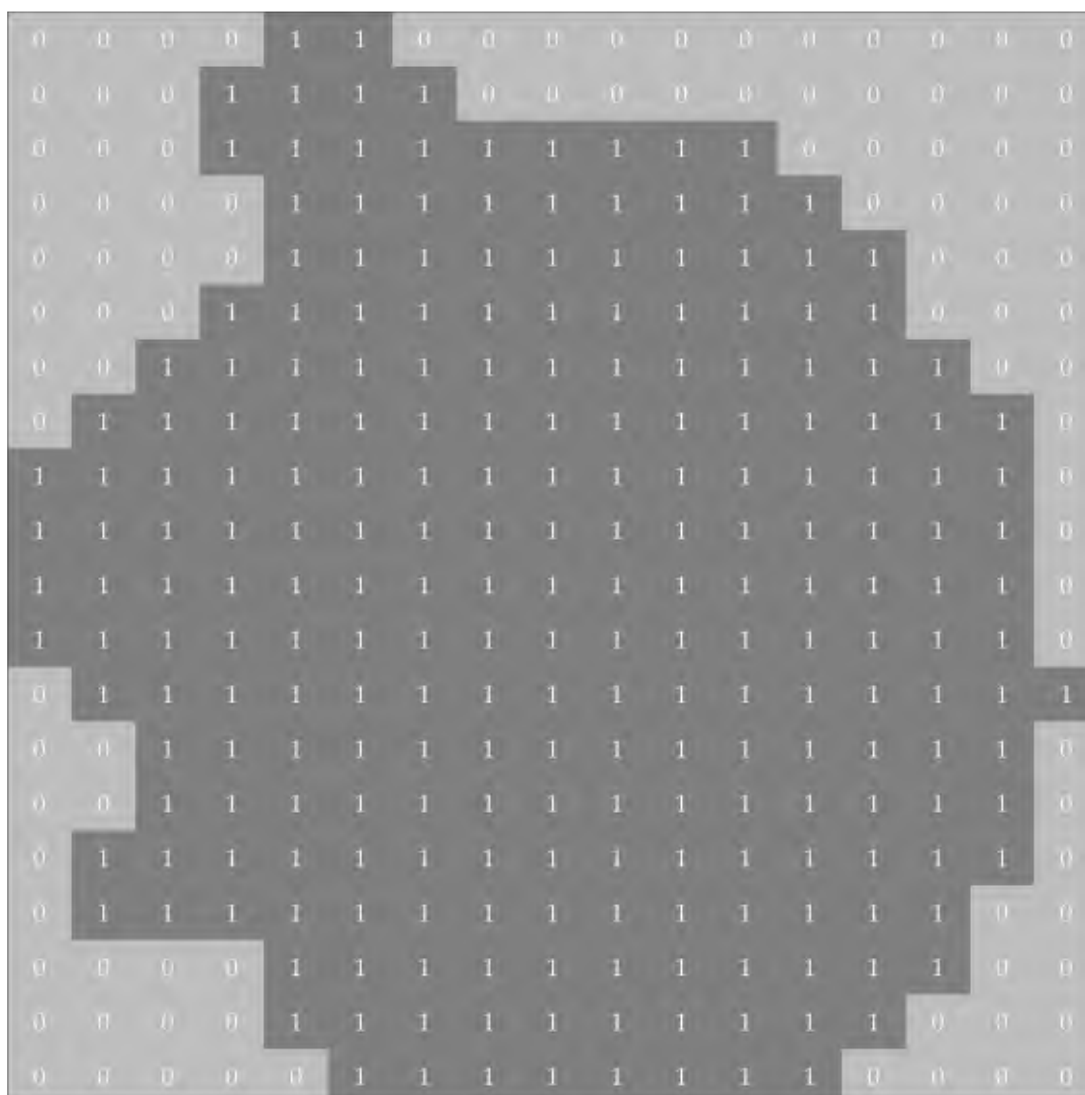


Figura B.1: Celdas activas e inactivas en la zona de estudio.

A partir del modelo digital de elevaciones de la zona de estudio, se asignaron las elevaciones a las celdas de la malla, como se muestra en la Figura B.2.

