



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

TRANSPORTE Y DESTINO DE ARSÉNICO EN EL
ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO POR MEDIO
DE MODELACIÓN SUBTERRÁNEA

PRESENTA:

MARÍA DEL MAR NAVARRO FARFÁN

ASESOR:

DR. MARCO ANTONIO MARTÍNEZ CINCO

CO-ASESORA:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

MORELIA, MICHOCÁN. OCTUBRE DEL 2024.



Asunto: Impresión de Tesis.

M.P.P. Venecia Azereet Medina Ortiz.
Jefe del Departamento de Titulación de la
U.M.S.N.H.

Por este medio nos dirigimos a usted de la manera más atenta para notificarle, que después de haberle dado seguimiento al desarrollo de la tesis: "TRANSPORTE Y DESTINO DE ARSÉNICO EN EL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO POR MEDIO DE MODELACIÓN SUBTERRÁNEA", después de haber revisado el manuscrito que presentó la alumna **María del Mar Navarro Farfán**, con matrícula **1116779E**, concluimos que cumple con los requisitos académicos y con lo establecido en el Reglamento General de Estudios de Posgrado para el desarrollo de su Tesis.

Por lo anterior este Comité Tutorial da el aval para su impresión final.

Director de Tesis: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco 02001403

(anteriormente)

Codirector: Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe 06000223

[Handwritten signature]

Vocales:

Dr. Horacio González Rodríguez 03003280

[Handwritten signature]

Dr. Roberto Guerra González 97003158

[Handwritten signature]

Dr. Mario Alberto Hernández Hernández 07000057

[Handwritten signature]

Atentamente.
Morelia, Michoacán a 08 de octubre de 2024.



DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO

Dr. José Apolinar Cortés

Coordinador del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química.



JAC/mcpa.



DEPARTAMENTO DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería Química - Universidad Michoacana de San Nicolás de...

Carretera 100, Morelia S.N.H. - Carretera del Oro - C.P. 58000 - Morelia, Michoacán - Tel. 4432 431 0000

http://posgrado-14.umich.mx

Para todos aquellos que se me han adelantado, porque sé que desde donde están, me miran con los ojos de amor con los que me miraron en vida.

Mamá, tía, nonno, Rocko agradezco al universo infinitamente por su existencia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero extender un agradecimiento especial al Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química, por abrirme las puertas para poder realizar mi investigación.

Al Dr. Marco Antonio Martínez Cinco, por su apoyo, comprensión y acompañamiento durante el proceso de doctorado, por creer en mí y por siempre motivarme a superarme.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por su continua exigencia, por saber llevarme al límite y siempre solicitar más de lo que yo creía que era capaz de lograr.

Al Dr. Mario Alberto Hernández Hernández, porque pese a la distancia, ha sido un pilar clave en este trabajo, por siempre estar al pendiente de mi y de mis avances y como siempre, por el gusto y el placer de trabajar con usted.

Al Dr. Horacio González Rodríguez, porque gracias a sus comentarios, el trabajo siempre ha sufrido modificaciones que han hecho que mejore y al mismo tiempo, que yo me supere.

Al Dr. Roberto Guerra González, por seguir trabajando conmigo, por su apoyo durante estos cuatro años y porque siempre estuvo interesado en mi trabajo.

A los doctores: Dr. Rafael Maya Yescas, Dr. Medardo Serna González, Dr. Agustín Jaime Castro Montoya y Dr. José Apolinar Cortés, porque sin sus enseñanzas, paciencia y confianza no podría llegar al punto en el que me encuentro. Gracias por detenerse y prestarme la atención necesaria para que aprendiera, por siempre tener una palabra de aliento para que me sintiera bienvenida en el posgrado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), por el apoyo otorgado durante el doctorado.

Gracias.

CONTENIDO

Índice de Figuras	i
Índice de Tablas	vi
Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Antecedentes	9
Estado del Arte.....	12
Planteamiento del Problema	14
Hipótesis	14
Objetivo General	14
Objetivos Particulares	14
Metodología.....	16
Bases de Datos	21
Análisis y Validación de información meteorológica e hidrométrica	22
Estaciones meteorológicas	23
Estaciones hidrométricas	27
Modelación superficial.....	30
Soil Moisture Method	30
Calibración del Modelo	35
Función objetivo e Indicadores de Bondad de Ajuste	35
Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE).....	36
Eficiencia de Nash – Sutcliffe modificada (In NSE)	37

Coeficiente de Correlación de Pearson (r)	37
Coeficiente de Simetría (CS).....	38
Mapa PGR	39
Mapa DRASTIC	40
Simulación Subterránea	41
MT3D.....	44
Ecuación de transporte.....	44
Cambio Climático	46
Resultados.....	48
Delimitación de Zona de Estudio	48
Gestión de Datos Meteorológicos e Hidrométricos.....	52
Estaciones Meteorológicas	52
Estaciones Hidrométricas.....	53
Modelación Superficial	55
Modelación Superficial Agrupada	64
Mapas de Peligrosidad	67
Mapa PGR	67
Mapa DRASTIC	71
Modelación subterránea.....	76
Muestreos en la Zona de Estudio.....	88
Análisis de Arsénico	91
Modelación subterránea del arsénico (As)	94
Cambio Climático	97

Modelación de transporte bajo efecto del cambio climático	102
Conclusiones	105
Referencias	109
Anexo A. sustento Matemático de la Validación de Estaciones.....	121
Validación y Análisis de Estaciones Meteorológicas	121
Homogeneidad.....	122
Independencia	131
Validación y Análisis de Estaciones Hidrométricas.....	133
Estaciones a Régimen Natural.....	133
Revisión Visual de las Series de Escurrimiento	134
Coeficiente de Escurrimiento.....	136
Modos en las Aportaciones.....	136
Anexo B. Información general de estaciones meteorológicas e hidrométricas	139
Anexo C. Código en R para generación de series de recarga.....	142
Anexo D. Diagramas Químicos de Representación Isotópica.....	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para el proyecto (A).....	17
Figura 2. Primera parte del esquema metodológico desarrollado para realizar las modelaciones del proyecto.....	19
Figura 3. Segunda parte del esquema metodológico desarrollado para realizar las modelaciones del proyecto.....	20
Figura 4. Diagrama general para la modelación hidrológica en zonas con escasez de información.....	23
Figura 5. Diagrama metodológico del análisis y validación de estaciones meteorológicas. ..	24
Figura 6. Esquema metodológico del análisis y validación de estaciones hidrométricas.	28
Figura 7. Modelo de tanques del SMM de WEAP.....	31
Figura 8. Representación del SMM de WEAP.	34
Figura 9. Capas temáticas utilizadas e influencia para la realización del mapa PGR.	39
Figura 10. Capas temáticas utilizadas e influencia para la realización del mapa DRASTIC. ...	41
Figura 11. Discretización del acuífero por medio de celdas, marcando filas, columnas y capas. Adaptado de (Harbaugh, 2005).....	42
Figura 12. Diagrama de árbol para la selección de escenarios con efecto del cambio climático.	47
Figura 13. Localización de la zona de estudio: Acuífero Morelia-Queréndaro.	48
Figura 14. Localización del cinturón volcánico transmexicano.....	49
Figura 15. Municipios que forman parte de la cuenca del lago de Cuitzeo.....	50
Figura 16. Localización del acuífero Morelia – Queréndaro y la distribución geográfica de los pozos de agua subterránea suministrados por el REPDA.....	51
Figura 17. Geología, fallas y fractura de la cuenca del Lago de Cuitzeo.	52

Figura 18. Volúmenes de escurrimiento y medias móviles.	55
Figura 19. Mapa de las cuencas a modelar en WEAP con los polígonos de Thiessen generados a partir de las estaciones meteorológicas.	56
Figura 20. Esquema de modelación de la cuenca 12314 en WEAP.	57
Figura 21. Esquema de modelación de la cuenca 12347 en WEAP.	57
Figura 22. Esquema de modelación de la cuenca 12415 en WEAP.	57
Figura 23. Esquema de modelación de la cuenca 12620 en WEAP.	57
Figura 24. Resultados de la modelación de la cuenca 12314.	59
Figura 25. Resultados de la modelación de la cuenca 12347.	60
Figura 26. Resultados de la modelación de la cuenca 12415.	61
Figura 27. Resultados de la modelación de la cuenca 12620.	62
Figura 28. Modelaciones en subcuencas. Serie original (a), periodo de calibración (b), periodo extendido (c) y modelación sin tratamiento (d).	63
Figura 29. División de las 12 subcuencas de modelación y localización de las 4 cuencas modeladas en WEAP.	64
Figura 30. Esquema metodológico de la modelación agrupada en WEAP.	65
Figura 31. Mapa de Hidrogeología para el mapa PGR.	68
Figura 32. Mapa de Densidad de Fallas Geológicas para el mapa PGR.	68
Figura 33. Mapa de Tipo de Suelo para el mapa PGR.	68
Figura 34. Mapa de Uso de Suelo para el mapa PGR.	68
Figura 35. Mapa de Densidad de Drenaje para el mapa PGR.	69
Figura 36. Mapa. de Pendiente para el mapa PGR.	69
Figura 37. Mapa de Precipitación para el mapa PGR.	69

Figura 38. Mapa de potenciales zonas de recarga (PGR) en el acuífero Morelia – Queréndaro.	71
Figura 39. Mapa de Profundidad de Nivel Estático (D) para el mapa DRASTIC.	72
Figura 40. Mapa de Recarga Natural (R) para el mapa DRASTIC.	72
Figura 41. Mapa de Profundidad de Medio Acuífero (A) para el mapa DRASTIC.	72
Figura 42. Mapa de Tipo de Suelo (S) para el mapa DRASTIC.	72
Figura 43. Mapa de Topografía (T) para el mapa DRASTIC.	73
Figura 44. Mapa de Medio Geológico (I) para el mapa DRASTIC.	73
Figura 45. Mapa de Profundidad de Conductividad Hidráulica (C) para el mapa DRASTIC. ..	73
Figura 46. Mapa DRASTIC en el acuífero Morelia – Queréndaro.....	75
Figura 47. Mapa de PGR – DRASTIC en el AMQ con presencia de arsénico y relleno sanitario.	76
Figura 48. Estado de las celdas de modelación en MODFLOW.....	78
Figura 49. Recarga distribuida por cuencas de modelación.	79
Figura 50. Valor del mapa PGR para cada cuenca.	80
Figura 51. Distribución de la geología en la zona.	81
Figura 52. Distribución de los pozos de extracción de acuerdo con la malla utilizada.	82
Figura 53. Distribución de los manantiales en la zona.	83
Figura 54. Elevaciones del modelo digital de elevaciones al centro de cada celda.	84
Figura 55. Elevación del nivel estático inicial.....	84
Figura 56. Niveles estáticos del año 2007.	85
Figura 57. Calibración de niveles piezométricos.	86
Figura 58. Variación de los niveles piezométricos en los diferentes periodos de tiempo.	86
Figura 59. Niveles estáticos del año 2022.	88

Figura 60. Interpolación de la elevación de niveles estáticos (2007).	89
Figura 61. Zonas de interés para la modelación de arsénico.	92
Figura 62. Variación de las concentraciones de As ($\mu\text{g/L}$).	93
Figura 63. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2017. ..	94
Figura 64. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2018. ..	95
Figura 65. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2019. ..	95
Figura 66. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2020. ..	96
Figura 67. Secuencia de Cheboratev obtenida a partir de los muestreos de agua en la zona.	97
Figura 68. Código de colores para los MCG.....	97
Figura 69. Variación de precipitación para los diferentes escenarios de cambio climático... ..	98
Figura 70. Variación de temperatura para los diferentes escenarios de cambio climático. ..	99
Figura 71. Variación de la percolación hacia el acuífero bajo los diferentes escenarios de cambio climático.	101
Figura 72. Variación de los niveles piezométricos bajo el efecto del cambio climático.	102
Figura 73. Variación de la concentración de arsénico en el año 2017.	103
Figura 74. Variación de la concentración de arsénico en el año 2018.	103
Figura 75. Variación de la concentración de arsénico en el año 2019.....	104
Figura 76. Variación de la concentración de arsénico en el año 2020.	104
Figura 77. Representación de la prueba de Curva Masa Doble.....	125
Figura 78. Series cronológicas con varios tipos de componentes determinísticas.....	135
Figura 79. Relación sobre los parámetros obtenidos con los aforos en las cuencas.	138
Figura 80. Diagrama de Piper.	144
Figura 81. Zonas delimitadas por el diagrama de Piper (<i>Diagrammes</i> , 2014).....	145

Figura 82. Diagrama de Cationes.	146
Figura 83. Diagrama de Aniones	146
Figura 84. Diagrama de Schöeller.....	147
Figura 85. Diagrama de Stabler.	148
Figura 86. Diagrama de Stiff.	149
Figura 87. Diagrama de Chadha.	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Revisión bibliográfica, estado del arte de la zona de estudio.....	12
Tabla 2. Revisión bibliográfica, estado del arte de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicas en la zona de estudio.	13
Tabla 3. Calidad de ajuste con los diferentes indicadores de ajuste. Adaptado de (Moriasi et al., 1983, 2007).	38
Tabla 4. Coeficiente de escurrimiento y módulo relativo de las estaciones hidrométricas seleccionadas.....	54
Tabla 5. Errores en la evapotranspiración, comparando el método de Thorthwaite y calculados por WEAP.....	58
Tabla 6. Resultados de los indicadores de bondad de ajuste de la modelación superficial..	62
Tabla 7. Distribución de las 12 subcuencas en las 5 zonas de modelación agrupada.	64
Tabla 8. Estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación superficial en WEAP.....	65
Tabla 9. Balance hídrico de las 12 subcuencas de modelación.	66
Tabla 10. Valores de reclasificación para la realización del mapa PGR.....	69
Tabla 11. Valores de reclasificación para la realización del mapa PGR.....	74
Tabla 12. Parámetros hidrogeológicos presentes en la zona de estudio.....	80
Tabla 13. Niveles y errores en la modelación subterránea tradicional.....	87
Tabla 14. Niveles y errores en la modelación subterránea tradicional.....	87
Tabla 15. Variación de la profundidad de los niveles en pozos de la zona (m).....	88
Tabla 16. Resultados de arsénico en los muestreos del 2022.	90
Tabla 17. Información obtenida en campo.....	91
Tabla 18. Variación en porcentaje de la percolación del acuífero bajo diferentes escenarios de cambio climático.	99

Tabla 19. Rangos de cambios permitidos para la prueba de Secuencias, según el número de datos.	123
Tabla 20. Valores de significancia para los valores de la Distribución de la t de Student y Cramer.....	126
Tabla 21. Valores críticos del número de secuencias en el test de Wald-Wolfowitz, para muestras pequeñas.....	129
Tabla 22. Probabilidades asociadas ' p ' auxiliares en la prueba de Wald-Wolfowitz.....	130
Tabla 23. Estaciones seleccionadas y que se utilizarán para la modelación superficial.	139
Tabla 24. Resultados de las pruebas de consistencia en las estaciones meteorológicas.....	140
Tabla 25. Resultados de las pruebas de homogeneidad y persistencia para las estaciones hidrométricas.....	141

RESUMEN

El agua es uno de los recursos más importantes para el ser humano, éste se ve degradado por la presencia de contaminantes como es el caso del arsénico. El arsénico es un elemento que, aunque sea en pequeñas concentraciones genera enfermedades que pueden ser crónicas o mortales y es por ello por lo que es tan importante conocer los sitios en los cuales se puede encontrar el contaminante y en qué concentraciones llegará a presentarse.

Por medio de un modelo de simulación subterráneo se pueden conocer las direcciones de flujo que tendrá el agua y así, el transporte y destino del arsénico en el medio hidrogeológico.

Para lograr la modelación subterránea se tuvo que realizar una modelación superficial a través del Método de Humedad del Suelo (SMM) en WEAP, que permitiera conocer las recargas hacia el acuífero; además se realizaron mapas de vulnerabilidad a la contaminación (DRASTIC) y de potenciales zonas de recarga (PGR). El modelo subterráneo fue realizado por medio del modelo MODFLOW y, para el transporte del arsénico se utilizó el módulo MT3D en MODFLOW.

En el caso de estudio del acuífero Morelia – Queréndaro (AMQ), se observan direcciones de flujo que van hacia el centro del acuífero. En la porción del municipio de Morelia se tienen flujos regionales con dirección noreste, lo que en el caso del arsénico es importante debido a que lleva arsénico, producto de lixiviados en el basurero municipal hacia la zona norte de la ciudad de Morelia.

En el AMQ se tiene arsénico por procesos geogénicos y antropogénicos; este arsénico viaja en el medio subterráneo difundiéndose a lo largo del acuífero y contaminándose así, sitios que no tenían presencia del elemento; este proceso es aún más crítico cuando se realiza la modelación bajo el efecto del cambio climático.

Palabras clave: acuífero, concentraciones, arsénico, modelación subterránea, direcciones de flujo.

ABSTRACT

Water is one of human beings' most important resources; contaminants such as arsenic degrades it. Arsenic is an element that, even in small concentrations, generates diseases that can be chronic or fatal and that is why it is so important to know the sites where the contaminant can be found and in what concentrations it will be present.

Using a groundwater simulation model, it is possible to know the flow directions that the water will have and thus, the transport and destination of arsenic in the hydrogeological environment.

To achieve groundwater modeling, it was necessary to perform surface modeling through the Soil Moisture Method (SMM) in WEAP, which would allow knowing the recharge to the aquifer; in addition, maps of vulnerability to contamination (DRASTIC) and potential recharge zones (PGR) were made. The groundwater model was created using the model MODFLOW and, for arsenic transport, the MT3D module was used in MODFLOW.

In the Morelia- Queréndaro aquifer (AMQ) study, flow directions are observed towards the center of the aquifer. In the portion of the municipality of Morelia, there are regional flows in a northeast direction, which in the case of arsenic is important because it carries arsenic, a product of leachates from the municipal landfill to the northern part of the city of Morelia.

Arsenic is present in the AMQ due to geogenic and anthropogenic processes; this arsenic travels in the subway environment, diffusing along the aquifer and thus contaminating sites that had no presence of the element; this process is even more critical when modeling is carried out under the effect of climate change.

Keywords: aquifer, concentrations, arsenic, groundwater modeling, flow directions.

INTRODUCCIÓN

La escasez mundial del agua es una crisis que se encuentra en crecimiento. Cerca de 1 200 millones de personas viven en zonas con escasez física de agua y, alrededor de 1 600 millones de habitantes tienen escasez económica de agua. Hay países que carecen de la infraestructura necesaria para transportar agua de cuerpos de agua superficiales y subterráneos (PNDU, 2006).

Según SEMARNAT (2018) aproximadamente el 39% del agua utilizada para uso consuntivo en México proviene de las aguas subterráneas, es por ello por lo que se debe de tener especial cuidado con la calidad del agua que se proporciona a los usuarios. Junto con la calidad de agua, se debe de tener conocimiento de la disponibilidad hídrica que se tiene en los ríos, lagos y acuíferos. Los acuíferos son entonces, motivo de interés debido a que un 38% de los acuíferos de México se encuentran en estado de sobreexplotación y un otros tienen problemas de contaminación (Sandoval Rodríguez, 2022).

Por otro lado, la posible reducción de disponibilidad de agua debido al efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos, aunado con el reto del manejo urbano del agua frente al crecimiento demográfico, ha orillado a buscar una mejora en la gestión actual del recurso hídrico, tanto en calidad como en cantidad.

Para entender el comportamiento de los acuíferos y determinar la relación existente entre la hidrología superficial y subterránea, se deben realizar modelaciones matemáticas, las cuales están supeditas a la disponibilidad de información con la que se cuenta para obtener la estructura de modelación (Triviño Pérez & Ortiz Rojas, 2004).

Uno de los principales problemas que se tienen con respecto al recurso hídrico en el país es que no se cuenta con información suficiente para realizar modelaciones tanto superficiales como subterráneas y aún menos, información sobre calidad del agua y patrones de flujo subterráneo con diferentes compuestos potencialmente tóxicos. Otro de los problemas importantes que se presentan se debe a que las diferentes fuentes de información cuentan

con diferencias importantes en los datos y esto, genera incertidumbre en los estudios realizados.

Para enfrentar este tipo de complicaciones en las modelaciones, se debe realizar una base de datos integral que cuente con la suficiente información necesaria para realizar las modelaciones superficiales y subterráneas. Estos datos deben pasar por una rigurosa y sistemática revisión para que sean fiables al ser utilizadas (Navarro-Farfán et al., 2024b).

La modelación hidrológica en cuencas con escasez e incertidumbre en los datos es una realidad (Arellano-Lara & Escalante-Sandoval, 2014); si bien se deben tomar en cuenta todas las complicaciones que ello conlleva, se puede realizar con periodos de calibraciones y simulaciones sumamente cortos, 4 y 2 años para calibración y validación respectivamente (Ang & Oeurng, 2018).

Según Hammer y Kadlec (1986), desde 1986 trabajándose he trabajado con las mismas series de datos, considerando periodos máximos de 13 años y peor aún, sin actualización. De acuerdo a la literatura, de forma general, se tienen los periodos de modelación utilizados oscilan entre los 15 y los 20 años (Bazzi et al., 2021; Dehghanipour et al., 2019; Khoshkhou et al., 2015; Lerat et al., 2020; Nazeer et al., 2022), sin embargo; es posible realizar modelaciones con periodos más cortos que van desde los 6 años hasta los 15 años (Goshime et al., 2021) o, en el mejor de los casos, con periodos de validación extensos (Adla et al., 2019; García-Romero et al., 2019; Lakshmi & Sudheer, 2021; Schuol et al., 2008) que incluyen periodos de validación y calentamiento adicional a los de validación; así como modelaciones por periodos completos o discontinuos (Zhang et al., 2011).

De acuerdo con Dehghanipour et al., (2019), una correcta modelación debe considerar un periodo de calentamiento, calibración y posterior validación (García-Romero et al., 2019), con al menos 10 años para cada etapa.

El cambio en el uso de suelo produce un cambio en los patrones de recarga asociados al ciclo hidrológico (Guerrero-Morales et al., 2020); esto a su vez, se encuentre ligado con el

incremento poblacional (Cook et al., 2022). Los modelos subterráneos son importantes para poder entender el comportamiento de los acuíferos y así, poder tomar decisiones en la planificación y gestión del recurso hídrico. Esto aún en zonas con escasez de información (Cook et al., 2022; Fotovat et al., 2019; Uchenna et al., 2023) e incluso, sequías (Alsevavni & Almohseen, 2017).

Algunos modelos subterráneos son utilizados para obtener información de los niveles piezométricos en los acuíferos (Chen et al., 2017; Khadri & Pande, 2016), que comúnmente se utiliza para conocer los cambios del volumen almacenado en el acuífero a través del tiempo; además se estudian los flujos regionales (Ochoa-González et al., 2015) y se consideran las posibles zonas de recarga y descarga (Sánchez-San Román, 2017)

Con respecto a los métodos de calibración del modelo subterráneo se puede plantear por medio de comparativa entre los procesos de flujos regionales y sus direcciones en el acuífero (Khadri & Pande, 2016; Ochoa-González et al., 2015), niveles piezométricos (Chen et al., 2017; Hughes et al., 2022; Khadri & Pande, 2016) y por la evapotranspiración (Hughes et al., 2022); también se considera la calibración por medio de volúmenes en manantiales (Uchenna et al., 2023) . Para la calibración de la modelación subterránea se modifican los parámetros hidrogeológicos del medio, en este caso, el parámetro que más influye en el proceso de calibración y limita la variación de los niveles piezométricos es la conductividad hidráulica 'k' (Jafari et al., 2021).

Uno de los elementos más importantes en la investigación es la representación de la recarga como componente de entrada al modelo subterráneo (Navarro-Farfán et al., 2024a). Generalmente la recarga se obtiene como una lámina de agua distribuida a lo largo del acuífero de forma homogénea, lo cual se considerará como recarga tradicional; la cual puede considerar el efecto de cambio climático (Abbas et al., 2022), retornos por riego (El Moneam, 2023) o incluso, variaciones temporales en las infiltraciones (El Moneam, 2023; Fotovat et al., 2019).

Cuando hay zonas en donde hay variabilidad importante entre el uso y el tipo de suelo, la recarga realmente no es homogénea y es por ello por lo que se propone el uso del mapa PGR como base de la ponderación de la recarga misma (Navarro-Farfán et al., 2024a).

Si bien la disponibilidad hídrica subterránea disminuye cada día, la concentración de los electrolitos y metales pesados presentes en el medio subterránea puede aumentar; sin embargo, conocer la concentración de arsénico de forma puntual no es suficiente, por lo que es importante conocer el comportamiento advectivo y difusivo, así como el alcance que tienen los contaminantes en el medio subterráneo.

Existen efectos adversos en la salud conocidos desde hace mucho tiempo, debido a la exposición de arsénico que, a pesar de los numerosos esfuerzos por disminuir la contaminación ambiental, la exposición a los mismos continúa, y las concentraciones continúan incrementándose en algunos lugares del mundo y en particular en ciudades en vías de desarrollo (Nava-Ruiz & Méndez-Armenta, 2011).

La constante exposición al As puede generar problemas en la salud como problemas de piel, cáncer (pulmón, vejiga, riñón) problemas vasculares, melanosis, hiperqueratosis, gangrena, diabetes, leucemia, arteriosclerosis, angiosarcoma, malformaciones congénitas, feto toxicidad, cirrosis, anemia, arritmias, pérdida auditiva, hiperqueratosis y bronquitis crónica; incluso, la exposición crónica a bajas concentraciones de As genera glomerulopatía y daño tubular (Hernández-Mena et al., 2021; Torres et al., 2019).

El agua de los acuíferos se puede ver deteriorada por la presencia de arsénico (Sikdar & Chakraborty, 2017). Existen principalmente dos tipos de presencia de Arsénico: i) proveniente de procesos Naturales (volcanes y disolución) y, ii) por procesos antropogénicos (minería, industrial y pesticidas) (Osuna-Martínez et al., 2021).

Existen mapas que presentan la posible distribución de As en LATAM (López et al., 2012) y en México (Osuna-Martínez et al., 2021) de acuerdo a las características geológicas que se tienen en la zona; es importante mencionar que las concentraciones de los elementos

presentes en el agua fluctúan en el tiempo (Rodríguez-Cantú et al., 2022) y no se mantienen estáticas debido a los procesos de disolución y a las variaciones en los procesos de precipitación (Israde-Alcantara et al., 2005; Sikdar & Chakraborty, 2017), infiltración y percolación hacia el acuífero.

El arsénico puede estar presente como producto de procesos geogénicos (López et al., 2012) y termales (Osuna-Martínez et al., 2021), lo cual está altamente relacionado con zonas geotérmicas y con presencia de vulcanismo (López et al., 2012); en México, una de las principales zonas geotérmicas se localiza en las inmediaciones del cinturón volcánico transmexicano (Peter Birkle et al., 2010; López et al., 2012; Yin et al., 2022), en donde se tiene presencia de arsénico por medio de la disolución de las rocas (Hernández-Mena et al., 2021; López et al., 2012; Rodríguez-Cantú et al., 2022).

Además, se tiene que la presencia de As se relaciona con las rocas ígneas ácidas y que, al mismo tiempo puede estar relacionada con la presencia de F y pH bajos (Hernández-Mena et al., 2021; Osuna-Martínez et al., 2021; Rodríguez-Cantú et al., 2022) y temperaturas elevadas. La migración de As en el acuífero es más lenta que el agua y las concentraciones pueden variar por procesos de sorción, dilución y retardo (Sikdar & Chakraborty, 2017).

De forma particular, el acuífero en estudio tiene la particularidad de estar inmerso en geologías que favorecen la recarga hídrica y esto mismo, tiene relación con las elevadas concentraciones de As (Hernández-Mena et al., 2021; Israde-Alcantara et al., 2005; López et al., 2012; Rodríguez-Cantú et al., 2022; Villalobos-Castañeda et al., 2010).

Además de el conocimiento de la traza del arsénico en el acuífero, es necesario entender el comportamiento bajo diferentes condiciones; es por ello por lo que se vuelve importante conocer las variaciones en los patrones de clima que se tendrán en los siguientes años. Ante ello, se propone la aplicación de modelos y métodos para simular las variaciones temporales de arsénico bajo escenarios de cambio climático (Yin et al., 2022).

Los escenarios de cambio climático representan los desequilibrios energéticos impuestos sobre el sistema climático como radiación solar, emisiones volcánicas, gases efecto invernadero (GEI), etc. Y, para el caso particular de la zona se utilizan los cuatro modelos presentados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Fernández Eguiarte et al., 2015), bajo los diferentes periodos (cercano, mediano y largo).

Existe una urgencia en la demanda por un recurso seguro subterráneo y para ello, se debe evaluar el efecto de parámetros hidrogeológicos y meteorológicos en el transporte de arsénico (Sathe & Mahanta, 2019). Adicional a ello, se tiene que el modelo subterráneo es base para determinar el comportamiento de las aguas, mostrando los flujos regionales, que a su vez son validados por la evolución del flujo subterráneo por medio de la secuencia de Cheboratev (Tóth, 1963).

ANTECEDENTES

El acuífero Morelia – Queréndaro no ha sido lo suficientemente estudiado, se tiene un vago conocimiento sobre las direcciones del acuífero y menos aún entendimiento sobre el transporte de algunos contaminantes que son potencialmente tóxicos para los humanos.

En la porción del municipio de Morelia, el sustrato se conforma de basaltos fracturados y materiales con alta porosidad y permeabilidad (González-Arqueros et al., 2021; Israde-Alcantara et al., 2005), así como un intenso sistema de fallas y fracturas (Israde-Alcantara et al., 2005), lo cual se contrapone a lo solicitado para un tiradero, donde generalmente se necesitan materiales arcillosos que impidan la percolación de los lixiviados generados en el sitio (Rodríguez-Cantú et al., 2022). Se sugiere que las concentraciones de As provienen de los lixiviados del tiradero y posteriormente, se tiene una dispersión en el acuífero (González-Arqueros et al., 2021). Estos lixiviados aumentan en la época de lluvias debido que se tiene un aumento en la humedad del basurero (González-Arqueros et al., 2021).

Así mismo, en la zona de Zinapécuaro y Araró se tienen sitios con capacidad de transporte de arsénico, ya que son aluviales cuaternarios y sedimentarios deltaicos, donde la heterogeneidad y anisotropía son importantes (Osuna-Martínez et al., 2021).

La CONAGUA (2023a), realizó un estudio publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) acerca de la actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Morelia – Queréndaro (1602), estado de Michoacán; en donde se muestran los parámetros más importantes del acuífero, así como información sobre fallas, geología, topografía, etc.; sin embargo, la información se encuentra desactualizada, ya que la información original data del año 2009 y al no contener información referenciada en algún sistema de coordenadas, resulta prácticamente imposible poder replicar la información del proyecto.

Otros autores muestran información sobre algunos de los contaminantes en la zona de estudio; se cuenta con concentraciones de arsénico en la porción de Zinapécuaro (Rodríguez-Cantú et al., 2022), donde se presentan concentraciones hasta nueve veces por encima de lo

establecido por la normativa oficial mexicana (Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021).

También se establece que las direcciones de flujo en el acuífero sufren perturbaciones por la extracción desmedida del recurso hídrico subterráneo, en donde se encuentran en los análisis químicos flúor, nitritos y nitratos; además, se menciona el decremento del nivel freático de aproximadamente 34 m en algunos pozos (Pérez-Villareal et al., 2018).

