



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE BIOLOGÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE ÍNDICES DE ALTERACIÓN
HIDROLÓGICA PARA DETERMINAR CAUDALES ECOLÓGICOS EN LA
CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO**

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

ING. JOSÉ GUADALUPE GARCÍA CONTRERAS

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

CODIRECTOR:

DR. JESÚS PARDO LOAIZA





*“Nunca reconoceremos el valor del agua
hasta que el pozo esté seco.”*

-Thomas Fuller.

Agradecimientos

A mi madre y padre, a pesar de no estar físicamente, sé que me guían y me cuidan siempre, los quiero y los extraño. Seguiré esforzándome por hacerlos sentir orgullosos.

A mi familia, por estar al tanto de mí en momentos difíciles y apoyarme en mis decisiones; y a los que ya no están, Pepe, Carmela, gracias por todo.

A la Dra. Sonia, por su paciencia y comprensión; sus conocimientos y consejos; por todo el apoyo desde que ingresé al Departamento de Hidráulica. Ha sido pieza clave para mi desarrollo académico y profesional. Gracias por ser una mentora excepcional.

Al Dr. Jesús Pardo y al Dr. Abel Solera, por sus aportes en esta investigación, por compartir sus conocimientos conmigo y por todo su apoyo durante mi estancia en la UPV.

A mis sinodales, por sus consejos y comentarios para lograr la culminación de este trabajo.

A mis amigos, desde los más viejos hasta los que conocí durante mi estancia, han hecho más llevadero el proceso y mi camino en esta vida, gracias por apoyarme, escucharme y aconsejarme.

A la gente que me tendió una mano, me dio ánimos, que confió en mí...

A la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental de la UMSNH, por brindarme todos los conocimientos necesarios durante mi etapa de posgrado, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico para la realización de mis estudios de posgrado.



Resumen

La implementación de caudales ecológicos en un Sistema de Recursos Hídricos es una propuesta para disminuir la alteración hidrológica provocada por efectos antrópicos. Esta propuesta se puede evaluar mediante la obtención de índices de alteración hidrológica los cuales son calculados a partir de una comparativa de un régimen de referencia y un régimen de análisis. Para el presente caso de estudio, se realizará la evaluación de la alteración hidrológica de la Cuenca de Lago de Cuitzeo en condiciones actuales y en un escenario donde sea implementado un caudal ecológico obtenido con base en la NMX-AA-159-SCFI-2012 comparándolos con el régimen natural de caudales. Para esto se desarrollará un modelo de hidrología superficial en el cual se obtendrán los escurrimientos de la cuenca, un modelo hidrológico subterráneo para conocer el comportamiento geohidrológico del acuífero y un modelo de gestión de los recursos hídricos para obtener los caudales en los principales afluentes de la cuenca para el régimen natural, el régimen alterado y con la implementación de un caudal ecológico, siendo factor clave la escala temporal diaria ya que esta proporciona información relevante para los índices que en escalas superiores (semanal, mensual, anual) se pierde y limita la aplicación de las metodologías para la evaluación de la alteración hidrológica. La finalidad de este trabajo es evaluar posibles reglas de gestión enfocadas a la sustentabilidad ambiental y la garantía de las demandas consuntivas.

Palabras clave: Cuenca, alteración hidrológica, modelo de gestión, índices de alteración hidrológica, caudal ecológico.



Abstract

The implementation of ecological flows in a Water Resources System is a proposal to reduce the hydrological alteration caused by anthropic effects. This proposal can be evaluated by obtaining hydrological alteration indexes which are calculated from a comparison of a reference regime and an analysis regime. For this case study, the hydrological alteration of the Cuitzeo Lake Basin will be evaluated under current conditions and in a scenario where an ecological flow obtained based on NMX-AA-159-SCFI-2012 is implemented, comparing them with the natural flow regime. For this purpose, a surface hydrology model will be developed to obtain the runoff of the basin, a subway hydrological model to determine the geohydrological behavior of the aquifer, and a water resource management model to obtain the flows in the main tributaries of the basin for the natural regime, the altered regime and with the implementation of an ecological flow, being the daily time scale a key factor since it provides relevant information for the indexes that in higher scales (weekly, monthly, annual) is lost and limits the application of the methodologies for the evaluation of the hydrological alteration. The purpose of this work is to evaluate possible management rules focused on environmental sustainability and the guarantee of consumptive demands.

Key words: watershed, hydrologic alteration, management model, hydrologic alteration indexes, ecological flow.



Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3	HIPÓTESIS	4
1.4	JUSTIFICACIÓN	5
2.	MARCO TEÓRICO	8
2.1	Gestión de los Recursos Hídricos en México	8
2.2	Presiones Hídricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo	10
2.3	Índices de Alteración Hidrológica	12
2.4	Caudales Ecológicos en México.....	17
2.5	Modelos matemáticos en la hidrología	20
2.5.1	Modelos hidrológicos superficiales.....	21
2.5.2	Modelo hidrológico superficial seleccionado	22
2.6	Modelos Hidrológicos subterráneos	29
2.6.1	Acuífero Depósito.....	30
2.6.2	Acuífero Unicelular	30
2.6.3	Acuífero con manantial.....	31
2.6.4	Acuífero pluricelular.....	32
2.6.5	Acuífero conectado con río con modelación con el método de los autovalores. 35	
2.7	Modelo Hidrológico Subterráneo elegido.....	37
2.8	Modelo de Gestión	38
2.9	ANTECEDENTES	40
3.	METODOLOGÍA.....	44
3.1	Caracterización de la zona de estudio.....	45



3.2	Recopilación de datos	45
3.2.1	Información Hidrométrica	45
3.2.2	Información climatológica	46
3.2.3	Manejo de los Recursos Hídricos	46
3.3	Análisis y validación de la información climatológica e hidrométrica 46	
3.4	Desarrollo de los modelos matemáticos.....	47
3.4.1	Modelo hidrológico superficial	47
3.4.2	Modelo hidrológico subterráneo	47
3.4.3	Modelo de Gestión	48
3.5	Evaluación de los Índices de Alteración Hidrológica	48
3.5.1	Índice de Alteración Hidrológica Global.....	55
3.6	Determinación de Caudales Ecológicos	56
4.	Aplicación al caso de estudio	57
4.1	Caracterización de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	57
4.2	Caracterización del Acuífero 1602 Morelia-Queréndaro	62
4.2.1	Localización.....	62
4.2.2	Situación administrativa del acuífero	63
4.2.3	Estudios hechos con anterioridad	65
4.2.4	Fisiografía.....	65
4.2.5	Clima	65
4.2.6	Hidrografía.....	65
4.2.7	Geomorfología.....	66
4.2.8	Hidrogeología.....	72
4.2.9	Comportamiento hidráulico.....	73



5.	Resultados.....	75
5.1	Información Hidrométrica	75
5.2	Información Climatológica	80
5.2.1	Análisis y validación de la información climatológica	84
5.2.2	Llenado de datos faltantes	88
5.3	Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)	89
5.4	Calibración de los MPE	90
5.5	Resultados de los MPE de las subcuencas.....	91
5.5.1	Subcuenca de Tarímbaro	92
5.5.2	Subcuenca Queréndaro	94
5.5.3	Subcuenca Santiago Undameo	97
5.5.4	Resumen de resultados de los MPE de las subcuencas.....	100
5.6	MPE de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	101
5.6.1	Asignación de parámetros del modelo HBV mediante análisis multivariante (AMV).....	101
5.6.2	Obtención de los escurrimientos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo para el periodo 1985-2020.	108
5.6.3	Usos consuntivos del agua en el Acuífero Morelia-Queréndaro 116	
5.7	Modelación del acuífero con AQUIVAL.	119
5.7.1	Geometría y condiciones de contorno del acuífero	119
5.7.2	Acciones elementales.....	122
5.7.3	Parámetros de control	127
5.7.4	Estado inicial del acuífero y simulación con AQUIVAL.....	129
5.7.5	Calibración del modelo subterráneo.....	132
5.7.6	Resultados del modelo	133



5.8	Modelación de la Gestión mediante SIMGES	137
5.8.1	Elementos que considera el modelo SIMGES.....	138
5.8.2	Módulo Aqt-Sim.....	140
5.8.3	Desarrollo de la topología de la Cuenca del Lago de Cuitzeo	140
5.8.4	Calibración del modelo SIMGES	144
5.8.5	Resultados del modelo de Gestión.....	145
5.8.6	Restitución a Régimen Natural.....	151
5.9	Modelo diario.....	152
5.9.1	Resultados modelo diario	154
5.10	Cálculo de los Índices de Alteración Hidrológica.....	158
5.10.1	Índices de Alteración Hidrológica por tramos de río.	159
5.11	Determinación de caudales ecológicos mediante la NMX-AA-159-SCFI-2012	166
5.11.1	Datos para determinar caudales en una cuenca.	169
5.11.2	Métodos propuestos por la NMX-AA-159-SCFI-2012	170
5.11.3	Resultados de la determinación de caudales ecológicos mediante la norma	173
5.12	Evaluación de la Alteración Hidrológica con la implementación de un caudal ecológico.....	182
5.12.2	Implementación de caudal ecológico en el Río Grande de Morelia	183
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	188
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	192
8.	ANEXOS.....	197



Índice de figuras

Figura 1. Distribución de la precipitación pluvial en México.....	9
Figura 2. Esquema de los parámetros IAH. Fuente: Ortín León, 2017.	13
Figura 3. Esquema general del modelo HBV. Fuente: Paredes Arquiola et al., 2017.	23
Figura 4. Relación entre la humedad del suelo (eje horizontal) y el coeficiente de filtración con distintos valores de β . Fuente: Paredes Arquiola et al., 2017. ...	25
Figura 5. Relación entre ETr y PWP. Fuente: Paredes Arquiola et al., 2017.	26
Figura 6. Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto de investigación.....	44
Figura 7. Zona de estudio: Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	57
Figura 8. Municipios de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	59
Figura 9. Ubicación Región Hidrológica de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	59
Figura 10. Tipos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	60
Figura 11. Usos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. ...	61
Figura 12. Red Hídrica de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	62
Figura 13. Localización del acuífero Morelia-Queréndaro	63
Figura 14. Geología del acuífero Morelia-Queréndaro.	67
Figura 15. Profundidad al nivel estático (m), 2007. Fuente: CONAGUA, 2022.	73
Figura 16. Elevaciones de nivel estático (msnm), 2007 y red de flujo subterráneo Fuente: CONAGUA,2022.	74
Figura 17. Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. ..	75
Figura 18. Escurrimientos anuales de la EH-12347.....	78
Figura 19. Límites de Anderson de la EH1234.	78
Figura 20. Propuesta de subcuencas para la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	79
Figura 21. Buffer a 20 Km de la Cuenca del Lago de Cuitzeo para la preselección de estaciones climatológicas.....	82



Figura 22. Estaciones preseleccionadas para la zona de estudio.	84
Figura 23. Estaciones válidas para el desarrollo del MPE de la cuenca.....	86
Figura 24. Gráfico para determinar número mínimo de estaciones climatológicas en función del área de la cuenca. Fuente: Aparicio, 1997.	87
Figura 25. Polígonos de Thiessen de las estaciones principales de la Cuenca.	87
Figura 26. Subcuenca Tarímbaro y las estaciones climatológicas con influencia sobre su superficie.	92
Figura 27. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.....	93
Figura 28. Series mensuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.....	93
Figura 29. Series anuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.....	94
Figura 30. Año medio de calibración del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.	94
Figura 31. Subcuenca de Queréndaro y estaciones con influencia sobre su superficie.....	95
Figura 32. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.	96
Figura 33. Series mensuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.	96
Figura 34. Series anuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.	97
Figura 35. Año medio de calibración del MPE de la subcuenca de Queréndaro.	97
Figura 36. Subcuenca de Santiago Undameo y estaciones con influencia sobre su superficie.	98
Figura 37. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.	99



Figura 38. Series mensuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.	99
Figura 39. Series anuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Santiago Undameo.....	100
Figura 40. Año medio de calibración del MPE de la subcuenca de Santiago Undameo.....	100
Figura 41. Año medio de validación del MPE de la subcuenca de Santiago Undameo.....	100
Figura 42. Gráfico de dispersión y de vectores propios de la matriz depurada en componente 1 y 2.....	104
Figura 43. Valores de los vectores propios, variación explicada acumulada y valores de los vectores por componentes obtenidos en JMP.	104
Figura 44. Valores atípicos de la matriz informativa obtenidos mediante distancias de Mahalanobis.	105
Figura 45. Dendrograma por el método de las medias.....	106
Figura 46. Gráfico canónico en función de las subcuencas.....	107
Figura 47. Gráfico canónico en función de los grupos realizados por el Método de las Medias.	107
Figura 48. Valores de la correlación canónica y resultados de las pruebas para verificar la agrupación del dendrograma obtenidos en JMP.....	107
Figura 49. Mapa de agrupación de las subcuencas para asignación de parámetros HBV.....	108
Figura 50. Esgurrimientos a escala diaria de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	110
Figura 51. Esgurrimientos a escala mensual de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	110
Figura 52. Año medio de la serie histórica 1985-2015 de la zona de estudio.	111
Figura 53. Análisis de los esgurrimientos anuales de la cuenca del Lago de Cuitzeo de 1985 a 2015.	112



Figura 54. Análisis de años húmedos y años secos para los escurrimientos de 1985-2020 para la zona de estudio.	113
Figura 55. Porcentajes del balance hídrico para la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Periodo 1985-2020.....	114
Figura 56. Niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro en 2008. ...	115
Figura 57. Niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro en 20017.	115
Figura 58. Niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro en 2022. ...	116
Figura 59. Extracción de aguas nacionales en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPDA, 2022).....	117
Figura 60. Extracción de aguas superficiales en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPDA, 2022).....	118
Figura 61. Extracción de aguas subterráneas en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPDA, 2022).....	118
Figura 62. Malla propuesta para modelar el acuífero Morelia-Queréndaro.	120
Figura 63. Malla discretizada propuesta en función de la geología del acuífero Morelia-Queréndaro.	121
Figura 64. Matriz de valores de la transmisividad en X y en Y para el modelo AQUIVAL.....	122
Figura 65. Matriz de valores del coeficiente de almacenamiento para el modelo AQUIVAL.	122
Figura 66. Ejemplo de matriz ingresada a AQUIVAL correspondiente a la demanda agrícola de Cuitzeo.....	124
Figura 67. Mapa de las Demandas Consuntivas en el Acuífero Morelia Queréndaro, 2022.	125
Figura 68. Localización del censo de aprovechamientos. Fuente: CONAGUA, 2007.	127
Figura 69. Malla con la ubicación de los pozos que contienen información piezométrica de los niveles estáticos del acuífero.....	129
Figura 70. Puntos de apoyo para generar ráster de niveles estáticos en 2007.	131



Figura 71. Curvas de N. E. para el año 2007 obtenidas en SIG.....	131
Figura 72. Matriz con datos de alturas iniciales para ingresar a AQUIVAL.	132
Figura 73. Matriz de datos de Transmisividad en X y en Y.....	133
Figura 74. Matriz de datos de Coeficiente de Almacenamiento.....	134
Figura 75. Comparativa N.E. Simulado vs. N.E. Observado para pozo CNA- 02-036-080.....	134
Figura 76. Comparativa N.E. Simulado vs. N.E. Observado para pozo CNA- 02-020-129.....	135
Figura 77. Salidas al Lago de Cuitzeo por el acuífero en el periodo 2007- 2022.	136
Figura 78. Mapa de direcciones de flujo del acuífero Morelia-Queréndaro para 2022.	137
Figura 79. Topología del modelo de gestión de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	142
Figura 80. Volúmenes históricos y simulados de la Presa de Cointzio.	145
Figura 81. Año medio de los volúmenes simulados e históricos de la Presa Cointzio.	145
Figura 82. Datos anuales simulados e históricos de la Presa Cointzio.....	146
Figura 83. Volúmenes históricos y simulados de la Presa Malpais.	146
Figura 84. Año medio de los volúmenes simulados e históricos de la Presa Malpais.....	147
Figura 85. Datos anuales simulados e históricos de la Presa Malpais.	147
Figura 86. Caudal simulado de entrada al lago.	148
Figura 87. Volúmenes simulados del lago.	148
Figura 88. Infiltración simulada del lago.....	148
Figura 89. Evaporación simulada del lago.....	149
Figura 90. Media mensual del volumen del lago a partir del registro histórico 1985-2020.	149
Figura 91. Media mensual del caudal de entrada del lago a partir del registro histórico 1985-2020.....	150



Figura 92. Media mensual de la evaporación del lago a partir del registro histórico 1985-2020.....	150
Figura 93. Media mensual de la infiltración del lago a partir del registro histórico 1985-2020.....	150
Figura 94. Comparativa de caudal de entrada. Régimen Alterado VS. Régimen Natural.	151
Figura 95. Comparativa de volúmenes. Régimen Alterado VS. Régimen Natural.....	152
Figura 96. Modelo diario en la interface de GeoAquatool Aqt-Sim.	153
Figura 97. Comparativa entre los resultados de los modelos obtenidos por Aquatool-SIMGES y GeoAquatool_Aqt-Sim.....	154
Figura 98. Ubicación del tramo de análisis en el esquema de SIMGES...	154
Figura 99. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo mensual de los volúmenes del Lago de Cuitzeo.	155
Figura 100. Comparativa de escurrimientos observados vs. escurrimientos simulados en el modelo diario.	155
Figura 101. Comparativa R.A. vs R.N. en escala diaria para tramo del Río Grande. Serie 2010-2015.....	156
Figura 102. Comparativa R.A. vs R.N. en escala mensual para tramo del Río Grande. Serie 2010-2015.....	156
Figura 103. Comparativa R.A. vs R.N. en escala diaria. Tramo del Río Grande. Año 2019.....	157
Figura 104. Comparativa R.A. vs R.N. en escala diaria. Tramo del Río Grande. Año 2019.....	157
Figura 105. Tramos elegidos para calcular los IAH en escala mensual. ..	158
Figura 106. Valores de los iah por grupo para cada tramo de río.....	162
Figura 107. Índices de Alteración Hidrológica por grupo para cada tramo de río.	163
Figura 108. Alteración Hidrológica por grupo IAH en la Cuenca.....	164
Figura 109. Rangos de Alteración Hidrológica para cada tramo de río y la cuenca.....	165



Figura 110. Matriz de objetivos ambientales. Fuente: NMX-AA-159-SCFI-2012	171
Figura 111. Serie considera a Régimen Hidrológico Natural de la EH-12347-SU.	174
Figura 112. Serie considera a Régimen Hidrológico Alterado o Actual de la EH-12347-SU.	175
Figura 113. RHN VS RHA. Serie de aportación media mensual.	177
Figura 114. RHN VS RHA. Serie de aportación anual.	177
Figura 115. Cálculo de años secos y húmedos de la EH-12347-SU.	178
Figura 116. Caudales Ecológicos conforme al objetivo de conservación moderado para año más seco.	181
Figura 117. Comparativa de los escurrimientos embalsados vs. salidas de la Presa Malpais de 1998 a 2020.	183
Figura 118. Índices de Alteración Hidrológica por grupo para cada tramo de río con la implementación de caudal ecológico.	185
Figura 119. Valores de IAH globales por tramo de río con la implementación de caudales ecológicos.	186
Figura 120. Comparativa de volúmenes en el Lago de Cuitzeo implementando caudal ecológico vs. sin caudal ecológico.	187
<i>Figura 121. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 1 y 2.</i>	<i>202</i>
<i>Figura 122. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 3 y 4.</i>	<i>203</i>
<i>Figura 123. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 5 y 6.</i>	<i>203</i>
<i>Figura 124. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 7 y 8.</i>	<i>204</i>
<i>Figura 125. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 9 y 10.</i>	<i>204</i>
<i>Figura 126. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 11 y 12.</i>	<i>205</i>
Figura 127. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 13 y 14	205
Figura 128. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Primer tramo de río aguas abajo de la Presa Cointzio. Río Grande. ...	206
Figura 129. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río aguas abajo después de las tomas del Módulo de Riego 01. Río Grande.	206



Figura 130. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río que antecede al Lago de Cuitzeo. Río Grande.	206
Figura 131. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río enseguida aguas debajo de la Presa Malpais. Río Queréndaro.	207
Figura 132. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río antes de la confluencia con Río Grande. Río Queréndaro.	207

Índice de Tablas

Tabla 1. Relación de parámetros para la caracterización del régimen de caudales.	14
Tabla 2. Agrupación de indicadores de alteración hidrológica propuesta por Monico et al., 2022.	15
Tabla 3. Índices de Alteración Hidrológica considerados por Monico et al., 2022.	16
Tabla 4. Rangos de alteración hidrológica propuestos por Monico et al., 2022.	16
Tabla 5. Funciones principales que presta el agua como servicio ambiental.	17
Tabla 6. Comparación de metodologías de los Caudales Ecológicos.	20
Tabla 7. Parámetros del modelo HBV. Descripción y rangos.	28
Tabla 8. Resumen de los parámetros estadísticos de los iah y sus influencias en el ecosistema ((Richter et al., 1996)).	51
Tabla 9. Clasificación de indicadores de alteración hidrológica.	55
Tabla 10. Municipios que abarca la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	58
Tabla 11. Superficie de los usos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	60



Tabla 12. Superficie de los tipos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	61
Tabla 13. Estaciones Hidrométricas que se encuentran en la zona de estudio.	75
Tabla 14. Resultados de las pruebas realizadas a las Estaciones Hidrométricas.	77
Tabla 15. Propuesta de subcuencas para la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	80
Tabla 16. Información general de las estaciones climatológicas preseleccionadas.	83
Tabla 17. Estaciones válidas para el desarrollo del MPE de la zona de estudio.	85
Tabla 18. Comparativa de estadísticos básicos en las estaciones climatológicas antes y después del llenado de datos.	89
Tabla 19. Resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia para las estaciones climatológicas principales.	89
Tabla 20. Rangos de ajuste.	91
Tabla 21. Valores obtenidos de la calibración subcuenca Tarímbaro.	92
Tabla 22. Valores obtenidos de la calibración subcuenca Tarímbaro.	95
Tabla 23. Valores obtenidos de la calibración subcuenca Santiago Undameo.	98
Tabla 24. Resumen de los parámetros del MPE-HBV obtenidos.	101
Tabla 25. Matriz preliminar para la elaboración del AMV.	102
Tabla 26. Matriz de correlación entre variables de análisis.	103
Tabla 27. Matriz informativa para realizar el AMV.	105
Tabla 28. Grupos para la asignación de parámetros del modelo HBV.	108
Tabla 29. Balance hídrico para la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Periodo 1985-2020.	114
Tabla 30. Usos del agua en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPDA, 2022).	117
Tabla 31. Valores propuestos de transmisividad en función del tipo de roca para el modelo AQUIVAL.	121



Tabla 32. Volúmenes correspondientes a las demandas urbanas discretizadas en el modelo.....	123
Tabla 33. Volúmenes correspondientes a las demandas agrícolas discretizadas en el modelo.....	124
Tabla 34. Volúmenes correspondientes a las demandas restantes en el modelo.	125
Tabla 35. Niveles piezométricos medidos en pozos dentro del acuífero. .	128
Tabla 36. Valores finales de T y S para el acuífero.	133
Tabla 37. Valores de los indicadores de ajuste para el modelo subterráneo.	135
Tabla 38. Balance del acuífero Morelia-Queréndaro.	136
Tabla 39. Valor de los indicadores de ajuste antes de la calibración para volúmenes en las presas.....	144
Tabla 40. Valor de los indicadores de ajuste después de la calibración para volúmenes en las presas.....	144
Tabla 41. Valores de volúmenes medios simulados e históricos de la Presa Cointzio.	145
Tabla 42. Valores de volúmenes medios simulados e históricos de la Presa Malpais.....	146
Tabla 43. Tramos seleccionados para la evaluación de la Alteración Hidrológica de la cuenca.	158
Tabla 44. Rangos de Alteración Hidrológica.....	159
Tabla 45. Valores de los iah para cada tramo de río.	160
Tabla 46. Valores de IAHg para cada tramo de río y para la cuenca.	162
Tabla 47. Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales.	172
Tabla 48. Caudales mínimos y máximos ordinarios del RHN.	175
Tabla 49. Caudales circulantes de la serie RHA.....	176
Tabla 50. Régimen de caudales ordinarios mínimos y máximos acorde al RHN (P10-P90) VS RHA para la EH-12347-SU.....	177



Tabla 51. Caudales ecológicos para año más seco del Río Grande de Morelia.	179
Tabla 52. Caudales ecológicos para el Río Grande de Morelia.....	180
Tabla 53. Valores de los iah con la implementación del caudal ecológico en el Río Grande.	184
Tabla 54. IAH generales por tramo de río con implementación de caudal ecológico.	184
Tabla 55. Garantías volumétricas de las demandas agrícolas en ambos escenarios.	186



1. INTRODUCCIÓN

En toda sociedad, es indispensable para el desarrollo humano retener el agua circulante en los sistemas fluviales mediante represas y embalses para poder regular los ríos y aprovechar este recurso para la producción de energía hidroeléctrica, producción agrícola, usos industriales, civiles y para la mitigación del riesgo de inundaciones (Bizzi et al., 2012), sin embargo, esto ha provocado una fuerte alteración en el régimen de los caudales naturales de todo el mundo debido a factores como la explotación desmedida de los recursos hídricos, el cambio climático y la falta de medidas de restauración y protección de las características naturales del régimen hidrológico.

La alteración hidrológica en un sistema de recursos hídricos implica una modificación de las condiciones naturales de los regímenes hidrológicos, estas modificaciones pueden alterar indirectamente la composición, estructura o función biótica de los ecosistemas acuáticos, humedales y riparios a través de su efectos sobre las características físicas del hábitat, trayendo consigo consecuencias adversas (Richter et al., 1996) es por esto que se ve la necesidad de evaluar dicha alteración mediante la implementación de Índices de Alteración Hidrológica (IAH), los cuales consisten en hacer una comparativa de un régimen de referencia (para el presente estudio será el régimen natural) contra el régimen existente (régimen alterado) utilizando una serie de atributos hidrológicos biológicamente relevantes como las operaciones de los embalses, el bombeo de aguas subterráneas y las desviaciones agrícolas, que caractericen la variación intra-anual en las condiciones del agua y luego utilizar un análisis de la variación interanual en estos atributos como base para comparar dichos regímenes .

Actualmente la cuenca del Lago de Cuitzeo presenta graves deterioros ambientales, debido a que se encuentra en una situación de extrema alteración hidrológica respecto de su dinámica funcional. Dentro de los problemas actuales que se han observado en los últimos años el más notorio es el proceso de desecación del lago, el cual está asociado a la reducción de las aguas que llegan al

lago, el decremento en la calidad del agua (Bocco et al., 2012) y el cambio climático, además diversas actividades de origen antrópico como el cambio de uso de suelo, la desviación de aguas para fines agrícolas y pecuarios, la construcción de obras de infraestructura para retener agua en las subcuencas de cabecera y la deforestación (a este último factor se le atribuye el azolve del vaso de lago), han acelerado este proceso causando sequias cada vez más frecuentes y por periodos de tiempo más prolongados trayendo consigo la muerte de fauna y vegetación endémica. Otro de los problemas es la contaminación del acuífero Morelia-Queréndaro debido a la descarga de aguas residuales municipal, agrícola, ganadera e industrial, todo esto complica la recuperación del régimen natural hidrológico poniendo a la cuenca del Lago de Cuitzeo como una zona de riesgo ante una notable crisis hídrica, de salud y económica para los habitantes.

La cuenca del Lago de Cuitzeo ha sido motivo de una gran diversidad de estudios de diferentes áreas como la hidrología, biología, geología, entre otras, que tienen la finalidad de mejorar el estado actual y conservarlo para generaciones futuras, estos estudios permiten obtener de forma cualitativa el desorden hidrológico presente en el lago, no obstante, se requiere de una métrica objetiva que permita tener una pauta para comprender hasta qué punto el régimen de flujo se desvía de las condiciones naturales y así diseñar medidas de gestión y restauración adecuadas. En este sentido, los Indicadores de Alteración Hidrológica se consideran actualmente uno de los enfoques más efectivos para evaluar la Alteración Hidrológica (Peñas et al., 2016).

La implementación de los Índices de Alteración Hidrológica solamente son una herramienta para evaluar el grado de alteración de la cuenca, sin embargo, si se desea tener una mejora en la funcionalidad del ciclo hidrológico y garantizar el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en él, es necesario aplicar una serie de medidas enfocadas a una correcta gestión del recurso hídrico de todo el sistema. Una manera de lograrlo es con la determinación de caudales ecológicos en las corrientes principales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.



La definición de caudal ecológico es la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales (Secretaría de Economía et al., 2012). Donde se plantea que además de suministrar de manera eficiente las diferentes demandas de agua en el sistema, se debe mantener un cierto caudal destinado para dichos servicios ambientales.

Actualmente se ha observado que las decisiones tomadas en cuanto a la gestión del recurso hídrico por los principales municipios que pertenecen a la Cuenca del Lago de Cuitzeo ubicados aguas arriba, afectan drásticamente los escurrimientos superficiales a lo largo de los afluentes principales ya que al retener o desviar el agua a ciertos puntos, la restante no es suficiente para la conservación adecuada de los ecosistemas presentes en la zona, específicamente en las partes bajas.

Para el presente estudio será aplicada la metodología hidrológica propuesta por la NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación de caudal ecológico, como una medida de regulación de la explotación, uso y conservación del agua para proteger los ecosistemas relacionados, con la finalidad de propiciar un desarrollo sustentable en las cuencas hidrológicas.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar Índices de Alteración Hidrológica para evaluar los impactos antrópicos en los recursos hídricos disponibles de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, así como la implementación de medidas de gestión como lo son los caudales ecológicos a fin de generar información útil para los organismos administradores del agua.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar los recursos hídricos superficiales en la cuenca mediante un Modelo Precipitación-Escorrentamiento a **escala diaria**.
- Conocer las condiciones de explotación y el funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Morelia-Queréndaro a través de la generación de un modelo subterráneo.
- Elaborar el modelo de gestión a escala diaria para conocer el régimen natural y el régimen alterado y obtener los caudales de los principales afluentes.
- Determinar los caudales ecológicos para los principales afluentes mediante la metodología propuesta por la NMX-AA-159-SCFI-2012 para determinar caudales ecológicos
- Evaluar los escenarios en condiciones actuales y con caudales ecológicos determinados por la NMX-AA-159-SCFI-2012 mediante los IAH diseñados para realizar una comparativa entre escenarios.

1.3 HIPÓTESIS

La implementación de Índices de Alteración Hidrológica en la cuenca del Lago de Cuitzeo permitirá evaluar de manera cuantitativa los impactos de los usos del agua y la aplicación de medidas de gestión como lo son los caudales ecológicos de tal modo que no se vean afectadas las garantías de las demandas teniendo como prioridad la protección de los ecosistemas riparios y acuáticos de la cuenca.



1.4 JUSTIFICACIÓN

La Cuenca del Lago de Cuitzeo actualmente presenta severos problemas de disponibilidad de agua, ya que sus fuentes superficiales y subterráneas se encuentran totalmente concesionadas. Esto significa un freno hacia un mayor desarrollo económico, que sin embargo es solucionable a través de la recuperación de agua del sector agrícola, del mismo sistema de abastecimiento urbano, o bien fomentando el reúso del agua residual en las actividades industriales que no requieran calidad potable (CONAGUA, 2010).

El problema que representa mayor afectación para los recursos hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo es la mala gestión de los mismos, de tal modo que no se tiene una regulación del consumo de agua en las poblaciones que se encuentran en la cabecera de la cuenca, tal es el caso de la Ciudad de Morelia que demanda la mayoría de los recursos superficiales como lo es en la presa de Cointzio que abastece a gran parte de la ciudad y sus tenencias. También a lo largo del Río Grande que es uno de los principales afluentes de la cuenca, mediante obras de toma y desvío. Además, la sobreexplotación del acuífero Morelia-Queréndaro a través de los pozos de donde se extrae agua para los diferentes usos consuntivos y lo que se bombea del manantial de la Mintzita, aunado a el deterioro de las redes de distribución de agua que provocan pérdidas en el sistema, han provocado que se detraiga el recurso hídrico (superficial principalmente) que corresponde a las poblaciones que se encuentran en las partes bajas de la cuenca, de manera particular en aquellas aledañas al Lago de Cuitzeo. Esto repercute de manera drástica en la cantidad de recursos hídricos que se debería asignar para el mantenimiento ambiental, ya que al limitar con poca cantidad de agua las demandas de las poblaciones urbanas, rurales y las zonas agrícolas, estas demandan toda el agua restante, evitando así que se tenga disponibilidad con fines ambientales repercutiendo en afectaciones a los ecosistemas de los ríos y el Lago de Cuitzeo.

En los últimos años, debido a los estragos provocados por las sequias en el Lago de Cuitzeo, dependencias como la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural han iniciado trabajos para desarrollar un Plan de Rehabilitación del lago, en el cual se pretende establecer medidas y acciones necesarias para revertir la situación de



deterioro de la cuenca (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021), también asociaciones civiles en conjunto con instituciones como la Procuraduría de Protección al Ambiente (ProAm) han realizado manifiestos ciudadanos para que la cuenca del Lago de Cuitzeo sea declarada como Zona de Restauración Ecológica ya que es el segundo cuerpo de agua más grande de México y es conocido a nivel internacional por fundaciones como DUMAC (Ducks Unlimited de México) que también ha realizado proyectos como la Iniciativa multi-institucional para la conservación y el manejo integral del Lago de Cuitzeo, Michoacán, fase I y fase II (en curso), en el cual se desarrollaron mecanismos de participación con los diferentes sectores sociales y gubernamentales que tienen injerencia en el área para llevar a cabo acciones específicas para la recuperación de las condiciones ecológicas del hábitat, teniendo como meta la rehabilitación, conservación y el manejo de los recursos del lago a mediano y largo plazo (Morales Perea, 2015).

En 1996, (Richter et al., 1996) hizo notar que mantener la integridad de los ecosistemas protegiendo a la biodiversidad nativa y los procesos ecológicos y evolutivos, crean y mantienen esa diversidad, y es la finalidad que se persigue con todas las actividades que se han venido realizando. Para esto se requiere que los organismos tomadores de decisiones caractericen las diferencias entre las condiciones actuales y deseadas para poder marcar un progreso hacia la gestión del ecosistema o de su restauración e incorporar estrategias adecuadas de adaptación en los planes de manejo de recursos hídricos y esta caracterización se logra mediante los IAH ya que además de medir la cantidad de cambio del régimen de flujo, se evalúa que procesos hidrológicos específicos se han alterado y en qué medida, de tal modo que se tengan fundamentos para determinar que políticas operativas o acciones en pro del medio ambiente son correctamente aplicables tomando en cuenta los tres pilares fundamentales de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos: eficiencia económica, equidad y sostenibilidad ambiental que tienen como propósito alcanzar un equilibrio de agua para el sustento y el desarrollo de una sociedad (Hassing et al., 2009).



Realizando un análisis conjunto de los IAH y la determinación de un caudal ecológico óptimo que no afecte las garantías de las demandas de la cuenca, se lograría diseñar planes basados en información objetiva y cuantitativa de tal modo que se pueda observar un beneficio para toda la cuenca, principalmente en las partes bajas que son las mayormente afectadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Gestión de los Recursos Hídricos en México

A lo largo del tiempo se han realizado modificaciones en la legislación y regulación de la gestión del agua en México debido al decremento del recurso hídrico y a su mal aprovechamiento, lo que genera circunstancias difíciles para lograr un desarrollo integral sustentable.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en México es un término que se acuñó hasta la última reforma de la Ley de aguas Nacionales (LAN), la cual menciona que es un proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Dicha gestión está íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable. Para la aplicación de esta Ley en relación con este concepto se consideran primordialmente agua y bosque (LAN, 1992).

En México la problemática del agua aumenta debido a diversos factores como el uso desmesurado de las aguas subterráneas, el retraso tecnológico y de infraestructura enfocados a la GIRH, pero pueden resumirse en tres aspectos principales: Sobreexplotación, Sobre-concesión y Contaminación de los recursos hídricos. Es por esto que se diseñan planes donde se mencionan medidas y lineamientos con la finalidad de lograr la seguridad y sustentabilidad hídrica en nuestro país. De acuerdo con la definición de la Organización de las Naciones Unidas, la seguridad hídrica es la “capacidad de la población de salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas y de calidad aceptable de agua para sostener los medios de sustento, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación del agua y los desastres relacionados con el agua, y para preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política” (CONAGUA, 2014).

De acuerdo a las Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2018), la precipitación anual del país de 1981-2010 fue de 739.8 milímetros. Es importante

señalar que la distribución mensual de la precipitación acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso, debido a que el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre los meses de junio y septiembre.

La precipitación en México marca una tendencia a la baja a lo largo de los años, y esto se hace más notorio en los estados del norte donde la precipitación llega a ser hasta 11 veces menor que en la parte sur del país. Esta distribución de precipitación provoca que se tomen medidas drásticas como el recorte de agua para uso urbano en estados como Nuevo León, Chihuahua, Tamaulipas, entre otros. Caso contrario para los estados del sur se tiende a un desperdicio de agua debido a que la precipitación es mayor, sin embargo la tendencia también es a la baja tal como se puede ver en la siguiente figura donde se contrasta la precipitación normal de 1981-2010 con la precipitación del 2017.

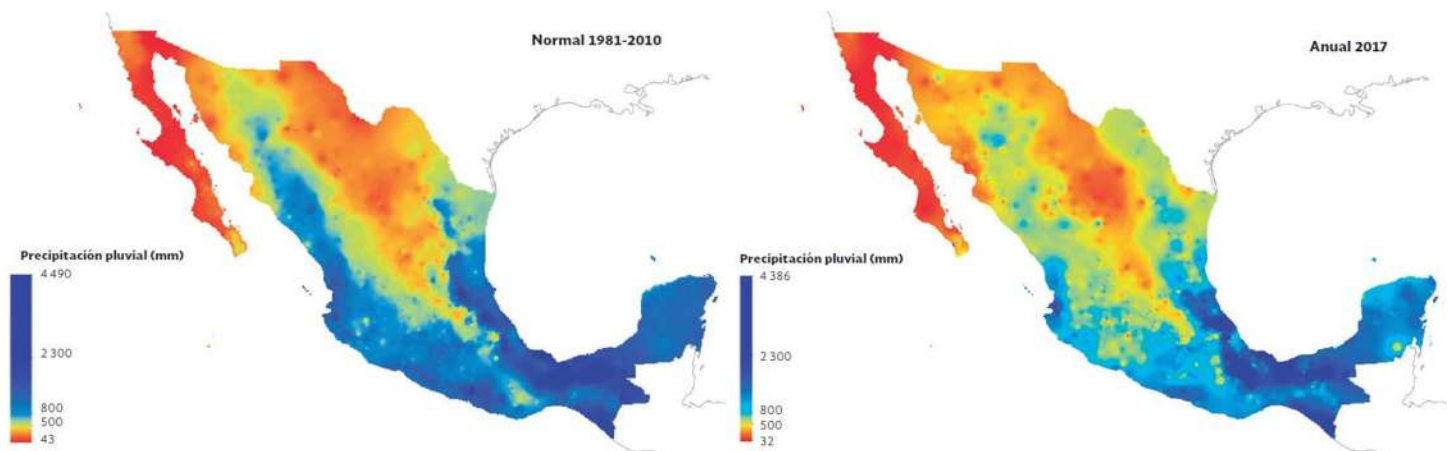


Figura 1. Distribución de la precipitación pluvial en México.

Fuente: Estadísticas del Agua en México, 2018

Para lograr el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos deben tomarse como vértices el bienestar social, desarrollo económico y la preservación del medio ambiente ya que tiene interacciones y objetivos complementarios que sintetizan una forma de desarrollo: el desarrollo sustentable.

En el IV Foro Mundial del Agua llevado a cabo en la Ciudad de México el 16 de marzo de 2006 se plantearon cinco perspectivas transversales, las cuales mencionan que se deben realizar cambios en la gobernabilidad hídrica de toda la

serie de sistemas de carácter político, social, económico y administrativo ya existente, cambios que deben ser elaborados por un grupo multidisciplinario de diversas áreas especializadas y que se debe reconocer como eje medular la ciencia y la tecnología. Se puntualiza que para que estos planes y estrategias sean eficientes se requiere definir indicadores, el establecimiento de cotas de referencia y la creación de mecanismos para asegurar el monitoreo y evaluación permanente ya que constituyen actividades clave en los esfuerzos por lograr enfoques más integrados para la solución de problemas. El monitoreo y la evaluación son importantes no solamente a nivel nacional y subnacional, sino también a nivel regional y global, para cerciorarse de que el proceso de desarrollar planes enfocados a la GIRH sea correcto y contribuya a alcanzar las metas de desarrollo sustentable más amplias (Murillo López, 2012).

2.2 Presiones Hídricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo

El Programa Estatal Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo (CONAGUA, 2010) considera a la Cuenca del Lago como una de las más importantes debido a sus aportaciones superficiales y a la ubicación en la que se encuentra ya que dentro de ella se encuentra la capital del Estado. A nivel cuenca muestra un desempeño muy superior al resto de las cuencas del estado ya que cuenta con 12 presas en funcionamiento y un escurrimiento total de 4523.6 Hm³/año. Pese a que la Cuenca del Lago de Cuitzeo tiene un mejor desempeño en comparación con otras, presenta severos problemas de disponibilidad debido al uso consuntivo y pérdidas de almacenamiento de 549.8 Hm³/año, clasificándose así en una situación de déficit. Además, sus fuentes superficiales y subterráneas se encuentran totalmente concesionadas. Esto representa una limitante para un mayor desarrollo económico que podría ser solucionable a través de la recuperación de agua del sector agrícola, del abastecimiento urbano o bien con el fomento del reúso del agua residual en las actividades industriales que no requieran calidad potable.

Una estrategia que se diseñó para reducir el grado de afectación en la cuenca, fue la elaboración del “Plan de Gestión Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo” (CONAGUA & CEAC, 2009) el cual se considera



un instrumento de gestión para detener, revertir y conservar el equilibrio del medio ambiente, mediante la adecuada explotación de sus recursos, el aprovechamiento racionalmente de acuíferos y cuerpos de agua superficiales, promoviendo un manejo forestal, acuícola y pecuario sostenibles que eviten el deterioro ambiental. La ejecución de este plan está a cargo de la Comisión de Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Otro de los problemas presentes en la cuenca es la contaminación debido a distintos factores, principalmente por la descarga de aguas negras de origen urbano e industrial debido a la baja cobertura de saneamiento ya que por la insuficiencia de recursos económicos o humanos no se realiza en forma efectiva las labores de monitoreo e inspección de las descargas de agua residual para determinar el grado de cumplimiento a la normatividad.

Los sistemas de alcantarillado tanto municipal como industrial descargan directamente a los ríos y lagos, en su mayoría no existe un pretratamiento que genere una reducción en los contaminantes provocando la degradación de los ecosistemas acuáticos, que resultan de gran importancia para el saludable equilibrio del medio ambiente, afectando en gran medida la disponibilidad real del agua y limitando el potencial de desarrollo hídrico, como el uso doméstico, la pesca o la agricultura. Los principales contaminantes presentes en las descargas de aguas residuales de origen industrial son arsénicos, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel y plomo. Estos compuestos pueden ser tóxicos, carcinogénicos o mutagénicos, aun en bajas concentraciones, tanto para los humanos como para los animales. Algunos son bioacumulables en la cadena alimenticia, como es el caso de el cromo, cadmio y plomo. Para el caso de las descargas de origen agropecuario y municipal; los principales contaminantes presentes son el fósforo, nitrógeno, coliformes fecales y huevos de helminto. Estos provocan riesgos en la salud a través de la transmisión de enfermedades que tienen como vector el agua. Altas concentraciones de nitrógeno y fosforo pueden conducir a la eutroficación de los sistemas acuáticos (Metcalf & Eddy Inc., 1991).

En cuanto al abastecimiento de agua subterránea, el acuífero Morelia-Queréndaro es de donde se extrae el agua que es destinada mayormente para el uso agrícola como para el uso y consumo humano, sin embargo, se ve también afectada por el mal manejo de los residuos municipales ya que producen lixiviados que son altamente contaminantes y se llegan a infiltrar hasta las capas del nivel freático provocando de esta manera que el agua que se extrae tenga presencia de los contaminantes o de metales pesados mencionados anteriormente.

Aunado a esto, el efecto de la degradación forestal y de suelos han afectado significativamente a los embalses de la cuenca. Las consecuencias del cambio de uso de suelo conllevan necesariamente a la pérdida de biodiversidad, debido a que la reducción de las superficies de los ecosistemas tiene como resultado la disminución de tamaño de las poblaciones silvestres, lo cual las hace más susceptibles a procesos de extinción local y global de la flora y fauna (CONAGUA, 2010).

Los recursos hídricos en la cuenca se ven amenazados por los distintos factores antropogénicos y la mala ejecución de las diferentes estrategias a corto y mediano plazo, lo que hace necesario el ejecutar estudios que permitan mejorar o diseñar nuevas estrategias donde se haga un análisis multicriterio a nivel cuenca buscando un beneficio para todo el sistema de recursos hídricos y no solo de un sector en específico.

2.3 Índices de Alteración Hidrológica

La aplicación de los Índices de Alteración Hidrológica (IAH) parte de la comparativa de un estado de referencia el cual es el régimen natural contra un régimen alterado (modificado por acciones antropogénicas) y a partir de esta comparativa se analizan indicadores que están relacionados principalmente en la magnitud, variabilidad y estacionalidad de las aportaciones de una cuenca y que permiten clasificar su grado de alteración desde un estado donde se encuentra totalmente alterada hasta donde es casi nula su alteración

Los IAH permiten evaluar de manera objetiva y eficiente, los cambios que sobre los elementos del régimen de caudales con mayor trascendencia ambiental

inducen los aprovechamientos de los recursos hídricos (Martínez & Fernández, 2008).

Las metodologías mayormente implementadas son las propuestas por Richter et al., en 1996, las cuales parten de los indicadores propuestos por la organización *The Nature Conservancy* que tiene como objetivo evaluar el grado de alteración hidrológica que se da como consecuencia de intervenciones antrópicas dentro de un ecosistema. Esta metodología requiere de datos con una escala temporal diaria para poder calcularse, sin embargo, para el caso de que solo se disponga de datos mensuales se debe realizar una adaptación de los parámetros a escala mensual, calculando sus valores únicos a partir de sus valores medios para la serie temporal completa reduciendo los parámetros a 12, manteniendo el rango de valores de los parámetros entre 0 (alteración total) y 1 (totalmente inalterado) (tabla 1), dichos parámetros se organizan desde dos puntos distintos (Ortín León, 2017), tal y como se muestra en la Figura 2:



Figura 2. Esquema de los parámetros IAH. Fuente: Ortín León, 2017.

Existen otras adaptaciones en cuanto a los parámetros de los IAH como la propuesta realizada por Martínez Santa-María & Fernández Yuste J.A., en su trabajo de Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS) la cual hace una reducción a 19 parámetros que considera adecuados para evaluar de forma clara y precisa el régimen de caudales, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Relación de parámetros para la caracterización del régimen de caudales.

COMPONENTE DEL RÉGIMEN		ASPECTO	PARÁMETRO		
VALORES HABITUALES	APORTACIONES ANUALES Y MENSUALES	MAGNITUD	Media de las aportaciones anuales	Por tipo de año	año húmedo año medio año seco AÑO PONDERADO (P1)
		VARIABILIDAD	Diferencia entre la aportación mensual máxima y mínima en el año	Por tipo de año	año húmedo año medio año seco AÑO PONDERADO (P2)
		ESTACIONALIDAD	Mes de máxima y mínima aportación del año	Por tipo de año (P3)	año húmedo año medio año seco
	CAUDALES DIARIOS	VARIABILIDAD	Diferencia entre los caudales medios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90%	Por tipo de año (P4)	año húmedo año medio año seco
VALORES EXTREMOS	VALORES MÁXIMOS de caudales diarios (AVENIDAS)	MAGNITUD Y FRECUENCIA	Media de los máximos caudales diarios anuales Caudal Generador del Lecho Caudal de conectividad Caudal de la avenida habitual (Q5%)		Qc (P5) QGL (P6) QCONEC (P7) Q 5% (P8)
		VARIABILIDAD	Coefficiente de variación de máximos caudales diarios anuales Coefficiente de variación de la serie de avenidas habituales		CV (Qc) (P9) CV (Q 5%) (P10)
		DURACION	Máximo nº de días consecutivos al año con $q > Q 5\%$		Duración avenidas (P11)
		ESTACIONALIDAD	Nº medio de días al mes con $q > Q 5\%$		12 valores (uno para cada mes) (P12)
	VALORES MÍNIMOS de caudales diarios (SEQUIÁS)	MAGNITUD Y FRECUENCIA	Media de los mínimos caudales diarios anuales Caudal de la sequía habitual (Q 95%)		Qs (P13) Q 95% (P14)
		VARIABILIDAD	Coefficiente de variación de mínimos caudales diarios anuales Coefficiente de variación de la serie de sequías habituales		CV (Qs) (P15) CV (Q 95%) (P16)
		DURACION	Máximo nº de días consecutivos al año con $q < Q 95\%$		Duración sequías (P17)
			Número medio de días al mes con caudal diario nulo		12 valores (uno para cada mes) (P18)
		ESTACIONALIDAD			12 valores (uno para cada mes) (P19)

Fuente: Martínez Santa-María C, Fernández Yuste J.A., 2018.

Se debe tener presente que, para la formulación de índices, se debe partir de un conjunto de indicadores ya que estos ayudan a reflejar y comunicar una idea compleja. Los indicadores propuestos por The Nature Conservancy hacen un análisis o monitoreo de las variables que caracterizan al régimen de caudales las cuales proporcionarán información objetiva y que será científicamente argumentada y una vez calculados, se plantearán índices orientados a la zona de estudio.

Estos indicadores están en función de la escala temporal con la que se disponga, ya que para tener datos en escala mensual o diaria pueden ser por medio de datos observados o datos simulados, sin embargo, dado que el aumento de escala temporal diaria a mensual reduce la sensibilidad de los resultados de los IAH,

las metodologías propuestas por Richter et al., se muestran más factibles para el caso de tener datos a escala diaria.

Un ejemplo del cálculo de los índices de alteración hidrológica, es la metodología presentada por Mónico et al., en 2022, donde evalúa los indicadores propuestos por The Nature Conservancy en 7 grupos (Tabla 2) para facilitar su análisis además de realizar una estandarización de los indicadores donde limita los valores a un rango entre 0 y 1, siendo cero la alteración total y uno la alteración nula. Finalmente realiza una agrupación más para sólo mantener 5 grupos teniendo en cuenta la relación que existe entre cada uno de los grupos de parámetros y los factores que intervienen en la evaluación (Tabla 3).

Tabla 2. Agrupación de indicadores de alteración hidrológica propuesta por Monico et al., 2022.

INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA				
PARÁMETROS			ABREVIATURA	GRUPO
Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Invierno	Octubre	IHA1	GRUPO 1
		Noviembre	IHA2	
		Diciembre	IHA3	
		Enero	IHA4	
		Febrero	IHA5	
		Marzo	IHA6	
	Verano	Abril	IHA7	GRUPO 2
		Mayo	IHA8	
		Junio	IHA9	
		Julio	IHA10	
		Agosto	IHA11	
		Septiembre	IHA12	
Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Caudales bajos	1-día mínimo	IHA13	GRUPO 3
		3-días mínimo	IHA14	
		7-días mínimo	IHA15	
		30-días mínimo	IHA16	
		90-días mínimo	IHA17	
		Núm días cero caudal	IHA18	
		Índice caudal base	IHA19	
	Caudales máximos	1-día máximo	IHA20	GRUPO 4
		3-días máximo	IHA21	
		7-días máximo	IHA22	
		30-días máximo	IHA23	
		90-días máximo	IHA24	

INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA			
PARÁMETROS		ABREVIATURA	GRUPO
Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha de caudal mínimo	IHA25	GRUPO 3
	Fecha de caudal máximo	IHA26	
Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Conteo pulsos bajos	IHA27	GRUPO 6
	Duración pulsos bajo	IHA28	
	Conteo pulsos altos	IHA29	
	Duración pulsos alto	IHA30	
Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasa de subida	IHA31	GRUPO 7
	Tasa de bajada	IHA32	
	Cantidad de inversiones hidrológicas	IHA33	

Tabla 3. Índices de Alteración Hidrológica considerados por Monico et al., 2022.

ÍNDICES DE ALTERACIÓN	
Nombre	Abreviatura
Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales (invierno)	EST _{INV}
Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales (verano)	EST _{VER}
Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales (caudales bajos)	EXT _{MIN}
Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales máximos (caudales máximos)	EXT _{MAX}
Tasa, frecuencia y duración de los pulsos y los cambios de las condiciones hidrológicas	PUL _{INT}

Para la valoración de los resultados que se obtuvieron en dicho estudio, se determinaron cuatro rangos de alteración hidrológica (Tabla 4), no obstante, se sugiere que el planificador es quien debe definir el o los límites de alteración aceptables en función de las características de la cuenca.

Tabla 4. Rangos de alteración hidrológica propuestos por Monico et al., 2022.

Estado	rango
Poco alterado	0.8 – 1
Moderadamente alterado	0.5 - 0.8
Alterado	0.3 - 0.5
Muy alterado	0 - 0.3

2.4 Caudales Ecológicos en México

En México el orden de prioridad en cuanto a los usos del agua deja al uso destinado para la conservación ambiental o caudal ecológico en quinto lugar, después del uso doméstico, público urbano, pecuario y agrícola, no obstante, ello no implica que estos últimos puedan acaparar todo el recurso en detrimento del ambiente. La definición del uso ambiental difiere un poco con la de caudal ecológico, sin embargo, persiguen el mismo fin. La Ley de Aguas Nacionales y la Ley del Agua y Gestión de Cuencas definen el Uso Ambiental o Uso para la conservación Ecológica como el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio del sistema (CONAGUA, 2010).

Actualmente en el país solamente cuenta con una Norma Mexicana para la determinación de caudales ecológicos, pero no se cuenta con una normativa oficial que deban cumplir los ríos en sus diferentes tramos para preservar los ecosistemas, controlar la sobreexplotación y mantener los servicios ambientales (Tabla 5) y sus funciones.

Tabla 5. Funciones principales que presta el agua como servicio ambiental.

Servicios ambientales	Funciones	Ejemplos
Regulación de clima	Regulación de temperatura y precipitación	Regulación de gases de efecto invernadero
Regulación de disturbios	Capacidad de resiliencia del ecosistema	Protección de tormentas, inundaciones, sequías, respuesta del hábitat, cambios ambientales, etc.
Regulación hídrica	Regulación de los flujos hidrológicos	Provisión de agua para uso doméstico, industrial, agropecuario, recreación, etc.
Oferta de agua	Almacenamiento y retención de agua	Provisión de agua mediante la cuenca, almacenamientos y acuíferos
Control de la erosión y sedimentos	Detención del suelo dentro del ecosistema	Prevención de la pérdida de suelo, evitar azolve en lagos y humedales
Saneamiento de aguas residuales	Recuperación de nutrientes móviles, remoción y descomposición de contaminantes	Tratamiento de agua residual, control de contaminación
Refugio de especies	Hábitat para poblaciones endémicas y migratorias	Semilleros, hábitat de especies locales y foráneas
Producción de alimentos	Producción primaria bruta de bienes extractables	Producción de peces, frutas, cultivos, etc.
Recreación	Proveer oportunidades para actividades de recreación	Pesca deportiva, ecoturismo
Cultural	Proveer oportunidades para usos no comerciales	Estética, artística, espiritual, educacional, valores científicos del ecosistema

Fuente: PHOC Visión 2030. Lerma-Santiago-Pacífico, CONAGUA, 2006.

Al no existir una normatividad específica con respecto al caudal ecológico, las concesiones y asignaciones, así como los permisos de descarga, no han considerado plenamente la necesidad de establecer un régimen de caudal, que es de gran importancia para la preservación de los ecosistemas fluviales, lacustres, lagunares y estuarinos.

La NMX-AA-159-SCFI-2012 es el único documento que determina las metodologías aplicables en México para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. Existen diferentes metodologías, estas se clasifican por la forma en que se aproximan o abordan al problema y cada una aporta resultados específicos en función de la cantidad de recursos que necesita. Las metodologías hidrológicas son las más simples, y en éstas se determina el caudal ecológico mediante el estudio de una serie de caudales históricos. Un ejemplo de las metodologías hidrológicas, en el que definen los caudales ecológicos como un porcentaje del caudal medio histórico, es la de Tennant o de Montana. Este tipo de metodologías tienen la ventaja de ser sencillas en cuanto a su aplicación, lo que aunado a una relativa baja cantidad de información que requieren, permiten obtener resultados en el corto plazo. Además de estas metodologías, existen otras donde es necesario utilizar métodos más detallados como el Physical Habitat Simulation (PHABSIM) el cual consiste en un análisis más detallado de la cantidad y conveniencia del hábitat físico disponible para la biota a diferentes condiciones de flujo, vinculando información hidrológica, hidráulica y biológica, que requieren una cantidad de información considerablemente mayor, cantidad de tiempo y, en general, mayor cantidad de recursos. Por último, las metodologías holísticas utilizadas en sitios con una alta variabilidad en el régimen de caudales, donde se han construido grandes presas, transformando así las características de la cuenca.

De esta manera se observa que la determinación del caudal ecológico se deberá aplicar a corrientes de cada cuenca hidrológica, y cuerpos de agua ya que se requieren para poder acotar la extracción de las aguas nacionales, establecer zonas de veda o declarar la reserva de agua, de tal manera que se puedan incorporar a la toma de decisiones para otorgar o negar concesiones y asignaciones

de agua, así como permisos de descarga, dentro de los lineamientos que marque la Autoridad del Agua.

A su vez, esta norma se complementa con la NOM-011-CONAGUA-2000 la cual establece las especificaciones para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Nación (DOF) el 17 de abril de 2002 y con la NOM-059-SEMARNAT-2010 sobre protección ambiental y menciona las especies nativas de México de flora y fauna silvestres; las categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión o cambio; y la lista de especies en riesgo, publicada en el DOF el 30 de diciembre de 2010.

La norma menciona que cualquier metodología será válida si:

I.- Permite entender el significado ecológico de cada componente del régimen hidrológico natural y genera propuestas para su conservación o restauración total o parcial.

II.- Las propuestas consideran el intervalo natural de variabilidad hidrológica tanto en condiciones ordinarias como el régimen de perturbaciones.

III.- Reconoce que en un sistema acuático modifica sus atributos como respuesta al aumento de los niveles de estrés y, por lo tanto, permiten ajustar las propuestas de caudales ecológicos a los objetivos ambientales o de conservación.

Existen diferentes metodologías para la determinación de Caudales Ecológicos, las cuales se muestran en la siguiente tabla, así como sus requerimientos:

Tabla 6. Comparación de metodologías de los Caudales Ecológicos.

TIPO	COMPONENTES CONSIDERADOS	NECESIDAD DE DATOS	NIVEL DE EXPERIENCIA	COMPLEJIDAD	INTENSIDAD RECURSOS	RESOLUCION RESULTADOS	FLEXIBILIDAD	COSTO
Hidrológico	Todo el ecosistema- no específico	B-M (principalmente de gabinete) Registros históricos de caudales virgenes o naturalizados Uso de datos ecológicos históricos	B-M Hidrológica Alguna experiencia en ecología	B-M	B-M	B-M	B-M	B
Hidráulico	Requerimientos hidráulicos genéricos del hábitat acuático para especies objetivo.	B-M (gabinete y campo) Registros históricos de caudales Variables de descarga hidráulica típicamente de secciones Variables hidráulicas relacionadas con las necesidades de hábitat-caudal a nivel genérico.	M Hidrológica Algo de modelización hidráulica Alguna experiencia en ecología	B-M	B-M	B-M	B-M	B-M
Simulación de hábitat	Principalmente hábitat para especies objetivo. Algunos consideran: Forma del canal, transporte sedimentos, calidad del agua, vegetación de ribera, fauna silvestre	M-A (gabinete y campo) Registros históricos de caudales Numerosas secciones transversales con múltiples variables hidráulicas Datos de idoneidad del hábitat para las especies objeto	M-A Hidrológica Nivel avanzado en modelización hidráulica y del hábitat. Especialista en ecología sobre necesidades físicas de especies objetivo.	M-A	M-A	M-A	M-A	M-A
Holístico	Todo el ecosistema, Algunos consideran: Acuíferos, zonas húmedas, estuarios, llanura de inundación, dependencia social del ecosistema, así como los componentes acuáticos y de la ribera	M-A (gabinete y campo) Registros de caudales Numerosas secciones transversales con múltiples variables hidráulicas. Datos biológicos sobre caudales y hábitat relacionados con todos los requerimientos de la biota y de los componentes del ecosistema	M-A Hidrológica Nivel avanzado en modelización hidráulica. Modelización del hábitat en algunos casos. Especialistas en todos los componentes del ecosistema. Alguna experiencia en requerimientos socioeconómicos	M-A	M-A	M-A	A	M-A

A: nivel alto; M: nivel medio; B: nivel bajo. Fuente: King et al, 2000.

2.5 Modelos matemáticos en la hidrología

Para lograr representar un fenómeno de la realidad de manera simplificada se hace uso de la modelación matemática. Existen modelos físicos como lo puede ser una maqueta a escala, sin embargo, cuando la extensión del fenómeno a modelar es lo suficientemente grande, estos modelos no son posibles de realizar o pueden resultar ser muy costosos. En estos casos el desarrollo de un modelo matemático resulta ser más eficiente y más económico.

La aplicación de modelos matemáticos en la hidrología superficial y subterránea son una herramienta fundamental para poder realizar una correcta evaluación del recurso hídrico y que generan información objetiva.

2.5.1 Modelos hidrológicos superficiales

Para este caso se ha utilizado el programa Evalhid el cual es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentamiento (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos (Paredes et al., 2017).

Para implementar los modelos disponibles con los que cuenta Evalhid es necesario disponer de datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de subcuenca. Los modelos de los que se disponen son Témez, HBV y Sacramento. Los tres presentan diferentes niveles de complejidad en la modelación hidrológica y han sido ampliamente aplicados.

El modelo Témez (Témez, 1977) es un modelo de pocos parámetros con una larga trayectoria de aplicación en España para la evaluación de recursos hídricos. Existe suficiente experiencia en su aplicación como para que tenga interés su consideración. Su bajo número de parámetros lo hace especialmente adecuado en cuencas con un número reducido de datos.

El modelo HBV (Bergström, 1995), de gran tradición en países nórdicos, permite la modelación hidrológica con un número no muy elevado de parámetros por lo que es bastante versátil en muchas ocasiones. El modelo original considera la modelación de nieve que en este programa se corresponde con el llamado modelo Nieve1.

Finalmente, el modelo Sacramento, (Burnash et al., 1973) también conocido como "SAC-SMA" es un modelo de alto número de parámetros, hasta 16, lo que

permite modelar en gran detalle procesos hidrológicos cuando se tiene gran disponibilidad de datos.

2.5.2 Modelo hidrológico superficial seleccionado

2.5.2.1 Introducción y antecedentes

El modelo hidrológico HBV es un modelo conceptual y agregado de precipitación escurrimiento ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, que ha sido aplicado en más de 30 países. Perteneció a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de escurrimiento empleando una estructura simple y robusta, y un pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para predecir el escurrimiento a centrales hidroeléctricas en 1970 (Bergström, 1976; Bergström, 1995), pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente. El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad.

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escurrimiento. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

En la siguiente figura, se ilustran los procesos generales de la versión utilizada del HBV. Esta incluye un módulo que procesa los datos de precipitación como lluvia o como nieve basándose en la temperatura de cada paso de tiempo. La lluvia y la nieve fundida (si existe) son procesadas en el módulo de humedad del suelo donde se evalúa la precipitación efectiva que contribuye al escurrimiento superficial. La parte restante de la precipitación contribuye a la humedad almacenada en el suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando el

contenido de agua existente en el subsuelo sea lo suficientemente grande. La salida principal del modelo es el escurrimiento total en el punto de desagüe de la cuenca, que consta de tres componentes: escurrimiento superficial, interflujo y flujo base (contribución del flujo subterráneo).

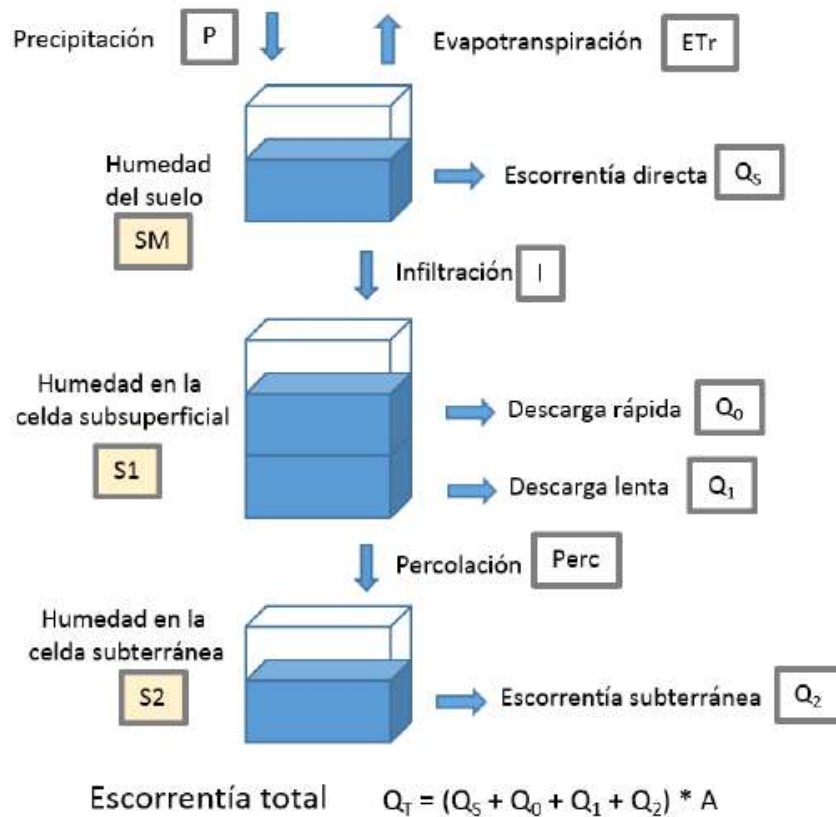


Figura 3. Esquema general del modelo HBV. Fuente: Paredes Arquiola et al., 2017.

2.5.2.2 Módulo de humedad del suelo

La precipitación caída sobre una cuenca se divide en dos componentes: La primera componente constituye el almacenamiento como humedad en el suelo del agua capilar disponible para evapotranspiración (SM); la segunda contribuye al escurrimiento subterráneo. Esta segunda componente (infiltración) es estimada basándose en el contenido de humedad del suelo en el momento en que se produce la precipitación.

Para este proceso se define dos parámetros: la capacidad de campo (FC) es el parámetro que limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona

superficial; el segundo parámetro (β) es un parámetro adimensional que modifica el porcentaje de filtración para el mismo grado de humedad relativa en el suelo.

La siguiente ecuación calcula la precipitación efectiva en función del contenido existente de humedad del suelo.

$$Inf_t = \left(\frac{SM_{t-1}}{FC} \right)^\beta P_t$$

Donde:

Inf_t Filtración efectiva [L]

SM humedad del suelo [L]

FC Máx. capacidad de almacenamiento del suelo (capacidad de campo) [L]

P precipitación diaria [L]

β coeficiente de forma (parámetro del modelo) [-]

Dado un déficit de humedad del suelo (medido por el ratio SM/FC), el parámetro β controla la cantidad de agua que contribuye a la escurrimiento. La figura 9 ilustra la relación entre la capacidad de campo y el coeficiente de filtración según el coeficiente de forma β . Siendo el coeficiente de filtración el cociente entre la filtración calculada y la precipitación (Inf/P). El gráfico muestra cómo, para una determinada humedad del suelo, cuanto mayor es β , menor es el coeficiente de filtración.