1868	2016	1983	1745	2058	2255	1897	1572	1512	1534	1591	1553	1712	1547	1559	1889	1891
2198	2167	2091	2131	1921	2093	1972	1843	1913	1581	1684	1781	1936	1593	1672	1711	1993
2106	1891	1940	2277	2504	1823	1640	1709	2093	1789	1908	2257	1983	2006	1831	1696	2044
1505	1503	1531	1799	2239	2007	1935	1758	1624	1751	1870	1964	2266	2277	1955	2096	1971
1763	1147	1292	1705	2093	1869	1820	2091	1821	1594	1785	1849	2429	2731	2591	2502	2254
1118	1634	1468	1668	1702	1912	1228	1355	2004	1563	1689	1615	2057	2377	2313	2247	2422
1262	1556	1597	1780	1352	1166	798	1127	1203	1241	1225	1736	1854	2289	2346	2209	2316
1303	1522	1549	1391	1249	1315	1129	1084	1100	1144	1198	1371	1756	2038	2239	2647	2263
1648	1350	1033	1638	1077	886	689	603	860	826	1291	1526	2179	2613	2621	2510	1947
1506	1252	1212	872	570	753	697	544	690	892	1273	1620	2348	3297	2949	2164	1793
2020	1735	1392	766	616	583	525	486	628	779	905	1337	1988	2247	1874	1629	1684
1897	1932	1333	985	729	534	478	446	508	777	736	1440	1745	1928	1861	1241	1083
1709	2396	1390	755	596	414	391	356	359	453	519	908	1355	1438	1531	936	776
1821	1696	1238	853	582	371	330	270	305	685	273	353	494	844	600	689	652
966	987	822	1070	493	381	316	283	240	249	225	226	272	379	397	468	502
534	1404	1228	831	869	540	331	267	293	270	211	210	220	423	293	354	366
1165	1646	1248	2087	1096	608	595	340	345	256	1006	249	200	195	246	268	265
1136	1471	1481	2030	1757	1293	441	546	1170	394	458	505	429	203	283	154	189
1396	1301	1484	2218	2343	1523	767	1135	702	1014	1284	675	680	445	286	360	164
1312	1000	1460	1389	2092	1912	1343	889	1193	1576	1446	1114	873	806	270	322	899

Figura B.2: Celdas de elevaciones de la superficie en la zona de estudio, en m.s.n.m.

Con los datos hidrogeológicos recopilados, se definieron las matrices del nivel estático inicial de simulación, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento (ver Figuras B.3, B.4 y B.5, respectivamente).

1693	1841	1808	1708	1883	1880	1860	1397	1337	1359	1416	1378	1537	1372	1384	1714	1716
2186	1992	2054	2056	1746	2056	1797	1768	1738	1406	1509	1706	1761	1518	1497	1536	1818
2094	1716	1765	2265	2429	1648	1565	1634	1918	1614	1733	1882	1608	1969	1756	1621	1969
1430	1428	1156	1787	2064	1995	1898	1583	1449	1714	1795	1952	1891	2102	1780	1921	1959
1388	1135	1217	1693	2081	1857	1783	2016	1746	1419	1610	1674	2054	2656	2216	2327	2079
1106	1597	1293	1656	1690	1737	1153	1318	1629	1388	1514	1440	2045	2340	2138	2072	1672
1187	1381	1422	1605	1277	991	786	1115	1191	1166	1188	1361	1779	2277	2334	2134	1941
1266	1447	1374	1216	1074	1303	379	1047	1063	1132	823	1296	1581	1863	2202	1897	1888
1473	1175	996	1463	1065	711	677	566	823	751	1216	1351	2142	2601	2609	2498	1772
1131	1240	1200	835	558	741	660	532	653	855	1098	1445	2336	2922	2774	1989	1718
1845	1560	1355	754	604	546	513	474	553	742	730	1300	1913	2172	1837	1617	1609
1860	1757	1321	810	692	359	303	271	333	402	661	1365	1570	1753	1786	1066	1046
1672	2221	1353	743	521	339	379	281	184	278	507	733	980	1263	1356	861	739
1809	1684	863	478	407	296	255	195	230	310	198	178	319	669	588	514	577
929	975	810	995	481	306	279	108	65	74	150	51	97	204	222	293	327
522	1392	853	656	694	365	319	230	281	258	174	35	45	248	118	179	191
1153	1471	1236	1712	1084	596	520	265	333	244	631	212	188	20	71	93	190
1124	1459	1444	2018	1745	1118	429	534	795	319	283	330	354	-172	-92	142	114
1321	1264	1472	2043	2168	1511	755	1060	690	1002	909	663	605	370	249	348	-11
1137	925	1285	1377	1717	1900	968	877	1181	1564	1271	1039	498	731	258	310	149

Figura B.3: Celdas del nivel estático inicial de simulación en la zona de estudio, en m.s.n.m.