Garduño Monroy y colaboradores (2012) publicaron un artículo donde se consideran las principales características conforme a la geología de la ciudad de Morelia; si bien es un trabajo completo donde consideran temas de contaminación y sobreexplotación, no cuenta con información de arsénico, además de que el estudio se centra únicamente en la localidad de Morelia.

De acuerdo con el Plan de Gestión Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo (CONAGUA, 2009) se tiene que el aprovechamiento subterráneo se ha convertido en la mayor fuente de abastecimiento para los diversos usos en la cuenca e incluso a nivel regional, al contar con prácticamente el doble de fuentes en comparación a las de origen superficial destinadas para satisfacer las demandas de recurso; de manera general, el balance de volúmenes concesionados y explotados de origen superficial en la cuenca se presenta como sobre explotado, debido a la existencia de una gran diferencia concentrada en tres de los usos: público urbano, servicios e industrial, siendo éste último uso el más crítico al tener solo 8 aprovechamientos, con una demanda muy por encima de la concesionada.

En 2007, se publicó un estudio que tuvo como objetivo, evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona; en él, no se cuenta con información sobre la calidad del agua, pero se dieron a conocer las condiciones actuales de explotación del agua subterránea y funcionamiento hidrogeológico del acuífero Morelia-Queréndaro, con el objeto de que sirviera de herramienta, para proponer las políticas de explotación adecuadas y estar en condiciones de realizar un mejor aprovechamiento del recurso subterráneo (IMTA, 2007).

Se tiene información sobre los lixiviados que percolan hacia el acuífero Morelia – Queréndaro; el basurero de la ciudad de Morelia fue abierto en 1997 sin control de gases o lixiviados, el sustrato son basaltos fracturados y materiales con alta porosidad y permeabilidad (Israde-Alcantara et al., 2005), (este no ha sido catalogado como relleno sanitario debido a algunas deficiencias) en donde se reciben 678 ton de residuos sólidos urbanos diariamente y en cuyo sitio se generan lixiviados con concentraciones elevada de As y algunos metales pesados como Pb, Cu, Ni, Zn, Cr, Fe (González-Arqueros et al., 2021; Israde-Alcantara et al., 2005).

ESTADO DEL ARTE

Para el estado del arte, se considera la información de la zona de estudio (Tabla 1) y de las concentraciones (Tabla 2) que hay según los estudios publicados dentro de ella.

Tabla 1. Revisión bibliográfica, estado del arte de la zona de estudio.

AUTOR	AÑO	NOMBRE	APORTE
CONAGUA	(2023)	Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán.	Se tiene información importante de los niveles piezométricos del año 2007, los cuales son datos base para la modelación en MODFLOW, como valores de niveles estáticos iniciales.
Hernández Hernández, et al.	(2021; 2022)	Medición de parámetros físico - químicos del agua subterránea de la ciudad de Morelia	En este trabajo, se tiene información de 76 pozos en la ciudad de Morelia, aún no se tienen resultados de los análisis de laboratorio.
Pérez Villarreal, et al.	(2018)	Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán.	Este artículo proporciona algunos valores de aniones y cationes en la zona de estudio; sin embargo, no se muestra información de arsénico.
Alvarado Pérez & Lucas Urbina	(2017)	Medición de Niveles estáticos en el AMQ	Medición de niveles estáticos en el año 2017: esto en la zona del acuífero Morelia – Queréndaro, esta información será útil para la modelación subterránea del acuífero.
Garduño Monroy, et al.	(2012)	Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio	El estudio no cuenta con información sobre los contaminantes de interés de este proyecto, además de que el estudio se centra en la localidad de Morelia, sin embargo, resulta bastante útil debido a que cuenta con información hidrogeológica de la zona de estudio.
CONAGUA	(2009)	Plan de Gestión Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo	La cuenca del Lago de Cuitzeo y el acuífero Morelia-Queréndaro, tienen una forma bastante similar, con lo que se puede decir entonces, que la información será complementaria para con el acuífero.
UMSNH	(2008)	Muestreo y calidad de agua en 7 pozos de la ciudad de Morelia	Se tiene información de 7 pozos y sobre Calcio, Magnesio, Bicarbonatos, Cloruros (dureza de calcio), Dureza total, Alcalinidad total, Sulfatos, Sodio, Potasio, Nitratos, Magnesio, SDT, Sílice, Hierro
CONAGUA	(CONAGUA, 2007)	Actualización Hidrogeológica de los acuíferos Maravatío–Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia Queréndaro y Pastor Ortiz	La última actualización del documento fue en diciembre del 2020; pero mantiene toda la información del de 2007. Sin embargo, la información base es sumamente útil.

En cuestión de concentraciones de arsénico se muestra la información en la Tabla 2, donde se muestra información en diferentes ciudades, como Los Azufres, Morelia y Araró, de agua de pozo y termal, donde se tienen concentraciones de 5 a 158 $\mu\text{g/L}$ en agua de pozo y en agua de manantial.

Tabla 2. Revisión bibliográfica, estado del arte de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicas en la zona de estudio.

AUTOR	AÑO	NOMBRE	APORTE
Hernández- Hernández, et al.	(2022)	Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las fuentes de agua potable en la Ciudad de Morelia (Michoacán México)	En este estudio se tiene la revisión de 70 pozos de agua potable, de los cuales, posteriormente se obtuvo información de 7 pozos en los cuales se observan los valores de Arsénico en la zona de estudio.
Rodríguez-Cantú, et al.	(2022)	<i>Arsenic – contaminated drinking water and associated health risks in children from communities located in a geothermal site of Michoacán, México: Monte Carlo probabilistic method.</i>	En la zona de Zinapécuaro y Araró, se tiene información de concentraciones de Arsénico, en las cuales, para el año 2018 se alcanzaron valores de hasta 92 µg/L.
Hernández-Mena et al.	(2021)	<i>GIS, Multivariate Statistics Analysis and Health Risk Assessment of Water Supply Quality for Human Use in Central Mexico</i>	Se muestran los sitios con mayor concentración en México, destacando la porción referente al cinturón volcánico transmexicano
CONAGUA	(2020)	Información general del estado de Michoacán	Es una base de datos en donde se presentan los niveles de As y de múltiples elementos potencialmente tóxicos, del estado de Michoacán y todo México, para Michoacán, sólo se cuentan con 6 sitios de muestreo.
Vázquez-Vázquez, et al.	(2015)	<i>Arsenic occurrence and water quality in recreation thermal spring at Araró, México</i>	Presenta variaciones de Arsénico en los muestreos realizados en el periodo agosto a noviembre de 2009
López et al	(2012)	<i>Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America</i>	Muestra de forma gráfica los sitios con altas concentraciones de As en Latinoamérica
Israde Alcantara, et al.	(2005)	<i>Geological Characterization and Environmental Implications of the Placement of the Morelia Dump, Michoacán, Central Mexico Isabel</i>	La modelación que se realiza con la información obtenida en este proyecto puede ser un punto de comparación para la modelación que se plantea.
Birkle & Merkel	(2000)	<i>Environmental Impact by Spill of Geothermal Fluids at the Geothermal Field of Los Azufres, Michoacán, Mexico</i>	Enfocado a producción geotérmica, pero cuenta con información de la zona, útil para las modelaciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a las deficiencias en el sistema que permitirían predecir el comportamiento del arsénico en el medio subterráneo, se requiere desarrollar una metodología que permita determinar los procedimientos que se deben realizar desde la caracterización de la zona de estudio, el procesamiento de datos, los modelos o métodos que pueden ser utilizados según la zona de estudio y el post procesamiento de resultados, de tal forma que los resultados puedan ser entregados a cualquier tercero y, que sean i) manipulables, ii) entendibles, iii) reproducibles y iv) de dominio público.

Lo anterior resulta importante debido a que actualmente no se cuenta con una adecuada gestión de información, principalmente en la calidad y la cantidad de los datos, lo que imposibilita implementar las metodologías existentes para la modelación del agua subterránea, especialmente acoplado con el transporte de arsénico, que presenta riesgos para la salud humana.

HIPÓTESIS

El transporte y destino del arsénico en el acuífero Morelia-Queréndaro pueden predecirse y validarse, incluso en zonas con escasez de información, mediante la aplicación de una metodología que incluya el preprocesamiento de datos.

OBJETIVO GENERAL

Predecir de forma confiable la traza de arsénico por medio de la modelación del mecanismo de transporte en medio poroso y agua subterránea en zonas con escasez de información.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Establecer una base de datos robusta por medio del análisis de las características del Acuífero Morelia – Queréndaro, a través de análisis y validación de información hidrometeorológica y de calidad del agua.
- Definir una red de muestreo de calidad de agua y medición de niveles piezométricos.

- Estimar la interacción del agua superficial y subterránea, por medio de un balance hídrico que involucre los procesos del ciclo hidrológico.
- Predecir la traza y concentración de arsénico por medio de la modelación de transporte de masa en el escenario actual y bajo distintos escenarios de gestión y de cambio climático.
- Identificar sitios de peligrosidad en el acuífero por medio de la generación de mapas DRASTIC y PGR.
- Proponer una metodología para disponer de criterios rigurosos y toma de decisiones para zonas con escasez de información que incluya el pre-procesamiento de datos, la modelación en conjunto y el post-procesamiento de resultados.

METODOLOGÍA

Para el establecimiento de la metodología en el proyecto, se utiliza el diagrama de flujo de la Figura 1, donde se describen las principales etapas del proyecto. También se establece el esquema metodológico (Figura 2 y Figura 3), en donde se tiene un mayor detalle con respecto a la información que se requiere y se obtiene en cada una de las etapas. La descripción de los pasos de la metodología se representa por medio de un código de colores, se tiene la parte del procesamiento de datos en amarillo, la etapa de modelación en rosa y el post procesamiento de los resultados en azul, resaltando en color verde, el desarrollo del repositorio interactivo.

La toma de decisiones con respecto a la base de datos y a las modelaciones, son la base para el desarrollo de la metodología, ya que éstas van de la mano con las carencias de los modelos con respecto a la información.

La etapa del procesamiento de datos es una parte imprescindible de cualquier tipo de proyecto de esta índole, debido a que es en dónde se realizan las pruebas para validar el uso de la información y así, disminuir los errores aleatorios, sistemáticos y de negligencia. De esta forma, aseguramos que los datos ingresados a los modelos son correctos y así, se tienen calibraciones más simples y resultados más confiables.

Para la modelación superficial, se utilizará el software WEAP, donde se aplica el método de humedad del suelo (*Soil Moisture Method*, por sus siglas en inglés SMM); la modelación subterránea se realizará por medio de la resolución de la ecuación de flujo subterráneo planteada en diferencias finitas, aplicada en el código de MODFLOW-2005, en el software *Processing MODFLOW*. El transporte de contaminantes se modelará mediante la herramienta MT3D acoplada en el código MODFLOW-2005, la cual permite la simulación del transporte advectivo de solutos y el transporte reactivo de solutos.

Por último, la etapa de post procesamiento de resultados es útil para comprender mejor los resultados de las modelaciones, se trabaja con mapas de peligrosidad que muestran las zonas con cierta vulnerabilidad, ya sea por altas concentraciones del transporte del contaminante o por el descenso del nivel freático; de esta forma, se puede llegar a tener un entendimiento claro con respecto a lo que sucede en el acuífero.

También se realizan mapas interactivos que se almacenan en un repositorio interactivo.

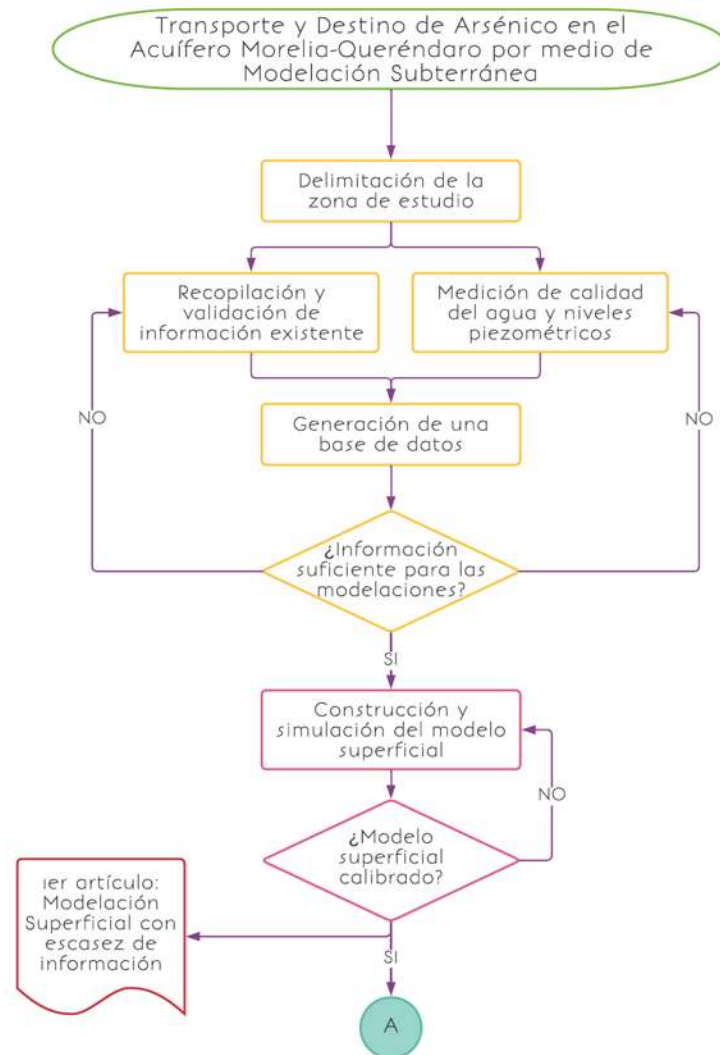


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para el proyecto (A).

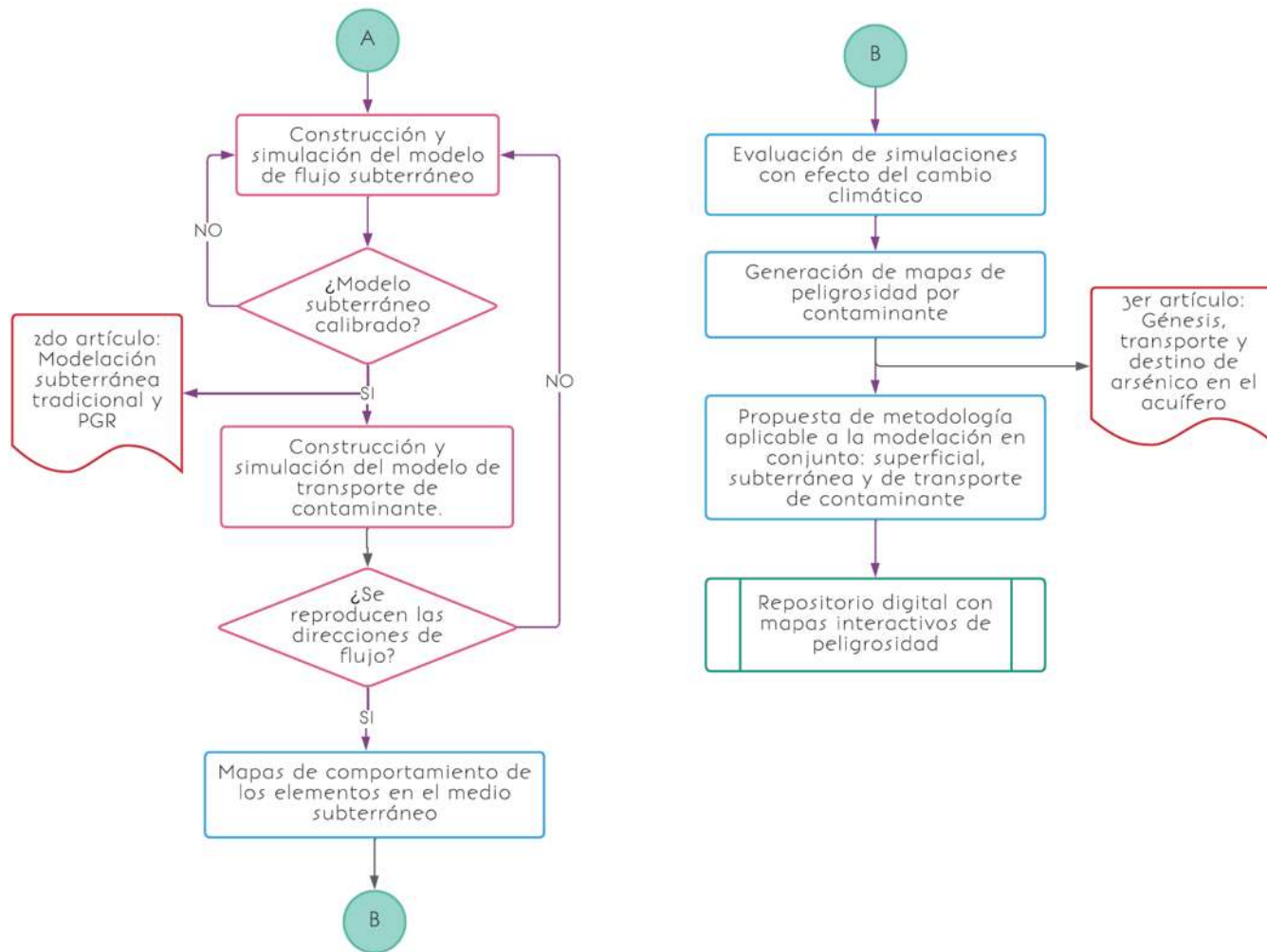
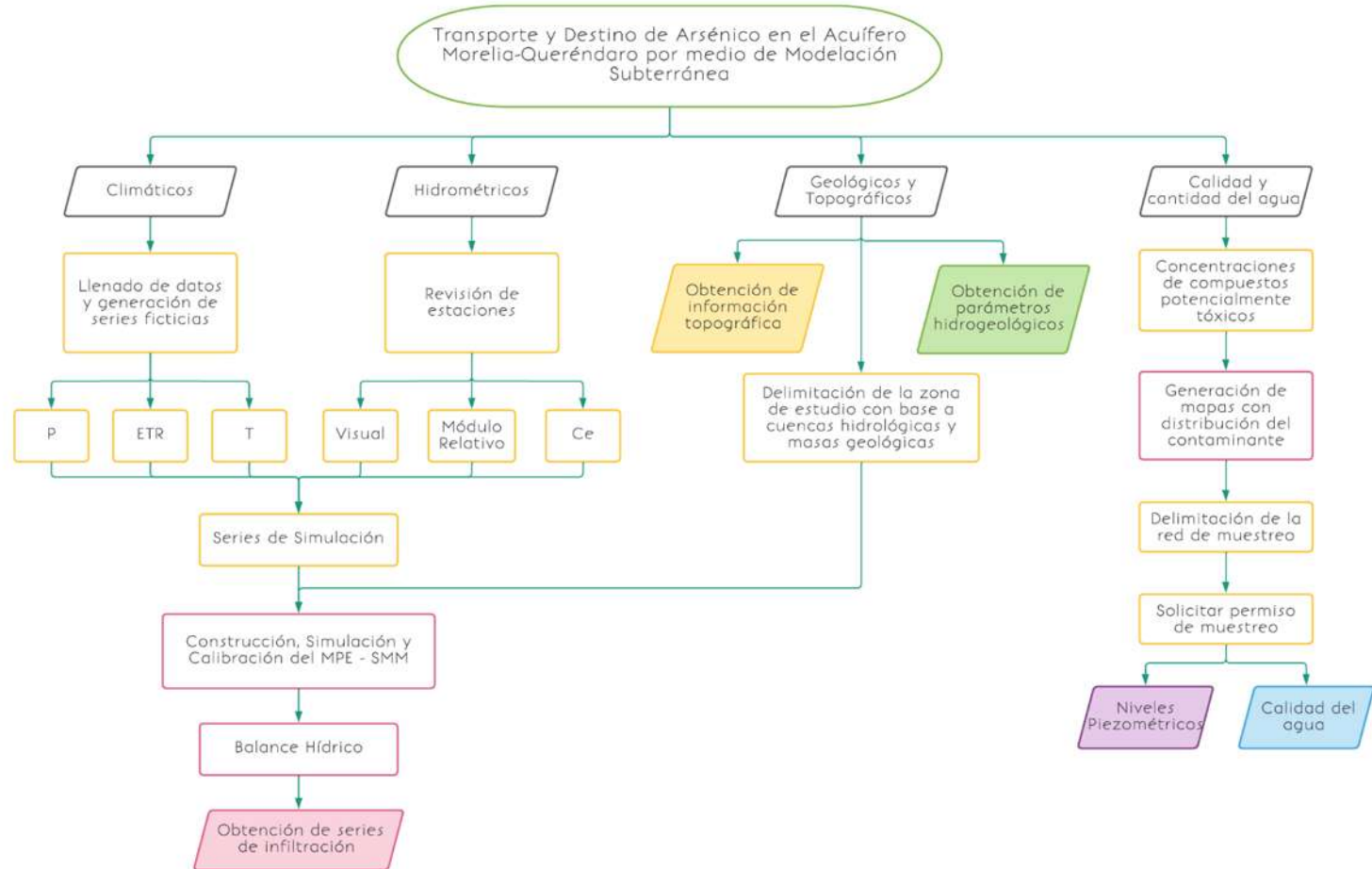


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para el proyecto (B) y (C).



Propuesta Metodológica aplicable a la modelación en conjunta:
Superficial, Subterránea y de Transporte de Contaminante

Figura 2. Primera parte del esquema metodológico desarrollado para realizar las modelaciones del proyecto.

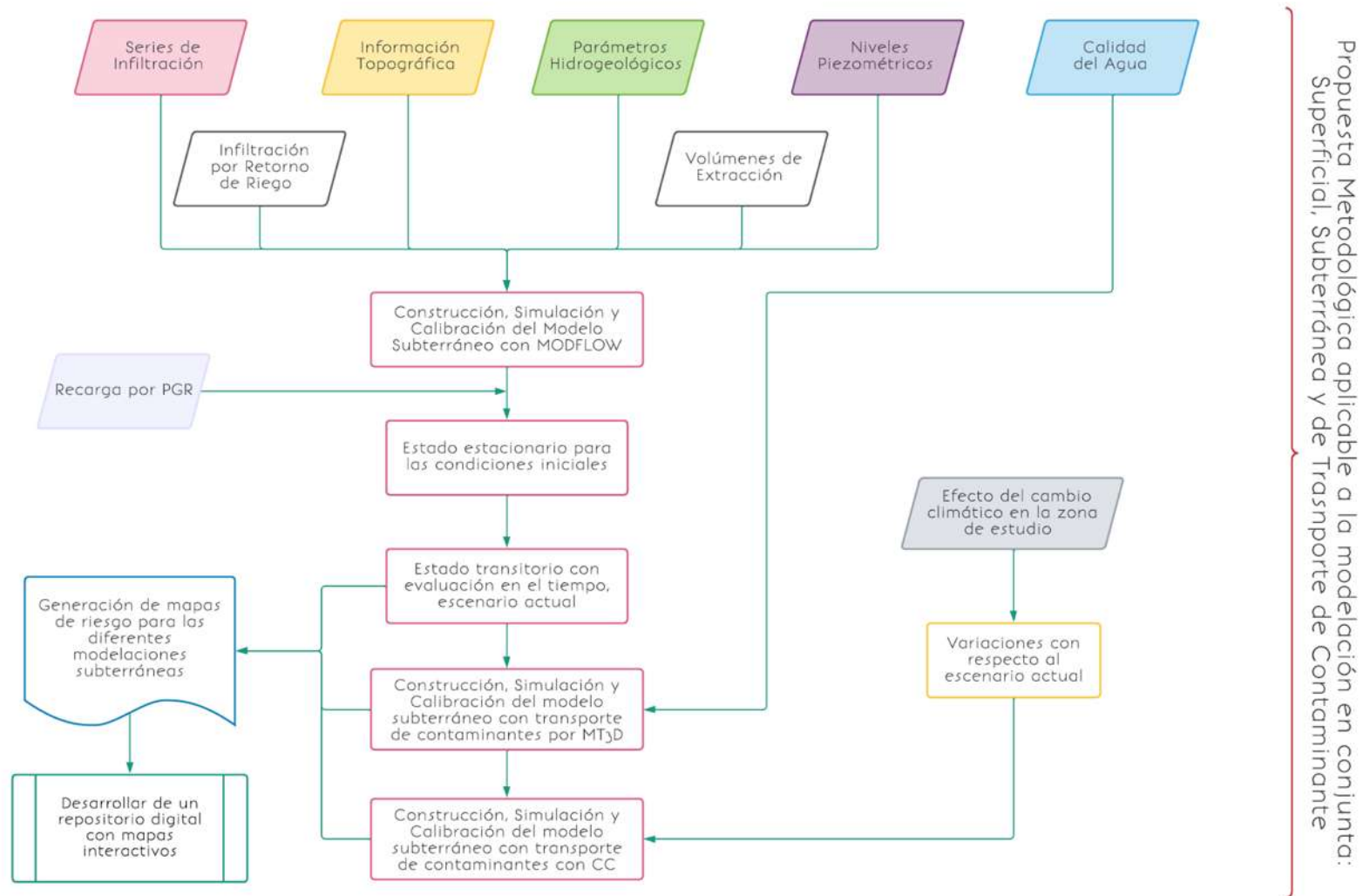


Figura 3. Segunda parte del esquema metodológico desarrollado para realizar las modelaciones del proyecto.

BASES DE DATOS

En la zona de estudio no se cuenta con suficiente información de calidad del agua, meteorológica e hidrométrica. Es por ello, que lo primero que se realiza es una búsqueda de información para trabajar con la mayor cantidad de datos posibles.

En materia de calidad de agua, se revisa la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (CONAGUA, 2020), en donde se tiene el registro del monitoreo de los principales cuerpos de agua del país, además de los resultados de los análisis de calidad de agua en algunos pozos de la zona metropolitana de Morelia. En la red, se incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de acuerdo con el tipo de cuerpo de agua. La información se encuentra integrada en un solo archivo y clasificada por tipo de cuerpo de agua y por estado, en este sentido, para el acuífero Morelia-Queréndaro se cuenta con información de nueve pozos de agua subterránea, distribuidos a lo largo de las localidades de Morelia (5), Zinapécuaro (2), Cuitzeo (1) y Tarímbaro (1). Es importante mencionar que la red, pese a que existe, no tiene una distribución espacial y temporal adecuada debido a que solo se han considerado pozos que se encuentran cerca de un cuerpo de agua importante.

La información meteorológica (precipitación y temperatura) se obtiene de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (SMN, 2023), así como de información solicitada a través de transparencia a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con lo que se logró actualizar la información hasta el 2022.

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país, por tal motivo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana (IMTA, 2017).

La CONAGUA, cuenta con un sistema de concesiones y asignaciones de agua superficial y subterránea regidos por la Ley de Aguas Nacionales (LAN), cuyo proceso implica la elaboración de Títulos y la solicitud de su inscripción en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) a efecto de otorgar seguridad jurídica a los particulares a través de la inscripción oportuna y confiable de las concesiones, emitir la información estadística, así como permitir la consulta pública. Esto también permite evitar o mitigar la sobreexplotación de acuíferos, disminuir la contaminación por descargas de aguas residuales a cuerpos de jurisdicción federal, custodiar las zonas federales y controlar la extracción de materiales pétreos (IMTA, 2017).

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA E HIDROMÉTRICA

Para realizar la evaluación de los recursos hídricos con escasez de datos se ha desarrollado una metodología general (Figura 4), dividida en dos etapas: la primera es el análisis y la validación de los datos y la segunda, es la modelación de la zona de estudio, misma que se realizó por cuencas aisladas y posteriormente, por anidación de cuencas.

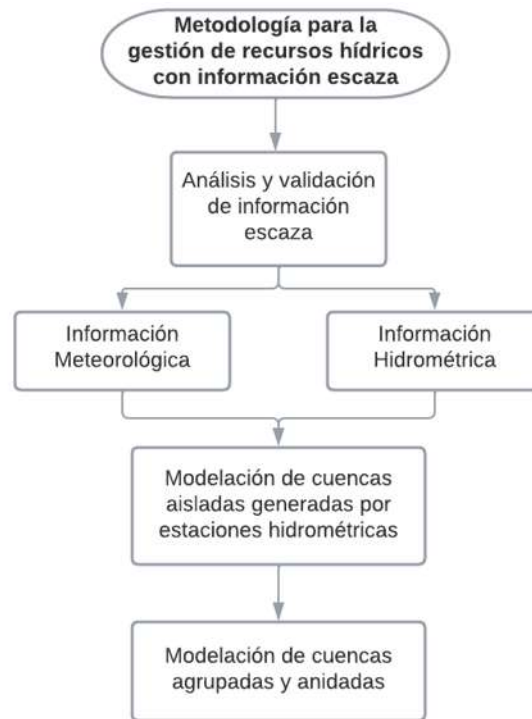


Figura 4. Diagrama general para la modelación hidrológica en zonas con escasez de información

De forma general, se tiene que la modelación es una etapa complicada cuando se realiza en zonas con escasez de información, es por ello por lo que con lo que se debe tener mayor cuidado es con el análisis y la validación de información (descargada de las bases de datos presentadas anteriormente) (Navarro-Farfán, García-Romero, Martínez-Cinco, Domínguez-Sánchez, et al., 2024).

Todo el sustento matemático, estadístico y gráfico que se menciona durante el análisis y validación de información, se encuentra desarrollado en el Anexo A.

Estaciones meteorológicas

Como parte importante de la metodología, se tiene el análisis y la validación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas, las cuales pasarán por un proceso selectivo para condicionar su aplicabilidad.

La validación de la información meteorológica se realizó siguiendo la metodología mostrada en la Figura 5.

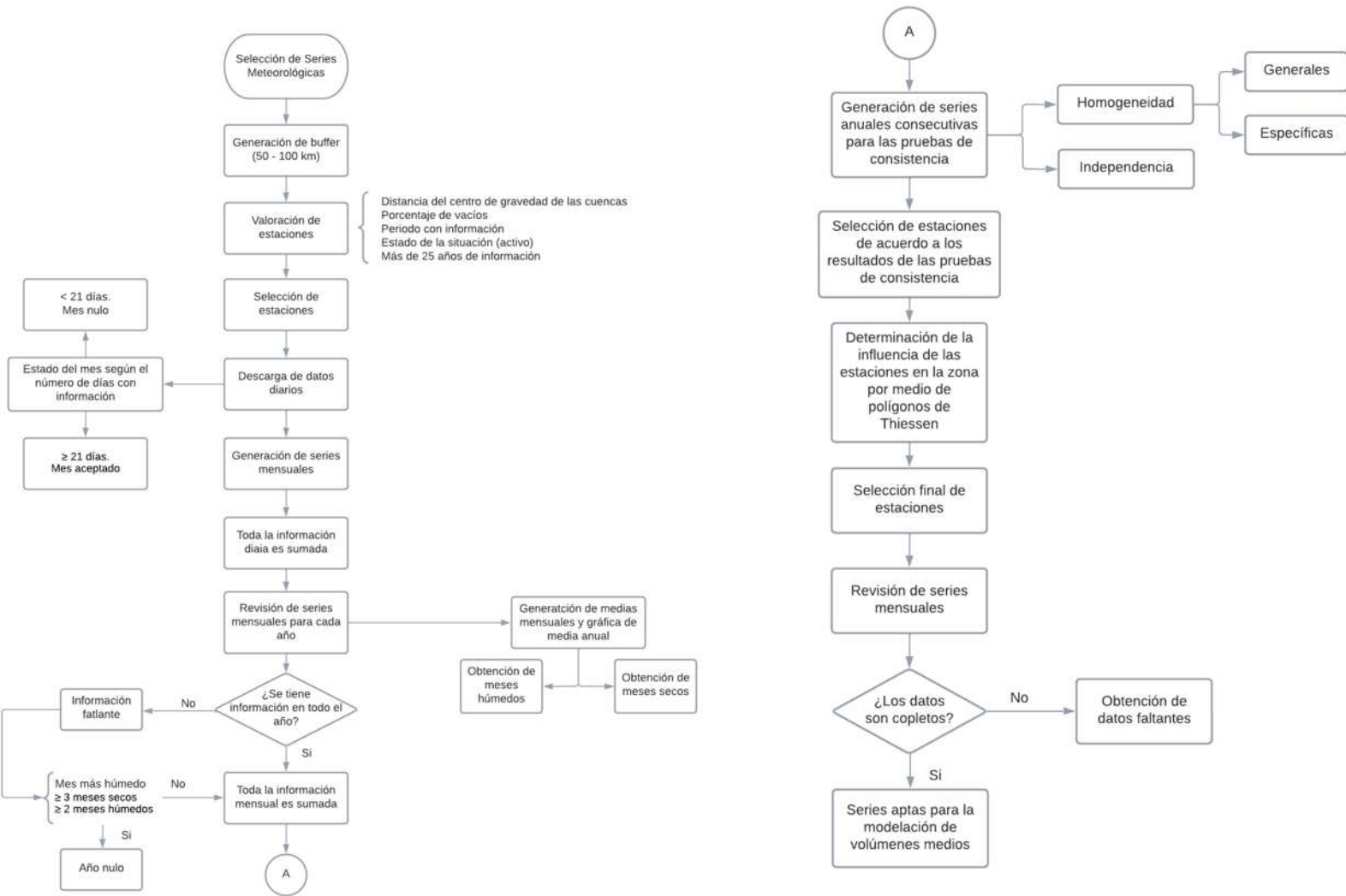


Figura 5. Diagrama metodológico del análisis y validación de estaciones meteorológicas.