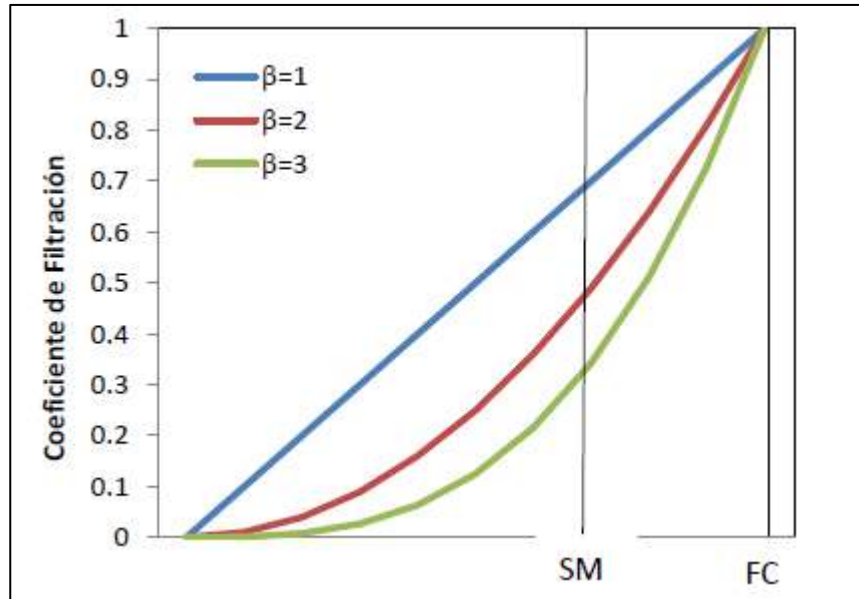


Figura 4. Relación entre la humedad del suelo (eje horizontal) y el coeficiente de filtración con distintos valores de β . Fuente: Paredes Arquiola et al., 2017.

2.5.2.3 Módulo de evapotranspiración

En el módulo de evapotranspiración se calcula ésta en base a la humedad en el suelo y la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración real será igual a la potencial o un valor reducido calculado mediante el parámetro de punto de marchitez del suelo (PWP).

$$ETr_t = ETP_t \left(\frac{SM_t}{PWP} \right) \quad \text{si } SM_t < PWP$$

$$ETr_t = ETP_t \quad \text{si } SM_t > PWP$$

El punto de marchitez es un límite de humedad del suelo por debajo del cual la evapotranspiración real es menor que la potencial con una reducción en el desarrollo de las plantas. La siguiente figura ilustra la relación entre ETr_t y PWP descrita en la ecuación anterior. Obviamente, PWP ha de tener un valor inferior a FC para que tenga un sentido físico.

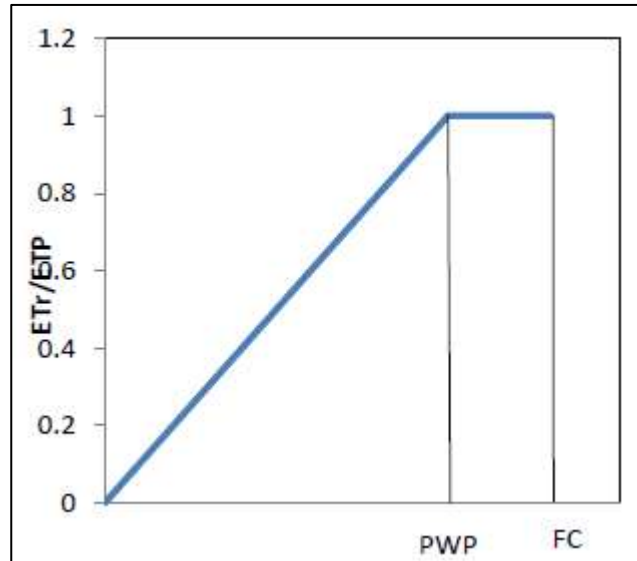


Figura 5. Relación entre ETr y PWP . Fuente: Paredes Arquiola et al., 2017.

2.5.2.4 Balance de humedad en el suelo

La humedad en el suelo resultante (SM) después de incorporar la precipitación y descontar la filtración y la evapotranspiración

$$SM_t = SM_{t-1} + P_t - ETr_t - Inf_t$$

Si la precipitación P_t fuera muy elevada, este balance podría dar como resultado un valor de SM superior a FC . En este caso el exceso se asigna como escurrimiento directo.

$$Si \ SM_t > FC \begin{cases} Qs_t = SM_t - FC \\ SM_t = FC \end{cases}$$

Donde: Qs representa el escurrimiento directo.

2.5.2.5 Cálculo del escurrimiento subsuperficial

El flujo subsuperficial se modela mediante dos funciones de descarga. Una descarga rápida (Q_0) que se activa cuando el almacenamiento en el suelo (S_1) supera un mínimo (L_m) y se define por un parámetro K_0

$$Q0_t = K_0(S1_{t-1} - Lm) \quad \text{si } S1_{t-1} > Lm$$

$$Q0_t = 0 \quad \text{si } S1_{t-1} < Lm$$

Y una descarga lenta que se regula por el parámetro K_1

$$Q1_t = K_1 * S1_{t-1}$$

Por último, esta celda tiene una descarga por percolación (Q_{perc}) que alimenta la celda de almacenamiento profundo, y se regula con el parámetro K_{perc}

$$Q_{perc_t} = K_{perc} * S1_{t-1}$$

2.5.2.6 Balance de agua en la celda subsuperficial

Tras determinar los flujos anteriores se calcula el balance de humedad en la celda subsuperficial como:

$$S1_t = S1_{t-1} + Inf_t - Q0_t - Q1_t - Q_{perc_t}$$

El balance anterior podría resultar negativo si la suma de ($K_0+K_1+K_{perc}$) fuera superior a la unidad. En tal caso $S1_t$ se asignaría como 0 y se daría un error de balance. Es responsabilidad del usuario definir los parámetros apropiados. Para asegurar que el proceso de escurrimiento es el más rápido, el valor de K_0 debe ser siempre mayor que K_1 .

2.5.2.7 Cálculo del balance y el escurrimiento subterráneo

Para la simulación del escurrimiento subterráneo se utiliza un modelo de celda como en el caso anterior, aunque con un solo parámetro de descarga (K_2) calculándose el drenaje subterráneo (Q_2) como:

$$Q2_t = K_2 * S2_{t-1}$$

Y el balance en esta celda se cerraría con

$$S2_t = S2_{t-1} + Q_{perc_t} - Q2_t$$

La respuesta de esta celda (Q2) debe ser más lenta que la primera, por lo que K2 debería ser menor que K1.

2.5.2.8 Cálculo del escurrimiento total

La escurrimiento o aportación total se calcula como la suma de los escurrimientos generados en cada uno de los módulos anteriores. Estos aportes han sido todos calculados en unidades de [mm] por lo que el caudal o volumen final de aportación se obtiene multiplicando por la superficie de la cuenca (A).

$$Q_t = (Q_{s_t} + Q_{0_t} + Q_{1_t} + Q_{2_t}) * A$$

La siguiente tabla muestra un resumen de los parámetros del modelo. Además, es necesario definir las condiciones iniciales que son la humedad inicial del suelo (SM0) y los almacenamientos iniciales de ambos tanques (S10 y S20).

Tabla 7. Parámetros del modelo HBV. Descripción y rangos.

Zona	Parámetro	Descripción	Unidades
Suelo	FC	Capacidad de campo	mm
	β	Coeficiente de forma para la infiltración	-
	PWP	Punto de marchitez de la vegetación	mm
Celda subsuperficial	Lmax	Umbral de de descarga rápida (tanque superior)	mm
	K0	Coeficiente de descarga rápida (tanque superior)	-
	K1	Coeficiente de recesión (tanque superior)	-
Celda profunda	Kperc	Coeficiente de percolación	-
	K2	Coeficiente de recesión (tanque inferior)	-

Fuente: Paredes Arquiola et al., 2017.

Además, estos parámetros deberán cumplir algunas condiciones como las siguientes:

- El parámetro FC debería tomar valores comparables a los definidos para Hmax en modelo de tipo Témez.
- PWP no debería ser mayor que FC.
- Los coeficientes K0, K1, K2 y Kperc no pueden ser mayores que 1,
- Además, debería cumplirse que $K0 > K1 > K2$.

- Si la suma de $K_0+K_1+K_{perc}$ es mayor que 1 existe el riesgo de generar un error de balance.

De la estructura del modelo se extrae la influencia que tienen los parámetros en la generación de escurrimiento:

- Los parámetros de humedad en el suelo (FC , PWP y β) determinan la evapotranspiración real y por tanto el escurrimiento total generada.
- El parámetro β es el factor determinante de la infiltración. Un valor más bajo aumenta la filtración al nivel subsuperficial.
- El resto de parámetros regulan la descarga subterránea, y si son definidos correctamente, K_0 y L_m determinan la descarga rápida y el resto (K_1 , K_{perc} y K_2) regulan la descarga a más largo plazo y la curva de recesión del río a largo plazo.

2.6 Modelos Hidrológicos subterráneos

Los acuíferos son elementos del sistema, que están conectados con el resto del mismo mediante las acciones que este pueda ejercer sobre ellos: filtraciones de embalses y tramos de río; conexión río-acuífero, infiltración profunda de zonas de riego y bombeos de las mismas; la recarga artificial y bombeos adicionales. Estas acciones se categorizan en acciones elementales y los parámetros de control (Andreu et al., 2007).

Por acción elemental se entiende una acción o conjunto de acciones que se ejercen sobre el acuífero y que puede variar en intensidad a lo largo de la ejecución del modelo. Por ejemplo, es una acción elemental un bombeo en un pozo, mientras que el caudal bombeado en cada mes es su intensidad. Asimismo, es acción elemental el bombeo en varios pozos de una zona siempre que el reparto del bombeo total entre ellos pueda suponerse fijo, siendo la intensidad de la acción el valor del bombeo total en un mes. Los acuíferos modelados como agregados sólo admitirán una acción elemental, que es la recarga (positiva o negativa) pues en ellos es inútil el distinguir su localización. En cambio, los acuíferos modelados como distribuidos admitirán varias acciones elementales.

Por parámetro de control se entiende cualquier respuesta del acuífero que interese conocer. Por ejemplo, el nivel en una celda, el volumen total en el acuífero, la relación río-acuífero. Los parámetros de control se utilizan como criterio para la definición de las reglas de operación para la explotación de acuíferos. Se puede impedir el bombeo cuando un parámetro de control dado alcance un valor inferior a un umbral dado.

Un acuífero se puede modelar dependiendo de sus características, su conexión con el sistema superficial y la disponibilidad de información para generar el modelo. Existen varios tipos conceptuales de acuíferos que se describen a continuación:

2.6.1 Acuífero Depósito

Corresponde al caso en que el acuífero no está conectado hidráulicamente con el sistema superficial y únicamente interesa conocer un parámetro de indicación de su estado de llenado y vaciado. Este parámetro es el volumen almacenado. Los datos a aportar son el volumen inicial y la recarga natural del acuífero. El modelo utilizado es:

$$V_n = V_{n-1} + R_n + RLL$$

El volumen a final de mes, V_n , es la suma del volumen a final de mes anterior (o inicial) V_{n-1} , la recarga en el mes, R_n , y la recarga natural RLL que se incluye mediante 12 datos de recarga media mensual.

Este modelo de acuífero, sólo admite una acción elemental que es la recarga neta (acción elemental no.1) y un parámetro de control, que es el volumen almacenado (parámetro de control número 1).

2.6.2 Acuífero Unicelular

Corresponde al caso de un acuífero conectado hidráulicamente con el sistema superficial, con un coeficiente de desagüe, α . Como puede demostrarse (Andreu, 1983) las ecuaciones que resultan son:

$$V_n = V_{n-1}e^{-\alpha} + \frac{R_n}{\alpha}(1 - e^{-\alpha})$$

$$Q_n = \alpha V_n = Q_{n-1}e^{-\alpha} + R_n(1 - e^{-\alpha})$$

La primera ecuación da el volumen a final de mes V_n en función del volumen final del mes anterior (o inicial), V_{n-1} , el coeficiente de desagüe α , y la recarga en el mes R_n .

La segunda ecuación da el caudal de relación río acuífero Q_n en función del caudal en el mes anterior y demás factores ya explicados.

Los datos que habrá que procurar son pues el valor de α y el de V_0 (volumen inicial).

Si $V_0=0$ y los valores de R_n son solamente los de las recargas netas de riegos se actúa entonces por superposición, con lo que los valores de Q_n son las afecciones al caudal natural de los ríos.

Este modelo de acuífero sólo admite una acción elemental, que es la recarga neta (acción elemental no.1). Proporciona dos parámetros de control. El parámetro de control no.1 es el volumen V_n y el parámetro de control no.2 es el caudal de relación con el río. Si este es positivo es del acuífero al río, y si es negativo es del río al acuífero.

2.6.3 Acuífero con manantial

Se denomina así al acuífero cuya relación con el sistema superficial es tal que este último recoge el drenaje del primero, normalmente por manantiales.

Para la simulación de estos acuíferos se utiliza un modelo agregado, en el que es necesario dar el valor del coeficiente de desagüe α , el de los caudales aforados históricos del manantial con régimen natural, Q_a , y el del volumen inicial del acuífero V_{n-1} (Sahuquillo, 1983).

El volumen a fin de mes del manantial viene dado por:

$$V_n = (V_{n-1} - V_{DET}) e^{-\alpha \Delta t} + \frac{RL_n}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t})$$

donde RL_n es el valor de la recarga (o bombeo si el valor es negativo) lejos del manantial y V_{DET} es el volumen de detracción al río que no haya podido ser realizado el mes anterior.

El volumen total mensual de afección al río viene dado por:

$$Q_n = V_{n-1} - V_{DET} - V_n + RL_n + RC_n$$

como consecuencia de la integración de las fórmulas del caudal instantáneo desde tiempo t_{n-1} a t_n (1 mes) y RC_n es la recarga cerca del manantial.

El volumen total mensual desaguado por el manantial sería:

$$Q_m = Q_a + Q_n$$

Si Q_m es negativo entonces se modifican los valores consiguientemente:

$$\begin{aligned} V_n &= V_n + Q_m \\ Q_m &= 0 \\ Q_n &= -Q_a \end{aligned}$$

siendo entonces Q_n la afección a los caudales del río.

Nótese que estamos actuando por superposición al régimen natural y, por lo tanto, las series de aportaciones utilizadas en el modelo superficial serían las naturales, que serán modificadas dentro de la simulación por el valor de Q_n .

Se utilizan por tanto dos acciones elementales, la no. 1 es la recarga lejos del manantial y la no.2 es la recarga cerca del manantial. Al igual que en el caso del acuífero unicelular se tienen dos parámetros de control.

2.6.4 Acuífero pluricelular

Se denomina así al acuífero cuya relación con el sistema superficial se produce según una ley representada por varios coeficientes de descarga identificados como celdas.

Para la simulación de estos acuíferos se utiliza un modelo pluricelular englobado (Sauquillo, 1983), en el que es necesario dar el valor del coeficiente de desagüe α_i en cada celda, el de los coeficientes de reparto de cada acción elemental sobre cada una de las celdas b_{ij} , y el del volumen inicial del acuífero V_j^{k-1} en cada celda.

El volumen a fin de mes en cada celda viene dado por:

$$V_i^k = V_i^{k-1} e^{-\alpha_i \Delta t} + \sum_j \frac{b_{i,j} R_j^k}{\alpha_i} (1 - e^{-\alpha_i \Delta t})$$

donde R^k es el valor de la acción elemental j (recarga si es positivo o bombeo si el valor es negativo).

Para los caudales se tiene:

$$Q_i^n = Q_i^{n-1} e^{-\alpha_i \Delta t} + \sum_j b_{i,j} R_j^n (1 - e^{-\alpha_i \Delta t})$$

El caudal de afección al manantial a final de cada mes viene dado por:

$$Q^n = \sum_i \alpha_i V_i^n$$

El volumen mensual de afección al manantial por cada celda viene dado por:

$$A_i^n = V_i^{n-1} - V_i^n + \sum_j b_{i,j} R_j^n$$

El volumen total de afección al manantial es la suma de los volúmenes de afección de cada una de las celdas.

$$A^n = \sum_i A_i^n$$

En el caso de que este valor resulte negativo, se producirán las correspondientes detracciones de caudal de río (sobre la conducción de tipo 3 conectada con este acuífero). Cuando sucede que el río no dispone de caudal

suficiente para que se produzca dicha detracción se generan las llamadas "detracciones imposibles". Estas detracciones imposibles se descuentan en el mes siguiente del volumen almacenado en la celda cuya relación con el río es más rápida (la que tiene un valor de α_i menor), para esta celda el valor de volumen a final de mes anterior se modifica de la siguiente forma.

$$V_{CR}^{n-1} = V_{CR}^{n-1} + DI$$

siendo CR el índice correspondiente a la celda más rápida y DI el valor de detracción imposible calculado para el mes n-1 (DI es negativo).

La utilización de este modelo puede realizarse para 3 situaciones de acuífero similares, pero con condiciones de contorno diferentes. Estos casos son, en primer lugar, el modelo de acuífero conectado con un río modelado por superposición al régimen natural; el segundo caso es el modelo con manantial modelado por superposición al régimen natural; y en tercer lugar el caso de un acuífero del que se dispone de datos de recarga por lluvia modelado completo.

1. Acuífero conectado con un río modelado por superposición al régimen natural. Este es el caso en que el acuífero puede detraer agua del río con la única limitación del caudal disponible.

Para su modelación se ha de disponer una conducción de tipo 3 conectada con el modelo del acuífero aguas abajo de la incorporación al sistema superficial de las aportaciones en régimen natural que incluyen la aportación del acuífero.

2. Acuífero con manantial modelado por superposición al régimen natural.

La diferencia con el anterior es que el acuífero no puede detraer agua del río, sin embargo, las aportaciones naturales del mismo están incluidas en la serie de aportaciones del río aguas abajo del manantial. En consecuencia, es necesario limitar la detracción que el modelo puede producir al valor máximo de las aportaciones del manantial.

Para su modelación se dispondrá, al igual que en el caso anterior, una conducción de tipo 3 conectada con el modelo del acuífero aguas

abajo de la incorporación al sistema superficial de las aportaciones en régimen natural que incluyen la aportación del acuífero. Pero esta conducción ha de tener su caudal máximo limitado por el valor de las aportaciones del manantial, de esta manera se limitan las detracciones de recursos superficiales al valor máximo de las salidas por manantial. Paralelamente, para permitir el paso de todo el caudal del río se incluirá una conducción tipo 1 con un coste by-pass para que solo lleve los caudales que superan la aportación del manantial.

3. Acuífero manantial con datos de recarga de lluvia modelado completo. En este caso las aportaciones naturales del acuífero al río no están incluidas en la serie de aportaciones superficiales aguas abajo del manantial.

Para su modelación se incluirá en primer lugar un tramo de río con filtraciones separado del sistema superficial que recibe la serie temporal de valores mensuales de recarga de lluvia. Y en segundo lugar se ha de incluir una conducción de tipo 3 conectada al acuífero y con entradas superficiales nulas.

2.6.5 Acuífero conectado con río con modelación con el método de los autovalores.

Corresponde a aquellos acuíferos para los que se considera necesario un modelo de parámetros distribuidos, y consecuentemente, una localización detallada de las acciones que se ejercen sobre dichos acuíferos, así como de las respuestas del acuífero.

Se ha utilizado para la modelación el método de los autovalores, pues está demostrado (Andreu & Sahuquillo, 1987) que es el más eficiente para sistemas que puedan ser supuestos lineales, en los que interese conocer unas pocas respuestas (parámetros de control) y sobre los que se ejerzan unas pocas acciones que puedan ser descritas como combinaciones lineales de unas acciones unitarias predeterminadas (acciones elementales).

Para su utilización el usuario deberá familiarizarse con el método. Los pasos a seguir son:

- a) Definición de las características hidrodinámicas del acuífero (transmisividades, coeficiente de almacenamiento), así como de su geometría y de las condiciones de contorno e iniciales.
- b) Confección de una malla de diferencias finitas o elementos finitos adaptada a la forma del acuífero y obtención del sistema de ecuaciones diferenciales cuyas incógnitas son las alturas en los nudos o bloques de la discretización.
- c) Obtención de los autovalores y autovectores correspondientes. Este paso puede ser realizado con cualquier paquete de subrutinas matemáticas.
- d) Definición de acciones elementales. Cada acción elemental es un vector con un valor no nulo en el elemento correspondiente a la celda donde actúa y un 0 en las demás. La suma de las componentes es la mitad
- e) Definición de los parámetros de control (Un parámetro de control puede ser un nivel en una celda, una media de niveles, un volumen en una zona, un caudal a través de un segmento de frontera río-acuífero, etc.).
- f) Decisión en cuanto al número de autovalores a incluir, n_a . Esta posibilidad de no incluir todos los autovalores (truncamiento) es conveniente para disminuir el tiempo de cálculo.
- g) Obtención de las matrices $[A^R]$, $[I]$, $[D]$. La matriz $[A^R]$ es la denominada "matriz A reducida" y tiene una fila por cada parámetro de control. Será pues de $n_p \times n_a$ donde n_p es el número de parámetros de control. La matriz $[I]$ es la matriz diagonal que contiene los autovalores, por lo tanto, sólo los n_a elementos de la diagonal principal son distintos de cero. La matriz $[\Psi]$ es la matriz de modificación de estado, de forma que las ecuaciones vectoriales que se utilizan en el modelo SIMGES son las siguientes:

$$\{c_n\} = [A^R] \{l_n\}$$

$$\{l_n\} = [e^{-\alpha \Delta t}] \{l_{n-1}\} + [\Psi] \{B\}$$

donde $\{B\}$ es un vector que contiene las intensidades de las acciones elementales para el mes en cuestión, por lo tanto, con n_e elementos (tantos como acciones elementales se haya definido). $\{l\}$ es el vector de estado del acuífero, que contiene n_a elementos. La matriz $[\Psi]$ es por lo tanto de $n_a \times n_e$ elementos, con una columna por cada acción elemental.

Los datos necesarios para el modelo son:

- La matriz $[\alpha]$ (diagonal) o autovalores,
- El vector $\{l\}$ para el estado inicial, $\{l_0\}$,
- Las filas de la matriz $[A^R]$ (cada fila corresponde a un parámetro de control), y
- Las columnas de la matriz $[\Psi]$ (cada columna corresponde a una acción elemental).

Existen más tipos de acuíferos, que para el presenta caso de estudio no es relevante mencionar dadas las características del acuífero en estudio.

2.7 Modelo Hidrológico Subterráneo elegido

Para la realización de la modelación del acuífero se utiliza el Método de los autovalores (MAV) dado que es el método que implementa el programa AQUIVAL que es un módulo incorporado al sistema soporte de decisión para la planificación y gestión de recursos hidráulicos incluyendo uso conjunto AQUATOOL (Solera et al., 2015). El modelo tipo autovalores se trata de un modelo de parámetros distribuidos general, que se aplica con eficiencia a sistemas que pueden ser supuestos lineales, con pocos parámetros de control y pocas acciones elementales. Teniendo como beneficios no solo el ingreso de los resultados obtenidos del modelo EvalHID sino también que las condiciones, características y disponibilidad de información del acuífero Morelia-Queréndaro permiten realizar un modelo

distribuido del mismo partiendo de datos que conformarán las acciones elementales y parámetros de control. Además, los resultados que arrojará el modelo subterráneo deben ser ingresados al modelo de gestión, que para el caso de estudio se pretende elaborar en SIMGES, teniendo una conexión de información entre programas.

AQUIVAL ayuda al usuario en la modelización por el método de los autovalores, facilitando la entrada de datos mediante un entorno gráfico. La principal característica de este modelo de parámetros distribuidos es la eficiencia computacional, que reduce el tiempo y la memoria utilizados. Con ello se puede incluir el modelo de flujo subterráneo en un modelo complejo de gestión y simular muchas alternativas para largos periodos de simulación (Andreu & Sahuquillo, 1987)

La ventaja de utilizar el modelo de autovalores empleando la herramienta AQUIVAL es que permitirá la simulación del acuífero para un periodo de tiempo con datos observados, lo cual podrá ser empleado para la calibración del modelo y posteriormente tener una serie de datos continuos para obtener resultados de un periodo específico y finalmente ingresar los resultados obtenidos en SIMGES.

2.8 Modelo de Gestión

Los resultados obtenidos de los modelos anteriores serán ingresados al modelo de gestión el cual permite simular la gestión de la cuenca donde se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial (Andreu et al., 2007).

La simulación se efectúa a nivel mensual (sin embargo, se plantea modificar a una escala diaria) y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas

por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volúmenes objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías. Todo ello permite que el modelo pueda ser utilizado, entre otras finalidades para:

- Determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca.
- Determinación de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías.
- Determinación de beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua.
- Determinación de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados.

2.9 ANTECEDENTES

El aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles en una cuenca acarrea de manera implícita una modificación de su régimen de caudales (Martínez Santa-María & Fernández Yuste J.A., 2008) lo que conlleva a caracterizar dicha alteración para cuantificarla y valorarla objetivamente; interpretar las consecuencias ambientales y fijar criterios al momento de establecer prioridades en la restauración de ecosistemas fluviales.

La necesidad de medir y evaluar el estado hidrológico del régimen de flujo que circula en sistemas fluviales ha llevado a producir más de 200 métodos agrupados en cuatro categorías principales: reglas hidrológicas, métodos de calificación hidráulica, métodos de simulación de hábitat y metodologías holísticas, sin embargo, se deben abordar varios inconvenientes generalizados, como la variabilidad climática entre las series anteriores y posteriores al impacto y la escasez de datos hidrológicos en muchos ríos afectados.

Una de las métricas más utilizadas son los IAH propuestos por Brian D. Richter et al., (1996) los cuales son un conjunto representativo y multiparamétrico para evaluar la alteración hidrológica. Esta metodología, se basa en un análisis de los datos hidrológicos disponibles utilizando 32 parámetros organizados en 5 grupos: magnitud, momento de ocurrencia, complejidad de las condiciones del agua, duración y tasa de cambio; para caracterizar estadísticamente la variación hidrológica dentro de cada año de las condiciones del agua, y luego realiza un análisis de la variación interanual de estos atributos como la base de una comparación de un régimen natural contra un sistema alterado por actividades humanas, resultando un total de 64 Indicadores. El caso de estudio donde se aplicó esta metodología fue en el río Roanoke alterado por la presa en Carolina del Norte (EE. UU.).

Un nuevo enfoque de la metodología anterior se realiza en el trabajo ¿Cuánta agua necesita un río? (1997) de B. D. Richter et al., el cual tiene como propósito establecer objetivos de gestión de ecosistemas fluviales basados en el flujo de corriente al que denominan “Enfoque del Rango de Variabilidad” (RVA por sus siglas

en inglés), en este trabajo se mantienen los 32 parámetros al igual que el anterior, pero modifican sus agrupaciones, siendo: variabilidad, tiempo, frecuencia, duración y tasas de cambio. Esta metodología está destinada a guiar el diseño de estrategias de gestión fluvial como lo son normas de operación de embalses o restauración de cuencas que conduzcan a lograr estos objetivos sobre una base anual. Tanto los objetivos como las estrategias de gestión RVA deben refinarse adaptativamente según lo sugerido por los resultados de la investigación a realizar y sea necesario para mantener la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas acuáticos.

Continuando con los trabajos de Richter et al., en 1998, su equipo de trabajo aplica la metodología del RVA en la cuenca alta del Río Colorado en Colorado y Utah (EE. UU.) en los ríos Colorado y Green que son los que drenan la cuenca superior. La intención principal de este estudio es demostrar una técnica para evaluar la alteración hidrológica a escala de red fluvial, siendo el primer esfuerzo para cartografiar espacialmente el grado de alteración hidrológica de los tramos fluviales en y entre los cauces de los ríos, utilizando los resultados del análisis de RVA. El mapeo de la alteración hidrológica puede proporcionar una representación visual de la extensión espacial de la alteración hidrológica en tres niveles: alto, medio y bajo; de tal modo que los resultados brinden información que permita a los gestores de los ríos, definir y adoptar fácilmente objetivos de gestión provisionales antes de que se disponga de resultados concluyentes y a largo plazo de la investigación de los ecosistemas.

Dentro de los trabajos relacionados para obtención de los IAH, se encuentran un manual de referencia metodológica para Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS), realizado por Martínez & Fernández., en 2008 aplicado en un estudio realizado en el embalse de “El Vado”, situado en el río Jarama en Guadalajara, España. Donde se propone un conjunto de IAH para evaluar de manera objetiva y eficiente los cambios que, sobre los elementos del régimen de caudales con mayor trascendencia ambiental, inducen los aprovechamientos de los recursos hídricos, metodología que emplea 19 parámetros agrupados en cinco componentes (magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasas de cambio) y se analizan en

dos vías paralelas: valores medios o habituales y valores extremos (sequías y avenidas).

Los trabajos mencionados anteriormente han sido base para el desarrollo de otro tipo de estudios, tal es el caso del trabajo “Desarrollo de indicadores representativos de la alteración hidrológica” presentado por Gao et al., en 2009 donde evalúa la capacidad de un conjunto de indicadores hidrológicos generalizados que puedan caracterizar mejor la alteración hidrológica causada por embalses y otras formas de regulación fluvial. En este trabajo se comparan los resultados de dos tipos de índices generalizados: Estadísticas de ecoflujo (Vogel et al., 2007) y el Método de Alteración del Régimen Hidrológico de Dun-dee (DHRAM) (Black et al., 2005); el primero tiene medidas adimensionales llamadas ecodéficit y ecosurplus que representan el déficit o excedente del flujo resultante de la alteración y se calculan en escala temporal anual y estacional (primavera, invierno y verano) utilizando un periodo de registro de un flujo de corriente o un flujo de corriente anual medio; el segundo obtiene como resultados una puntuación (de 0 a 30 dividido en 6 intervalos) basada en el porcentaje total de cambio en 33 parámetros que establece The Nature Conservancy (The Nature Conservancy, 2009) para antes y después de la regulación del flujo, cuanto mayor sea la puntuación, mayor será el riesgo de daño al ecosistema.

En cuanto a los caudales ecológicos, en México en 2014 se crea el Programa Nacional de Reservas de Agua (PRNA) el cual es un trabajo conjunto de la Comisión Nacional del Agua en coordinación con la Alianza WWF-México-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. (FGRA) y el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo con el propósito de garantizar la funcionalidad del ciclo hidrológico y de las funciones ecológicas y servicios ecosistémicos asociados, como una respuesta preventiva ante los impactos del cambio climático en el país (Pérez Munguía et al., 2014), además de la elaboración de diferentes protocolos desarrollados en torno a esta normativa mexicana.

En 2017, Ortín León realiza una tesis donde analiza las metodologías existentes en lo relativo a la evaluación de la alteración hidrológica, estudiando su

validez y viabilidad de aplicación para la cuenca del Júcar y caracteriza todos los usos y presiones existentes que provocan una alteración en el régimen hidrológico, evaluando la magnitud de dicha alteración, y propone una serie de medidas orientadas a corregirlas.

Para 2019, el trabajo “Aplicación de Índices de Sostenibilidad y Alteración Hidrológica en la gestión de la cuenca del Río Guadalquivir” (Rodríguez Benlloch, 2019) caracteriza la cuenca del río Guadalquivir a través de la aplicación de dos tipos de índices: Índices de Sostenibilidad para determinar la capacidad de suministro de recursos hídricos a las demandas desde los puntos de vista de la fiabilidad, la resiliencia y la vulnerabilidad e IAH, los cuales propone de acuerdo a la metodología desarrollada por Ortín León, 2017 y Richter et al., 1996, 1997, 1998.

Otro trabajo que presenta una metodología para evaluar los efectos de las estrategias de gestión de los caudales ecológicos en la alteración hidrológica es el realizado por Mónico González et al., en 2022 donde se evalúa diariamente el impacto de dichas estrategias en la cuenca del Río Órbigo que pertenece a la demarcación hidrográfica del Duero en la Península Ibérica, en el cual se definen tres escenarios de gestión: el escenario actual, un escenario sin ningún tipo de política ambiental y el escenario con los sectores ambientales inicialmente proyectados para el periodo 2022-2027.

Por último, Pardo Loaiza et al., en 2022 realiza un trabajo enfocado a indicadores que permitan optimizar los regímenes de caudales ecológicos en sistemas de recursos hídricos complejos mediante la evaluación conjunta de sus efectos de alteración hidrológica, la alteración del hábitat, las garantías de las demandas, y la explotación del recurso hídrico teniendo como caso de estudio el sistema de explotación Órbigo ubicado en la Demarcación Hidrológica del Duero.

3. METODOLOGÍA

La metodología a desarrollarse durante este proyecto consta de varias etapas las cuales se muestran en el siguiente esquema:

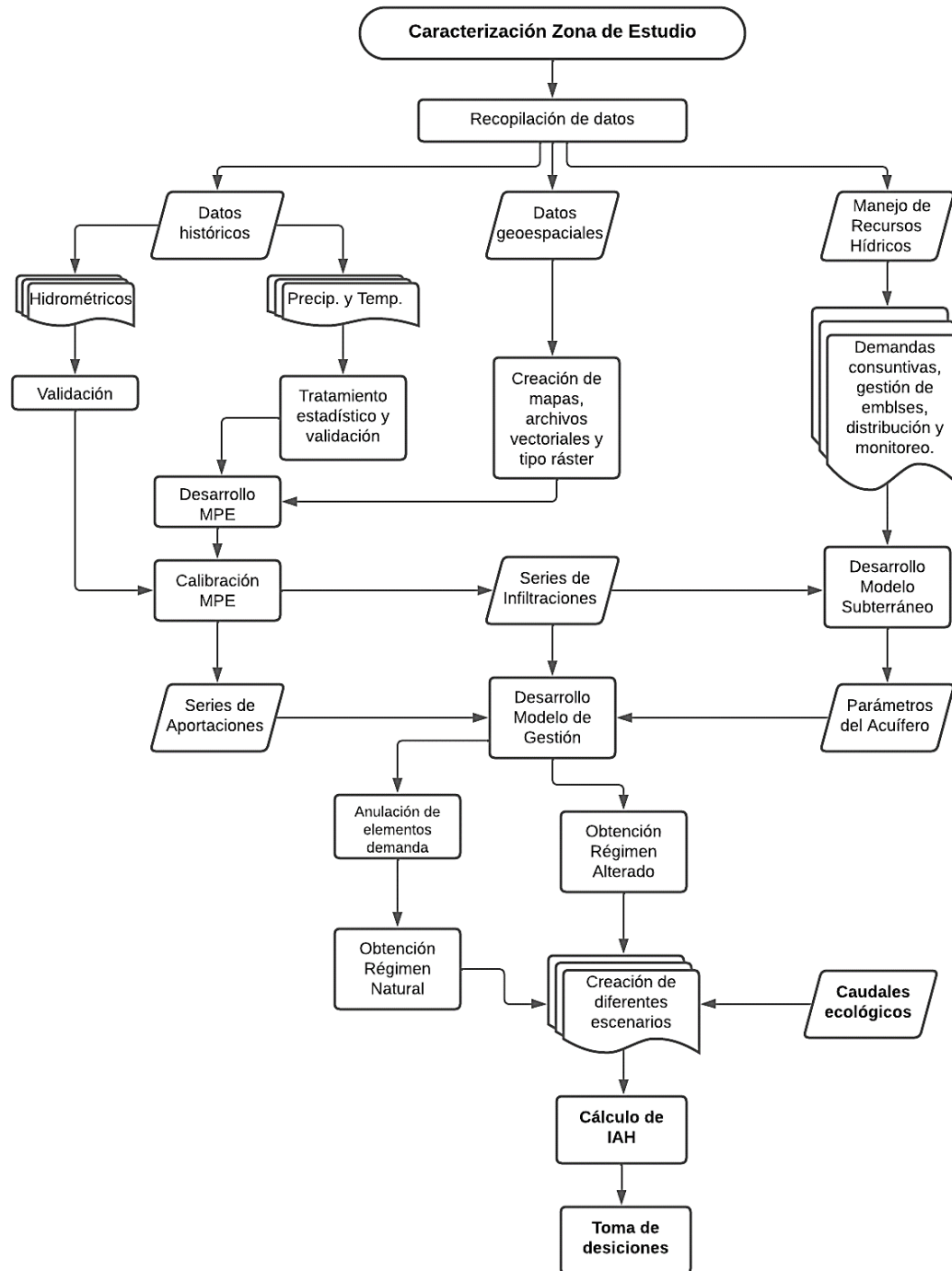


Figura 6. Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Caracterización de la zona de estudio

Es la etapa inicial que permitirá conocer la zona de estudio donde se desarrollará la investigación. Esto se logra mediante el uso de información geoespacial como lo son los archivos vectoriales y ráster obtenidos de diversas bases de datos como lo son el INEGI y CONABIO para los archivos en formato vectorial y para los Modelos Digitales de Elevación (MDE) se hizo uso de la plataforma ASTER de la NASA para obtener un MDE con una resolución de 30 metros y de esta manera delimitar la zona de estudio, conocer las estaciones climatológicas e hidrométricas que están dentro y fuera de la cuenca. Con estos archivos también se logra conocer algunas características geomorfológicas de la cuenca como el área y el perímetro; su punto de salida y el centroide; tipo y uso de suelo; ubicación política e hidrológica, red hídrica, entre otros.

3.2 Recopilación de datos

Es la etapa inicial para la elaboración de los diferentes modelos matemáticos y la más importante ya que la correcta gestión de información permitirá obtener buenos resultados al final de la investigación. Cabe señalar que la información que se requiere debe ser en una escala temporal diaria.

3.2.1 Información Hidrométrica

Se inicia con la recopilación de información de las estaciones hidrométricas presentes dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo considerando como adecuadas para el desarrollo del Modelo de Precipitación-Escorrentamiento aquellas que estén en las subcuencas de cabecera y se encuentren sobre el cauce principal y no sobre los canales ya que la información requerida es aquella que muestre un régimen natural o lo menos alterado posible. Conociendo el registro histórico de las estaciones hidrométricas se puede determinar un periodo histórico base donde coincidan con las estaciones climatológicas y de esta manera poder realizar una mejor preselección. La información recabada de las hidrométricas es obtenida del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) administrado por la Comisión Nacional del Agua.

3.2.2 Información climatológica

Las estaciones climatológicas brindan información de temperatura y precipitación. De primera instancia se realizará una preselección de estaciones tomando en cuenta aquellas que tengan más de 15 años de datos diarios y que estén a no más de un buffer de 20 kilómetros alrededor de la cuenca y dentro de ella para garantizar una correcta distribución espacial de la precipitación y temperatura. La información será recabada de la base de datos de Clima Computarizado (CLICOM).

3.2.3 Manejo de los Recursos Hídricos

Para la elaboración del modelo del acuífero se requieren los datos de los pozos existentes en la cuenca los cuales serán obtenidos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDa) de CONAGUA. Estos registros aportan la información de los diferentes usos consuntivos del agua como lo son las demandas agrícolas, urbanas, de servicios, diferentes usos, industriales, etc. También, se requiere de información piezométrica del año más actual, así como el más antiguo, esto con la finalidad de poder desarrollar un modelo que pueda ser calibrado. Estos datos se han tomado de la información proporcionada por el informe “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán” (CONAGUA, 2022). Además de otros datos como las salidas por manantial, recargas inducidas provocadas por los retornos de riego en la zona agrícola del Distrito de Riego 020 y por fugas en las redes de distribución, la recarga horizontal a través de fracturas en las rocas, salidas por ETP en zonas particulares del acuífero y salidas por flujo subterráneo.

Como se había mencionado con anterioridad, se requiere de los resultados proporcionados por el MPE correspondientes a las infiltraciones o recargas verticales provocadas por la precipitación.

3.3 Análisis y validación de la información climatológica e hidrométrica

En esta etapa se les aplicaran diferentes pruebas estadísticas para conocer la calidad de la información a través de la aplicación de pruebas de homogeneidad e independencia para conocer la tendencia de los datos. Con esta etapa se realizará

la selección de estaciones climatológicas principales, dándole preferencia a aquellas que cubran el registro histórico dado por las estaciones hidrométricas, que pasen la mayoría de las pruebas y que tengan el menor porcentaje de vacíos, los cuales serán llenados para obtener series continuas con un mismo periodo histórico y poder así ingresar estas series al MPE. En el caso de los datos de las estaciones hidrométricas se desea que cumplan con periodo mínimo de 25 años, sin embargo, debido a la escasez de información en el país se analizarán aquellas estaciones que permitan calibrar el modelo y realizar las adaptaciones pertinentes en caso de tener un corto registro histórico.

3.4 Desarrollo de los modelos matemáticos

Como se mencionó anteriormente, la investigación consta de tres modelos para evaluar los impactos de los usos del agua y la implementación de caudales ecológicos mediante los IAH: el Modelo de Precipitación-Escurrimiento, el modelo del acuífero y el modelo de gestión. Esto se logrará mediante el uso de las herramientas mencionadas en el apartado anterior.

3.4.1 Modelo hidrológico superficial

Se comenzará con el desarrollo del MPE ya que es el más complejo y el que requiere de más tiempo en cuanto a análisis de información, este modelo requiere de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial para su elaboración. Además, se debe llevar a cabo la etapa de calibración con ayuda de los datos observados que serían los escurrimientos medidos por las estaciones hidrométricas previamente analizados y validados estadísticamente. Todos estos datos deben ser ingresados en escala diaria.

Si la disponibilidad de información lo permite, se realizará la validación de este modelo para determinar si los resultados obtenidos están apegados a lo que realmente sucede en la cuenca para finalmente obtener los escurrimientos en escala diaria y disponer de ellos para la elaboración del modelo de gestión.

3.4.2 Modelo hidrológico subterráneo

Para el desarrollo de este modelo serán utilizados los datos de las extracciones, características del acuífero como sus conexiones y recargas, además

de las alturas piezométricas en pozos que servirán para calibrar el modelo, tipo de acuífero, etc., utilizando el programa AQUIVAL el cual basa sus cálculos en el método de los autovalores que emplea un procedimiento de cálculo de diferencias finitas.

3.4.3 Modelo de Gestión

La modelación de la gestión del SRH de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, consta de dos modelos en diferente escala temporal. Se desarrolla el modelo de gestión en escala mensual ingresando los datos obtenidos por el modelo superficial (MPE) y el modelo subterráneo del acuífero, ingresando además información de las demandas consuntivas que son abastecidas por escurrimientos superficiales y por bombes del acuífero, datos de los embalses que para este caso son las Presa de Cointzio, la Presa Malpais y el Lago de Cuitzeo, que a pesar de no funcionar como una presa, tiene las características de las entradas, curvas elevación-volumen, tasa de evaporación, a excepción de excedentes. Una vez calibrado el modelo, se procede a realizar el bajado a escala mensual a diaria.

El modelo diario se desarrolla a través de una interface que actualmente se encuentra en etapa de desarrollo. Forma parte del SSD AQUATOOL, teniendo mejoras como georreferenciación, ingreso de nuevas variables que mejoran la interacción entre el sistema superficial y el subterráneo, así como la incorporación de gráficos y por ende la obtención de datos y análisis que en escala mensual no son posibles. Esta interface nueva llamada GeoAquatool contiene diferentes módulos como su antecesora AQUATOOL, y a través del módulo Aqt-Sim es posible realizar el modelo de gestión a escala diaria para de esta manera, tener los datos necesarios para realizar la evaluación de la alteración hidrológica aplicando la metodología de (Richter et al., 1997).

3.5 Evaluación de los Índices de Alteración Hidrológica

Para la evaluación de la alteración hidrológica, se ha utilizado el programa IHA7.1, el cual fue desarrollado por The Nature Conservancy (TNC). Este programa permite calcular las características de los regímenes hidrológicos naturales y alterados partiendo de datos hidrológicos diarios, estos pueden ser

caudales de corriente medidos o simulados, niveles hidrométricos, niveles de lagos, entre otros. La finalidad de calcular estas características es resumir periodos largos de datos hidrológicos diarios en series de parámetros ecológicamente relevantes mucho más manejables.

Esta evaluación puede calcularse para dos tipos de modificaciones en los caudales, para la comparación de dos periodos de tiempo distintos o el análisis de las tendencias a lo largo de un solo periodo. En el primer caso se realiza un análisis anterior y posterior al impacto provocado por la construcción de un embalse, toma de agua o desvío o cualquier otro tipo de perturbación. En el segundo caso es la comparativa de un régimen de referencia, como lo puede ser el régimen natural de caudales de un SRH y un régimen comparativo que generalmente es el régimen alterado, tal como se ha mencionado en el presente trabajo.

Para obtener resultados confiables, Richter et. al (1997) propone que se usen por lo menos veinte años de registros diarios para cada serie de comparación, es decir, si se evalúa la alteración hidrológica anterior y posterior al impacto deben ser veinte años antes y veinte años después. En el caso de la comparativa de regímenes, debe ser una serie de datos de al menos 20 años para cada régimen. En casos de estudio donde sea necesario evaluar eventos extremos, se aumenta esta cantidad de datos como para el análisis de grandes inundaciones u otros eventos extremos.

El número de años de datos necesarios depende de: I) El grado de variabilidad climática; II) la frecuencia o variabilidad del parámetro en particular; III) la severidad de la alteración hidrológica que se está tratando de detectar; y IV) Si el objetivo es caracterizar la tendencia central o el rango de variabilidad interanual.

Los indicadores de alteración hidrológica (iah) pueden ser calculados como estadísticas paramétricas (media/desviación estándar) o no paramétricas (percentil). En la mayoría de los casos, se recomienda usar las estadísticas no paramétricas debido a la naturaleza sesgada (no normal) de los datos.

La metodología define que son un total de 33 parámetros estadísticos que para el caso del análisis no paramétrico son la mediana (P_{50}) y el Coeficiente de Dispersión ($(P_{75} - P_{25}) / P_{50}$). Se calcula para cada uno de los iah en régimen natural y régimen alterado donde a partir de estos, se calcula un factor de desviación del régimen alterado respecto del régimen natural para los parámetros estadísticos. Este se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Factor de Desviación} = \frac{|(\text{Valor R. A.} - \text{Valor R. N.})|}{\text{Valor R. N.}}$$

Finalmente, el programa realiza un conteo de significancia el cual consiste en mezclar de manera aleatoria los datos de la serie y recalcula medianas y coeficientes de dispersión ficticios en ambos regímenes mil veces y muestra como resultado las fracciones de las pruebas para los cuales los valores de desviación resultaron mayores al caso real. Los resultados tienen un valor mínimo de cero y un valor máximo de uno donde:

- Cuando el valor es cero, corresponde a un conteo de significancia bajo. Indica que existe diferencia significativa entre el régimen natural y el régimen alterado.
- Cuando el valor es 1, corresponde a un conteo de significancia alto. Indica que hay poca diferencia entre el régimen natural y el régimen alterado.

En situaciones poco frecuentes, el algoritmo del conteo de significancia puede generar conteos muy bajos dado que se usan valores correspondientes a las medidas de tendencia central (análisis paramétrico) o debido a que existe poca diferencia entre las series de un régimen y otro.

Los 33 iah se calculan y se agrupan de acuerdo a sus influencias en el ecosistema. Los grupos de indicadores propuestos por Richter et al. (1996) son:

1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales.
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas.

3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos.
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas.

En la siguiente tabla se muestran cada uno de los grupos, su parámetro estadístico y su influencia en el ecosistema:

Tabla 8. Resumen de los parámetros estadísticos de los iah y sus influencias en el ecosistema ((Richter et al., 1996)).

Grupode indicadores de alteración hidrológica (iah)	Parámetros hidrológicos	Influencias del ecosistema
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la media o la mediana para cada mes del calendario <i>Subtotal 12 parámetros</i>	• Disponibilidad del habitat para organismos acuáticos • Disponibilidad de humedad del suelo para las plantas • Disponibilidad de agua para los animales terrestres • Disponibilidad de alimentos/cobertura para amíferos con pelo • Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres • Acceso de los depredadores a los sitios de anidación • Influye la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua

Grupos de indicadores de alteración hidrológica (iah)	Parámetros hidrológicos	Influencias del ecosistema
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Mínimos anuales, media de 1 día	• Equilibrio de organismos competitivos, ruderales y tolerantes a las presiones
	Mínimos anuales, medias de 3 días	• Creación de sitios para la colonización de plantas
	Mínimos anuales, medias de 7 días	• Estructuración de la morfología del canal del río y las condiciones físicas del hábitat
	Mínimos anuales, medias de 30 días	• Estrés de la humedad del suelo en las plantas
	Mínimos anuales, medias de 90 días	Deshidratación en los animales
	Máximos anuales, media de 1 día	• Estrés anaeróbico en las plantas
	Máximos anuales, medias de 3 días	• Volumen del intercambio de nutrientes entre los ríos y las planicies de inundación
	Máximos anuales, medias de 7 días	• Duración de las condiciones de presión tales como bajo nivel de oxígeno y concentración de químicos en los ambientes acuáticos
	Máximos anuales, medias de 30 días	• Distribución de las comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación
	Máximos anuales, medias de 90 días	• Duración de los caudales altos para la eliminación de residuos, aeración de los lechos de desove en los sedimentos del canal
	Cantidad de días con caudal cero	
	Índice de flujo base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual	
	<i>Subtotal 12 parámetros</i>	
3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día	• Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos
	Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día	• Predictibilidad/evitabilidad del estrés en los organismos
	<i>Subtotal 2 parámetros</i>	• Acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación • Indicios para el desove de los peces migratorios • Evolución de las estrategias de los ciclos biológicos, mecanismos de comportamiento.

Grupos de indicadores de alteración hidrológica (iah)	Parámetros hidrológicos	Influencias del ecosistema
4. frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días) Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días) <i>Subtotal 4 parámetros</i>	• Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas • Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas • Disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos • Intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación • Disponibilidad de minerales del suelo • Acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas • Influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos)
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias entre valores diarios consecutivos Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre los valores diarios consecutivos. Cantidad de inversiones hidrológicas <i>Subtotal 3 parámetros</i> Total 33 parámetros	• Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes) • Atrapamiento de los organismos en las islas, planicies de inundación (niveles crecientes) • Estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente (varial zone)

El análisis entre dos tipos de regímenes permite la implementación del Análisis del Rango de Variabilidad (ARV) propuesto por Richter et al. (1997). El ARV usa como referencia la variación natural de los valores de los parámetros estadísticos de los iah anteriores al desarrollo para definir el alcance de las alteraciones a los regímenes naturales de caudales. La variación anterior al desarrollo también puede usarse como base para definir las metas iniciales de caudal ecológico. El ARV también genera una serie de factores de alteración hidrológica (AH), que cuantifica el grado de alteración de los 33 parámetros de caudal iah.

En el ARV, la gama completa de datos en régimen natural o anteriores al impacto para cada parámetro se divide en tres categorías diferentes. Los límites

entre las categorías se basan en valores de percentiles (para un análisis no paramétrico) donde se tiene la siguiente demarcación:

- La categoría más baja contiene todos los valores menores o iguales que el percentil 33.
- La categoría media contiene todos los valores que caen en el intervalo entre los percentiles 34 y 67.
- La categoría más alta contiene los valores mayores que el percentil 67.

Posteriormente, el programa calcula la frecuencia esperada con la cual los valores “posterior al impacto” de los parámetros iah deberían caer dentro de una categoría. Luego calcula la frecuencia con la cual los valores anuales “posterior al impacto” de los parámetros iah caen realmente en cada una de las tres categorías. Esta frecuencia esperada es igual a la cantidad de valores en la categoría durante el periodo anterior al impacto multiplicada por la razón entre el número de años posteriores al impacto y al número de años anteriores al impacto. Finalmente, se calcula el factor de alteración hidrológica para cada una de las tres categorías mediante la siguiente expresión:

$$Factor\ AH = \frac{Frecuencia\ observada - Frecuencia\ esperada}{Frecuencia\ esperada}$$

Un valor positivo de AH significa que la frecuencia de los valores en la categoría ha aumentado entre el periodo anterior al impacto y el periodo posterior al impacto (con un valor máximo de infinito), mientras que un valor negativo significa que la frecuencia de los valores ha disminuido (su valor mínimo es -1).

Los valores obtenidos por el programa no tienen un rango de evaluación para determinar si es alta o baja la alteración hidrológica presente en cada tramo y por ende en todo el SHR. Para facilitar la comprensión de las salidas de los iah se realiza una normalización de los valores resultantes dentro de un rango definido, donde cero corresponde a la alteración total y uno a la nula alteración. Esta normalización la describe Monico et al. (2021) en su trabajo de tesis de maestría “Evaluación de la alteración hidrológica y del hábitat en las cuencas fluviales reguladas”.

Se consideran dos condiciones: si el valor del indicador es menor que cero, el valor normalizado será el valor resultante más uno, y si el valor del indicador es mayor que cero, el valor normalizado será dividido por el valor resultante más uno.

$$\text{Si } x \leq 0; iah = x + 1$$

$$\text{Si } x > 0; iah = \frac{1}{(x + 1)}$$

3.5.1 Índice de Alteración Hidrológica Global

Siguiendo la propuesta de Monico et al. (2021), se realiza una agrupación de los iah clasificándolos en 5 grupos. Esta clasificación se ha realizado considerando la interrelación entre el tipo de variable y los factores que intervienen en la evaluación de cada iah. El primer y segundo grupo corresponden a los indicadores estacionales de los meses de invierno y verano, respectivamente. El tercer y cuarto grupo de indicadores representan los indicadores mínimo y máximo extremos, respectivamente. El quinto grupo incluye indicadores relacionados con la frecuencia y duración de los pulsos y cambios en las condiciones hidrológicas. La Tabla 9 presenta estos grupos.

Tabla 9. Clasificación de indicadores de alteración hidrológica.

Grupo IAH	Descripción
IAHG1	Magnitud Condiciones Hidrológicas invernales mensuales
IAHG2	Magnitud Condiciones Hidrológicas de verano mensuales
IAHG3	Magnitud y duración de los mínimos anuales
IAHG4	Magnitud y duración de los máximos anuales
IAHG5	Frecuencia y duración de los pulsos y cambios en las condiciones hidrológicas

Los cinco indicadores se calculan con un promedio ponderado de los iah considerado en cada grupo, se representa con la siguiente ecuación:

$$IAHGi = \sum C_i * iah_{n,i}$$

$$\sum_1^n C_i = 1$$

Donde:

Iah = indicadores de alteración hidrológica considerados en el grupo

Ci = Factor de ponderación asignado para cada *iah*

Finalmente se define un índice general de alteración hidrológica para cada tramo de río, que combina los cinco IAHG detallados anteriormente. El factor de ponderación atribuido a cada IAHG depende de la importancia del IAHG en la cuenca de estudio.

$$IAH_{g,i} = \sum k_j * IAHG_j$$
$$\sum k_j = 1$$

Donde:

IAHg = Índice de alteración general por tramo de río

IAHG = índice de alteración por grupo

Kj = Factor de ponderación de cada uno de los índices obtenidos

Para conocer el grado de alteración global en toda la cuenca. Se realiza un promedio aritmético de todos los IAHg calculados para cada tramo de análisis.

3.6 Determinación de Caudales Ecológicos

La metodología marcada por la NMX-AA-159-SCFI-2012 es aplicable a caudales medidos y caudales simulados, por lo que una vez calibrado y validado el MPE, se plantea aplicar la metodología de la norma y determinar un caudal ecológico donde minimice la afectación a las garantías de las demandas y de esta manera observar el comportamiento del Sistema de Recursos Hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

4. Aplicación al caso de estudio

La cuenca del Lago de Cuitzeo ha sido el presente caso de estudio dadas sus condiciones actuales y la factibilidad de la aplicación de la metodología descrita anteriormente. Las características geomorfológicas, ubicación política e hidrológica de dicha cuenca se presentan a continuación. De igual manera, dado que la metodología implica el desarrollo de un modelo de gestión, este comprende el acuífero por lo que también se describe toda la información relacionada con el Acuífero Morelia-Queréndaro.

4.1 Caracterización de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

El uso de Sistemas de Información Geográfica permite hacer un reconocimiento de la zona de estudio para conocer su ubicación política e hidrológica, características geomorfológicas de la cuenca, preselección de estaciones climatológicas y la representación de los resultados obtenidos.

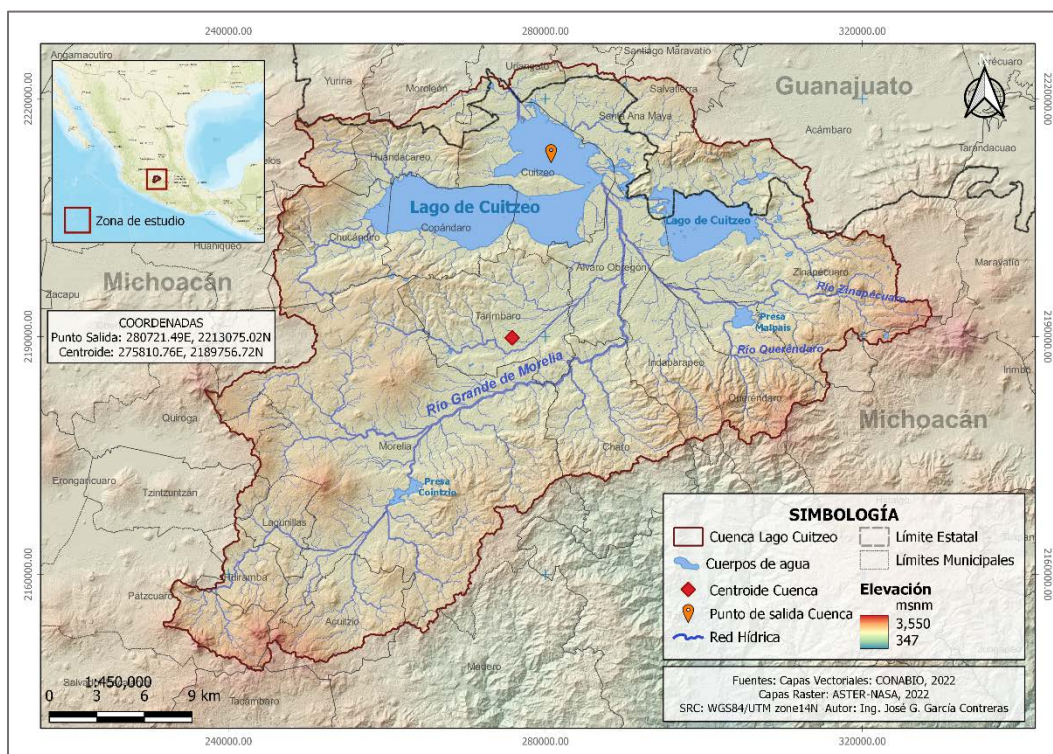


Figura 7. Zona de estudio: Cuenca del Lago de Cuitzeo

La cuenca del Lago de Cuitzeo está ubicada en la parte centro del país, específicamente en la parte norte del Estado de Michoacán, con una pequeña porción en el Estado de Guanajuato. Tiene una superficie de aproximadamente 3,940 km² y un perímetro de 425 km. Es de tipo endorreico por lo que su punto de salida se encuentra en la parte más baja del vaso del lago. Sus principales afluentes son el Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro que alimentan al Lago de Cuitzeo. Dentro de la cuenca se encuentran la Presa de Cointzio que suministra agua para uso urbano y uso agrícola para la Ciudad de Morelia; y la Presa Malpais que suministra en su mayoría a las zonas de riego pertenecientes a Queréndaro y las comunidades ubicadas aguas abajo.

Los municipios que conforman la cuenca se muestran en la siguiente tabla donde se muestran las áreas que están dentro de la cuenca para cada municipio, siendo Morelia y Zinapécuaro aquellos con mayor proporción.

Tabla 10. Municipios que abarca la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

No.	Municipio	Entidad	Área (Km ²)	% de área en la Cuenca
1	Acámbaro	Gto.	145.81	3.71%
2	Moroleón	Gto.	32.32	0.82%
3	Salvatierra	Gto.	61.41	1.56%
4	Uriangato	Gto.	30.02	0.76%
5	Yuriria	Gto.	13.54	0.34%
6	Acuitzio	Mich.	137.38	3.49%
7	Álvaro Obregón	Mich.	159.52	4.06%
8	Charo	Mich.	199.83	5.08%
9	Chucándiro	Mich.	179.88	4.58%
10	Copándaro	Mich.	173.28	4.41%
11	Cuitzeo	Mich.	252.99	6.44%
12	Hidalgo	Mich.	14.84	0.38%
13	Huandacareo	Mich.	95.72	2.43%
14	Huaniqueo	Mich.	5.64	0.14%
15	Huiramba	Mich.	64.21	1.63%
16	Indaparapeo	Mich.	167.25	4.25%
17	Lagunillas	Mich.	72.66	1.85%
18	Madero	Mich.	4.08	0.10%
19	Morelia	Mich.	1012.14	25.75%
20	Morelos	Mich.	43.05	1.10%
21	Pátzcuaro	Mich.	81.66	2.08%
22	Queréndaro	Mich.	160.46	4.08%
23	Quiroga	Mich.	25.73	0.65%
24	Santa Ana Maya	Mich.	104.09	2.65%
25	Tacámbaro	Mich.	0.82	0.02%
26	Tarímbaro	Mich.	255.69	6.50%
27	Tzintzuntzan	Mich.	13.60	0.35%
28	Zinapécuaro	Mich.	423.69	10.78%

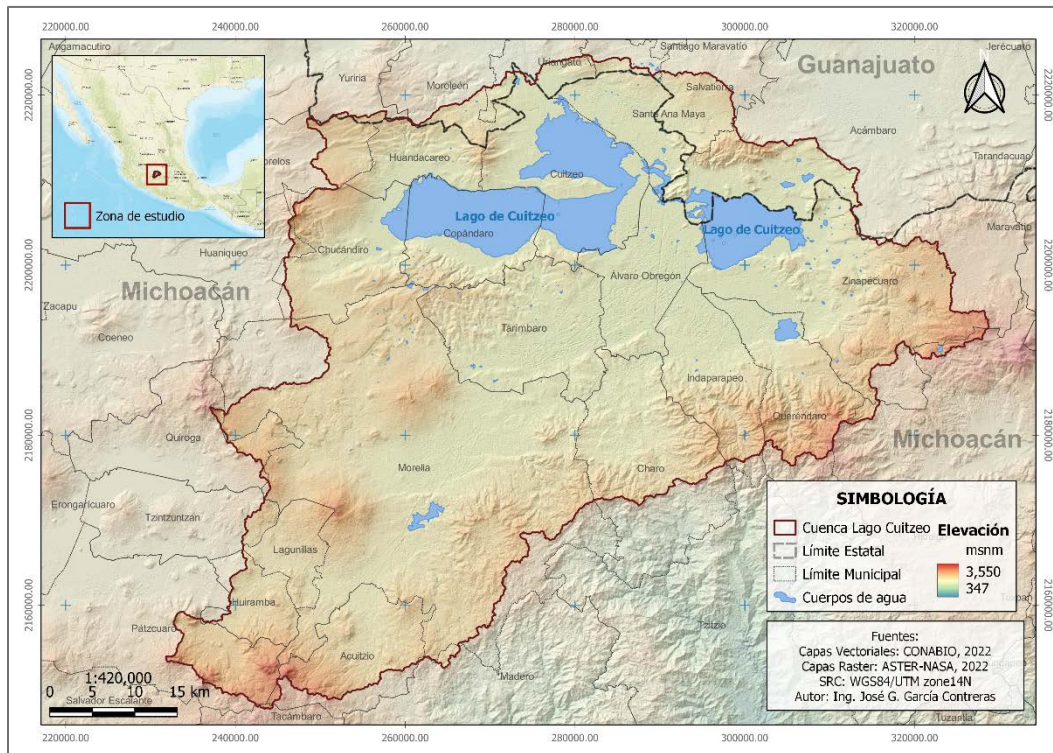


Figura 8. Municipios de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

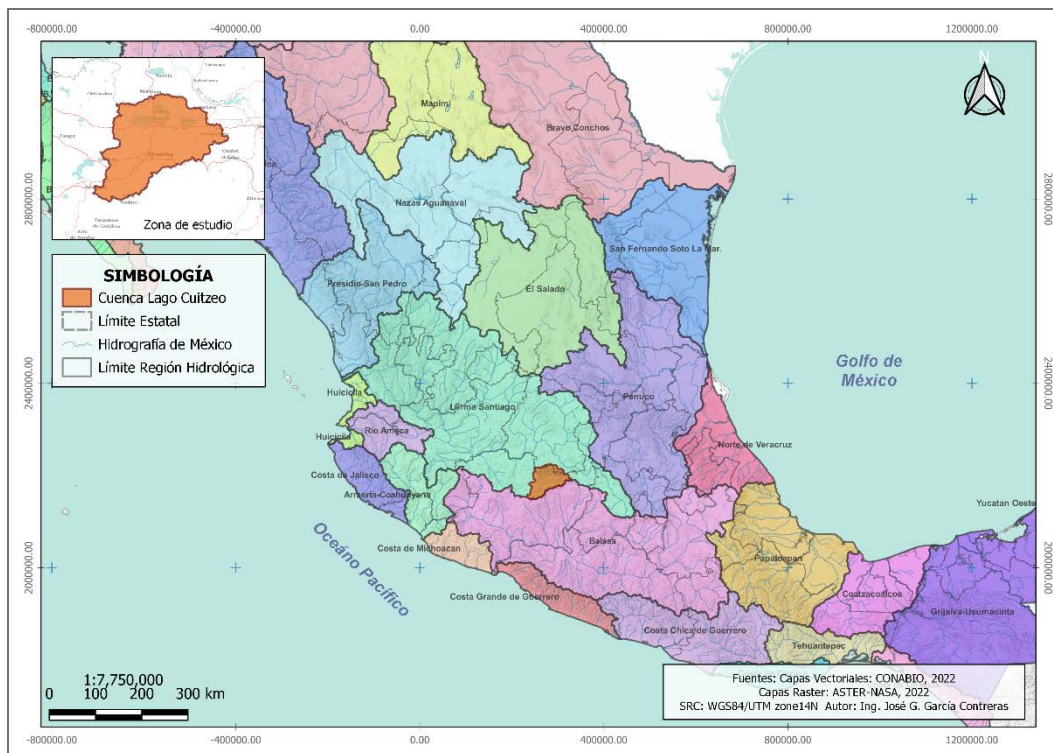


Figura 9. Ubicación Región Hidrológica de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

En cuanto a la ubicación hidrológica la zona de estudio pertenece a la Región Hidrológica Lerma-Santiago y a la Subregión Alto Lerma.

Los usos de suelo presentes en la cuenca son los mostrados en la siguiente tabla donde se puede observar que la agricultura es el tipo de suelo predominante en la cuenca, es por esto que la mayoría de los recursos hídricos disponibles se destinan a esta actividad.