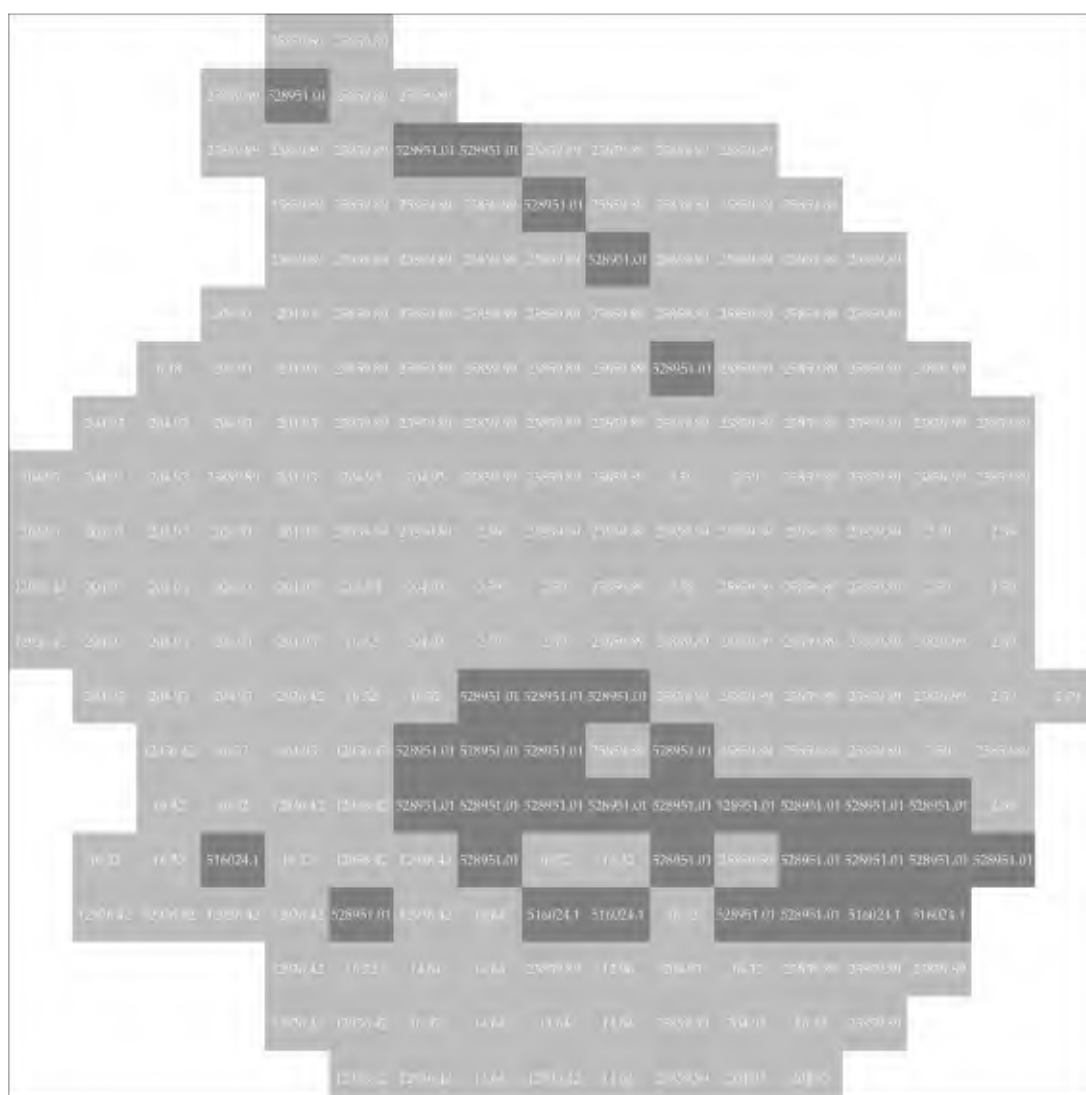


Figura B.4: Celdas de conductividades hidráulicas en la zona de estudio, en m mes^{-1} .