Para la selección espacial de las estaciones meteorológicas, se definió un radio de influencia, considerando hasta un 60% adicional del radio máximo de la cuenca, con la finalidad de que las estaciones cubran la zona de estudio. Esta condición se valida con el trazo de los polígonos de Thiessen ((Sánchez-Quispe, et al., 2021)).

De las estaciones que se encuentran dentro del radio de influencia, se deberán descartar aquellas que no sean aptas, para ello se establecieron los siguientes criterios: primero, se revisa que la estación aún esté activa y que tenga al menos 25 años de información; posteriormente, se obtiene el porcentaje de vacíos (siendo un valor deseable <20%, ya que estas series si deberán completarse en caso de datos faltantes y tener un porcentaje alto, mantiene una incertidumbre mayor), el periodo en estudio también es importante, ya que la información meteorológica debe empatar con la información hidrométrica y, por último, se considera la distancia que existe entre la estación y el centro de gravedad de la cuenca, esto, por medio de la distancia euclidiana.

Con los criterios anteriores, las estaciones se califican, es decir, se otorga mayor calificación a las que cumplen con el mayor número de criterios.

Una vez que se tiene la calificación, se seleccionan las mejores estaciones y se descartan aquellas que se consideren no aptas. La generación de las series temporales se hace a partir del análisis y validación de los datos a escala diaria. A partir de los datos diarios, se generaron las series a escala mensual. Para pasar de información diaria a mensual, es necesario que se tenga al menos 21 días de información en el mes, que se acumulan para obtener el valor mensual. Si no existen al menos 21 días de registro en cada mes, se considera que no se cuenta con suficiente información y, por ende, el mes será nulo (vacío).

A partir de las series mensuales se generaron las series anuales, también se obtuvieron los promedios mensuales y el promedio anual. Con lo anterior se seleccionaron los meses húmedos y los meses secos y, de acuerdo con el número de meses faltantes y su importancia con respecto al aporte de la precipitación, se generan las series anuales, las cuales se utilizan para las pruebas de consistencia.

Las pruebas fueron utilizadas para evaluar la homogeneidad e independencia de las series, que son dos características imprescindibles para la precipitación. Esto se logra a través de la implementación de las pruebas generales, como Secuencias (Mather, 1975), la prueba de Helmert (Doorenbos, 1976), Curva Masa Doble (Martínez et al., 2006), o Wald-Wolfowitz (Siegel, 2015); además de pruebas específicas como t de Student (WMO, 1966), o Cramer (WMO, 1966). Con estas pruebas, se demuestra que los elementos presentes en la muestra provienen estadísticamente de una misma población.

De igual forma, la serie de precipitaciones debe demostrar independencia. Esta propiedad se evalúa a través de la prueba de los Límites de Anderson (Salas et al., 1980). Se dice que una serie es independiente, cuando se demuestra que la probabilidad de que la ocurrencia de cualquier dato de precipitación presente en la muestra no dependa de la ocurrencia del valor de precipitación subsecuente o precedente en el tiempo o en el espacio. Los métodos y modelos que utilizados se encuentran supeditados a la información disponible.

Con respecto a los resultados esperados para las pruebas de homogeneidad, se espera que cada estación utilizada cumpla con las pruebas generales, pero, si no se cumple con alguna de ellas, se deben revisar las pruebas particulares, de tal manera que se pueda asegurar que la serie efectivamente es homogénea; por otra parte, la prueba de independencia debe de cumplirse en todas las estaciones.

Una vez seleccionadas las estaciones, se deben dibujar los polígonos de Thiessen de la cuenca, éstos deben cubrir al menos el 90% de la zona de interés. De lo contrario se deben seleccionar estaciones adicionales para cubrir el porcentaje indicado de la zona de estudio.

Las series de precipitación cuentan con vacíos que deben ser completados por medio de algún método de llenado de datos, en el caso particular, se utiliza el método de IDW (*inverse distance weighted*) de acuerdo con la distancia euclidiana (Arellano-Lara & Escalante-Sandoval, 2014), el cual permite completar las series a escala mensual para poder utilizarlas en la modelación superficial. Con respecto a las series de temperatura, el llenado se realiza por medio de promedios mensuales.

Para las estaciones meteorológicas utilizadas, es necesario realizar el proceso denominado llenado de datos, se utilizó el método del IDW a escala mensual. Se descargaron también las series de temperatura mensual, con las cuales se obtuvo la evapotranspiración por medio del método de Thornthwaite (1948), el cual, servirá para realizar una calibración del SMM por medio del parámetro K_c (coeficiente de cultivo).

Estaciones hidrométricas

Por otro lado, se debe llevar a cabo la selección y validación de las estaciones hidrométricas. Este procedimiento se muestra en la Figura 6.

En la primera etapa se descarga la información y se valida la serie, posteriormente, se revisa la tendencia de la serie de manera gráfica, posteriormente, en la tercera etapa se revisa la consistencia de la serie y, por último, en la cuarta etapa, se obtienen parámetros característicos de la cuenca.

Una vez que se tiene seleccionada la zona de estudio, se deben seleccionar aquellas estaciones que están dentro del buffer; por ello, se propone la realización de un buffer del 40 al 50% con respecto al radio máximo que se presenta en la cuenca, el buffer es limitado, debido a que se requiere que las estaciones hidrométricas descarguen dentro de la zona de estudio, o bien, sean parte de la zona de estudio.

La descarga de información hidrométrica se realiza de forma mensual, cuidando la continuidad de las series; si se tiene al menos el 75% de los datos mensuales en un año, se suman para así, poder generar series anuales.

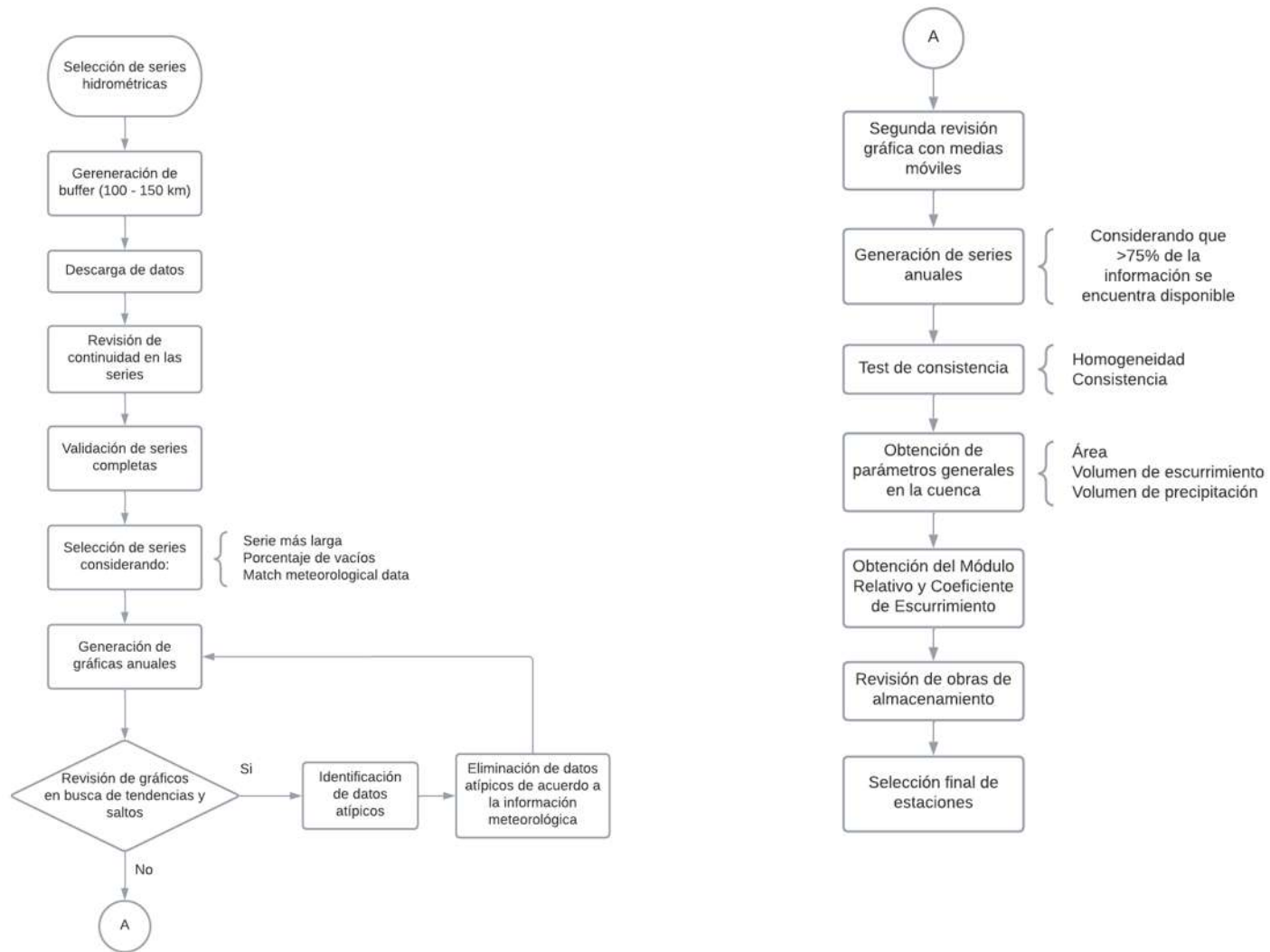


Figura 6. Esquema metodológico del análisis y validación de estaciones hidrométricas.

Es importante destacar que, para las series hidrométricas, no se realizó la estimación de datos faltantes, por lo que, para obtener la información de las estaciones seleccionada, se propone utilizar la serie más larga, esperando poder contar con un periodo continuo de al menos 15 años (Bazzi et al., 2021; Dehghanipour et al., 2019; Khoshkhoo et al., 2015; Lerat et al., 2020; Nazeer et al., 2022). La estimación de datos faltantes en las estaciones hidrométricas no puede realizarse con un método simple. Por ello se debe obtener porcentaje de vacíos y conocer la información disponible.

A partir de la serie más larga, que será la serie por modelar, se realiza una gráfica para verificar la tendencia de esta y la presencia de saltos (si es que los tuviera); una alteración en la serie puede significar que la serie se encuentre en régimen alterado y por ello, la modelación podría no llegar a calibrarse.

La presencia de la alteración en la serie es un valioso indicador para saber si la cuenca realmente se encuentra a régimen natural. Este paso forma parte de una revisión, pero no es una limitante.

Dentro de la misma revisión gráfica, es imprescindible revisar la presencia de datos atípicos, en caso de tener alguno, este se debe comparar con los valores meteorológicos para comprobar su veracidad. En el caso de que el valor del escurrimiento no coincida con las precipitaciones, se propone la eliminación de los valores atípicos y se deben rehacer las gráficas para volver a revisar la tendencia y/o la presencia de saltos. Como segunda revisión gráfica, se deben realizar los gráficos anuales, acompañadas de las medias móviles, de manera que se pueda observar la preservación de la media.

Una vez generadas las series anuales, se realizan pruebas de consistencia, considerando como tal homogeneidad y persistencia; se recomienda utilizar pruebas de homogeneidad general y persistencia (no independencia) por medio de límites de Anderson. La homogeneidad también se utiliza para conocer la tendencia, ya que es un excelente indicador de la preservación de la media, por lo que, si no se cumple, puede ser un indicador de que

no es recomendable utilizar la serie; por otra parte, la persistencia en la serie es una característica que es deseable, más no limitante.

Con las recomendaciones antes mencionadas, ha disminuido el número de estaciones (hidrométricas y meteorológicas) a utilizar. Esta selección nos asegura la utilización de mejores estaciones y, por ende, modelaciones de mejor calidad.

MODELACIÓN SUPERFICIAL

Soil Moisture Method

El método de humedad del suelo o SMM por sus siglas en inglés (*Soil Moisture Method*) es el modelo que se utiliza con el software WEAP (*Water Evaluation and Planning System*), la cual es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas (Stockholm Environment Institute, 2009).

En general, este modelo hidrológico es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo (Stockholm Environment Institute, 2009).

El modelo matemático del método de la humedad del suelo es un balance de agua entre entradas y salidas; en donde la diferencia entre entradas y salidas en cada uno de los dos tanques representa los cambios en la humedad en la zona de raíces y en la zona profunda respectivamente. En la Figura 7, se muestra el esquema del funcionamiento del Método de Humedad del Suelo:

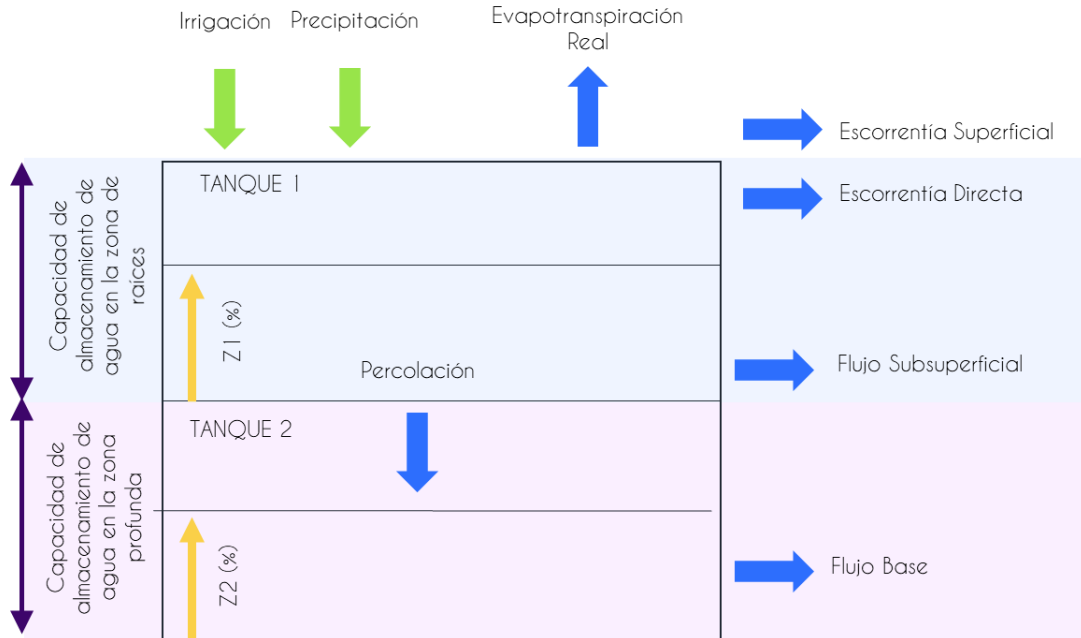


Figura 7. Modelo de tanques del SMM de WEAP.

Este método se considera como el más complejo presente en WEAP, ya que representa la cuenca como dos tanques de suelo, así como el potencial de acumulación de nieve. En la capa superior del suelo, simula la evapotranspiración (ET) considerando las precipitaciones y el riego en tierras agrícolas y no agrícolas, la escorrentía y el flujo subsuperficial y los cambios en la humedad del suelo; además, permite la caracterización del uso de la tierra y/o el impacto del tipo de suelo en estos procesos. El encauzamiento del flujo de base al río y los cambios de humedad del suelo se simulan en la capa inferior del suelo. En consecuencia, el método de humedad del suelo requiere una parametrización más extensa del suelo y el clima para simular estos procesos.

Una unidad de cuenca hidrográfica se puede dividir en N áreas fraccionales que representan diferentes usos de la tierra / tipos de suelo, y se calcula un balance de agua para cada área fraccional, j de N . El clima se supone uniforme sobre cada subcuenca, y el balance hídrico como almacenamiento efectivo en la zona radicular se calcula como se muestra en la Ecuación [1].

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad [1]$$

De todos los parámetros que intervienen en la idealización del modelo, existen 9 que influyen de forma puntual en cada uno de los procesos del ciclo del agua:

K_c	Coeficiente de cultivo
S_w	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces
D_w	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía
K_s	Conductividad de zona de raíces
K_d	Conductividad de zona profunda
f	Dirección preferencial de flujo
z_1	Nivel inicial de humedad en la zona de raíces
z_2	Nivel inicial de humedad en la zona profunda

Conceptualmente, lo que hace WEAP es convertir las entradas de precipitación en las salidas hacia flujos que alimentan los ríos.

Hay tres salidas del primer taque:

1. Escorrentía Superficial: que está gobernada por el parámetro Factor de Resistencia a la escorrentía (RRF).
2. Escorrentía Directa: que solo ocurre si el tanque 1 está completamente saturado, es decir que no se dan procesos de infiltración hacia la primera capa del suelo, eso debido a la capacidad de agua en la zona de raíces, que llamaremos S_w .
3. Flujos Intermedios: debido a que en el tanque 1 hay una capacidad de agua y tiene una conductividad en zona de raíces que llamaremos K_s se dan los flujos intermedios; adicionalmente, este flujo intermedio está gobernados por la dirección del flujo (f), que es el factor que me distribuye el agua entre flujo intermedio y percolación.

El tanque 2 (Figura 7) también tiene una capacidad de almacenamiento en la zona profunda que llamaremos D_w ; y a su vez tiene una conductividad en la zona profunda que gobierna el flujo base K_d .

Por otro lado, como todo modelo, es necesario fijar las condiciones de frontera o condiciones iniciales; en ese sentido debemos fijar el nivel de humedad inicial en la zona de raíces y el nivel de humedad inicial en la zona profunda (z_1 y z_2 respectivamente).

El modelo matemático del método de la humedad del suelo es un balance de agua entre entradas y salidas; en donde la diferencia entre entradas y salidas en cada uno de los 2 tanques representa los cambios en la humedad del tanque 1 y el tanque 2 en la zona de raíces y en la zona profunda, respectivamente.

El coeficiente de cultivo (K_c) permite transformar de ET de Referencia a ET del cultivo bajo condiciones estándar. El cálculo de la evapotranspiración potencial, PET, se realiza utilizando la ecuación de Penman-Monteith modificada para una cosecha de hierba estandarizada, de 0.12 m de altura y con una resistencia superficial de 69 s/m.

El modelo matemático del método de la humedad del suelo es un balance de agua entre entradas y salidas; en donde la diferencia entre entradas y salidas en cada uno de los dos tanques representa los cambios en la humedad en la zona de raíces y en la zona profunda respectivamente. En la Figura 8, se muestra el esquema del funcionamiento del Método de Humedad del Suelo:

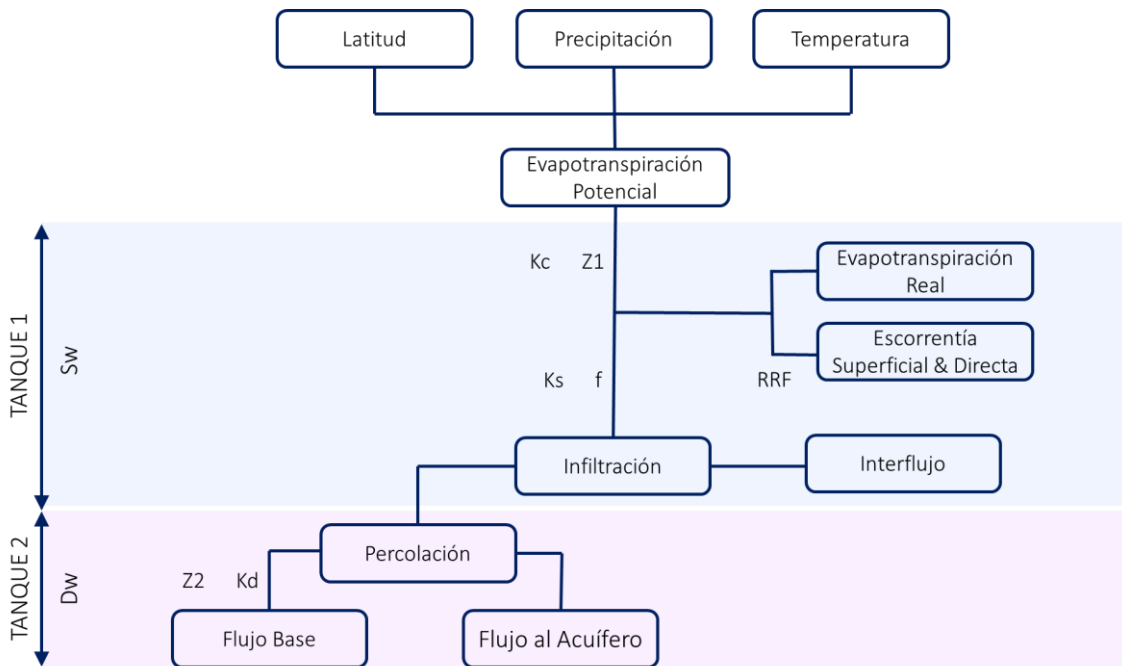


Figura 8. Representación del SMM de WEAP.

La calibración se realiza por medio de la variación de 4 de los 9 parámetros que intervienen en el SMM. La variación de los parámetros se encuentra relacionada con el sitio de aplicación. Dentro de cada modelación se debe realizar un análisis de sensibilidad para determinar la influencia de los parámetros con respecto a la información que se obtendrá del modelo. Los parámetros calibrados son:

- i. *Crop Coefficient* (K_c) que condiciona el volumen evapotranspirado y depende del uso de suelo,
- ii. *Runoff Resistance Factor* (RRF) establece la relación del agua que puede escurrir con respecto a la limitante natural que tiene el terreno,
- iii. *Soil Water Capacity* (SWC) considera la capacidad de retención de humedad en la porción de suelo subsuperficial y,
- iv. *Preferref Flow Direction* (F) que marca la dirección preferencial del flujo, como si se limitara por medio del ángulo de infiltración (penetración) con respecto a la horizontal.

La extrapolación de información se realiza por medio del traslado de parámetros. Adicionalmente, se deben considerar características de las cuencas, como es el tipo de suelo

y sus características particulares. El SMM fracciona las cuencas de acuerdo con el uso de suelo, posteriormente se asocian parámetros a cada tipo de suelo, mismos que pueden ser modificados a una escala mensual, sin variaciones cíclicas a nivel anual.

CALIBRACIÓN DEL MODELO

Como mencionan Merino y Paredes (2016), los modelos permiten partir de un grupo de datos y al pasar por una formulación matemática que explique el proceso considerado, obtener una o varias variables de respuesta. La mayoría de los modelos hidrológicos están basados en representaciones conceptuales de procesos físicos que gobiernan los flujos de agua superficial y subterráneo.

Los resultados del modelo serán tan fiables como lo sean las suposiciones tomadas, los datos de entrada disponibles y los parámetros estimados. Se presenta el problema de seleccionar el modelo que simule de una forma adecuada el caso de estudio, además de contar con parámetros coherentes en las modelaciones que represente el comportamiento real de la cuenca.

Al proceso de obtención de estos parámetros se le denomina calibración, y en el caso de los MPE se realiza mediante la aplicación de técnicas de optimización que busquen un conjunto de parámetros que hagan que los resultados del modelo se ajusten a los valores observados lo mejor posible.

La calibración puede realizarse de forma manual, que consiste en un proceso iterativo de prueba y error y cada vez que los parámetros del modelo son ajustados, se compara por medio de indicadores de bondad de ajuste o visualmente los resultados del modelo con los datos de las aportaciones históricas.

Función objetivo e Indicadores de Bondad de Ajuste

El propósito de la calibración automática de modelos es, por tanto, encontrar aquellos valores de los parámetros del modelo que optimicen (maximizando o minimizando) el valor numérico de la función objetivo, la cual integra diferentes indicadores de ajuste.

La calibración de modelos está enfocada a un criterio de exactitud, que se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo; para ello se hace uso de diferentes metodologías basadas en ecuaciones para la bondad de ajuste o su indicador de ajuste, los cuales demuestran numéricamente la similitud o diferencia entre los valores simulados por el MPE y observados de la estación hidrométrica.

Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)

Es un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo, pero no siempre, suceden durante periodos de flujo elevado. El valor de NSE varía de -1 a 1. Un valor de NSE = 1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de NSE = 0 significa que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de estos datos tendría una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo.

La principal desventaja del coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe es que las diferencias entre los valores observados y simulados se calculan como valores cuadráticos. Como resultado, los valores mayores de las series temporales están fuertemente sobrevalorados mientras que los valores más bajos no son tomados en cuenta. En la cuantificación de predicciones de flujo, esto conlleva a una sobreestimación del mal funcionamiento del modelo durante picos de flujo y una subestimación del funcionamiento del modelo para condiciones de flujo escaso. El NSE (Ecuación [2]) no es muy sensible a sobre o infravaloraciones sistemáticas del modelo especialmente durante periodos de flujo escaso.

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{sim}}(t) - Q_{\text{obs}}(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{obs}}(t) - \bar{Q}_{\text{obs}}(t))^2} \quad [2]$$

Eficiencia de Nash – Sutcliffe modificada (ln NSE)

El coeficiente de Nash – Sutcliffe de la transformación logarítmica del flujo (Ecuación [3]), da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la consecuente sensibilidad a valores extremos, el coeficiente de NSE se calcula con valores logarítmicos de los valores observados y simulados. Mediante esta transformación, los picos se achatan y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel. Como consecuencia, la influencia de los valores de flujo escaso se incrementa en comparación con los picos de flujo y por tanto aumenta la sensibilidad del *ln* NSE frente a las sobre o infravaloraciones sistemáticas del modelo.

$$\ln\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{\text{sim}}(t)) - \ln(Q_{\text{obs}}(t))]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{\text{obs}}(t)) - \ln(\bar{Q}_{\text{obs}}(t))]^2} \quad [3]$$

Coefficiente de Correlación de Pearson (r)

La correlación de Pearson (Ecuación [4]) mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por el sesgo. El valor del coeficiente varía entre -1 y 1. El coeficiente r toma el valor de 1, momento denominado de correlación completa positiva, cuando los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con X e Y aumentando conjuntamente. El valor de 1 es independiente de la magnitud de la pendiente. En cambio, si los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente negativa, con Y decreciendo cuando X aumenta, el coeficiente r toma el valor de -1, momento denominado de correlación completa negativa. Un valor de r cercano a cero indica que las variables X e Y no están correlacionadas linealmente.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad [4]$$

Por otra parte, tiene el inconveniente que es un estadístico pobre para decidir si la correlación observada es estadísticamente significativa, y/o si una correlación observada es significativamente más fuerte que otra.

El motivo es que en el cálculo del coeficiente se ignora la distribución individual de X e Y, por lo tanto, no hay una manera universal de evaluar sus distribuciones en el caso de que las dos variables no estén correlacionadas (hipótesis nula).

Coefficiente de Simetría (CS)

Es una medida de la simetría del ajuste entre la media de la simulación media y la media de la serie observada; esta característica, aunque simple, es importante preservarla en modelaciones de periodos largos. Si el valor del CS (Ecuación [5]) es 1, quiere decir que la serie observada y la serie simulada tienen la misma media.

$$CS = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}; \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2 \quad [5]$$

Para las ecuaciones anteriores [2]- [5] se tiene que $Q_{sim}(t)$ y $Q_{obs}(t)$ son el flujos simulado y observado, respectivamente, en el intervalo de tiempo t ; N es el número de meses de la calibración, y la barra alta denota el valor medio. Además, en la Tabla 3 se muestra la calidad del indicador según el valor que se haya obtenido en la calibración.

Tabla 3. Calidad de ajuste con los diferentes indicadores de ajuste. Adaptado de (Moriasi et al., 1983, 2007).

CALIDAD	NSE / ln NSE / r / SC
Muy Buena	0.75 < Coeficiente ≤ 1.00
Buena	0.65 < Coeficiente ≤ 0.75
Satisfactoria	0.50 < Coeficiente ≤ 0.65

No Satisfactoria	Coefficiente ≤ 0.50
------------------	--------------------------

MAPA PGR

Para la realización del mapa de zonas con potencial recarga al acuífero (PGR por sus siglas inglés *Potential Groundwater Recharge*), se utiliza la calculadora de mapas (en formato ráster) para poder establecer zonas con mayor capacidad de infiltración, esto se realiza con el apoyo de mapas temáticos que describen las diferentes capacidades de recarga con las cuales cuenta cada una (Mussa et al., 2020).

La clasificación que se le dará a cada clase dependerá de sus características para una posible zona de recarga en cada capa temática, algunos autores usan principalmente 5 clasificaciones (Matus Silva, 2007), sin embargo, se decide utilizar una escala de 1 – 7, considerando que 1 es la capacidad mínima de recarga y 7 es la capacidad máxima.

Los mapas temáticos se realizan con una distribución espacial (Sharma et al., 1983) que depende de las características de cada capa temática, los cuales se presentan en la Figura 9, junto con la influencia que se le otorga a cada variable. La variabilidad del factor de influencia se obtiene de acuerdo con la recurrencia de la variable en la zona de estudio.

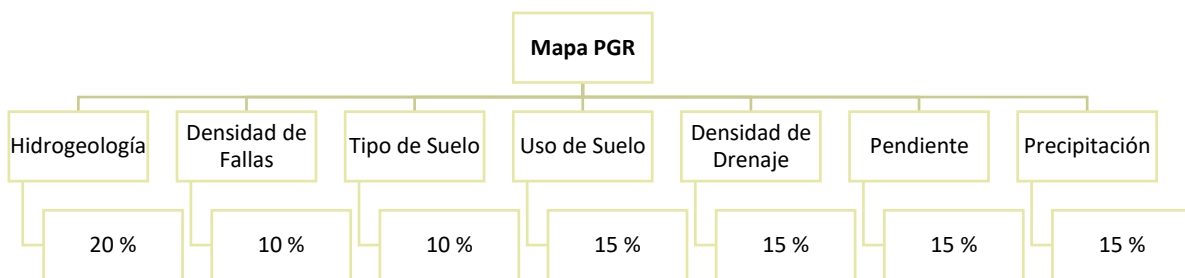


Figura 9. Capas temáticas utilizadas e influencia para la realización del mapa PGR.