Tabla 11. Superficie de los usos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Descripción	Área (Km ²)	% de área en la Cuenca
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	4.04	0.10%
ASENTAMIENTOS HUMANOS	242.20	6.16%
BOSQUE	625.77	15.92%
CUERPO DE AGUA	322.73	8.21%
AGRICULTURA	1365.35	34.73%
MEZQUITAL XERÓFILO	1.49	0.04%
PASTIZAL	500.08	12.72%
VEGETACION SECUNDARIA	809.10	20.58%
TULAR	60.52	1.54%

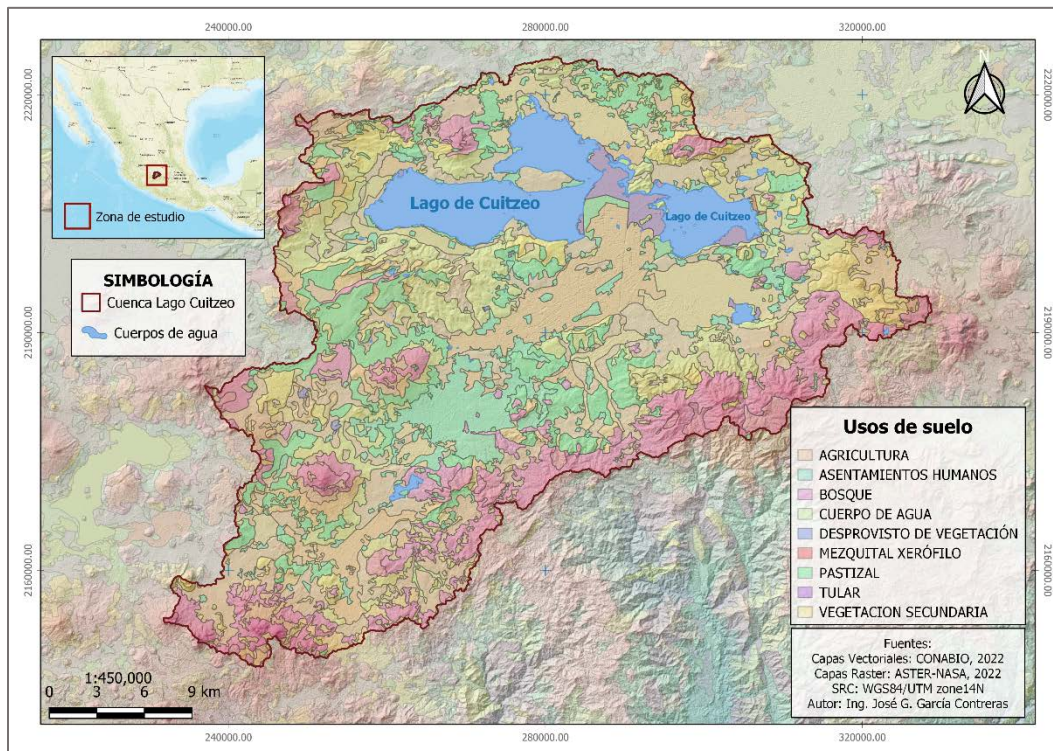


Figura 10. Tipos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Los principales tipos de suelo de la cuenca son el vertisol y el luvisol, siendo estos suelos arcillosos que permiten retener mucha humedad y tienden a tener poca filtración de agua.

Tabla 12. Superficie de los tipos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Descripción	Área (Km ²)	% de área en la Cuenca
VERTISOL	1351.10	34.37%
LUVISOL	767.37	19.52%
SOLOCHAK	86.07	2.19%
FEOMZEM	241.81	6.15%
ACRISOL	464.71	11.82%
LITOSOL	117.66	2.99%
GLEYSOL	13.89	0.35%
ANDOSOL	384.95	9.79%
RANKER	63.07	1.60%
PLANOSOL	8.42	0.21%
FEOMZEM	87.95	2.24%
REGOSOL	1.77	0.04%

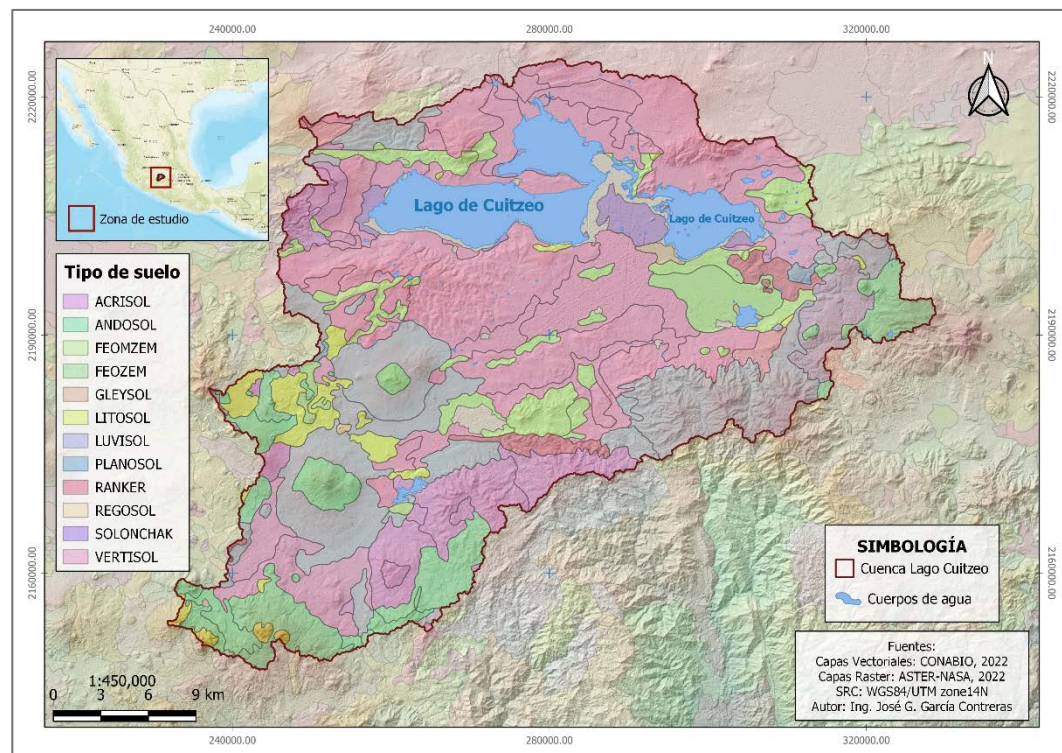


Figura 11. Usos de suelo presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

La red hídrica de la cuenca consta de corrientes en su mayoría temporales y que son tributarias de los principales afluentes de la cuenca los cuales son el Río Grande de Morelia donde confluyen el Río Tirio y el Río Tiripetío; y el Río Queréndaro que recibe los escurrimientos del Río Zinapécuaro.

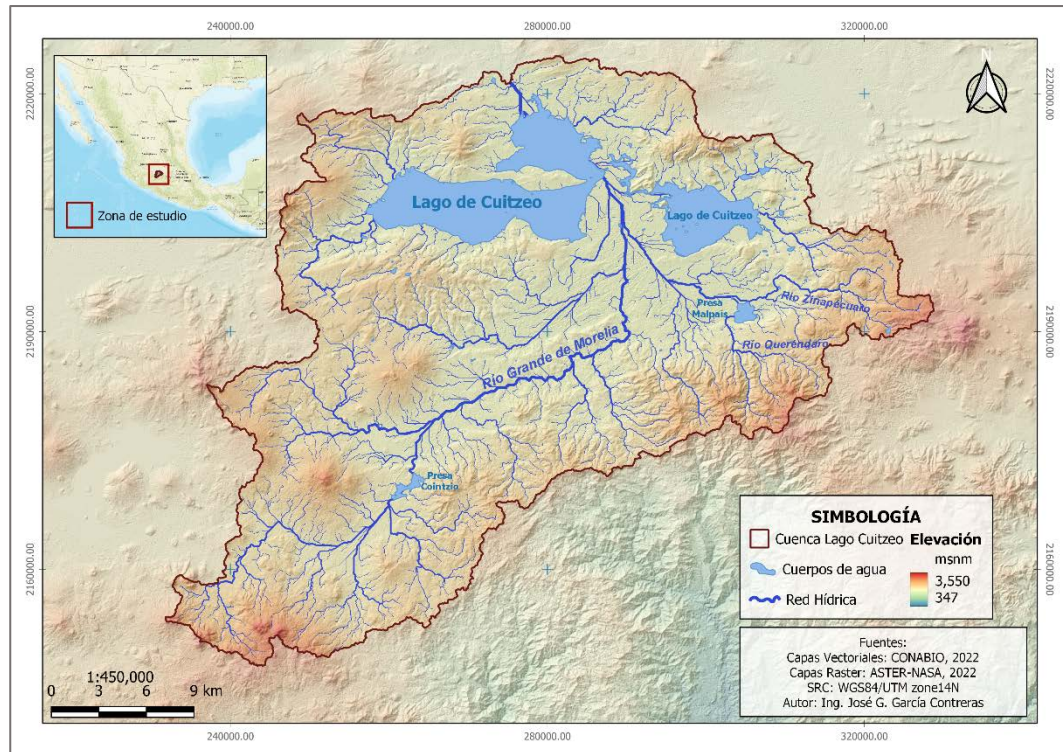


Figura 12. Red Hídrica de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

4.2 Caracterización del Acuífero 1602 Morelia-Queréndaro

La información recopilada sobre el acuífero fue obtenida en el informe “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán” (CONAGUA, 2022). Este informe comprende estudios técnicos que van desde los años de 1977 a 2006. Algunos con información hidrogeológica, con el objetivo de evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona.

4.2.1 Localización

El acuífero Morelia-Queréndaro, definido con la clave 1602 en el Sistema de Información geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los

oriente por el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de los terrenos que ocupa y circunda la Laguna de Los Azufres, en el Estado de Michoacán”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 13 de febrero de 1956.

El centro del acuífero por el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los municipios de Morelia y Charo, Mich.”, publicado en el DOF el 10 de febrero de 1964.

Al suroeste por el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuífero en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona”, publicado en el DOF el 27 de junio de 1975.

El resto del acuífero por el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de mantos acuíferos y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los municipios del estado de Michoacán”, publicado en 20 de octubre de 1987. Tres decretos se clasifican como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros y uno (Zona del Bajo Balsas) como tipo II que sólo permite extracciones para usos domésticos.

En el acuífero se localiza el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro; aún no se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2009, los principales municipios Morelia, Álvaro Obregón, Charo y Tarímbaro, se ubican en la zona de disponibilidad 5; Zinapécuaro de Figueroa, en la zona de disponibilidad 7; Cuitzeo del Porvenir, Queréndaro, Indaparapeo y Huandacareo, en la zona de disponibilidad 6; Acuitzio del Canje, en la zona de disponibilidad 9.

El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca (15) Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993, también pertenece a la Comisión de Cuenca (15C) Lago de Pátzcuaro, instalado el 18 de mayo de 2004.

4.2.3 Estudios hechos con anterioridad

Los estudios realizados al acuífero se muestran en el **anexo A** para su revisión ya que son antecedentes con información hidrogeológica importante que tuvo como objetivo el evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona.

4.2.4 Fisiografía

El acuífero Morelia-Queréndaro, según el INEGI (1991), se ubica en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, cubre parte de tres subprovincias, la Neovolcánica Tarasca, Sierras y Bajíos Michoacanos, y Mil Cumbres.

El Eje Neovolcánico está representado por grandes expresiones de vulcanismo explosivo, originado durante eventos relativamente recientes; la segunda, alcanza desarrollo significativo de sistemas de fallas asociado con manifestaciones volcánicas y grabens o fosas.

El vulcanismo de la región se generó a lo largo de lineamientos de fallas formando las sierras circundantes y creando paisajes de morfologías combinadas y notable singularidad.

4.2.5 Clima

De acuerdo con los datos de las 26 estaciones climatológicas seleccionadas (ERIC II, 1999), con registros de 1940 a 2004, el clima es templado subhúmedo. Los promedios anuales de temperatura, precipitación y evaporación potencial son 17.4° C, 797 mm y 1,810 mm respectivamente; el régimen de lluvias se presenta de junio a septiembre.

La precipitación menos abundante se presenta en la porción norte del acuífero y la más cuantiosa en la porción sureste.

4.2.6 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 12, Lerma-Chapala-Santiago, constituye una región alta que se caracteriza por tener zonas planas y amplias, que basculan ligeramente hacia el noroeste. Estos valles se encuentran separados por elevaciones que corresponden a estructuras volcánicas, cuyas altitudes varían entre los 1,600 y 2,000 m. En la porción norte del acuífero se encuentran orientados de

oeste a este. Esta región hidrológica comprende parcialmente cinco cuencas en el estado, a dos de ellas pertenece el acuífero.

Cuenca Río Lerma-Salamanca, tiene dos subcuencas intermedias: "Presa Solís-Salamanca" y "Salamanca-Río Angulo".

Cuenca Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Laguna de Yuriria, el lago de Pátzcuaro, el de Cuitzeo y la laguna de Yuriria ligan su origen al sistema volcánico que fue afectado por fallas. Durante largos periodos de erosión las amplias depresiones han sido azolvadas, reflejándose principalmente en el lago de Cuitzeo. En la zona central de la porción de esta cuenca se localiza el Distrito de Riego Morelia-Queréndaro.

La corriente superficial más importante es el río Grande de Morelia, corre por un estrecho valle fluvial, situado en la porción occidental de la zona y desemboca en una extensa planicie, ubicada en la porción central de la misma.

4.2.7 Geomorfología

El acuífero define rasgos geomorfológicos resultado de fuerzas tectónicas y actividad volcánica muy intensas, que actuaron combinadamente y alternadamente con la erosión. Hay dos unidades morfológicas presentes en la zona: a) montañas y lomeríos y, b) valles.

Las montañas y lomeríos están constituidos predominantemente por rocas ígneas extrusivas de edad Terciaria, en la porción sur de la zona, las constituyen andesitas y basaltos del Paleógeno- Neógeno, sus montañas alcanzan elevaciones superiores a los 3,000 msnm, presentan un relieve muy abrupto, con frentes escarpados y fuertes pendientes.

Los valles son de origen tectónico y fluvial, actualmente están ocupados en su mayor parte por tres unidades del Distrito de Riego 020. La planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro, ubicada en la porción central de la zona, está formada por las llanuras de inundación de los ríos y arroyos, que siguiendo cursos divagantes desembocan al lago de Cuitzeo.

4.2.7.1 GEOLOGÍA

La región se encuentra afectada por sistemas de fallas con dirección E-W y NE-SW que dieron origen al valle donde se aloja el sistema acuífero. Están presentes ignimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente (Corona y Birgit, 2001).

Las rocas que afloran dentro de los límites del acuífero son de tipo ígneo extrusivo básica del periodo cuaternario, según INEGI 2007. (Figura 14) muestra la geología general del acuífero.

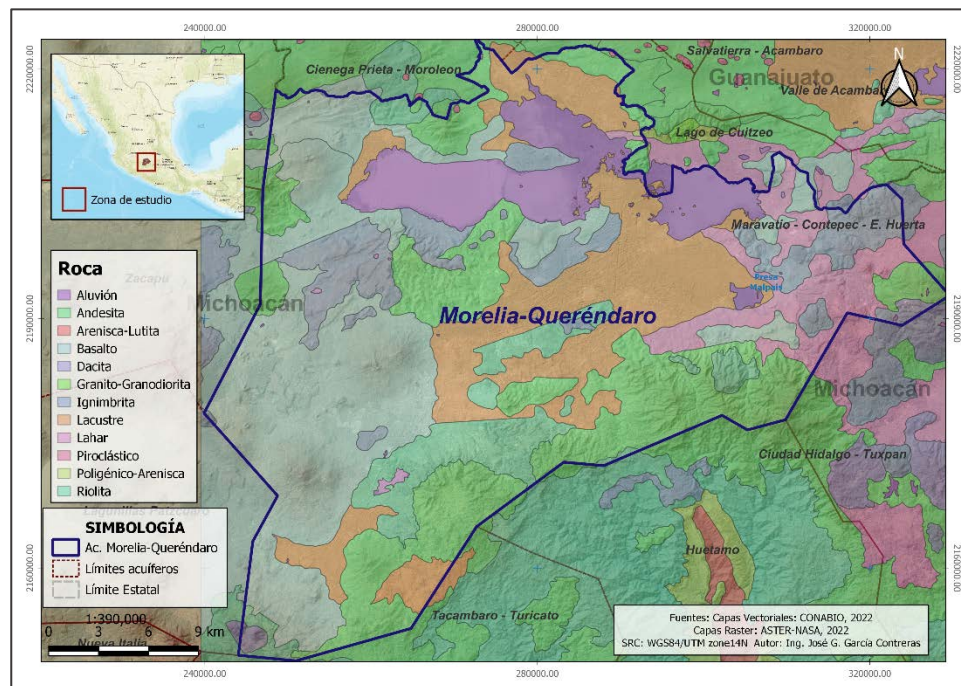


Figura 14. Geología del acuífero Morelia-Queréndaro.

4.2.7.2 Estratigrafía

Las unidades que afloran en la zona son:

Rocas ígneas. Está constituida por tobas, brechas y lavas ignimbríticas, de composición riolítica (Mioceno Inferior). En la sierra de Mil Cumbres, suprayace a derrames andesíticos de edad Oligoceno. En la sierra de Mil Cumbres y en el camino a Tzitzio, su espesor que va de 300 a 350 m, al este de Copándaro, es del

orden de 120 m. Está ampliamente distribuida en la porción sureste del área y en la ribera sur del lago de Cuitzeo.

Derrames andesíticos. Derrames de lavas, aglomerados y brechas de composición andesítica (Mioceno Medio). Las lavas se presentan al NNE del poblado de Tarímbaro en ocasiones hasta con pseudoplegamientos, como en la cantera cercana al poblado de Álvaro Obregón. Su espesor es cercano a los 400 m, aflora en los macizos montañosos, en el frente de la falla que limita al valle de Morelia-Álvaro Obregón por el SE, constituyendo la elevación en donde se asienta este último poblado y en el extremo norcentral del área, en el fondo de las barrancas, alrededor del poblado Cañada del Herrero y en el frente del alto de la falla normal que limita a la planicie del Lago de Cuitzeo, por el sur.

Lavas, brechas y conglomerados. Predominantemente derrames de lavas, brechas y conglomerados basales (Mioceno-Plioceno). En la porción norte el espesor es del orden de 260 m y en la barranca del arroyo Uval, de 120 m.

Ignimbritas y tobas riolíticas. Ignimbritas o tobas soldadas, vidrios, derrames y tobas vítreas, cristalinas, arenosas y arcillosas, pumicíticas y de composición dacítica y riolítica (Plioceno Inferior-Medio). Se han medido espesores de cerca de 350 m. En el área del poblado de Morelos, afloran más de 150 m de tobas soldadas, se les midió un espesor máximo de 140 m, sin embargo, en los alrededores de la ciudad de Morelia, muestran que el espesor de las tobas arenosas y de las ignimbritas, aumentan del oriente de dicha ciudad hacia el poniente de la misma.

Depósitos lacustres y gravas, arenas y tobas. Constituida por sedimentos o depósitos, en ambientes lacustres, de constitución arcillo-arenoso, que se gradúan vertical y horizontalmente a gravas, arenas y tobas (Plioceno Superior). Sus espesores pueden ser de hasta 80 m y llegar a ser mayores al oriente del área. Sus afloramientos se restringen hacia las porciones central y centro oriental del área, y en las inmediaciones del noreste de la ciudad de Morelia, de igual manera, al norte de ésta a unos 2 km, antes de la bifurcación hacia Álvaro Obregón y Cuitzeo.

Derrames basálticos y andesíticos. Son derrames de lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto-andesítica, andesita-basáltica y andesítica (Plioceno Superior). En la porción oriental, sus espesores son de un máximo de 25 m y en la occidental, pueden alcanzar hasta del orden de 400 m. Los afloramientos más amplios, conforman los aparatos volcánicos: La Trampa, El Irauco y El Picacho, así como pequeñas mesetas que coronan a los depósitos de ignimbritas y tobas riolíticas, al norte del poblado Santa Ana del Arco o a los lacustres, como al NE del poblado Francisco I. Madero.

Lavas, brechas y tobas basálticas. Lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto andesítico y andesíticas (Plioceno Tardío-Cuaternario Temprano). Sus espesores son variables, al poniente de la ciudad de Morelia es de 60 m, estos espesores deben de aumentar hacia el centro de emisión del Quinceo, probablemente hasta unos 600 m tomando en cuenta su altura.

Lavas, escorias, brechas, piroclastos y tobas. Derrames de lavas, escorias, brechas, aglomerados, piroclastos y lapilli (Cuaternario Medio). Debido a los grandes volúmenes de rocas volcánicas de esta unidad, los espesores deben de ser cientos de metros, si se considera que algunos de los valles u hondonadas, donde afloran rocas de esta unidad, tienen un desnivel de más de 400 m con respecto a los afloramientos contiguos, también de rocas de esta unidad. Sus afloramientos se circunscriben a la porción poniente del área y continúan hacia el poniente y sur poniente, ya que estos se consideran como pertenecientes al extremo noreste de la meseta Tarasca.

Gravas, arenas, limos y arcillas. Esta unidad está constituida por limos y arcillas, depositados en ambiente lacustre; gravas, arenas y arcillas de origen residual y aluviones compuestos por conglomerados; gravas, arenas, limos y arcillas. Se les asigna una edad del Reciente, aunque los lacustres a profundidad, en la porción oriente del valle de Morelia-Álvaro Obregón, pueden rebasar esta edad, lo mismo que en el de Lagunillas y Tiripetío. Los espesores de los residuales deben ser mayores a unos 3 m; los aluviones, pueden llegar a los 10 m, en la periferia del valle Morelia-Álvaro Obregón y los lacustres es posible que tengan

algunas decenas en el centro del valle y en el de Tiripetío y Lagunillas. Están distribuidos ampliamente en el área, aunque en general sus afloramientos, son de reducidas dimensiones, los residuales cubren por lo general las partes altas o laderas de las anteriores unidades, los aluviones se encuentran en las hondonadas, fondo del lago de Cuitzeo, valle Morelia-Álvaro Obregón y los lacustres, en la porción oriental del anterior valle y en el subsuelo de los otros dos.

4.2.7.3 Geología estructural

En lo concerniente a los alineamientos estructurales, es posible dividir a la provincia en los sectores poniente, oriente y central, basándose en la concentración de ellas y los sentidos preferenciales que muestran. El sector poniente es afectado por sistemas de alineamientos de dirección SE-NW; en el sector oriental los alineamientos observan una dirección SW-NE, S-N y NNW-SSE; siendo afectada la porción central que es donde se ubica la zona, predominantemente por el sistema SW-NE, observándose también alineamientos de sentido E-W y NNW-SSE.

Se observa la existencia de fosas tectónicas orientadas E-W, como las que corresponden con los lagos de Chapala y Cuitzeo, así como, la zona del Bajío Guanajuatense a S-N, como las de los valles de México y Toluca.

Por otro lado, se observan alineamientos estructurales de direcciones coincidentes con los del sector central, esto es, SW-NE, E-W y SSE-NNW, en donde la mayoría de ellos corresponden a trazas de fallas normales, con sus bloques bajos hacia el norte. Los sistemas sensiblemente E-W y SW-NE, con escalonamientos hacia el N y NW propiciaron los valles de Morelia-Álvaro Obregón, el de Atapaneo-Charo y la depresión existente al SE de Morelia, entre los poblados de Buenavista-Zurumbeneo; debiéndose al sistema SW-NE la depresión en donde se asienta la Cd. de Morelia, que corresponde a un gran alineamiento sensiblemente SW-NE.

El graben es evidenciado por la abrupta terminación de los afloramientos de las unidades miocénicas ubicadas al oriente, sur y suroriente de la Cd. de Morelia, esto es, en la porción suroriental del área, lo que equivale a conceptualizarla como el pilar tectónico oriente de él, el cual hacia el valle de Morelia-Álvaro Obregón es profundizado por el sistema de fallas que originó este valle. El pilar tectónico

occidental se manifiesta al noroeste de Tarímbaro, sitio en donde afloran las rocas miocénicas y es cubierto hacia el sur por los derrames basálticos y andesíticos de edad Plio-Cuaternaria. La fosa tectónica o el graben, quedó enmascarado por el depósito de ignimbritas o tobas soldadas y en él se definen, además del valle de Morelia, el de Tiripetío y la depresión en donde se ubica el vaso de la Presa Cointzio; que prácticamente lo cruzan del SW al NE, corresponde a los sistemas de fallas que lo formaron.

Por último, basándose en la descripción anterior de los sistemas de fallas, es posible inferir que, el sistema más antiguo identificable es el SW-NE, el cual afectó a las rocas de edad Mio- Pliocénicas y anteriores, después de él, irrumpieron las ignimbritas o tobas soldadas y se sucedieron los restantes sistemas como el E-W y SSE-NNW, que afectan a las ignimbritas. Así mismo, la afectación de las ignimbritas por el sistema de fallas SW-NE, determina que éste se activó poco después de que éstas ocurrieron, posteriormente acontecieron los otros sistemas.

Las fallas de transurrencia, desplazamiento lateral derecho, son de los últimos sistemas en aparecer, aunque son anteriores al sistema de sentido E-W, pues aparentemente son cortadas por éste.

4.2.7.4 Geología del subsuelo.

La geometría del acuífero está definida por la depresión tectónica originada por el sistema de fallas SW-NE, en rocas de composición basáltica y conglomerados Mio-Pliocénicos, que afloran en la barranca del Arroyo Uval. Por lo tanto, el conglomerado se considera como basamento del sistema acuífero. Sus fronteras laterales están constituidas, al oriente por el pilar tectónico que limita a la fosa, como tal lo demuestra el pozo Mil Cumbres, perforado en las faldas del Punhuato, el cual hasta una profundidad de 202 m, cortó basaltos andesíticos, aglomerados y al conglomerado basal, resultando fallido; hacia el sur-oriente de la ciudad de Morelia se está también dentro del pilar tectónico, pero el cruce de fallas del sistema E-W determinó que las rocas ignimbritas, basálticas y posiblemente el conglomerado mismo, adquirieran alta permeabilidad; la frontera lateral poniente no está bien

definida. Los espesores de este acuífero son del orden de los 300 m en el centro del acuífero, al centro-sur de 400 m.

En la planicie Álvaro Obregón-Queréndaro, las rocas que alojan al acuífero son variables, pero por lo general en su porción superior son clásticas, del tamaño de gravas y arenas, alojándose también en basaltos y tobas pumíticas, hacia las laderas de las porciones centro-norte y norcentral; hacia las laderas de la porción sur, los clásticos y lacustres suprayacen a las andesitas basálticas Miocénicas.

4.2.8 Hidrogeología

4.2.8.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo. El acuífero se aloja en una depresión tectónica y está conformado, en su porción superior, por sedimentos clásticos de granulometría variada, así como sedimentos arcillosos que se depositaron en la parte baja de la cuenca, donde se localiza el Lago de Cuitzeo; la porción inferior está constituida por rocas volcánicas que presentan permeabilidad primaria y secundaria, principalmente basaltos y tobas.

El medio granular y fracturado conforman una misma unidad hidrogeológica que presenta en general permeabilidad media a alta y un espesor promedio de 300 a 400 m.

Las distintas unidades que conforman el acuífero muestran variaciones: al poniente está alojado principalmente en tobas pumíticas con horizontes líticos y arcillosos y tobas soldadas, cuya geometría es controlada por los sistemas de fallas W-E; hacia Álvaro Obregón y Queréndaro está conformado principalmente por sedimentos clásticos del tamaño de gravas y arenas y hacia la zona contigua al Lago de Cuitzeo por sedimentos arcillosos, brechas andesíticas, basaltos así como brechas y cenizas basálticas.

4.2.9 Comportamiento hidráulico

4.2.9.1 Profundidad al nivel estático

Los valores de profundidad al nivel estático varían de 10 a 200 m, valores menores de 10 m se registran en el valle de Álvaro Obregón y Huandacareo; en tanto que los valores mayores, entre 160 y 200 m, se registran entre las localidades de Mil Cumbres, Peña Blanca, Fraccionamiento Coto del Ángel y Valle de las Flores. En la zona aledaña al Lago de Cuitzeo las profundidades varían entre 10 y 25 m. Profundidades del orden de los 50-160 m se presentan en la ciudad de Morelia (Figura 15).



Figura 15. Profundidad al nivel estático (m), 2007. Fuente: CONAGUA, 2022.

4.2.9.2 Elevación del nivel estático

En lo que respecta a la configuración de la elevación del nivel estático para octubre de 2007 varía de manera general de 1840 a 2000 msnm, estas curvas van ascendiendo del valle a las serranías, en la zona urbana de Morelia se presentan elevaciones de 1820 en la zona noreste a 1880 en la zona suroeste (Figura 16).

En el área del Río Grande, el agua subterránea circula de los flancos montañosos hacia la faja fluvial y luego a lo largo de ésta con dirección suroeste-noreste; en el sector de la ciudad de Morelia se aprecia una depresión piezométrica local, originada por la concentración de pozos, hacia la cual converge el flujo subterráneo. El Agua escapa de esta área hacia la de Álvaro Obregón-Queréndaro a través de la estrecha sección fluvial y de lomeríos. En la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro, el agua fluye subterráneamente de los cerros circundantes hacia el Lago de Cuitzeo, cuya elevación media es de 1,820 msnm; las aportaciones más cuantiosas proceden de los macizos montañosos que la limitan por el oeste y suroeste.

Aparentemente, la meseta alargada constituida por tobas riolíticas y coronada por basaltos en su flanco norte, que separa a las áreas de Morelia y Álvaro Obregón-Queréndaro, es receptora de recarga para ambos acuíferos.

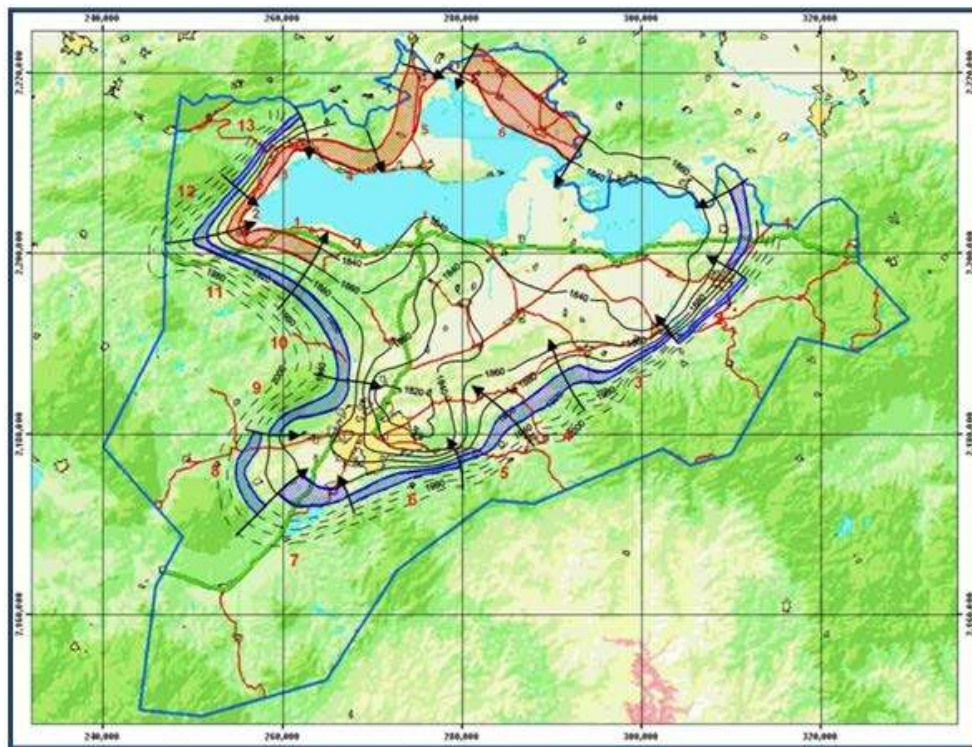


Figura 16. Elevaciones de nivel estático (msnm), 2007 y red de flujo subterráneo Fuente: CONAGUA, 2022.

5. Resultados

5.1 Información Hidrométrica

Las estaciones hidrométricas que se encuentran dentro de la cuenca son las que se muestran en la lista siguiente:

Tabla 13. Estaciones Hidrométricas que se encuentran en la zona de estudio.

No.	CLAVE	NOMBRE	CORRIENTE	COORDENADAS UTM	
				X	Y
1	12093	ZINZIMEO	RIO QUERENDARO	293059.51	2198401.31
2	12219	COINTZIO	RIO GRANDE DE MORELIA	263188.79	2173398.24
3	12221	ATAPANEO	RIO GRANDE DE MORELIA	271902.96	2182512.88
4	12223	QUIRIO	RIO GRANDE DE MORELIA	289770.28	2190966.17
5	12312	COINTZIO	CANAL LA HUERTA	263328.38	2172934.97
6	12314	QUERENDARO	RIO QUERENDARO	302092.42	2191746.83
7	12323	SALIDAS DE MALPAIS	RIO QUERENDARO	303572.52	2193975.44
8	12341	SALIDA TUNEL	RIO GRANDE DE MORELIA	263089.14	2172476.71
9	12347	SANTIAGO UNDAMEO	RIO GRANDE DE MORELIA	260010.97	2168980.12
10	12365	EL SALTO	RIO GRANDE DE MORELIA	263036.97	2172938.83
11	12494	PLANTA POTABILIZADORA	TOMA AGUA POTABLE	270668.71	2177145.69
12	12560	XOCONOLE	CANAL XOCONOLE	289622.92	2190814.14
13	12588	EL PLAN	RIO GRANDE DE MORELIA	289354.90	2192755.03
14	12620	TARIMBARO	ARROYO GUADALUPE	267045.56	2189712.48
15	12932	ZINZIMEO	CANAL ZINZIMEO	289654.00	2193428.10

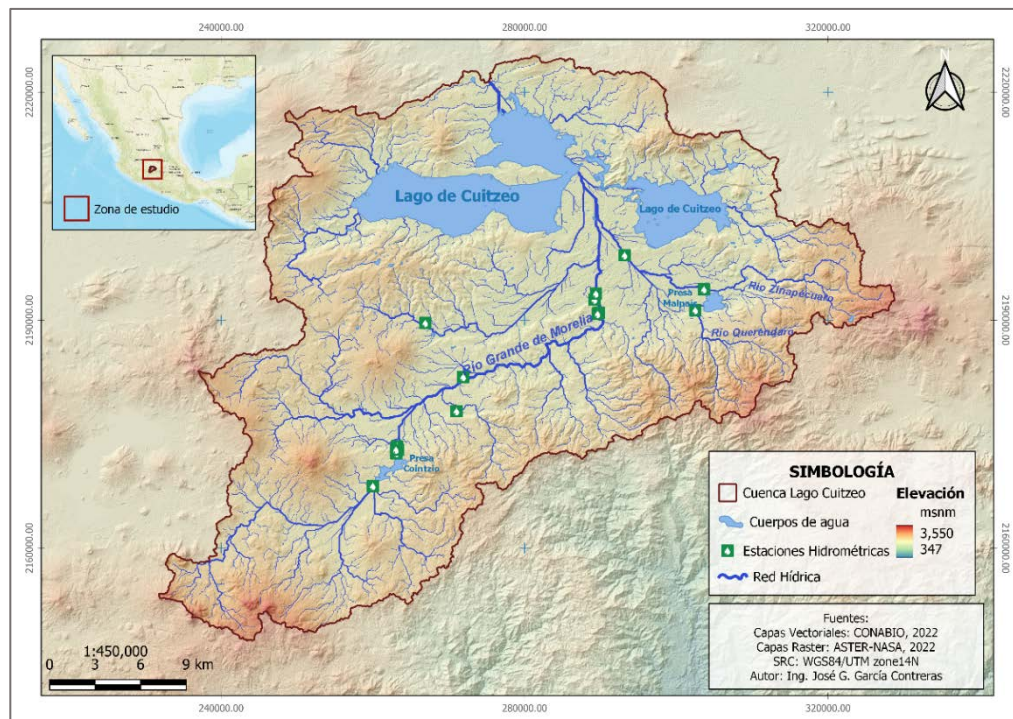


Figura 17. Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

La información de las estaciones fue descargada desde la plataforma del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) en escala diaria correspondiendo esta a los caudales medios diarios y no a los caudales acumulados diarios, esto permite que se pueda realizar una comparativa con los valores arrojados por el modelo de gestión en escala diaria. Posterior al análisis de dicha información se pudo observar que los datos cuentan con errores sistemáticos donde no obedecen a un orden cronológico ya que algunos meses correspondientes a un año en específicos vienen en mezclados con otro año. También se observó que el criterio de CONAGUA para determinar un mes como nulo es a partir de un dato diario faltante, lo que muestra que el hacer un análisis a escala diaria representa una mayor disponibilidad de información en comparativa con la escala mensual.

A todas las estaciones se les aplicaron las pruebas propuestas por Sánchez-Quispe et al., en 2021 donde menciona que las series de caudales deberán cumplir con dos características o propiedades: homogeneidad y persistencia.

En esta etapa se establece que, la generación de series anuales se realiza a partir de los datos a escala mensual. Básicamente se establece un criterio: si un año carece de tres o más meses, el año se considera nulo. Este criterio establecido en la metodología puede variar seleccionándose en algunos casos criterios más arriesgados o más conservadores especialmente acorde al estudio a desarrollar. También se puede considerar establecer en lugar de un criterio, dos criterios: uno para meses secos y otro para meses húmedos, como lo indicado en las precipitaciones. Lo importante de esta etapa es establecer y aplicar criterios con conocimiento del riesgo asumido en la generación de las series anuales.

En la etapa de análisis de la consistencia, se identifican procedimientos generales y específicos. Dentro de los procedimientos generales se recomienda realizar un análisis gráfico de los datos obtenidos a fin de identificar la tendencia y valores atípicos que pueden representar en los registros o los instrumentos de medición. Para determinar si se trata de un valor erróneo, como primera medida deberá compararse el caudal registrado en un tiempo determinado con los valores de precipitación registrados para esa misma fecha, posteriormente, determinar si el

dato proviene de un evento extremo o si se trata de un error en los datos obtenidos. En este caso se sugiere no considerar la estación hidrométrica en el análisis de consistencia de los datos y por tanto rechazar la estación para el estudio.

Una vez depuradas las estaciones hidrométricas de forma visual, se realizan tres procedimientos específicos a las series anuales de caudales medios; se aplican primero dos procedimientos: el Coeficiente Escurrimiento (Ce) y Módulo Relativo (Mr). Finalmente se aplica pruebas de consistencia a los datos: la prueba de Secuencias, la prueba estadística de Helmert (ambas evalúan homogeneidad); y la prueba de límites de Anderson (evalúa persistencia). Si las series cumplen con las condiciones establecidas en dichas pruebas, entonces se puede decir que los datos hidrométricos analizados están validados, y por tanto pueden ser utilizados con cierta fiabilidad en otros estudios o investigaciones. Cabe indicar, en el caso de las pruebas de consistencia si sólo una prueba cumple la homogeneidad queda a criterio del modelador rechazar; y respecto a la prueba de persistencia no necesariamente se cumple prueba en todas las series de caudales medios.

Los resultados de la aplicación de estas pruebas fueron los siguientes:

Tabla 14. Resultados de las pruebas realizadas a las Estaciones Hidrométricas.

Estación	Código	Área	Año Inicial	Año Final	Años de Servicio	Prueba					
						Tipo de Serie	Mr (lps/km ²)	Ce	Límites de Anderson	Secuencias	Helmert
Santiago Undameo	12347	623.28	1939	2002	63	Estocástica Descendente	3.78	0.13	No Persistente	No Homogénea	No Homogénea
Queréndaro	12314	130.78	1936	1996	60	Estocástica Descendente	5.76	0.15	Persistente	Homogénea	Homogénea
Tarímbaro	12620	92.93	1966	1987	21	Estocástica con Salto	0.96	0.04	No Persistente	Homogénea	No Homogénea
Atapaneo	12221	101.82	1927	2002	75	Estocástica Ascendente	49.26	1.94	Persistente	No Homogénea	No Homogénea
Planta Potabilizadora	12494	88.94	1954	2012	58	Estocástica Ascendente	5.25	0.18	No Persistente	Homogénea	No Homogénea
El Plan	12588	312.58	1956	2014	58	Estocástica Descendente	15.63	0.55	Persistente	Homogénea	No Homogénea
Canal Zinzimeo	12932	312.58	1946	2015	69	Estocástica Descendente	0.97	0.03	Persistente	Homogénea	No Homogénea
Salida Tunel	12341	88.59	1940	2012	72	Estocástica Descendente	19.93	0.70	Persistente	Homogénea	No Homogénea
El Salto	12365	88.59	1941	2011	70	Estocástica Ascendente	16.42	0.58	No persistente	Homogénea	Homogénea
Cointzio	12312	88.59	1940	2010	70	Estocástica Ascendente	5.79	0.20	Persistente	Homogénea	No Homogénea
Cointzio	12219	88.59	1927	2012	85	Estocástica Ascendente	31.46	1.10	Persistente	Homogénea	Homogénea
Quirio	12223	312.58	1941	1968	27	Estocástica con salto	13.36	0.23	No Persistente	No Homogénea	No Homogénea
Salida de Malpais	12323	141.17	1960	1985	25	Estocástica Descendente	11.48	0.40	No Persistente	No Homogénea	No Homogénea
Xoconole	12560	141.17	1962	2016	54	Estocástica	4.87	0.17	Persistente	No Homogénea	No Homogénea
Zinzimeo	12093	315.93	1929	1939	10	Estocástica	5.37	0.19	Persistente	No Homogénea	Homogénea

Tomando en cuenta los resultados obtenidos y después de haber revisado de manera visual las gráficas de todas las estaciones hidrométricas, se concluye que los datos de los escurrimientos observados aptos para calibrar los MPE de las diferentes subcuencas son los de las hidrométricas con clave 12347 (Santiago Undameo), 12626 (Tarímbaro) y 12314 (Queréndaro).

Como se puede observar en la Figura 18, el comportamiento de los escurrimientos en la EH-12347-Santiago Undameo obedece a ser de tipo estocástico descendente con un salto en el año de 1980.

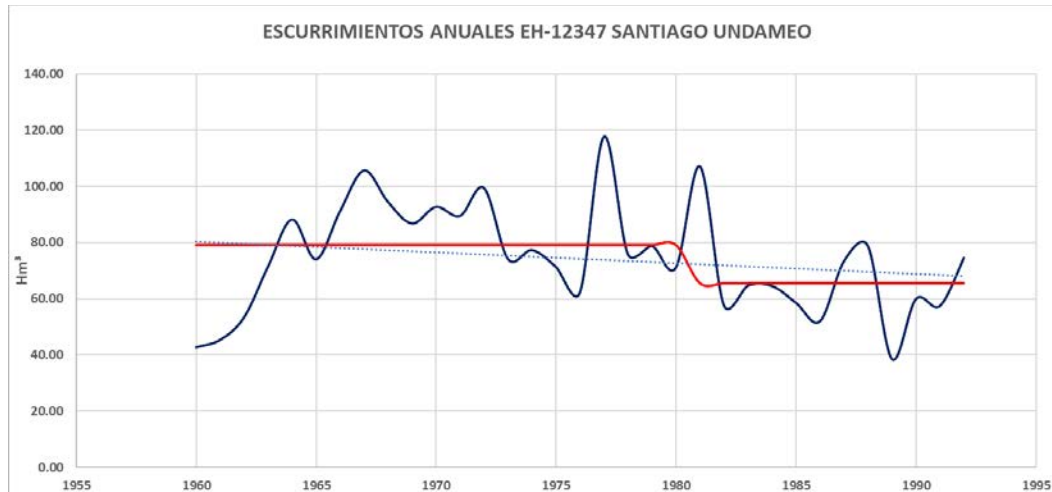


Figura 18. Escurrimientos anuales de la EH-12347

Para el análisis de la prueba de Límites de Anderson se observa que muestra una independencia de los datos.

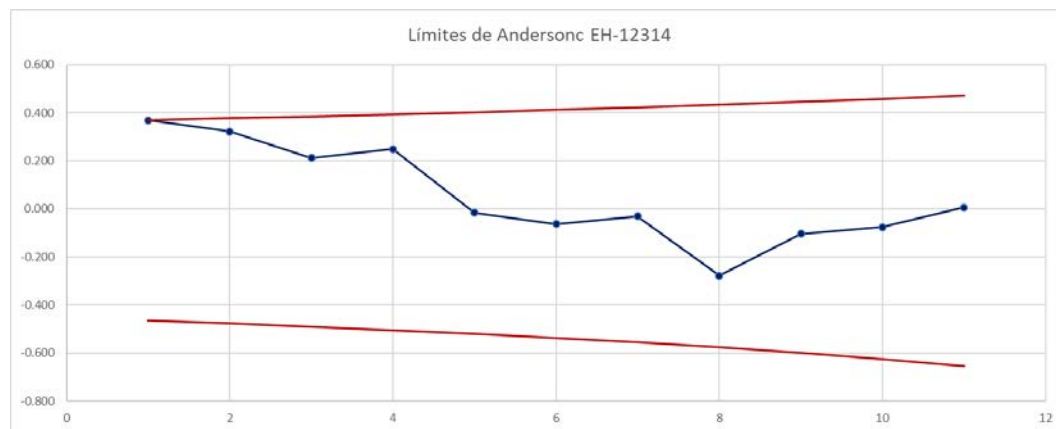


Figura 19. Límites de Anderson de la EH1234.

Partiendo de la ubicación de las estaciones hidrométricas y con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica se realiza la propuesta para la subdivisión de la cuenca.

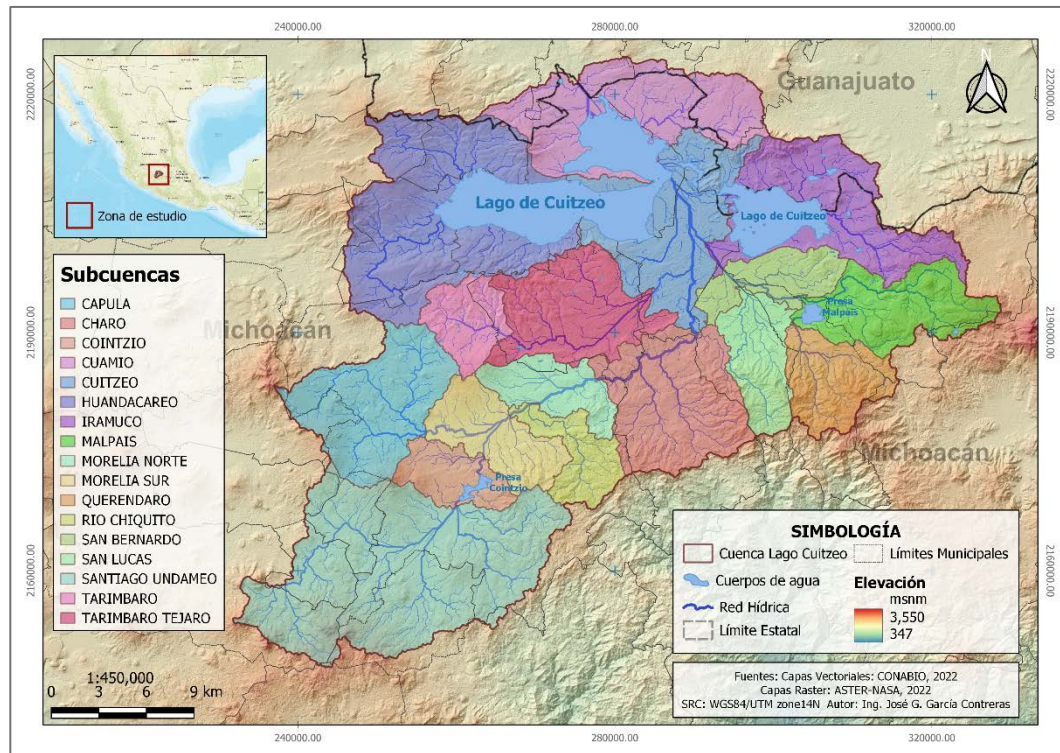


Figura 20. Propuesta de subcuencas para la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Se tiene un total de 17 subcuencas de las cuales 3 son utilizadas para desarrollar un MPE para cada una y poder obtener los parámetros del modelo HBV y así trasladar esa información a las demás subcuencas.

En la Tabla 14 se muestran los nombres, área y perímetro de cada subcuenca.

Una vez definidas las subcuencas y analizadas las series históricas de escurrimientos, se plantea que el periodo de modelación comprenda de 1960 a 1990 ya que es donde los datos tienen un comportamiento más homogéneo y es donde existe la mayoría de datos para las tres estaciones hidrométricas.

Tabla 15. Propuesta de subcuencas para la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Subcuenca	Nombre	Área (Km ²)	Perímetro (Km)
I	SANTIAGO UNDAMEO	623.28	158.50
II	CAPULA	254.14	87.87
III	COINTZIO	88.59	53.01
IV	MORELIA SUR	136.57	70.07
IX	TARIMBARO TEJARO	220.62	95.03
V	RIO CHIQUITO	88.94	67.78
VI	HUANDACAREO	536.29	131.55
VII	TARIMBARO	92.93	49.48
VIII	MORELIA NORTE	101.82	62.82
X	CHARO	268.29	85.80
XI	CUAMIO	350.03	114.23
XII	CUITZEO	312.58	120.54
XIII	SAN BERNARDO	100.66	71.05
XIV	SAN LUCAS	121.38	63.60
XV	QUERENDARO	130.78	59.05
XVI	IRAMUCO	315.93	128.85
XVII	MALPAIS	188.46	91.47

5.2 Información Climatológica

Para realizar una preselección de estaciones se realiza un buffer de 20 Km alrededor de la zona de estudio con la finalidad de obtener un buen número de estaciones climatológicas y que además estén distribuidas espacialmente. Como se mencionó con anterioridad, las estaciones que se toman en cuenta son aquellas que tengan un periodo mayor a 15 años, estén o no en funcionamiento, esto con la finalidad de disponer de información suficiente para hacer el llenado de datos.

Las estaciones que quedaron dentro del buffer fueron un total de 62, siendo este un buen número para iniciar con la preselección. De igual manera se siguieron los criterios metodológicos propuestos por Sánchez-Quispe et al., 2021, donde se menciona que como primer paso para la selección de las estaciones meteorológicas consiste en realizar una exploración de todas las estaciones existentes en la zona de estudio (distribución espacial). Posteriormente se deberá realizar una clasificación de las estaciones disponibles, para seleccionar las mejores en función de cinco criterios: i) número de años de servicio, ii) porcentaje de datos faltantes, iii)

distancia de las estaciones al centro de gravedad de la zona en estudio (o cuenca hidrológica), iv) grado de actualización de los datos y v) localización geográfica de la estación con respecto al resto de estaciones disponibles (generalmente se busca una distribución uniforme de las estaciones, de manera que cubran la zona). De la clasificación anterior se deberán seleccionar únicamente las estaciones que se consideren como aptas, serán aquellas que, contengan el mayor número de años de servicio, el menor porcentaje de datos faltantes, la menor distancia al centro de gravedad de la zona en estudio, las que contengan la información más actualizada y que además cuenten con una localización geográfica útil. Generalmente, esta información se concentra en una tabla, donde se deberán clasificar las estaciones tomando como base los criterios de selección descritos anteriormente. Posteriormente se asignan pesos por intervalos de cada criterio y pesos por cada criterio de la estación, permitiendo el primer grupo de pesos, asignar un peso a cada intervalo de criterio de la estación y para determinar el peso global de cada estación se aplica el segundo grupo de pesos (este segundo grupo de pesos puede ser uno o más escenarios de combinación de pesos para los criterios), se puede decidir por un solo escenario, o por la media de pesos de los escenarios. Las estaciones con un peso global alto son la mejor calificadas y serán a su vez las estaciones seleccionadas.

La generación de las series permite obtener los datos en la escala temporal indicada (diaria, mensual o anual) para la aplicación de cada una de las pruebas necesarias para evaluar las dos propiedades indispensables en las series de precipitación: la homogeneidad y la independencia. Para generar estas series, es necesario realizar un análisis previo de los datos disponibles en cada una, dado que son series, por lo regular incompletas, es necesario establecer criterios para seleccionar los datos que formarán parte de la serie a analizar en la etapa de consistencia de datos. Debido a la variabilidad que caracteriza a la precipitación, no se considera con el mismo grado de incertidumbre la precipitación anual obtenida a partir de un año donde los datos faltantes eran meses húmedos, a aquél donde los datos faltantes corresponden a meses secos.

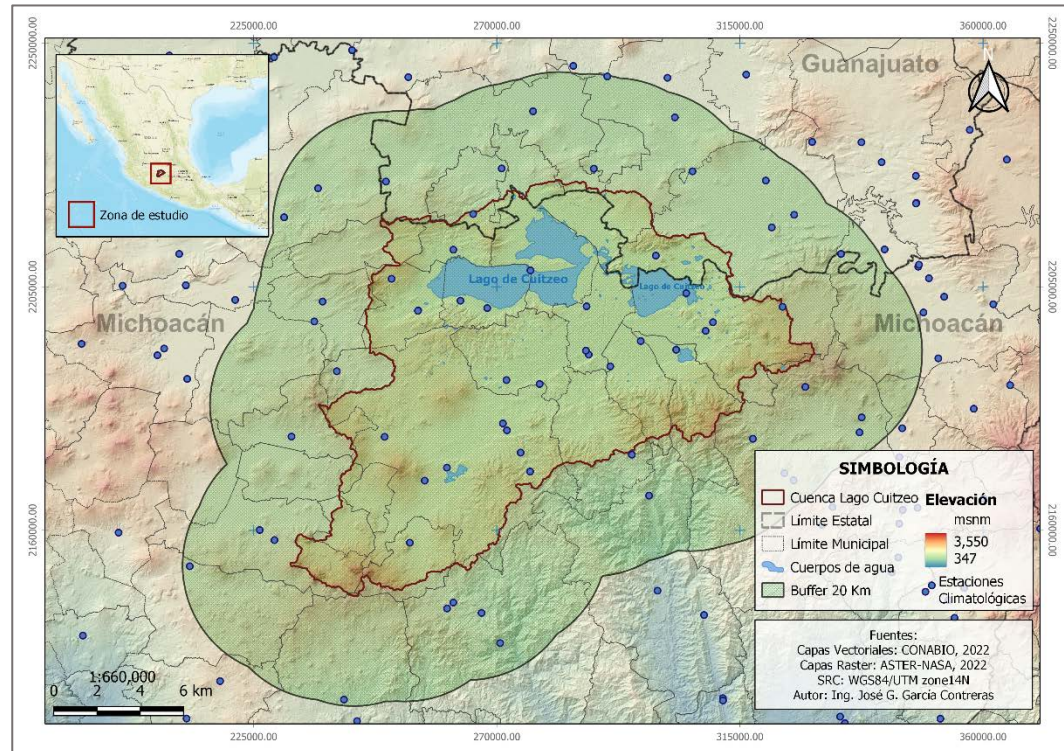


Figura 21. Buffer a 20 Km de la Cuenca del Lago de Cuitzeo para la preselección de estaciones climatológicas.

La lista de las estaciones climatológicas preseleccionadas es la siguiente, resaltando con color verde aquellas que se plantean como principales debido a su poco porcentaje de vacíos, ubicación espacial y registro histórico similar al de las estaciones hidrométricas:

Tabla 16. Información general de las estaciones climatológicas preseleccionadas.

No.	CLAVE	NOMBRE	ALTITUD	X	Y	DISTANCIA AL C.G. (Km)	AÑOS DE SERVICIO	AÑOS EFECTIVOS	AÑO INICIAL	AÑO FINAL	VACIOS	ESTATUS
1	11002	ACAMBARO-GTO	1860.00	320966.97	2215994.01	52.23	79	75.41	1937	2016	4.55%	PRINCIPAL
2	11010	CERANO-GTO	1909.00	250126.85	2224461.92	43.18	54	50.50	1962	2016	6.47%	PRINCIPAL
3	11021	EL SABINO-GTO	1730.00	291131.37	2243884.27	56.25	54	53.19	1962	2016	1.49%	PRINCIPAL
4	11027	IRAMUCO-GTO	1840.00	299421.80	2210783.99	31.62	50	42.91	1929	1979	14.18%	SECUNDARIA
5	11047	MOROLEON-GTO	1812.00	271431.55	2226876.43	37.38	94	51.68	1922	2016	45.02%	SECUNDARIA
6	11060	SALVATIERRA-GTO	2059.00	302955.25	2236283.67	53.87	79	71.69	1937	2016	9.25%	PRINCIPAL
7	11076	PRESA SOLIS-GTO	1901.00	324536.17	2218325.77	56.48	55	52.16	1961	2016	5.16%	PRINCIPAL
8	11097	SANTA MARIA (SMN)-GTO	1751.00	276884.51	2237448.94	47.70	41	37.23	1924	1965	9.20%	SECUNDARIA
9	11114	EL REFUGIO-GTO	2040.00	306189.46	2226393.06	47.59	17	15.79	1975	1992	7.14%	SECUNDARIA
10	11149	PARACUARO-GTO	1890.00	319283.74	2224652.97	55.75	37	33.58	1979	2016	9.24%	SECUNDARIA
11	11156	EL DORMIDO-GTO	1907.00	289153.63	2226837.20	39.41	35	32.26	1980	2015	7.83%	SECUNDARIA
12	11158	PIÑICUARO-GTO	2130.00	266001.40	2218458.08	30.33	35	29.97	1981	2016	14.36%	PRINCIPAL
13	16001	ACUITZIO DEL CANJE (MICH)	2200.00	254406.77	2157827.57	38.44	54	38.60	1961	2015	28.52%	SECUNDARIA
14	16004	ALVARO OBREGON (SMN)-MICH	1854.00	286964.67	2192476.08	11.48	22	21.37	1964	1986	2.86%	SECUNDARIA
15	16016	CARRILLO PUERTO, MICH	1840.00	287072.25	2201394.56	16.19	46	42.68	1969	2015	7.22%	SECUNDARIA
16	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)-MICH	2060.00	336572.11	2178111.13	61.87	47	45.60	1959	2006	2.98%	SECUNDARIA
17	16022	COINTZIO-MICH	2096.00	261823.76	2171570.67	22.94	67	60.87	1940	2007	9.15%	PRINCIPAL
18	16023	COPANDARO DE GALEANA-MICH	1840.00	269319.36	2201064.37	13.04	32	29.69	1969	2001	7.21%	SECUNDARIA
19	16027	CUITZEO, MICH	1831.00	276507.91	2208046.56	18.30	92	81.90	1923	2015	10.98%	PRINCIPAL
20	16028	CUITZILLO GRANDE-MICH	1987.00	278018.20	2187049.37	3.49	38	36.62	1969	2007	3.62%	PRINCIPAL
21	16034	EL JACAL (SMN)-MICH	1875.00	255112.74	2200640.80	23.39	18	14.33	1969	1987	20.41%	SECUNDARIA
22	16045	EL TEMAZCAL, MICH	2220.00	293882.08	2174001.95	23.97	49	48.34	1965	2014	1.35%	PRINCIPAL
23	16049	ETUCUARO-MICH	1690.00	266810.51	2144743.36	45.90	44	40.96	1944	1988	6.90%	SECUNDARIA
24	16050	HUANIQUEO, MICH	2040.00	237383.66	2202280.61	40.42	66	64.78	1948	2014	1.85%	SECUNDARIA
25	16052	HUINGO, MICH	1921.00	304874.85	2203833.32	32.29	74	72.25	1941	2015	2.36%	PRINCIPAL
26	16055	JESUS DEL MONTE, MICH	2180.00	274304.75	2174361.69	15.47	80	77.53	1935	2015	3.09%	PRINCIPAL
27	16071	LOS AZUFRES-MICH	2953.00	325994.68	2186514.03	50.29	33	23.79	1964	1997	27.91%	SECUNDARIA
28	16080	MORELIA (OBS), MICH	1912.70	270818.86	2179758.39	11.18	29	27.32	1986	2015	5.80%	SECUNDARIA
29	16081	MORELIA, MICH	1908.00	272579.58	2178474.65	11.74	68	67.04	1947	2015	1.41%	PRINCIPAL
30	16087	PATZCUARO, MICH	2140.00	226082.17	2160051.62	57.93	46	38.87	1969	2015	15.51%	SECUNDARIA
31	16091	ALVARO OBREGON (DGE), MICH	1840.00	286973.56	2193214.16	11.69	49	48.39	1966	2015	1.24%	PRINCIPAL
32	16096	MALPAIS	1859.00	303215.33	2193365.55	27.64	71	56.82	1944	2015	19.97%	PRINCIPAL
33	16097	PUCUATO	2490.00	323240.70	2170548.15	51.17	65	57.43	1950	2015	11.64%	SECUNDARIA
34	16098	SABANETA	2510.00	324948.30	2169247.21	53.25	63	61.12	1952	2015	2.98%	PRINCIPAL
35	16100	PUENTE SAN ISIDRO (MICH)	2022.00	235065.53	2199084.62	41.80	46	45.30	1947	1993	1.52%	SECUNDARIA
36	16104	PURUANDIRO	2012.00	236915.85	2223215.19	51.31	65	43.56	1942	2007	32.98%	SECUNDARIA
37	16105	QUIRIO	1858.00	290519.44	2190311.40	14.72	52	49.07	1963	2015	5.63%	PRINCIPAL
38	16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	1444.00	270625.66	2139154.34	50.87	93	90.87	1922	2015	2.29%	PRINCIPAL
39	16114	SAN MIGUEL DEL MONTE	1965.00	276180.75	2170864.76	18.90	52	38.29	1963	2015	26.37%	SECUNDARIA
40	16116	SAN SEBASTIAN (MICH)	1836.00	295783.95	2194955.62	20.64	22	21.90	1969	1991	0.45%	PRINCIPAL
41	16118	SANTA FE	2203.00	232001.73	2177320.66	45.54	51	45.53	1963	2014	10.73%	SECUNDARIA
42	16119	SANTA RITA	1880.00	263286.39	2202437.65	17.82	51	21.95	1964	2015	56.95%	SECUNDARIA
43	16120	SANTIAGO UNDAMEO (MICH)	2130.00	256656.87	2168871.58	28.34	54	53.39	1953	2007	1.13%	PRINCIPAL
44	16123	TACAMBARO	1640.00	241715.26	2128721.61	69.91	89	85.41	1922	2011	4.03%	PRINCIPAL
45	16136	TZITZIO-MICH	1565.00	297351.08	2166427.23	31.75	46	38.72	1969	2015	15.82%	SECUNDARIA
46	16139	VILLA MADERO (MICH)	2097.00	261610.49	2146656.69	45.38	41	40.60	1943	1984	0.98%	PRINCIPAL
47	16140	VILLA MADERO [CFE] (MICH.)	2182.00	261595.91	2145549.48	46.44	33	30.60	1961	1994	7.27%	PRINCIPAL
48	16145	ZINAPECUARO-MICH	1880.00	308347.77	2196875.43	33.31	92	79.88	1923	2015	13.17%	PRINCIPAL
49	16146	ZIRAHUEN-MICH	2090.00	213517.26	2153354.38	72.15	68	56.87	1947	2015	16.37%	PRINCIPAL
50	16152	CIUDAD HIDALGO [SMN] (MICH.)	2327.00	336513.54	2181248.10	61.30	66	65.50	1922	1988	0.76%	PRINCIPAL
51	16199	SAN MIGUEL CURINHUATO-MICH	2020.00	333330.39	2211105.44	61.35	40	34.55	1975	2015	13.62%	SECUNDARIA
52	16221	FRUTICULTORES (MICH)	1986.00	310485.19	2198113.27	35.67	25	12.00	1980	2005	52.00%	SECUNDARIA
53	16231	LAS CRUCES BARRERAS-MICH	2408.00	249870.20	2206498.33	30.87	33	20.27	1982	2015	38.59%	SECUNDARIA
54	16234	GALEANA-MICH	1935.00	230521.60	2217861.58	53.30	34	26.34	1981	2015	22.54%	SECUNDARIA
55	16235	HUAJUMBARO-MICH	2285.00	317016.64	2176917.37	43.16	35	30.76	1980	2015	12.12%	SECUNDARIA
56	16247	CAPULA (MICH)	2097.00	249435.62	2177831.37	28.95	26	17.80	1981	2007	31.54%	SECUNDARIA
57	16250	HUANDACAREO-MICH	1851.00	262365.23	2211862.29	25.87	32	25.54	1982	2014	20.20%	SECUNDARIA
58	16254	TEREMENDO-MICH	2188.00	240745.32	2189400.88	35.07	33	32.45	1982	2015	1.68%	PRINCIPAL
59	16255	UCAREO-MICH	2554.00	322591.51	2201308.61	48.19	34	31.47	1981	2015	7.44%	SECUNDARIA
60	16257	STA. ISABEL DE AJUNO (MICH)	2250.00	228154.87	2158204.81	57.15	6	4.50	1982	1988	25.00%	SECUNDARIA
61	16512	EL COLEGIO-MICH	1880.00	272698.36	2187762.69	3.70	29	25.73	1986	2015	11.28%	SECUNDARIA
62	16513	EL JACAL (DGE)-MICH	1874.00	255111.89	2200579.28	23.36	18	17.95	1969	1987	0.26%	SECUNDARIA

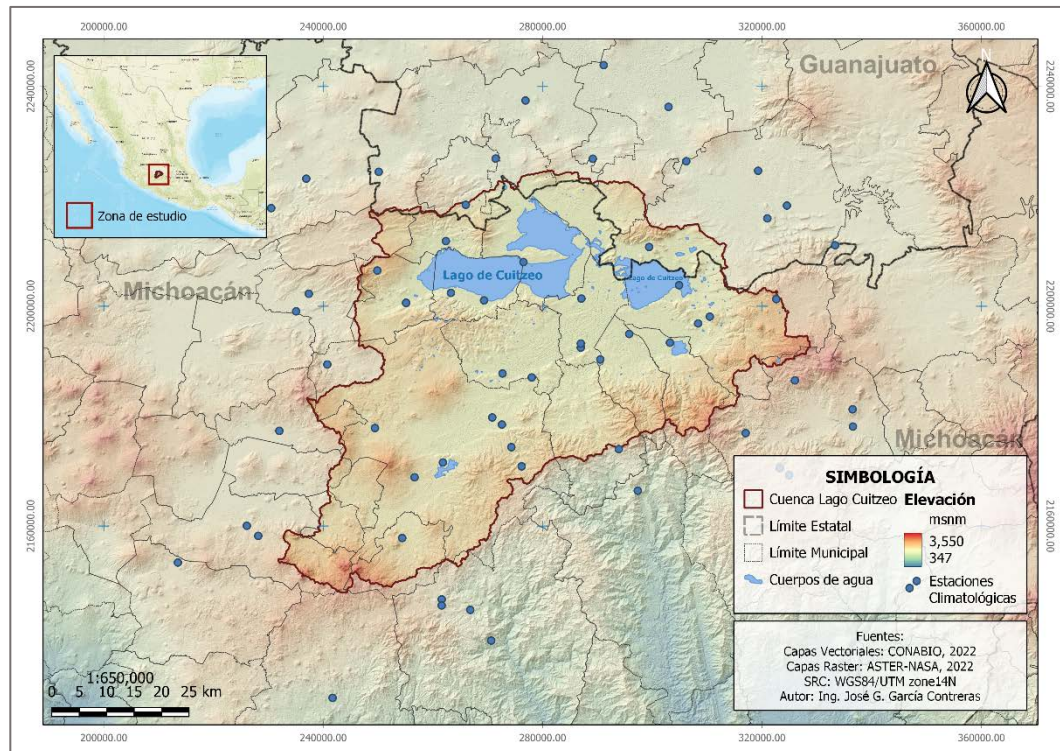


Figura 22. Estaciones preseleccionadas para la zona de estudio.