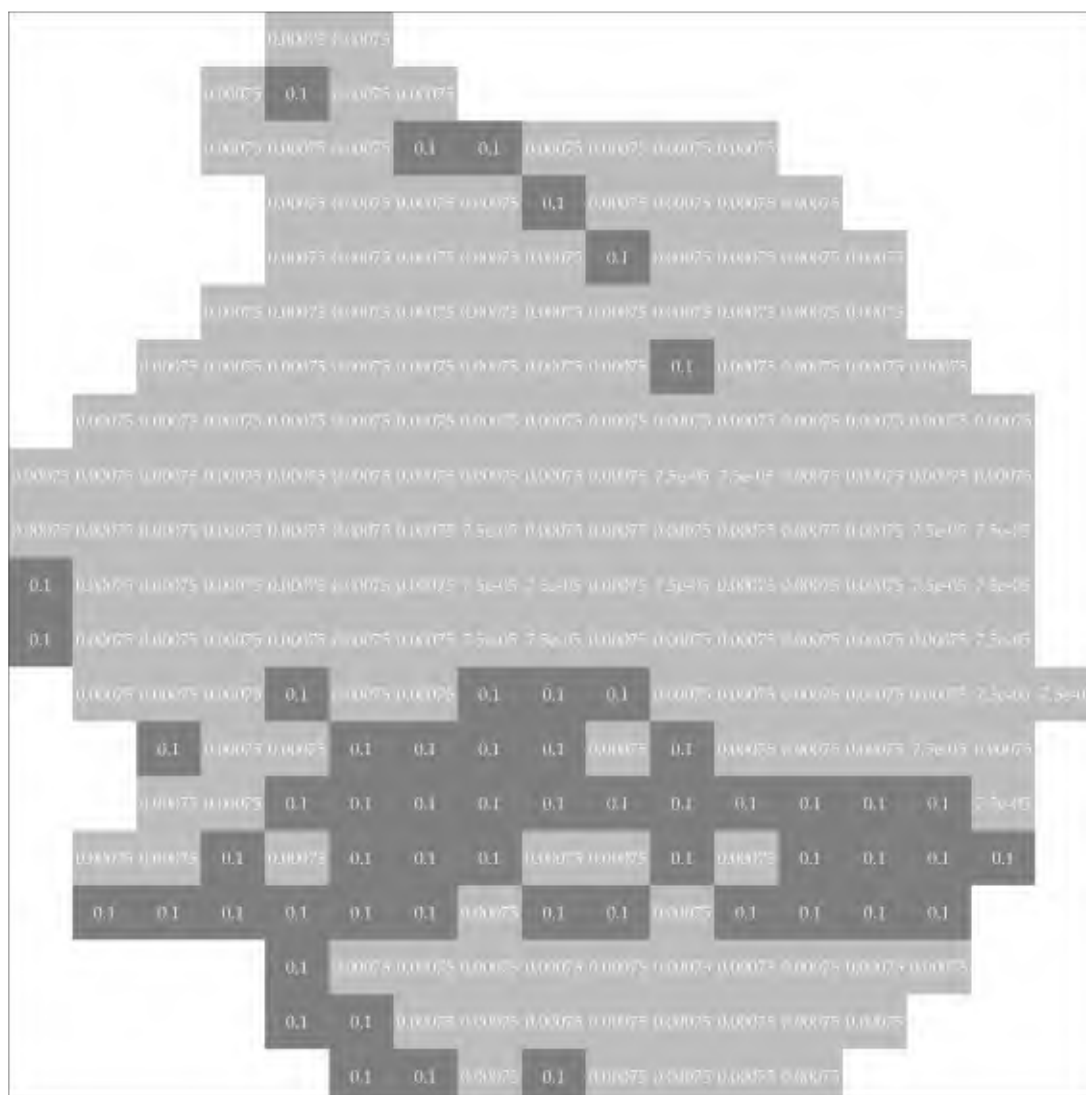
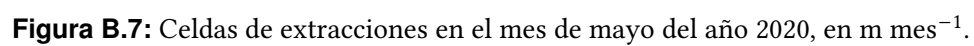


Figura B.5: Celdas de coeficientes de almacenamiento en la zona de estudio.

A partir de las series de infiltraciones y de los datos de extracciones, se definieron sus matrices correspondientes (ver Figuras B.6 y B.7).



Ulises Absalom Barajas Madrigal

Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Tepalcatepec ante Eventos de Sequía mediante la Aplicación ...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:592723464

Fecha de entrega

18 may 2026, 1:32 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

18 may 2026, 1:37 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Tepalcatepec ante Eventos de Sequía medi....pdf

Tamaño del archivo

28.1 MB

163 páginas

36.635 palabras

194.488 caracteres

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 11%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos	
Título del trabajo	GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC ANTE EVENTOS DE SEQUÍA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE MODELACIÓN CONJUNTA	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Ulises Absalom Barajas Madrigal	1595216D@umich.mx
Director	José Jaime Madrigal Barrera	jose.madrigal@umich.mx
Codirector	Giovanni Carlo Flores Fernández	giovanni.flores@umich.mx
Coordinador del programa	Sonia Tatiana Sánchez Quispe	quispe@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Si	Revisión de formato general de documento
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	Si	Imágenes de apoyo para diagramas metodológicos
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Ulises A
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, a 05 de mayo de 2026