En general, se puede decir que los dos factores que afectan la recarga en una cuenca son los factores climatológicos y factores que afectan el suelo, dentro de los cuales se considera el

uso y tipo de suelo, la topografía, la red hidrográfica y la litología. Así mismo, se tiene que la correcta determinación de las zonas de recarga es importante para establecer sitios con mayor capacidad de intercambio de agua (Vasileva, 2019).

MAPA DRASTIC

DRASTIC es un método establecido para la generación de un mapa de vulnerabilidad al acuífero por contaminación a partir de capas temáticas (Awawdeh et al., 2015), en las que se presenta la capacidad de ingreso del contaminante, dicho método se realiza por medio de la manipulación de mapas espacialmente distribuidos:

- D *Depth to Water* Profundidad del nivel estático
- R *Net Recharge* Recarga Natural Neta
- A *Aquifer Media* Medio Acuífero
- S *Soil Media* Tipo de Suelo
- T *Topography* Topografía
- I *Impact of Vadose Zone* Impacto de la Zona Vadosa
- C *Hydraulic Conductivity* Conductividad Hidráulica

El método DRASTIC, fue desarrollado para la *US Environmental Protection Agency* (EPA) y es probablemente el índice de vulnerabilidad más ampliamente utilizado, que tiene como finalidad evaluar diversas variables representativas de la vulnerabilidad a la contaminación, basado particularmente en siete variables intrínsecas del acuífero (Torres Díaz et al., 2014).

Al igual que en el mapa PGR, se tiene que cada una de las capas temáticas está ponderada por un porcentaje (Figura 10) para lograr tener el mapa con el impacto real de la contaminación. De forma similar, se tiene una reclasificación por 7 valores, donde se tiene que el valor 1 corresponde a sitios con poca capacidad de contaminación y el valor de 7 corresponde a una alta probabilidad de contaminación.

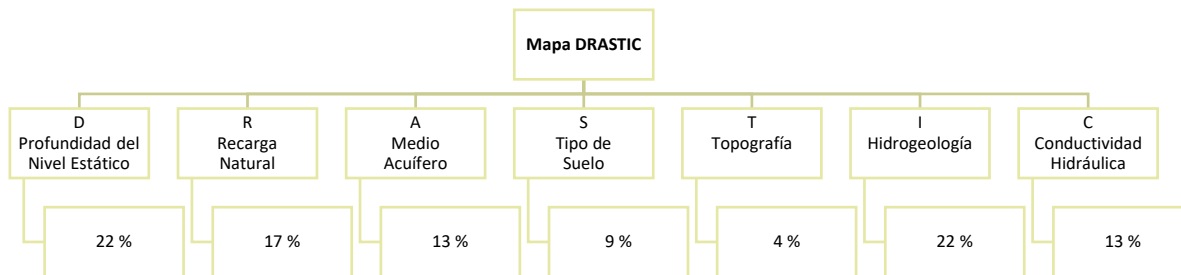


Figura 10. Capas temáticas utilizadas e influencia para la realización del mapa DRASTIC.

En este caso, el mapa DRASTIC ha sido normalizado a los valores que se presentan en el mapa PGR para que ambos puedan unificarse en un mapa PGR + DRASTIC, el cual será utilizado para comparar los valores de arsénico obtenidos en la zona y que, se pueda determinar una posible procedencia de las altas concentraciones.

SIMULACIÓN SUBTERRÁNEA

Esta etapa del proyecto se realiza a partir de la paquetería Modflow 2005, utilizando el software PMWIN (*Processing Modflow for Windows*), el cual es un software de código libre desarrollado en Fortran por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que puede ser descargado, instalado y modificado sin costo; es importante mencionar que esto no quiere decir que el software en sí esté desactualizado o que tenga menor calidad.

MODFLOW se basa en diferencias finitas que definen el flujo en el medio poros; dada su discretización en celdas rectangulares, el control volumétrico de lo que entra y lo que sale es exacto y no es un problema en la simulación. Este control también se cumple en condiciones que varían con el tiempo, teniendo un control exacto del agua proveniente de almacenamiento.

Según Harbaugh (2005), MODFLOW simula el flujo constante y no permanente en un sistema de flujo de forma irregular en el que las capas de acuíferos pueden ser confinadas, no confinadas, o una combinación de ambas. Se puede simular el flujo de las tensiones externas, como el flujo a los pozos, la recarga de área, la evapotranspiración, el flujo a los desagües y

el flujo a través de los lechos de los ríos. Las conductividades o transmisiones hidráulicas para cualquier capa pueden diferir espacialmente y ser anisotrópicas (restringidas a tener las direcciones principales alineadas con los ejes de la malla), y el coeficiente de almacenamiento puede ser heterogéneo. Pueden simularse los límites de altura y flujo especificados, así como un flujo dependiente de la altura a través del límite exterior del modelo que permite que el agua sea suministrada a un bloque límite en el área modelada a una tasa proporcional a la diferencia de altura actual entre una "fuente" de agua fuera del área modelada y el bloque límite.

Para realizar las simulaciones en MODLFOW, es necesario contar con una discretización espacial de un sistema acuífero con una red de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de filas, columnas y capas como se muestra en la Figura 11.

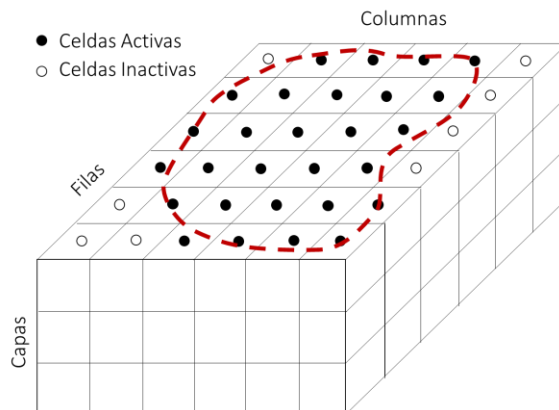


Figura 11. Discretización del acuífero por medio de celdas, marcando filas, columnas y capas. Adaptado de (Harbaugh, 2005).

El movimiento tridimensional del agua subterránea a través del material poroso puede ser descrito por la Ecuación [6] como una diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [6]$$

K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son valores de conductividad hidráulica a lo largo de los ejes cartesianos x , y , y z , que se supone que son paralelos a los principales ejes de la conductividad hidráulica (LT^{-1});

h es altura piezométrica (L); W es un flujo volumétrico por unidad de volumen que representa las fuentes y/o sumideros que permiten la entrada ($W > 0$) o salida ($W < 0$) de agua del sistema (T^{-1}); S_s es el almacenamiento específico del material poroso ($1/L$); t es el tiempo (T). En general, K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} pueden ser funciones del espacio (x, y, z), y h y W del espacio y tiempo (x, y, z, t), con lo que la ecuación anterior describe el flujo saturado en un medio poroso heterogéneo y anisótropo en régimen transitorio. La ecuación anterior junto con condiciones iniciales y de contorno, constituyen el modelo matemático del flujo subterráneo.

Dentro de cada celda hay un punto llamado "nodo" en el que se debe calcular la altura. Se podrían usar muchos esquemas para localizar nodos en las celdas; sin embargo, la ecuación de diferencia finita desarrollada utiliza la formulación centrada en bloques en la que los nodos están en el centro de las celdas.

El desarrollo de la ecuación del flujo en diferencias finitas (Ecuación [7]) resulta de aplicar la ecuación de continuidad a una celda: la suma de todos los flujos que entran y salen de la celda debe ser igual al cambio en el almacenamiento. Suponiendo que la densidad del agua subterránea es constante y considerando que junto con las condiciones iniciales y de contorno, se tiene que la ecuación de continuidad que expresa el balance de flujo en una celda es:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad [7]$$

Donde Q_i es el caudal que entra en la celda por una cara (L^3/T), S_s es el coeficiente de almacenamiento específico del medio ($1/T$), ΔV es el volumen de la celda (L^3), Δh es la variación en el potencial por unidad de peso en el intervalo de tiempo Δt (L).

Las condiciones de contorno están establecidas por las celdas inactivas y de altura constante, las cuales limitan los flujos que se tienen en el sistema. En este sentido, las celdas que tienen flujo en el acuífero son aquellas que se consideran como activas. El mismo modelo requiere información de la zona de estudio como son: entradas y salidas del acuífero, así como el

conocimiento de los parámetros hidrogeológicos y de los niveles piezométricos iniciales e históricos.

MT3D

El modelo MT3D (Zheng & Wang, 1999), es un modelo de transporte de solutos. Simula advección, dispersión y reacciones químicas de contaminantes. Incluye tres principales técnicas de solución de transporte: el método estándar de diferencias finitas, seguimiento de partículas basado en los métodos de Euler-Lagrange, y método de orden superior de volúmenes finitos TVD.

El modelo integra los datos resultados de la modelación de flujo realizada con MODFLOW. Requiere datos de porosidad efectiva, concentración inicial del contaminante, advección, difusión y dispersión longitudinal.

La combinación de MODFLOW y MT3D permite la representación precisa del flujo de agua subterránea y de las concentraciones de múltiples contaminantes en tres dimensiones, así como la capacidad de incluir múltiples fuentes y capas en distintos tipos de acuíferos, y la presencia de pozos de extracción, ríos y otros elementos que puedan influir en los patrones de flujo.

Ecuación de transporte

Como menciona Zheng y Wang (1999), la ecuación diferencial parcial (Ecuación [8]) que describe el destino y transporte de contaminantes, en sistemas de flujo de agua subterránea transitorios se describe a continuación:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad [8]$$

Donde θ es la porosidad del medio subsuperficial; C^k es la concentración disuelta de las especies k (M/L^3); t es el tiempo, x_{ij} es la distancia a lo largo del eje de coordenadas cartesianas respectivas (L); D_{ij} es el tensor del coeficiente de dispersión o difusión

hidrodinámica (L/T); v_{ij} es la infiltración o velocidad lineal del agua en los poros (L/T); q_s es la tasa volumétrica de flujo por unidad de volumen del acuífero representado en fuentes de flujo (positivo) y sumideros (negativo) (1/T); C_s^k es la concentración de fuente o sumidero de flujo para las especies k (M/L³); y, R_n es el término de reacción química (M/L³T).

El código MT3DMS es capaz de manejar la sorción lineal o no lineal controlada en equilibrio, la sorción no equilibrada (limitada en velocidad) y la reacción de primer orden que puede representar la desintegración radiactiva o proporcionar una representación aproximada de la biodegradación. La formulación general diseñada para modelar la sorción con velocidad limitada también se puede usar para modelar la transferencia de masa cinética entre los dominios móviles e inmóvil en un modelo de difusión advección de doble dominio. Las reacciones químicas más sofisticadas pueden ser modeladas a través de paquetes de reacción adicionales (Zheng & Wang, 1999)

En el caso de MT3D, permite la modelación del contaminante como advección, dispersión y reacción química, para los cuales se requiere el ingreso de las matrices de concentración inicial (Bedekar et al., 2016).

El movimiento del arsénico considerado por MT3D se considera en parte difusivo y en parte advectivo (activándose las dos opciones en el modelo); en este caso, el movimiento advectivo es el predominante debido al flujo del agua subterránea.

El movimiento difusivo sigue la Ley de Fick y ocurre cuando se tiene la presencia de concentraciones diferentes; el movimiento advectivo, por su parte, ocurre por el movimiento del fluido, predominando con las direcciones de flujo.

Para el caso de MT3D, se tienen condiciones de frontera iguales a las que se establecen en MODFLOW, teniendo en consideración aquellas celdas en las cuales se pueden presentar los procesos difusivos y advectivos.

CAMBIO CLIMÁTICO

En México, en 2012, se desarrollaron escenarios climáticos regionales; este proyecto fue realizado en conjunto diferentes centros de investigación:

- INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático,
- CCA: Centro de Ciencias de la Atmósfera, perteneciente a la UNAM,
- IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y,
- CICESE: Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, C. C.

De esta forma, se logró tener un análisis en el que se presenta el desempeño de los Modelos de Circulación General (MCG) a escala regionalizada, utilizando una serie histórica de referencia específica que permite tener la reproducción de procesos atmosféricos de importancia para todo México. Es importante resaltar que los MCG tienen diferentes desempeños, por lo cual es recomendable verificar la validez de un modelo y así, conocer el o los escenarios más críticos (Fernández Eguiarte et al., 2015).

Se logra entonces contar con series de control y series modificadas a efectos de cambio climático. En este sentido, se tiene que para la zona de estudio y considerando los MCG regionalizados para México a cada treinta segundos (aproximadamente un kilómetro), se trabaja con escenarios seleccionados con base en la Figura 12.

Los modelos de circulación general utilizados para la modelación bajo el efecto del cambio climático son:

1. MPI_ESM_LR (Alemania)
2. GFDL_CM3 (Estados Unidos)
3. CNRMCM5 (Francia)
4. HADGEM2_ES (Reino Unido)

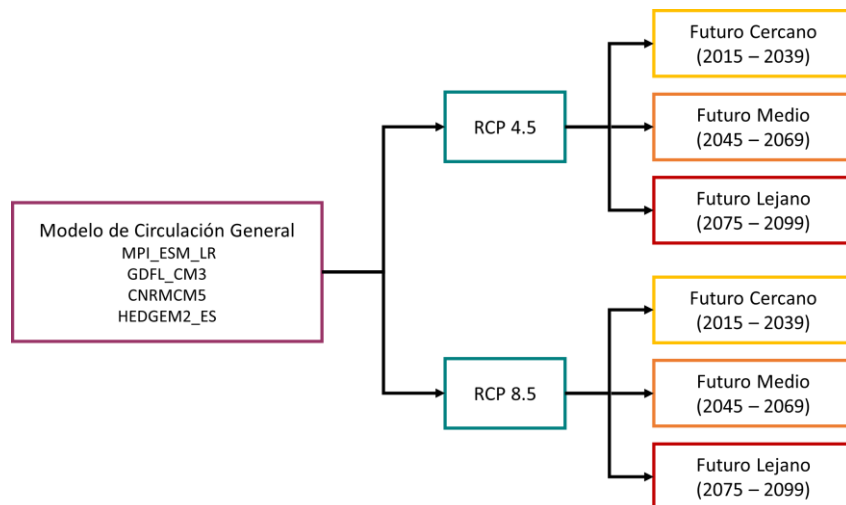


Figura 12. Diagrama de árbol para la selección de escenarios con efecto del cambio climático.

La obtención de la variación de las series de precipitación y temperatura se obtuvo por medio de un Sistema de Información Geográfico (SIG), a través de las series descargadas de la plataforma oficial. Se obtienen entonces, porcentajes de variación a partir de la serie histórica de referencia; estas variaciones se aplican a las series de precipitación y temperatura para obtener las series en los horizontes cercanos, medios y futuros.

RESULTADOS

DELIMITACIÓN DE ZONA DE ESTUDIO

La delimitación de la zona de estudio parte de las características topográficas, geológicas y límites naturales de agua; en este sentido, se tiene que la zona de estudio coincide con la cuenca del Lago de Cuitzeo, la cual se encuentra en el límite entre los estados de Michoacán de Ocampo y Guanajuato. Dentro de la cuenca, se localiza la localidad de Morelia y, por ende, el parte del municipio de Morelia; además, como se muestra en la Figura 13, dentro de la zona de estudio se localiza el Lago de Cuitzeo al norte, así como la Presa de Cointzio al sur y Presa de Queréndaro al este.

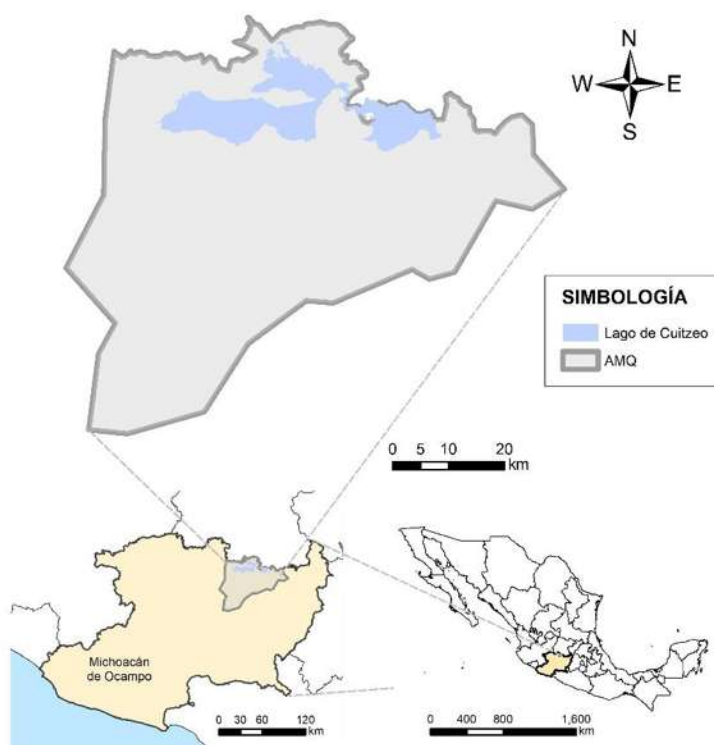


Figura 13. Localización de la zona de estudio: Acuífero Morelia-Queréndaro.

La zona de estudio se encuentra dentro del cinturón volcánico transmexicano (Figura 14), lo que representa cierta correlación con sitios con concentraciones elevadas de arsénico.

La zona de estudio (la porción norte del acuífero Morelia – Queréndaro) se encuentra en una zona con características geotérmicas.

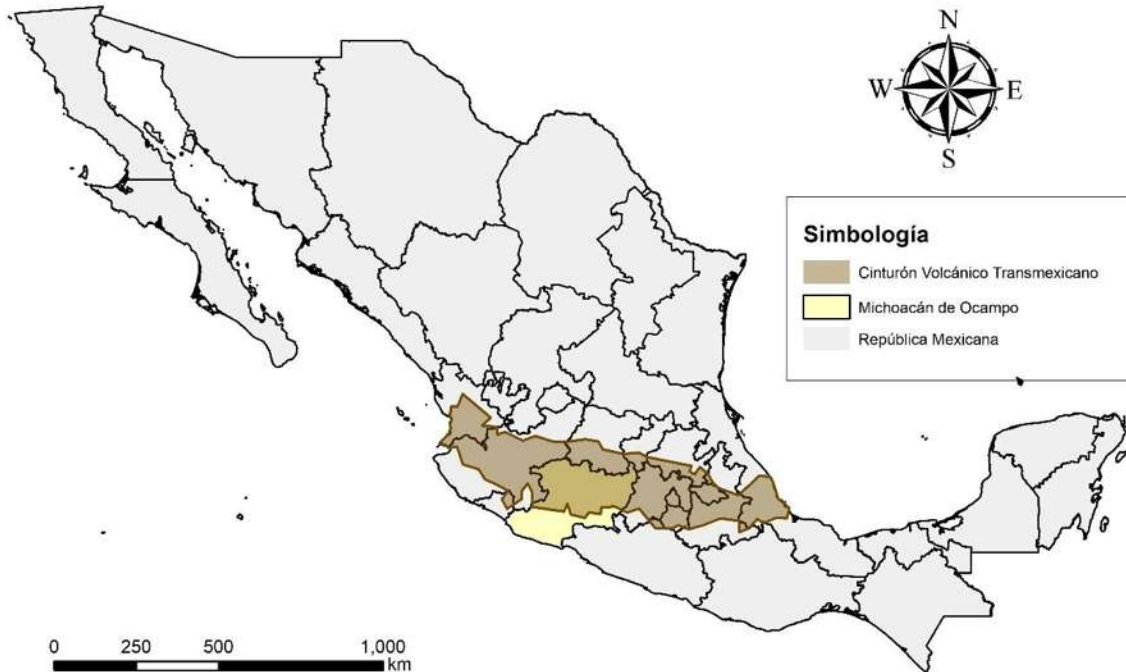


Figura 14. Localización del cinturón volcánico transmexicano.

La cuenca del Lago de Cuitzeo pertenece a la Región Hidrológica Administrativa Lerma Santiago Pacífico; a la Región Hidrológica Lerma Santiago y a la Subregión Hidrológica Alto Lerma; se tiene un clima templado, subhúmedo, temperatura media anual de 12° C a 18° C y una precipitación de 40 mm en el mes más seco.

En la Figura 15, se muestran los municipios que forman parte del Acuífero Morelia – Queréndaro (AMQ), se tienen 15 municipios, con un total de 1 170 349 habitantes, siendo los principales centros de población los municipios de Morelia (con 825 585 habitantes), Tarímbaro (con 119 032 habitantes) y Zinapécuaro (con 49 471 habitantes), de acuerdo con COESPO (COESPO, 2020).

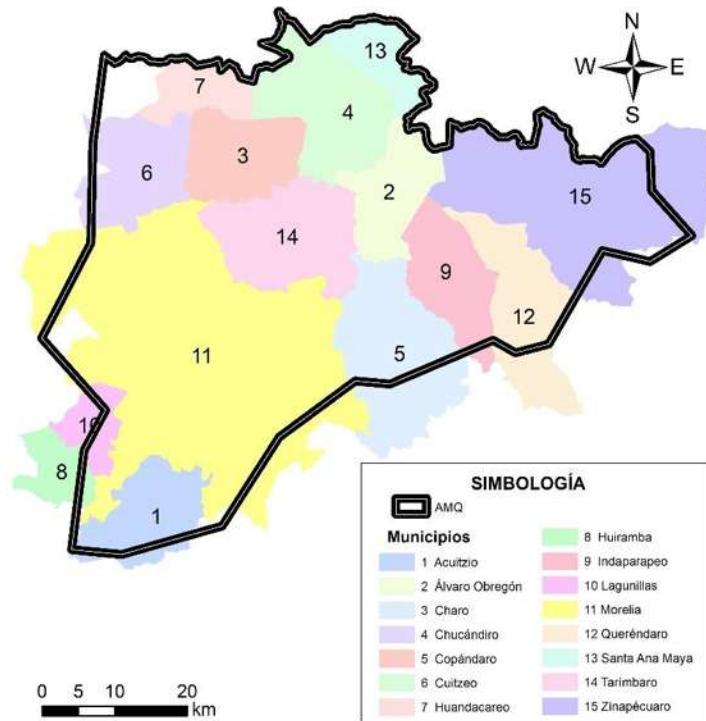


Figura 15. Municipios que forman parte de la cuenca del lago de Cuitzeo.

Se sabe que el municipio de Morelia se encuentra en constante crecimiento con una tasa de crecimiento del 2%, se debe considerar que el crecimiento poblacional se presenta en toda la zona metropolitana de Morelia, lo que implica los municipios de Morelia, Tarímbaro y Charo; además, de que el crecimiento industrial resulta importante; en este sentido, se tiene que existe, además, un problema grave debido a la irresponsabilidad en el manejo de los desechos químicos e industriales, pues se considera puede afectar nocivamente a los suelos y acuíferos (CONAGUA, 2009).

Como se muestra en la Figura 16, el acuífero Morelia-Queréndaro presenta una similitud importante con respecto a la cuenca del Lago de Cuitzeo, dentro de ella, y de acuerdo con la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) se tiene un total de 1 239 pozos, con un volumen total concesionado de 172.65 hm³ de agua; el uso principal de agua que se tiene en la zona es el agrícola con un 50.44%, seguido del uso público urbano, con un 26.13% y el uso industrial con un 16.50%. Los porcentajes son de acuerdo con el volumen concesionado (CONAGUA, 2023b).

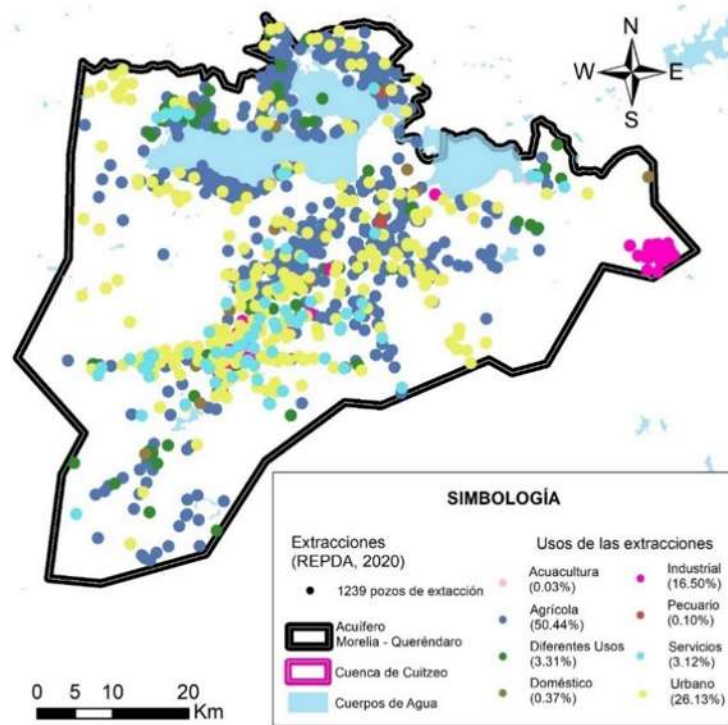


Figura 16. Localización del acuífero Morelia – Queréndaro y la distribución geográfica de los pozos de agua subterránea suministrados por el REPDA.

El acuífero además tiene un déficit de volumen del 2.5% con respecto al volumen que se recarga (CONAGUA, 2023a); ya que, pese a que el REPDA presenta un volumen concesionado, es común que los pozos extraigan más agua de la que se concesiona en el contrato, además de que muchos de los pozos, no se encuentran en la base de datos debido a que pertenecen a zonas de asentamientos irregulares y, para el caso particular de algunos sitios en la localidad de Morelia, lo administra la junta de colonos y no el OOAPAS.

Como se observa en la Figura 17, la geología principal de la zona de estudio es roca ígnea extrusiva básica y, suelo aluvial en las zonas cercanas al lago de Cuitzeo y las Presas de Queréndaro y Cointzio; además, de que las fallas presentan en su mayoría, una dirección suroeste – noreste y oeste-este.

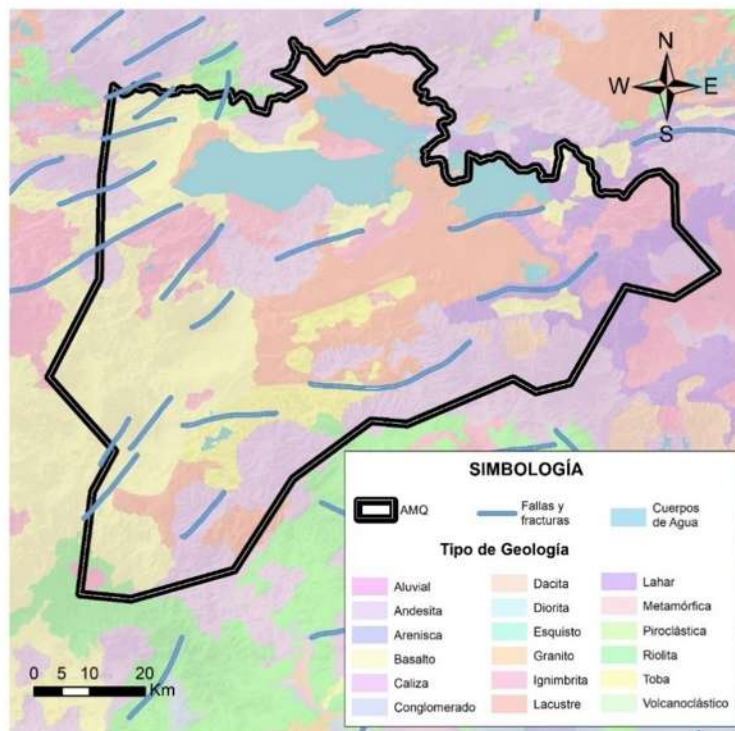


Figura 17. Geología, fallas y fractura de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Los valores de profundidad al nivel estático varían de 10 a 200 m, con valores menores de 10 m registrados 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 (CONAGUA, 2023a)

GESTIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS E HIDROMÉTRICOS

Estaciones Meteorológicas

Se tiene una revisión de las estaciones que se localizan en un buffer de 30 km con respecto a la zona de estudio, lo que nos da un total de 77 estaciones, las cuales fueron descartándose hasta llegar a 44 estaciones que se encuentran operando y a las cuales se le realizaron las pruebas de homogeneidad e independencia; al final y de acuerdo con los resultados de las

pruebas, se tiene un total de 30 estaciones meteorológicas que se utilizarán para la modelación superficial, las cuales se muestran en el Anexo B.

Las estaciones fueron seleccionadas por la cantidad de años en servicio, la información efectiva, el bajo porcentaje de vacíos, la distancia a la que se encuentran (menos de 30 km) y con una correlación superior a 0.75.

Además, se tiene que en Tabla 24, (presente en el Anexo B), se muestran los resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia en las estaciones meteorológicas revisadas. Las estaciones que se utilizan deben pasar al menos cuatro de las seis pruebas de homogeneidad, además de la prueba de independencia de Límites de Anderson. 30 estaciones son las que van a utilizarse.

Cabe destacar que en la modelación superficial se realizan polígonos de Thiessen para cada cuenca, de tal forma que se conozca la influencia que tendrá cada estación y, de esta forma, que se realicen las series en las estaciones ficticias, fijadas al centro de gravedad de cada cuenca.

Estaciones Hidrométricas

Para las estaciones hidrométricas, se debe de tener especial cuidado con que las estaciones sean homogéneas, lo que quiere decir que no hay un salto importante o un cambio en la tendencia, que haga que la modelación no se pueda reproducir; además sabemos que el valor de coeficiente de escurrimiento C_e debe ser menor a 1 y, el módulo relativo se encuentre en el rango de valores de 3 a 12, para así, asegurar que el módulo relativo representa una estación a régimen natural.

Por esta razón, se tiene que de un estimado inicial de 74 estaciones hidrométricas que se encuentran dentro del buffer de 50 km, sólo se le aplicaron pruebas a 30 estaciones, las cuales tienen una serie continua de más de 15 años, la cual es más sencilla de modelar y, de esta forma, si se pueden realizar las pruebas de homogeneidad; por su parte, en la Tabla 25, se muestran los resultados de las pruebas realizadas a las estaciones hidrométricas. En donde

se observa que, de las 30 estaciones revisadas, únicamente 12 pueden utilizarse debido a que son homogéneas, por otra parte, no es necesario que la prueba de persistencia sea positiva, pero debe realizarse para entender el comportamiento de la estación.

De las 12 estaciones evaluadas, se tiene la revisión visual y meticulosa de 5 estaciones, de los cuales se obtiene el módulo relativo y el coeficiente de escurrimiento; en este sentido, y considerando también el número de represas que se tienen en la zona, se seleccionan 4 estaciones a modelar (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficiente de escurrimiento y módulo relativo de las estaciones hidrométricas seleccionadas.

No.	ESTACIÓN	NOMBRE	ÁREA (Km ²)	E (hm ³)	P (mm)	Ce	Mr	NÚMERO REPRESAS	PERIODO
1	12314	Queréndaro	134.26	37.55	1200	0.23	8.9	0	1969 - 1987
2	12347	Santiago Undameo	623.12	68.98	900	0.12	3.5	2	1940 - 1987
3	12415	Puente San Isidro	216.17	18.36	900	0.09	2.7	2	1960 - 1992
4	12620	Tarímbaro	94.52	10.36	900	0.12	3.5	0	1967 - 1985

Como se observa en las gráficas de escurrimiento con medias móviles (Figura 18), se tiene que la estación 12314 (Queréndaro) presenta un salto decreciente en el año de 1968, lo que indica que se tiene alguna obra que pudo haber modificado el escurrimiento natural; sin embargo, esto no es un impedimento para poder utilizarla ya que lo único que debe considerarse es el periodo de calibración que debe de utilizarse.