5.2.1 Análisis y validación de la información climatológica

Una vez calificadas las estaciones climatológicas que se han preseleccionado, se decide aplicar a todas las pruebas de homogeneidad e independencia para tener holgura en cuanto a la disponibilidad de información ya que hay estaciones que, a pesar de tener poca información, puede ser útil para el llenado de datos a escala diaria. Las pruebas de homogeneidad que se les aplicaron fueron la prueba de Secuencias, prueba de Helmert y Curva Masa Doble, perteneciendo estas al grupo de pruebas generales, también se les aplicaron pruebas específicas como la prueba de t Student, Cramer y Wald-Wolfowitz esto con la finalidad de que, si existe incertidumbre en las primeras pruebas, se pueda decidir el usar o no una estación.

Para demostrar la independencia de los datos se aplicó la prueba de los Límites de Anderson teniendo como condicionante para que se considere una estación climatológica independiente que los valores del correlograma no sobrepasen los límites de confianza en más de un diez por ciento.

Los resultados de las estaciones climatológicas que pasan las pruebas de homogeneidad e independencia se muestran en la Tabla 15, cabe señalar que se consideró apta una estación climatológica cuando haya pasado 4 de las 7 pruebas. Dando como resultado 37 estaciones climatológicas válidas para su uso en el llenado de datos y elección de estaciones principales para desarrollar el MPE.

Tabla 17. Estaciones válidas para el desarrollo del MPE de la zona de estudio.

*HOM = Homogénea, NO HOM = No homogénea, IND = Independiente

No.	CÓDIGO DE ESTACION	NOMBRE	COORDENADAS			Pruebas							ESTATUS
			X	Y	Z	Secuencias	Helmert	T Student	Cramer	Curva masa	Wald-Wolfowitz	Limites de Anderson	
1	11027	IRAMUCO-GTO	299421.804	2210783.99	1840.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
2	11114	EL REFUGIO-GTO	306189.464	2226393.06	2040.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NULL	IND	VALIDA
3	11002	ACAMBARO-GTO	320966.974	2215994.01	1860.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
4	11010	CERANO-GTO	250126.85	2224461.92	1909.00	NO HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
5	11047	MOROLEON-GTO	271431.547	2226876.43	1812.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
6	11060	SALVATIERRA-GTO	302955.248	2236283.67	2059.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
7	11076	PRESA SOLIS-GTO	324536.165	2218325.77	1901.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
8	11156	EL DORMIDO-GTO	289153.626	2226837.2	1907.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
9	16023	COPANDARO DE GALEANA-MICH	269319.364	2201064.37	1840.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
10	16001	ACUITZIO DEL CANJE-MICH	254406.773	2157827.57	2200.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
11	16016	CARRILLO PUERTO-MICH	287072.251	2201394.56	1840.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
12	16027	CUITZEO-MICH	276507.913	2208046.56	1831.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
13	16028	CUITZILLO GRANDE-MICH	278018.204	2187049.37	1987.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
14	16049	ETUCUARO-MICH	266810.506	2144743.36	1690.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
15	16100	PUENTE SAN ISIDRO-MICH	235065.533	2199084.62	2022.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
16	16116	SAN SEBASTIAN-MICH	295783.951	2194955.62	1836.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
17	16120	SANTIAGO UNDAMEO-MICH	256656.875	2168871.58	2130.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
18	16139	VILLA MADERO-MICH	261610.487	2146656.69	2097.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
19	16140	VILLA MADERO (CFE)-MICH	261595.912	2145549.48	2182.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
20	16045	EL TEMAZCAL, MICH	293882.083	2174001.95	2220.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
21	16050	HUANIQUEO, MICH	237383.658	2202280.61	2040.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
22	16055	JESUS DEL MONTE, MICH	274304.746	2174361.69	2180.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
23	16080	MORELIA (OBS), MICH	270818.864	2179758.39	1912.70	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
24	16081	MORELIA, MICH	272579.576	2178474.65	1908.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
25	16087	PATZCUARO, MICH	226082.173	2160051.62	2140.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
26	16096	MALPAIS	303215.333	2193365.55	1859.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
27	16098	SABANETA	324948.298	2169247.21	2510.00	HOM	NO HOM	HOM	NO HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
28	16104	PURUANDIRO	236915.853	2223215.19	2012.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
29	16105	QUIRIO	290519.437	2190311.4	1858.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
30	16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	270625.662	2139154.34	1444.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
31	16235	HUAJUMBARO-MICH	317016.641	2176917.37	2285.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
32	16123	TACAMBARO-MICH	241715.255	2128721.61	1640.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
33	16136	TZITZIO-MICH	297351.077	2166427.23	1565.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
34	16145	ZINAPECUARO-MICH	308347.77	2196875.43	1880.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
35	16146	ZIRAHUEN-MICH	213517.256	2153354.38	2090.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
36	16255	UCAREO-MICH	322591.506	2201308.61	2554.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
37	16152	CIUDAD HIDALGO (SMN)-MICH	336513.544	2181248.1	2327.00	NO HOM	NO HOM	HOM	HOM	NO HOM	HOM	IND	VALIDA
38	16254	TEREMENDO-MICH	240745.316	2189400.88	2188.00	HOM	NO HOM	NO HOM	HOM	NO HOM	HOM	IND	VALIDA
39	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)-MICH	336572.109	2178111.13	2060.00	HOM	NO HOM	NO HOM	NO HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA

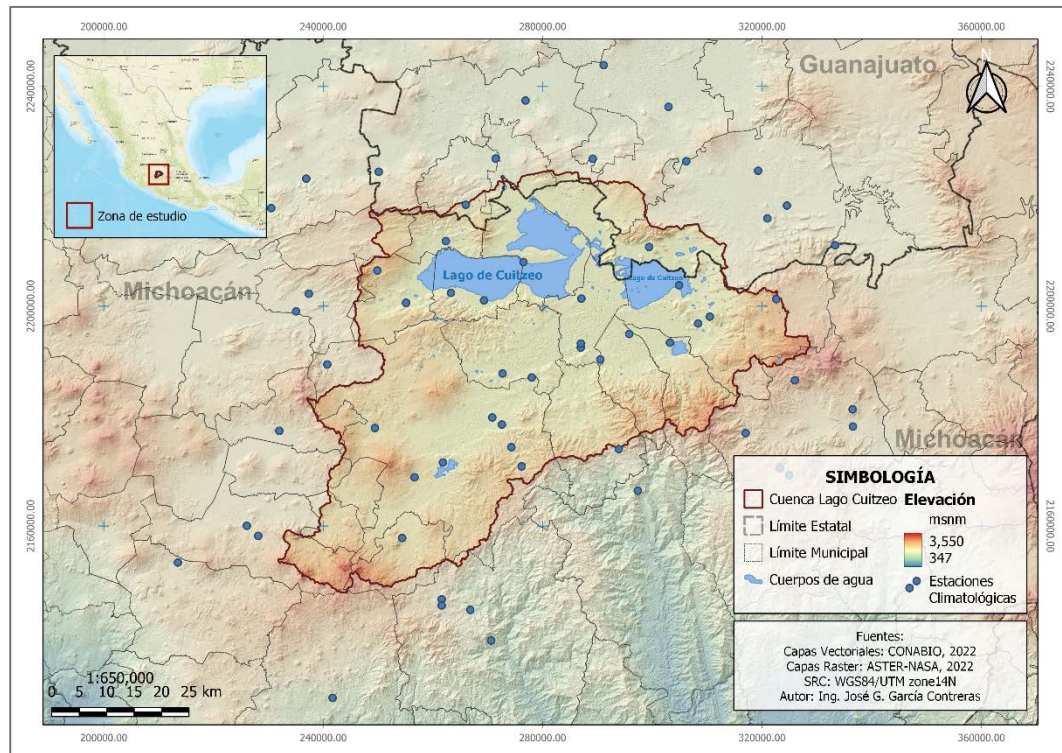


Figura 23. Estaciones válidas para el desarrollo del MPE de la cuenca.

Una vez que se han determinado las estaciones con información apta para el caso de estudio, se eligen las estaciones principales que cubran completamente la cuenca y se comprueba dibujando polígonos de Thiessen para asegurar que tengan influencia cada una de ellas y puedan representar de mejor manera la distribución espacial de la precipitación.

Según las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial se recomienda que, para una cuenca con una superficie aproximada de cuatro mil kilómetros cuadrados se deben tener como mínimo 11 estaciones climatológicas (Aparicio Mijares, 1997), no obstante, debido a la forma de la cuenca se decide aumentar este número para poder tener cubierta toda la zona de estudio y poder representar de mejor manera la variable de la precipitación en el MPE.

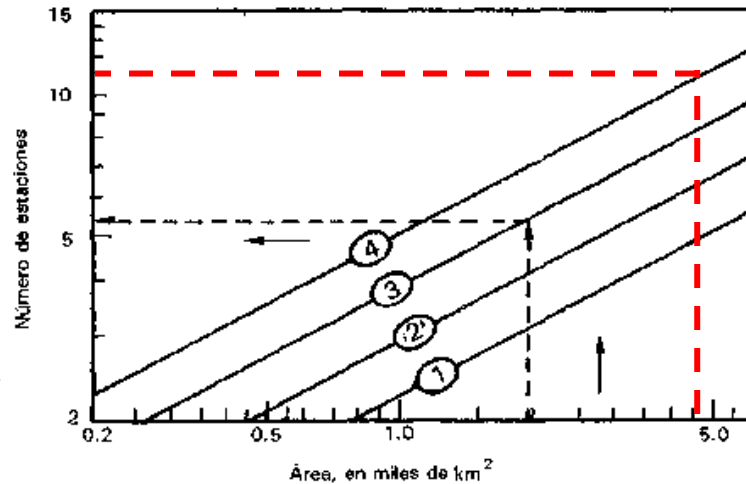


Figura 24. Gráfico para determinar número mínimo de estaciones climatológicas en función del área de la cuenca. Fuente: Aparicio, 1997.

Las estaciones principales para elaborar el MPE son 16 ya que cuentan con la mayor parte del registro histórico de las estaciones hidrométricas y cuentan con poco porcentaje de vacíos lo cual es sumamente importante ya que al realizar un llenado a escala diaria, el que falte un mes o dos, elevaría drásticamente el número de datos faltantes en comparación con llenado de datos a escala mensual.

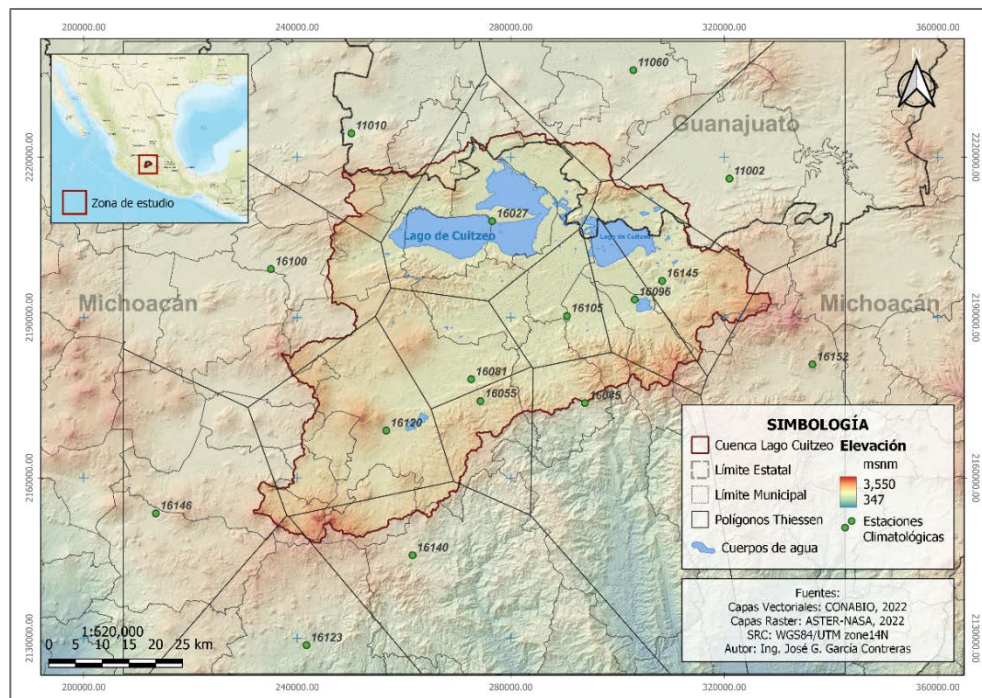


Figura 25. Polígonos de Thiessen de las estaciones principales de la Cuenca.

5.2.2 Llenado de datos faltantes

Para el desarrollo del MPE se requiere el uso de series de precipitación y temperatura (para calcular la ETP) continuas, esto es una limitante ya que en México la gran mayoría de estaciones climatológicas presentan un gran porcentaje de vacíos. Para lograr que las series de las 16 estaciones climatológicas sean continuas se hace un llenado de datos por método IDW el cual consiste en llenar el vacío con la información de estaciones climatológicas con una correlación mayor a 0.75, en el presente caso de estudio se logró llenar la mayoría de vacíos de las estaciones principales con otras estaciones cuyo valor del factor de correlación es mayor a 0.85 a excepción de la estación 16145-Zinapecuaro que presentaba gran cantidad de vacíos y poca correlación con las demás estaciones, no obstante se alcanzó a tener un factor de correlación mínimo de 0.74.

Para el caso de los vacíos presentes en las temperaturas, se realizará calculando el promedio diario de toda la serie de la estación climatológica (media móvil, es decir, se tendrán 366 promedios para llenar cada vacío existente en la serie de datos para poder obtener series continuas de ETP.

El proceso de cálculo no se explica en el presente documento, pero se desglosará completamente en el documento final.

Dado que el realizar un llenado de datos con información de mala calidad o llenar un porcentaje alto de vacíos en una misma serie genera una variación en los parámetros estadísticos, se decide calcular el promedio, la desviación estándar y la varianza antes y después de haber llenado los vacíos para observar su comportamiento. Los estadísticos calculados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 18. Comparativa de estadísticos básicos en las estaciones climatológicas antes y después del llenado de datos.

No.	Clave	Nombre	Antes de llenar datos				Después de llenar datos		
			Datos faltantes	Media	Desv. Est.	Varianza	Media	Desv. Est.	Varianza
1	11002	ACAMBARO-GTO	0.49%	2.03	5.70	32.47	2.03	5.70	32.46
2	11010	CERANO-GTO	10.51%	1.91	5.93	35.12	1.93	5.82	33.92
3	11060	SALVATIERRA-GTO	6.51%	1.94	5.84	34.08	1.91	5.71	32.66
4	16027	CUITZEO-MICH	0.01%	2.01	5.21	27.09	2.01	5.21	27.09
5	16045	EL TEMAZCAL-MICH	16.85%	4.00	9.23	85.15	3.59	8.56	73.19
6	16055	JESÚS DEL MONTE-MICH	2.73%	2.49	5.76	33.21	2.50	5.76	33.15
7	16081	MORELIA-MICH	0.33%	2.14	5.60	31.35	2.14	5.59	31.28
8	16096	PRESA MALPAÍS-MICH	11.59%	1.91	4.85	23.48	1.97	4.81	23.13
9	16100	PUENTE SAN ISIDRO-MICH	2.17%	2.21	5.86	34.36	2.23	5.88	34.56
10	16105	QUIRIO-MICH	13.02%	2.04	5.44	29.63	1.98	5.21	27.13
11	16120	SANTIAGO UNDAMEO	0.03%	2.26	5.75	33.06	2.26	5.75	33.05
12	16123	TACAMBARO-MICH	3.98%	3.05	8.78	77.09	3.08	8.75	76.53
13	16140	VILLA MADERO (CFE)-MICH	5.71%	3.36	8.64	74.57	3.26	8.48	71.99
14	16145	ZINAPECUARO-MICH	7.99%	2.51	7.33	53.80	2.43	7.12	50.75
15	16146	ZIRAHUEN-MICH	8.48%	2.75	6.64	44.04	2.67	6.45	41.54
16	16152	CIUDAD HIDALGO (SMN)-MICH	7.56%	2.19	5.45	29.72	2.22	5.42	29.34

Con la finalidad de tener mayor certeza sobre la calidad de las series llenadas se les aplican nuevamente las pruebas de homogeneidad e independencia y se puede observar que no hubo diferencia significativa entre los resultados obtenidos antes y después del llenado por lo que no hay ningún inconveniente en utilizar las series llenadas de las 16 estaciones elegidas como principales.

Tabla 19. Resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia para las estaciones climatológicas principales.

No.	CÓDIGO	NOMBRE	Coordenadas			Pruebas					Wald-Wolfowitz	Límites de Anderson	ESTATUS
			X	Y	Y	Secuencias	Helmert	T Student	Cramer	Curva masa			
1	16152	CIUDAD HIDALGO (SMN)-MICH	336513.54	2181248.10	2327.00	NO HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
2	11002	ACAMBARO-GTO	320966.97	2215994.01	1860.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
3	11010	CERANO-GTO	250126.85	2224461.92	1909.00	HOM	HOM	NO HOM	NO HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
4	16055	JESUS DEL MONTE, MICH	274304.75	2174361.69	2180.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
5	16081	MORELIA, MICH	272579.58	2178474.65	1908.00	HOM	HOM	NO HOM	NO HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
6	16120	SANTIAGO UDAMEO-MICH	256656.87	2168871.58	2130.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
7	16140	VILLA MADERO (CFE)-MICH	261595.91	2145549.48	2182.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
8	16096	PRESA MALPAIS-MICH	303215.33	2193365.55	1859.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
9	16145	ZINAPECUARO-MICH	308347.77	2196875.43	1880.00	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	HOM	IND	VALIDA
10	16045	EL TEMAZCAL, MICH	293882.08	2174001.95	2220.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	IND	VALIDA
11	16100	PUENTE SAN ISIDRO-MICH	235065.53	2199084.62	2022.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
12	16027	CUITZEO-MICH	276507.91	2208046.56	1831.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
13	16146	ZIRAHUEN-MICH	213517.26	2153354.38	2090.00	HOM	NO HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
14	16123	TACAMBARO-MICH	241715.26	2128721.61	1640.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
15	16105	QUIRIO	290519.44	2190311.40	1858.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA
16	11060	SALVATIERRA-GTO	302955.25	2236283.67	2059.00	HOM	HOM	HOM	HOM	HOM	NO HOM	IND	VALIDA

5.3 Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

Los métodos más usuales para el cálculo de la ETP son el método de Thorntwaite, sin embargo, se limita su uso debido a la escala temporal ya que es solo para el cálculo de la ETP de manera mensual, por lo que se decide utilizar el método de Hargreaves y Samani propuesto por la FAO donde debido a la existencia

de datos meteorológicos mínimos disponibles de radiación solar, humedad relativa o velocidad del viento, estos deben ser estimados. Sin embargo, como una opción alternativa, la ETP se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$ET_o = 0,0023(T_{media} + 17,8)(T_{max} - T_{min})0,5 Ra$$

Donde el cálculo de la ETP está en función de las temperaturas mínimas (T_{min}), temperaturas medias (T_{media}) y temperaturas máximas (T_{max}); además de la radiación solar extraterrestre (Ra) (FAO, 2006).

Una vez obtenidas las series históricas a escala diaria de los escurrimientos, de las precipitaciones y de las ETP, se dispone a trasladar dicha información a los centroides de las subcuencas que serán modeladas matemáticamente. Los datos trasladados serán ingresados en el programa Evalhid y posteriormente se llevará a cabo el proceso de calibración hasta encontrar el grupo de parámetros óptimos del modelo que simulen las condiciones hidrológicas de la subcuenca en la serie de datos medidos, esto se logra mediante el uso de una herramienta de calibración automática que consiste en un proceso automático a través de algoritmos de optimización.

5.4 Calibración de los MPE

Para lograr una correcta calibración del MPE se deben tomar en cuenta indicadores de eficiencia, los cuales permiten determinar la capacidad de reproducción de la realidad en un modelo. Existen diferentes indicadores de eficiencia, por ejemplo:

- El Error Medio (ME)
- El Error Medio Absoluto (MAE)
- El Error Cuadrático Medio (MSE)
- La Raíz Cuadrada del Error Medio (RMSE)
- El Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE)
- El Coeficiente de Determinación (r^2)
- EL Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
- El Logaritmo de Nash-Sutcliffe (ln NSE)

- El Coeficiente de Correlación de Pearson (r)
- El Coeficiente de Simetría
- El Sesgo Porcentual (PBIAS)
- La Desviación Estándar de las Observaciones (RSR)

Los últimos seis son los empleados en el calibrador automático.

De acuerdo a una valoración de rangos se determina si la calidad de ajuste es buena o no satisfactoria.

Tabla 20. Rangos de ajuste.

Calidad de ajuste	NSE o E	PBIAS	RSR
Muy buena	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$0.00 < \text{RSR} \leq 0.50$
Buena	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$
Satisfactoria	$0.50 \leq \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$
No Satisfactoria	$\text{NSE} \leq 1.03$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	$\text{RSR} > 0.70$

Fuente: D. N. Moriasi et al., 2007

El algoritmo empleado en el calibrador fue el Algoritmo Hipercubo Latino+Rosenbrock (HLR), el cual se trata de un algoritmo de gradiente o de búsqueda local con lanzamiento múltiple.

La Función Objetivo (FO) que muestra el calibrador automático es la ecuación que será optimizada dadas ciertas restricciones y con variables que deben ser maximizadas mediante la utilización de técnicas lineales o no lineales. Los valores de la FO van desde menos uno a uno donde el mejor ajuste es el correspondiente al valor de uno, esto para el caso de los NSE, In NSE, PBIAS y el Coeficiente de Simetría. Para el caso del BIAS y el RSR los valores van de cero a uno donde el mejor valor de ajuste es cero.

5.5 Resultados de los MPE de las subcuencas

Los resultados particulares se muestran en cada apartado, al final se muestran los datos de los parámetros para la elaboración del MPE general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

5.5.1 Subcuenca de Tarímbaro

Para el caso de la subcuenca de Tarímbaro se trabajó inicialmente con periodo de 22 años que data de 1966 hasta 1987, sin embargo, debido a que la hidrométrica presentaba un salto en el año de 1973, se planteó el supuesto de que probablemente se movió la estación hidrométrica del sitio original provocando una variación en los datos de escurrimientos, por lo que se decidió recortar el periodo de 1973 a 1984 quedando solo 12 años para calibrar y limitando de esta manera a realizar la validación de el MPE-Tarímbaro. Los resultados se muestran a continuación.

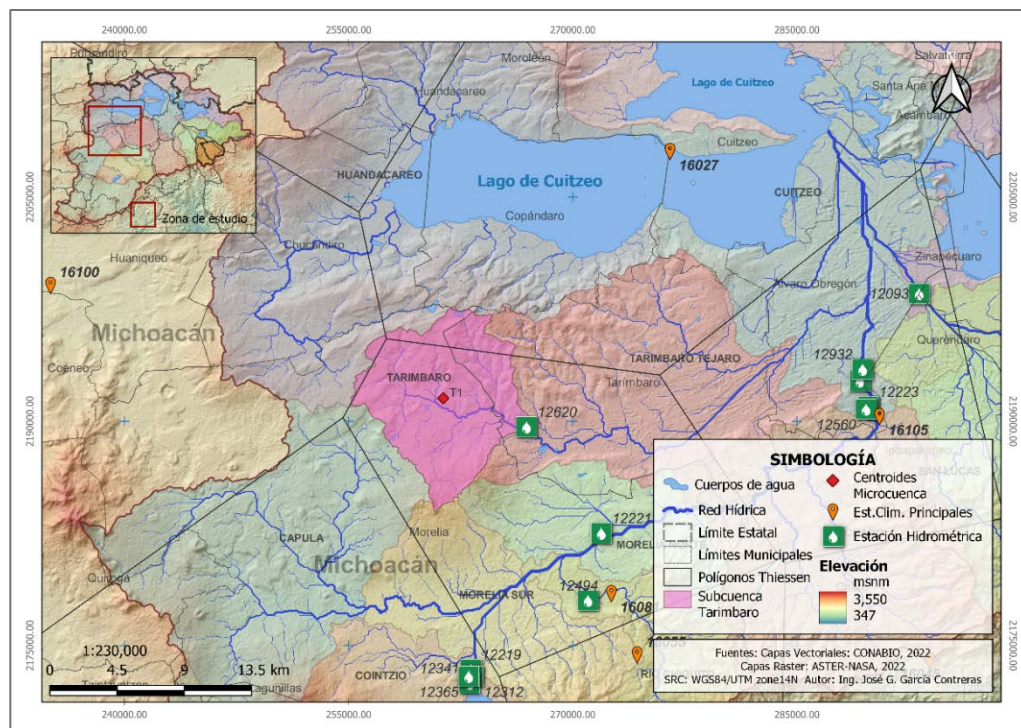


Figura 26. Subcuenca Tarímbaro y las estaciones climatológicas con influencia sobre su superficie.

Tabla 21. Valores obtenidos de la calibración subcuenca Tarímbaro.

Tarímbaro	
Valor de los Indicadores de Ajuste	
FO =	2.67
NS =	0.36
Ln NS =	0.71
PBIAS =	0.60
Coef. Simetría =	0.998

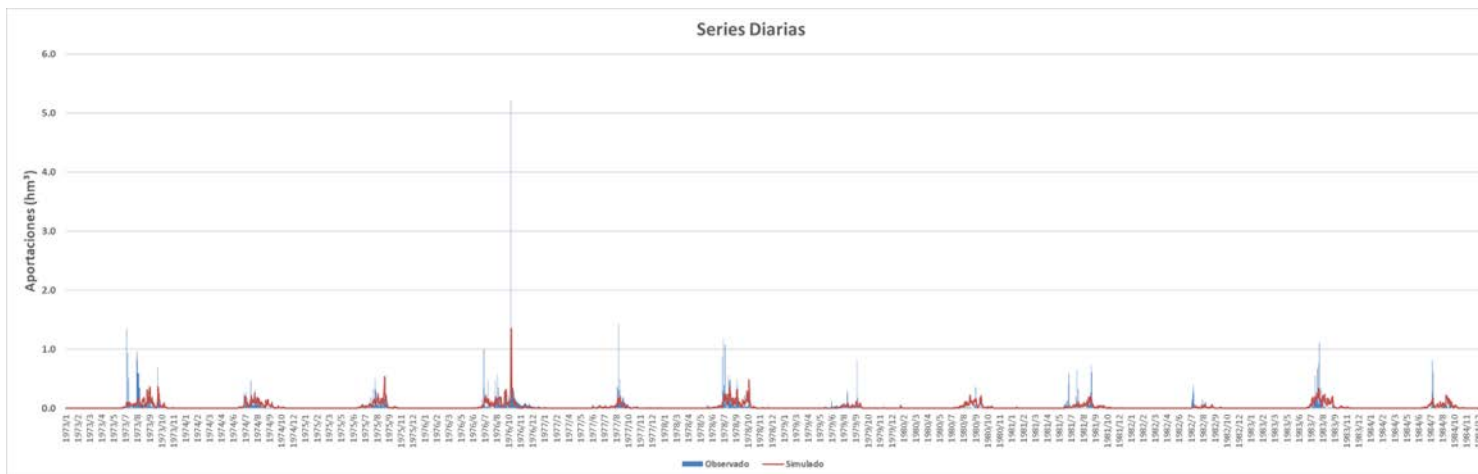


Figura 27. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.

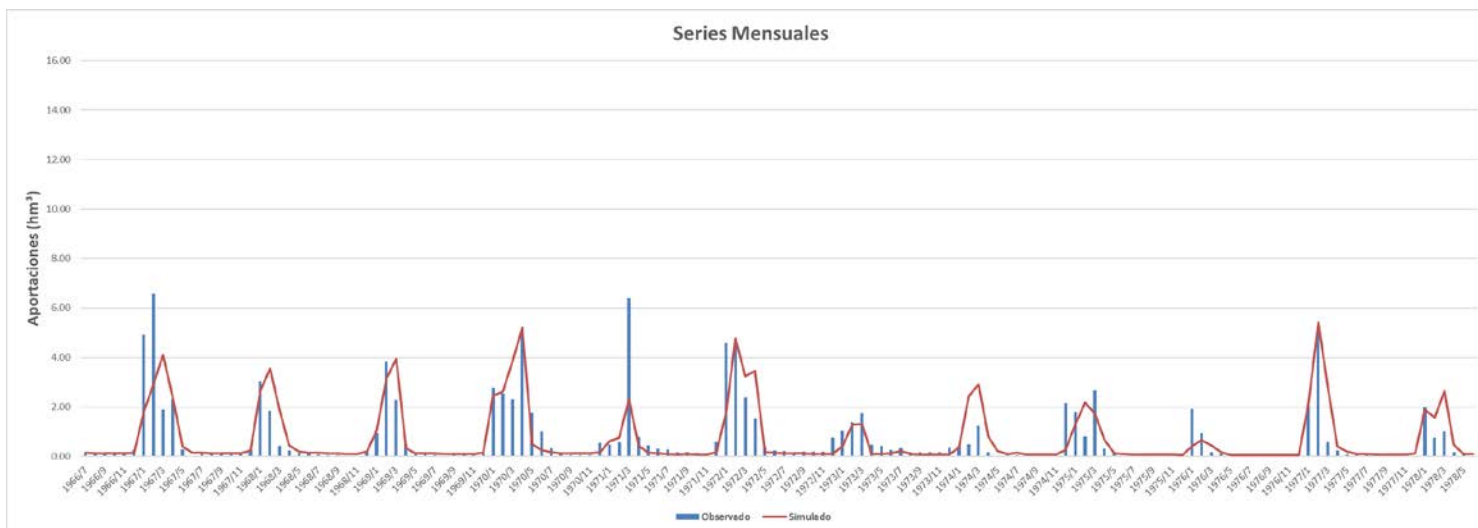


Figura 28. Series mensuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Tarímbaro

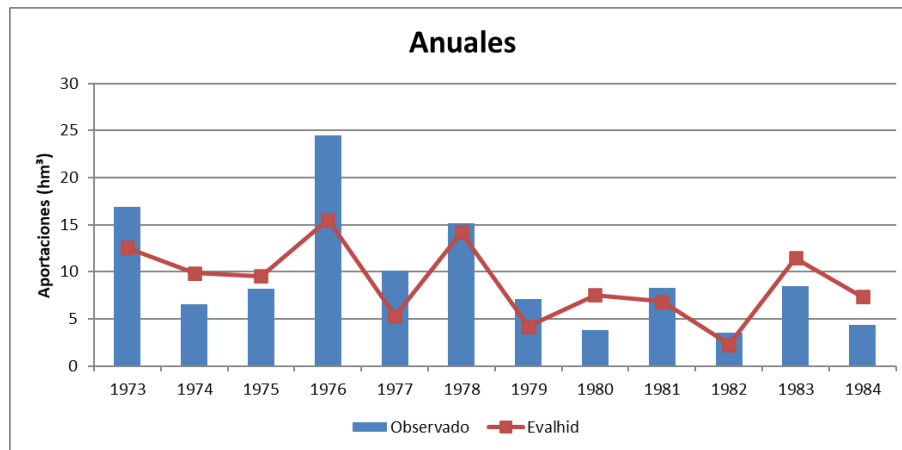


Figura 29. Series anuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.

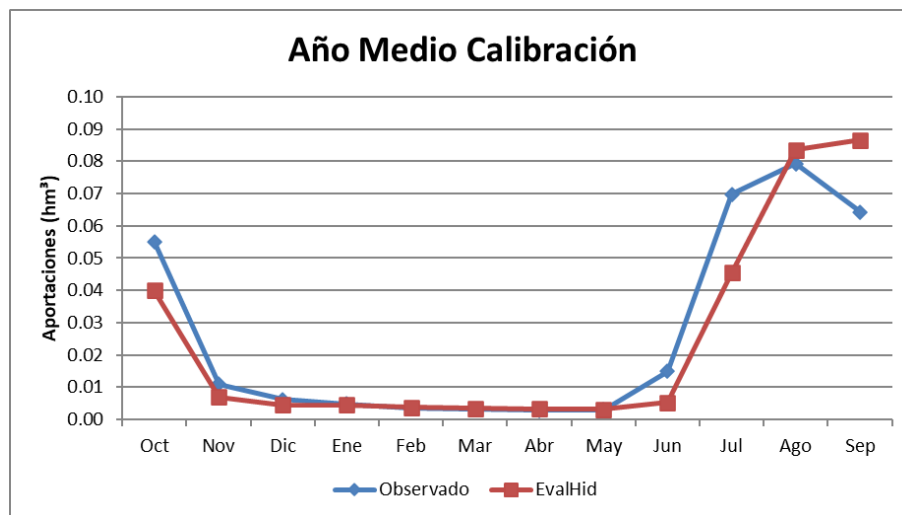


Figura 30. Año medio de calibración del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.

5.5.2 Subcuenca Queréndaro

La subcuenca de Queréndaro inicialmente constaba con registro histórico de 27 años a partir de 1960 hasta 1987, pero al igual que en el caso de la subcuenca de Tarímbaro se mostraba una tendencia en los datos que dividía a la serie en dos, por lo que se decide iniciar en 1968 hasta 1987 quedando 20 años para realizar la calibración. Aunque se considera una cantidad de años suficiente para realizar también la etapa de validación, no se lograba subir los indicadores de ajuste si se consideraba un periodo para dicha etapa por lo que se opta a usar todo el registro histórico para la calibración, dando los siguientes resultados.

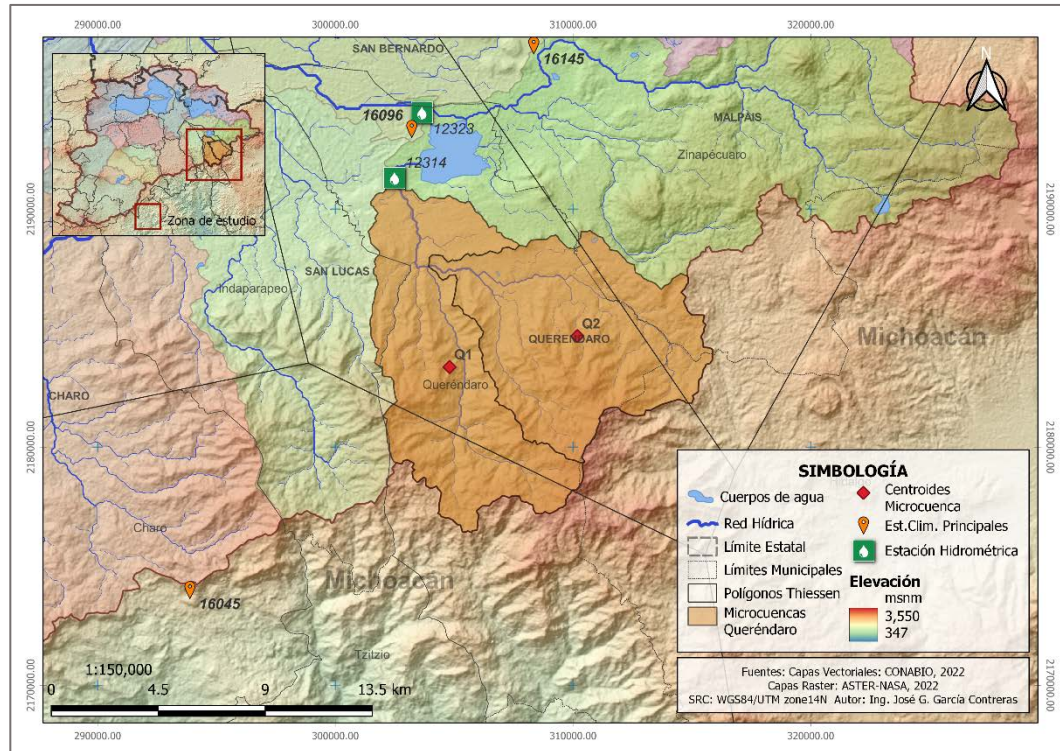


Figura 31. Subcuenca de Queréndaro y estaciones con influencia sobre su superficie.

Tabla 22. Valores obtenidos de la calibración subcuenca Tarímbaro.

Queréndaro	
Valor de los Indicadores de Ajuste	
FO =	2.96
NS =	0.46
Ln NS =	0.80
PBIAS =	0.70
Coef. Simetría =	0.998

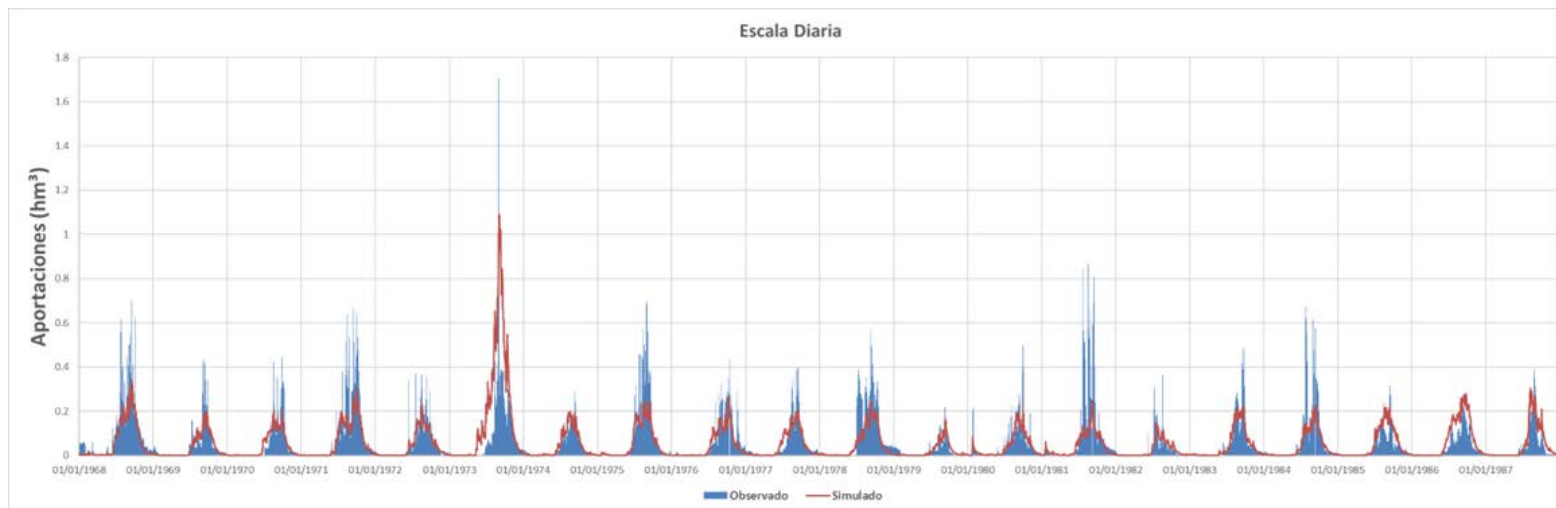


Figura 32. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.

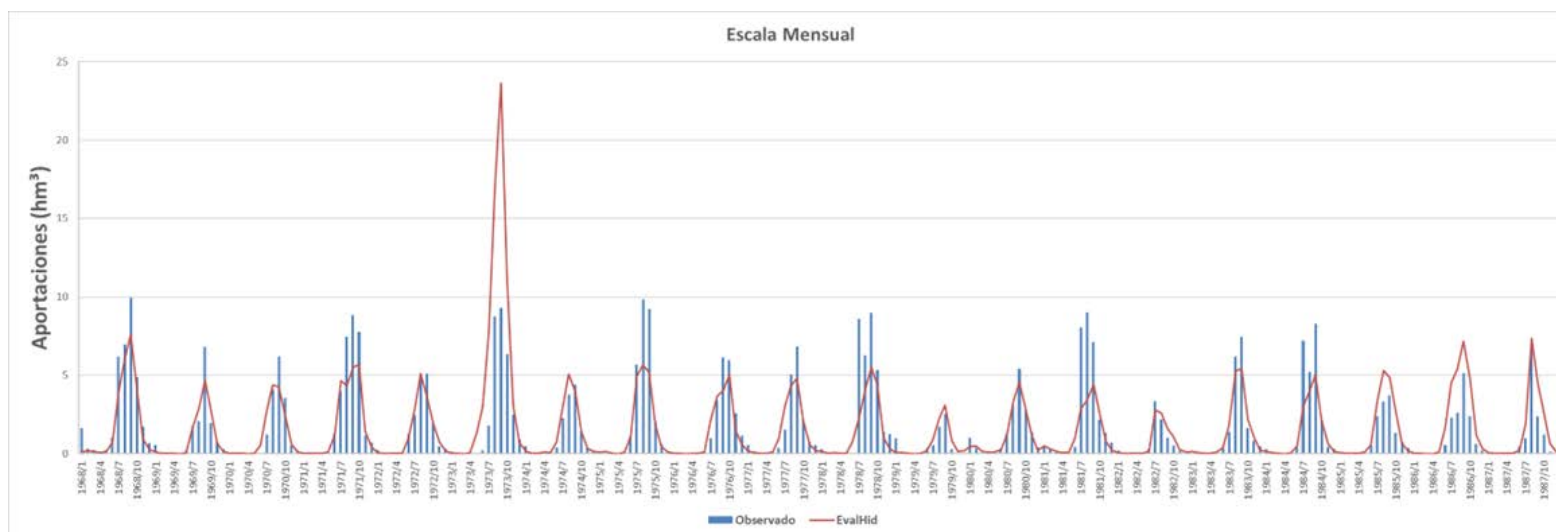


Figura 33. Series mensuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.

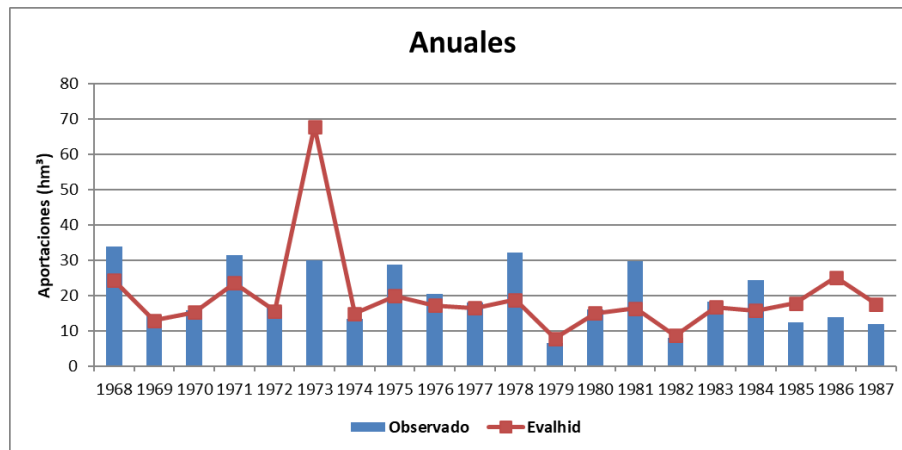


Figura 34. Series anuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.

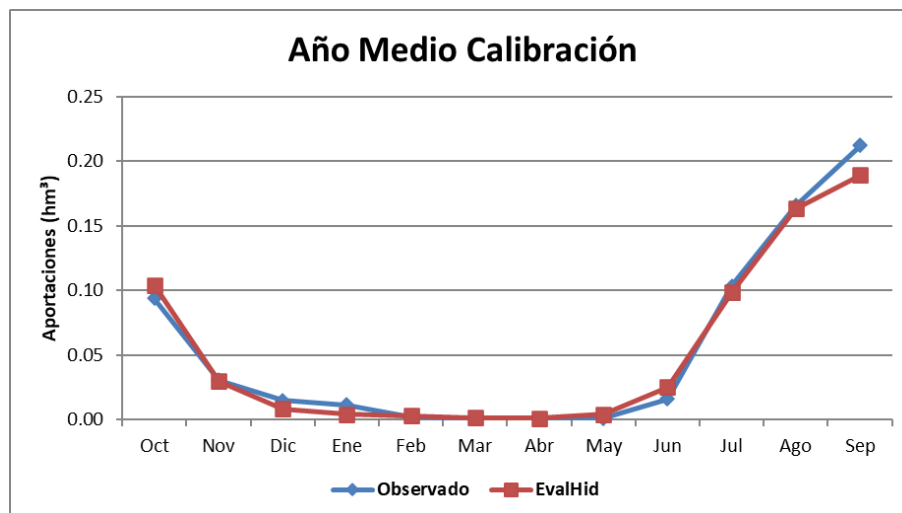


Figura 35. Año medio de calibración del MPE de la subcuenca de Queréndaro.

5.5.3 Subcuenca Santiago Undameo

La subcuenca Santiago Undameo debido a su superficie mayor en comparación con las otras subcuencas y al periodo histórico más extenso, obtuvo los mejores valores de los indicadores de ajuste. En este MPE se consideró una etapa de calentamiento del modelo de un año, es decir se inició la calibración a partir de 1961 hasta 1983 y los años restantes fueron para validación. Se muestran los resultados a continuación.

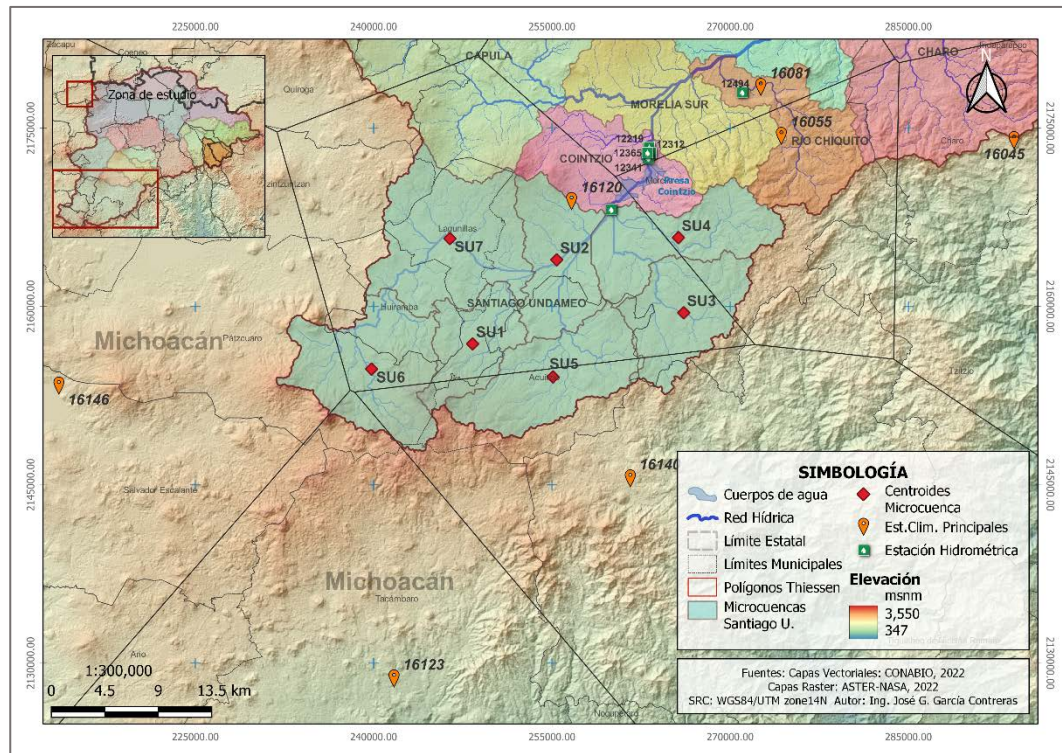


Figura 36. Subcuenca de Santiago Undameo y estaciones con influencia sobre su superficie.

Tabla 23. Valores obtenidos de la calibración subcuenca Santiago Undameo.

Santiago Undameo	
Valor de los Indicadores de Ajuste	
FO =	3.25
NS =	0.67
Ln NS =	0.76
PBIAS =	0.82
Coef. Simetría =	0.998

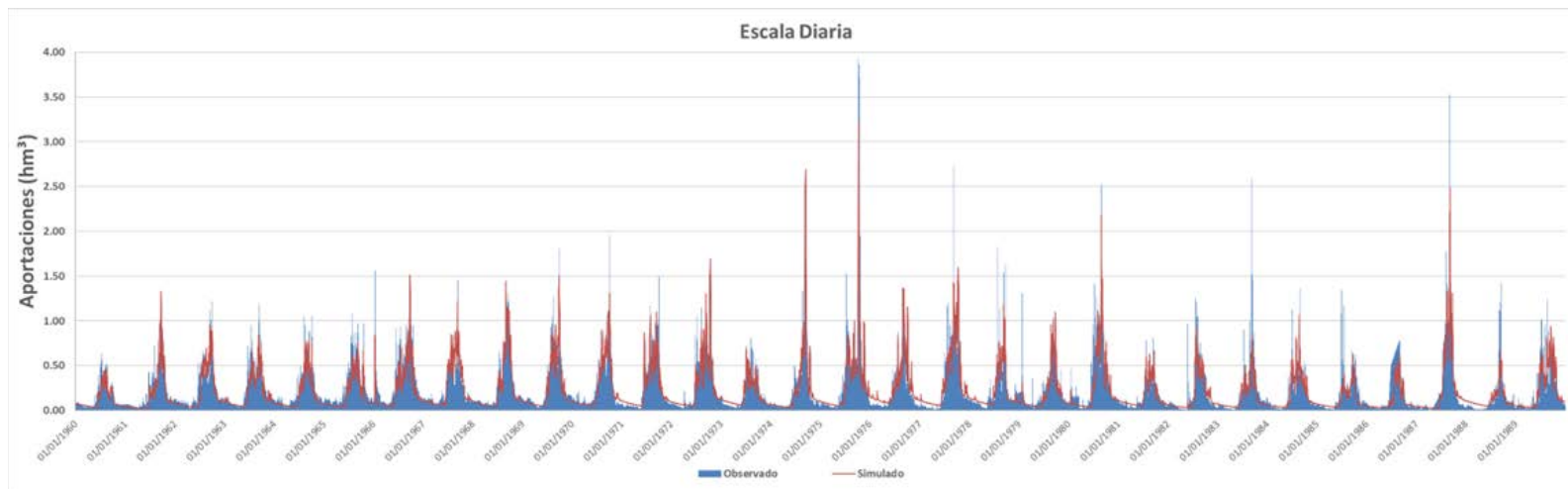


Figura 37. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.

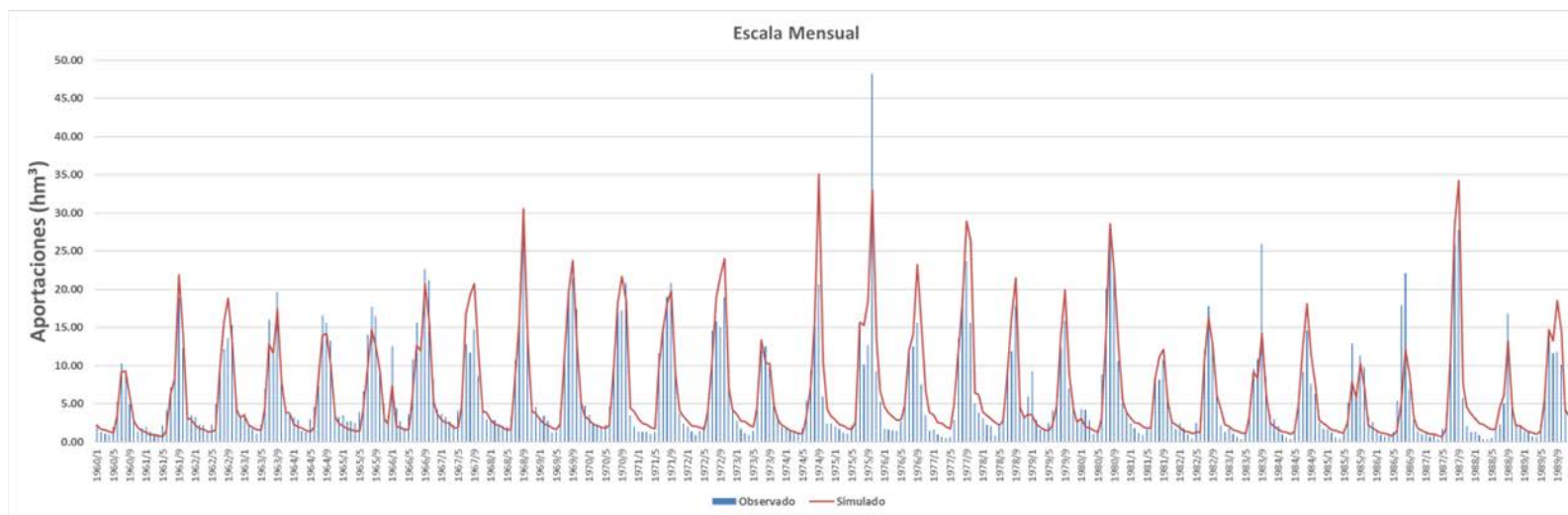


Figura 38. Series mensuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.

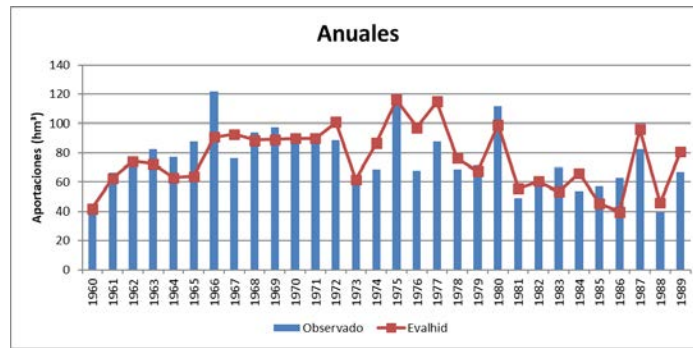


Figura 39. Series anuales de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Santiago Undameo.

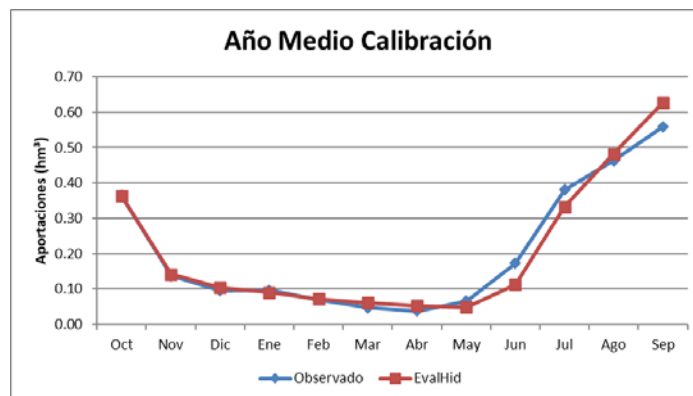


Figura 40. Año medio de calibración del MPE de la subcuenca de Santiago Undameo.

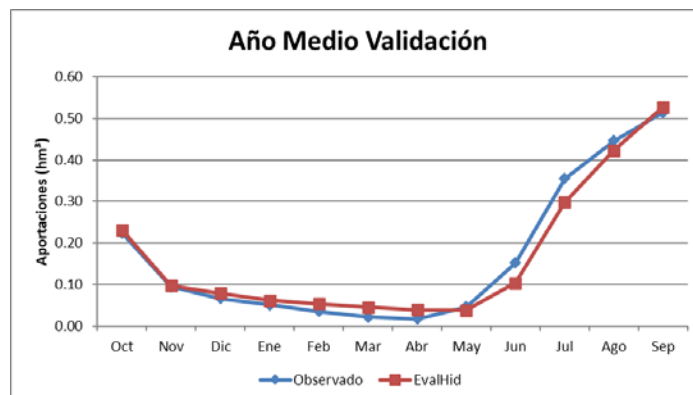


Figura 41. Año medio de validación del MPE de la subcuenca de Santiago Undameo.

5.5.4 Resumen de resultados de los MPE de las subcuencas

Los parámetros del MPE-HBV para las diferentes subcuencas son:

Tabla 24. Resumen de los parámetros del MPE-HBV obtenidos.

Subcuenca	Parámetros HBV								Condiciones iniciales del suelo		
	Betha	FC (mm)	Pwp (mm)	Lmáx (mm)	K0	K1	K2	Kperc	H0 (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)
Santiago Undameo	1.372	797.251	156.712	0.400	0.067	0.067	0.005	0.067	40.000	1.500	75.000
Queréndaro	0.755	998.967	198.197	85.029	0.229	0.124	0.056	0.479	0.000	0.000	0.000
Tarímbaro	3.408	355.571	276.859	13.192	0.636	0.299	0.001	0.065	50.000	1.000	100.000

Como se puede observar, los valores de la capacidad de campo correspondientes a Santiago Undameo corresponden a un tipo de suelo que retiene más agua. La textura predominante en esas subcuencas es fina y los usos de suelo son mayormente bosques, lo que conlleva a que exista una humedad en mayor grado y mayor retención del agua, de igual manera, para la subcuenca de Tarímbaro que muestra un valor de la capacidad de campo más bajo, que, a pesar de tener también suelos con texturas finas, los usos en la subcuenca de Tarímbaro son casi en su totalidad destinados para la agricultura.

Obtenidos los parámetros HBV, se deben asignar a las demás subcuencas para poder elaborar el modelo general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo y así conocer los escurrimientos generados.

5.6 MPE de la Cuenca del Lago de Cuitzeo

El MPE de la cuenca del Lago de Cuitzeo se desarrolla con los resultados de los tres modelos de las subcuencas anteriormente descritos, dado que en la zona de estudio se tiene información limitada para poder calibrar las 17 subcuencas. Lo que hace aplicable el uso de métodos multivariantes para poder asignar los parámetros del modelo HBV en escala diaria a las subcuencas que no tienen información hidrométrica. Esto con la finalidad de que la asignación de parámetros tenga un fundamento estadístico y no arbitrario ya que puede repercutir considerablemente en la simulación para obtener la cantidad de recurso que escurre, se infiltra o se evapotranspira.

5.6.1 Asignación de parámetros del modelo HBV mediante análisis multivariante (AMV)

Los métodos multivariantes permiten analizar grandes cantidades de variables y especies o individuos para compararlos entre sí y formar grupos con

aquellos que sean semejantes en función de dichas variables a través de diferentes métodos de agrupación.

Para el presente caso de estudio se realizará una agrupación por conglomerados jerárquicos o “clusters” los cuales requieren de un proceso previo de análisis para llegar a una correcta agrupación, ya que como se mencionó anteriormente, si se realiza una mala agrupación se cae en el error de formar grupos que no sean similares y se asignen los parámetros erróneamente. El proceso de la elaboración de estos grupos se describe a continuación.

Una vez obtenidos los parámetros de las microcuencas que se pueden calibrar y validar dada la información disponible de las estaciones hidrométricas. Se procede a realizar un AMV para generar conglomerados jerárquicos que permitan asignar dichos parámetros a las cuencas que no cuentan con información hidrométrica.

Para el presente caso de estudio se realizará un AMV considerando aquellas variables que influyan en el escurrimiento de una cuenca, donde de preferencia sean variables continuas y no discretas, haciendo uso del programa JMP para realizar dicho análisis.

El primer paso es realizar un análisis exploratorio mediante una matriz informativa que incluya aquellas variables que, a consideración, permitan identificar similitudes o diferencias entre los individuos (para este caso las subcuencas) y formar conglomerados. Se tiene una matriz preliminar la cual incluye las siguientes variables:

Tabla 25. Matriz preliminar para la elaboración del AMV.

SUBCUENCA	GRUESA	FINA	MEDIA	AGUA	DESPR. DE VEGETACIÓN	ASENT. HUMANOS	BOSQUE	CUERPO DE AGUA	AGRICULTUR A	MEZQUITAL XERÓFILO	PASTIZAL CULTIVADO	PASTIZAL HALÓFILO	PASTIZAL INDUCIDO	VEGETACION SECUNDARIA	TULAR	PRECIP. ACUMULADA	ETP ACUMULADA	Pendiente Media
SANTIAGO UNDAMEO	0.000	141.062	482.039	0.623	0.156	11.358	151.344	4.300	301.622	0.000	0.000	0.000	51.225	103.720	0.000	27465.765	50786.463	0.169
CAPULA	0.297	65.628	188.402	0.000	2.613	5.395	47.892	0.000	83.490	0.000	0.000	0.000	55.048	59.891	0.000	25936.065	50568.224	0.141
COINTZIO	0.000	39.160	44.554	4.928	0.000	4.927	22.880	4.867	33.524	0.000	0.000	0.000	3.939	18.505	0.000	27790.302	50728.344	0.148
MORELIA SUR	0.000	121.261	15.355	0.033	0.000	57.657	18.302	0.000	22.427	0.000	1.683	0.000	18.376	18.205	0.000	27123.873	50950.328	0.14
RIO CHIQUITO	0.000	53.732	22.558	12.689	0.000	22.172	42.792	0.000	15.400	0.000	0.510	0.000	2.480	5.623	0.000	32435.241	49972.479	0.222
HUANDACAREO	0.000	370.202	51.751	114.681	0.000	10.425	42.124	102.154	116.910	0.000	0.000	8.674	64.889	189.702	1.758	23580.591	51755.319	0.138
TARIMBARO	0.000	77.150	15.840	0.000	0.000	1.029	6.942	0.173	18.481	0.000	0.000	0.000	34.397	31.969	0.000	24073.131	51323.157	0.172
MORELIA NORTE	0.000	76.719	21.663	3.486	0.000	55.237	7.653	0.000	17.691	0.000	1.215	0.000	14.314	5.758	0.000	25385.976	51270.283	0.132
TARIMBARO TEJARO	0.000	213.627	6.250	0.841	0.901	19.250	2.379	0.056	100.391	0.000	0.000	0.000	29.175	68.566	0.000	22572.337	51872.942	0.141
CHARO	0.000	166.479	101.403	0.496	0.000	9.395	67.461	0.000	78.380	0.000	0.000	0.000	78.816	34.325	0.000	29923.516	48988.905	0.21
CUAMIO	0.000	323.602	3.238	23.322	0.000	6.840	16.211	62.440	128.012	0.000	0.000	4.329	71.530	54.443	6.356	22799.862	52702.304	0.098
CUITZEO	0.000	195.746	17.442	99.490	0.000	13.194	3.892	71.293	141.043	0.000	0.000	10.761	5.144	30.150	37.203	23171.262	52510.689	0.072
SAN BERNARDO	0.000	20.868	79.775	0.034	0.252	4.797	1.230	0.126	75.632	0.000	0.000	0.000	13.824	4.262	0.554	25555.511	53837.122	0.084
SAN LUCAS	0.000	49.561	70.652	1.194	0.000	3.601	34.995	0.000	51.335	0.000	0.000	0.000	0.000	31.475	0.000	26467.035	51684.817	0.22
QUERENDARO	0.000	24.593	106.067	0.132	0.000	1.694	79.378	0.000	25.851	0.000	0.000	0.000	1.136	22.734	0.000	28923.459	52157.138	0.318
IRAMUCO	5.947	126.302	103.478	80.250	0.000	7.768	19.730	74.103	97.909	1.486	0.000	8.408	15.628	81.225	9.719	25661.021	53552.593	0.125
MALPAIS	3.935	11.231	172.855	0.443	0.116	7.577	60.844	3.346	57.877	0.000	0.000	0.000	4.831	48.930	4.942	26774.256	53450.773	0.206

Como primer paso se verificará mediante un análisis de correlación, aquellas variables que sean redundantes ya que estas no generan información significativa. A esto se le llama depuración de la matriz preliminar, una vez depurada se considera una matriz informativa. Para el presente caso de estudio se consideró como variables redundantes aquellas con un coeficiente de correlación mayor a 0.75. Tiendo como variables redundantes bosque y media; cuerpo de agua y agua; pastizal halófilo, agua y cuerpo de agua; tular y pastizal halófilo; pastizal cultivado y asentamientos humanos; mezquital xerófilo y gruesa.

Antes de eliminar aquellas variables que son redundantes se calcula la variación explicada acumulada de toda la matriz siendo esta del 66.675% en sus tres primeros componentes por lo que se debe aumentar por lo menos a un 70% preferentemente. También se hace un análisis de valores atípicos (outlayers) mediante el cálculo de distancias de Mahalanobis y se observa que no existen valores atípicos dentro de la matriz preliminar por lo que se procede a depurar dicha matriz y observar si existen cambios.

Tabla 26. Matriz de correlación entre variables de análisis.

	GRUESA	FINA	MEDIA	AGUA	DESPROVIS TO DE VEGETACI N	ASENTAMIE NTOS HUMANOS	BOSQUE	CUERPO DE AGUA	AGRICULTU RA	MEZQUITAL XERÓFILO	PASTIZAL CULTIVADO	PASTIZAL HALÓFILO	PASTIZAL INDUCIDO	VEGETACIO N SECUNDARI A	TULAR	PRECIPITACI ON ACUMULADA	ETP ACUMULADA	Pendiente Media
GRUESA	1	-0.1533	0.1454	0.2677	-0.068	-0.1495	-0.0038	0.2835	0.009	0.8232	-0.1546	0.3098	-0.2082	0.1695	0.1678	-0.0165	0.5165	-0.0262
FINA	-0.1533	1	-0.16	0.6163	-0.0927	0.0271	-0.0822	0.746	0.4551	0.0102	-0.1113	0.622	0.6722	0.6892	0.2552	-0.5419	0.0033	-0.4214
MEDIA	0.1454	-0.16	1	-0.1855	0.2122	-0.2344	0.8768	-0.1772	0.7163	0.0335	-0.2601	-0.1928	0.2178	0.3264	-0.159	0.238	-0.0969	0.186
AGUA	0.2677	0.6163	-0.1855	1	-0.2023	-0.1027	-0.1956	0.9415	0.27	0.4056	-0.1924	0.9688	0.104	0.5915	0.6484	-0.3982	0.3085	-0.4093
DESPROVIS TO DE VEGETACIÓN	-0.068	-0.0927	0.2122	-0.2023	1	-0.1268	0.0241	-0.2114	0.0779	-0.094	-0.1577	-0.198	0.2562	0.1022	-0.1438	-0.1418	-0.1483	-0.1319
ASENTAMIENTOS HUMANOS	-0.1495	0.0271	-0.2344	-0.1027	-0.1268	1	-0.2182	-0.1615	-0.2317	-0.0992	0.9551	-0.1314	-0.1412	-0.2305	-0.0791	0.0546	-0.2306	-0.1913
BOSQUE	-0.0038	-0.0822	0.8768	-0.1956	0.0241	-0.2182	1	-0.1852	0.5596	-0.1158	-0.2119	-0.2401	0.2543	0.3208	-0.2546	0.4859	-0.3256	0.5291
CUERPO DE AGUA	0.2835	0.746	-0.1772	0.9415	-0.2114	-0.1615	-0.1852	1	0.3368	0.414	-0.2393	0.9519	0.2749	0.5453	0.5624	-0.4992	0.3851	-0.4575
AGRICULTURA	0.009	0.4551	0.7163	0.27	0.0779	-0.2317	0.5596	0.3368	1	0.0645	-0.3735	0.3183	0.4514	0.5681	0.2618	-0.2583	0.0765	-0.3035
MEZQUITAL XERÓFILO	0.8232	0.0102	0.0335	0.4056	-0.094	-0.0992	-0.1158	0.414	0.0645	1	-0.1048	0.4532	-0.1122	0.1884	0.174	-0.0538	0.3752	-0.1534
PASTIZAL CULTIVADO	-0.1546	-0.1113	-0.2601	-0.1924	-0.1577	0.9551	-0.2119	-0.2393	-0.3735	-0.1048	1	-0.2208	-0.2055	-0.3359	-0.1687	0.1771	-0.2438	-0.0825
PASTIZAL HALÓFILO	0.3098	0.622	-0.1928	0.9688	-0.198	-0.1314	-0.2401	0.9519	0.3183	0.4532	-0.2208	1	0.1127	0.4978	0.7588	-0.4778	0.396	-0.4835
PASTIZAL INDUCIDO	-0.2082	0.6722	0.2178	0.104	0.2562	-0.1412	0.2543	0.2749	0.4514	-0.1122	-0.2055	0.1127	1	0.5428	-0.1812	-0.2217	-0.339	-0.2076
VEGETACION SECUNDARIA	0.1695	0.6892	0.3264	0.5915	0.1022	-0.2305	0.3208	0.6453	0.5681	0.1884	-0.3359	0.4978	0.5428	1	-0.0071	-0.3745	0.0861	-0.1397
TULAR	0.1678	0.2552	-0.159	0.6484	-0.1438	-0.0791	-0.2546	0.5624	0.2618	0.174	-0.1687	0.7588	0.1812	-0.0071	1	-0.3686	0.3535	-0.4446
PRECIPITACIÓN ACUMULADA	-0.0165	-0.5419	0.238	-0.3982	-0.1418	0.0546	0.4859	-0.4992	-0.2583	-0.0538	0.1771	-0.4778	-0.2237	-0.3745	-0.3686	1	-0.5349	0.6615
ETP ACUMULADA	0.5165	0.0033	-0.0969	0.3085	-0.1483	-0.2306	-0.3256	0.3851	0.0765	0.3752	-0.2438	0.396	-0.339	0.0861	0.3535	-0.5349	1	-0.3236
Pendiente Media	-0.0262	-0.4214	0.186	-0.4093	-0.1319	-0.1913	0.5291	-0.4575	-0.3035	-0.1534	-0.0825	-0.4835	-0.2076	-0.1397	-0.4446	0.6615	-0.3236	1

Posteriormente, se realiza un análisis de componentes principales para obtener los valores de los vectores propios y la variación explicada acumulada. Para este caso las variables que se eliminaron fueron: media (textura), agua (textura), pastizal halófilo, asentamientos humanos y mezquital xerófilo ya que al eliminarlas se tuvo un aumento de la variación explicada. Los resultados del análisis de componentes principales son los siguientes:

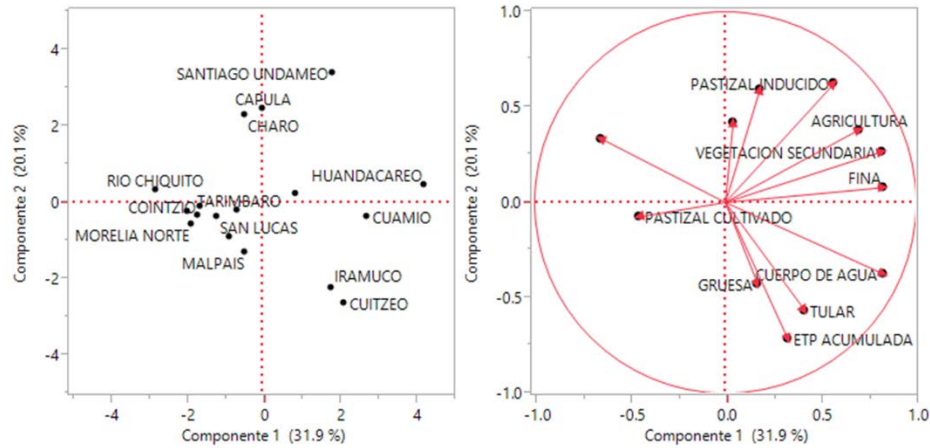


Figura 42. Gráfico de dispersión y de vectores propios de la matriz depurada en componente 1 y 2.