Las demás estaciones, no muestran un salto importante que pueda demostrar la presencia de un cambio debido a alguna obra antropogénica, por lo que se tiene que la estación genera una cuenca en régimen natural.

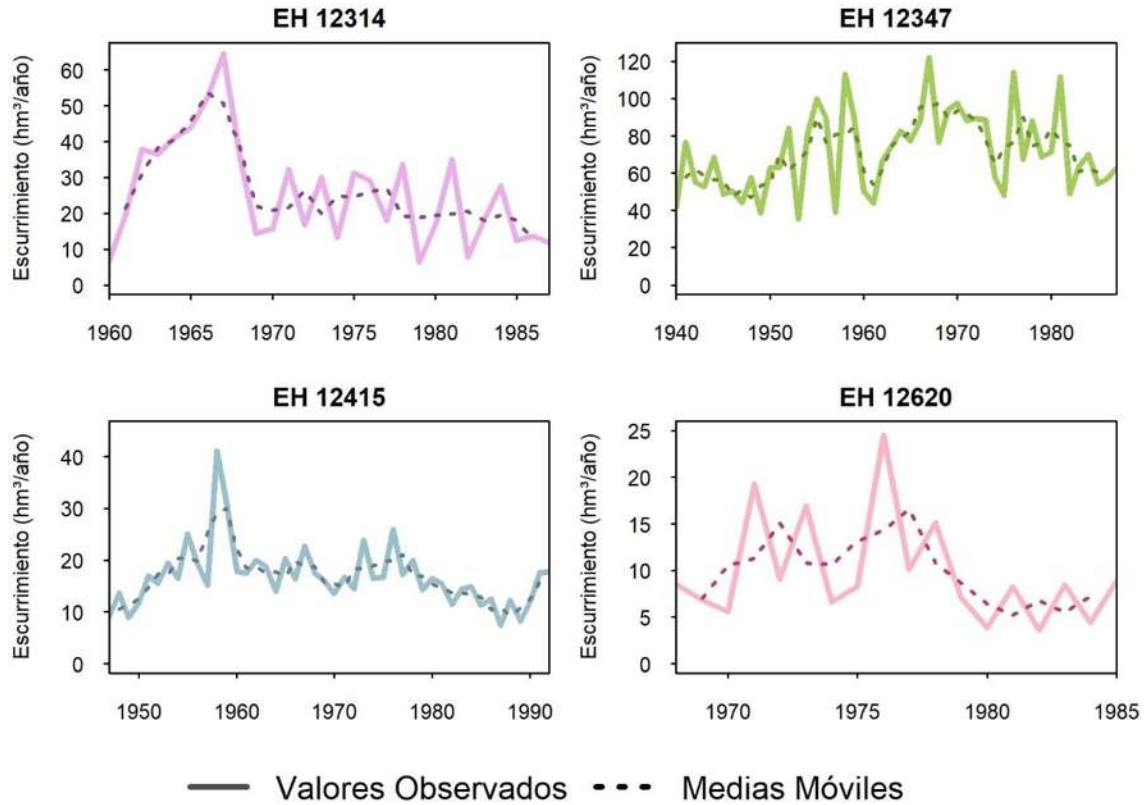


Figura 18. Volúmenes de escurrimiento y medias móviles.

MODELACIÓN SUPERFICIAL

Una vez que se tiene la información de las estaciones meteorológicas, se deben generar estaciones ficticias para las cuencas que se generan a partir de las estaciones hidrométricas que se seleccionaron. En este sentido, se muestra en la Figura 19, las cuencas de modelación 12314, 12347, 12415 y 12620.

La modelación superficial se obtiene por medio del método de humedad del suelo (SMM) en WEAP, donde se tiene el ingreso de cuatro cuencas, generadas a partir de las estaciones hidrométricas que cumplieron los requisitos necesarios.

Dado que la zona de estudio no está completamente cubierta por las cuencas de modelación, es necesario realizar las modelaciones por cuenca (de forma individual) y, posteriormente se agrupan para modelarse como una sola cuenca, como subcuencas anidadas. Como primer parte, se debe calibrar la evapotranspiración que se tiene en la cuenca y, posteriormente realizar la calibración de los escurrimientos gráfica y estadísticamente.



Figura 19. Mapa de las cuencas a modelar en WEAP con los polígonos de Thiessen generados a partir de las estaciones meteorológicas.

En las siguientes figuras (Figura 20 a Figura 23) se muestran los diagramas que se utilizan en WEAP para las modelaciones, en las cuales, se observa la cuenca, el cauce principal y la estación hidrométrica que se utiliza para tener una calibración por medio de la comparación de volúmenes (en este caso, mensuales); además, de los elementos que requiere el software (relaciones río – cuenca y cuenca – acuífero), lo que permite obtener distintos elementos del ciclo hidrológico presentes en la cuenca.

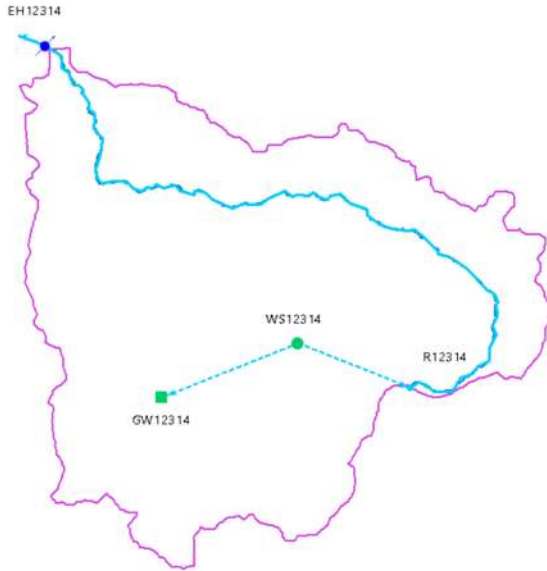


Figura 20. Esquema de modelación de la cuenca 12314 en WEAP.



Figura 21. Esquema de modelación de la cuenca 12347 en WEAP.

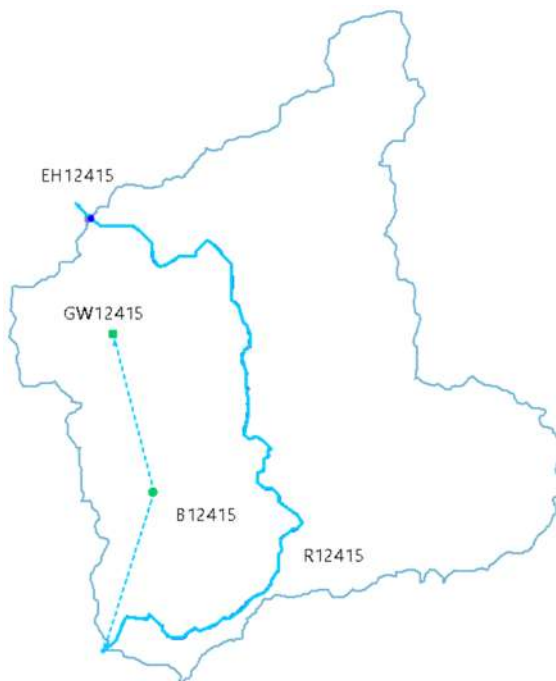


Figura 22. Esquema de modelación de la cuenca 12415 en WEAP.



Figura 23. Esquema de modelación de la cuenca 12620 en WEAP.

Para cada una de las cuencas se propone como primer punto, la calibración de la evapotranspiración, la cual compara los valores medios obtenidos por medio del método de

Thornthwaite contra los valores de la evapotranspiración real (actual) calculadas por WEAP por el método de Penman Moteith; en la Tabla 5, se presentan los errores (en mm) de las medias de los errores de las evapotranspiraciones para cada cuenca modelada.

Tabla 5. Errores en la evapotranspiración, comparando el método de Thornthwaite y calculados por WEAP.

Cuenca	Error (mm)	Evapotranspiración por Thornthwaite (mm)	Evapotranspiración por WEAP (mm)
12314	3.29	61.28	57.99
12347	-3.56	76.20	79.76
12415	5.26	65.04	59.78
12620	0.41	65.31	64.90

De los nueve parámetros que se pueden modificar en WEAP, se utiliza el parámetro Kc (coeficiente de cultivo) para modificar la evapotranspiración; es importante recalcar que una vez que se tiene un error bajo (< 10%), el coeficiente Kc se queda fijo y ahora, se calibran los escurrimientos al modificar los parámetros RRF (factor de resistencia a la escorrentía), S_w (capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces) y f (dirección preferencial del flujo).

Tanto el valor de RRF como el de S_w, se modifican con una variación mensual que se mantiene a lo largo del periodo de modelación, en este sentido, no se puede aplicar para una variación anual debido a que existiría una periodicidad que no se puede mantener si se extiende la calibración.

Los periodos de calibración varían de acuerdo con la información disponible, de esta forma se tienen los periodos de calibración siguientes:

- Cuenca 12314 → 1969 – 1987
- Cuenca 12347 → 1951 – 1987
- Cuenca 12415 → 1969 – 1988
- Cuenca 12620 → 1967 – 1983

La primera cuenca a modelar es la cuenca 12314 “Queréndaro”; como se puede observar en la gráfica de la Figura 24, la tendencia de los escurrimientos simulados y observados a lo largo del tiempo es correcto, sin embargo, se tiene una sobreestimación del volumen de

escorrentía en los meses de octubre y junio; se observa que en año de 1981, no fue posible alcanzar los volúmenes observados en la estación hidrométrica, razón por la cual, el indicador de bondad de ajuste de Nash – Sutcliffe es el más bajo de las cuatro cuencas, al cual apenas alcanza el rango de una buena calibración (Tabla 6). Esta cuenca no cuenta con un valor de gasto base.

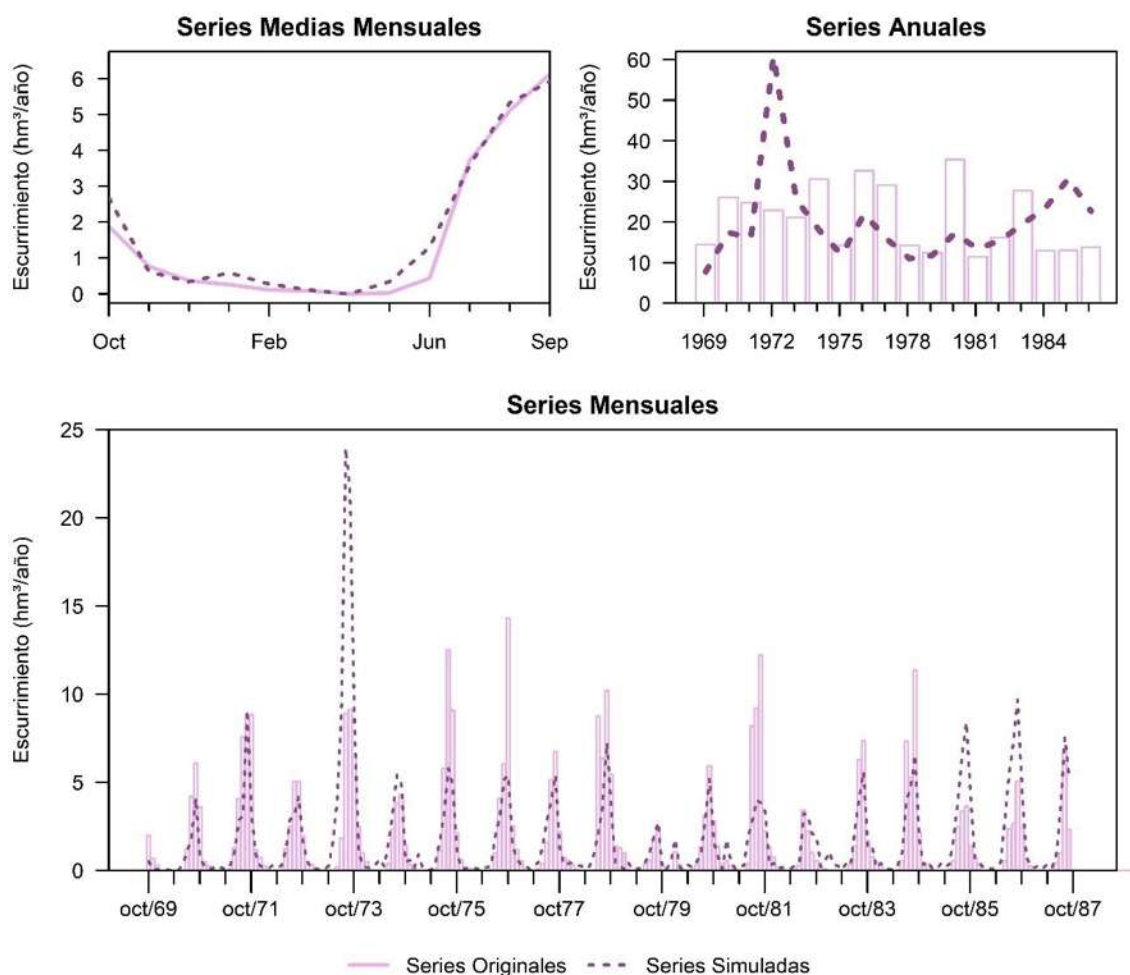


Figura 24. Resultados de la modelación de la cuenca 12314.

En la Figura 25 que representa a la estación hidrométrica “Santiago Undameo”, se puede apreciar que las tendencias entre los volúmenes simulados y observados son correctas y se limitan correctamente los meses con escurrimiento y los meses de estiaje. Se tiene que la cuenca 12347 es la que tiene la mejor calibración, lo cual se observa en la Tabla 6, donde esta cuenca, los valores de los indicadores de bondad de ajuste son los más altos. Para realizar la

calibración de la cuenca, se considera que el cauce principal tiene $0.7776 \text{ hm}^3/\text{mes}$ como gasto base.

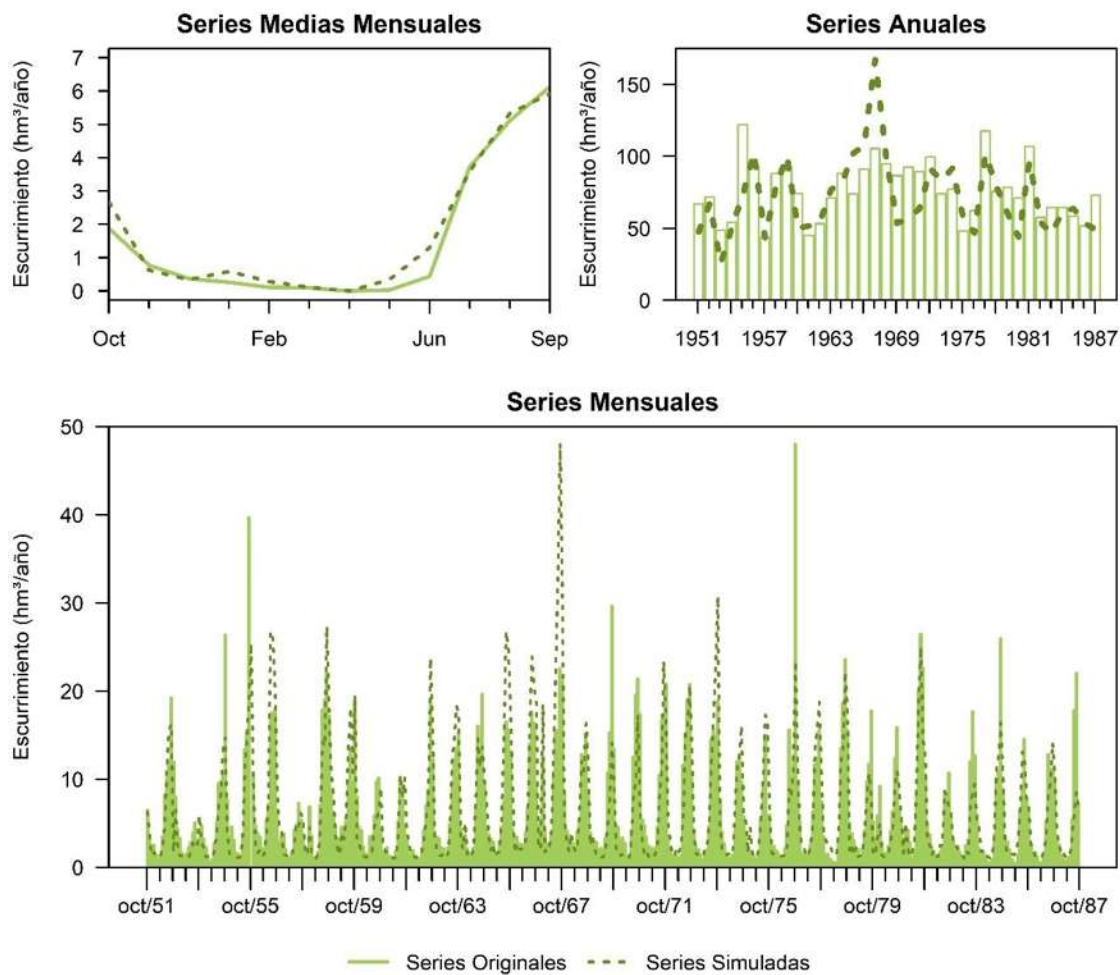


Figura 25. Resultados de la modelación de la cuenca 12347.

Para la calibración visual de la cuenca 12415 “Puente San Isidro” tiene un comportamiento bastante bueno. Pese a que no se tiene una tendencia exacta, los volúmenes simulados que quedan por debajo y por encima de los observados se compensan (Figura 26), y de esta forma, se logran indicadores de bondad de ajuste satisfactorios (Tabla 6). Para esta cuenca, también se considera un gasto base de 0.5184 hm^3 .

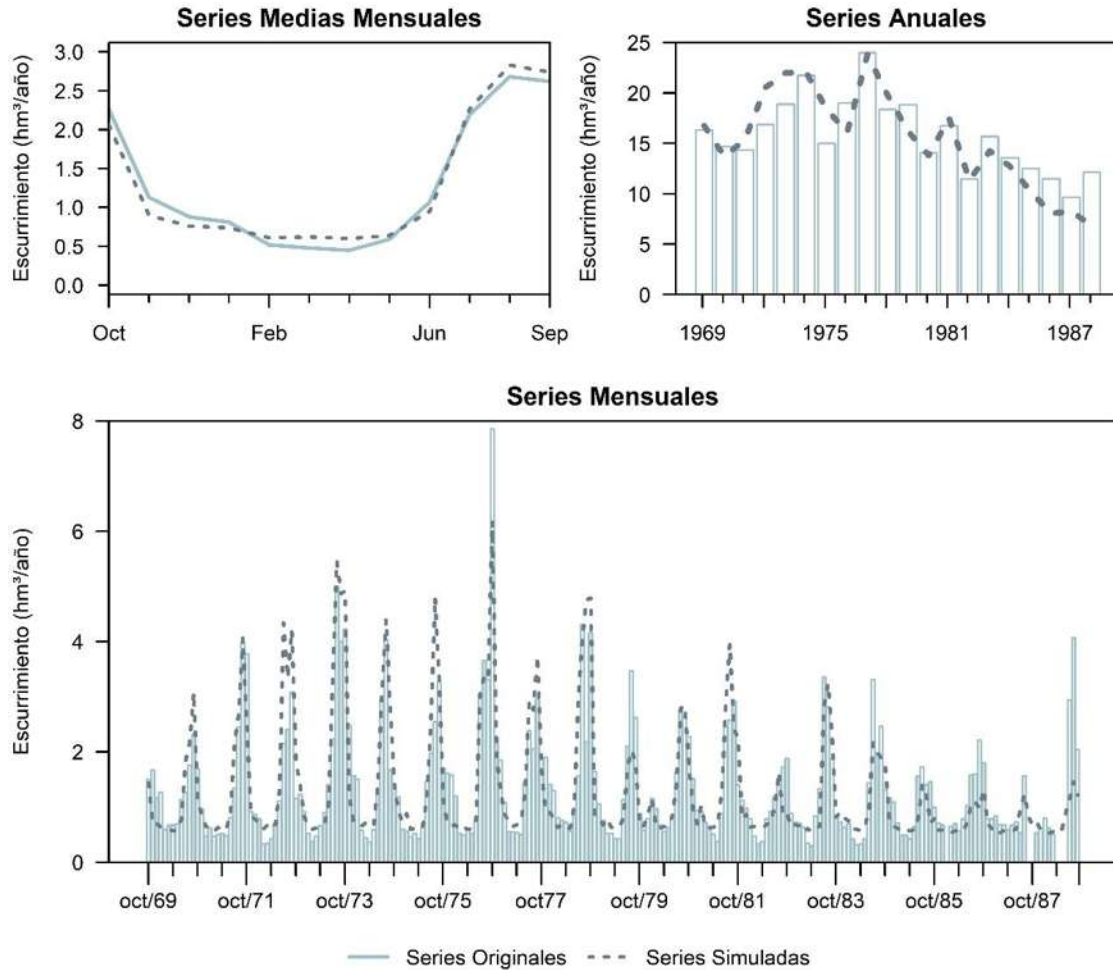


Figura 26. Resultados de la modelación de la cuenca 12415.

Por último, la cuenca 12620 “Tarímbaro” tiene una tendencia bastante buena con respecto a los volúmenes medios mensuales (Figura 27), esto, considerando que los volúmenes que se manejan en dicha cuenca son bastante bajos y las variaciones que se tienen entre volúmenes simulados y observados son bastante pequeños. Por otra parte, la razón por la cual los valores de los indicadores de bondad de ajuste son bajos (Tabla 6), se debe a que, los volúmenes se compensan, pero no cumplen con una tendencia adecuada. Para esta cuenca, no se utiliza un gasto base.

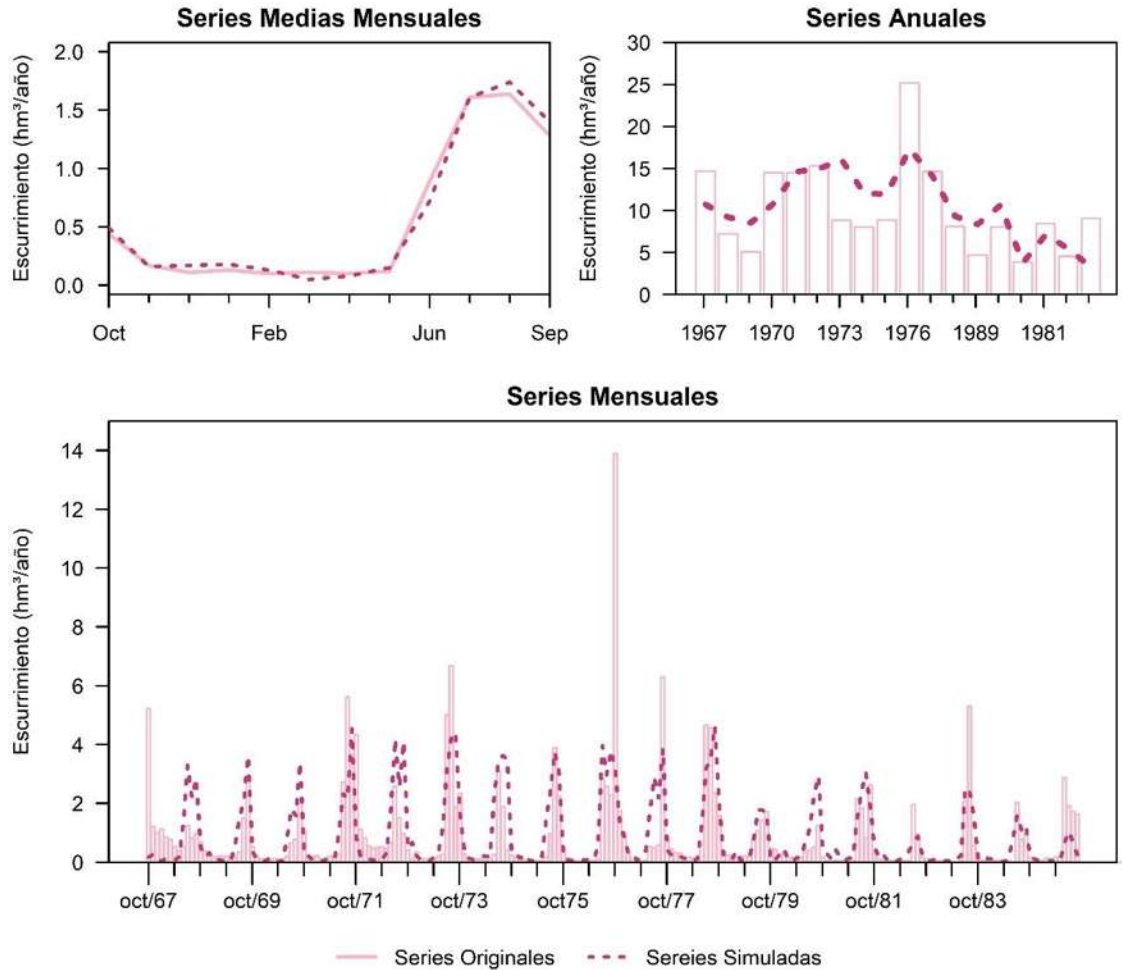


Figura 27. Resultados de la modelación de la cuenca 12620.

En la Tabla 6, se tiene el resumen de la calibración estadística de las cuatro cuencas modeladas en WEAP, en la cual, se debe de observar que los parámetros son valores considerados como correctos al encontrarse dentro del rango de buenos a satisfactorios.

Tabla 6. Resultados de los indicadores de bondad de ajuste de la modelación superficial.

Indicadores de Bondad de Ajuste	CUENCA			
	12314	12347	12415	12620
Nash Sutcliffe	0.5005	0.6588	0.6464	0.5466
Ln Nash Sutcliffe	0.6217	0.8052	0.7250	0.5077
Pearson	0.7103	0.8386	0.8200	0.7548
Coeficiente de Simetría	0.993347	0.995730	0.997886	0.999826

Como se observa en la Figura 28, con los parámetros efectivos, se pueden realizar

modelaciones de acuerdo con la disponibilidad de la información meteorológica para extender la serie modelada a cualquier periodo de interés, de la misma manera, puede ser aplicada a diferentes escenarios y, a cualquier cuenca generada.

También se observa que si no se tuviera un tratamiento a los datos hidrometeorológicos, no se podría representar adecuadamente el gasto; esto genera que las series obtenidas de escurrimiento se encuentren muy por debajo de la media. Ahora bien, los valores obtenidos en la serie con periodo extendido y con el tratamiento de la información tiene valores bastante similares a los observados la serie original.

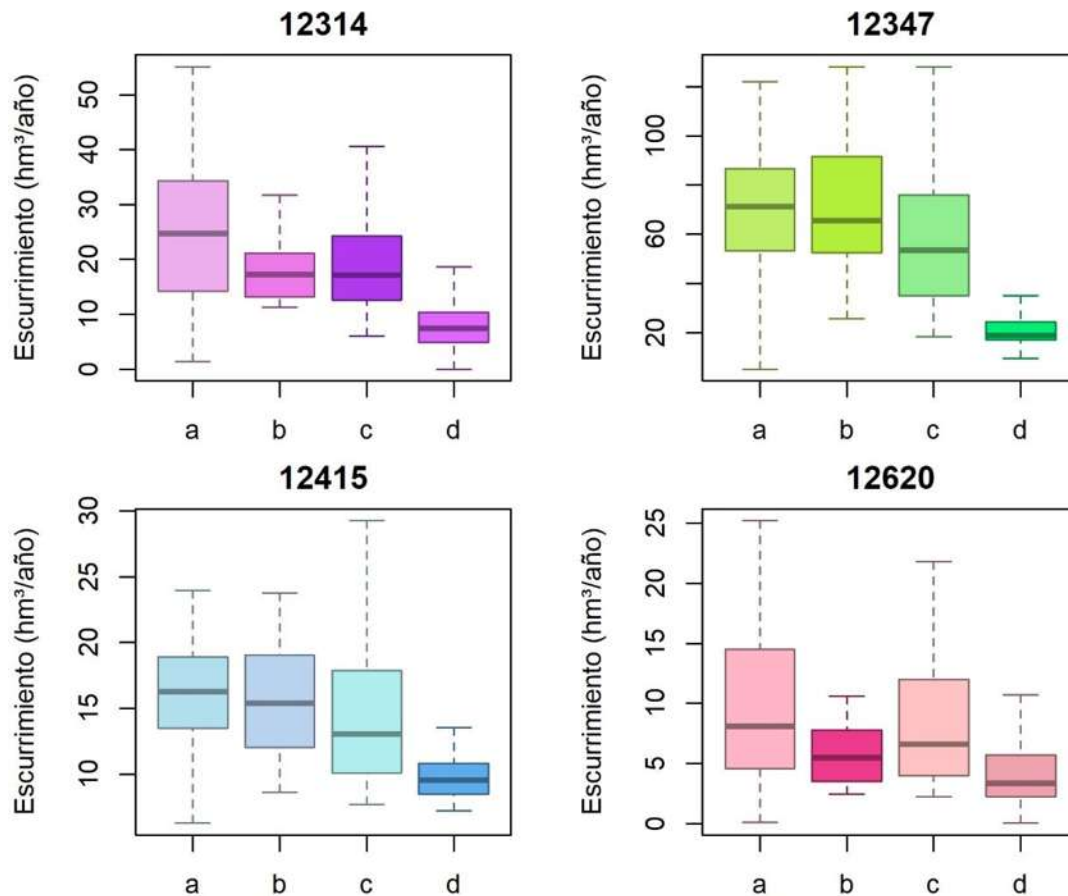


Figura 28. Modelaciones en subcuencas. Serie original (a), periodo de calibración (b), periodo extendido (c) y modelación sin tratamiento (d).

MODELACIÓN SUPERFICIAL AGRUPADA

Con respecto a la modelación agrupada de la zona de estudio, se dividió la zona en estudio en 12 subcuencas (Figura 29), divididas en 5 zonas (que se presentan en la Tabla 7), por medio de las cuales, se realiza un traslado de parámetros, con lo que resulta sencilla la modelación de la zona completa.

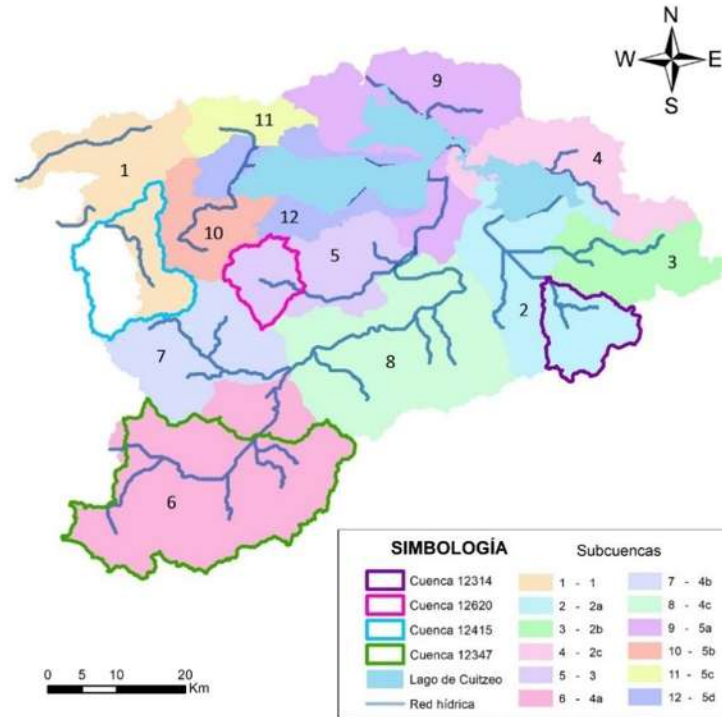


Figura 29. División de las 12 subcuencas de modelación y localización de las 4 cuencas modeladas en WEAP.

Tabla 7. Distribución de las 12 subcuencas en las 5 zonas de modelación agrupada.

NUM	CUENCA	NUM	CUENCA
1	1	7	4b
2	2a	8	4c
3	2b	9	5a
4	2c	10	5b
5	3	11	5c
6	4a	12	5d

La modelación que se realiza en WEAP se hace de forma conjunta y, el esquema que se genera se muestra en la Figura 30, donde se pueden observar los elementos base (estación hidrométrica, relación río – cuenca y cuenca – acuífero) para cada una de las 12 subcuencas.

También se tiene que de acuerdo con los polígonos de Thiessen que se muestran en la Figura 19, la modelación agrupada se apoya en 21 estaciones meteorológicas, que se presentan en la Tabla 8.

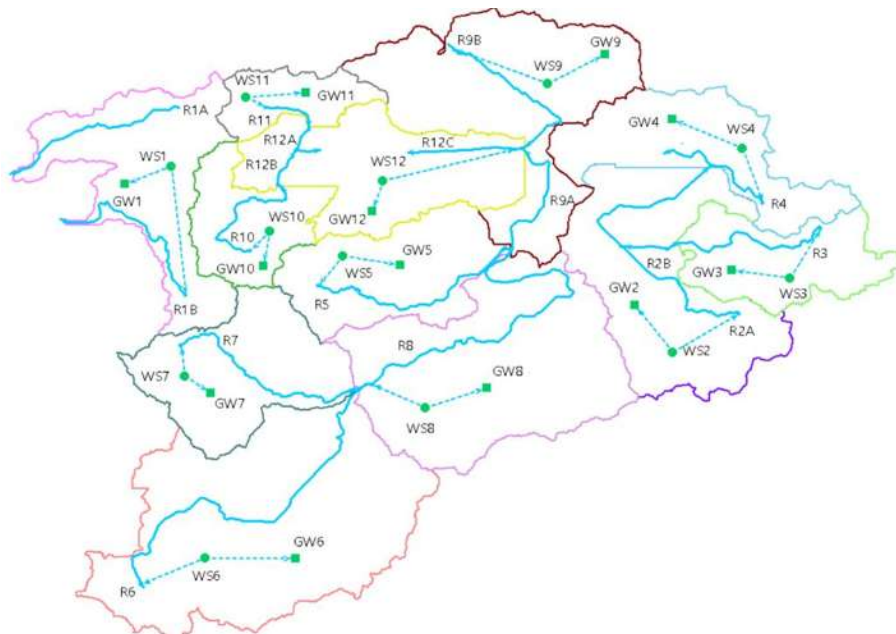


Figura 30. Esquema metodológico de la modelación agrupada en WEAP.

Tabla 8. Estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación superficial en WEAP.

NUM	CUENCA	ESTACIONES						
1	1	11010	16050	16155	16250	16254		
2	2a	16016	16045	16052	16096	16105	16145	16235
3	2b	16052	16096	16145	16235			
4	2c	11002	16016	16052	16145			
5	3	16016	16027	16028	16080	16250	16254	
6	4a	16022	16055	16080	16087	16109	16254	
7	4b	16022	16080	16254				
8	4c	16022	16028	16045	16055	16080	16081	16105
9	5a	16016	16027	16105	16250			
10	5b	16050	16250	16254				
11	5c	11010	16250					
12	5d	16016	16027	16250				

Para el traslado de parámetros, se debe de considerar si es que existe alguna relación entre las cuencas, ya sea que están anidadas a una cuenca más grande o que es parte de la zona.

Para ello, se considera que las cuencas de la zona 1 se anidan a la cuenca 12415 “Puente San Isidro”, ya que esta cuenca es la cuenca de cabecera de esta zona, así mismo, la cuenca 12314 “Queréndaro” se localiza en la cabecera de la zona 2. La zona 3 se anida a la cuenca 12620 “Tarímbaro”, ya que, al compartir el mismo cauce el traslado es prácticamente automático. Para la zona 4 que se localiza al sur del acuífero, los parámetros que se utilizan son los de la cuenca 12347 “Santiago Undameo”, la cual se encuentra en la cabecera de la zona y, se trasladan los parámetros a las cuencas vecinas que descargan hacia el mismo cauce que nace en la misma cuenca de Santiago Undameo.

Por último, la zona 5 es un poco más complicada ya que no se puede anidar a ninguna cuenca que ya esté modelada, pero es cercana a las cuencas 12620 “Tarímbaro” y 12347 “Santiago Undameo”, esta última tiene conexión desde donde nace el río hasta el lago de Cuitzeo; se debe de considerar que esta zona es la más compleja a modelar, ya que todas son cuencas de descarga directa al lago de Cuitzeo.

Como parte de la validación de la modelación, se tiene que realizar un balance hídrico de la zona, donde es importante considerar que no es necesario que se tenga un cierre en cero (lo cual es bastante complicado), sin embargo, se busca un error lo bastante bajo para que este pueda ser despreciado. Como se muestra en la Tabla 9, los errores que se presentan en el balance son relativamente bajos (< 10%), con ellos, se calcula un error global, con un valor de 6.02%, el cual es un buen indicador de la modelación.

Cabe destacar cuando se realiza el método de traslado de parámetros, es importante realizar el balance, ya que este proceso puede generar incertidumbre y modificar los valores que naturalmente se tendrían en la zona (principalmente modificando la evapotranspiración) el cual es un valor sumamente sensible en el método de humedad del suelo (SMM).

Tabla 9. Balance hídrico de las 12 subcuencas de modelación.

	INFORMACIÓN GENERAL											
	WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6	WS7	WS8	WS9	WS10	WS11	WS12
PRECIPITACIÓN	64.5	59.9	65.5	57.1	62.0	81.0	76.5	65.0	57.7	66.5	62.7	56.7
ETR	59.6	52.0	60.1	53.9	57.8	69.2	65.6	55.7	52.5	56.5	53.5	51.4

ESCURRIMIENTO	2.2	4.3	2.8	1.3	2.4	3.6	3.2	2.8	2.2	3.1	3.0	0.6
INFILTRACIÓN	2.1	2.0	2.3	1.6	1.9	3.5	3.2	2.6	1.6	2.8	2.6	1.6
INTERFLUJO	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.6	0.6	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3
ASM	26.6	29.0	27.5	25.0	24.1	27.3	24.8	24.6	34.6	32.6	27.7	23.5
DSM	26.4	25.3	24.3	22.1	22.8	27.3	24.8	25.1	30.4	28.6	24.2	22.2
BALANCE	0.35	4.90	3.15	2.88	0.71	4.12	3.91	2.91	5.40	7.56	6.63	4.15
ERROR (%)	0.54	8.18	4.80	5.04	1.14	5.08	5.11	4.47	9.35	11.37	10.56	7.32

Al tener la modelación de las 12 subcuencas, se obtiene una recarga distribuida en la zona de estudio, información que es base para la modelación subterránea.

MAPAS DE PELIGROSIDAD

Se presentan los mapas PGR (*Potential Groundwater Recharge*) y DRASTIC como parte de los escenarios de peligrosidad que tiene el acuífero.

Ambos mapas se conforman de mapas temáticos procesados con la calculadora de mapas a través de un SIG, de forma en la que, a partir de una ponderación de estos, se tiene un mapa generado con la información que indica: zonas con mayor capacidad de recarga en el acuífero (PGR) y zonas con mayor potencial de contaminación por escurrimiento superficial (DRASTIC).

Mapa PGR

El mapa PGR requiere mapas distribuidos los parámetros que interfieren en la infiltración el agua al medio poroso, con ello, se otorga un porcentaje de influencia, para lograr ponderarlo:

- Hidrogeología (20%) (Figura 31).
- Densidad de fallas (10%) (Figura 32).
- Tipo de suelo (10%) (Figura 33).
- Uso de suelo (15%) (Figura 34).
- Densidad de drenaje (15%) (Figura 35).
- Pendiente (15%) (Figura 36).
- Precipitación (15%) (Figura 37).

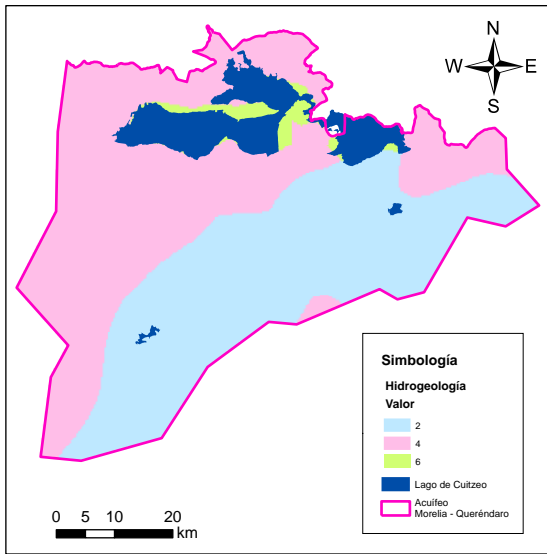


Figura 31. Mapa de Hidrogeología para el mapa PGR.

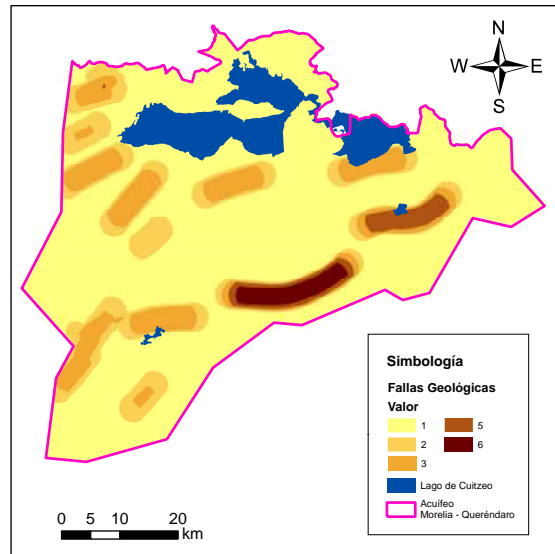


Figura 32. Mapa de Densidad de Fallas Geológicas para el mapa PGR.

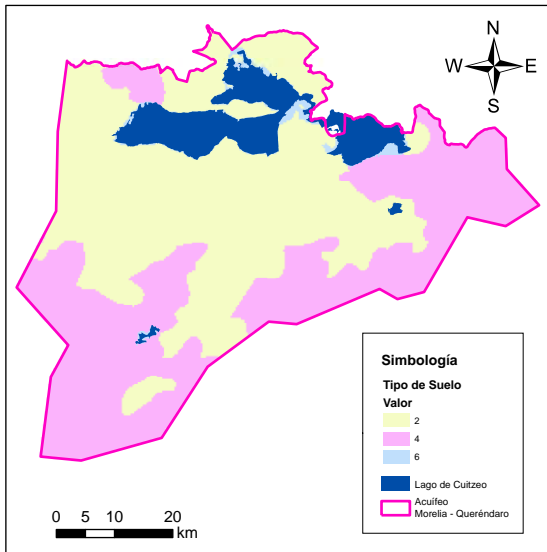


Figura 33. Mapa de Tipo de Suelo para el mapa PGR.

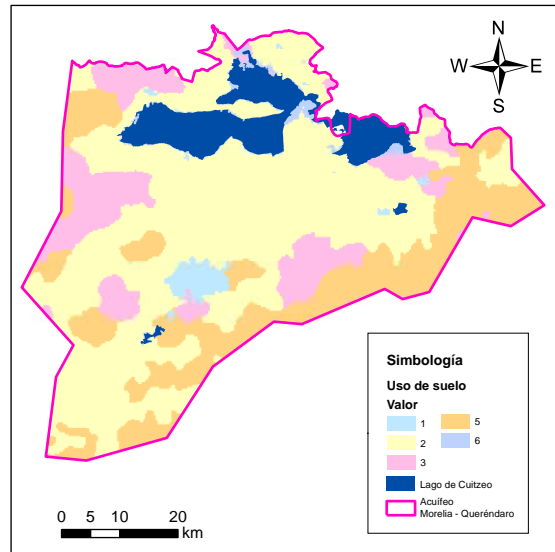


Figura 34. Mapa de Uso de Suelo para el mapa PGR.

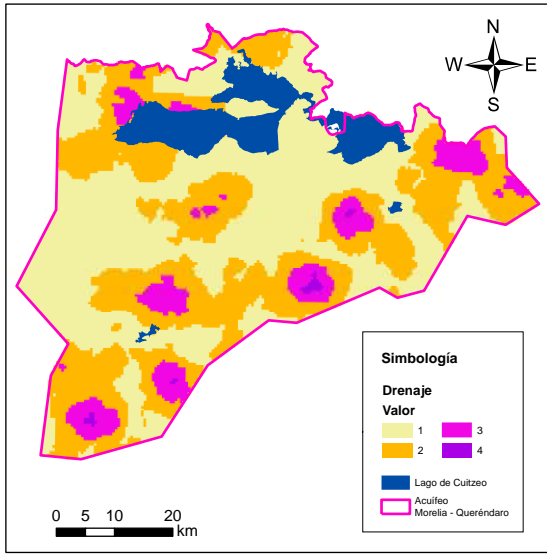


Figura 35. Mapa de Densidad de Drenaje para el mapa PGR.

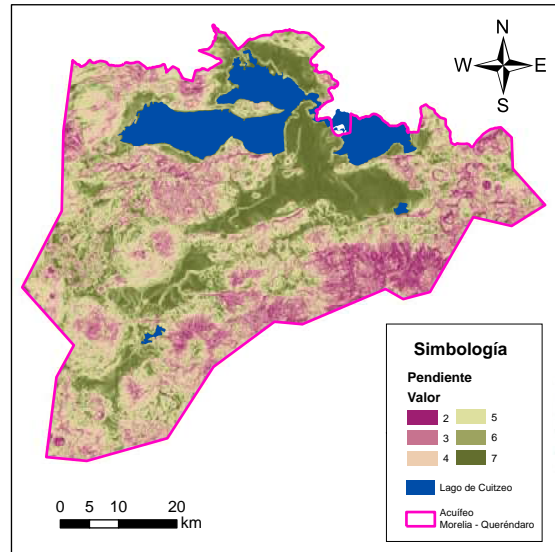


Figura 36. Mapa de Pendiente para el mapa PGR.

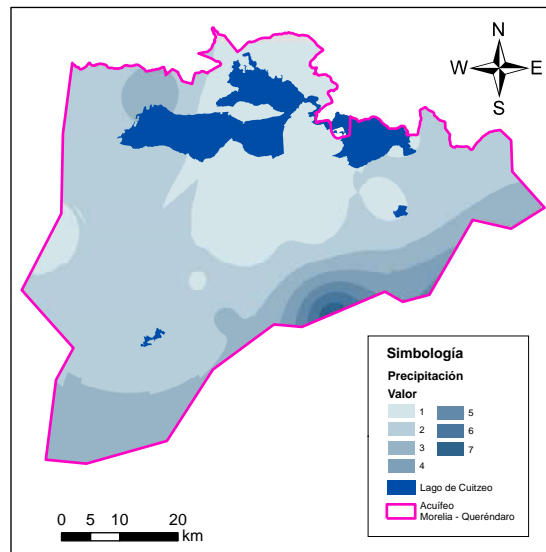


Figura 37. Mapa de Precipitación para el mapa PGR.

En la Tabla 10, se muestra las clasificaciones utilizadas para los mapas independientes, considerando que el valor 7 es el que presenta mayor capacidad de recarga y, el valor 1 es el que se considera como de poca influencia para la recarga.

Tabla 10. Valores de reclasificación para la realización del mapa PGR.

Parámetro	Característica	Valor de Reclasificación
Hidrogeología	Permeabilidad Baja Media	2
	Permeabilidad Media Alta	4

	Permeabilidad Alta	6
Densidad de Fallas	Muy Baja	1
	Baja	2
	Media	3
	Alta	5
	Muy Alta	6
Tipo de Suelo	Fino	2
	Medio	4
	Aluvial	6
Uso de Suelo	Agrícola	2
	Desnudo	3
	Urbano	1
	Bosque	5
	Cuerpo de Agua	6
	Matorral	3
	Pastizal	3
Densidad de Drenaje	Muy Baja	1
	Baja	2
	Media	3
	Moderada Alta	4
Pendiente	Llana (<2%)	7
	Suave (<6%)	6
	Inclinado (<13%)	5
	Moderado Escarpado (<25%)	4
	Escarpado (<55%)	3
	Muy Escarpado (>55%)	2
Precipitación	Muy Baja (654 – 752)	1
	Baja (752 – 849)	2
	Media (849 – 946)	3
	Moderada Alta (946 – 1044)	4
	Alta (1044 – 1141)	5
	Muy Alta (1141 – 1238)	6
	Demasiado Alta (1238 – 1336)	7

Se tiene entonces que, los valores reclasificados son utilizados para crear el mapa PGR, mostrado en la Figura 38, donde se observa que los sitios con mayor capacidad de recarga se localizan cerca del Lago de Cuitzeo y en la falda de los cerros que generan el parteaguas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Se observa que los sitios con menor capacidad de recarga se localizan en las inmediaciones del municipio de Morelia, donde se tiene un uso y tipo de suelo menos favorables para la infiltración.

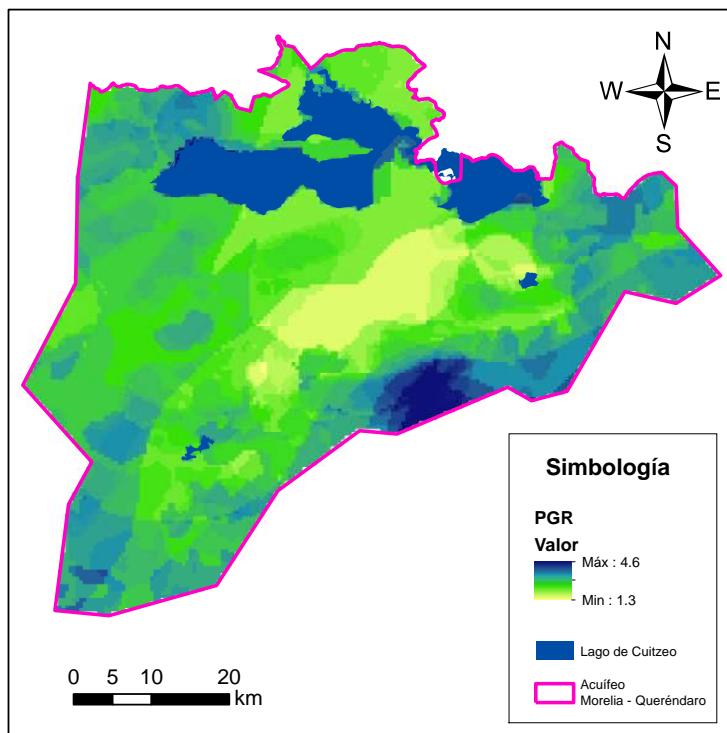


Figura 38. Mapa de potenciales zonas de recarga (PGR) en el acuífero Morelia – Queréndaro.

Mapa DRASTIC

De forma similar al mapa PGR, el mapa DRASTIC requiere mapas distribuidos de:

- D → Nivel estático (22%) (Figura 39).
- R → Recarga superficial media (17%) (Figura 40).
- A → Medio acuífero (13%) (Figura 41).
- S → Tipo de suelo (9%) (Figura 42).
- T → Topografía (4%) (Figura 43).
- I → Medio geológico (22%) (Figura 44).
- C → Conductividad Hidráulica (13%) (Figura 45).

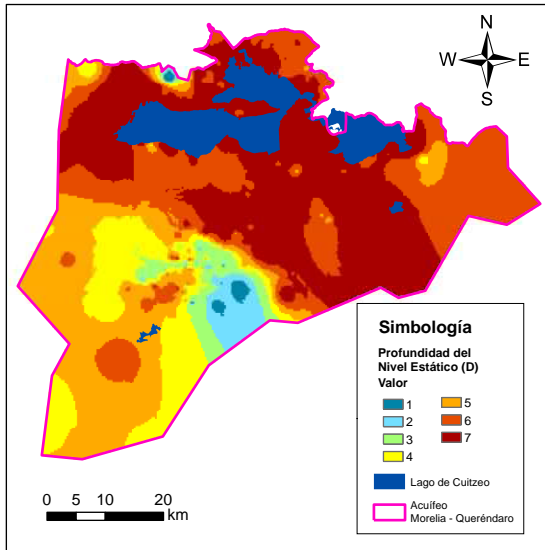


Figura 39. Mapa de Profundidad de Nivel Estático (D) para el mapa DRASTIC.

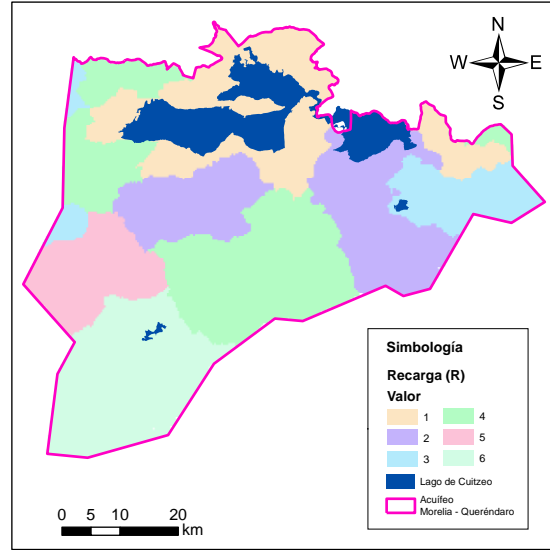


Figura 40. Mapa de Recarga Natural (R) para el mapa DRASTIC.

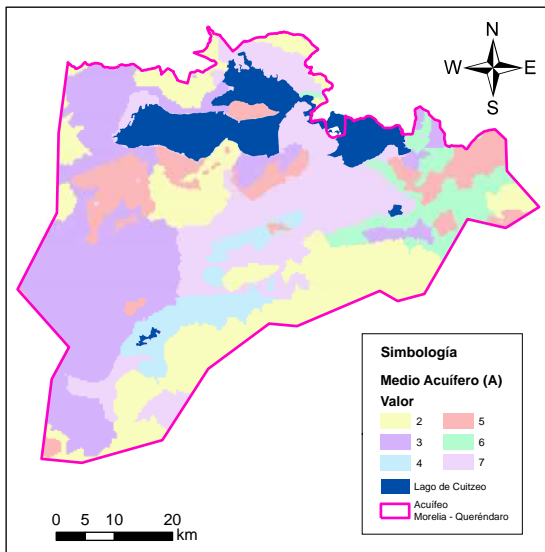


Figura 41. Mapa de Profundidad de Medio Acuífero (A) para el mapa DRASTIC.

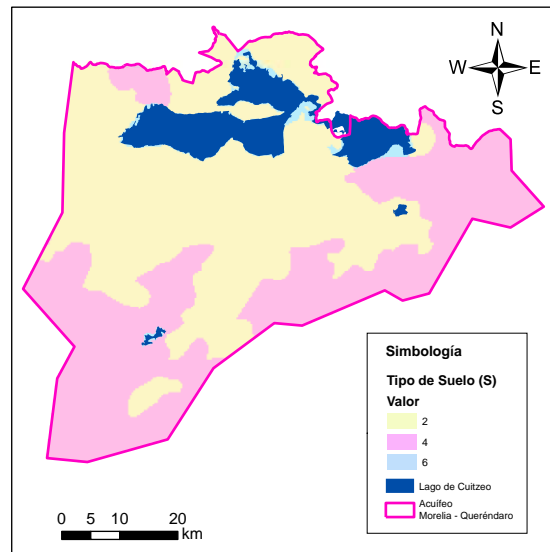


Figura 42. Mapa de Tipo de Suelo (S) para el mapa DRASTIC.

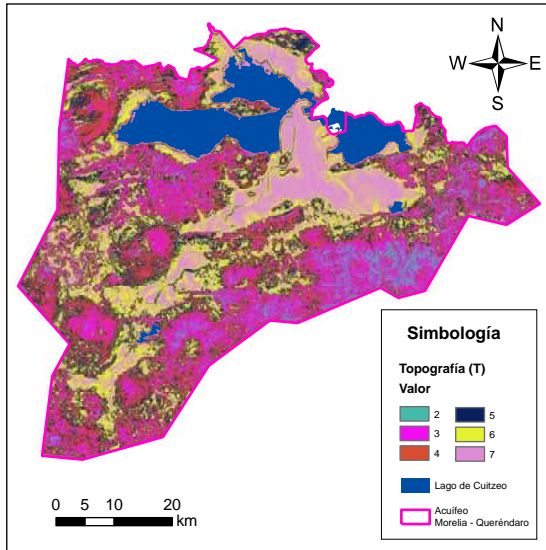


Figura 43. Mapa de Topografía (T) para el mapa DRASTIC.

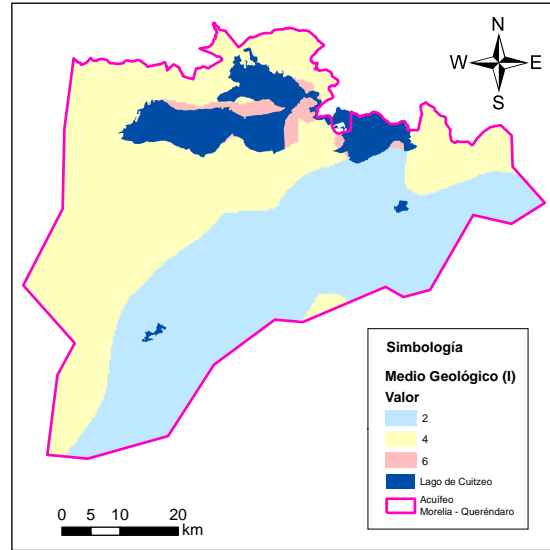


Figura 44. Mapa de Medio Geológico (I) para el mapa DRASTIC.

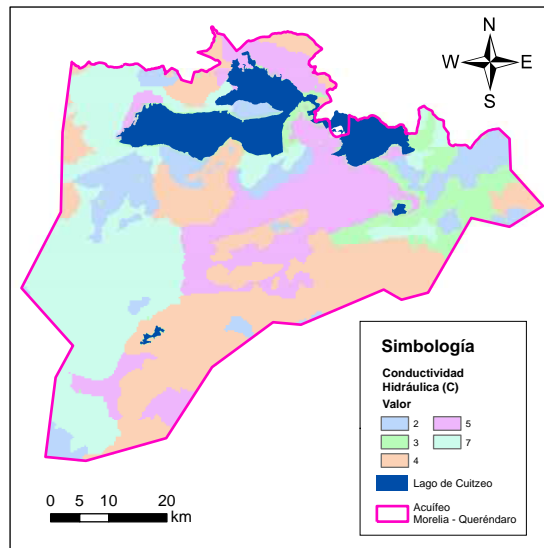


Figura 45. Mapa de Profundidad de Conductividad Hidráulica (C) para el mapa DRASTIC.

De forma similar que con el mapa PGR, se presenta en la Tabla 11 la reclasificación de los parámetros que interfieren en la contaminación del acuífero, considerando así, que el valor con mayor riesgo de contaminación corresponde al 7 y, el valor con menos capacidad de contaminación el 1.

Tabla 11. Valores de reclasificación para la realización del mapa PGR.

Parámetro	Característica	Valor de Reclasificación
D → Nivel estático	< 22 m	7
	22 - 42 m	6
	42 - 62 m	5
	62 - 86 m	4
	86 - 121 m	3
	121 - 157 m	2
	> 157 m	1
R → Recarga superficial media	< 1000 mm/año	1
	1000 - 1800 mm/año	2
	1800 - 2400 mm/año	3
	2400 - 3000 mm/año	4
	3000 - 3500 mm/año	5
	3500 - 4000 mm/año	6
A → Medio acuífero	Andesita	4
	Arenisca	5
	Basalto	7
	Caliza	4
	Dacita	4
	Granito	5
	Lacustre	5
	Lahar	3
	Piroclástica	3
	Riolita	2
Toba	4	
S → Tipo de suelo	Fino	2
	Medio	4
	Aluvial	6
T → Topografía	Llana (<2%)	7
	Suave (< 6%)	6
	Inclinado (<13%)	5
	Moderado Escarpado (< 25%)	4
	Escarpado (<55%)	3
	Muy Escarpado (>55%)	2
I → Medio geológico	Permeabilidad Baja Media	2
	Permeabilidad Media Alta	4
	Permeabilidad Alta	6
C → Conductividad Hidráulica	Andesita	2
	Basalto	4
	Conglomerado	3
	Dacita	2
	Ignimbrita	4
	Lacustre	4
	Lahar	4
	Piroclástico	3
	Riolita	4
Toba	4	

Con los valores mostrados en la Tabla 11 y, a partir de la calculadora de mapas, se tiene el mapa DRASTIC, el cual se muestra en la Figura 46 y, se obtiene que los valores con mayor capacidad de contaminación se encuentran en las inmediaciones del Lago de Cuitzeo, así

como en la parte baja de los cerros que conforman el parteaguas de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

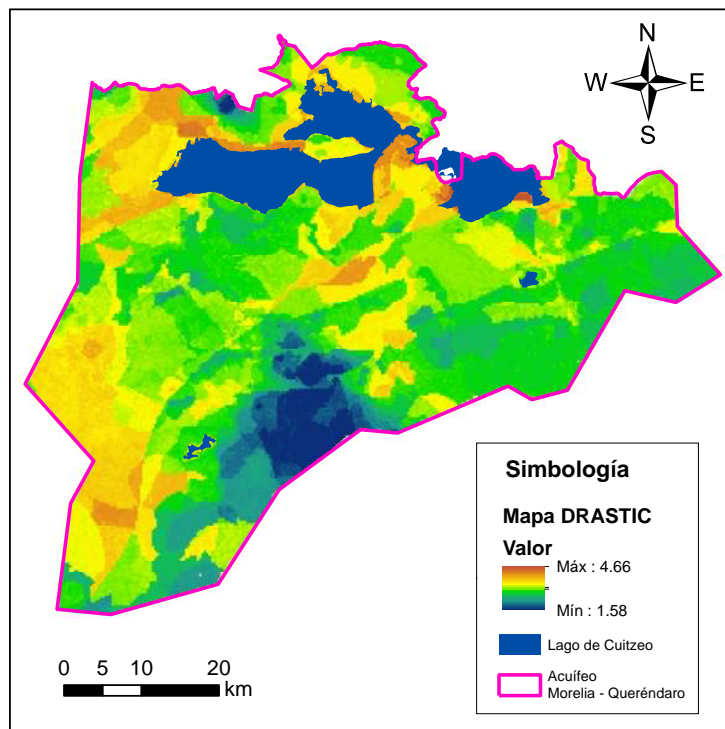


Figura 46. Mapa DRASTIC en el acuífero Morelia – Queréndaro.

La principal diferencia con el mapa PGR es que en el caso del mapa DRASTIC, la zona que corresponde al municipio de Morelia si tiene capacidad de contaminación, por lo que para ello se propone la creación del mapa PGR – DRASTIC (Figura 47), en el cual, se considera la unión de ambos mapas, ponderándolos con un factor del 50% y, considerando entonces que se tiene que un nuevo mapa reclasificado con un rango de 1 – 7, siendo 1 el valor más favorable donde no se presenta contaminación ni recarga y, el 7 el valor más crítico, con mayor posibilidad de recarga y por ende, de contaminación.