La variación explicada es del 67.173% una vez eliminadas las variables redundantes. Se puede apreciar en el gráfico de dispersión cuales variables tienen mayor peso en cada componente, se pueden eliminar variables para aumentar la variación, sin embargo, limitar el AMV con pocas variables repercute en la formación de conglomerados y en el valor de la distancia máxima para detectar valores atípicos.

Valor propio	20	40	60	80	Valores propios					Porcentaje				
4.1365					Número	Valor propio	Porcentaje	20	40	60	80	acum.		
2.6849					1	4.1365	31.819					31.819		
1.7537					2	2.6849	20.653					52.472		
1.2483					3	1.7537	13.490					65.962		
0.9387					4	1.2483	9.602					75.564		
0.7315					5	0.9387	7.221					82.785		
0.6059					6	0.7315	5.627					88.412		
0.4011					7	0.6059	4.661					93.073		
0.2250					8	0.4011	3.065					96.138		
0.1603					9	0.2250	1.731					97.869		
0.0777					10	0.1603	1.233					99.102		
0.0285					11	0.0777	0.598					99.700		
					12	0.0285	0.219					99.919		
					13	0.0079	0.061					100.000		

Vectores propios													
	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6	Prin7	Prin8	Prin9	Prin10	Prin11	Prin12	Prin13
GRUESA	0.08186	-0.19370	0.51373	-0.09618	0.40382	0.41824	0.29676	-0.31072	0.16348	-0.31468	0.16172	-0.05774	-0.06901
FINA	0.04032	0.15538	-0.22648	0.28006	0.12674	-0.11369	0.05420	0.05152	0.17937	0.06510	0.66281	0.11928	-0.39764
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	0.01426	0.14551	-0.17957	-0.76210	0.01331	0.17904	0.35746	0.34931	0.05247	0.22594	0.15376	-0.07509	-0.02165
BOSQUE	-0.06727	0.48300	0.36581	0.06899	-0.19915	0.22981	-0.13997	0.14011	0.16869	0.12433	-0.29504	-0.09469	-0.59328
CUERPO DE AGUA	0.42134	-0.08213	0.09748	0.27999	0.13225	-0.05977	0.31975	0.14656	-0.20123	0.35671	-0.21440	-0.60107	0.08975
AGRICULTURA	0.29953	0.29590	0.18707	-0.04676	-0.44191	0.31303	-0.30900	-0.07155	-0.07955	-0.08312	0.34609	-0.20900	0.46365
PASTIZAL CULTIVADO	-0.17766	-0.13526	-0.37404	0.34769	0.15258	0.68427	-0.10121	0.30909	0.24397	0.09476	-0.09979	-0.00371	0.14512
PASTIZAL INDUCIDO	0.24117	0.40930	-0.25127	-0.04038	0.16529	-0.00069	0.09825	-0.52035	0.42399	0.19715	-0.32393	0.13922	0.24102
VEGETACION SECUNDARIA	0.35232	0.29004	0.13566	0.03743	0.34689	0.03991	-0.03349	0.41102	-0.33959	-0.22089	-0.21407	0.49126	0.17104
TULAR	0.24930	-0.27971	0.11125	0.13284	-0.58914	0.00721	0.45196	0.18155	0.31738	-0.00780	-0.14894	0.34476	0.05103
PRECIPITACIÓN ACUMULADA	-0.37334	0.19919	0.19023	0.23369	-0.06115	0.13123	0.36399	-0.18810	-0.35680	0.49225	0.23223	0.31949	0.12536
ETP ACUMULADA	0.20137	-0.38487	0.33241	-0.17196	0.12207	-0.03754	-0.44910	0.05131	0.19380	0.58967	0.02673	0.25231	0.04035
Pendiente Media	-0.31923	0.23150	0.30612	0.14057	0.17776	-0.37120	0.07072	0.36496	0.49281	-0.04138	0.16743	-0.13240	0.36512

Figura 43. Valores de los vectores propios, variación explicada acumulada y valores de los vectores por componentes obtenidos en JMP.

Observamos que ya no hay variables redundantes en la matriz depurada (Tabla 25) por lo que se procede con el conglomerado jerárquico. Sin embargo, al hacer el análisis de valores atípicos (Figura 44) se observa que hay varios individuos que están por encima de la distancia máxima, Sin embargo, se realizarán los

conglomerados considerando a todos los individuos para observar los conglomerados.

Tabla 27. Matriz informativa para realizar el AMV.

	GRUESA	FINA	DESPROVIS TO DE VEGETACI N	BOSQUE	CUERPO DE AGUA	AGRICULTU RA	PASTIZAL CULTIVADO	PASTIZAL INDUCIDO	VEGETACIO N SECUNDARI A	TULAR	PRECIPITACI ÓN ACUMULAD A	ETP ACUMULAD A	Pendiente Media
GRUESA	1	-0.1533	-0.068	-0.0038	0.2835	0.009	-0.1546	-0.2082	0.1695	0.1678	-0.0165	0.5165	-0.0262
FINA	-0.1533	1	-0.0927	-0.0822	0.746	0.4551	-0.1113	0.6722	0.6892	0.2552	-0.5419	0.0033	-0.4214
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	-0.068	-0.0927	1	0.0241	-0.2114	0.0779	-0.1577	0.2562	0.1022	-0.1438	-0.1418	-0.1483	-0.1319
BOSQUE	-0.0038	-0.0822	0.0241	1	-0.1852	0.5596	-0.2119	0.2543	0.3208	-0.2546	0.4859	-0.3256	0.5291
CUERPO DE AGUA	0.2835	0.746	-0.2114	-0.1852	1	0.3368	-0.2393	0.2749	0.6453	0.5624	-0.4992	0.3851	-0.4575
AGRICULTURA	0.009	0.4551	0.0779	0.5596	0.3368	1	-0.3735	0.4514	0.5681	0.2618	-0.2583	0.0765	-0.3035
PASTIZAL CULTIVADO	-0.1546	-0.1113	-0.1577	-0.2119	-0.2393	-0.3735	1	-0.2055	-0.3359	-0.1687	0.1771	-0.2438	-0.0825
PASTIZAL INDUCIDO	-0.2082	0.6722	0.2562	0.2543	0.2749	0.4514	-0.2055	1	0.5428	-0.1812	-0.2237	-0.339	-0.2076
VEGETACION SECUNDARIA	0.1695	0.6892	0.1022	0.3208	0.6453	0.5681	-0.3359	0.5428	1	-0.0071	-0.3745	0.0861	-0.1397
TULAR	0.1678	0.2552	-0.1438	-0.2546	0.5624	0.2618	-0.1687	-0.1812	-0.0071	1	-0.3686	0.3535	-0.4446
PRECIPITACIÓN ACUMULADA	-0.0165	-0.5419	-0.1418	0.4859	-0.4992	-0.2583	0.1771	-0.2237	-0.3745	-0.3686	1	-0.5349	0.6615
ETP ACUMULADA	0.5165	0.0033	-0.1483	-0.3256	0.3851	0.0765	-0.2438	-0.339	0.0861	0.3535	-0.5349	1	-0.3236
Pendiente Media	-0.0262	-0.4214	-0.1319	0.5291	-0.4575	-0.3035	-0.0825	-0.2076	-0.1397	-0.4446	0.6615	-0.3236	1

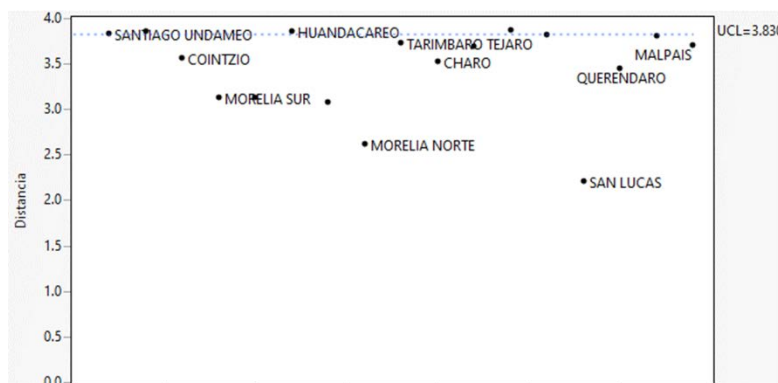


Figura 44. Valores atípicos de la matriz informativa obtenidos mediante distancias de Mahalanobis.

Se realizan los conglomerados jerárquicos mediante los siguientes métodos, tanto con datos brutos como datos estandarizados:

- Medias
- Centroides
- Ward
- Vecino más cercano
- Vecino más lejano
- Ward acelerado

El dendrograma que representa mejor los resultados y agrupa de mejor manera las subcuencas en función de sus características es por el método de las medias.

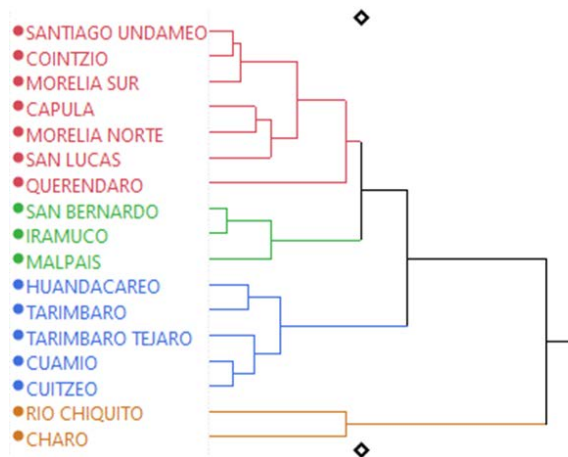


Figura 45. Dendrograma por el método de las medias.

Los otros métodos agrupan de la casi de la misma manera a las subcuencas calibradas, sin embargo, lo que se requiere en un dendrograma para representar mejor el resultado de los grupos es que sea un dendrograma compacto, es decir que sus distancias entre grupos no sean muy grandes respecto de otros. Es por esto que el dendrograma realizado por el método de las Medias es el que se tomará para asignar los parámetros del modelo HBV.

Con la finalidad de corroborar los conglomerados obtenidos, se realiza un análisis discriminante.

En el gráfico canónico (Figura 46) se puede observar que a pesar de que los individuos se encuentran fuera de los límites de confianza debido a las diferencias existentes entre sí, los grupos realizados se encuentran definidamente separados uno de otro. Sin embargo, también se realiza un gráfico canónico para verificar si la agrupación realizada es adecuada en función de los conglomerados mostrados en el dendrograma obtenido por el método de las Medias (Figura 47) y se observa como claramente están definidos 5 grupos, no obstante, la información de las cuencas calibradas es solamente tres, por lo que los grupos que se muestran alejados se les asignan los parámetros del modelo HBV con los que son más parecidos.

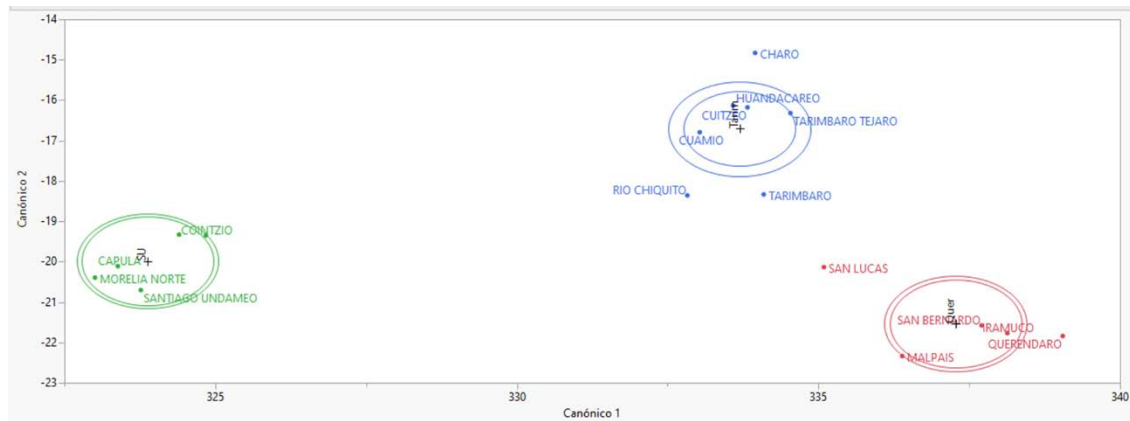


Figura 46. Gráfico canónico en función de las subcuencas.

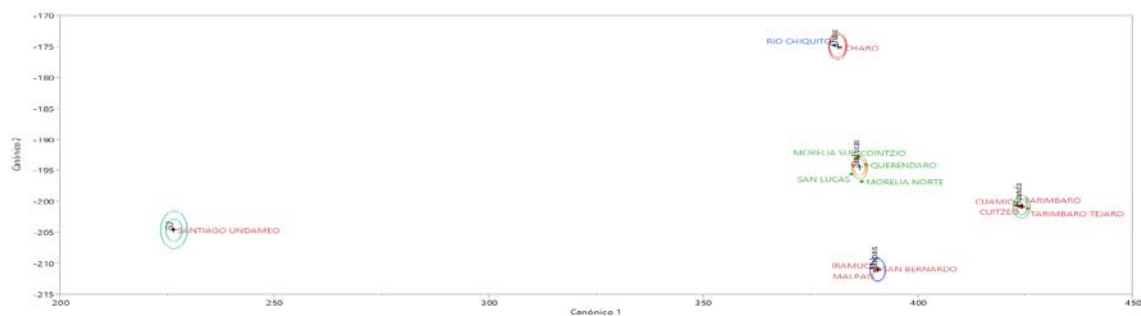


Figura 47. Gráfico canónico en función de los grupos realizados por el Método de las Medias.

Para finalizar el análisis discriminante se realizan las pruebas estadísticas más recomendadas y se obtienen los valores de la correlación canónica que demuestra la confiabilidad de la agrupación de los datos donde se observa que las pruebas a pesar de que no están dentro de los límites de confianza, 3 de ellas muestran que la probabilidad de que sean iguales es menor al 25%.

Valor propio	Porcentaje	Porcentaje acum.	Corr canónica	Razón de verosimilitud	Aproximación de F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Prob > F
34.8914751	86.9116	86.9116	0.9859707	0.00445469	2.1512	26	4	0.2391
5.25447488	13.0884	100.0000	0.91657759	0.15988552	1.3136	12	3	0.4628

Prueba	Valor	Aproximación de F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Prob > F
Lambda de Wilks	0.0044547	2.1512	26	4	0.2391
Traza de Pillai	1.8122527	2.2275	26	6	0.1610
Hotelling-Lawley	40.14595	1.5441	26	2	0.4685
Raíz máxima de Roy	34.891475	8.0519	13	3	0.0559

Figura 48. Valores de la correlación canónica y resultados de las pruebas para verificar la agrupación del dendrograma obtenidos en JMP.

5.6.2 Obtención de los escurrimientos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo para el periodo 1985-2020.

Finalmente se forman los grupos a los que pertenece cada microcuenca sin información hidrométrica, siendo los que se muestran a continuación:

Tabla 28. Grupos para la asignación de parámetros del modelo HBV.

Asignación de parámetros		
Grupo "Santiago Undameo"	Grupo "Tarímbaro"	Grupo "Queréndaro"
Cointzio	Huanda	San Bernardo
More Sur	Tarímbaro-Tejaro	Iramuco
Capula	Cuamio	Malpais
More Nor	Cuitzeo	San Lucas
	Río Chiquito	
	Charo	

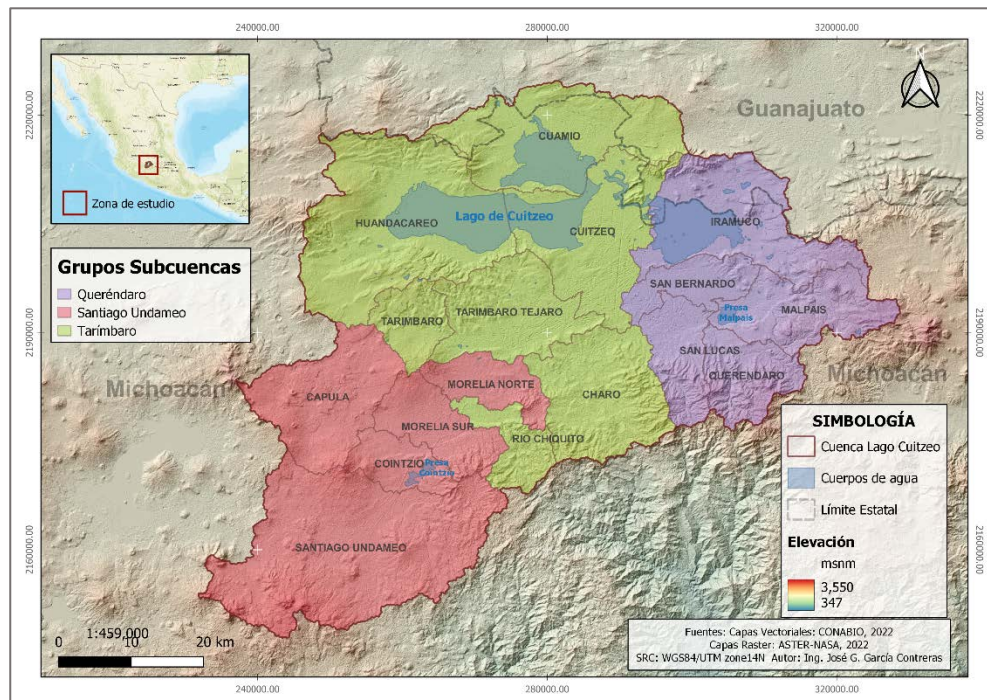


Figura 49. Mapa de agrupación de las subcuencas para asignación de parámetros HBV.



Una vez asignados los valores de los parámetros HBV, se procede a realizar la modelación de la cuenca completa en escala diaria para obtener los escurrimientos teniendo como punto de desagüe el Lago de Cuitzeo.

La asignación de parámetros mediante un AMV permite tener un fundamento estadístico para el desarrollo de modelos semidistribuidos en zonas con poca información hidrométrica, además de extender las series a un periodo mayor sin la necesidad de que coincidan los registros históricos de las 3 subcuencas para el presente caso de estudio. Estos escurrimientos abarcan un periodo de 1985 al 2020 donde los resultados se muestran de la siguiente manera:

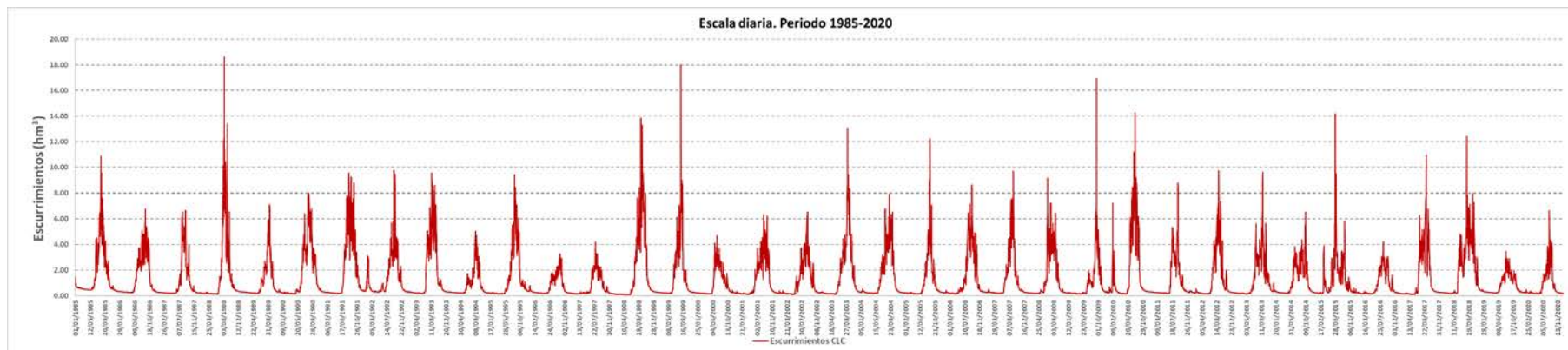


Figura 50. Escurreimientos a escala diaria de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

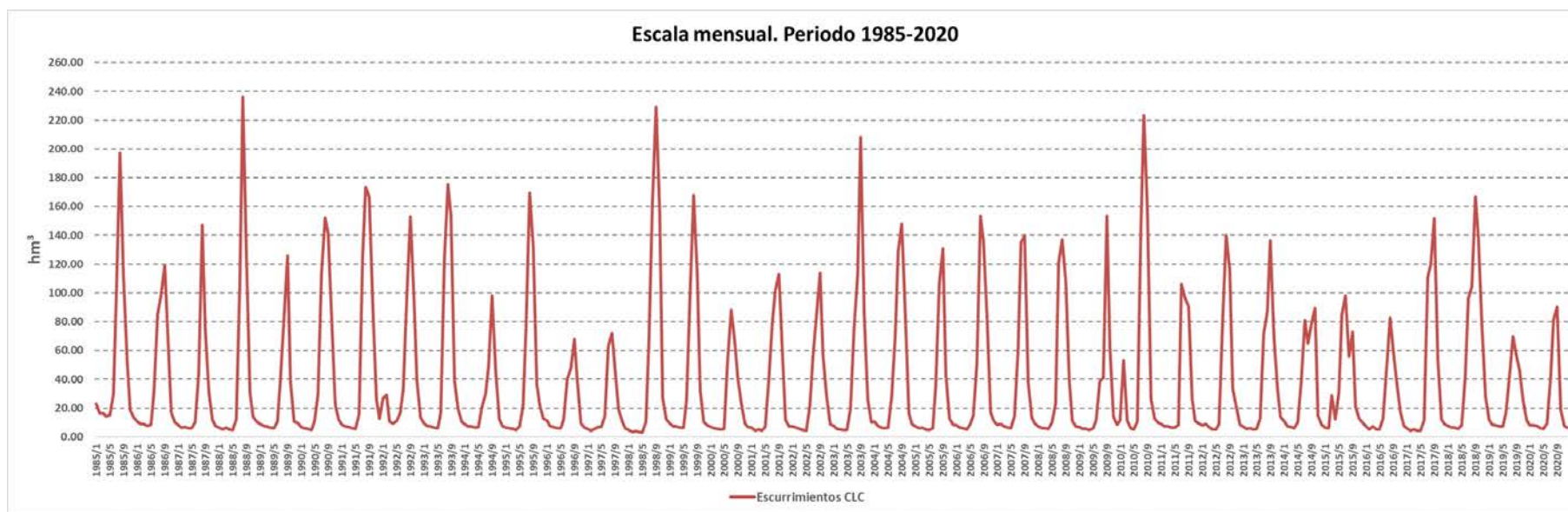


Figura 51. Escurreimientos a escala mensual de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Al ser un MPE en escala diaria se puede identificar cuáles son las semanas o hasta días con menor o mayor escurrimiento para poder proponer medidas de gestión. Se puede ver en el gráfico a escala diaria (Figura 50) que existe un periodo de 1996 a 1998 donde los escurrimientos son menores a todos los demás y que además hay un comportamiento similar en tres periodos donde los escurrimientos aumentan y disminuyen de manera casi periódica. Sin embargo, hay una tendencia a la baja de dichos escurrimientos en los 35 años hasta 2020.

Una de las ventajas que se puede tener al realizar una modelación en escala diaria, es que puede aumentarse esa escala a mensual (Figura 51) tal como se observa en el gráfico donde se aprecia que podría dividirse en dos periodos donde la tendencia es similar, pero es más notoria la reducción en los últimos años.

Se puede observar en la gráfica de año medio que los meses con mayor escurrimiento corresponden a los meses de julio, agosto y septiembre. En cuanto a los meses con menor escurrimiento son marzo, abril y mayo por lo que durante meses previos a estos, podrían adaptarse medidas que permitan garantizar cierta cantidad de agua para evitar sequías drásticas y de una manera mitigar un poco el impacto de los daños.

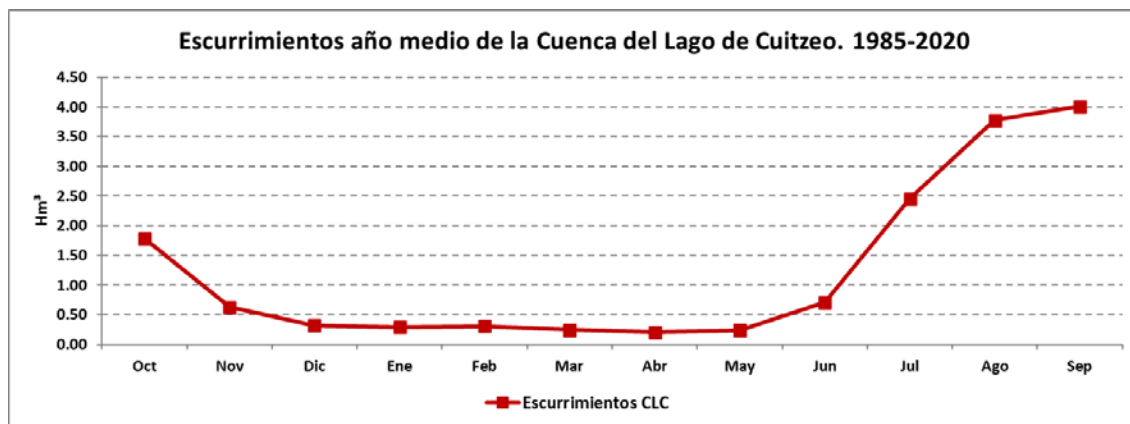


Figura 52. Año medio de la serie histórica 1985-2015 de la zona de estudio.

Para una escala anual (Figura 53), se observa que hay una reducción de un 13% aproximadamente en los 35 años de la modelación donde a falta de series actuales, se considera sigue esa disminución por las sequías que se han vuelto cada vez más frecuentes en el lago.

Para determinar cuáles son los años secos y años húmedos se calcula el promedio de los escurrimientos anuales de toda la serie y aquellos escurrimientos mayores a la media se consideran húmedos, caso contrario quedan clasificados como meses secos.

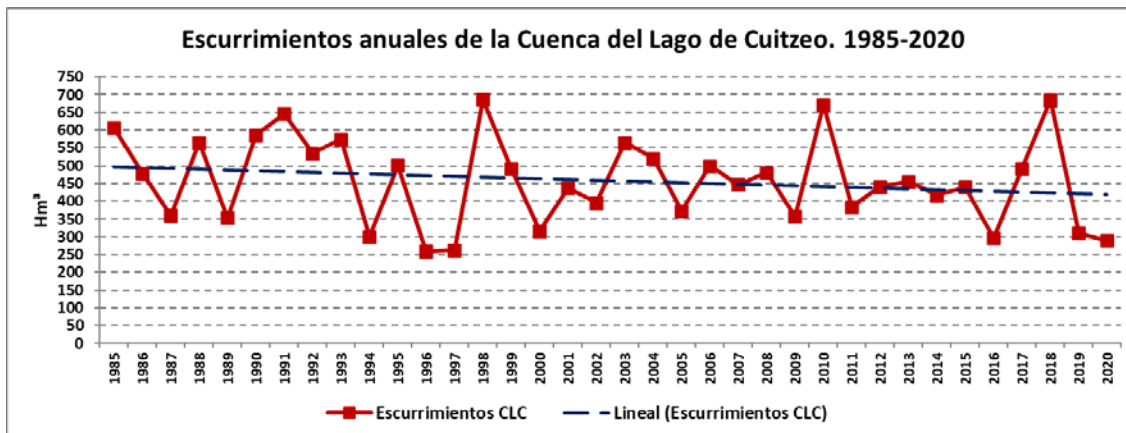


Figura 53. Análisis de los escurrimientos anuales de la cuenca del Lago de Cuitzeo de 1985 a 2015.

Al realizar un análisis de años secos y húmedos (Figura 54), el primer año seco es en 1987, pero en 1989 es mayor la sequía, una vez pasados 7 años se presenta la sequía más drástica de toda la serie que es entre los años de 1996 y 1997. en 2000 se observa nuevamente un año seco y hasta el 2009 nuevamente se tienen escurrimientos casi de la misma magnitud. A partir de la sequía más drástica se observa que los escurrimientos tienden a bajar ya que de 1985 a 1996 (11 años) se tienen 6 años húmedos mientras que para la misma cantidad de años húmedos suceden en 19 años lo que es una clara situación de alarma.

Se puede observar que, a pesar de que los escurrimientos en los años húmedos posteriores a 1996 son en algunos casos superiores a los que anteceden la sequía más drástica, estos no son tan frecuentes. Para tener un criterio de si los años húmedos tienen una tendencia a la baja se requiere hacer un análisis con una serie de tiempo más larga de al menos 60 años.

Las sequías identificadas corresponden a las sequías registradas por medios de comunicación locales de los municipios aledaños al lago, artículos e informes realizados por universidades, así como de testimonios tomados a habitantes de

dichas comunidades. Tal como lo menciona el artículo “*Sistema productivo local en Michoacán: La actividad pesquera en Mariano Escobedo, Cuitzeo*” (Onofre et al., 2015), en el año de 1991 al cubrirse por agua toda la superficie del lago, surgieron conflictos entre los pescadores y los agricultores por la lucha de las tierras azolvadas y desecadas anteriormente. En 1993 se otorgó a los pescadores apoyos del Programa Nacional de Solidaridad (PRONASOL) para la adquisición de equipos de artes de pesca y de 1997 a 1999 ocurrieron sequías que provocaron nuevamente la migración temporal de parte de la población de Mariano Escobedo a Estados Unidos.

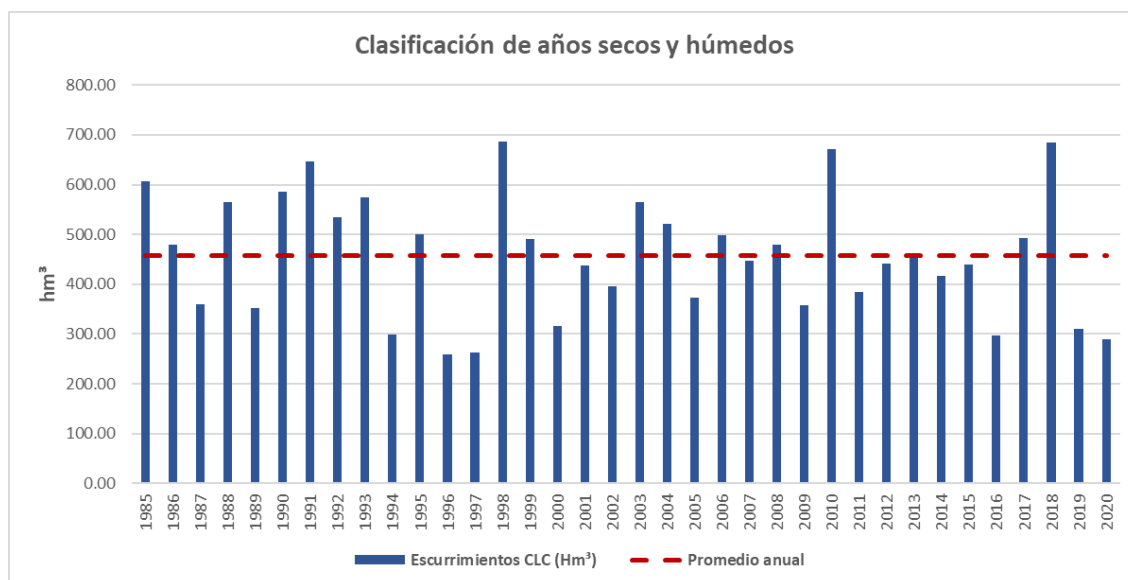


Figura 54. Análisis de años húmedos y años secos para los escurrimientos de 1985-2020 para la zona de estudio.

El promedio anual de la serie de 1985-2020 es de 457.626 hm³ y el promedio mensual es de 38.135 hm³.

Realizando el balance hídrico para el mismo periodo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 29. Balance hídrico para la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Periodo 1985-2020.

Balance Hídrico			
Variable	Valor prom. (mm/año)	Valor acum. (hm³/año)	%
Precipitación	842.11	3262.19	100.00%
Escurrimiento subterráneo	62.70	204.37	7%
Escurrimiento superficial	70.39	271.85	8%
Infiltración	61.54	199.54	7%
Evapotranspiración	708.86	2785.50	84%



Figura 55. Porcentajes del balance hídrico para la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Periodo 1985-2020.

5.6.2.1 Evolución del nivel estático

Para establecer la evolución del nivel estático en el acuífero se tienen datos de mediciones realizadas en 2007 en una red de pozos de monitoreo del Informe de Disponibilidad Hídrica (CONAGUA, 2007). Para el 2017 se realizaron nuevamente mediciones en dichos pozos para obtener los niveles piezométricos de cada uno para observar los cambios que hayan tenido (Alvarado Pérez & Lucas Urbina, 2017) y fueron nuevamente medidos en la investigación realizada por Navarro Farfán, en 2022. Lo que permitió realizar los mapas que se muestran a continuación de la evolución del acuífero en los últimos años.

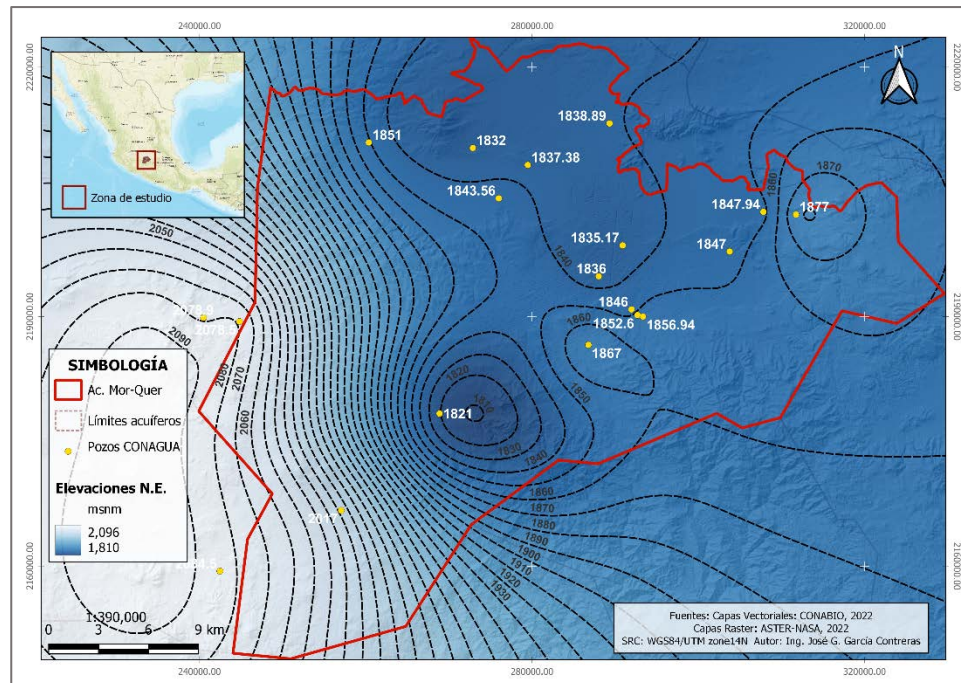


Figura 56. Niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro en 2008.

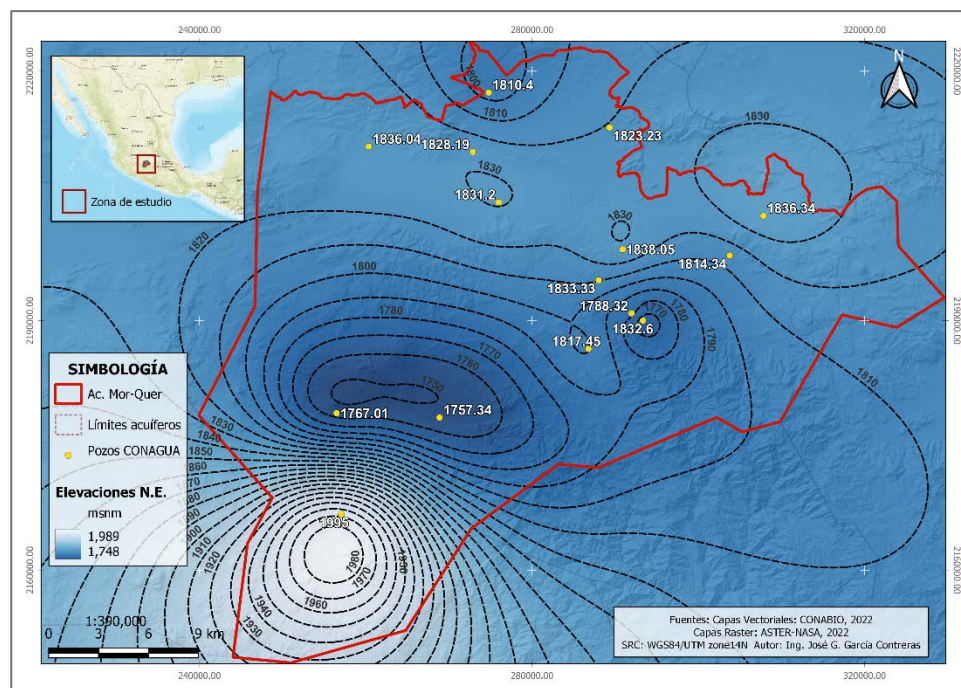


Figura 57. Niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro en 20017.

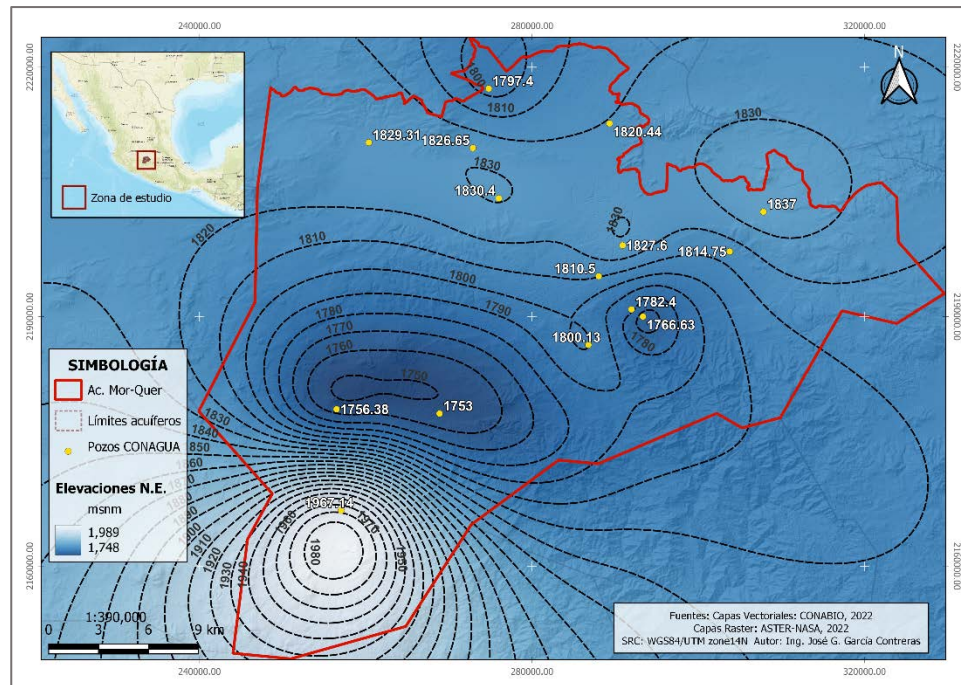


Figura 58. Niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro en 2022.

Sin embargo, no se tiene una red de monitoreo que cubra la mayor parte del acuífero, por lo que al ser mediciones que solo fueron tomadas en dos instantes de tiempo y espacialmente se encuentran distantes entre sí, limitan en gran medida el correcto desarrollo del modelo. Esto impacta de manera importante ya que en función de la calidad y cantidad de información medida (real) se discretiza el acuífero. En este caso, se tiene poca información con la cual contrastar los resultados, por lo que elaborar un modelo muy detallado complicará su elaboración y su calibración, es por esto que se propone simplificar tanto el mallado como las acciones elementales, considerando solo aquellas que sean cuantificables a partir de datos históricos.

5.6.3 Usos consuntivos del agua en el Acuífero Morelia-Queréndaro

De acuerdo al informe mencionado con anterioridad, en el año 2007 se tenía un registro de 986 pozos y 23 manantiales donde el uso principal del agua era agrícola (53.69%), el segundo lugar lo ocupaba el público urbano (40.21%) y en menor medida los demás usos (6.1%); dando una estimación aproximada de 162.2 hm³/año mientras que el volumen de agua estimado en el censo por salida de manantiales es de 60.3 hm³/año.

Para el año 2022 que es el último año que se tiene registro, los pozos han aumentado en un 34.5% siendo un total de 1327 pozos donde el uso agrícola se mantiene en primer lugar con un 51.63%, seguido del uso público urbano (25.86%) y del uso industrial (15.62%) y los demás usos (5.88%), dando una estimación aproximada de 177.88 hm³/año. Para el caso de los manantiales no se tienen datos medibles al 2022.

Tabla 30. Usos del agua en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPD, 2022).

Uso	Volumen de extracción de aguas nacionales (m3/año)	Volumen de aguas superficiales (m3/año):	No. pozos	Volumen de aguas subterráneas (m3/año):
AGRICOLA	91,847,057.72	6,600,670.00	768	93,457,752.79
PUBLICO URBANO	45,997,473.89	25,575,193.56	281	47,756,309.69
SERVICIOS	5,775,757.90	0.00	75	5,203,962.90
INDUSTRIAL	27,793,994.00	11,037,600.00	90	60,353,754.00
DIFERENTES USOS	5,744,472.05	0.00	86	6,073,868.32
PECUARIO	167,005.00	0.00	16	195,005.00
DOMESTICO	512,354.77	0.00	9	1,354,190.77
ACUACULTURA	45,000.00	0.00	2	45,000.00
TOTAL	177,883,115.33	43,213,463.56	1327	214,439,843.47

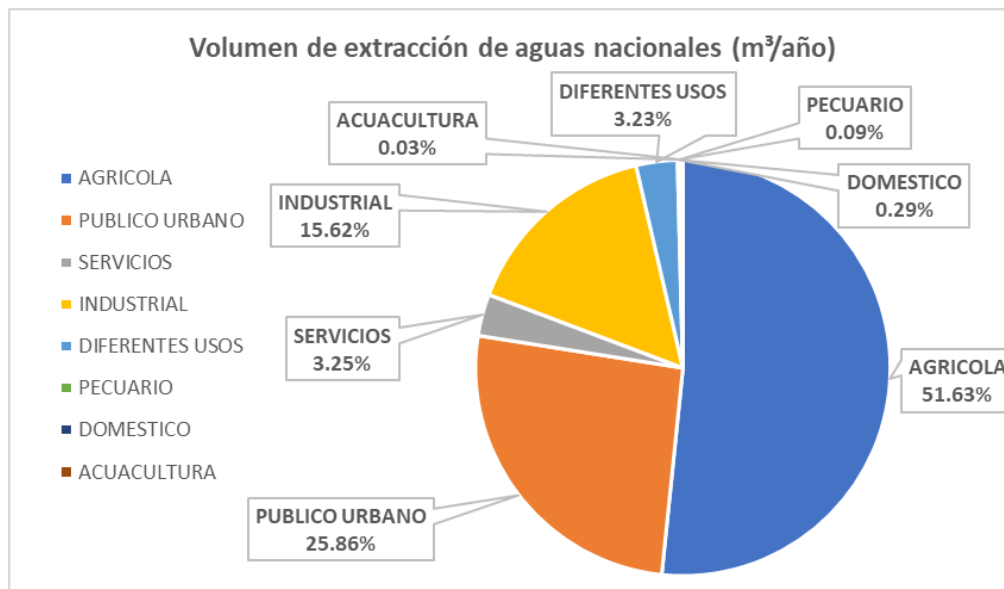


Figura 59. Extracción de aguas nacionales en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPD, 2022).

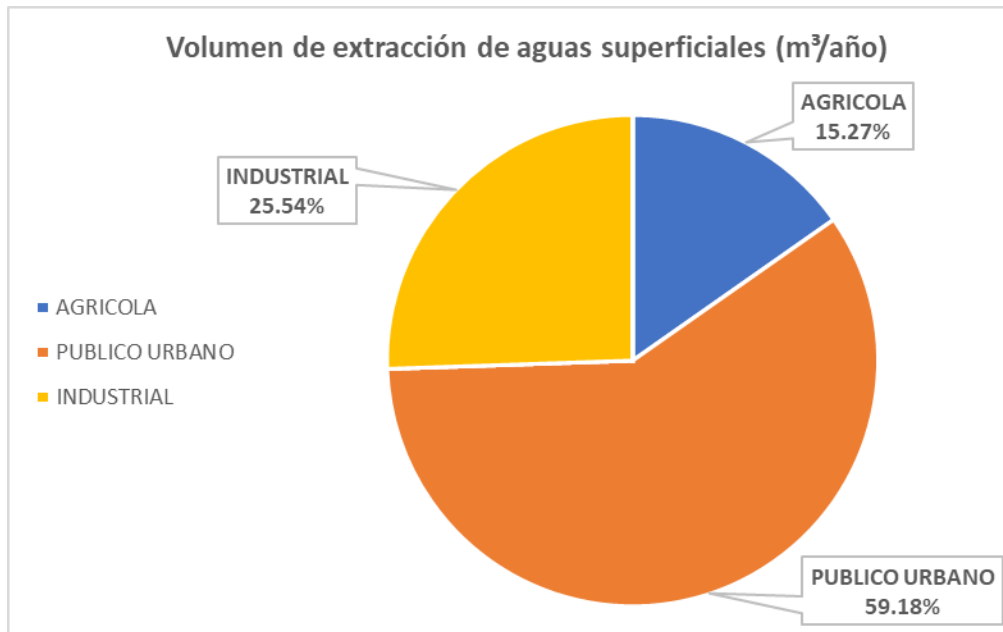


Figura 60. Extracción de aguas superficiales en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPDA, 2022).

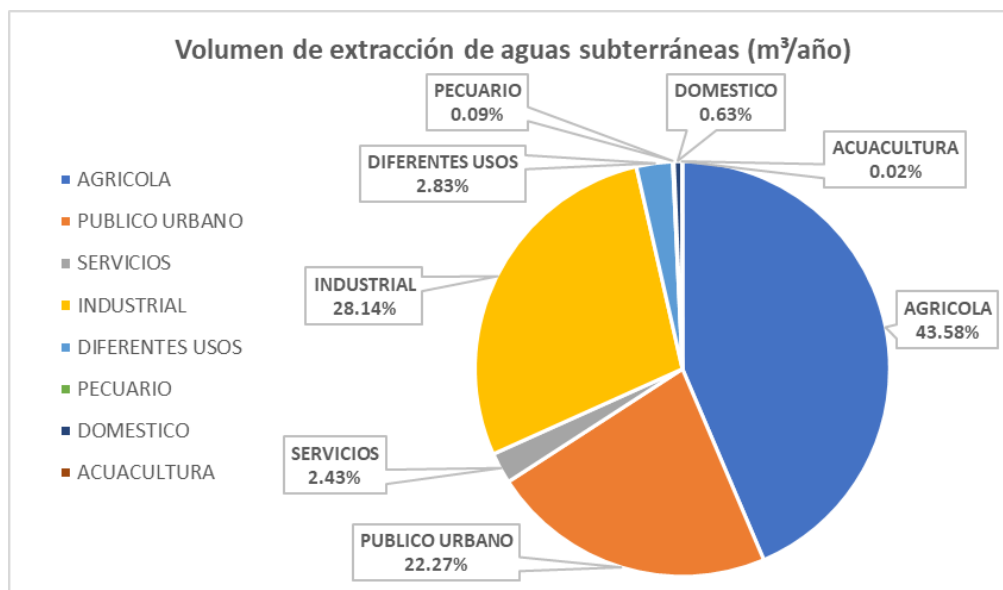


Figura 61. Extracción de aguas subterráneas en el Acuífero Morelia-Queréndaro, 2022. (REPDA, 2022).

5.7 Modelación del acuífero con AQUIVAL.

Se va a discretizar el modelo del acuífero mediante diferencias o elementos finitos dividiéndolo en 25x30 celdas de 3,000 metros de lado donde la simulación se realiza mediante el método de los autovalores utilizando el programa AQUIVAL.

A continuación, se describen los datos generales utilizados para la preparación del modelo del acuífero.

El acuífero se considera de manera general de tipo libre; de acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, cuenta con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo (CONAGUA, 2022).

Para la discretización del acuífero se tomaron en cuenta algunas consideraciones hechas por Pardo Loaiza (2016):

- La dirección del flujo subterráneo se realiza predominantemente en dirección del Lago de Cuitzeo (Figura 54).
- La totalidad del Lago de Cuitzeo se considera de nivel constante teniendo importantes entradas de gasto de la cuenca del Río Grande de Morelia, la cuenca del río Queréndaro y Zinapécuaro y zonas aledañas al lago.
- Se tomaron en cuenta los valores de las transmisividades en dirección X y Y, así como los coeficientes de almacenamiento en función del tipo de roca presente en el acuífero a manera de precalibración.

5.7.1 Geometría y condiciones de contorno del acuífero

Como se mencionó anteriormente el modelo consta de una malla de 25x30 celdas donde con ayuda de sistemas de información geográfica se le ha asignado un valor correspondiente a cada celda de acuerdo a la superficie del acuífero. Hay tres tipos de celda que se definen por los valores 0, 1 y 2: “Inactiva” = 0; “Activa” =

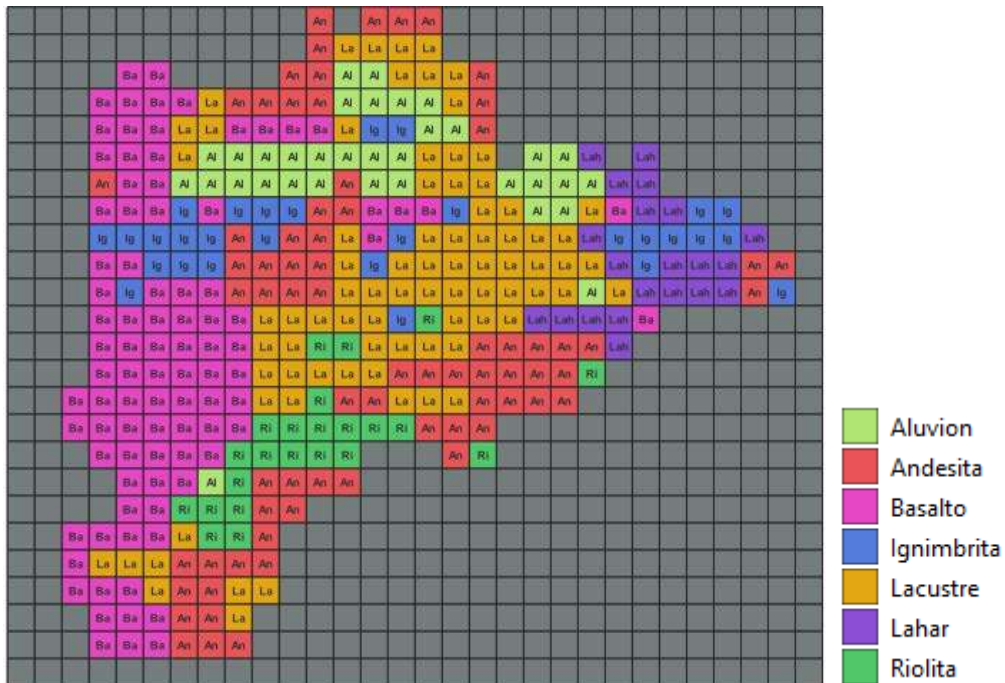


Figura 63. Malla discretizada propuesta en función de la geología del acuífero Morelia-Queréndaro.

Tabla 31. Valores propuestos de transmisividad en función del tipo de roca para el modelo AQUIVAL.

Roca	T (m ² /día)	S	No. Celdas
Al	95	0.07	34
An	2089	0.085	72
Ba	6500	0.08	90
Ig	1800	0.1	29
La	136	0.17	80
Lah	600	0.19	21
Ri	4100	0.22	23
Total =			349

Demandas Urbanas. En todo el acuífero se tiene distribuido este uso del agua, Sin embargo, no se debe considerar como una sola acción elemental por lo que se ha propuesto que se discretice en las demandas urbanas correspondientes a aquellos municipios donde se observe mayor concentración de pozos, es por esto que han propuesto 7 zonas:

- | | |
|----------------|----------------|
| 1. Morelia I | 5. Zinapécuaro |
| 2. Morelia II | 6. Cuitzeo |
| 3. Tarímbaro | 7. Huandacareo |
| 4. Indaparapeo | |

Se tiene el registro de los siguientes volúmenes para estas demandas:

Tabla 32. Volúmenes correspondientes a las demandas urbanas discretizadas en el modelo.

Agrupación Mpio.	Volumen (m³/año)
<i>Morelia II</i>	24,028,000.40
<i>Tarimbaro</i>	7,106,066.18
<i>Morelia I</i>	6,550,698.40
<i>Zinapécuaro</i>	2,545,210.75
<i>Indaparapeo</i>	2,250,286.31
<i>Huandacareo</i>	2,174,089.65
<i>Cuitzeo</i>	1,343,122.20
Total =	45,997,473.89

Demandas Agrícolas. Para el caso de estas demandas, se ha propuesto que se discreticen en los módulos de riego correspondientes al Distrito de Riego 020 que son suministrados por bombeos de pozos. Además, se han propuesto al igual que con las demandas urbanas, zonas donde exista una gran concentración de pozos. Para este caso son las siguientes:

- | | |
|----------------|--------------------|
| 1. Morelia II | 7. Cuitzeo |
| 2. Tarímbaro | 8. MR03 |
| 3. Morelia I | 9. MR04 |
| 4. Zinapécuaro | 10. MR05 |
| 5. Indaparapeo | 11. Copándaro |
| 6. Huandacareo | 12. Santa Ana Maya |

Se tiene el registro de los siguientes volúmenes para estas demandas:

Tabla 33. Volúmenes correspondientes a las demandas agrícolas discretizadas en el modelo.

Agrupación Mpio.	Volumen (m³/año)
<i>Morelia II</i>	2,213,718.00
<i>Tarimbaro</i>	9,692,879.40
<i>Morelia I</i>	4,457,167.76
<i>Zinapecuaro</i>	2,945,578.60
<i>Indaparapeo</i>	10,595,295.00
<i>Huandacareo</i>	2,821,378.17
<i>Cuitzeo</i>	7,125,286.82
<i>MR03</i>	21,279,524.39
<i>MR04</i>	6,554,305.40
<i>MR05</i>	2,950,478.00
<i>Copándaro</i>	6,214,407.48
<i>Santa Ana Maya</i>	14,997,038.70
Total =	91,847,057.72

[illegible]

Figura 66. Ejemplo de matriz ingresada a AQUIVAL correspondiente a la demanda agrícola de Cuitzeo.

Demandas restantes. Para el caso de las demandas restantes se ha contemplado que se mantengan como una acción elemental cada una dado que la cantidad de pozos es muy poca en comparación con las demandas anteriores. Siendo entonces las siguientes:

1. Demandas Mínimas (DEMMIN)
2. Diferentes usos
3. Industrial
4. Servicios

Cuyos volúmenes son:

Tabla 34. Volúmenes correspondientes a las demandas restantes en el modelo.

Agrupación Uso	Volumen (m ³ /año)
DEMMIN	724,359.77
DIFERENTES USOS	5,744,472.05
INDUSTRIAL	27,793,994.00
SERVICIOS	5,775,757.90
Total =	40,038,583.72

Las acciones elementales correspondientes a las demandas consuntivas están representadas en la siguiente figura:

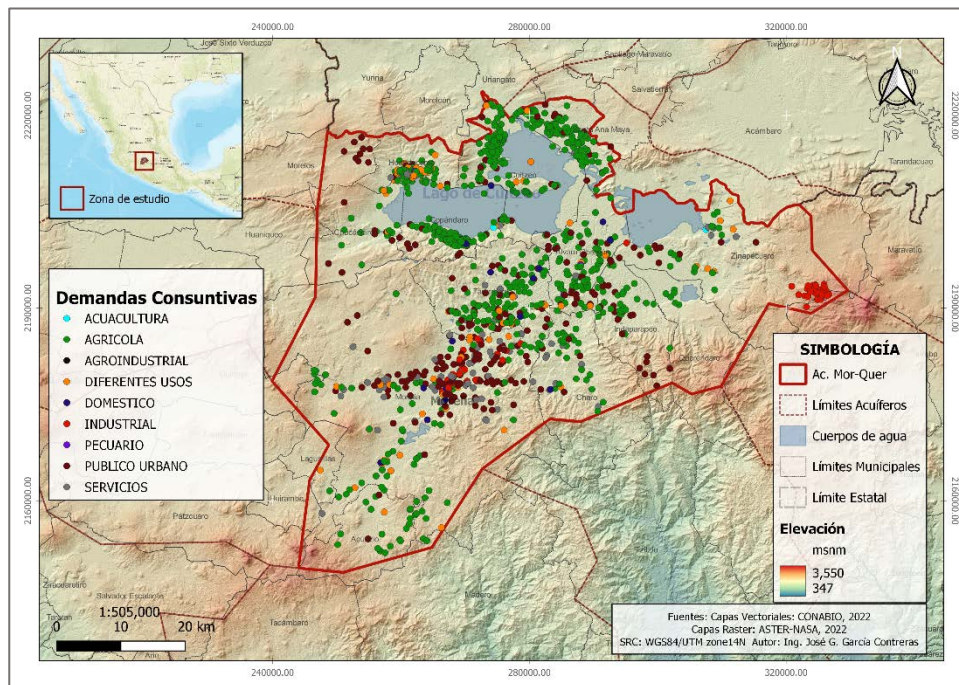


Figura 67. Mapa de las Demandas Consuntivas en el Acuífero Morelia Queréndaro, 2022.

Además de estas acciones elementales que corresponden a todas las extracciones (salidas del acuífero), se debe ingresar también la recarga vertical o infiltración dado que esta representa una entrada al acuífero para poder simular el

comportamiento del mismo a través del tiempo. Para este caso, se ha considerado calcular de manera mensual las infiltraciones obtenidas del MPE para cada subcuenca y no considerar una recarga uniforme dado que las condiciones del suelo, distribución espacial de la precipitación y superficie de las subcuencas son diferentes una de otra. Por lo que son un total de 17 recargas verticales (RV1-RV17) correspondientes a cada una de las subcuencas del modelo hecho en EvalHID. Se ingresaron también las siguientes acciones elementales:

- Salidas por manantiales
- Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Retornos por riego
- Retornos por fugas en Redes de Agua Potable

Dando un total de 45 acciones elementales, las cuales como se mencionó anteriormente, se han calculado a partir de registros históricos y en el caso de estas últimas, del informe final sobre el Acuífero Morelia-Queréndaro de la Comisión Nacional del Agua del año 2007, en el cual describe que se realizó un censo de aprovechamientos de aguas subterráneas existentes. La información recabada consideró entre otros aspectos: la localización del aprovechamiento, datos del aprovechamiento (uso del agua, nivel estático, nivel dinámico, entre otros), características del equipamiento, características constructivas e hidrometría.

El registro de aprovechamientos hidráulicos se efectuó por medio de una brigada que recorrió el área de estudio con el apoyo de un plano topográfico escala 1:50,000 y aparato GPS para su geoposicionamiento. La localización de los 986 aprovechamientos censados se muestra en la siguiente figura:

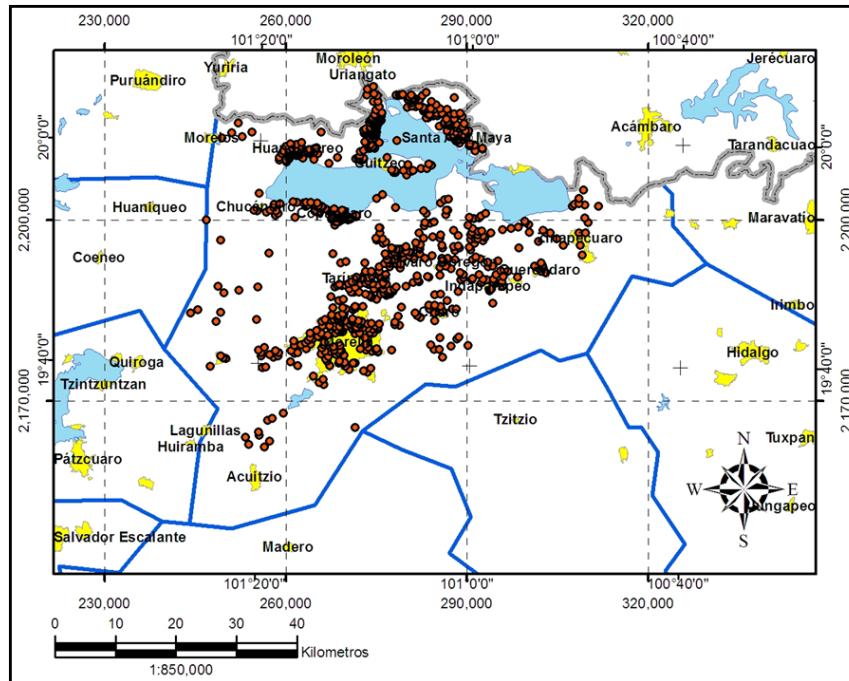


Figura 68. Localización del censo de aprovechamientos. Fuente: CONAGUA, 2007.

Se localizaron 963 pozos y 23 manantiales en la zona de estudio, de los cuales se rescató información útil para el modelo de 357 puntos (incluyendo pozos y manantiales).

Los volúmenes descritos deben ser ingresados en el modelo en el apartado de intensidades con signo negativo para las demandas y con signo positivo para las recargas verticales.

5.7.3 Parámetros de control

Los parámetros de control se definen de manera similar a las acciones elementales, pero estos pueden ser de diversos tipos. Para este caso de estudio, debido a la poca información disponible, se utilizarán los valores medidos en la red de pozos de monitoreo mencionados en el apartado de evolución del nivel estático correspondientes a los niveles piezométricos medios de los años 2017 y 2022 (Tabla 33).

Tabla 35. Niveles piezométricos medidos en pozos dentro del acuífero.

No.	Nombre	Número de Registro	2017	2022	X	Y	Z
1	Tzintzimeo	CNA-02-003-014	1838.05	1827.6	290902	2198571	1840
2	Aeropuerto Morelia	CNA-02-003-043	1833.33	1810.5	288026.675	2194865.49	1844
3	Jéruco	CNA-02-020-005	1828.19	1826.65	272889.625	2210292.39	1842
4	Cuamio	CNA-02-020-035	1810.4	1797.4	274796.2	2217431.98	1847
5	Crucero Mor-Sal	CNA-02-020-129	1831.2	1830.4	276008.49	2204232.5	1852
6	Charo	CNA-02-022-009	1817.45	1800.13	286780	2186607	1872.75
7	Huandacareo	CNA-02-036-080	1836.04	1829.31	260378.049	2210947.98	1854
8	Carr. Álvaro O.	CNA-02-040-015	1788.32	1782.4	291972.89	2190875.57	1892
9	Indaparapeo	CNA-02-040-016	1832.6	1766.63	293342.636	2190010.66	1911
10	Ciudad Universitaria	CNA-02-053-062	1757.34	1753	268880.675	2178346.91	1940
11	El Reparo	CNA-02-053-148	1995	1967.14	257047.248	2166700.58	2040
12	La Maestranza	CNA-02-053-175	1767.01	1756.38	256495.881	2178871.77	2031
13	Sta. Ana Maya	CNA-02-078-002	1823.23	1820.44	289326.63	2213243.05	1858
14	José Ma. Morelos	CNA-02-110-014	1814.34	1814.75	303775.45	2197832.93	1872
15	Araró	CNA-02-110-017	1836.34	1837	307834	2202611	1850

Estos pozos deben ser ubicados dentro de las celdas en el modelo para que una vez que el modelo realice simulaciones, permita obtener las alturas (msnm) en esas celdas y verificar si el comportamiento del acuífero coincide con los datos de los pozos. También se agregó el parámetro de control “salidas al lago” que corresponde al caudal de salida por un conjunto dado de celdas de contorno con la finalidad de conocer la cantidad de agua que está aportando el acuífero al lago y facilitando así también la conexión del sistema superficial con el sistema subterráneo mediante esta acción elemental.