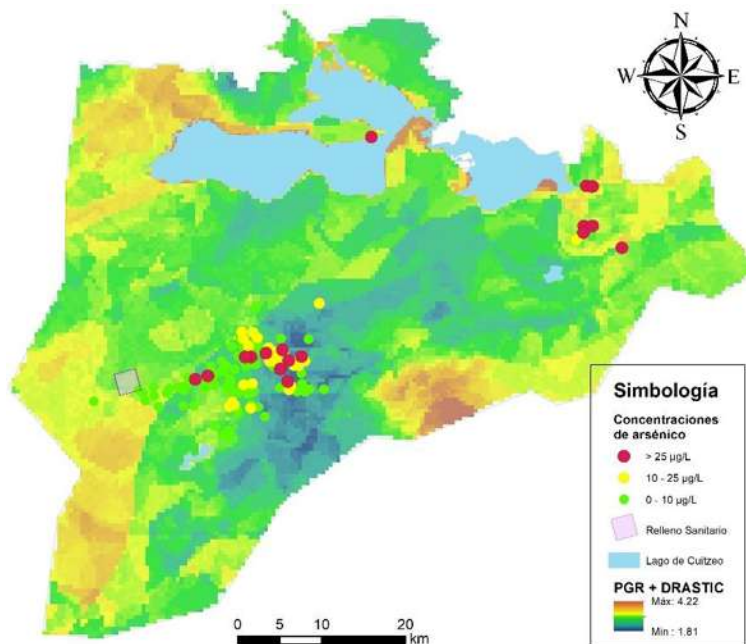


Figura 47. Mapa de PGR – DRASTIC en el AMQ con presencia de arsénico y relleno sanitario.

En el mapa de la Figura 47, se muestra que el sitio en donde se encuentra el relleno sanitario tiene una recarga y una vulnerabilidad ante la contaminación moderada; mientras que las concentraciones en la localidad de Morelia se encuentran en una vulnerabilidad baja, lo que permite entender que la recarga se presenta en la zona del relleno sanitario y esta, migra hacia la localidad de Morelia. Este flujo se valida posteriormente con la secuencia de Cheboratev y con las modelaciones subterráneas.

MODELACIÓN SUBTERRÁNEA

La modelación subterránea se realiza por medio de dos métodos, el primero es el tradicional, considerando una recarga homogénea en la cuenca de referencia; la segunda, es la recarga modificada por el mapa de recarga ponderada (PGR); ambos se realizan para el periodo establecido desde octubre del 2006 hasta septiembre del 2022.

MODFLOW requiere el ingreso de información distribuida por medio de matrices, se requiere tener información básica de:

- Estatus de la celda
- Elevación del terreno natural
- Espesor del acuífero
- Conductividad Hidráulica
- Coeficiente de Almacenamiento
- Recargas al acuífero (tradicional y por recarga ponderada)
- Extracciones (pozos y manantiales)
- Niveles estáticos iniciales

En general, toda la información que se ingresa a MODFLOW se debe procesar en un SIG, por medio del cual, se transforma la información distribuida a matrices; es por ello por lo que lo primero que se debe de realizar es una malla que permita que la información no se sobresature en una celda. Para este caso en particular, se generó una malla de 4km² por celda, las cuales son uniformes a lo largo de todo el acuífero y tienen una extensión de 2km por arista de cada celda.

La malla tiene un total de 1710 celdas, divididas en 973 celdas activas, 106 celdas de altura constante y 631 celdas inactivas; se debe considerar que las celdas de altura constante no consideran los ríos en la zona, ya que no se tiene conocimiento de la relación río – acuífero; por otro lado, las celdas que, si se consideran como de altura constante, son aquellas que forman parte del lago de Cuitzeo y las principales presas de la zona (Figura 48).

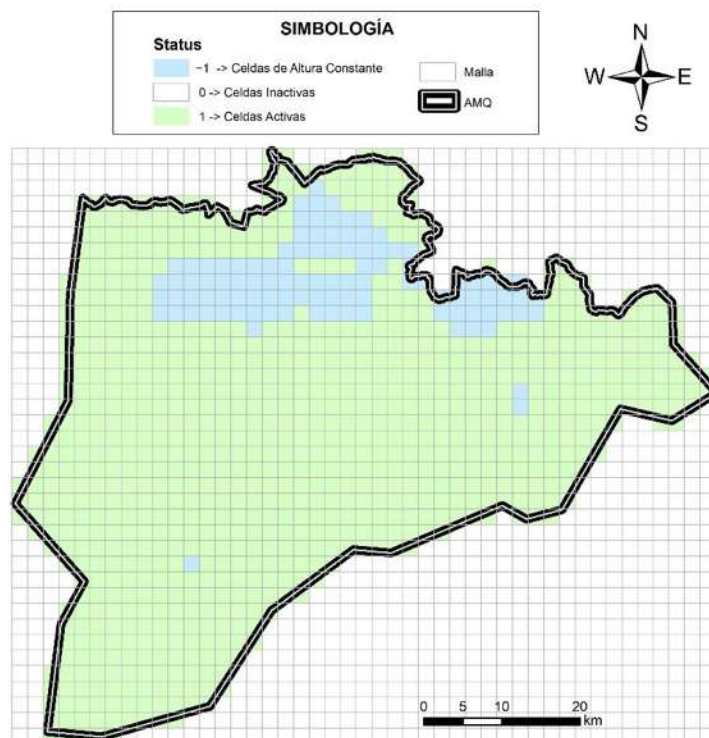


Figura 48. Estado de las celdas de modelación en MODFLOW.

Como muestra en la Figura 49, la recarga de las celdas se realiza a partir de la distribución de las cuencas modeladas en WEAP, donde se observa que no es necesario presentar las recargas las celdas de altura constante, ya que no se consideran en el proceso de cálculo.

Para este paso en Modflow, es necesario generar una matriz tipo ASCII para cada periodo de tiempo, en donde, a su vez se consideren las entradas al acuífero de acuerdo con la recarga natural obtenida por medio SMM a través de WEAP.

Dado a que este es un proceso extendido y repetitivo, se optó por realizar un código en R Studio, por medio del cual se generan y almacenan las 192 matrices de forma automática, lo que logró disminuir los tiempos de trabajo considerablemente. El código se muestra en el Anexo C.

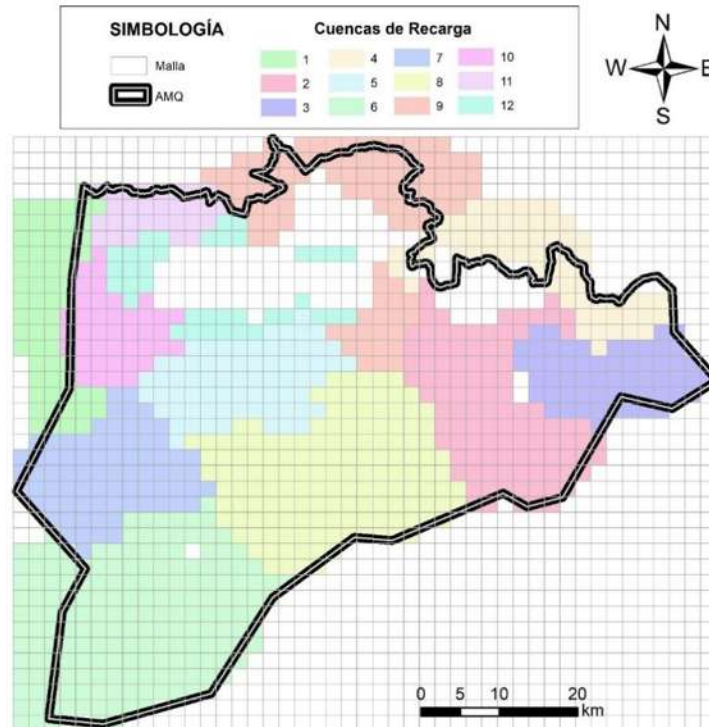


Figura 49. Recarga distribuida por cuencas de modelación.

Primero se realiza la recarga uniformemente distribuida (tradicional), donde se tiene la lámina homogénea de recarga por la cuenca; por lo que el tratamiento de la información es simple y, para cada celda se requiere conocer la cuenca a la cual pertenece y el área de influencia de cada una.

En el caso de la recarga modificada por el mapa PGR, se tiene que la recarga total de la cuenca se debe de ponderar para cada unidad de área, obteniendo así, una recarga unitaria que depende de la capacidad de infiltración en cada punto de la cuenca, por lo que se tiene que esta recarga no es homogénea.

Si bien, el tratamiento de la información se vuelve más complejo, da resultados adecuados que pueden ser comparados con la modelación tradicional; la variación no es muy notoria, pero se considera útil para cuando se requiere refinar el modelo, lo cual resultaría útil en zonas con suficiente información.

Para realizar la ponderación, se normalizó la recarga según el valor del mapa PGR (mapa presente en la Figura 50) y el área y, posteriormente se obtuvo un valor unitario (para cada km^2), con lo cual se obtuvo un valor que al ser multiplicado por el área de influencia y por la recarga, otorgara la recarga en hm^3 .

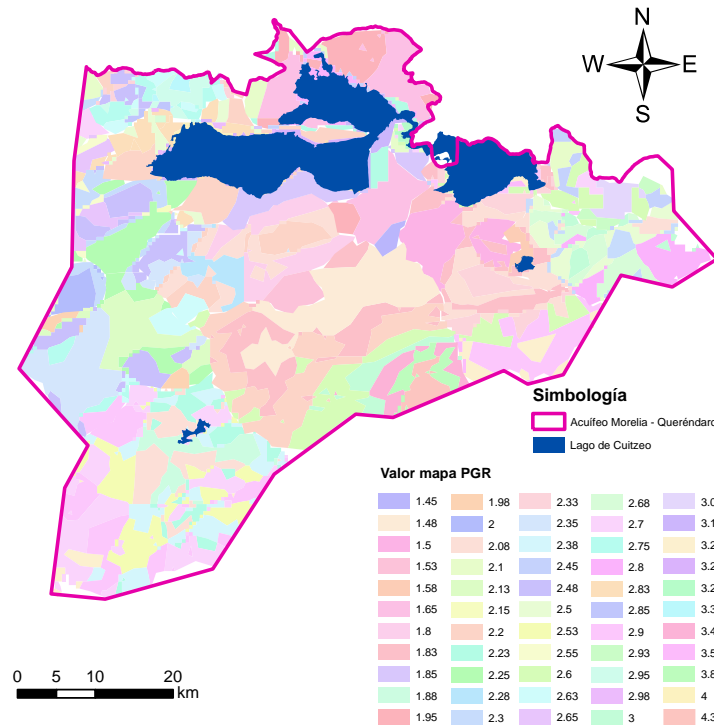


Figura 50. Valor del mapa PGR para cada cuenca.

Con lo anterior descrito, se generan mallas con información para cada celda en estudio, con lo cual se plantean 2 modelos de simulación subterránea en Modflow.

Para los valores de los parámetros hidrogeológicos, se considera la geología que se tiene en la zona, dichos valores se encuentran en la Tabla 12, los valores con los cuales se calibró la modelación subterránea es la conductividad hidráulica mínima y el coeficiente de almacenamiento máximo.

Tabla 12. Parámetros hidrogeológicos presentes en la zona de estudio.

Geología	K min	Smax
Andesita	0.001	0.05
Arenisca - Media	3.3	0.15
Basalto	10	0.05

Caliza	0.001	0.06
Dacita	0.001	0.005
Granito	3.3	0.18
Lacustre	3.3	0.06
Lahar	0.0001	0.005
Piroclástica	0.0001	0.005
Riolita	0.00001	0.005
Toba	0.001	0.05

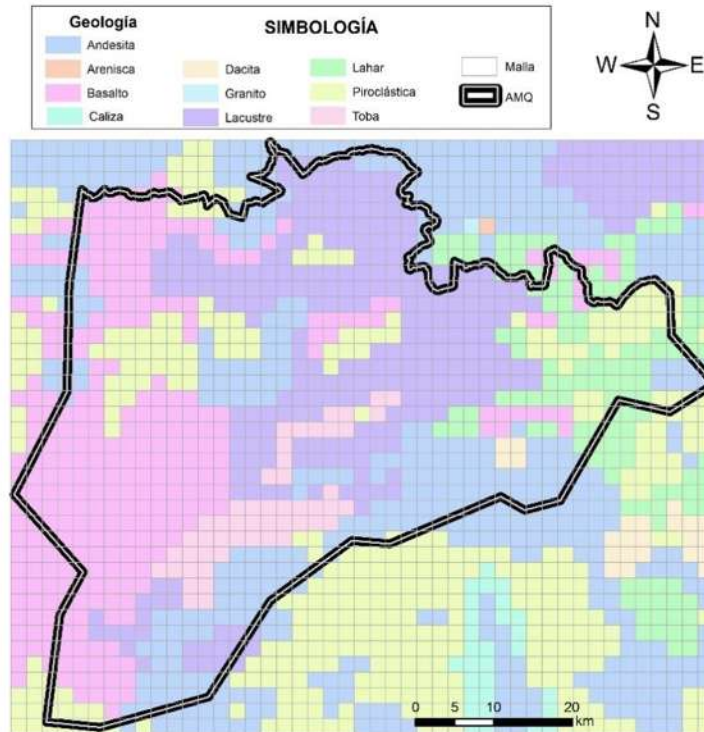


Figura 51. Distribución de la geología en la zona.

Por otra parte, las extracciones que se tienen en la zona de estudio son sumamente importantes para la modelación subterránea, como se observa en la Figura 16, se tienen 1239 pozos de extracción y, ahora los distribuimos de acuerdo a la malla que se generó con anterioridad, razón por la cual y, como se muestra en la Figura 52, se intenta que no se tenga una densidad importante de pozos en cada celda, por lo cual, el número máximo de pozos que se tiene en una celda es de 36 pozos, los cuales se encuentran cerca al lago de Cuitzeo.

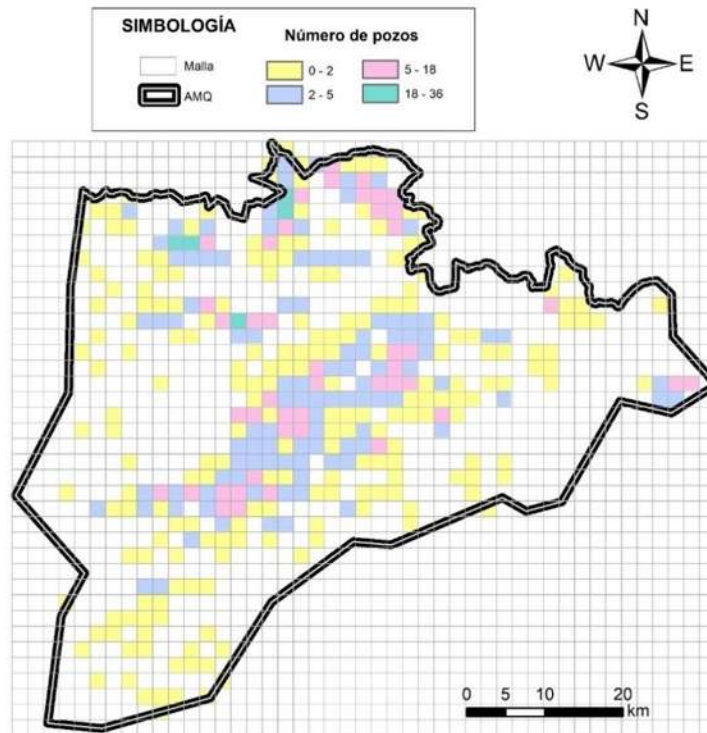


Figura 52. Distribución de los pozos de extracción de acuerdo con la malla utilizada.

Lo mismo se realiza con los manantiales, los cuales sirven como un desfogue natural del acuífero, ante ello, es importante que se conozcan las celdas en las que se localizan (Figura 53), a las cuales se les otorga un valor de conductancia, que se considera en la modelación subterránea. El máximo número de manantiales en una celda es de 5.

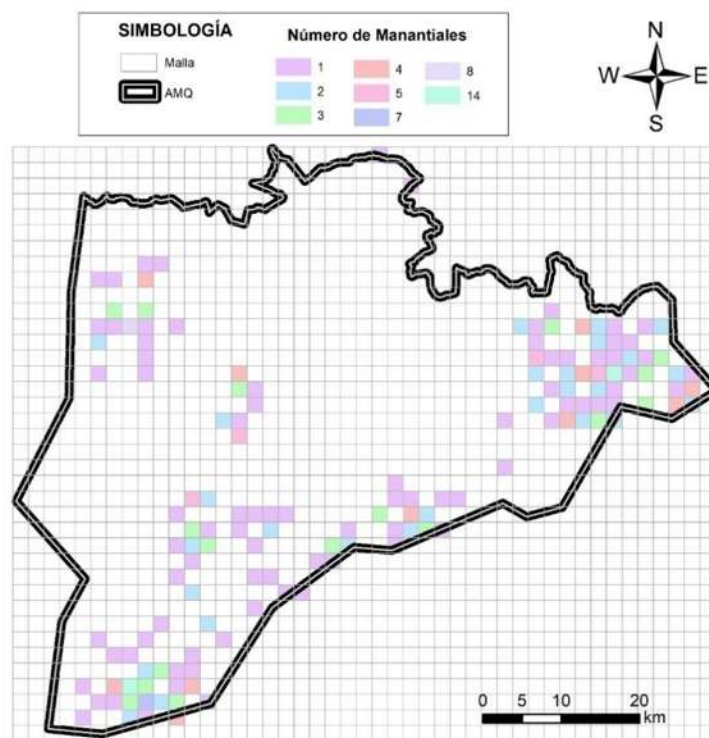


Figura 53. Distribución de los manantiales en la zona.

De la misma forma, se necesitan conocer parámetros como elevaciones de terreno natural (Figura 54) y elevación de los niveles estáticos iniciales, los cuales se presentan en la Figura 55.

Se puede observar que en la zona centro del acuífero Morelia-Queréndaro, se tienen las elevaciones más bajas del terreno, lo cual tiene consistencia con lo que se presenta en los valores del nivel estático.

En este sentido, mientras se realizan las modelaciones en Modflow, se trata de llegar a valores semejantes de los niveles estáticos medidos en 2008, 2017 y 2022.

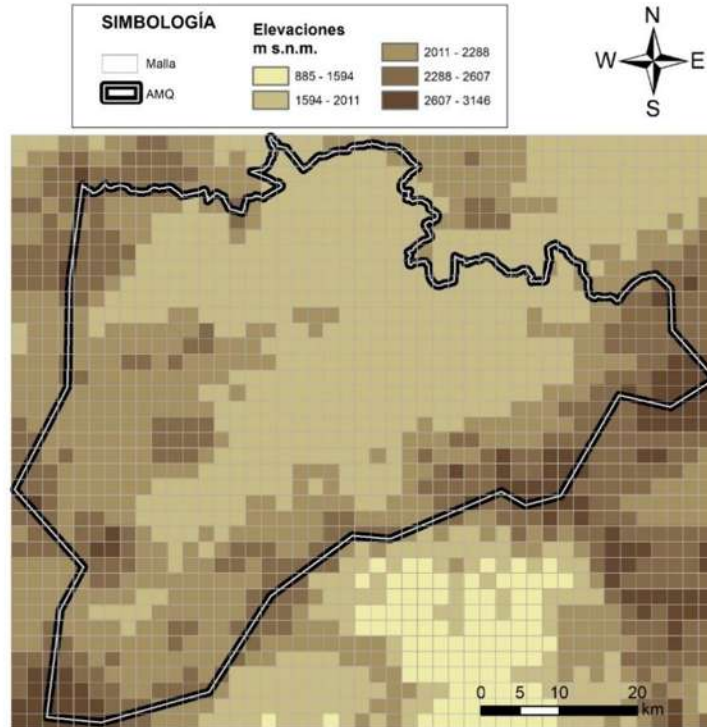


Figura 54. Elevaciones del modelo digital de elevaciones al centro de cada celda.

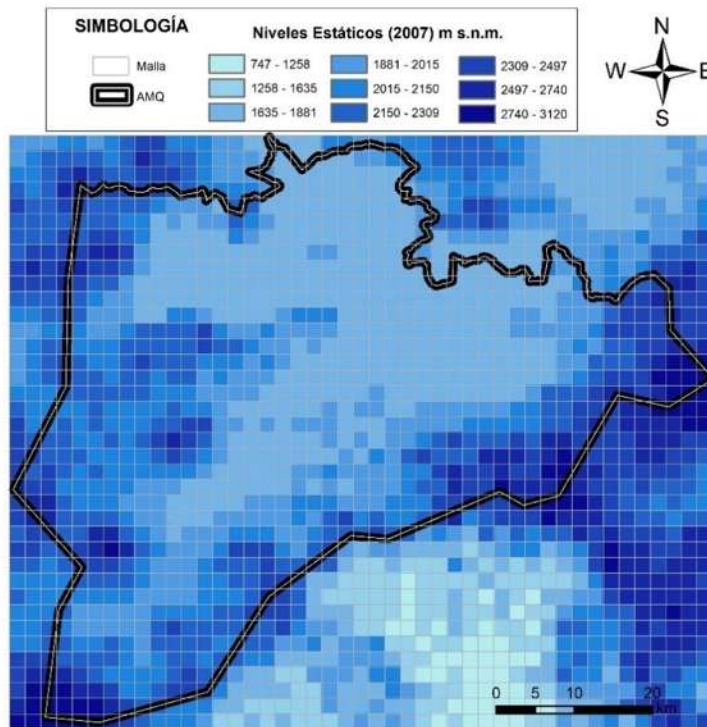


Figura 55. Elevación del nivel estático inicial.

Como parte de los parámetros de ingreso al modelo, se muestran en la Figura 56, los valores de los niveles estáticos iniciales, los cuales fueron obtenidos por medio de la interpolación con el método IDW de las profundidades de pozos medidos en el año 2007.

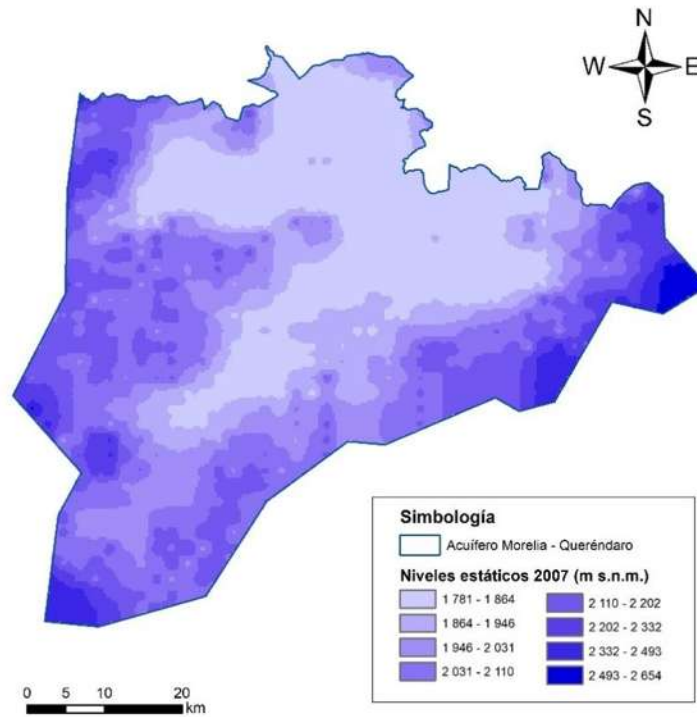


Figura 56. Niveles estáticos del año 2007.

La información de los niveles estáticos tuvo un tratamiento especial debido a que se comportaba de una forma similar a la topografía, por lo cual se suavizaron las elevaciones más marcadas por medio de la eliminación de los valores presentes en el cuantil 90.

Con lo anterior descrito, se tiene que la modelación subterránea se realizó por medio de los dos métodos de recarga, sin embargo, como se puede observar en las gráficas mostradas en la Figura 57, la variación entre los métodos es prácticamente nula y se tiene entonces que cualquier método puede ser aplicado con la misma fiabilidad.

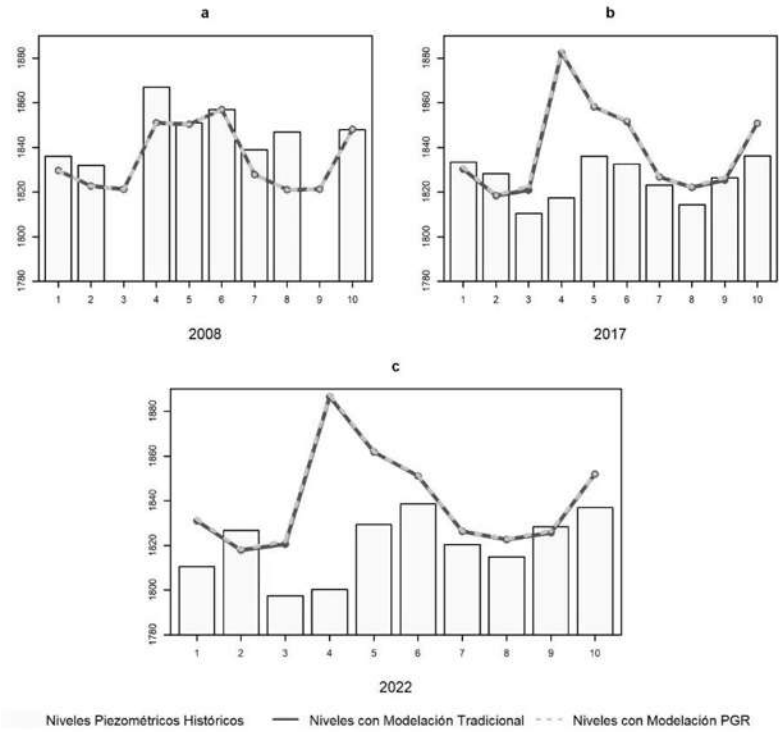


Figura 57. Calibración de niveles piezométricos.

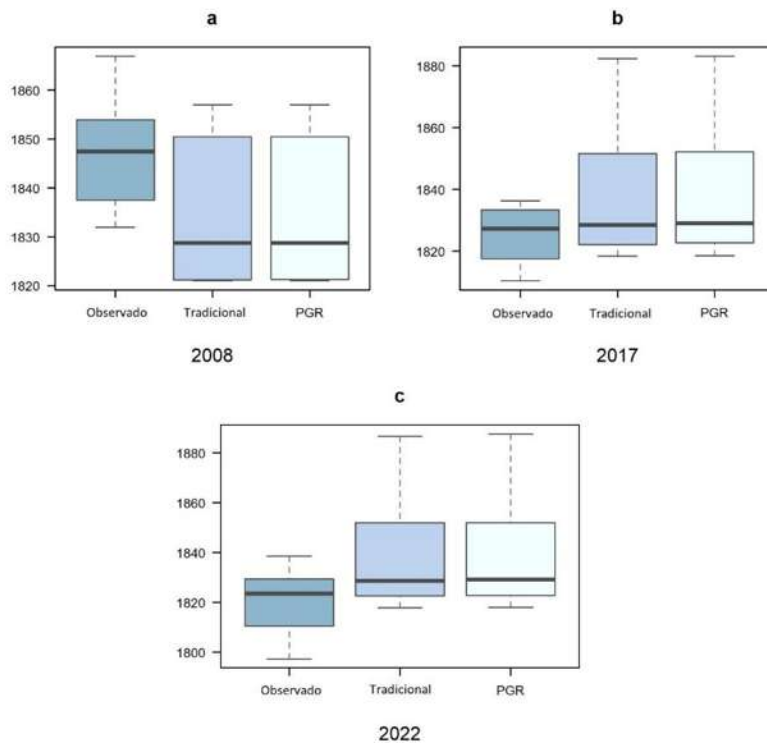


Figura 58. Variación de los niveles piezométricos en los diferentes periodos de tiempo.

De acuerdo con las gráficas mostradas en la Figura 58, se tiene que los valores de la modelación siguen la tendencia de los valores observados en los años 2008, 2017 y 2022; los valores de los niveles estáticos junto con el valor del error estandarizado en función de los

niveles observados se muestran en la Tabla 13 para los valores de la modelación con recarga tradicional y en la Tabla 14 para los resultados de la modelación subterránea con recarga ponderada por el mapa PGR.

Tabla 13. Niveles y errores en la modelación subterránea tradicional.

Observados			Niveles Estáticos Tradicional			Error Tradicional		
2008	2017	2022	2008	2017	2022	2008	2017	2022
1836	1833.33	1810.5	1829.791	1830.234	1830.95	0.34%	0.17%	-1.13%
1832	1828.19	1826.65	1822.693	1818.449	1817.928	0.51%	0.53%	0.48%
N/D	1810.4	1797.4	1821.254	1820.944	1820.488	N/D	-0.58%	-1.28%
1867	1817.45	1800.13	1850.948	1882.355	1886.643	0.86%	-3.57%	-4.81%
1851	1836.04	1829.31	1850.479	1858.26	1861.753	0.03%	-1.21%	-1.77%
1856.94	1832.6	1838.63	1857.079	1851.665	1851.123	-0.01%	-1.04%	-0.68%
1821	1757.34	1753	1841.144	1849.988	1853.669	-1.11%	-5.27%	-5.74%
2017	1995	1967.14	2027.61	2043.199	2046.125	-0.53%	-2.42%	-4.02%
N/D	1767.01	1756.38	1965.438	1979.571	1983.479	N/D	-12.03%	-12.93%
1838.89	1823.23	1820.44	1827.84	1826.72	1826.295	0.60%	-0.19%	-0.32%
1847	1814.34	1814.75	1821.027	1822.072	1822.53	1.41%	-0.43%	-0.43%
N/D	1826.5	1828.3	1821.198	1825.346	1825.665	N/D	0.06%	0.14%
1847.94	1836.34	1837	1848.213	1850.77	1851.927	-0.01%	-0.79%	-0.81%

Tabla 14. Niveles y errores en la modelación subterránea tradicional.

Observados			Niveles Estáticos Tradicional			Error Tradicional		
2008	2017	2022	2008	2017	2022	2008	2017	2022
1836	1833.33	1810.5	1829.789	1831.23	1831.911	0.34%	0.11%	-1.18%
1832	1828.19	1826.65	1822.696	1818.564	1817.995	0.51%	0.53%	0.47%
N/D	1810.4	1797.4	1821.255	1822.771	1822.012	N/D	-0.68%	-1.37%
1867	1817.45	1800.13	1850.949	1883.21	1887.495	0.86%	-3.62%	-4.85%
1851	1836.04	1829.31	1850.478	1858.442	1861.916	0.03%	-1.22%	-1.78%
1856.94	1832.6	1838.63	1857.08	1852.125	1851.594	-0.01%	-1.07%	-0.71%
1821	1757.34	1753	1841.147	1850.085	1853.764	-1.11%	-5.28%	-5.75%
2017	1995	1967.14	2027.625	2043.317	2046.284	-0.53%	-2.42%	-4.02%
N/D	1767.01	1756.38	1965.444	1979.609	1983.531	N/D	-12.03%	-12.93%
1838.89	1823.23	1820.44	1827.842	1826.858	1826.449	0.60%	-0.20%	-0.33%
1847	1814.34	1814.75	1821.02	1822.287	1822.756	1.41%	-0.44%	-0.44%
N/D	1826.5	1828.3	1821.196	1826.523	1826.42	N/D	0.00%	0.10%
1847.94	1836.34	1837	1848.213	1850.781	1851.939	-0.01%	-0.79%	-0.81%

Se puede observar en los resultados anteriores que los errores máximos obtenidos en el modelo fueron de 13 % y que los errores son bastante similares entre ambas modelaciones. Con lo anterior, se presenta el mapa de los niveles estáticos en el año 2022.