En el caso de la malla que se ingresará a AQUIVAL, los pozos quedan ubicados en las siguientes celdas:

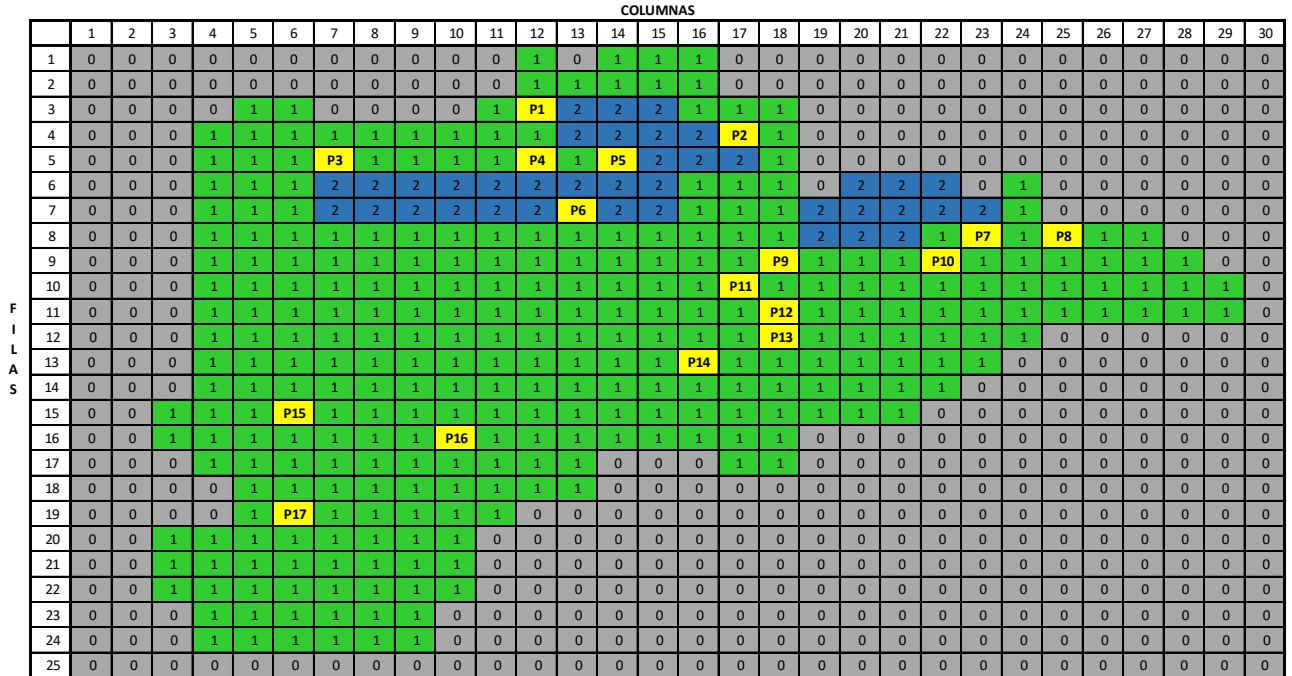


Figura 69. Malla con la ubicación de los pozos que contienen información piezométrica de los niveles estáticos del acuífero.

5.7.4 Estado inicial del acuífero y simulación con AQUIVAL

Aquival permite la simulación del acuífero para un periodo de tiempo, lo cual puede ser empleado para la calibración del modelo. También será necesaria esta simulación para obtener los datos de estado inicial del acuífero para la simulación con SIMGES.

En este caso, partiendo de la información de los niveles piezométricos proporcionada por el censo de aprovechamientos de CONAGUA en 2007 y con el uso de herramientas de los sistemas de información geográfica, se genera un archivo tipo ráster con la información proporcionada con dichos niveles y se realiza una interpolación calculada en SIG mediante el método “Multilevel B-Spline Interpolation”: El algoritmo hace uso de una jerarquía gruesa a fina de grillas de control para generar una secuencia de funciones bicúbicas B-spline cuya suma se aproxima a la función de interpolación deseada.

Con la información de la profundidad del nivel estático del acuífero en los 357 puntos, se logra generar un archivo tipo ráster para conocer el nivel estático dentro del acuífero, sin embargo, dado que el método de interpolación no genera datos fuera de los puntos que están dentro del acuífero, se colocan puntos denominados “pozos ficticios” con profundidad media del nivel estático fuera del margen del acuífero Morelia-Queréndaro con base en información recabada de los informes de los siguientes acuíferos:

- Lago de Cuitzeo
- Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta
- Ciudad Hidalgo Tuxpan
- Huetamo
- Tacámbaro-Turicato
- Lagunillas-Pátzcuaro
- Zacapu
- Pastor Ortiz
- Ciénega Prieta-Moroleón

De este modo se genera un ráster con un área mayor a la del acuífero que permite conocer de mejor manera las alturas en los márgenes del acuífero y facilitar de este modo la obtención de alturas iniciales en los centroides de la malla y dar inicio con la simulación (Figura 70).

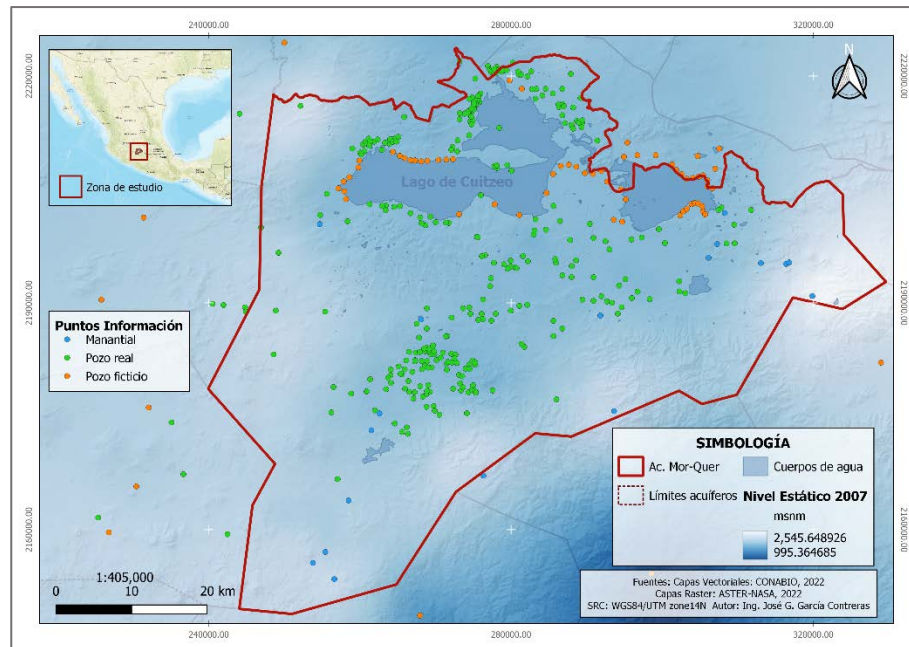


Figura 70. Puntos de apoyo para generar ráster de niveles estáticos en 2007.

Con el ráster de alturas para 2007 (alturas iniciales) se generaron curvas de nivel estático para corroborar que la interpolación haya sido correcta comparándolas con las mostradas en el informe de CONAGUA 2007 (Figura 16).

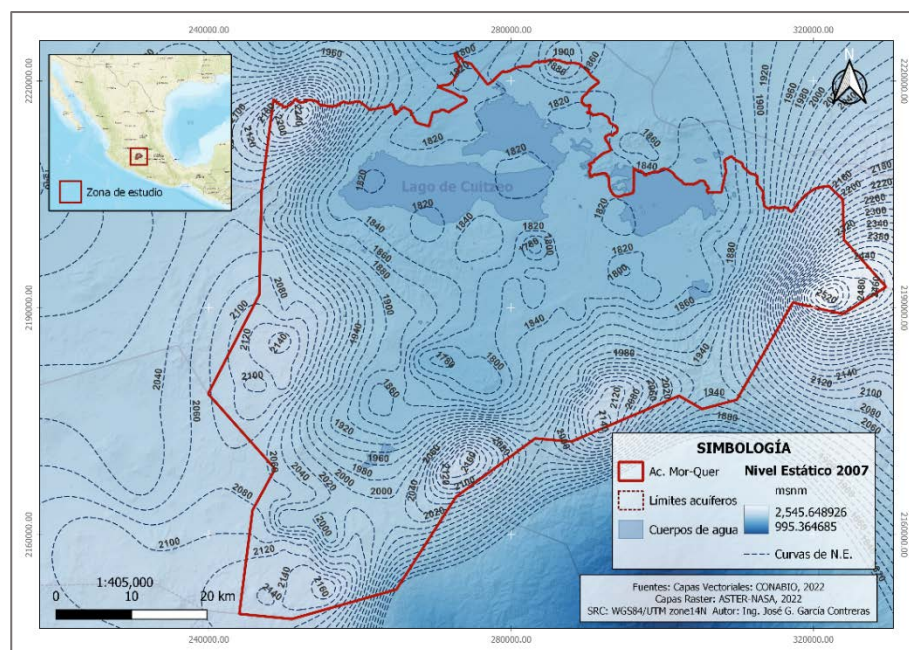


Figura 71. Curvas de N. E. para el año 2007 obtenidas en SIG.

5.7.6 Resultados del modelo

Realizada la calibración del modelo se tienen los valores finales de Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento en función del tipo de litología:

Tabla 36. Valores finales de T y S para el acuífero.

Roca	Clave	Valores	
		T (m ² /día)	S (Adim)
Aluvión	Al	25	0.51
Andesita	An	35	0.79
Basalto	Ba	95	0.71
Ignimbrita	Ig	185	0.08
Lacustre	La	2	0.92
Lahar	Lah	13.5	0.08
Riolita	Ri	7.5	0.11

Sin embargo, en algunos puntos de control, fue necesario realizar un ajuste singular en celdas cercanas para que el modelo lograra ajustar de mejor manera, dando como resultado la siguiente malla de propiedades hidráulicas:

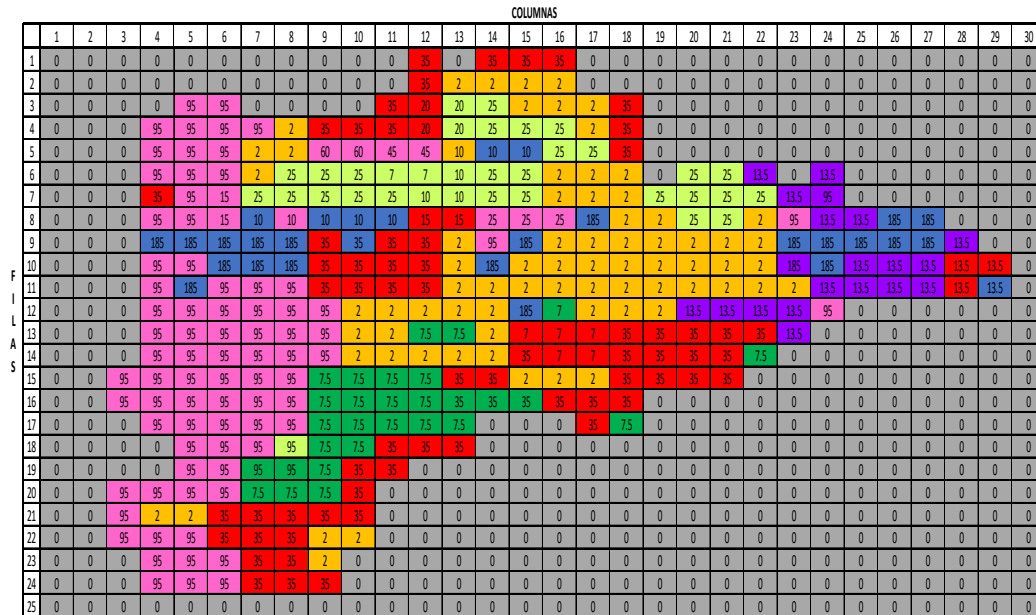


Figura 73. Matriz de datos de Transmisividad en X y en Y.

		COLUMNAS																																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
F I L A S	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.79	0	0.79	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.79	0.92	0.92	0.92	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	3	0	0	0	0	0	0.71	0.71	0	0	0	0	0	0.79	0.79	0.51	0.51	0.92	0.92	0.92	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	4	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.92	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.51	0.51	0.51	0.92	0.92	0.92	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	5	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.92	0.92	0.8	0.8	0.89	0.89	0.92	0.92	0.92	0.51	0.51	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	6	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.92	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.92	0.92	0.92	0	0.51	0.51	0.08	0	0.08	0	0	0	0	0	0		
	7	0	0	0	0	0.79	0.71	0.8	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.92	0.92	0.92	0.51	0.51	0.51	0.51	0.08	0.71	0	0	0	0	0	0		
	8	0	0	0	0	0.71	0.71	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.79	0.79	0.71	0.71	0.71	0.08	0.92	0.92	0.51	0.51	0.92	0.71	0.08	0.08	0.08	0.08	0	0	0
	9	0	0	0	0	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.79	0.08	0.79	0.79	0.92	0.71	0.08	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0	0
	10	0	0	0	0	0.71	0.71	0.08	0.08	0.08	0.79	0.79	0.79	0.79	0.92	0.08	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.79	0.79	0	
	11	0	0	0	0	0.71	0.08	0.71	0.71	0.71	0.71	0.79	0.79	0.79	0.79	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.79	0.79	0
	12	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.08	0.11	0.92	0.92	0.92	0.08	0.08	0.08	0.08	0.71	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.92	0.92	0.11	0.11	0.92	0.11	0.11	0.11	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.79	0.11	0.11	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.79	0.79	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.79	0.79	0.11	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.11	0.11	0.11	0.11	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0	0	0	0	0.79	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.11	0.11	0.79	0.79	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.11	0.79	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.71	0.11	0.11	0.11	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0.71	0.92	0.92	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.79	0.79	0.79	0.92	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.79	0.79	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0.71	0.71	0.71	0.79	0.79	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 74. Matriz de datos de Coeficiente de Almacenamiento.

En cuanto a los resultados de los niveles estáticos simulados respecto de los medidos se tienen los siguientes resultados para los pozos que mejor ajustaron, los gráficos de todos los pozos se muestran en el **Anexo B**:



Figura 75. Comparativa N.E. Simulado vs. N.E. Observado para pozo CNA-02-036-080.

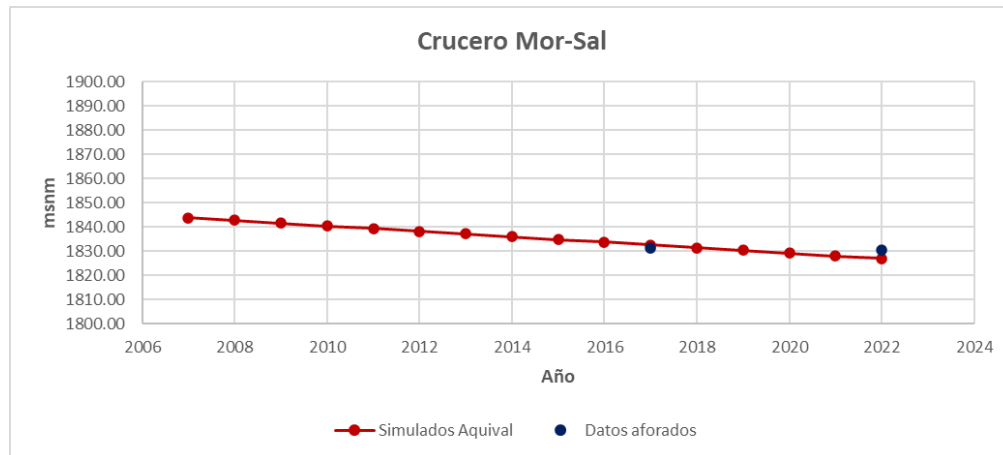


Figura 76. Comparativa N.E. Simulado vs. N.E. Observado para pozo CNA-02-020-129.

Para el caso de los pozos denominados como “La Maestranza” (CNA-02-053-175) e “Indaparapeo” (CNA-02-040-016), no fueron tomados en cuenta ya que las diferencias entre lo simulado y lo observado tenían una diferencia significativa lo que supone un error de medición o un comportamiento atípico del nivel estático al momento de realizar la medición.

En cuanto a los resultados de los indicadores de ajuste se tienen los siguientes valores mostrados en la tabla, donde se colocan los valores con los que se inició la modelación y con los que se terminó una vez calibrado el modelo.

Tabla 37. Valores de los indicadores de ajuste para el modelo subterráneo.

Indicador de ajuste	Valor inicial	Valor final
Prom. Error absoluto	376.52	14.83
Prom. Error relativo	20.63%	0.81%
ECM	254542.89	374.61
RECM	504.52	19.35

Dados los valores de los indicadores se determina que la modelación es satisfactoria y se procede a continuar con la obtención de datos para las modelaciones que preceden.

Para el caso de las salidas al lago se tienen los siguientes resultados:

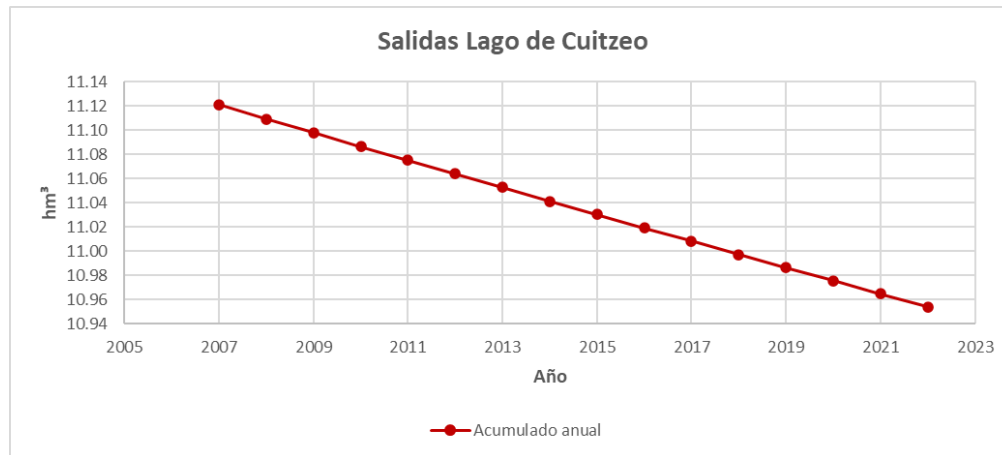


Figura 77. Salidas al Lago de Cuitzeo por el acuífero en el periodo 2007-2022.

Se observa que en los últimos 15 años se ha tenido un decremento en cuanto a las salidas por parte del acuífero de 0.167 hm^3 , esto pudiendo ser debido al descenso del nivel estático en todo el acuífero, debido a la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo.

Con el modelo terminado y la cuantificación de las entradas y salidas del acuífero se obtiene un balance el cual indica que el acuífero se encuentra en un estado de déficit de 8 hm^3 .

Tabla 38. Balance del acuífero Morelia-Queréndaro.

Entradas	Volumen ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Salidas	Volumen ($\text{hm}^3/\text{año}$)
Recarga Vertical	121.30	Bombeos	177.89
Retornos por Riego	9.18	Salidas por flujo horizontal	3.28
Retornos por fugas R.A.P.	1.84	Descarga por manantiales	58.15
Entradas por flujo horizontal	87.95		
Salidas al Lago	11.04		
Total Entradas =	231.32	Total Salidas =	239.32
Cambio en el almacenamiento	-8.00		

Como parte de los resultados de la modelación, se obtendrán los autovalores que permiten conocer el comportamiento geohidrológico del acuífero a través de un archivo compatible con el programa que se empleará para realizar el modelo de gestión.

Con el modelo del acuífero terminado se obtienen elevaciones en cada celda con las cuales, apoyándose de SIG, se realizará un ráster y posteriormente se calculan las direcciones de flujo (Figura 78) con la finalidad de observar si hay un cambio de dirección provocado por los bombeos de los pozos.

Como última etapa, se realiza la modificación de la escala temporal reduciendo el paso de tiempo de mensual a diario para poder ingresarlo al módulo Aqt-Sim.

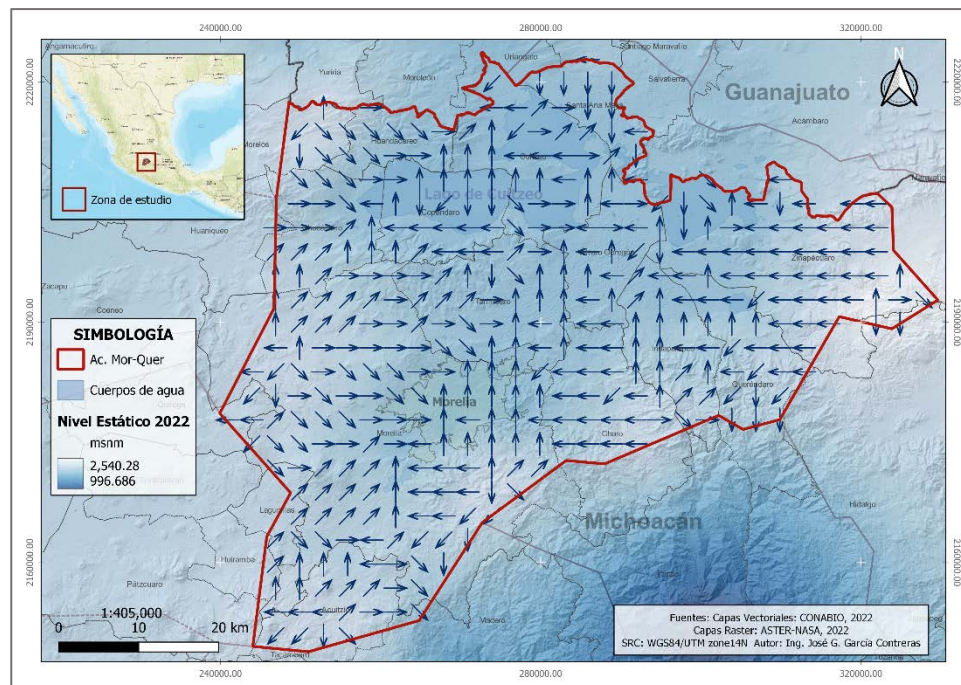


Figura 78. Mapa de direcciones de flujo del acuífero Morelia-Queréndaro para 2022.

5.8 Modelación de la Gestión mediante SIMGES

La modelación de la gestión de los recursos hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo es una simulación conjunta dado que intervienen datos del modelo superficial y datos del modelo subterráneo, aunado a otros elementos que conforman el sistema de recursos hídricos como lo son embalses, elementos retorno, tomas de demanda, entre otros. Esta modelación se lleva a cabo a través del software SIMGES de manera inicial y posteriormente se traslada a GeoAquatool en su módulo Aqt-Sim ya que este permite bajar la escala de tiempo

de paso mensual a intervalos inferiores. No obstante, se encuentra aún en etapa de desarrollo.

5.8.1 Elementos que considera el modelo SIMGES

La definición de unos elementos tipo, que son combinados por el usuario de diferentes formas, permite la adaptación del modelo a cualquier esquema. Los elementos considerados son:

- Embalses (superficiales), con su aportación intercuenca incluida. Quedan definidos mediante sus parámetros físicos, sus parámetros de gestión (volúmenes máximos, volúmenes objetivos, y prioridad de almacenamientos con respecto a otros embalses).

- Aportaciones intermedias. Se consideran como tales aquellas que no puedan ser consideradas o no convenga sean consideradas directamente como entradas de embalse.

- Conducciones. Se contempla bajo esta misma denominación a los tramos de río, canales, y cualquier otra conexión que convenga establecer. Quedan definidas por sus parámetros físicos (incluyendo capacidades máximas), y por sus posibles caudales mínimos (normalmente ecológicos). Se distingue en este grupo de conducciones tres tipos:

- Tipo 1: Responden básicamente a la definición del párrafo anterior.
- Tipo 2: Contemplan pérdidas por filtración en el cauce.
- Tipo 3: Contemplan conexión hidráulica entre el río y un acuífero subyacente, y por tanto flujo del acuífero al río y viceversa, en función del estado del acuífero.
- Tipo 4: Responden a la definición del tipo 1 con caudal máximo instantáneo función de la diferencia de cota entre la entrada y la salida de la conducción. Si en su origen o final se tiene un embalse, se considera la variación de cota a efectos de determinar el máximo que puede circular a lo largo del mes
- Tipo 5: Se trata de conexiones hidráulicas entre nudos y/o embalses, para las que el caudal circulante es función de la diferencia de cota entre sus

extremos. La circulación de agua puede tener lugar en ambos sentidos y se considera la variación de cota que pueda tenerse en los embalses a lo largo del mes.

- Demandas consuntivas. Son aquellos elementos que utilizan el agua y en los que parte de ella es consumida y por tanto se pierde para el sistema. Quedan incluidas dentro de este tipo tanto las zonas regables como las demandas urbanas e industriales. Se definen por su curva de demanda, sus parámetros de consumo, sus tomas y su conexión con algún elemento de retorno. Se admite el suministro a una misma demanda desde distintas fuentes.

- Elementos de retorno. Son simplemente definiciones de puntos de reintegro de agua al sistema provenientes de demandas consuntivas.

- Demandas no consuntivas (centrales hidroeléctricas). Son aquellos elementos que utilizan el agua sin consumirla. Se definen mediante sus datos físicos y de producción y por su caudal mensual objetivo a utilizar.

- Recarga artificial. Son elementos cuyo flujo va a recargar acuíferos, utilizándose para tal fin los sobrantes. Se definen por sus características físicas.

- Bombeos adicionales. Son elementos de captación de agua procedente de acuíferos que es incorporada al sistema superficial para su utilización en lugar distinto de la zona donde se efectúa el bombeo.

-Acuíferos. Quedan definidos mediante sus parámetros físicos y mediante unos parámetros de explotación, que una vez rebasados anulan las extracciones. El modelo permite contemplar varios tipos de acuíferos:

- Acuífero depósito.
- Acuífero unicelular.
- Acuífero con manantial.
- Acuífero pluricelular.
- Acuífero conectado con río y con modelación distribuida por el método de los autovalores

- Acuífero rectangular homogéneo conectado por uno de sus lados con un río totalmente penetrante
- Acuífero rectangular homogéneo conectado por dos de sus lados contiguos con ríos totalmente penetrantes
- Acuífero con desagüe a tres niveles distintos: se trata de un modelo simplificado que permite considerar la conexión con dos niveles distintos de aguas superficiales y la evapotranspiración variable a lo largo del año.
- Acuífero modelado por el método de los autovalores sin limitaciones de geometría ni parámetros hidrodinámicos.

5.8.2 Módulo Aqt-Sim

Este módulo se basa en el funcionamiento de SIMGES de AQUATOOL, teniendo como ventaja reducir el paso de tiempo hasta una escala diaria, lo que permite realizar análisis que en la escala mensual no son posibles. Sin embargo, al ser un programa en etapa de desarrollo, se tienen algunas limitantes, principalmente en la simulación de grandes periodos de tiempo.

La principal utilidad de este módulo es obtener una evaluación de la calidad de la gestión a largo plazo en un escenario definido. Los resultados que se obtienen son los valores de las variables de flujo y almacenamiento de las masas de agua para el paso de tiempo definido (diario, semanal, mensual, anual), así como resúmenes y estadísticas de diverso tipo como indicadores de garantía y vulnerabilidad de la demanda.

A través de este módulo es posible generar un modelo diario partiendo de los modelos superficial y subterráneo que se han desarrollado también en escala diaria.

5.8.3 Desarrollo de la topología de la Cuenca del Lago de Cuitzeo

Basándose en la geometría de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, sus ríos y la ubicación de las demandas, se propone la siguiente topología la cual consta de los siguientes elementos:

- 3 embalses. Corresponden a la Presa de Cointzio, Presa Malpais y al Lago de Cuitzeo, este último en la realidad no es un embalse ya que

no tiene vertidos ni regulaciones, además que está seccionado en tres partes. Sin embargo, el simplificar el modelo de esta manera al considerar el lago como un embalse, permite conocer los volúmenes totales que contiene y su conexión con el acuífero.

- 18 aportaciones intermedias. Son 18 debido a que se hizo un ajuste en la aportación correspondiente a la Presa de Cointzio, ya que la subcuenca denominada como “Cointzio” abarca aguas arriba y aguas debajo de la presa, por lo que, para mejor representación del sistema, se calculó la aportación con base en las áreas que se generan aguas arriba y aguas debajo de la presa.
- 28 elementos demanda. Corresponden a las demandas consuntivas presentes en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.
- 7 tomas superficiales. Estas corresponden a los diferentes canales que están en los módulos de riego. Sin embargo, para simplificar el modelo se decidió unir en algunos casos todos los canales que abastecen a un mismo módulo.
- 36 tramos de río tipo 1. Estos elementos fueron colocados en la topología en función de la red hídrica de la cuenca.
- 1 tramo de río tipo 3. Este elemento fue colocado para poder simular la interacción del sistema superficial con el sistema subterráneo ya que permite la infiltración con base en un parámetro de control.
- 12 retornos. Colocados para simular aquellos retornos superficiales de los elementos demanda.

- 1 acuífero por el método de los autovalores. Este elemento fue previamente obtenido de la modelación subterránea el cual cuenta con la información de los autovalores y autovectores que permiten conocer el comportamiento geohidrológico del acuífero a través de sus parámetros de control y acciones elementales.

El modelo contempla simular el Sistema de Recursos Hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo en un periodo histórico de 1985 al 2020.

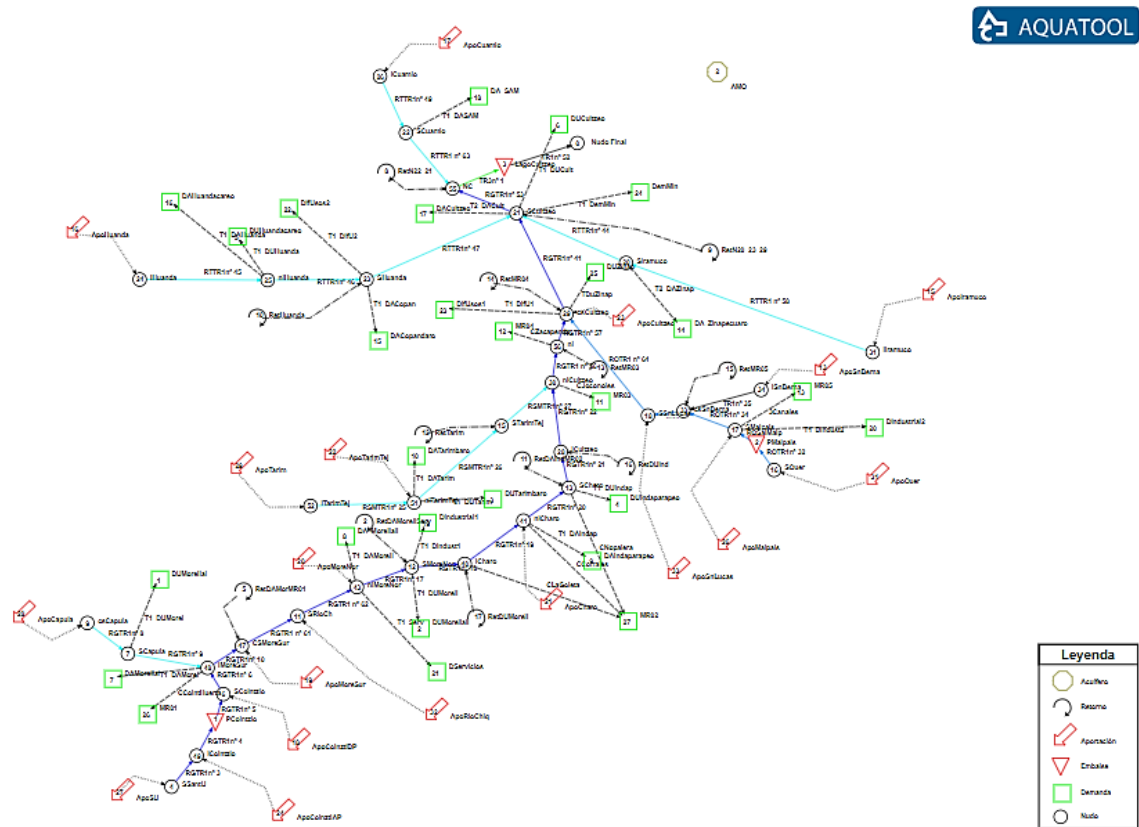


Figura 79. Topología del modelo de gestión de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

5.8.3.1 Datos de ingreso al modelo (inputs)

Cada elemento del modelo se alimenta de datos distintos, los cuales han sido recopilados de diferentes fuentes de datos o son resultado de otros modelos. Los datos se describen a continuación según su elemento.

- Elementos Demanda Urbana. Para este caso, se requiere la información obtenida de la base de datos REPDA, con los datos de las

demandas urbanas de manera anual. Sin embargo, el modelo SIMGES requiere un dato de volumen mensual (hm^3/mes) por lo que para obtener esas series de datos se realiza una división del total de cada demanda entre 12, que correspondiente a los meses del año, considerando que la demanda urbana no tiene mucha variación en el tiempo.

- Elementos Demanda Agrícola. Las demandas agrícolas tienen una variación en el tiempo, ya que estas dependen de la temporada de siembra, tipo de cultivo y temporada de lluvias (meses húmedos). Pero, debido a que para el presente caso de estudio no se tiene información precisa acerca de los cultivos o planes de riego, se ha propuesto que, para generar variación en el tiempo, se multiplique la demanda anual por un factor mensual calculado a partir de la ETP. De esta manera, se evita que exista uniformidad de las demandas a través del tiempo.
- Elementos embalse. Para las presas se requiere información sobre volúmenes iniciales, volúmenes mínimos, capacidad máxima de embalse, datos de elevación, superficie y volúmenes, así como una tasa de evaporación.
- Elementos toma de demanda. Para este caso, se han colocado datos mensuales de los canales que suministran a los módulos de riego calculados a partir de los promedios de un registro histórico de 15 años.
- Elementos aportación intermedia. Las series de aportaciones fueron obtenidas a partir del MPE con un registro histórico que abarca de 1985 al 2020.
- Elemento Acuífero. El acuífero es ingresado a partir de un archivo de datos obtenido de la simulación subterránea con parámetros calculados en escala mensual.

5.8.4 Calibración del modelo SIMGES

El modelo de gestión se puede calibrar a través de datos históricos de embalses o de datos hidrométricos realizando una modificación en los valores de los volúmenes objetivo de los embalses e intentando asemejar los valores simulados con los reales y determinando a través de indicadores de ajuste si esta comparativa da resultados satisfactorios. Para este caso, a pesar de que el modelo abarca un registro histórico de 1985 al 2020, sólo se considerará para la calibración de 1985 al 2009 ya que no se tiene un registro más actual de los volúmenes de las presas.

Los indicadores de ajuste empleados para este caso fueron el Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el Sesgo Porcentual (PBIAS). Además, para corroborar los resultados de estos indicadores, se propuso calcular también el Máximo Error, el Coeficiente de Correlación de Pearson, el Coeficiente de Simetría y la Raíz del Error Cuadrático Medio.

Realizando una modelación por cada modificación realizada a los volúmenes objetivo o en su caso, a los volúmenes iniciales de los embalses, se logra finalmente calibrar el modelo. Los valores de los indicadores de ajuste obtenidos en la primera y última modelación son los siguientes:

Tabla 39. Valor de los indicadores de ajuste antes de la calibración para volúmenes en las presas.

Indicador	P. Cointzio	P. Malpais	Valor perfecto
RSME	39.67	12.09	0.00
NSE	-2.24E+28	-8.69E+28	1.00
PAAE	175.70	146.65	0.00
Coef. Correl	-0.02	-0.05	1.00
PBIAS	54.30	45.32	0.00
Máx. Error	64.99	19.36	0.00

Tabla 40. Valor de los indicadores de ajuste después de la calibración para volúmenes en las presas.

Indicador	P. Cointzio	P. Malpais	Valor perfecto
RSME	15.80	5.22	0.00
NSE	-3.54E+27	-1.63E+28	1.00
PAAE	31.51	15.06	0.00
Coef. Correl	0.67	0.70	1.00
PBIAS	9.74	4.66	0.00
Máx. Error	38.15	15.39	0.00

5.8.5 Resultados del modelo de Gestión

Para la presa de Cointzio se han definido volúmenes objetivo que generan la siguiente serie simulada y se comparan con los volúmenes históricos, además se han graficado los volúmenes medios y anuales.

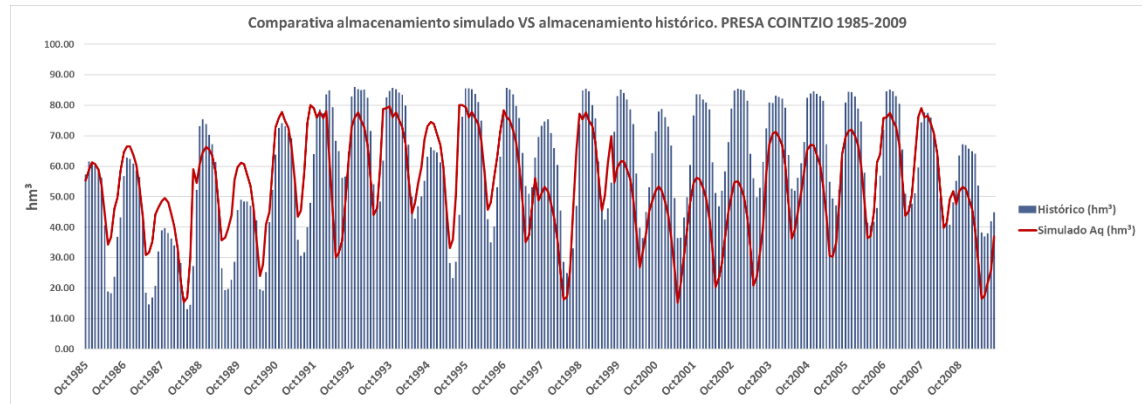


Figura 80. Volúmenes históricos y simulados de la Presa de Cointzio.

Tabla 41. Valores de volúmenes medios simulados e históricos de la Presa Cointzio.

Mes	Simulado Aq (hm³)	Histórico (hm³)
Ene	65.29	74.24
Feb	62.40	72.26
Mar	55.44	68.98
Abr	45.11	55.84
May	39.15	40.52
Jun	41.06	36.73
Jul	48.81	39.23
Ago	58.65	46.98
Sep	62.28	58.2
Oct	65.95	70.98
Nov	67.29	75.6
Dic	67.70	75.63

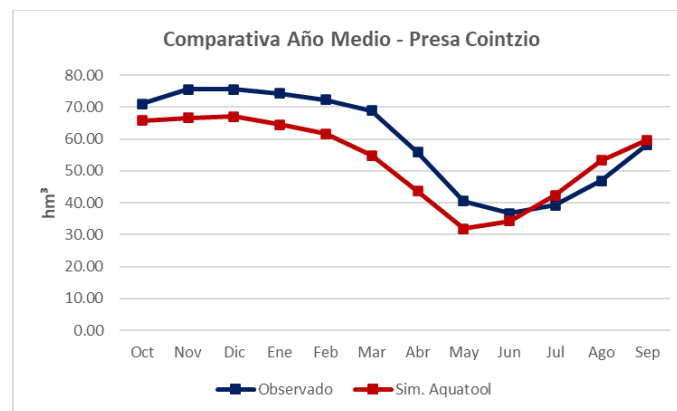


Figura 81. Año medio de los volúmenes simulados e históricos de la Presa Cointzio.

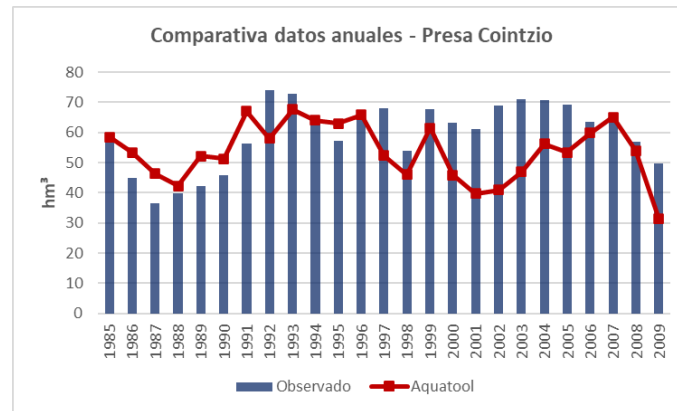


Figura 82. Datos anuales simulados e históricos de la Presa Cointzio.

De igual manera, para la presa Malpais, se modificaron volúmenes objetivo hasta asemejar en la medida de lo posible los volúmenes embalsados simulados con los históricos, obteniendo los siguientes resultados:

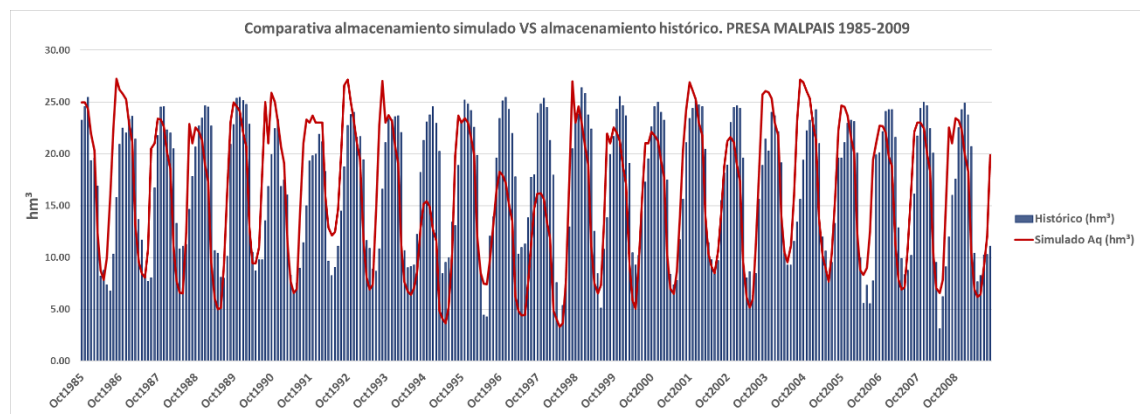


Figura 83. Volúmenes históricos y simulados de la Presa Malpais.

Tabla 42. Valores de volúmenes medios simulados e históricos de la Presa Malpais.

Mes	Simulado Aq (hm³)	Histórico (hm³)
Ene	19.68	23.51
Feb	18.26	22.78
Mar	10.61	19.89
Abr	7.47	10.31
May	6.66	8.47
Jun	7.36	8.15
Jul	11.88	9.94
Ago	18.34	12.84
Sep	21.56	17.89
Oct	22.17	21.44
Nov	22.45	23.33
Dic	21.79	24.22

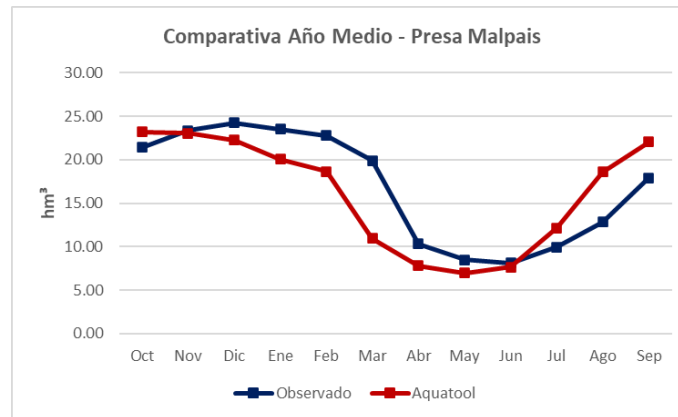


Figura 84. Año medio de los volúmenes simulados e históricos de la Presa Malpais.

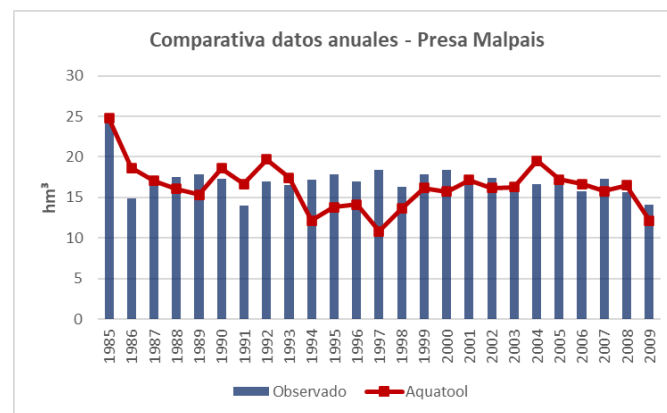


Figura 85. Datos anuales simulados e históricos de la Presa Malpais.

Una vez que se ha realizado la calibración, se puede extender la serie histórica hasta 2020 para conocer el caudal de entrada, los volúmenes, la infiltración y la evaporación del Lago de Cuitzeo en régimen alterado.

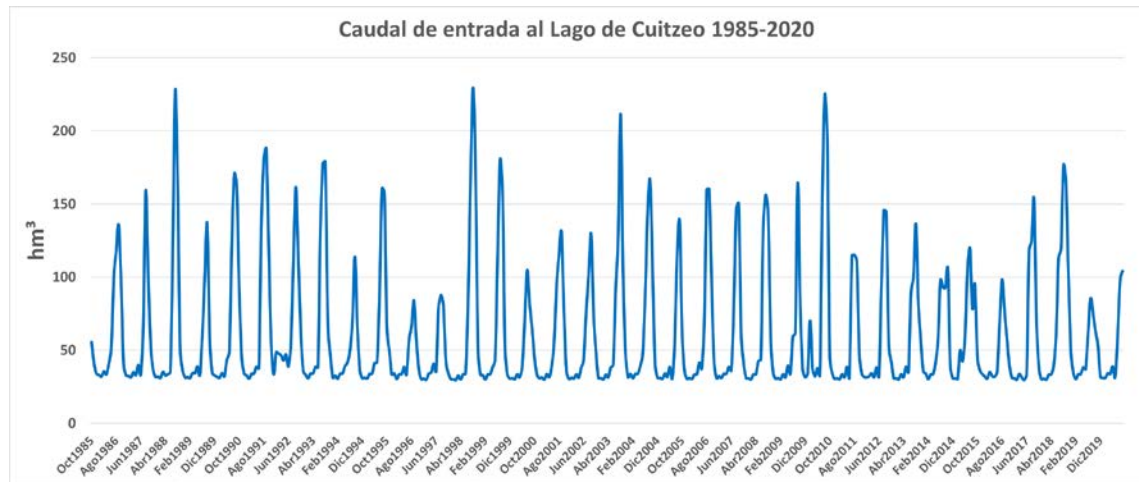


Figura 86. Caudal simulado de entrada al lago.

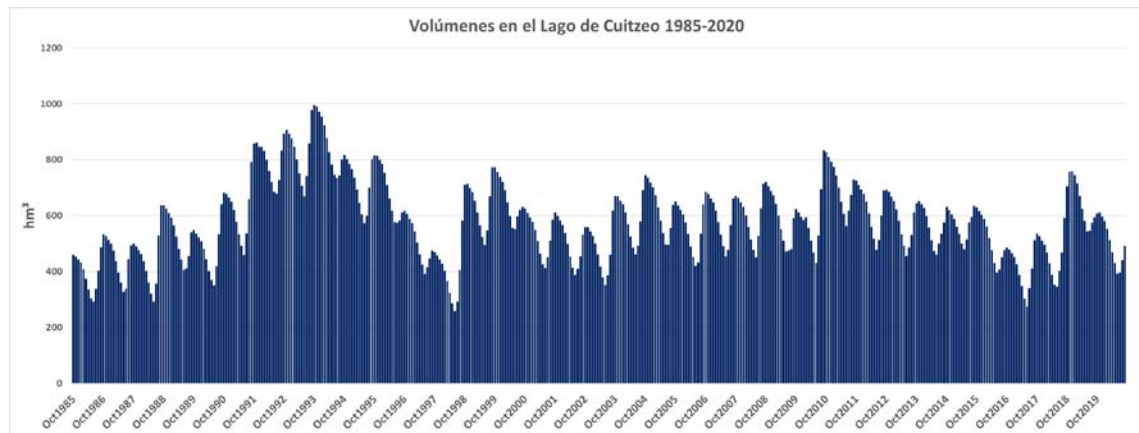


Figura 87. Volúmenes simulados del lago.

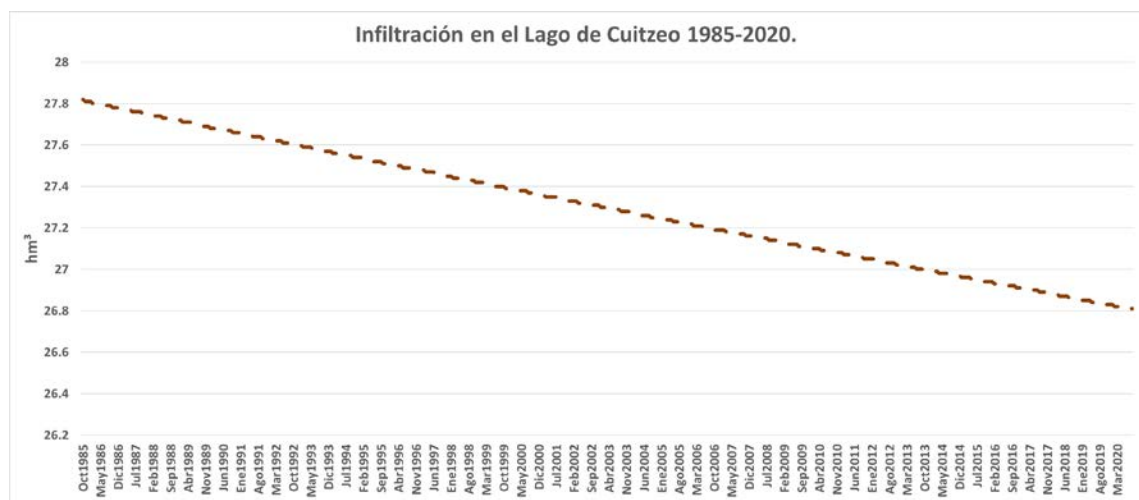


Figura 88. Infiltración simulada del lago.

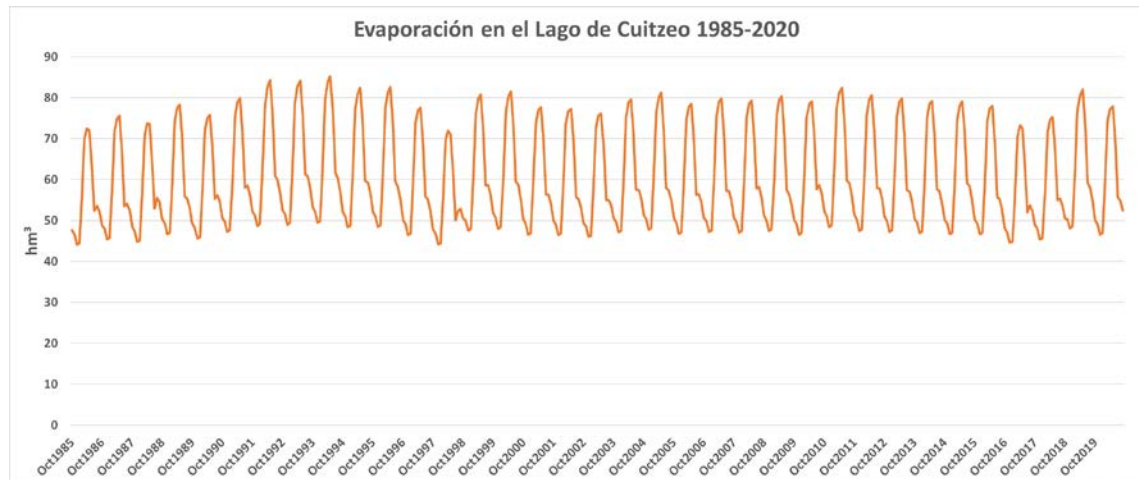


Figura 89. Evaporación simulada del lago.

Con los resultados obtenidos, se observa en el gráfico de los volúmenes en el lago que presenta una tendencia de descenso en el periodo de simulación. También, se aprecia que hay picos de descenso que a conforme pasa el tiempo se presentan de manera más frecuente y durante periodos más largos, marcando una diferencia notable a partir del mayor descenso en los años 1997 y 1998 llegando a un valor de 257.21 hm³. El valor máximo registrado en la simulación es de 993.62 hm³ para el año de 1993.

Para representar la variación anual de los volúmenes, caudal de entrada, evaporación y filtración, se calcularon las medias para cada caso.

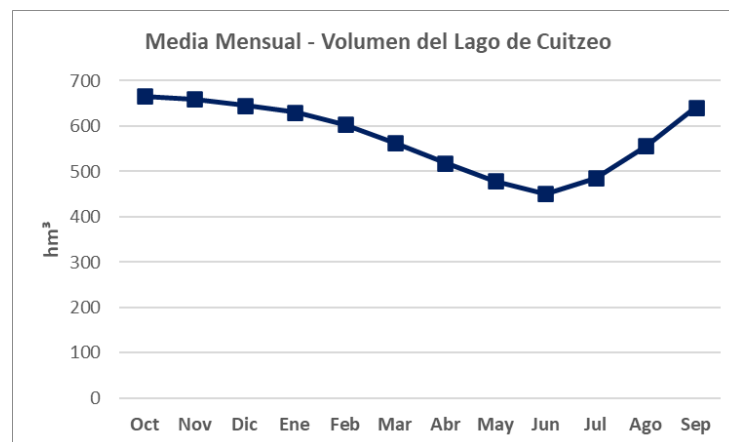


Figura 90. Media mensual del volumen del lago a partir del registro histórico 1985-2020.

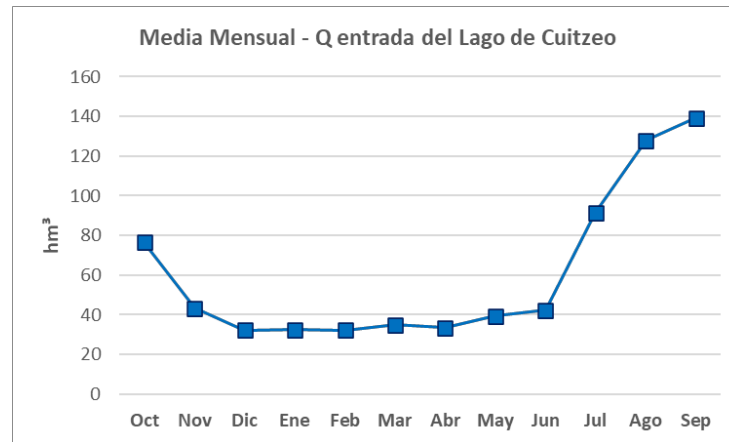


Figura 91. Media mensual del caudal de entrada del lago a partir del registro histórico 1985-2020.

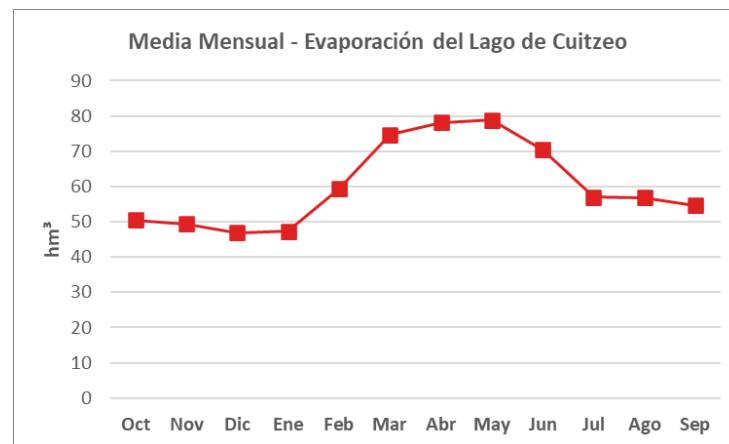


Figura 92. Media mensual de la evaporación del lago a partir del registro histórico 1985-2020.

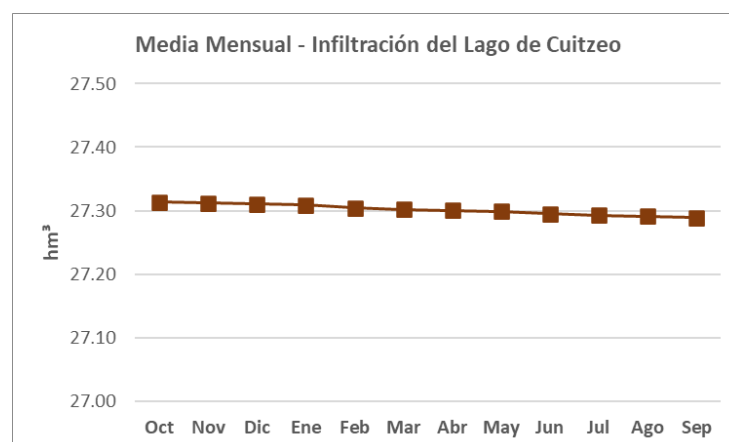


Figura 93. Media mensual de la infiltración del lago a partir del registro histórico 1985-2020.

Se puede observar como en los meses de mayo, junio y julio son los meses donde se tienen los niveles más bajos de los volúmenes del lago, mientras que para

el caudal de entrada se observa que los meses con mayor caudal corresponden a julio, agosto, septiembre y octubre, coincidiendo con los meses húmedos de la zona de estudio. Por otro lado, la evaporación del lago tiene su punto mayor en los meses abril y mayo, lo que correspondería a los meses con mayor temperatura y donde empiezan a bajar los niveles del lago.

La infiltración se presenta casi de manera constante en el año, teniendo un ligero descenso en los meses de agosto y septiembre dado que las condiciones del acuífero se mantienen constantes en el tiempo.

5.8.6 Restitución a Régimen Natural

La restitución a régimen natural consiste en obtener un régimen de caudales que no sea afectado por ninguna acción antrópica y este puede ser obtenido mediante los datos de estaciones hidrométricas que estén a régimen natural para con ellas realizar una calibración del modelo de gestión, o en su defecto, al no contar con esta información, se requiere anular todas aquellas demandas en el sistema, además de cambiar los volúmenes iniciales, mínimos, objetivo y máximos por cero, de igual manera con la tasa de evaporación para que solo estén presentes las aportaciones, ya que lo que se pretende simular que no exista ninguna perturbación en el sistema de recursos hídricos. Posterior a realizar la restitución a régimen natural, se realiza una comparativa de las variables mostradas anteriormente.

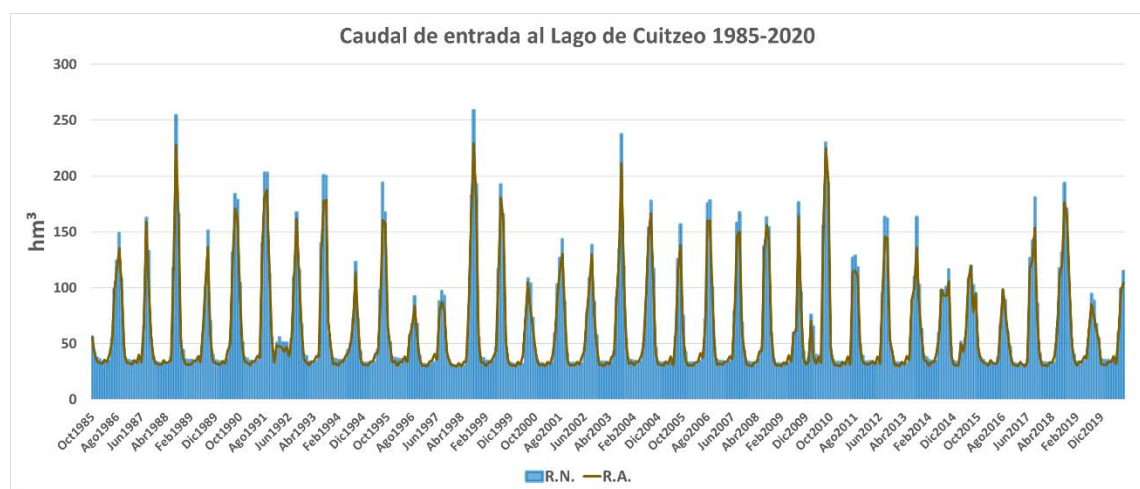


Figura 94. Comparativa de caudal de entrada. Régimen Alterado VS. Régimen Natural.

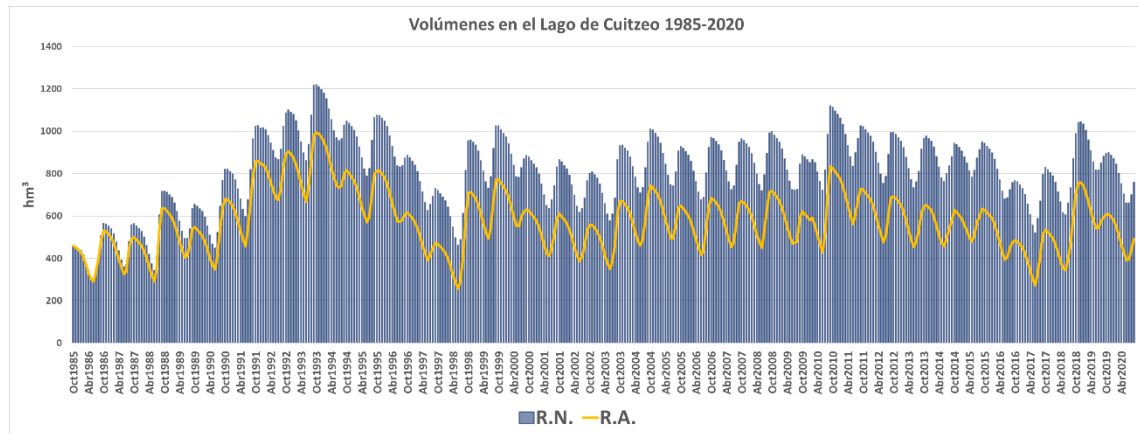


Figura 95. Comparativa de volúmenes. Régimen Alterado VS. Régimen Natural.

Se realiza un análisis visual para conocer el comportamiento de los caudales de entrada al lago (Figura 94) donde la diferencia entre un régimen y otro no se aprecia de manera notoria. Caso contrario, en los volúmenes es visiblemente notable la diferencia entre el régimen alterado y el régimen natural.

Con la restitución a régimen natural se obtiene el régimen de referencia (régimen natural) y el de comparación (régimen alterado) y con los valores de estos modelos y sus elementos, se realiza el bajado de escala ingresándolos a GeoAquatool en el módulo Aqt-Sim.

5.9 Modelo diario

El modelo diario se desarrolló partiendo del modelo mensual ingresando el esquema con datos para el régimen natural y el régimen alterado en el módulo Aqt-Sim el cual permite realizar los cálculos con paso de tiempo básico variable, desde diario hasta mensual, para horizontes temporales de simulación intra-anales, anuales o plurianuales.

El módulo admite el ingreso de datos en escala mensual y hace la discretización en escala diaria partiendo de datos mensuales. Sin embargo, esto repercute en la sensibilidad de los resultados dado que divide en el número de días el valor mensual, restando así la variación que se tiene si se ingresaran datos diarios. Para este caso, la mayoría de información fue obtenida en escala diaria. Sin embargo, los datos de algunas variables como las demandas consuntivas e

información de los embalses, fueron ingresados en escala mensual dada la escasez de información diaria en el país.

La finalidad de realizar un modelo diario es representar la variación de los caudales a lo largo del año en el SRH, afectados por las demandas ya que esta variación es fundamental para planificar y gestionar correctamente el recurso hídrico y análisis de déficits ya que, a diferencia del modelo mensual, existen análisis que solo son aplicables a datos diarios, tal es el caso de los índices de alteración hidrológica. Si los índices son calculados en escala mensual, estos no resultan eficientes en cuencas donde la diferencia entre caudales a régimen natural y en régimen alterado es poca.

Cabe señalar, que el programa de GeoAquatool está en etapa de desarrollo, por lo que tiene limitaciones para generar modelaciones con series mayores a 9,000 datos, es por esto, que el modelo diario solo abarca de 1997 a 2020, siendo 23 años completos de modelación, los que son suficientes de acuerdo a metodologías empleadas para evaluar la alteración hidrológica en un SRH para que se tengan resultados fiables.

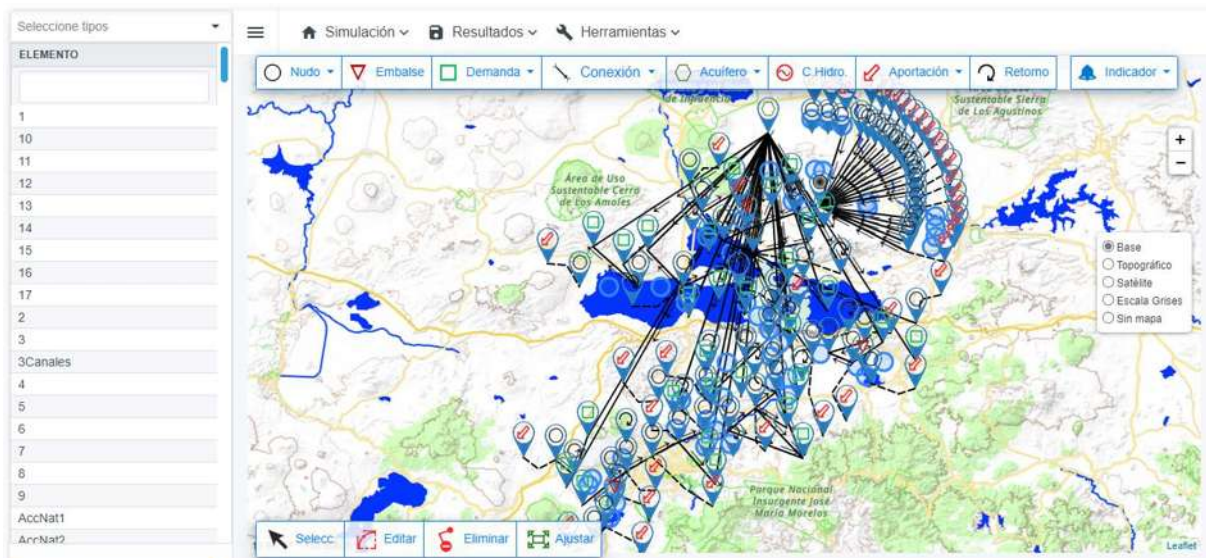


Figura 96. Modelo diario en la interface de GeoAquatool Aqt-Sim.

5.9.1 Resultados modelo diario

El modelo diario presenta ligeras variaciones en el comportamiento de los embalses debido a que no se tiene un registro diario de las demandas y esto termina afectando los volúmenes almacenados tanto en la Presa de Cointzio y la Presa Malpais. No obstante, el caudal que transita por los tramos de río, a pesar de esta variación, muestra la misma tendencia temporal. En la comparativa realizada del modelo mensual y el modelo diario acumulado mensual podemos observarlo tal como se muestra en la Figura 97, el análisis de los demás tramos se muestra en el **Anexo C**.

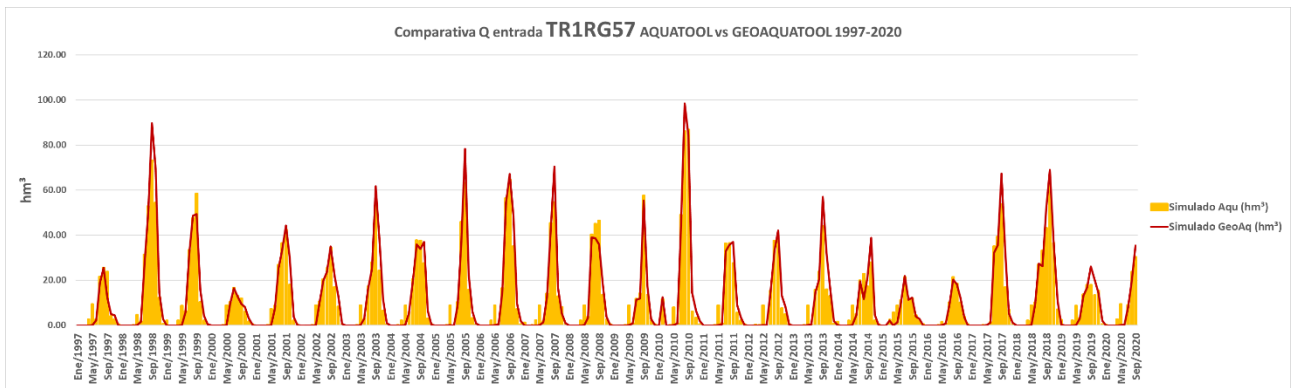


Figura 97. Comparativa entre los resultados de los modelos obtenidos por Aquatool-SIMGES y GeoAquatool_Aqt-Sim.

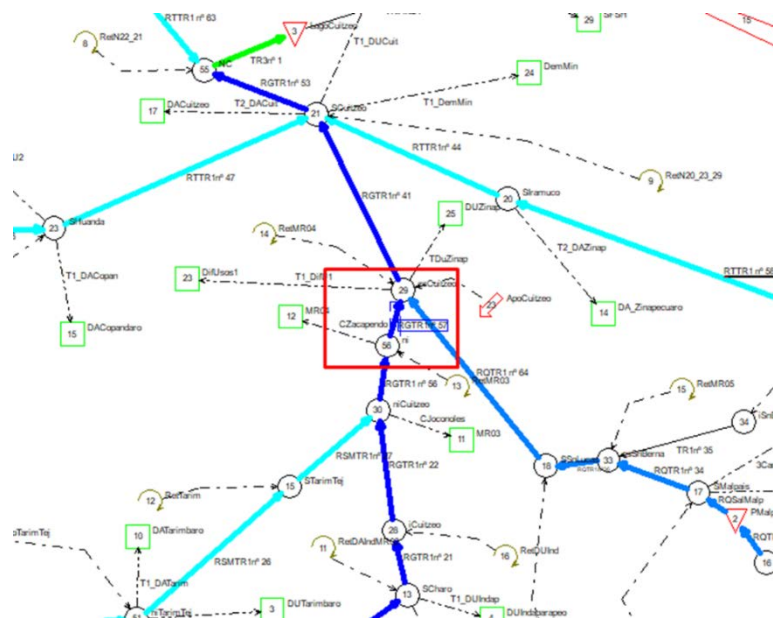


Figura 98. Ubicación del tramo de análisis en el esquema de SIMGES.

En cuanto el comportamiento de los volúmenes del Lago se puede observar que tanto en el modelo mensual y el modelo diario acumulado mensual se observa el mismo comportamiento tal como se muestra en la figura siguiente:

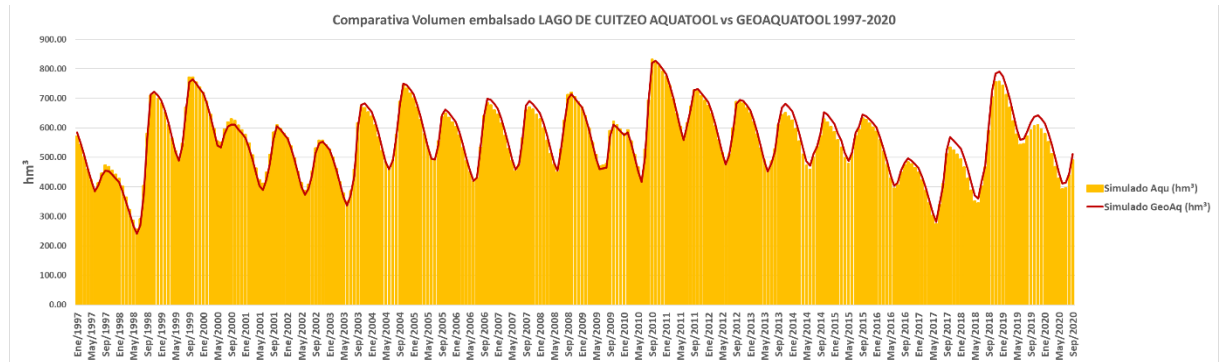


Figura 99. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo mensual de los volúmenes del Lago de Cuitzeo.

Para corroborar los resultados obtenidos en el modelo diario, se realizó una comparativa en escala mensual en la estación hidrométrica “12588 - El Plan” a régimen alterado con la finalidad de sustentar la modelación realizada.



Figura 100. Comparativa de escurrimientos observados vs. escurrimientos simulados en el modelo diario.

Se observa que el modelo diario logra representar los escurrimientos observados por la estación hidrométrica de manera satisfactoria teniendo un coeficiente de correlación de 0.83. Sin embargo, presenta dificultades para representar algunos valores máximos. También se observa que el mayor desfase que se tiene entre los escurrimientos simulados y observados se tiene después del periodo donde no hay datos.

Como se ha mencionado con anterioridad, la variación de los caudales es lo que permite realizar ciertos estudios como lo es la evaluación de la alteración hidrológica a través de índices de alteración. Esto se puede apreciar de manera visual en gráficos donde se han tomado 5 años (Figura 101 y Figura 102) de la serie completa para observar esta variación de los caudales a través del tiempo y se comparan el régimen alterado y el régimen natural.

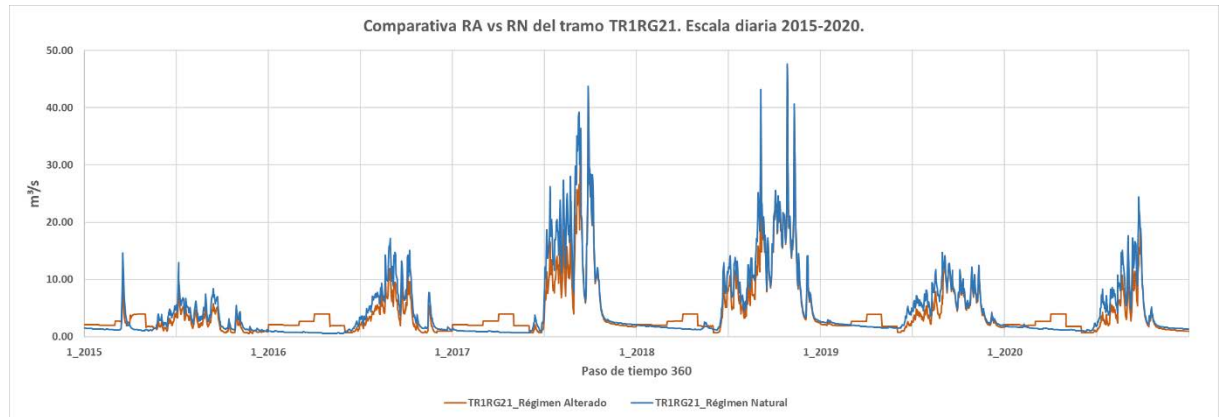


Figura 101. Comparativa R.A. vs R.N. en escala diaria para tramo del Río Grande. Serie 2010-2015

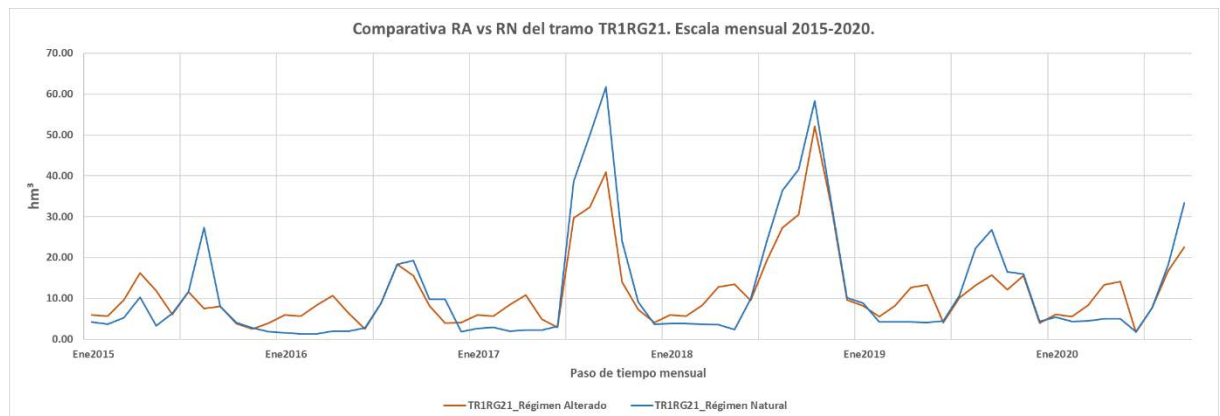


Figura 102. Comparativa R.A. vs R.N. en escala mensual para tramo del Río Grande. Serie 2010-2015.

Se observa que la reducción de escala temporal de mensual a diaria muestra como en algunos puntos existen picos o pulsos que son significativos para el análisis de la alteración hidrológica, donde si en un tiempo determinado hubo un caudal superior a la media del mes, el modelo diario es capaz de representarlo, mientras que, en el modelo mensual, estos picos solo son apreciables cuando existe una

gran diferencia entre ambos regímenes lo que genera pérdida de sensibilidad del estudio. De igual manera, se compara de manera más detallada en un solo año (Figura 103 y Figura 104) como son estas variaciones entre a escala mensual y la escala diaria.

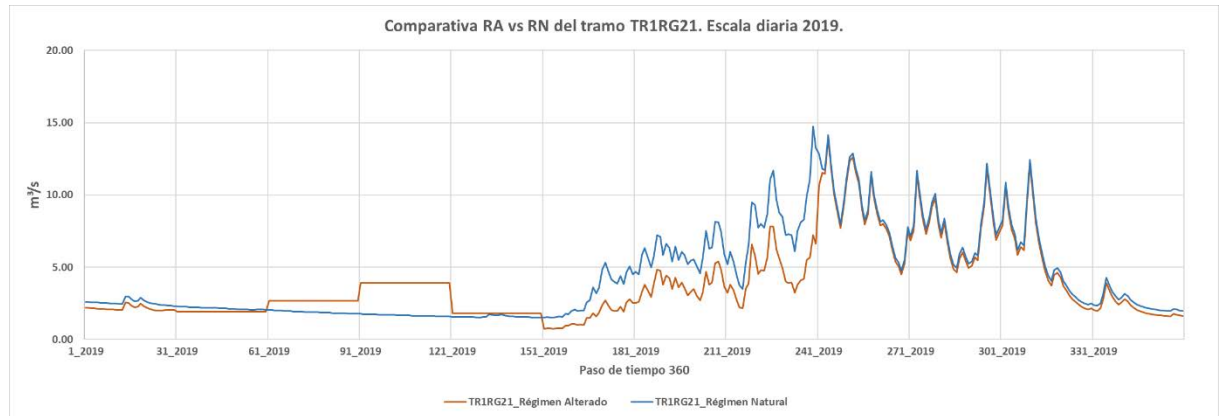


Figura 103. Comparativa R.A. vs R.N. en escala diaria. Tramo del Río Grande. Año 2019.

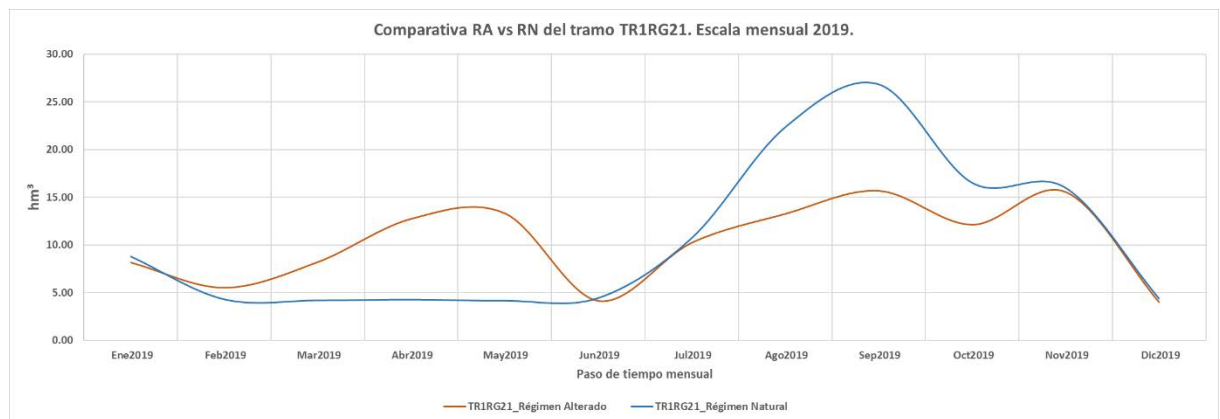


Figura 104. Comparativa R.A. vs R.N. en escala diaria. Tramo del Río Grande. Año 2019.

De este modo, una vez corroborado que los datos arrojados por el modelo diario son correctos. Se procede a la etapa final de la investigación, el cálculo de los índices de alteración con los datos diarios y realizar la evaluación de la alteración hidrológica en el SRH de la Cuenca del Lago de Cuitzeo en un registro histórico de 1997 a 2020.

5.10 Cálculo de los Índices de Alteración Hidrológica

Para determinar la alteración hidrológica en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se han elegido cinco tramos de río (Tabla 43) representativos de todo el S.R.H para el cálculo de los índices de alteración hidrológica.

Tabla 43. Tramos seleccionados para la evaluación de la Alteración Hidrológica de la cuenca.

Clave Tramo	Río	Ubicación	Observación
TR1RG5	Río Grande	Aguas abajo enseguida de la Presa Cointzio	Caudal regulado mediante reglas de operación
TR1RQSalMalp	Río Queréndaro	Aguas abajo enseguida de la Presa Malpais	Caudal regulado mediante reglas de operación
TR1RG57	Río Grande	Aguas abajo de tomas superficiales para MR 01-04	Tiene aportaciones intermedias
TR1RG64	Río Queréndaro	Aguas abajo de tomas superficiales para MR 05	Tiene aportaciones intermedias
TR3	Confluencia	Aguas arriba del Lago de Cuitzeo	Descarga todos los escurrimientos al lago

Esta elección está basada en la importancia que tienen estos tramos en cuanto a los términos de alteración hidrológica, ya que al estar ubicados aguas debajo de las presas tienen un caudal regulado en el SRH y modifican el régimen natural de caudales de forma drástica, de igual manera, se eligieron dos tramos de río ubicados aguas debajo de todas las tomas superficiales para las demandas agrícolas en cada río y el tramo aguas arriba del Lago de Cuitzeo ya que este es la confluencia de todos los escurrimientos que van a descargar al vaso del lago.

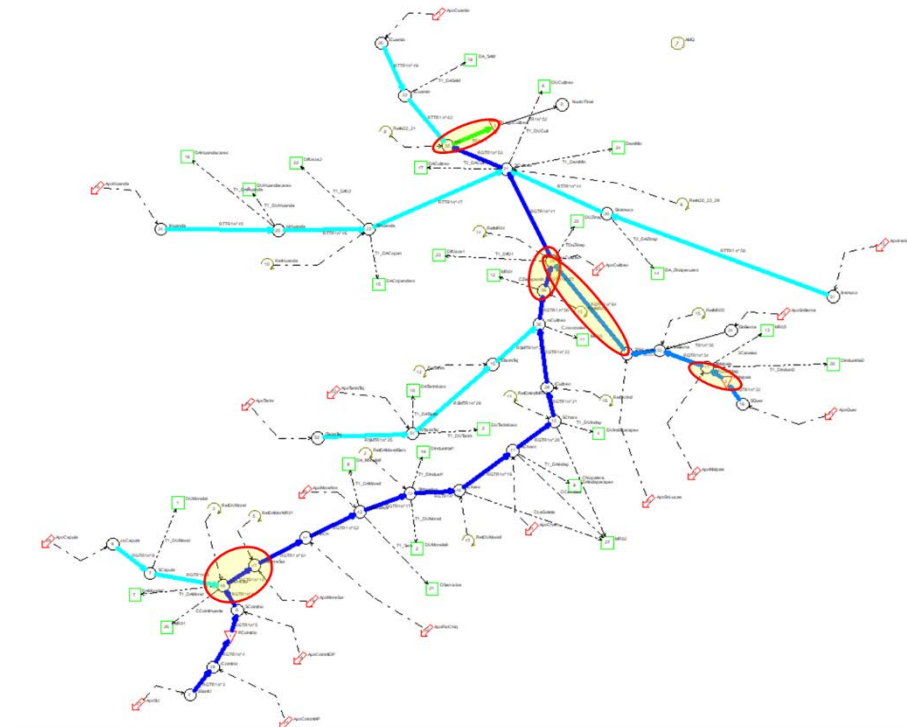


Figura 105. Tramos elegidos para calcular los IAH en escala mensual.

Los dos tramos que se encuentran posterior a la toma superficial para el suministro de las demandas de los módulos de riego se eligieron con la finalidad de revisar el impacto no solo de estas demandas, sino también el poder evaluar si las aportaciones intermedias tienen un efecto positivo en la alteración hidrológica ya que estas pueden hacer que a través de los escurrimientos de ríos temporales y arroyos el régimen de caudales tienda a ser más similar al natural.

Para el caso del tramo de río aguas arriba del Lago de Cuitzeo, se intenta analizar el impacto de la alteración hidrológica en el vaso ya que visualmente es lo más afectado dadas las sequías drásticas presentes en los últimos años.

Tabla 44. Rangos de Alteración Hidrológica.

Rango	Estado
0.75 - 1.00	Ligeramente alterado
0.50 - 0.75	Moderadamente alterado
0.25 - 0.50	Alterado
0.00 - 0.25	Muy alterado

5.10.1 Índices de Alteración Hidrológica por tramos de río.

La agrupación realizada se basa en la propuesta descrita por Mónico González et al. (2022) la cual se muestra en la siguiente tabla junto con los valores de cada iah normalizado para cada tramo de río. Esta agrupación mantiene los 33 iah pero agrupados en función de la magnitud de las condiciones de eventos extremos, su frecuencia y duración. Los grupos son los siguientes:

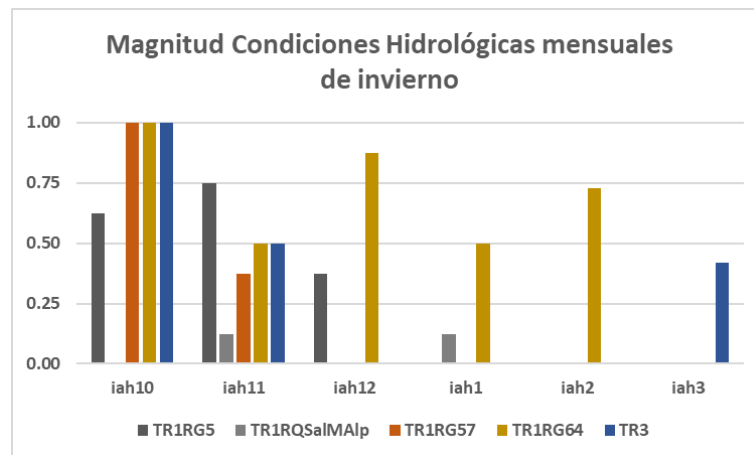
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales de invierno.
2. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales de verano.
3. Magnitud y duración de los máximos anuales.
4. Magnitud y duración de los mínimos anuales.
5. Frecuencia y duración de los pulsos y cambios en las condiciones hidrológicas.

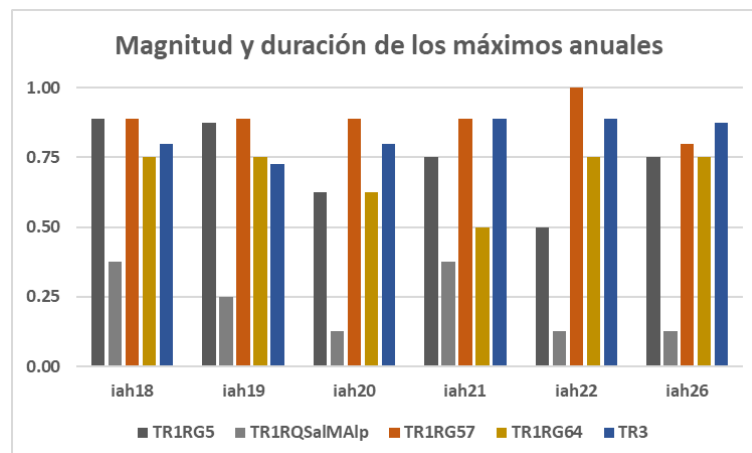
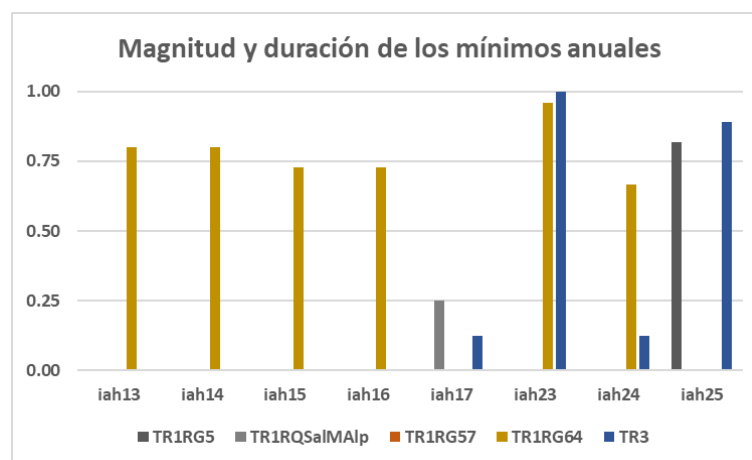
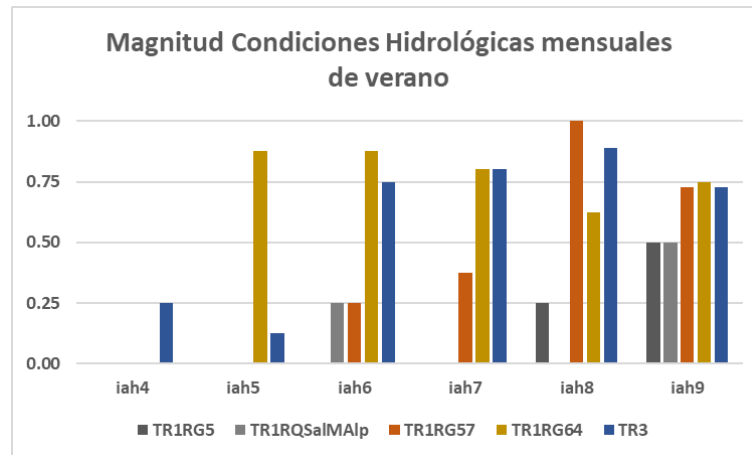
A continuación, se muestran los grupos de iah y los valores correspondientes a cada tramo de análisis.

Tabla 45. Valores de los iah para cada tramo de río.

Grupo	No. iah	Parámetro	TR1RG5	TR1RQSaIMAlp	TR1RG57	TR1RG64	TR3
Magnitud Condiciones Hidrológicas mensuales de invierno	iah10	Mediana Octubre	0.625	0.000	1.000	1.000	1.000
	iah11	Mediana Noviembre	0.750	0.125	0.375	0.500	0.500
	iah12	Mediana Diciembre	0.375	0.000	0.000	0.875	0.000
	iah1	Mediana Enero	0.000	0.125	0.000	0.500	0.000
	iah2	Mediana Febrero	0.000	0.000	0.000	0.727	0.000
	iah3	Mediana Marzo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.421
Magnitud Condiciones Hidrológicas mensuales de verano	iah4	Mediana Abril	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250
	iah5	Mediana Mayo	0.000	0.000	0.000	0.875	0.125
	iah6	Mediana Junio	0.000	0.250	0.250	0.875	0.750
	iah7	Mediana Julio	0.000	0.000	0.375	0.800	0.800
	iah8	Mediana Agosto	0.250	0.000	1.000	0.625	0.889
	iah9	Mediana Septiembre	0.500	0.500	0.727	0.750	0.727
Magnitud y duración de los mínimos anuales	iah13	Mínimos anuales, media de 1 día	0.000	0.000	0.000	0.800	0.000
	iah14	Mínimos anuales, medias de 3 días	0.000	0.000	0.000	0.800	0.000
	iah15	Mínimos anuales, medias de 7 días	0.000	0.000	0.000	0.727	0.000
	iah16	Mínimos anuales, medias de 30 días	0.000	0.000	0.000	0.727	0.000
	iah17	Mínimos anuales, medias de 90 días	0.000	0.250	0.000	0.000	0.125
	iah23	Cantidad de días con caudal cero	0.000	0.000	0.000	0.958	1.000
	iah24	Índice deQ base: Q _{mín} de 7 días/Q _{medio} anual	0.000	0.000	0.000	0.667	0.125
	iah25	Fecha de caudal mínimo	0.818	0.000	0.000	0.000	0.889
Magnitud y duración de los máximos anuales	iah18	Máximos anuales, media de 1 día	0.889	0.375	0.889	0.750	0.800
	iah19	Máximos anuales, medias de 3 días	0.875	0.250	0.889	0.750	0.727
	iah20	Máximos anuales, medias de 7 días	0.625	0.125	0.889	0.625	0.800
	iah21	Máximos anuales, medias de 30 días	0.750	0.375	0.889	0.500	0.889
	iah22	Máximos anuales, medias de 90 días	0.500	0.125	1.000	0.750	0.889
	iah26	Fecha de caudal máximo	0.750	0.125	0.800	0.750	0.875
Frecuencia y duración de los pulsos y cambios en las condiciones hidrológicas	iah27	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico	0.833	0.667	0.900	0.625	0.909
	iah28	Media o mediana de la duración de los pulsos bajos	0.875	0.571	0.750	0.600	1.000
	iah29	Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico	0.286	0.364	0.667	0.938	0.929
	iah30	Media o mediana de la duración de los pulsos altos	0.250	0.000	0.100	0.800	0.889
	iah31	Tasa de ascenso	0.000	0.000	0.727	0.375	0.889
	iah32	Tasa de descenso	0.000	0.000	0.000	0.750	0.800
	iah33	Cantidad de inversiones hidrológicas	0.000	0.000	0.500	0.818	0.800

Para facilitar la interpretación de los resultados se muestran los gráficos para cada grupo de iah para cada tramo de análisis.





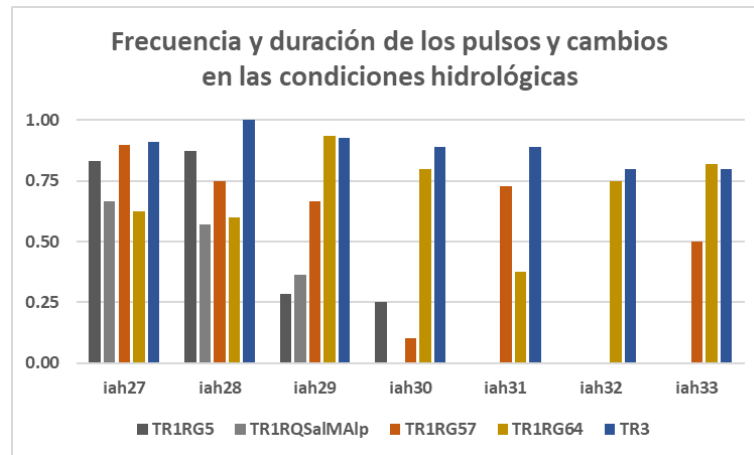


Figura 106. Valores de los iah por grupo para cada tramo de río.

Se observa que el grupo con mayor alteración es el de la magnitud y duración de los mínimos anuales en los tramos de río aguas debajo de las presas y el tramo posterior a las tomas de agua superficial del Río Grande, esto debido a que, en condiciones naturales, el caudal mínimo debería tener más variaciones y valores diferentes. Sin embargo, dado que se tiene que abastecer una demanda superficial, los embalses mantienen un caudal constante en el río.

Para el presente caso de estudio, los factores de ponderación tienen el mismo valor para el cálculo de un índice general por grupo por lo que se obtienen los siguientes valores para cada IAHg para cada uno de los tramos de río y para toda la cuenca.

Para obtener el índice de alteración general por grupo de iah de toda la cuenca, se calculó un promedio aritmético de los IAH generales de todos los tramos analizados.

Tabla 46. Valores de IAHg para cada tramo de río y para la cuenca.

Grupo IAH	Descripción	TR1RG5	TR1RQSalMAIp	TR1RG57	TR1RG64	TR3	IAH Cuenca
IAHG1	Magnitud Condiciones Hidrológicas invernales mensuales	0.2917	0.0417	0.2292	0.6004	0.3202	0.2966
IAHG2	Magnitud Condiciones Hidrológicas de verano mensuales	0.1250	0.1250	0.3920	0.6542	0.5902	0.3773
IAHG3	Magnitud y duración de los mínimos anuales	0.1023	0.0313	0.0000	0.5849	0.2674	0.1972
IAHG4	Magnitud y duración de los máximos anuales	0.7315	0.2292	0.8926	0.6875	0.8300	0.6741
IAHG5	Frecuencia y duración de los pulsos y cambios en las condiciones hidrológicas	0.3206	0.2288	0.5206	0.7008	0.8879	0.5317

La manera gráfica de representar estos resultados es a través de gráficos radiales que muestran una comparativa entre el régimen inalterado (con valor de uno) y el régimen alterado donde a medida que los puntos se acercan al centro, es

más notoria su alteración. El gráfico muestra la alteración de cada tramo de río y para la cuenca por cada grupo de parámetros en un registro histórico de 1997 a 2020.



Figura 107. Índices de Alteración Hidrológica por grupo para cada tramo de río.

En los gráficos radiales se observa que el tramo de río con mayor alteración es el que está ubicado aguas debajo de la presa Malpais siendo los grupos IAHg1,IAHg2 e IAHg3 los de mayor alteración. Esto puede ser debido a que el río Queréndaro es un río temporal y la presa solo recibe los escurrimientos de la microcuenca generada por el embalse. No obstante, las aportaciones intermedias logran impactar de manera positiva en el río ya que en el tramo ubicado aguas abajo

posterior a las demandas y antes de la confluencia con el Río Grande se mantiene una tendencia en todos los grupos de IAHg.

En el caso del Río Grande, se observa que el grupo con menor afectación es el de la magnitud y duración de los máximos anuales para ambos tramos de análisis. Esto se puede atribuir a que hay una mayor cantidad de aportaciones intermedias a lo largo del río y a que la operación de la presa coincide con los escurrimientos máximos generados por las lluvias.

El IAH general de la cuenca por grupo de iah muestra que el grupo de la magnitud y duración de los mínimos anuales es el más alterado, este corresponde a una condición de sequías, siendo este el mayor problema reflejado en el punto de salida de la cuenca que es el Lago de Cuitzeo.

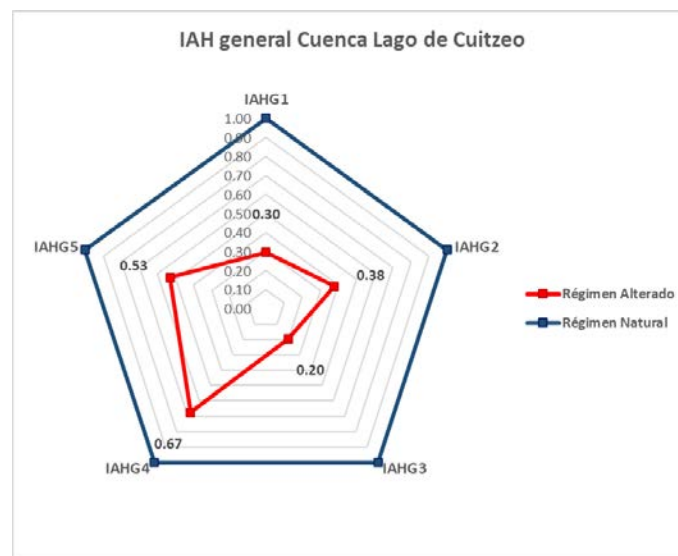


Figura 108. Alteración Hidrológica por grupo IAH en la Cuenca.

Para determinar en qué rango de alteración se encuentra cada tramo de estudio y la cuenca se realiza un promedio ponderado de todos los grupos de índices de tal modo que tenemos los resultados mostrados en la Figura 109, donde se observa que los tramos de río ubicados inmediatamente aguas debajo de las presas están en un estado muy alterado para el Río Queréndaro y un estado alterado para el Río Grande. Para este caso, se ha propuesto el mismo factor de ponderación.

Los tramos que están ubicados aguas debajo de las tomas superficiales de los diferentes módulos de riego, a pesar de tener esa demanda de agua no muestran una alteración mayor a los tramos enseguida de las presas, esto es dado que se tienen escurrimientos intermedios de pequeños ríos y arroyos; y también escurrimientos subterráneos en algunas zonas de la cuenca. Estas aportaciones intermedias impactan de manera positiva, disminuyendo la alteración hidrológica en dichos tramos.

Finalmente se obtiene que la alteración hidrológica de la cuenca al 2020 se encuentra en un estado alterado con un valor de 0.42 con una tendencia a tener mayor alteración debido a la escasez de lluvias y la mala gestión del agua.

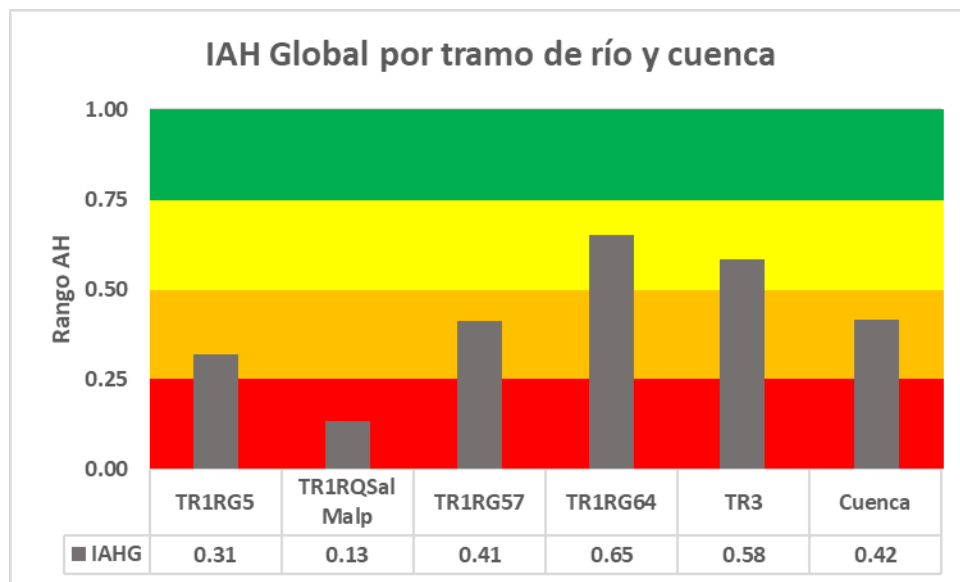


Figura 109. Rangos de Alteración Hidrológica para cada tramo de río y la cuenca.

Con la implementación de un caudal ecológica, se pretende tener una mejoría en la alteración hidrológica de los tramos de río y de la cuenca por lo que se procede a determinar este valor de caudal ecológico con base en la norma mexicana y generar un escenario donde sea establecido dicho caudal ecológico aplicando la metodología desarrollada en el escenario actual y determinar si es viable su implementación evaluando también la garantía de las demandas.

5.11 Determinación de caudales ecológicos mediante la NMX-AA-159-SCFI-2012

Como ya se ha mencionado con anterioridad, actualmente, la Cuenca del Lago de Cuitzeo presenta severos problemas de disponibilidad de agua debido a la retención, desvío y el poco retorno de agua a los principales afluentes. Esto ha provocado afectaciones drásticas en las partes bajas de la cuenca, reflejadas en el Lago de Cuitzeo que presenta periodos de desecación constantes provocando un deterioro paulatino a los ecosistemas ribereños y riparios. La determinación de un caudal ecológico mediante la metodología hidrológica presentada en la NMX-AA-159-SCFI-2012 es una medida que, de ser implementada, procuraría una cantidad de recurso hídrico para los diferentes ecosistemas para su mantenimiento y conservación, enfocando así la gestión del agua hacia un desarrollo sustentable.

En México la problemática del agua aumenta debido a diversos factores como el uso desmesurado de las aguas superficiales y subterráneas, el retraso tecnológico y de infraestructura enfocados a la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) y la falta de regulación en sitios localizados aguas arriba de las cuencas hidrológicas, por mencionar los más importantes. Sin embargo, éste último es el más notorio en la mayoría de las cuencas, por ejemplo en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, donde se ha observado que las decisiones tomadas en cuanto a la gestión del recurso hídrico por los principales municipios que pertenecen a esta cuenca ubicados aguas arriba, afectan drásticamente los escurrimientos superficiales a lo largo de los afluentes principales ya que al retener o desviar el agua a ciertos puntos, el agua restante no es suficiente para la conservación adecuada de los ecosistemas presentes en la cuenca, específicamente en las partes bajas. Es por esto que la determinación de Caudales Ecológicos (CE) se considera una medida que representaría un beneficio en general para toda la cuenca, pero especialmente en estas zonas.

La definición de caudal ecológico es la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y

sociales (Secretaría de Economía et al., 2012). Adicionalmente se plantea que, además de suministrar de manera eficiente las diferentes demandas de agua en el sistema, se debe mantener un cierto caudal destinado para dichos servicios ambientales, por lo que la determinación de CE para la zona de estudio repercutiría de manera favorable a mejorar el régimen de caudales existente debido a la mala gestión del agua.

La Cuenca del Lago de Cuitzeo es considerada como una de las más importantes debido a sus aportaciones superficiales y a su localización geográfica, ya que dentro de ella se encuentra la capital del estado de Michoacán (CONAGUA, 2010). A nivel cuenca muestra un desempeño muy superior al resto de las cuencas del estado ya que cuenta con 12 presas en funcionamiento y un escurrimiento total de 452.6 hm³/año. Pese a que la Cuenca del Lago de Cuitzeo tiene un mejor desempeño en comparación con otras, presenta severos problemas de disponibilidad debido al uso consuntivo y pérdidas de almacenamiento de 549.8 hm³/año, clasificándose así en una situación de déficit. Además, sus fuentes superficiales y subterráneas se encuentran totalmente concesionadas. Esto representa una limitante para un mayor desarrollo económico que podría ser solucionable a través de la recuperación de agua del sector agrícola, del abastecimiento urbano o bien con el fomento de la reutilización del agua residual en las actividades industriales que no requieran calidad potable.

De acuerdo a la información proporcionada por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDRA), los usos consuntivos que acaparan todo el recurso hídrico superficial corresponden al uso público urbano, agrícola e industrial, por lo que se debe considerar que los CE para la cuenca no afecten de manera drástica las garantías de estas demandas.

En México el orden de prioridad en cuanto a los usos del agua deja al uso destinado para la conservación ambiental o caudal ecológico en quinto lugar, después del uso doméstico, público urbano, pecuario y agrícola, no obstante, ello no implica que estos últimos puedan acaparan todo el recurso en detrimento del ambiente (Pérez Munguía et al., 2014). La definición del uso ambiental difiere un

poco con la de caudal ecológico, sin embargo, persiguen el mismo fin. La Ley de Aguas Nacionales y la Ley del Agua y Gestión de Cuencas definen el Uso Ambiental o Uso para la Conservación Ecológica como el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio del sistema (CONAGUA, 2010).

Actualmente, el país solamente cuenta con una Norma Mexicana para la determinación de CE, pero no se cuenta con una normativa oficial que deban cumplir los ríos en sus diferentes tramos para preservar los ecosistemas, controlar la sobreexplotación y mantener los servicios ambientales y sus funciones.

El hecho que no exista una normatividad específica con respecto al caudal ecológico, las concesiones y asignaciones, así como los permisos de descarga, no han considerado plenamente la necesidad de establecer un régimen de caudal, que es de gran importancia para la preservación de los ecosistemas: fluviales, lacustres, lagunares y estuarinos (Secretaría de Economía et al., 2012).

La NMX-AA-159-SCFI-2012 es la única norma que determina las metodologías aplicables en México para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas como una medida de regulación de la explotación, uso y conservación del agua para proteger los ecosistemas relacionados, con la finalidad de propiciar un desarrollo sustentable en las cuencas hidrológicas. Existen diferentes metodologías, estas se clasifican por la forma en que se aproximan o abordan al problema y cada una aporta resultados específicos en función de la cantidad de recursos que necesita. Las metodologías hidrológicas son las más simples, y en éstas se determina el caudal ecológico mediante el estudio de una serie de caudales históricos. Un ejemplo de las metodologías hidrológicas, en el que definen los CE como un porcentaje del caudal medio histórico, es la de *Tennant* o de *Montana* o la propuesta por la *Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte*. Este tipo de metodologías tienen la ventaja de ser sencillas en cuanto a su aplicación, lo que aunado a una relativa baja cantidad de información que requieren, permiten obtener resultados en el corto plazo. Además de estas metodologías,

existen otras donde es necesario utilizar métodos más detallados como *el Physical Habitat Simulation (PHABSIM)* el cual consiste en un análisis más detallado de la cantidad y conveniencia del hábitat físico disponible para la biota a diferentes condiciones de flujo, vinculando información hidrológica, hidráulica y biológica, que requieren una cantidad de información considerablemente mayor, cantidad de tiempo y, en general, mayor cantidad de recursos. Por último, las metodologías holísticas utilizadas en sitios con una alta variabilidad en el régimen de caudales, donde se han construido grandes presas, transformando así las características de la cuenca.

Para el presente caso de estudio, se utilizará la metodología hidrológica propuesta por la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte debido a que requiere solamente de registros históricos de caudales (información disponible al momento de realizar el estudio) y a su grado bajo-medio de complejidad respecto de las demás metodologías, no obstante, la resolución de los resultados está en función de su complejidad, a mayor complejidad de la metodología, mayor resolución habrá en los resultados.

5.11.1 Datos para determinar caudales en una cuenca.

Para la determinación de los CE para la cuenca del Lago de Cuitzeo, se requieren datos con información de las series históricas de los escurrimientos (caudales), esta información se encuentra disponible en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual es obtenida a través de estaciones hidrométricas ubicadas en los cauces y canales de la cuenca. Además, con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica y la plataforma de geomática Google Earth, se elaboraron mapas que facilitan conocer la ubicación espacial de las estaciones hidrométricas, ya que en algunas ocasiones la descripción que brinda el BANDAS resulta ser confusa.

Adicionalmente, se implementaron otros recursos como archivos ráster y vectoriales de plataformas como de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), del Instituto Nacional de Estadística y

Geografía (INEGI) y de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) para la elaboración de dichos mapas.

5.11.2 Métodos propuestos por la NMX-AA-159-SCFI-2012

Las metodologías hidrológicas descritas en la NMX-AA-159-SCFI-2012 son la de Tennant o de Montana y la propuesta por la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. Sin embargo, una vez que se han revisado ambas metodologías, se ha decidido implementar la segunda, dado que la información disponible y las condiciones de la cuenca permiten obtener mejores resultados que la primera, ya que esta se considera como un análisis preliminar para determinar si la información disponible es factible para determinar CE en una zona elegida, además de que se utilizan principalmente en corrientes que no presentan estructura de regulación como presas, esto es una limitante para su aplicación debido a que en la cuenca se encuentran la Presa de Cointzio y la Presa Malpais.

La finalidad de la metodología propuesta por la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., es conservar, o bien, recuperar o reconstruir el régimen hidrológico actual a partir del régimen hidrológico natural.

La aplicación de esta metodología es apropiada para corrientes o cuerpos de agua nacionales a nivel de cuenca hidrológica donde se pretenda conservar su régimen hidrológico natural con la finalidad de reservar un volumen de agua para uso ambiental o para la conservación ecológica conforme a la Ley de Aguas Nacionales.

En cuanto a la información de los escurrimientos, se requiere de una serie que se considere a régimen natural (donde no existan cambios significativos por efecto del hombre) con al menos 20 años completos de información. Para tamaños menores de la serie se debe analizar la representatividad de la misma en cuanto a la presencia de años húmedos, medios, secos y muy secos. Así mismo, en casos donde la serie sea mayor a 20 años y en los términos marcados por la norma el régimen hidrológico no se encuentre significativamente alterado, podrá utilizarse la serie completa.

El procedimiento a seguir para determinar el volumen de reserva con la finalidad ambiental en una corriente o cuerpo de agua nacional a nivel de cuenca hidrológica marca como primer paso identificar el objetivo ambiental para la cuenca, esto se establece a partir de la importancia ecológica y la presión de usos de agua. La importancia ecológica está en función de los aspectos bióticos, aspectos de integridad ecológica y alteración hidrológica. En cuanto a la presión de uso, se determinará como la relación en porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca o acuífero, conforme a la información publicada por la Comisión Nacional del Agua. El nivel de la presión de uso se establecerá de acuerdo a los valores que marca la norma.

Tomando en cuenta estos aspectos, la Norma clasifica a la cuenca del Lago de Cuitzeo con una importancia ecológica y una presión de uso muy alta, por lo que se debe utilizar la siguiente matriz para asignar el objetivo ambiental correspondiente:

Importancia ecológica	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D
		Baja	Media	Alta	Muy Alta
		Presión de uso			

Figura 110. Matriz de objetivos ambientales. Fuente: NMX-AA-159-SCFI-2012

El objetivo ambiental es el estado ecológico que se pretende alcanzar dentro de la cuenca para mantener la integridad de los ecosistemas actuales o, cuando se considere que estos están degradados, el que contribuya a su recuperación o rehabilitación. El grado del objetivo ambiental es “A” cuando corresponde a un estado de conservación muy bueno, “B” a un estado de conservación bueno, “C” a un estado moderado y “D” a un estado deficiente.

Una vez definido todo esto, se establece que la cuenca del Lago de Cuitzeo le corresponde un estado u objetivo de conservación deseado moderado (C).

Posteriormente se procede a identificar las corrientes donde se realizará el estudio de los CE y ubicar las estaciones hidrométricas más representativas de dichas corrientes.

Una vez identificadas las corrientes (perennes o intermitentes) y determinado el objetivo ambiental, se procede a elegir el intervalo de porcentajes de Esguerrimiento Medio Anual (EMA) de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 47. Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales.

OBJETIVO AMBIENTAL	ESTADO DE CONSERVACION	CAUDAL ECOLÓGICO(% EMA)	
		CORRIENTES PERENNES	CORRIENTES TEMPORALES
A	Muy bueno	≥40	≥20
B	Bueno	25-39	15-19
C	Moderado	15-24	10-14
D	Deficiente	5-14	5-9

Dado que el Río Grande de Morelia es una corriente perenne, se asigna el intervalo del 15 al 24% y para el Río Queréndaro que es una corriente temporal el intervalo del 10 al 14%. Para elegir el valor adecuado de CE se debe considerar el interés de conservación de las cuencas (con especial observancia en las Áreas Naturales Protegidas y la conservación de especies amenazadas), los posibles conflictos con el resto de usos del agua o las condiciones particulares de la masa de agua (como la contaminación o alteración morfológica). Para el caso de corrientes perennes, el caudal base deberá determinarse como el caudal mínimo mensual que formará parte del caudal ecológico. Además, si en temporada de estiaje, el porcentaje del caudal medio mensual conforme al objetivo ambiental asignado es inferior al caudal base, entonces el caudal ecológico a asignar para ese mes deberá ser al menos igual al caudal base.

Considerando todos los antecedentes expuestos, y la metodología seleccionada a partir del Caudal Medio Mensual para las series de las estaciones hidrométricas del Río Grande y Río Queréndaro, se realizó un análisis para determinar si las series de las estaciones hidrométricas de referencia son consideradas a régimen natural. Esto consiste en determinar el régimen de

volúmenes circulantes de agua de manera mensual y anual, del estado natural y actual, y el grado de afectación de este último sobre el primer. El objetivo es determinar si existe o no afectación significativa al régimen hidrológico natural debido a la presencia de infraestructura hidráulica o hidroeléctrica.

Una vez realizado este análisis, se procede con la selección del caudal ecológico óptimo para las corrientes principales de la cuenca.

5.11.3 Resultados de la determinación de caudales ecológicos mediante la norma

El Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro se consideran como los afluentes principales ya que son los que tienen mayor longitud en toda la cuenca y confluyen en ellos la gran mayoría de ríos y arroyos, tal como se observa en el mapa de la red hídrica de la cuenca en estudio.

Dentro de la cuenca se encuentran 15 estaciones hidrométricas, de las cuales únicamente la estación hidrométrica 12314-Queréndaro y la 12347-Santiago Undameo, son consideradas como estaciones de referencia dado que se encuentran aguas arriba de las presas; no obstante, dichas estaciones presentan una alteración antrópica, derivada de pequeños poblados lo que se traduce en la presencia de alteración en el régimen natural de los escurrimientos.

Se observa que a pesar de que existen más estaciones hidrométricas a lo largo de los dos cauces. Las estaciones que se encuentran después de las presas, son hidrométricas que tiene como finalidad medir los caudales que se extraen de dichas obras hidráulicas, por lo que son caudales modificados por acción del hombre y no por escurrimientos naturales de la cuenca, y por ello se decidió no considerarlas para el presente estudio.

La información empleada son los escurrimientos en escala diaria, correspondiendo esta a los caudales medios diarios. Se pudo observar que en las series existen errores sistemáticos donde no obedecen a un orden cronológico ya que algunos meses correspondientes a un año en específico, están colocados en otro año. También se observó que el criterio de CONAGUA para determinar un mes

como nulo es a partir de un dato diario faltante, lo que muestra que el hacer un análisis a escala diaria representa una mayor disponibilidad de información en comparativa con la escala mensual. Es importante considerar estas observaciones en la etapa del tratamiento de los datos para futuros estudios.

Una vez descargada y ordenada la información, se procede a realizar el análisis de las series para determinar si están alteradas o no y aplicar la metodología de CE seleccionada.

Se muestran a continuación los resultados de la estación hidrométrica de Santiago Undameo ya que es una corriente perenne y existe mayor información, para lo cual la metodología seleccionada es apta.

La EH-12347-SU cuenta con un registro histórico que data de 1956 hasta 2001, por lo que el periodo que se considera a régimen hidrológico natural (RHN) es el comprendido de 1956 a 1978 y como régimen hidrológico actual o alterado (RHA) el correspondiente a 1979 a 2001.

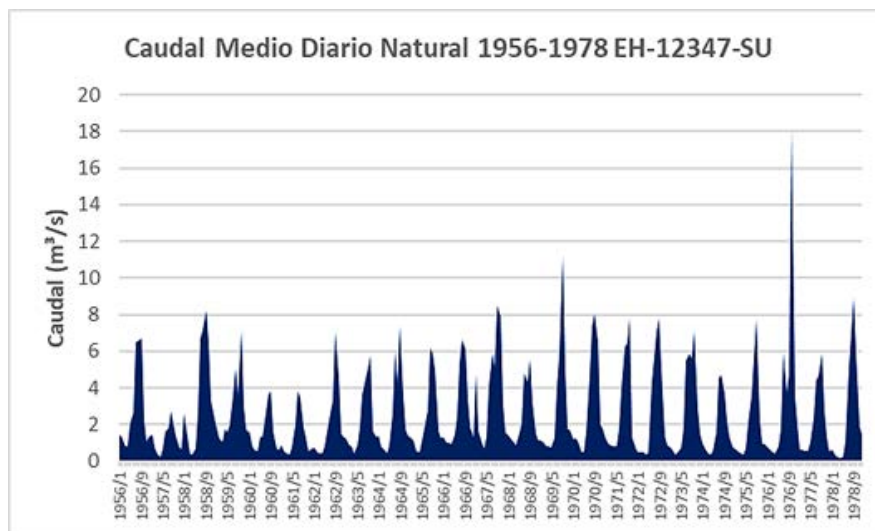


Figura 111. Serie considera a Régimen Hidrológico Natural de la EH-12347-SU.

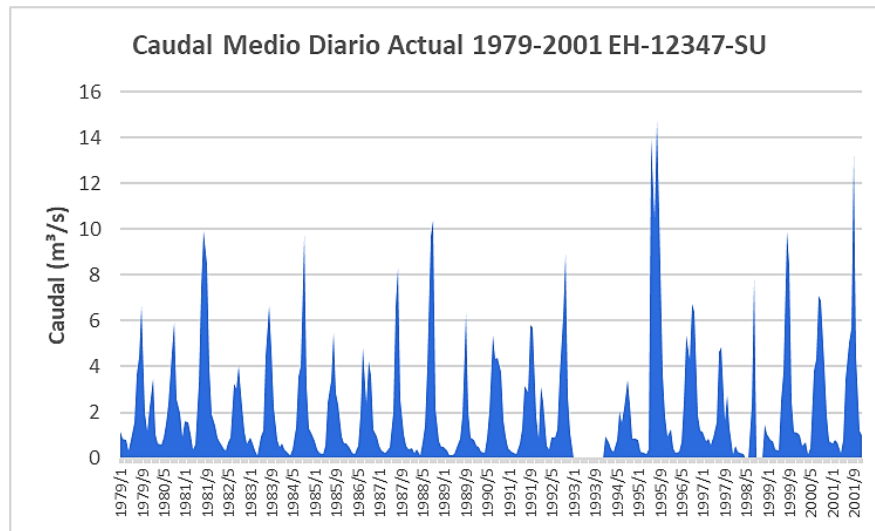


Figura 112. Serie considera a Régimen Hidrológico Alterado o Actual de la EH-12347-SU.

Nota: Los datos de 1993 no se encuentran disponibles en BANDAS por lo que en la gráfica no aparecen.

Haciendo un análisis visual, se puede observar que los caudales son menores en el RHA que el RHN, sin embargo, para determinar si la serie está en un régimen alterado o no, se debe hacer un análisis de los percentiles 10 y 90 (Tabla 57) que corresponderían a los caudales mínimos y máximos ordinarios respectivamente.

Tabla 48. Caudales mínimos y máximos ordinarios del RHN.

MES	PERCENTIL	
	10%	90%
Ene	0.612	2.263
Feb	0.498	1.324
Mar	0.358	1.036
Abr	0.291	0.903
May	0.508	1.572
Jun	1.283	3.504
Jul	2.381	6.307
Ago	3.379	7.120
Sep	2.674	8.688
Oct	1.487	7.844
Nov	0.706	3.231
Dic	0.649	1.882
Aportación media (suma)	14.827	45.674
Caudal medio anual (prom)	1.236	3.806

Una vez calculados los caudales mínimos y máximos se procede a verificar si los caudales circulantes del RHA se encuentran contenidos en el régimen de caudal ordinario máximo (P90) y mínimo (P10) sugeridos por el RHN. Donde si el RHA cumple en más de un 50% en relación con el RHN, se considera hidrológicamente inalterado, caso contrario a que sea menor a 50%, será una serie alterada. Como se muestra en la Tabla 59, la mayoría de los caudales están dentro del intervalo de los percentiles 10 y 90. En la se muestran los resultados donde las caudales mensuales actuales tienen un 67.18% con respecto de los caudales ordinarios máximos y mínimos de la serie considera a RHN.

En los gráficos de RHN Vs. RHA, se puede observar de manera gráfica como el comportamiento de los caudales que se consideran a RHA se mantienen dentro de los caudales máximos y mínimos ordinarios, por lo que se corrobora la información calculada de manera numérica.

Tabla 49. Caudales circulantes de la serie RHA.

Régimen Hidrológico Alterado (RHA)													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1979	1.136	0.856	0.783	0.326	0.813	1.583	3.659	4.417	6.660	1.966	1.230	2.219	25.648
1980	3.452	1.073	0.619	0.572	0.920	1.539	2.388	4.626	5.938	2.603	1.984	0.933	26.646
1981	1.608	1.590	1.066	0.400	0.617	3.306	7.507	9.908	8.483	3.947	1.905	1.404	41.741
1982	0.903	0.680	0.436	0.346	0.682	0.891	3.248	3.035	4.022	2.249	1.148	0.629	18.269
1983	0.921	0.655	0.361	0.155	0.944	1.187	4.499	6.635	4.756	2.238	0.822	0.494	23.666
1984	0.666	0.395	0.248	0.151	0.363	1.386	3.588	4.049	9.695	3.156	1.332	1.099	26.127
1985	0.771	0.373	0.228	0.161	0.545	2.455	3.427	5.457	2.847	2.335	0.957	0.640	20.196
1986	0.646	0.450	0.218	0.166	0.566	1.938	4.812	2.440	4.215	3.623	1.254	0.968	21.295
1987	0.546	0.341	0.260	0.345	0.488	2.026	6.684	8.255	2.586	1.065	0.527	0.383	23.506
1988	0.451	0.242	0.391	0.145	0.681	1.437	4.036	9.689	10.376	2.159	0.772	0.502	30.880
1989	0.505	0.335	0.149	0.138	0.205	0.588	0.852	1.895	6.271	2.035	0.898	0.813	14.683
1990	0.524	0.471	0.272	0.248	0.901	2.066	5.360	4.351	4.402	3.793	1.644	0.968	25.000
1991	0.427	0.297	0.233	0.180	0.657	1.318	3.179	2.916	5.811	5.738	1.844	0.878	23.478
1992	3.107	2.434	0.551	0.380	0.901	0.878	1.255	3.618	6.233	8.882	2.698	1.092	32.028
1993													0.000
1994	0.961	0.697	0.381	0.308	0.794	2.032	1.583	2.157	3.415	2.356	0.862	0.869	16.416
1995	0.789	0.304	0.240	0.204	0.378	13.885	10.517	14.668	10.693	3.661	1.802	0.974	58.117
1996	1.267	0.419	0.211	0.296	0.685	2.480	5.334	4.337	6.741	6.364	1.886	1.225	31.244
1997	1.161	0.753	0.840	0.606	0.893	1.577	4.632	4.828	1.693	2.769	1.303	0.201	21.256
1998	0.554	0.273	0.223	0.203			2.359	7.840				1.472	12.923
1999	1.066	0.777	0.734	0.395	0.313	2.522	3.788	9.852	8.414	2.509	1.161	1.084	32.616
2000	1.026	0.545	0.714	0.209	0.423	3.817	4.323	7.095	6.899	4.016	1.853	0.744	31.665
2001	0.668	0.808	0.690	0.243	0.792	3.456	5.053	5.657	13.188	4.464	1.209	1.023	37.252

Tabla 50. Régimen de caudales ordinarios mínimos y máximos acorde al RHN (P10-P90) VS RHA para la EH-12347-SU.

Mes	RHN P10	RHN P50	RHN P90	Q medio actual (m³/s)	No. meses que cumple	Total de meses	% Cumplimiento	Clase
Ene	0.612	1.225	2.263	1.053	14	22	63.64%	NO ALTERADA
Feb	0.498	0.847	1.324	0.671	9	22	40.91%	ALTERADA
Mar	0.358	0.566	1.036	0.448	11	22	50.00%	ALTERADA
Abr	0.291	0.466	0.903	0.281	15	22	68.18%	NO ALTERADA
May	0.508	0.826	1.572	0.646	15	21	71.43%	NO ALTERADA
Jun	1.283	1.851	3.504	2.494	15	21	71.43%	NO ALTERADA
Jul	2.381	4.501	6.307	4.186	15	22	68.18%	NO ALTERADA
Ago	3.379	5.168	7.120	5.806	11	22	50.00%	ALTERADA
Sep	2.674	6.150	8.688	6.349	15	21	71.43%	NO ALTERADA
Oct	1.487	4.603	7.844	3.425	19	21	90.48%	NO ALTERADA
Nov	0.706	1.632	3.231	1.385	20	21	95.24%	NO ALTERADA
Dic	0.649	1.289	1.882	0.937	15	22	68.18%	NO ALTERADA
Mensual	1.236	2.427	3.806	2.307	174	259	67.18%	NO ALTERADA
Anual	14.827	29.123	45.674	27.680	17	22	77.27%	NO ALTERADA

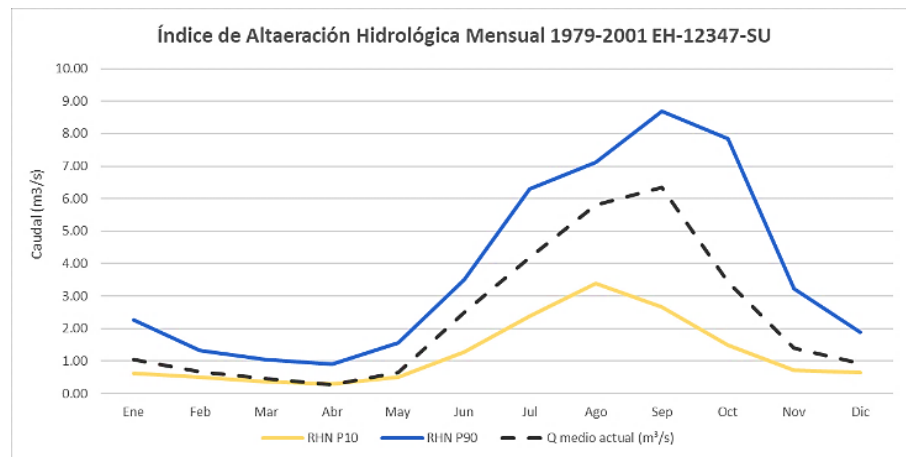


Figura 113. RHN VS RHA. Serie de aportación media mensual.

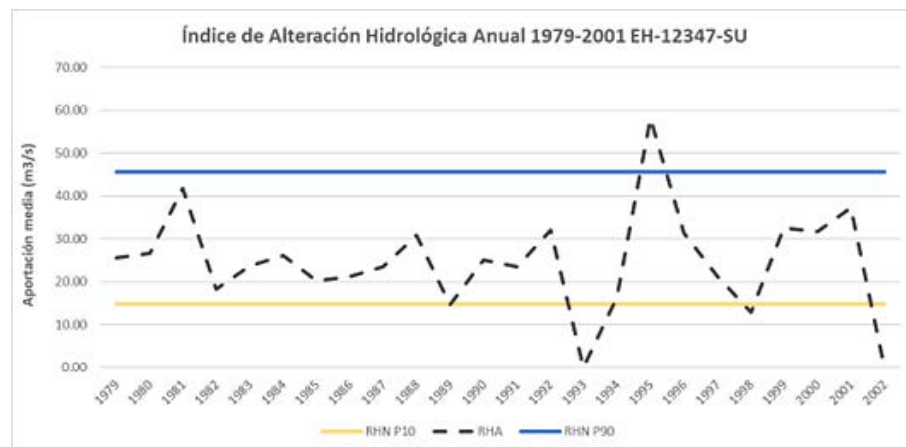


Figura 114. RHN VS RHA. Serie de aportación anual.

Teniendo presente que es una serie a régimen natural, se dispone a calcular los CE del Río Grande.

La metodología de la Norma indica que se debe realizar un análisis calculando los promedios mensuales de la serie para de este modo, identificar un porcentaje que este dentro del intervalo del objetivo ambiental. Sin embargo, la elección arbitraria de un porcentaje considerando los promedios mensuales de toda la serie, supondrían que en condiciones críticas (años más secos), se deba disponer de todo el caudal para un fin ecológico, por lo que se decide hacer un cálculo en donde solamente se consideren los datos del año más seco que de acuerdo al gráfico es el año de 1957.

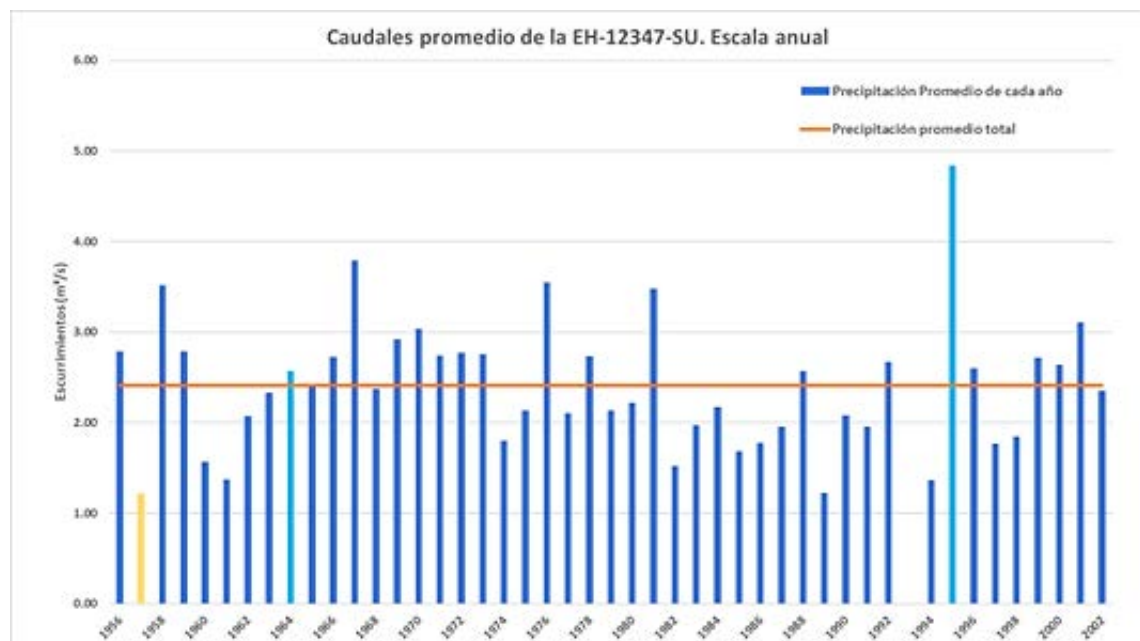


Figura 115. Cálculo de años secos y húmedos de la EH-12347-SU.

Dado que el intervalo va desde un 15 a un 24%, se calculan todos los porcentajes para realizar la comparativa con el Caudal Medio Mensual (CMM) de toda la serie.

Tabla 51. Caudales ecológicos para año más seco del Río Grande de Morelia.

Caudal Medio Mensual = CMM		Escorrentamiento Medio Anual = EMA = 1.22									
INTERVALOS DE VALORES DE REFERENCIA PARA RÉGIMEN DE CAUDAL ECOLÓGICO AÑO MÁS SECO											
Mes	CMM	OBJETIVO DE CONSERVACIÓN MODERADO									
		15%	16%	17%	18%	19%	20%	21%	22%	23%	24%
Ene	1.45	0.217	0.232	0.246	0.261	0.275	0.290	0.304	0.319	0.333	0.348
Feb	0.76	0.114	0.121	0.129	0.137	0.144	0.152	0.159	0.167	0.175	0.182
Mar	0.44	0.066	0.070	0.074	0.079	0.083	0.088	0.092	0.096	0.101	0.105
Abr	0.26	0.039	0.041	0.044	0.046	0.049	0.051	0.054	0.057	0.059	0.062
May	0.68	0.102	0.109	0.116	0.123	0.130	0.137	0.143	0.150	0.157	0.164
Jun	1.59	0.238	0.254	0.270	0.286	0.302	0.317	0.333	0.349	0.365	0.381
Jul	1.83	0.275	0.293	0.311	0.330	0.348	0.366	0.384	0.403	0.421	0.439
Ago	2.74	0.410	0.438	0.465	0.492	0.520	0.547	0.574	0.602	0.629	0.657
Sep	2.03	0.305	0.325	0.345	0.366	0.386	0.406	0.427	0.447	0.467	0.488
Oct	1.40	0.210	0.224	0.238	0.252	0.266	0.280	0.294	0.308	0.322	0.336
Nov	0.76	0.115	0.122	0.130	0.138	0.145	0.153	0.160	0.168	0.176	0.183
Dic	0.69	0.103	0.110	0.117	0.124	0.131	0.138	0.145	0.152	0.158	0.165
Promedio	1.22	0.183	0.195	0.207	0.219	0.232	0.244	0.256	0.268	0.280	0.292

Se comienza analizando el mayor porcentaje dispuesto para CE en el año más seco y se compara con el mismo valor pero para la serie completa, obligando a que se elija de igual manera un 24% para CE, lo que supone una afectación directa a las garantías de las demandas de la cuenca, por lo que se va disminuyendo el porcentaje de la condición más crítica hasta coincidir lo más posible con la serie completa, dando como resultado que para la condición más crítica el CE óptimo es de 19% y para la serie completa es de un 17% (Tabla 42). Este último valor garantiza que aún en años secos, el CE no acaparará todos los caudales del río, dando así holgura para poder suministrar los demás usos consuntivos y permitiendo que en condiciones más favorables (años más húmedos) estos puedan disponer de mayor cantidad de agua.

Debido a que existen fenómenos que aumentan o disminuyen las precipitaciones, se debería hacer un cálculo de CE para años secos y años húmedos, sin embargo, operacionalmente resultaría muy complicado e implicaría mayor demanda de recursos económicos y humanos.

Tabla 52. Caudales ecológicos para el Río Grande de Morelia.

Caudal Medio Mensual = CMM				Escorrentamiento Medio Anual = EMA =						2.419	
INTERVALOS DE VALORES DE REFERENCIA PARA RÉGIMEN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN EL RÍO GRANDE DE MORELIA											
Mes	CMM	DEFINICIENTE		MODERADO		BUENO		MUY BUENO		Q Ecol	Q Ecol año +Seco (19%)
		5%	14%	15%	24%	25%	39%	40%	80%	17%	
Ene	1.180	0.059	0.165	0.177	0.283	0.295	0.460	0.472	0.944	0.201	0.275
Feb	0.778	0.039	0.109	0.117	0.187	0.195	0.304	0.311	0.623	0.132	0.144
Mar	0.543	0.027	0.076	0.081	0.130	0.136	0.212	0.217	0.435	0.092	0.083
Abr	0.431	0.022	0.060	0.065	0.103	0.108	0.168	0.172	0.345	0.073	0.049
May	0.785	0.039	0.110	0.118	0.188	0.196	0.306	0.314	0.628	0.133	0.130
Jun	2.314	0.116	0.324	0.347	0.555	0.579	0.903	0.926	1.851	0.393	0.302
Jul	4.319	0.216	0.605	0.648	1.037	1.080	1.684	1.728	3.455	0.734	0.348
Ago	5.506	0.275	0.771	0.826	1.321	1.377	2.147	2.202	4.405	0.936	0.520
Sep	6.249	0.312	0.875	0.937	1.500	1.562	2.437	2.499	4.999	1.062	0.386
Oct	4.238	0.212	0.593	0.636	1.017	1.059	1.653	1.695	3.390	0.720	0.266
Nov	1.580	0.079	0.221	0.237	0.379	0.395	0.616	0.632	1.264	0.269	0.145
Dic	1.098	0.055	0.154	0.165	0.263	0.274	0.428	0.439	0.878	0.187	0.131
Promedio	2.419	0.121	0.339	0.363	0.580	0.605	0.943	0.967	1.935	0.411	0.232

Una vez determinado el CE para el Río Grande de Morelia que es una corriente perenne, se dispone a analizar las condiciones del Río Queréndaro y las series de la EH-12314-Q.

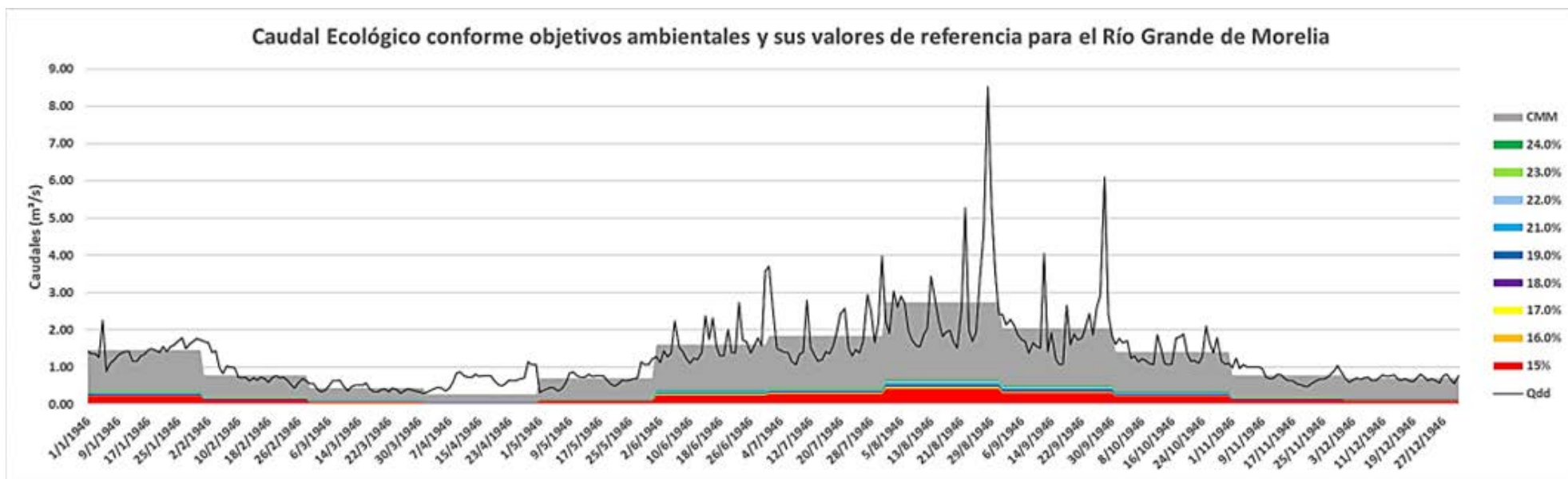


Figura 116. Caudales Ecológicos conforme al objetivo de conservación moderado para año más seco.

El Río Queréndaro a diferencia del Río Grande, es una corriente temporal, lo que supone una limitante para la aplicación de la metodología empleada hasta el momento, ya que a pesar de que hay porcentajes establecidos para este tipo de corrientes, se presenta la limitante de que solamente en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre (meses húmedos) se pueden asignar CE. Se propone que, a través de la modificación de las reglas de operación de la presa, se pueda regular el caudal para generar las condiciones de la implementación de un caudal ecológico en el Río Queréndaro.

5.12 Evaluación de la Alteración Hidrológica con la implementación de un caudal ecológico.

Siguiendo la metodología de la NMX-AA-159-SCFI-2012 para el establecimiento de un caudal ecológico, se elige como valor el 17% del caudal medio mensual de la estación hidrométrica aguas arriba de la presa Cointzio y para la estación hidrométrica aguas arriba de la presa Malpais el 10.5%.

El escenario del SRH de la Cuenca del Lago de Cuitzeo con la implementación del caudal ecológico se desarrolla teniendo como base el modelo de gestión en escala diaria agregando una condicionante en los tramos de río correspondientes a ambos ríos. Esta condicionante es definiendo un caudal mínimo igual al porcentaje definido por la norma mexicana a través de los diferentes tramos y posteriormente evaluar la garantía de las demandas, la alteración hidrológica y el volumen en el Lago de Cuitzeo y analizar si se tiene un efecto positivo.

5.12.1.1 Implementación de caudal ecológico en el Río Queréndaro

La implementación de un caudal ecológico en el Río Queréndaro no es posible con el escenario actual ya que el modelo de gestión muestra que para la Presa Malpais, existen meses donde no se tienen salidas en la obra de toma de la presa, es decir, el caudal que transita en el tramo inmediatamente aguas debajo de la presa es cero. Esto se atribuye a que el Río Queréndaro es temporal, por lo que las reglas de operación de la presa están diseñadas para retener el agua en temporada de lluvias (cerrar compuertas) para ser suministrada en temporada de estiaje. Tal como se observa en la siguiente figura:

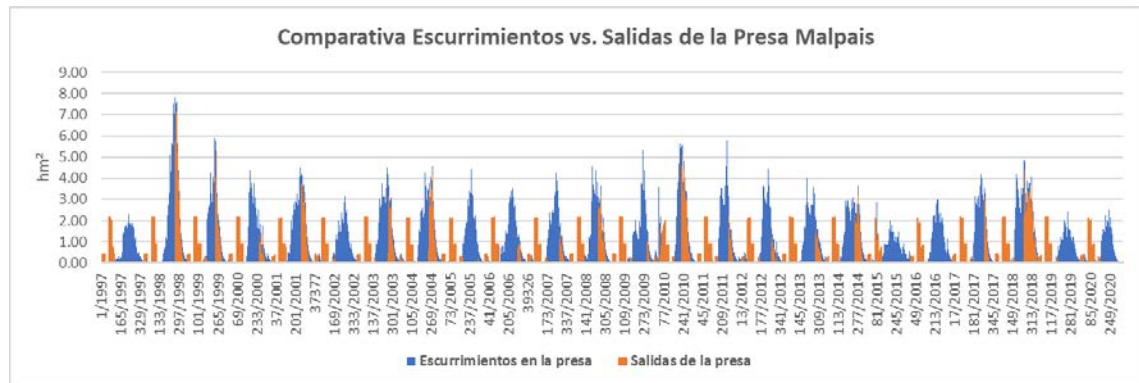


Figura 117. Comparativa de los escurrimientos embalsados vs. salidas de la Presa Malpais de 1998 a 2020.

A pesar de que esto resulta funcional para el suministro de las demandas agrícolas del módulo de riego 05, limita la aplicación del caudal ecológico por lo que se propone una modificación a las reglas de operación de la presa Malpais.

5.12.2 Implementación de caudal ecológico en el Río Grande de Morelia

Para este caso, se asigna un 17% del caudal registrado por la estación hidrométrica 12347-Santiago Undameo ubicada aguas arriba de la presa tal como se muestra en la Tabla 52, los valores del caudal correspondiente a este porcentaje se ingresan al modelo de gestión como caudales mínimos en los tramos de río correspondientes al Río Grande y se realiza la simulación. Dado que la Presa Cointzio sí tiene salidas durante todo el año, sí es posible la implementación del caudal ecológico.

Los tramos de río con la implementación de los caudales ecológicos muestran los siguientes valores de los 33 iah:

Tabla 53. Valores de los iah con la implementación del caudal ecológico en el Río Grande.

Grupo	No. iah	Parámetro	TR1RG5	TR1RG57	TR3
Magnitud Condiciones Hidrológicas mensuales de invierno con Qecológico	iah10	Mediana Octubre	0.375	0.875	1.000
	iah11	Mediana Noviembre	0.375	0.375	0.375
	iah12	Mediana Diciembre	0.375	0.000	0.000
	iah1	Mediana Enero	0.000	0.000	0.000
	iah2	Mediana Febrero	0.000	0.000	0.000
	iah3	Mediana Marzo	0.000	0.000	0.471
Magnitud Condiciones Hidrológicas mensuales de verano con Qecológico	iah4	Mediana Abril	0.000	0.000	0.375
	iah5	Mediana Mayo	0.000	0.000	0.125
	iah6	Mediana Junio	0.500	0.750	0.500
	iah7	Mediana Julio	0.000	0.375	0.800
	iah8	Mediana Agosto	0.000	0.889	1.000
	iah9	Mediana Septiembre	0.125	0.615	0.667
Magnitud y duración de los mínimos anuales con Qecológico	iah13	Mínimos anuales, media de 1 día	0.889	0.000	0.000
	iah14	Mínimos anuales, medias de 3 días	0.800	0.000	0.000
	iah15	Mínimos anuales, medias de 7 días	0.800	0.000	0.000
	iah16	Mínimos anuales, medias de 30 días	0.875	0.000	0.000
	iah17	Mínimos anuales, medias de 90 días	0.615	0.000	0.125
	iah23	Cantidad de días con caudal cero	1.000	1.000	1.000
	iah24	Índice deQ base: Q _{mín} de 7 días/Q _{medio} anual	0.533	0.000	0.125
	iah25	Fecha de caudal mínimo	0.444	0.000	0.818
Magnitud y duración de los máximos anuales con Qecológico	iah18	Máximos anuales, media de 1 día	0.375	0.889	0.800
	iah19	Máximos anuales, medias de 3 días	0.375	0.875	0.727
	iah20	Máximos anuales, medias de 7 días	0.250	0.875	0.667
	iah21	Máximos anuales, medias de 30 días	0.375	1.000	0.800
	iah22	Máximos anuales, medias de 90 días	0.375	1.000	1.000
	iah26	Fecha de caudal máximo	0.375	0.800	1.000
Frecuencia y duración de los pulsos y cambios en las condiciones hidrológicas con Qecológico	iah27	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico	0.933	0.900	0.727
	iah28	Media o mediana de la duración de los pulsos bajos	0.636	0.375	0.875
	iah29	Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico	0.143	0.778	0.929
	iah30	Media o mediana de la duración de los pulsos altos	0.125	0.300	0.571
	iah31	Tasa de ascenso	0.000	0.889	0.889
	iah32	Tasa de descenso	0.250	0.000	0.750
	iah33	Cantidad de inversiones hidrológicas	0.000	0.500	0.727

Los valores de alteración hidrológica por grupo de iah son:

Tabla 54. IAH generales por tramo de río con implementación de caudal ecológico.

Grupo IAH	Descripción	TR1RG5	TR1RG57	TR3
IAHG1	Magnitud Condiciones Hidrológicas invernales mensuales	0.1875	0.2083	0.3076
IAHG2	Magnitud Condiciones Hidrológicas de verano mensuales	0.1042	0.4382	0.5778
IAHG3	Magnitud y duración de los mínimos anuales	0.7446	0.1250	0.2585
IAHG4	Magnitud y duración de los máximos anuales	0.3542	0.9065	0.8323
IAHG5	Frecuencia y duración de los pulsos y cambios en las condiciones hidrológicas	0.2982	0.5345	0.7812

Se logra tener una mejoría considerable en el tramo ubicado aguas abajo de la Presa Cointzio (TR1RG5), principalmente en el grupo de la magnitud y duración de los mínimos anuales. Sin embargo, para el caso de los tramos aguas abajo

posterior a las demandas y aguas arriba del Lago de Cuitzeo (descarga al lago), no se nota mucha mejoría. Esto puede ser atribuible a que la cantidad de agua definida como caudal ecológico no es significativa en comparación con los escurrimientos que se tienen a lo largo del cauce.

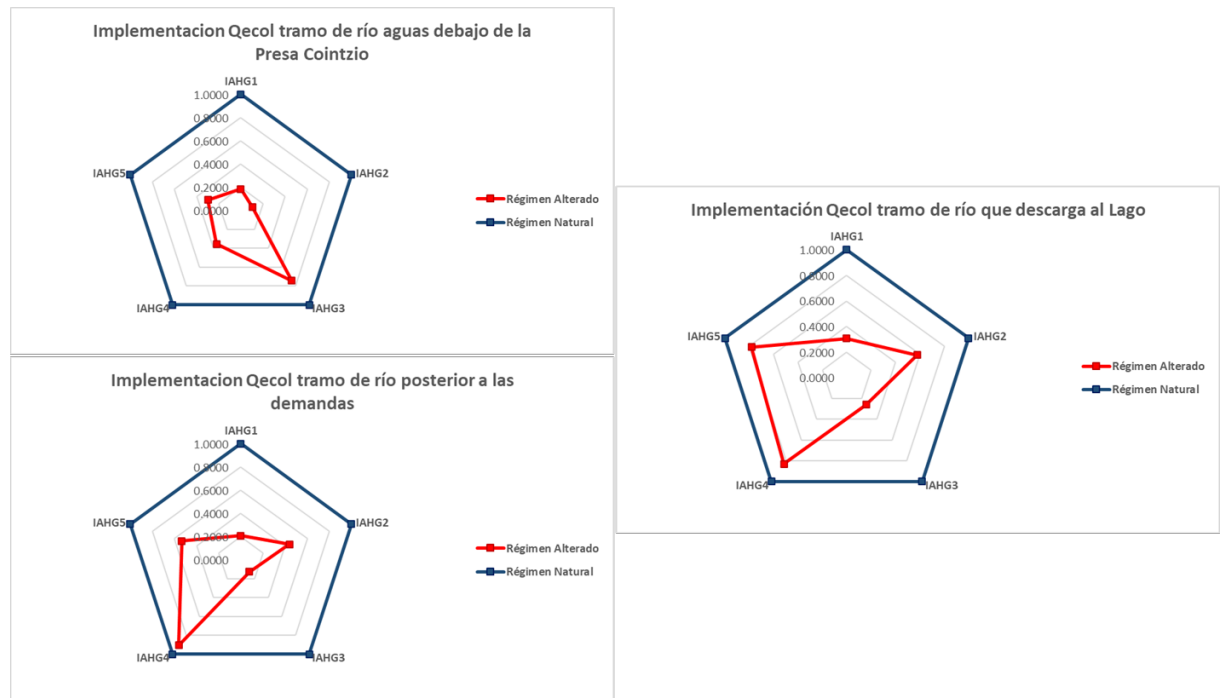


Figura 118. Índices de Alteración Hidrológica por grupo para cada tramo de río con la implementación de caudal ecológico.

En cuanto a los valores globales (Figura 119) por tramo de río se nota una mejoría para el tramo aguas abajo de la presa que aumenta de un valor de 0.31 a 0.34 y para el tramo posterior a las demandas aumenta de 0.41 a 0.44. No obstante, para el caso del tramo de río que descarga al Lago de Cuitzeo, se tiene un descenso de 0.58 a 0.55, esto puede ser atribuible a que los escurrimientos intermedios del río son temporales, tomando en cuenta el Río Queréndaro que no tiene definido un caudal ecológico dadas las reglas de operación de la presa. Los grupos de IAH que mostraron un descenso son en cuanto a magnitud, frecuencia y duración, variables que están relacionadas con la temporalidad de las lluvias. Esta condición se deberá analizar de manera particular, tomando en cuenta si los beneficios son mayores dadas las condiciones actuales de las sequías y la finalidad del estudio.

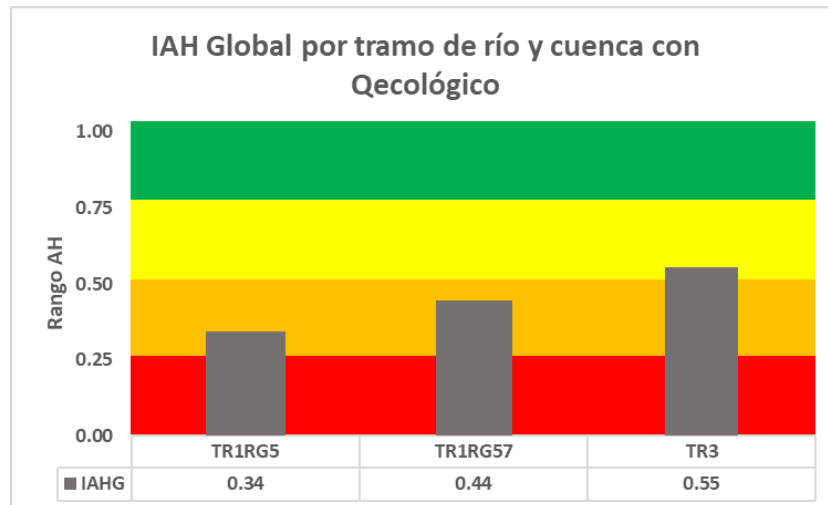


Figura 119. Valores de IAH globales por tramo de río con la implementación de caudales ecológicos.

El análisis de las garantías de las demandas en ambos escenarios es realizado por el programa bajo el criterio de la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH), la cual es una norma que tiene como objetivo establecer criterios para la elaboración de los planes hidrológicos de cuencas españolas. Este análisis muestra que en ambos escenarios las garantías volumétricas resultan ser iguales, teniendo un déficit en los módulos de riego 02, 03 y 04. Para el caso del módulo de riego 05 se han calculado también las garantías volumétricas a pesar de que este es abastecido por el Río Queréndaro.

Tabla 55. Garantías volumétricas de las demandas agrícolas en ambos escenarios.

Demanda	Garantía Volumétrica sin Qecológico	Garantía Volumétrica con Qecológico	Criterio IPH
MR01	100.00%	100.00%	CUMPLE
MR02	78.30%	78.30%	NO cumple
MR03	78.20%	78.20%	NO cumple
MR04	87.30%	87.30%	NO cumple
MR05	95.20%		NO cumple

En cuanto a los volúmenes en el Lago de Cuitzeo con la implementación de un caudal ecológico (Figura 120), se observa que no existe una diferencia significativa entre un escenario y otro, por lo que se optaría por aumentar el

porcentaje del caudal ecológico para el Río Grande y la modificación de las reglas de operación de la Presa Malpais.

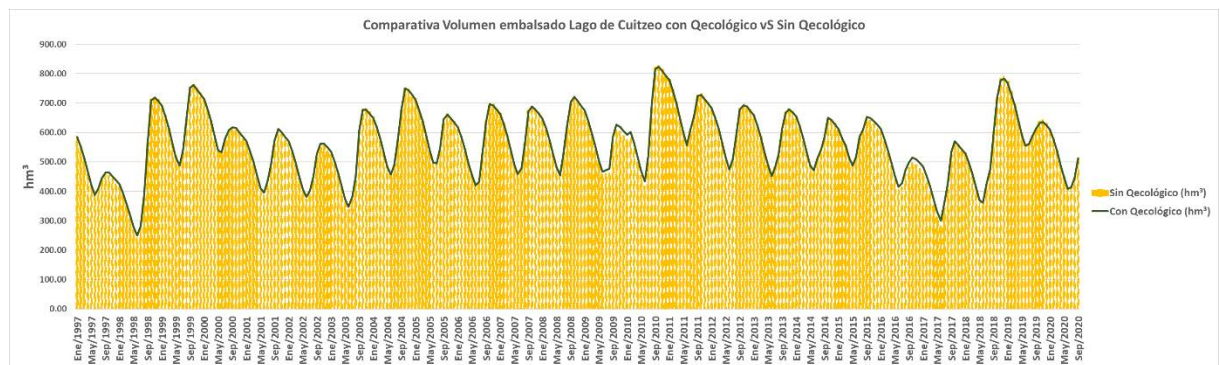


Figura 120. Comparativa de volúmenes en el Lago de Cuitzeo implementando caudal ecológico vs. sin caudal ecológico.

El desarrollo del escenario con la implementación del caudal ecológico, muestra que el porcentaje definido bajo la norma no genera un beneficio notorio en la alteración hidrológica. Además, bajo el análisis de las garantías de las demandas, se observa que las reglas de operación en ambas presas no son funcionales dado que no se tiene un control del abastecimiento de las demandas agrícolas y el suministro presenta déficits en la mayoría de los módulos. Estos resultados muestran las condiciones actuales, sin embargo, se recomienda recabar más datos de las demandas, la operación de las presas, así como la topobatimetría del Lago de Cuitzeo para evaluar su comportamiento de mejor manera y de este modo generar soluciones viables y eficientes para la conservación de los ecosistemas de los ríos y cuerpos de agua.

El análisis de diversos escenarios con caudales ecológicos diferentes basándose en el régimen natural del SRH, permitiría la elaboración de nuevas reglas de operación que sean eficientes para el abastecimiento de las demandas de agua superficiales y principalmente para aminorar las sequías en el Lago de Cuitzeo ya que es el principal deterioro que se tiene actualmente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de un MPE a escala diaria ha permitido identificar ciertos errores sistemáticos provenientes de las diferentes bases de datos, como lo han sido en cuanto a datos hidrométricos el criterio de hacer un mes nulo si hace falta un día o más, siendo así una reducción considerable de la información para realizar la calibración de un MPE, también se pudo identificar el cambio de sitio de la estación hidrométrica 12347-Santiago Undameo ya que antes del año de 1955 estaba midiendo sólo las aportaciones del río Tiripetio y posteriormente una vez ubicada aguas abajo, mide también los escurrimientos del río Tirio. Información que hasta el momento no ha sido actualizada por la dependencia responsable.

El reducir la escala temporal mensual a diaria de un MPE, implica un aumento drástico de los recursos de información, su tratamiento y análisis lo que hace que se vuelva una tarea más meticulosa para no cometer errores al momento de ejecutar el modelo, sin embargo, este trabajo exhaustivo brinda un modelo más robusto ya que en escala diaria se puede observar de manera más clara la variación de la precipitación, de la ETP y de los escurrimientos lo que permitirá diseñar de manera más eficiente estrategias de gestión de los recursos hídricos.

Para el desarrollo de los modelos implementados en esta investigación, la falta de información es un factor que implica un aumento de recursos de trabajo, estadísticos, tiempo y que llega a generar mayor incertidumbre en los resultados. Sin embargo, la utilización de nuevos programas que permiten la modelación diaria abre camino al desarrollo de nuevas técnicas de evaluación y gestión del recurso hídrico, así como análisis enfocados a la conservación del medio ambiente.

El AMV es una herramienta estadística que permite generar modelos completos partiendo de modelos semidistribuidos con poca información y que da pie a su aplicación en otro tipo de estudios hidrológicos.

A pesar de que se tiene un fundamento estadístico al momento de asignar los parámetros de un MPE a través del AMV, no se debe dejar de lado el criterio “de un buen hidrólogo” ya que este se forma a través de la experiencia del desarrollo de modelos, dominio de programas y conocimiento de la zona de estudio.

El desarrollo de metodologías para zonas con poca información no debe abrir paso a que se deje de lado la modernización y mantenimiento de estaciones climatológicas e hidrométricas ya que los datos reales favorecen la calidad de los resultados de un MPE.

Con el desarrollo del modelo subterráneo del Acuífero Morelia-Queréndaro para el periodo 2007-2022 se obtienen las siguientes conclusiones:

La disponibilidad de información piezométrica es parte fundamental para determinar los niveles piezométricos iniciales y los parámetros de control. Para este caso, se tenían limitantes en cuanto a esta información, sin embargo, se propusieron “técnicas” para obtener información donde no la había y era necesario contar con ella, esto mediante la interpolación de puntos y el tener información alrededor del acuífero ya que esto ayuda a conocer si el acuífero tiene entradas o salidas de acuíferos vecinos.

La discretización realizada por celdas de 3000x3000 metros se considera adecuada dado que no existen muchos puntos de control, esto para el modelo en Aquivál y la finalidad que tiene la presente investigación.

La clasificación que se hizo de la litología se considera apropiada, sin embargo, se modificó a la que se propuso en un inicio en las zonas aledañas al lago, por lo que corroborar los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento con estudios previos serviría como base para modelaciones futuras.

Auxiliarse de SIG para revisar el comportamiento de los niveles observados y los simulados es una herramienta útil ya que permite identificar puntos del mallado donde hay diferencias considerables y de esta manera proceder a corregir los valores propuestos de las propiedades hidráulicas.

Se hace la propuesta como línea futura de investigación, generar una red de monitoreo en puntos donde de acuerdo a la simulación y la información recabada se consideran importantes, tal es el caso de la zona centro de la ciudad de Morelia, el desarrollo habitacional de Villas del Pedregal y Campo Nubes, en los módulos de



riego, zona industrial de Morelia y Zinapécuaro, en las zonas agrícolas cercanas al Lago de Cuitzeo (Copándaro y Huandacareo), parte sur del acuífero (Acuitzio y Cointzio) ya que esto permitiría tener modelaciones con mejores resultados.

En cuanto a las conclusiones del modelo de gestión. En un sistema de recursos hídricos, a pesar de que el modelo sea detallado y bueno, si no se tiene una buena calidad de información, el modelo nunca reflejará con una buena aproximación la realidad por lo que se recomienda que a criterio del modelador y del conocimiento de la zona, se haga un esquema en función de la información disponible para no caer en el error de “inventar o suponer información” ya que si se colocan “detalles mínimos” con información y se suponen otros que realmente deberían ser importantes, se obliga a mover valores del modelo para ajustarlo, cuando en la realidad no es así.

El desarrollo de un modelo de gestión a nivel cuenca permite simular diferentes escenarios tomando en cuenta factores como lo son eventos extremos (sequías e inundaciones), la consideración de un caudal ecológico y sobre todo la garantía de las demandas consuntivas. Con esto se pueden desarrollar reglas de operación de embalses que no solo garanticen el abastecimiento para las diferentes demandas, sino que también logren la conservación de los ecosistemas de ríos, arroyos y lagos.

La evaluación de la alteración hidrológica es un método que permite cuantificar el grado de alteración de un sistema de recursos hídricos e identificar factores que repercuten de manera drástica en el régimen de caudales. Se intenta que, a través de la implementación de índices de alteración hidrológica, sea más sencillo el desarrollo de reglas de gestión y su impacto de tal modo que se garantice el cuidado del agua y sobre todo del medio ambiente.

Como conclusión general, la implementación de índices de alteración hidrológica permite evaluar la propuesta de nuevas políticas hídricas con un enfoque ambiental, ya que permite la cuantificación del grado de alteración en un sistema de recursos hídricos con la implementación de caudales ecológicos, de un caudal mínimo, modificación de las reglas de operación en las presas, entre otras técnicas



para mejorar las condiciones actuales y de este modo aminorar el riesgo de una crisis hídrica. Esto se logra a través del desarrollo de modelos matemáticos en hidrología superficial, subterránea y de la gestión de recursos hídricos ya que actualmente en México, se tiene una deficiencia de información y conlleva a que diferentes datos como la precipitación, temperaturas, niveles estáticos del acuífero, consumo del agua, información de infraestructura hidráulica, entre otros, provoca un aumento del trabajo del modelador e incertidumbre en los resultados.

Para la presente investigación, el mayor reto fue realizar el bajado de escala temporal de mensual a diaria, principalmente por la disponibilidad de información y también debido a que aún se encuentra en etapa de desarrollo la interface del módulo de la SSD GeoAquatool. Sin embargo, la implementación de las metodologías mostradas en este trabajo y la validación de los resultados obtenidos, muestran un avance para futuras líneas de investigación que ayuden a generar políticas hídricas que garanticen el suministro de las demandas consuntivas teniendo un enfoque ecológico encaminado a la sustentabilidad ambiental sin dejar de lado el desarrollo socioeconómico del país.

Finalmente, los trabajos desarrollados para mejorar la gestión del agua en México siguen teniendo aportes importantes que quedan a disposición de los organismos administradores del agua. No obstante, si estos no consideran toda la información disponible y ejecutan las propuestas desarrolladas, la situación hídrica del país irá empeorando. Por lo que el trabajo conjunto de especialistas del área de recursos hídricos y de las ciencias ambientales, junto con la sociedad y gobierno es la clave para una correcta gestión integral del agua y la conservación del medio ambiente y, por ende, de nuestras condiciones de vida.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado Pérez, A., & Lucas Urbina, O. (2017). *Medición de Niveles Estáticos en el Acuífero Morelia Queréndaro*.
- Andreu, J. (1983). Modelos agregados y distribuidos. Modelos unicelulares. Modelos Glover-Jenkins. In M. Varela (Ed.), *Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas*.
- Andreu, J., & Sahuquillo, A. (1987). Efficient Aquifer Simulation in Complex Systems. *Water Planning and Management*, 113(1).
- Andreu, J., Solera Solera, A., Capilla Romá, J., & Ferrer Polo, J. (2007). Modelo SIMGES de simulación y Gestión de los Recursos Hídricos, incluyendo utilización conjunta. In *Universidad Politécnica de Valencia* (3.03.01). <http://www.upv.es/aquatoool/docs/SIMGE2usr300.pdf>
- Aparicio Mijares, F. J. (1997). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (S. A. de C. V. Editorial Limusa, Ed.).
- Bizzi, S., Pianosi, F., & Soncini-Sessa, R. (2012). Valuing hydrological alteration in multi-objective water resources management. *Journal of Hydrology*, 472–473, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.033>
- Black, A. R., Rowan, J. S., Duck, R. W., Bragg, O. M., & Clelland, B. E. (2005). DHRAM: A method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 15(5), 427–446. <https://doi.org/10.1002/aqc.707>
- Bocco, G., López Granados, E., & Mendoza, M. E. (2012). La Investigación Ambiental en la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Una revisión de la bibliografía publicada. In M. Bravo, G. Barrera Camacho, M. E. Mendoza, T. Sáenz Reyes, R. Sánchez Martínez, & F. Bahena Juárez (Eds.), *Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del Lago de Cuitzeo*. Campo Experimental Uruapan-INIFAP y Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-UNAM.



- Comisión Nacional del Agua, C. (2018). *Estadísticas del Agua en México 2018*.
www.gob.mx/conagua
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*.
- CONAGUA. (2022). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán*.
- CONAGUA. (2010). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán*.
- CONAGUA, & CEAC. (2009). *PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO*.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (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>
- Economía Secretaria de, CFE, CONAGUA, CONANP, IMTA, INE, SEMARNAT, UNAM, WWF-México, & Conservancy, T. N. (2012). Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la Determinación del Caudal Ecológico en cuencas hidrológicas. In *Diario Oficial de la Federación México* (p. 123).
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo*.
- Gao, Y., Vogel, R. M., Kroll, C. N., Poff, N. L. R., & Olden, J. D. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 374(1–2), 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009>
- Hassing, J., Ipsen, N., Clausen, T. J., Lrasen, H., & Lindgaard-Jørgensen, P. (2009). Integrated Water Resources Management (IWRM) in Action. In *The United Nations World Water Assessment Programme*.

LAN. (1992). LEY DE AGUAS NACIONALES. In *Última reforma publicada DOF-06-01-2020*.

Martínez Santa-María, C., & Fernández Yuste J.A. (2008). *Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS). Manual de Referencia Metodológica Versión 1*. 1–69. <http://www.chduero.es/acciona5/metodologia/iharis.pdf>

Metcalf & Eddy Inc. (1991). *Wastewater Engineering. Treatment Disposal and Reuse*. (Mc-Graw Hill Book Co, Ed.; 3rd edition).

Mónico González, V., Solera Solera, A., Paredes Arquiola, J., & Bergillos Meca, R. (2022). *EFFECTO DEL RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS SOBRE LOS INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA. CASO DE ESTUDIO, CUENCA DEL RÍO ÓRBIGO. (Demarcación Hidrográfica del Duero)*. Universitat Politècnica de València.

Morales Perea, D. (2015). *DUMAC, Ducks Unlimited de México*. Lago de Cuitzeo: Iniciativa Multi-Institucional Para Su Conservación. <https://dumac.org/2015/07/30/lago-de-cuitzeo-iniciativa-multi-institucional-para-su-conservacion/>

Murillo López, F. (2012). *El enfoque de la Gestión Integral en el uso de los recursos hídricos ante la problemática de la escases, calidad y saneamiento del agua en México*. Universidad de Sonora.

Navarro Farfán, M. del M. (2022). *Medición de Niveles Estáticos en el Acuífero Morelia Quréndaro*.

Onofre, G., Carbajal, G., & Carbajal, M. (2015). Sistema productivo local en Michoacán: La actividad pesquera en Mariano Escobedo, Cuitzeo. *Economía y Sociedad*, XIX(32), 15–40.

Ortín León, A. (2017). *Estudio de alteración hidrológica en cuencas con elevado estrés hídrico: el caso de la cuenca del río Júcar* [Tesis de Licenciatura, Universitat Politècnica de València, Valencia, España]. <http://hdl.handle.net/10251/87538>

Pardo Loaiza, J. (2016). *Gestión Integrada de Recursos Hídricos en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, ante el efecto del Cambio Climático* [Tesis de Maestría]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

Pardo Loaiza, J., Solera Solera, A., & Bergillos Meca, R. (2022). *Mejora de la gestión del recurso hídrico mediante la incorporación de indicadores de regímenes ecológicos en el análisis de sistemas de recursos hídricos*. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/192461/Pardo - Mejora de la gestion del recurso hidrico mediante la incorporacion de indicadores de regi....pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/192461/Pardo%20-%20Mejora%20de%20la%20gestion%20del%20recurso%20hidrico%20mediante%20la%20incorporacion%20de%20indicadores%20de%20regi....pdf?sequence=1)

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A Method

Paredes Arquiola, J., Solera Solera, A., Andreu Álvarez, J., & Lerma Elvira, N. (2017). *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. (v1.1). http://www.upv.es/aquaatool/files/manuales/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf

Peñas, F. J., Barquín, J., & Álvarez, C. (2016). Assessing hydrologic alteration: Evaluation of different alternatives according to data availability. *Ecological Indicators*, 60, 470–482. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.021>

Pérez Munguía, R. M., Urbán Lamadrid, R., Neri Flores, I., Pineda López, R. F., Domínguez Cortazar, M. Á., Hernández Guzmán, R., Torres García, U., Cordero Herrera, G., Salinas Rodríguez, S. A., Guerra Gilbert, A., & Rodríguez Pineda, J. A. (2014, November). *PROGRAMA NACIONAL DE RESERVAS DE AGUA Protocolo de geomorfología para la aplicación de la Norma de Caudal Ecológico* (NMX-AA-159-SCFI-2012). <https://www.researchgate.net/publication/330700228>

Richter, B. D., Baumgartner, J. v., Braun, D. P., & Powell, J. (1998). A Spatial Assessment of Hydrologic Alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(1), 329–340.



- Richter, B. D., Baumgartner, J. v., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- Richter, B. D., Baumgartner, J. v, Wigington, R., & Braun, D. P. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37(1), pp.231-249. http://www.calwater.ca.gov/Admin_Record/C-047636.pdf
- Rodríguez Benlloch, F. J. (2019). *Aplicación de Índices de Sostenibilidad y Alteración Hidrológica en la Gestión de la Cuenca del Río Guadalquivir* [Tesis de Maestría]. Universitat Politècnica de València , Valencia, España.
- Sánchez-Quispe, S. T., Navarro-Farfán, M. del Ma., & García-Romero, L. (2021). Capítulo 7 Metodología para el tratamiento de datos meteorológicos e hidrométricos a escala de cuenca. *CIERMMI Women in Science TXVI Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.35429/H.2021.16.107.145>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *Gobierno de México - Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. Inician Trabajos Para Desarrollar Plan de Rehabilitación Del Lago de Cuitzeo. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/inician-trabajos-para-desarrollar-plan-de-rehabilitacion-del-lago-de-cuitzeo?idiom=es>
- Solera, A., Paredes, J., & Andreu, J. (2015). *Manual de usuario AQUATOOL+ (1.0)*.
- The Nature Conservancy. (2009). Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual. In *The Nature Conservancy* (Issue June, p. 76). <https://doi.org/10.1002/0470848944>
- Vogel, R. M., Sieber, J., Archfield, S. A., Smith, M. P., Apse, C. D., & Huber-Lee, A. (2007). Relations among storage, yield, and instream flow. *Water Resources Research*, 43(5), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006WR005226>

8. ANEXOS

Anexo A

Estudios hechos con anterioridad en el Acuífero Morelia-Queréndaro

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE MORELIA-QUERÉNDARO, MICHOACÁN (SARH, 1977).

Este documento reporta la existencia de dos fuentes principales de agua subterránea, un acuífero granular y un acuífero basáltico. Espesores de 100 m en el valle de Morelia, de 300 m en la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro. Estimaron 21 Mm³ de extracción de agua subterránea (pozos y norias), siendo el uso principal el de abastecimiento de agua potable. Los manantiales descargan un volumen anual del orden de 50 Mm³.

En términos generales, el agua subterránea es de buena calidad, los sólidos disueltos totales tienen 800 ppm. Exceptuando el área inmediata a la laguna de Cuitzeo, registrándose contenidos entre 800 y más de 3,000 ppm. Realizaron 150 sondeos eléctricos verticales los cuales se integraron en 11 perfiles geoeléctricos. Muestrearon 184 aprovechamientos para análisis de calidad del agua. Llevaron a cabo 10 pruebas de bombeo.

ESTUDIO DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA Y ACTIVIDADES GEOLÓGICAS COMPLEMENTARIAS EN LA ZONA DE MORELIA-ÁLVARO OBREGÓN, MICHOACÁN (SARH, 1988).

El estudio es una actualización del conocimiento geológico e hidrológico de los materiales del subsuelo con posibilidades de construir acuíferos susceptibles de explotación, mediante 50 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en 10 secciones y un estudio hidrogeoquímico, efectuado en 30 aprovechamientos. Concluyen que en el subsuelo de la zona en que se encuentra ubicada la Cd. de Morelia, así como en las áreas circundantes se manifiesta la existencia de un sistema acuífero de alta productividad, alojado principalmente en las ignimbritas y tobas pumíticas de edad Plioceno Superior, así como en los derrames, brechas, aglomerados y conglomerados de composición basáltica y andesítica. La calidad fisicoquímica es

apta para todo uso, únicamente la de la porción baja del valle Morelia-Álvaro Obregón, presenta peligro de salinidad media a ligeramente alta.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CUANTITATIVO DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO, MICH. (CNA, 1990).

En el estudio se llevó a cabo una actualización del inventario de aprovechamientos, reportando 1,038 (924 pozos, 52 norias y 62 manantiales) mediante los cuales se extrae un volumen del orden de 52 Mm³/año en los acuíferos de la porción norte contigua al Lago de Cuitzeo a través de 581 aprovechamientos; 197 Mm³/año, de los que 83 Mm³/año se extraen en el valle de Morelia mediante 216 aprovechamientos y 62 Mm³/año en la Planicie Álvaro Obregón-Queréndaro con 241 aprovechamientos. El principal uso del agua subterránea es el agrícola (56%) y público urbano (17%).

Reportan una sobreexplotación del agua subterránea en el valle de Morelia provocando el descenso progresivo de los niveles del agua en el área localizada entre Cointzio y el poblado de Charo, alcanzando un máximo de 30 m en el intervalo de 1977-1990. La calidad del agua en forma general es buena, reportando una salinidad total predominante de 1,000 ppm.

Concluyen que la recarga que recibe el acuífero granular en la porción sur de la zona: planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro y valle de Morelia es superior a 178 Mm³, reportando una disponibilidad en este acuífero de 33 Mm³ dado que en esa zona sólo se reportan 145 Mm³/año de extracción. Recomiendan reglamentar la disponibilidad de agua en el acuífero granular para satisfacer demandas de riego para uso doméstico de los núcleos de población asentadas en los valles. Regular la disponibilidad de aguas subterráneas en la porción occidental de la planicie de Álvaro Obregón para satisfacer las demandas de agua potable de la población de Morelia. No incrementar la explotación de agua subterránea en el valle de Morelia, específicamente en el área comprendida entre las poblaciones de Cointzio y Charo.

ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS ACTUALES Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN DEL ACUÍFERO DE MORELIA-QUERÉNDARO, MICHOACÁN (CNA, 1993).

Reportan una extracción de 100 Mm³/año (incluye pozos y norias) distribuido de la siguiente manera: 40 Mm³/año para uso agrícola, 53 Mm³/año para abastecimiento de núcleos de población e instalaciones industriales y 7 Mm³/año para uso doméstico y/o abrevadero. En el documento se realizó el balance de aguas subterráneas, considerando la extracción de 100 Mm³/año, una descarga natural del orden de 45 Mm³/año (considerando evapotranspiración y descarga de manantiales), el cambio de almacenamiento anual de 15 Mm³ (calculado en el lapso 1977-1992). Para planear el desarrollo y orientar el manejo del acuífero, realizaron una modelación matemática preliminar, ya que disponen de poca información para formar y calibrar el modelo, se simuló el comportamiento de los niveles en el intervalo 1993-2010, suponiendo un bombeo incrementado en unos 45 Mm³/año, a partir de 1993, con la siguiente distribución: 30 Mm³/año en el área de Álvaro Obregón-Queréndaro y 15 Mm³/año en el área de Morelia.

Los resultados indican que el incremento del bombeo provocaría el descenso de los niveles del agua, afectando el área de Morelia. En el acuífero se observan abatimientos desde 1977 en la zona de Morelia, del orden de 5 a 20 m; y en la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro del orden de los 6 m, provocados por la operación de los pozos agrícolas construidos a partir de 1989.

REGISTROS DE LITOLOGÍA, ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO (CNA, 1995).

Este expediente contiene planos de litología del área norte de la Laguna de Cuitzeo. En el plano fechado 1977, "Estudio Geohidrológico, Río Lerma, Modelo Tectónico, Subcuencas Subterráneas, SARH" indican dos abatimientos en la zona del acuífero Morelia-Queréndaro, uno en el municipio de Cuitzeo y el de mayor área se ubica en la zona entre Queréndaro y Zinapécuaro.

REGISTROS DE PIEZOMETRÍA, ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO (CNA, 1997).

Este expediente contiene una recopilación de planos de piezometría de estudios previos (SARH, 1990; entre otros). Contiene información litológica de 13 pozos; datos piezométricos de aprovechamientos que abastecen la ciudad de Morelia en el periodo sep/96-mar/97 (ésta información carece de coordenadas), el OOAPAS dividió la información de niveles dinámicos en cinco zonas, 1) Zona Río Chiquito, destacando la Reserva Ocolucen con niveles de 183.6 m; 2) Zona Prados Verdes, Mariano Escobedo II con niveles de 154.2 m; 3) Zona Quinceo, Potrerillos con niveles de 190.2 m; 4) Zona Realitos, El Lago II con niveles de 157.1 m; 5) Zona Oriente de la Cd., Enrique Ramírez II con niveles de 158.2 m. Los niveles estáticos se encuentran entre 2 y 98 m, los niveles dinámicos entre 21 y 215 m, el gasto entre 3 y 70 lps, profundidad total entre 25 y 350 m.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA SUR-PONIENTE DE MORELIA (OOAPAS, 2006).

El estudio tiene una extensión de 48 km², localizada en la zona sur-poniente de Morelia. El censo indica un total de 59 aprovechamientos de agua subterránea, de ellos 53 son pozos y 6 manantiales. 33 de los pozos son operados por el OOAPAS Morelia; se observa que los niveles.

estáticos de los pozos ubicados en la zona del valle varían de los 14 a los 45 m de profundidad y los pozos ubicados en la zona de las faldas del Quinceo varían de los 47 a los 110 m. Además, se realizaron 20 sondeos eléctricos verticales.

Reportan un volumen de agua subterránea disponible en el acuífero de 5'840,579.64 m³; abatimientos en la zona del ex Ejido Tzindurio, el FOVISSSTE La Huerta, Ciudad Universitaria y en el Fraccionamiento Ario 1815, San Isidro Itzicuaró. El menor abatimiento se encuentra en la zona comprendida entre la población de San Juanito Itzicuaró y el Fraccionamiento Fuentes de Valladolid y hacia el Sur de estos asentamientos. La calidad del agua subterránea es apta para el consumo humano en la zona centro y sur del valle aluvial, los pozos que en algunos



parámetros rebasan lo establecido por la norma, se ubican al norte y oriente de la zona de estudio.

ACTUALIZACION HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS: MARAVATIO-CONTEPEC- EPITACIO HUERTA, ZACAPU, MORELIA-QUERÉNDARO Y PASTOR ORTIZ, EN EL ESTADO DE MICHOACÁN. 2007. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para la Comisión Nacional del Agua.

El objetivo general es conocer las condiciones actuales de explotación del agua subterránea y funcionamiento hidrogeológico del acuífero Morelia-Queréndaro (1602), con el objeto de que sirva de herramienta, para proponer las políticas de explotación adecuadas y estar en condiciones de realizar un mejor aprovechamiento del recurso subterráneo.

Anexo B

Gráficos comparativos entre el nivel estático simulado y el nivel estático observado para la modelación del acuífero.

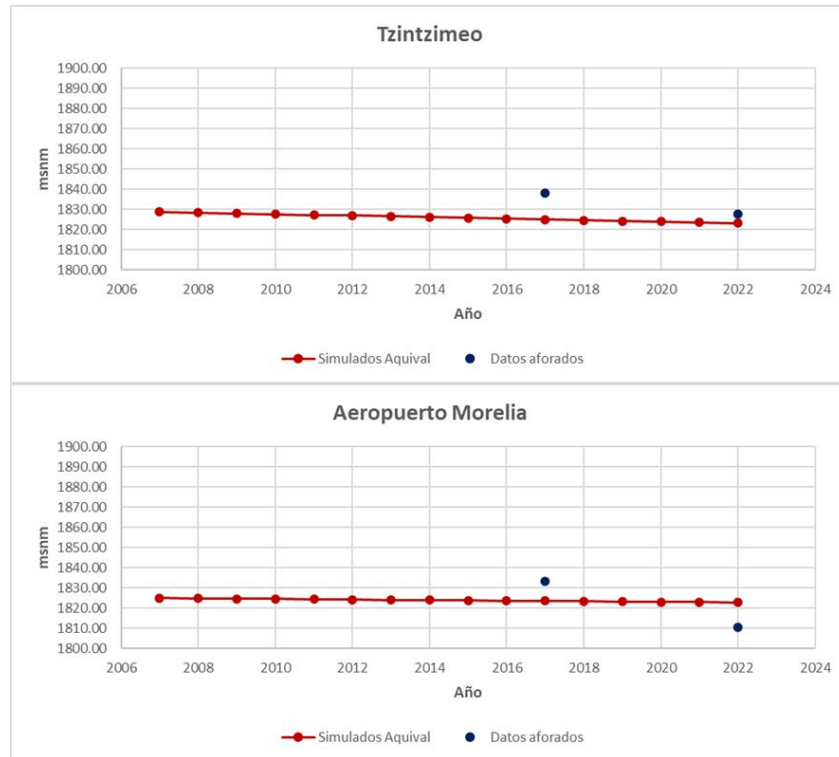


Figura 121. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 1 y 2.

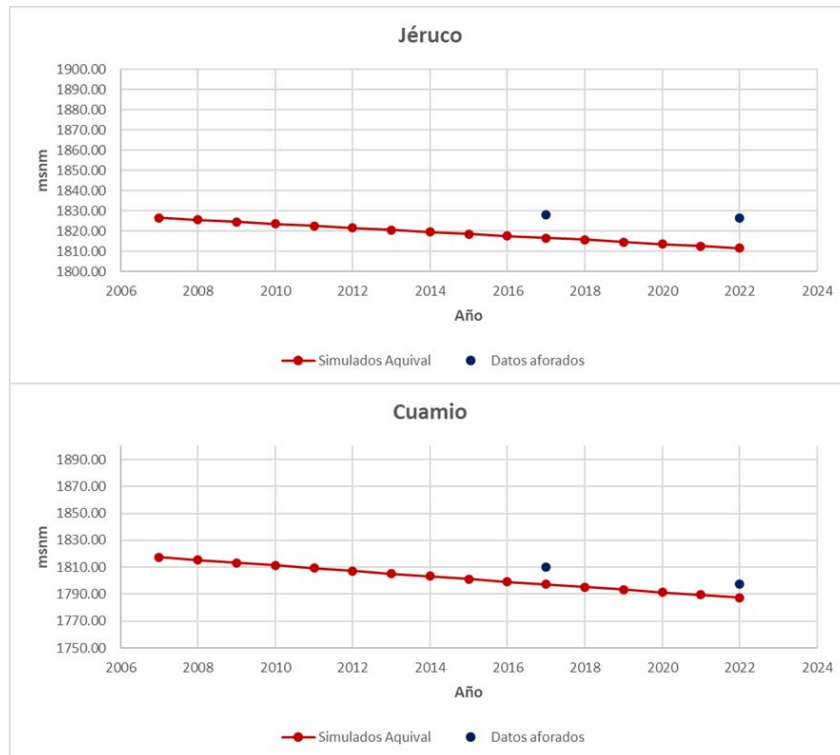


Figura 122. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 3 y 4.

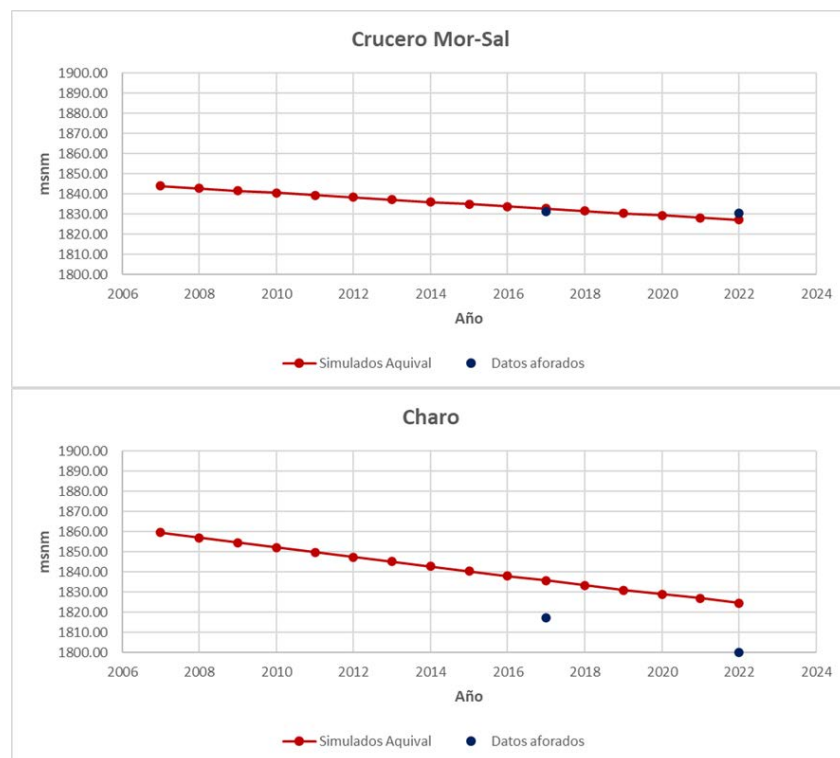


Figura 123. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 5 y 6.

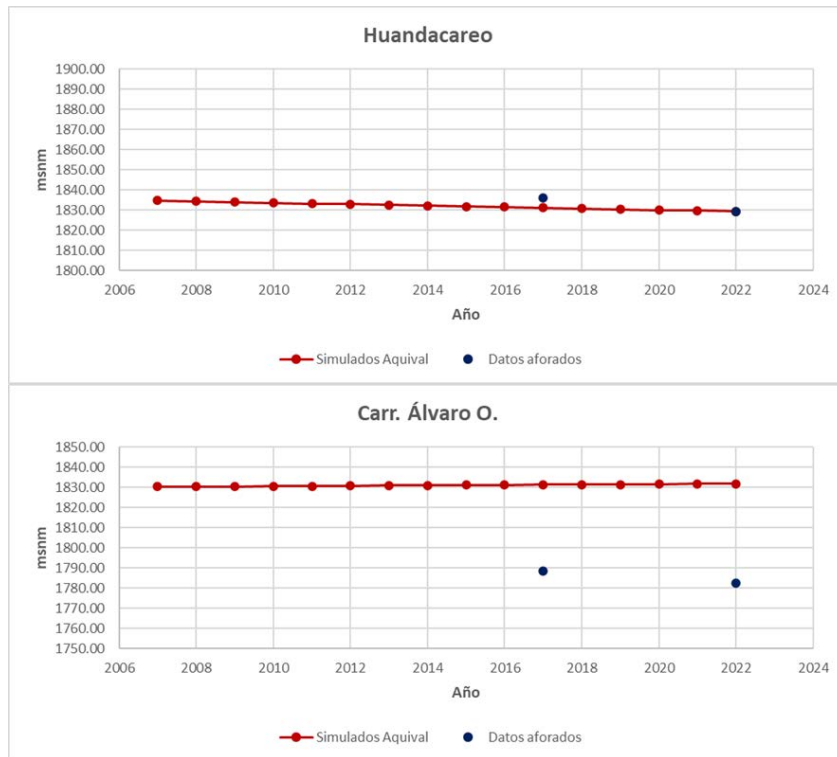


Figura 124. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 7 y 8.

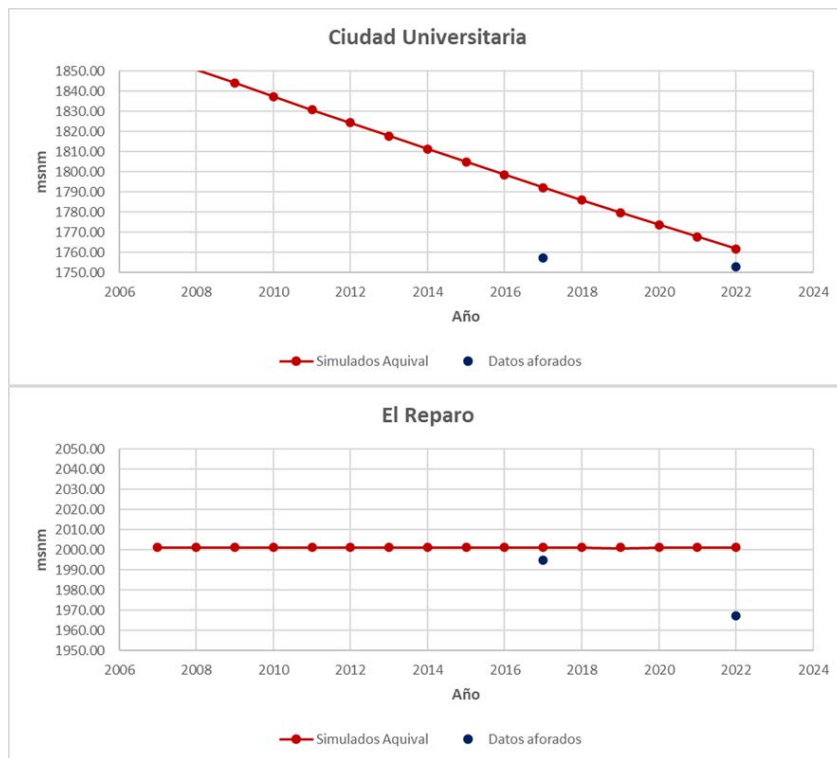


Figura 125. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 9 y 10.

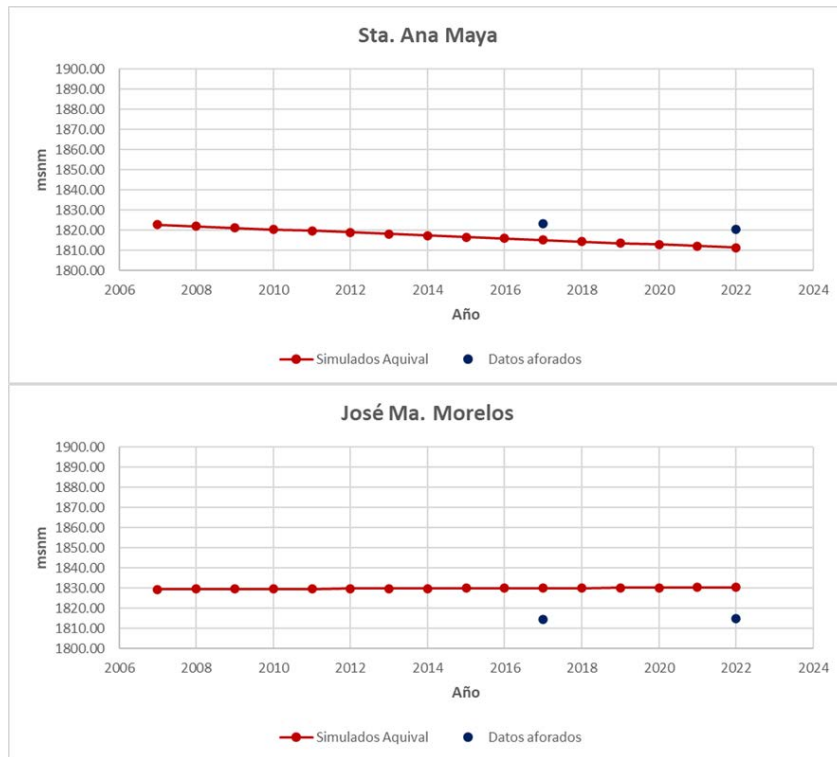


Figura 126. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 11 y 12.

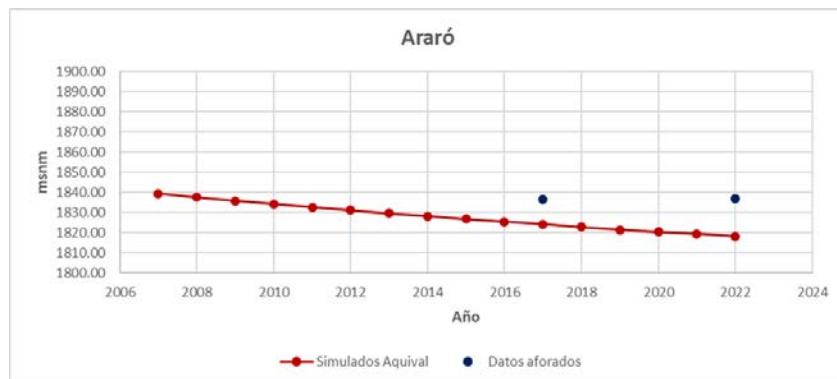


Figura 127. Comparativa de N.E. simulado y real de pozos 13 y 14

ANEXO C

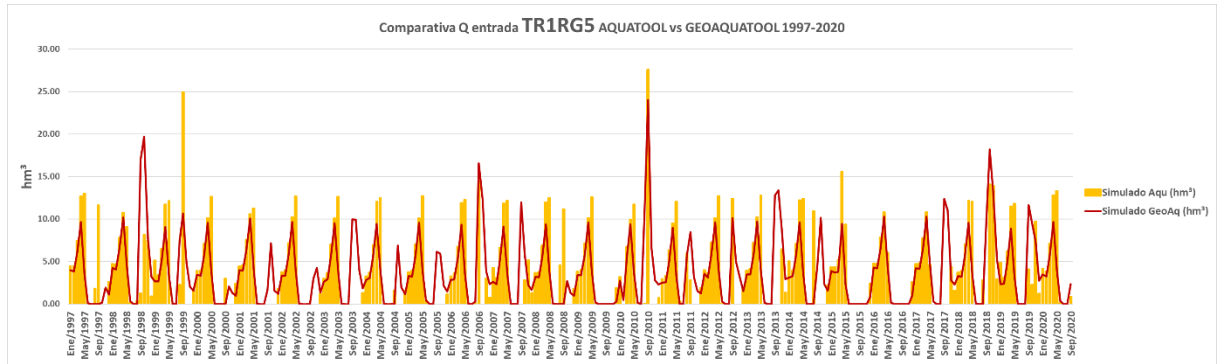


Figura 128. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Primer tramo de río aguas abajo de la Presa Cointzio. Río Grande.

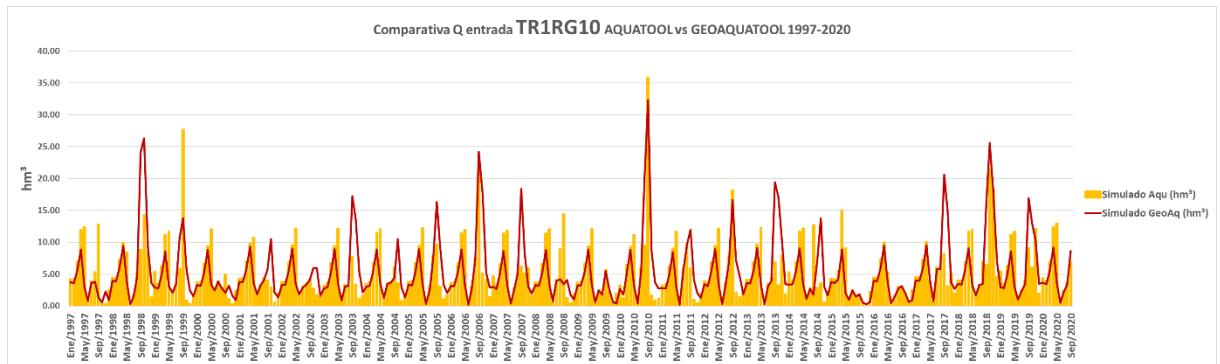


Figura 129. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río aguas abajo después de las tomas del Módulo de Riego 01. Río Grande.

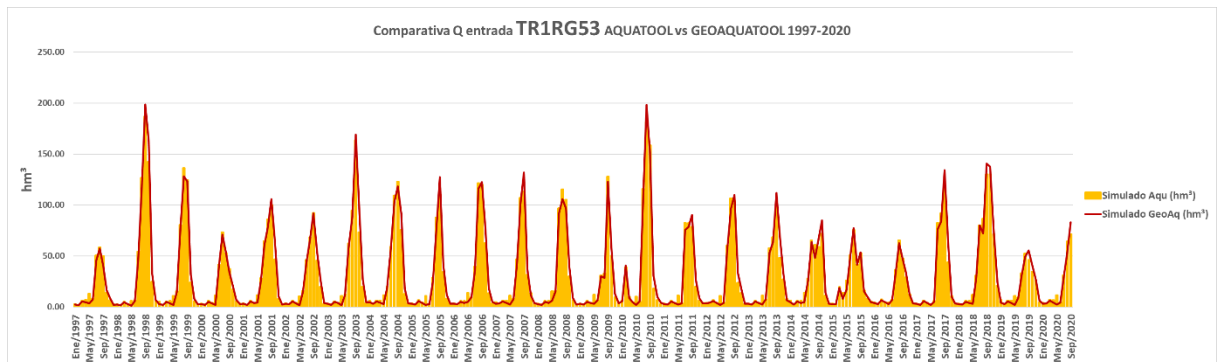


Figura 130. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río que antecede al Lago de Cuitzeo. Río Grande.

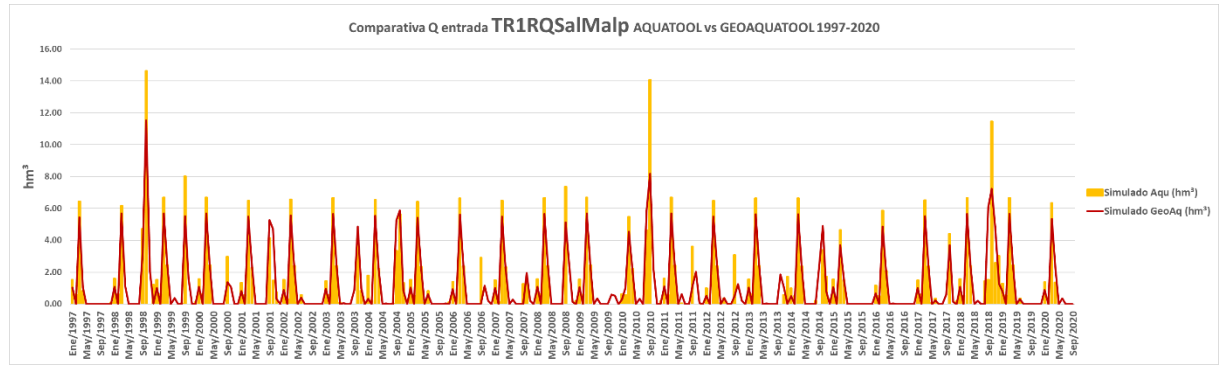


Figura 131. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río enseguida aguas debajo de la Presa Malpais. Río Queréndaro.

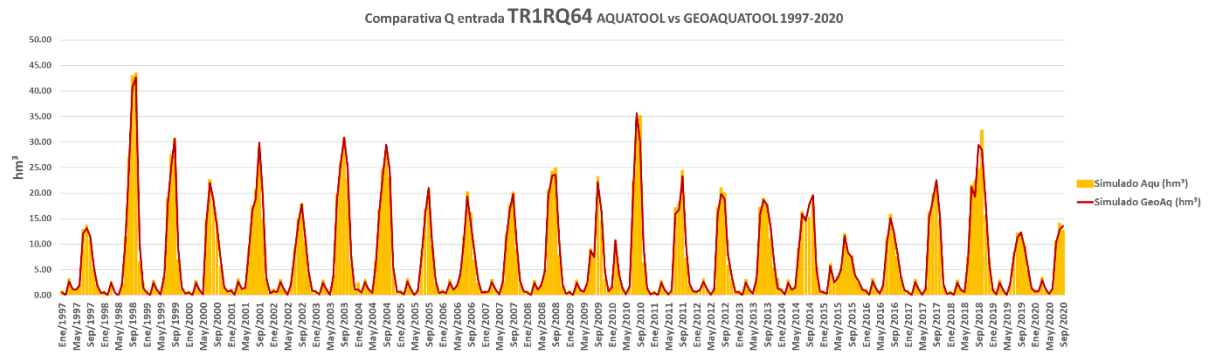


Figura 132. Comparativa Modelo diario acumulado mensual vs. Modelo Mensual. Tramo de río antes de la confluencia con Río Grande. Río Queréndaro.