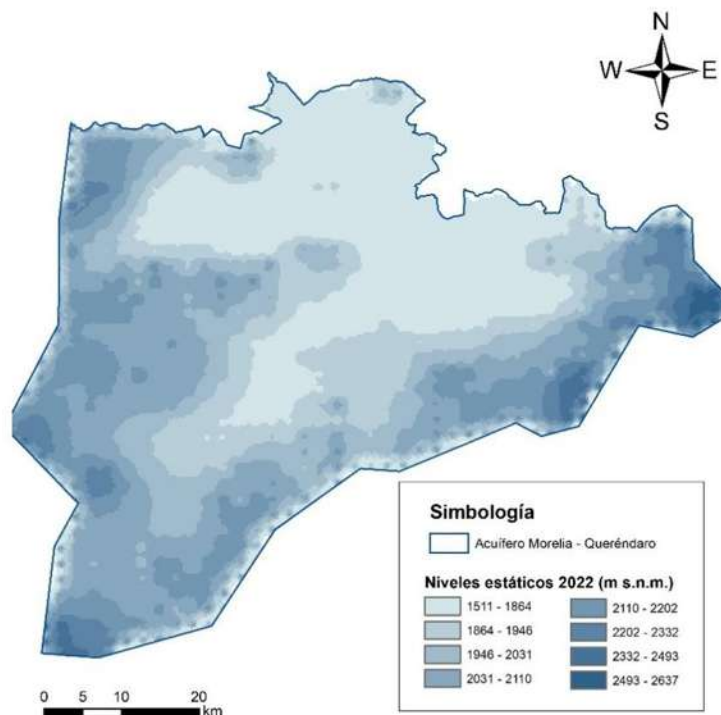


Figura 59. Niveles estáticos del año 2022.

Se muestra el mapa de niveles estáticos obtenidos en el año 2022, con lo que se puede observar que las zonas se han homogeneizado y que los niveles han descendido; de manera puntual se tiene que la elevación máxima ha descendido 20 m desde el año 2007, llegando a una elevación máxima de 2637 m s. n. m. (Figura 59).

MUESTREOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Como parte del muestreo y monitoreo de la zona de estudio, se tiene información de los niveles estáticos en 2008, 2017 y 2022. Con lo cual, se tienen entonces 3 periodos de comparación en la zona de estudio. Entonces, tal y como se observa en la Tabla 15, se contemplan 22 pozos, los cuales pertenecen a la red de muestreo oficial de la CONAGUA.

Tabla 15. Variación de la profundidad de los niveles en pozos de la zona (m).

Número de Registro	X	Y	Z	2008	2017	2022
CNA-02-003-014	290902	2198571	1840	1835.17	1838.05	1827.6
CNA-02-003-043	288026.675	2194865.49	1844	1836	1833.33	1810.5
CNA-02-020-005	272889.625	2210292.39	1842	1832	1828.19	1826.65
CNA-02-020-035	274796.2	2217431.98	1847	N/D	1810.4	1797.4
CNA-02-020-129	276008.49	2204232.5	1852	1843.56	1831.2	1830.4
CNA-02-020-146	279497.332	2208236.39	1851	1837.38	1824.7	N/D

CNA-02-022-009	286780	2186607	1873	1867	1817.45	1800.13
CNA-02-036-080	260378.049	2210947.98	1854	1851	1836.04	1829.31
CNA-02-039-002	242468.076	2159394.21	2179	2084.5	1746.11	1741.7
CNA-02-040-015	291972.89	2190875.57	1892	1846	1788.32	1782.4
CNA-02-040-016	293342.636	2190010.66	1911	1856.94	1832.6	1766.63
CNA-02-040-019	292687	2190191	1894	1852.6	1789.44	1764.5
CNA-02-053-062	268880.675	2178346.91	1940	1821	1757.34	1753
CNA-02-053-115	244814.11	2189418.75	2132	2078.5	1768.7	N/D
CNA-02-053-117	240481.459	2189878.56	2159	2078.9	2074	2077.15
CNA-02-053-148	257047.248	2166700.58	2040	2017	1995	1967.14
CNA-02-053-175	256495.881	2178871.77	2031	N/D	1767.01	1756.38
CNA-02-078-002	289326.63	2213243.05	1858	1838.89	1823.23	1820.44
CNA-02-110-014	303775.45	2197832.93	1872	1847	1814.34	1814.75
CNA-02-110-014-B	303222.028	2197785.33	1849	N/D	1826.5	1828.3
CNA-02-110-016	311758	2202279	1927	1877	1803.72	N/D
CNA-02-110-017	307834	2202611	1850	1847.94	1836.34	1837

Así mismo, en la Figura 60, se muestra el comportamiento de los niveles estáticos, en donde se muestra que el flujo se dirige hacia la zona centro; se establecen, además, las direcciones de flujo regional.

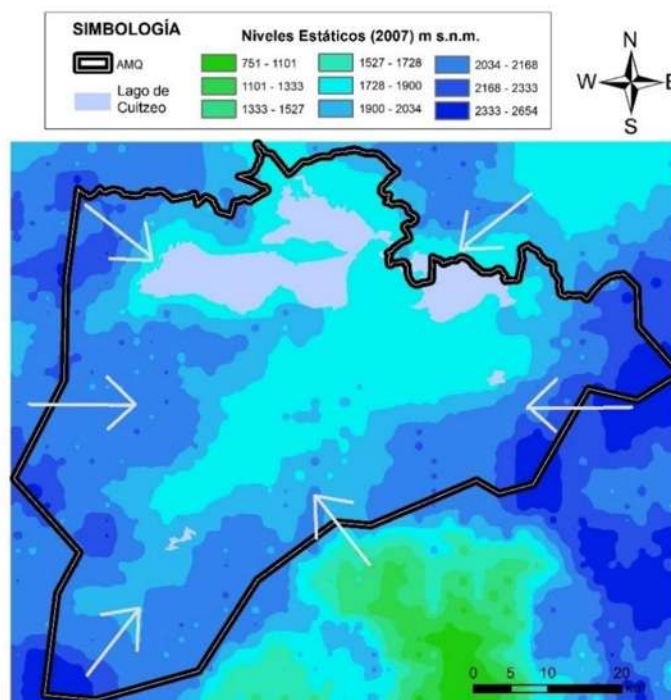


Figura 60. Interpolación de la elevación de niveles estáticos (2007).

En la Tabla 16, se muestran los resultados del ion fluoruro (F⁻) y arsénico (As), en donde se puede observar que, de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021), el pozo en Ciudad Industrial II, Mercado de Abastos, La Palma y Centrika; además de que el pozo Díaz Ordaz se encuentra bastante cerca al límite máximo permisible.

Tabla 16. Resultados de arsénico en los muestreos del 2022.

Nombre	X (UTM Z14N)	Y (UTM Z14N)	Z m s.n.m.	F- (mg/L)	As (mg/L)
Real Universidad	268150	2178193	1874	0.201	0.004
Díaz Ordaz	269025	2179123	1910	0.222	0.009
Centrika	269232	2179616	1915	0.339	0.016
Manantial de la Mintzita	261469	2173769	1886	0.176	N/D
Villa Magna I	255951	2177999	2017	0.208	N/D
Villa Magna III	256263	2177113	2004	0.242	0.002
La palma	269632	2184570	1881	0.267	0.012
Loma Real	269848	2183228	1893	0.217	0.007
El Realito II	269340	2183205	1950	0.258	0.004
Unidos Santa Cruz	267927	2181937	1880	0.22	0.006
Amp. Santa Cruz	267581	2182274	1891	0.252	0.005
Ciudad Industrial II	274891	2182368	1884	0.174	0.025
Mercado de abastos	272167	2182097	1889	0.272	0.011
Lomas de Santiaguito	271668	2182216	1901	0.251	0.005
Lopez Mateos	266417	2179646	1909	0.228	0.005
Manantial UNLA	265585	2179372	1895	0.258	N/D

Por otra parte, los límites máximos permisibles actuales y en un futuro para el ion fluoruro (F⁻) es de 1.5 y 1 mg/L, con lo cual se tiene que los valores obtenidos y mostrados en la Tabla 16, se encuentran por debajo de los máximos permisibles.

Así mismo, se obtuvo información de calidad de agua en los mismos pozos, lo cual se presenta en la Tabla 17; se muestra información de aniones (HCO₃⁻, SO₄⁻ y Cl⁻) y cationes (Na⁺, K⁺, Ca⁺ y Mg⁺) obtenida de los 15 pozos de agua subterránea, dicha información es tratada para la realización de los diagramas de Piper, Schöeller, Stabler, Stiff y Chadha mostrados en el Anexo D.

Tabla 17. Información obtenida en campo

POZO	T (C°)	pH	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
P1	14.3	6.91	58.56	17.48	5.82	11.16	2.8	7.94	7.46	42.37	14.87
P2	24.2	6.39	430.99	0.07	70.1	97.95	12.94	23.01	45.94	88.38	0
P3	15.1	7.09	178.85	39.38	27.3	47.20	6.3	14.06	21.19	62.59	3.84
P4	13.6	7.01	116.08	14.61	20	25.67	3.9	16.34	9.45	62.38	2.46
P5	17.1	6.88	270.06	34.34	12.3	43.60	7.85	30.39	27.88	67.62	20.3
P6	22.9	7.91	253.76	0.96	93	75.75	12.87	13.42	28.78	54.24	0
P7	26.4	7.04	732	0.31	366.7	292.10	35.95	42.19	70.36	78.85	0
P8	20.6	7.61	475.8	162.20	249.7	211.70	14.07	59.52	91.94	63.45	0
P9	37	6.90	597.8	36.67	428.5	356.50	55	30.68	41.87	117.48	0
P10	45	7.15	329.4	24.40	718	382.00	39	47.62	38.5	125.61	0
P11	16.4	6.94	351.36	142.60	47.7	73.50	8.44	28.77	62.27	50.18	30.36
P12	18.9	6.54	248.88	124.80	35.5	55.30	9.23	41.67	37.3	53.92	32.98
P13	21.2	7.75	341.6	453.00	182.2	164.80	14.67	71.43	101.07	60.02	0
P14	21.5	6.79	414.8	609.50	186	205.10	16.11	88.21	102.34	63.34	0
P15	12	6.68	85.22	45.68	29.1	37.75	5.77	12.54	21.89	59.06	51.08

Los diagramas presentados en el Anexo D fueron desarrollados con ayuda del software Diagrammes, el cual es un software de uso libre, creado por la Universidad de Avignon, Francia.

ANÁLISIS DE ARSÉNICO

La calidad de agua varía espacialmente en toda la zona de estudio y esto se debe a que existen sitios en donde se tiene mayor vulnerabilidad; principalmente, dividiremos las zonas de interés en 2 (Figura 61) : i) la porción que se localiza al norte, referente al municipio de Zinapécuaro y a la región termal de Araró y, ii) el municipio de Morelia, en donde se tiene la presencia de As por medio de las percolaciones de los lixiviados en las inmediaciones del basurero de la localidad de Morelia.

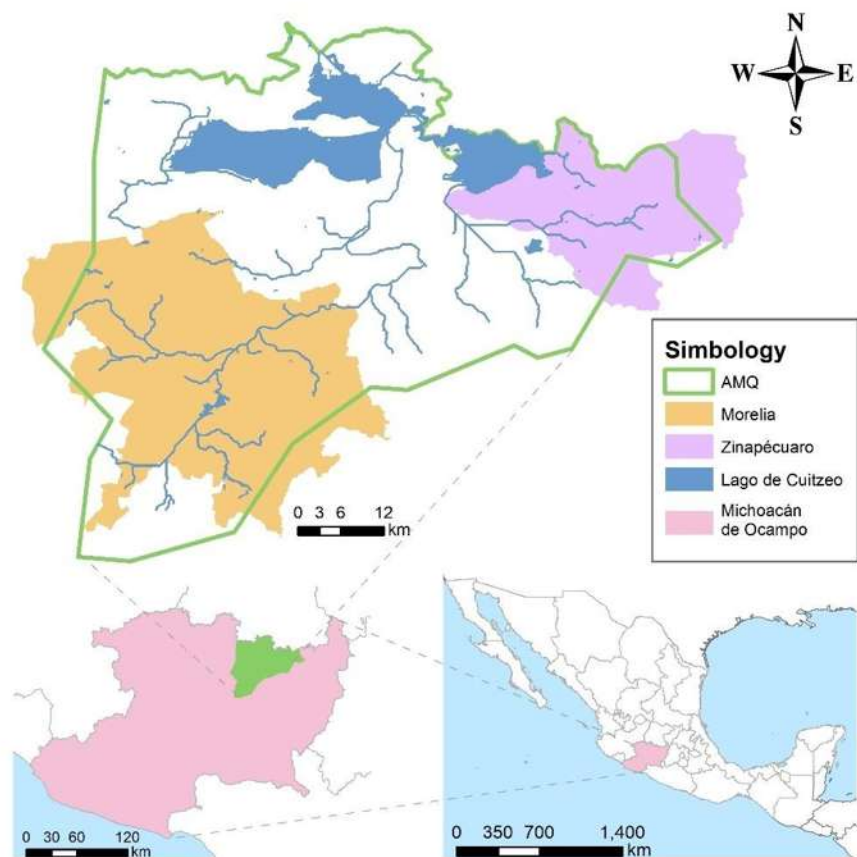


Figura 61. Zonas de interés para la modelación de arsénico.

Por otra parte, en la Figura 62 se presentan las gráficas que muestran el comportamiento del arsénico en los diferentes bimestres para diferentes años; donde es interesante apreciar que las concentraciones más elevadas se encuentran en último bimestre del año, donde en la zona de Zinapécuaro se alcanzan concentraciones superiores a los 90 $\mu\text{g/L}$.

Los meses en los cuales se tiene una tendencia más homogénea en todos los pozos son los que pertenecen al segundo (marzo – abril) y al quinto (septiembre – octubre) bimestre del año, donde se alcanzan concentraciones cercanas a los 50 $\mu\text{g/L}$ y 40 $\mu\text{g/L}$, respectivamente.

En todos los bimestres se tienen concentraciones por encima de la normatividad vigente, lo que quiere decir que la presencia de arsénico en la zona es una constante a través del tiempo. Lo anterior es importante porque se demuestra entonces que la presencia de arsénico no es causa de algún evento aislado; esto se relaciona con la presencia de arsénico geogénico y con las percolaciones que se tienen en la zona del basurero.

Concentraciones de As en $\mu\text{g/L}$

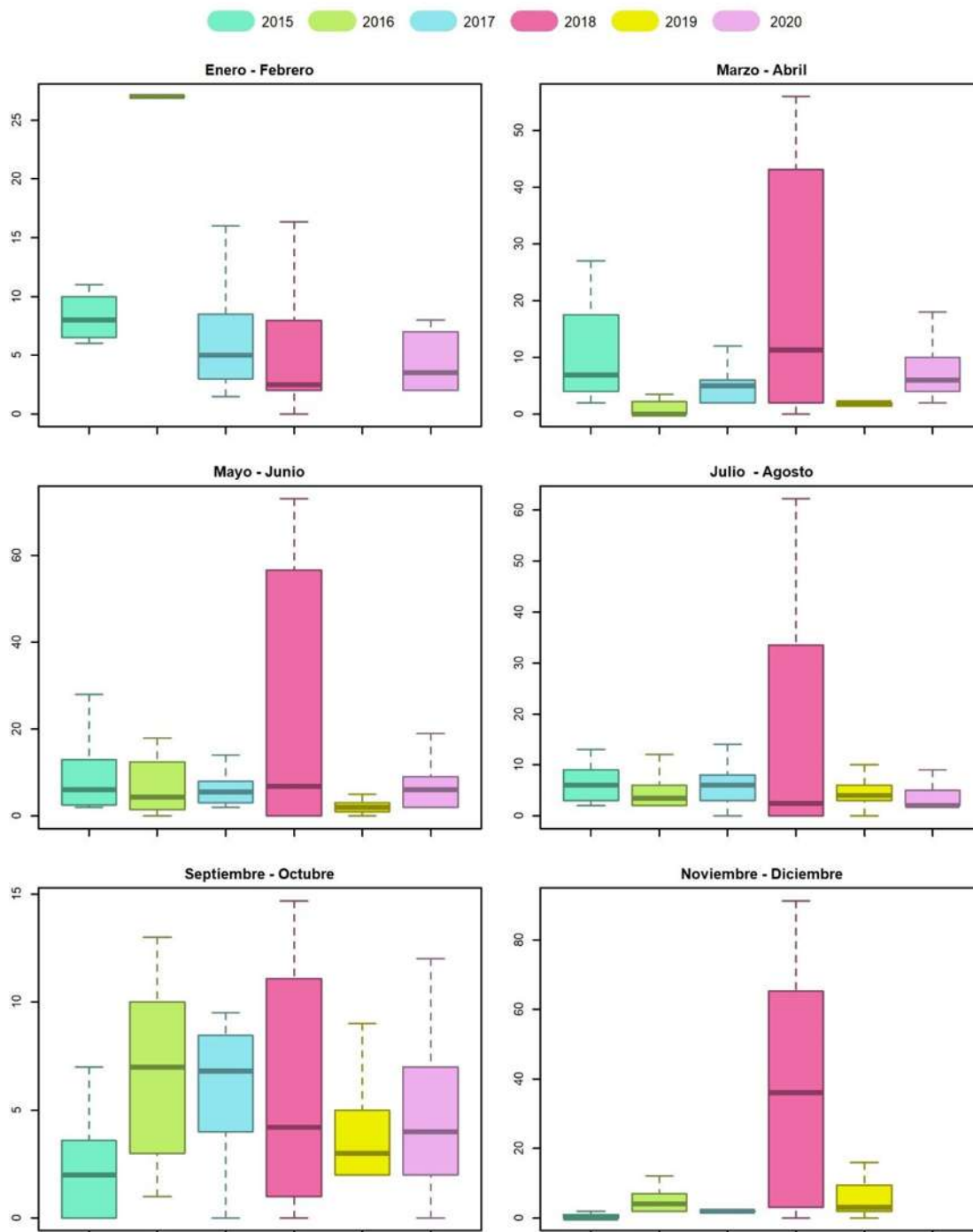


Figura 62. Variación de las concentraciones de As ($\mu\text{g/L}$).

MODELACIÓN SUBTERRÁNEA DEL ARSÉNICO (As)

El arsénico presente en la porción oeste de la localidad de Morelia (Figura 63 a) se difunden en las celdas contiguas, lo que se muestra claramente en la Figura 63 b; en este sentido, las direcciones de flujo obligan al agua a moverse hasta la porción centro; esa zona a su vez se ve influenciada por las acciones de sobre bombeo, con lo que se logra que el arsénico llegue a la porción noreste de la localidad, que es donde se localizan los pozos con concentraciones elevadas. Aunque la concentración máxima no disminuye significativamente en los valores máximos ($35\mu\text{g/L}$) existen sitios donde no se tenía presencia de arsénico y con ello, se muestra que el elemento se ha difundido en nuevas celdas; incluyendo aquellas que se localizan cerca de la periferia del lago de Cuitzeo.

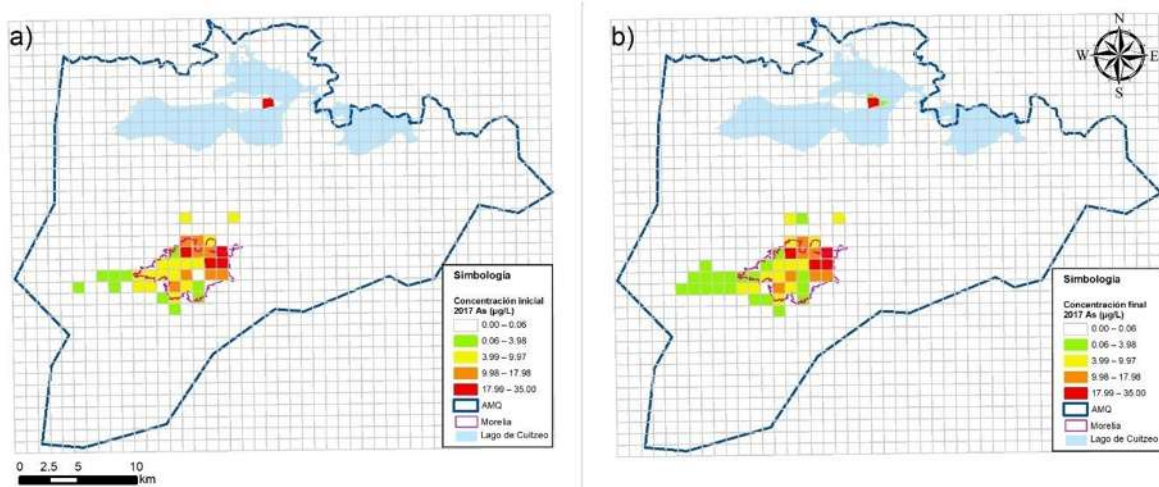


Figura 63. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2017.

Ahora, para el año 2018 (Figura 64), se tiene un comportamiento similar al presentado en el 2017. Se tiene también que, en este caso, los valores máximos obtenidos fueron de $92\mu\text{g/L}$; lo cual es más de nueve veces más que el valor máximo permisible establecido por la NOM-12-SSA-2021. En este caso en particular, se tiene el conocimiento de las concentraciones en la zona del municipio de Zinapécuaro, más en concreto con la localidad de Zinapécuaro y la localidad de Araró. Este sitio es de particular interés debido a que se encuentra dentro de una zona con potencial geotérmico.

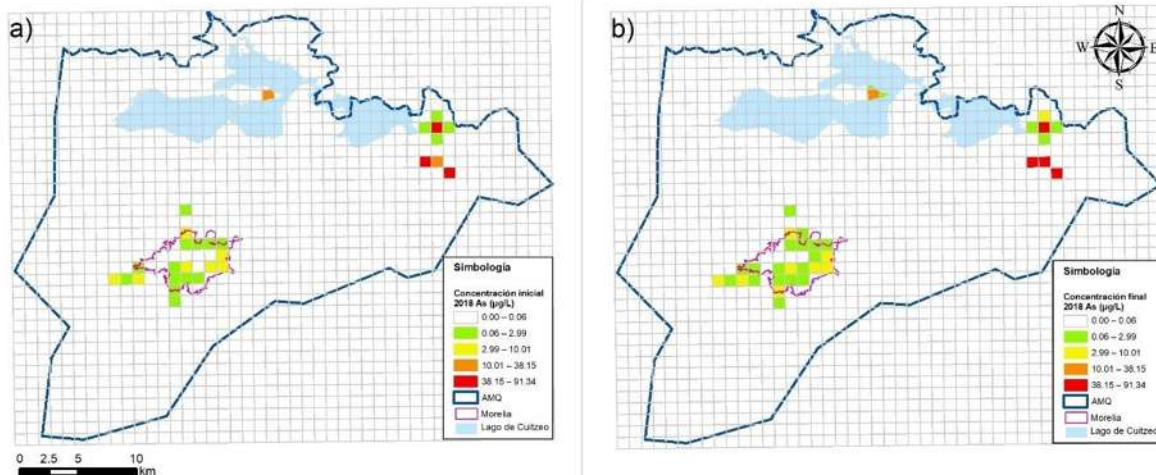


Figura 64. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2018.

Se sigue manteniendo una dirección de flujo hacia el noreste y, en el año 2018 se observa que las concentraciones de arsénico se difunden en la localidad de Morelia.

En el año 2019 se presentaron concentraciones máximas de $27.95 \mu\text{g/L}$ en la zona de Zinapécuaro y al noreste de la localidad de Morelia (Figura 65), que coincide con la ubicación de ciudad industrial. Los pozos en esa zona tienen una consistencia con respecto a las concentraciones elevadas de arsénico.

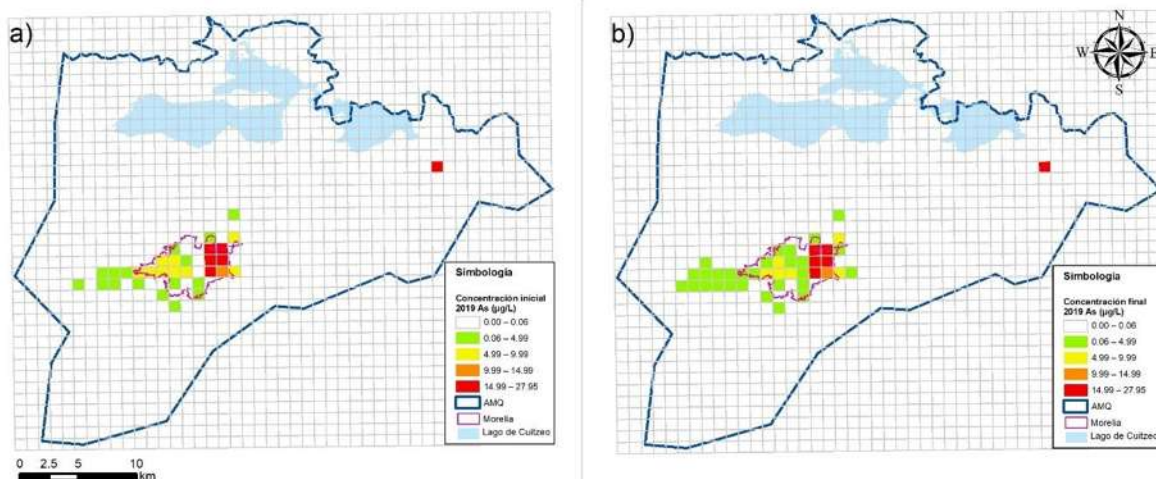


Figura 65. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2019.

De nuevo se puede observar que las concentraciones que se tienen en la porción oeste de la localidad de Morelia tienen una difusión hacia el centro de la misma localidad, los que a su vez no permite que las concentraciones en la porción noreste bajen.

Para el año 2020 (Figura 66) se tiene que la concentración máxima se localiza en la zona de ciudad industrial y, para el final del año, la porción oeste también se ha difundido, lo que permite que más celdas tengan la presencia de arsénico.

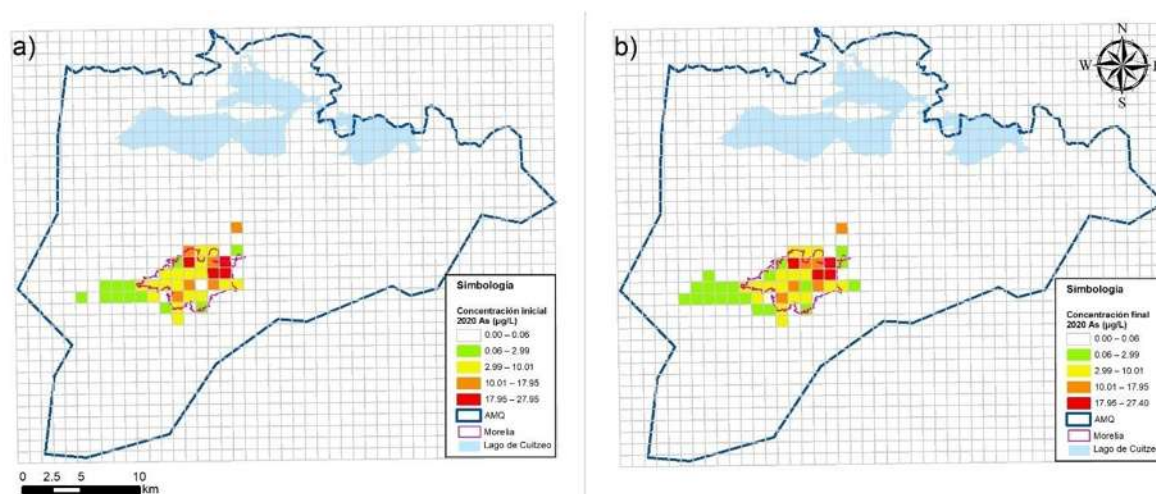


Figura 66. Variación de la concentración de arsénico ($\mu\text{g/L}$) inicial y final en el año 2020.

De forma general, se tiene que las concentraciones de arsénico siguen los flujos regionales, lo cual deja más claro debido a que se tiene un bombeo excesivo en la porción de la localidad de Morelia. El flujo en la porción centro del acuífero es constantemente en dirección noreste.

Con la información obtenida en campo en 2022, y de acuerdo con el diagrama de Piper (Anexo D), se determinan las familias de agua en el sistema, con lo que se genera en Figura 67, el mapa de comportamiento de aguas, con la cual, siguiendo la secuencia de Cheboratev, se muestra el cambio en las aguas: aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas \rightarrow aguas sulfatadas cálcicas y magnésicas \rightarrow aguas cloruradas sódicas y potásicas.

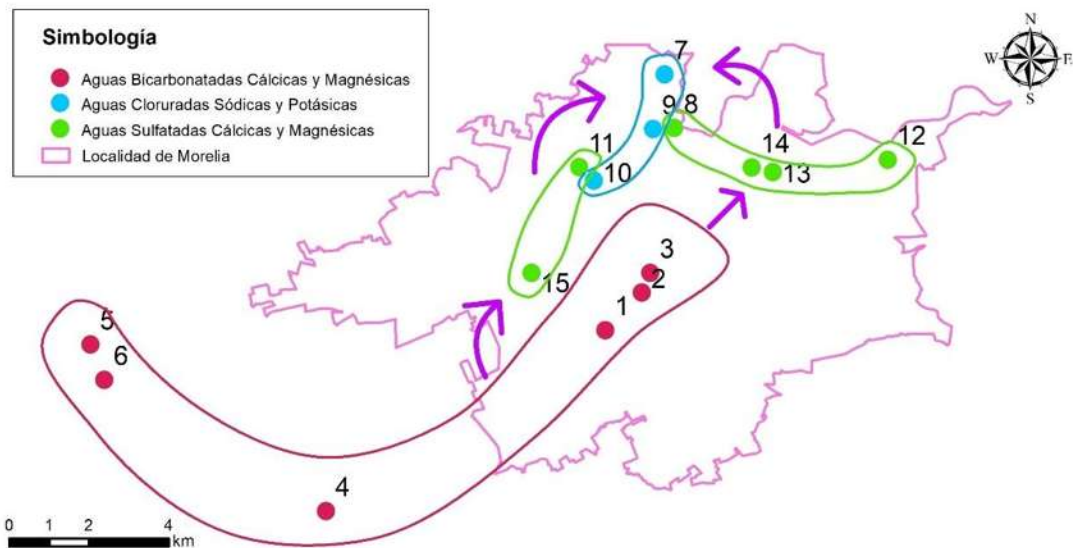


Figura 67. Secuencia de Cheboratev obtenida a partir de los muestreos de agua en la zona.

De acuerdo con la información iónica y con la secuencia de Cheboratev, se determina que los flujos provenientes del suroeste viajan hasta el noreste; estos flujos a su vez fueron establecidos en la modelación subterránea.

CAMBIO CLIMÁTICO

La información de cambio climático se obtiene por medio de los modelos de circulación general de Alemania (MPI_ESM_LR), Estados Unidos (GFDL_CM3), Francia (CNRMCM5) y Reino Unido (HADGEM2_ES). Para los modelos de circulación general, se presenta un código de colores, mostrado en la Figura 68.

Serie Histórica de Referencia	
MPI_ESM_LR	Alemania
GFDL_CM3	Estados Unidos
CNRMCM5	Francia
HADGEM2_ES	Reino Unido

Figura 68. Código de colores para los MCG.

A continuación, se muestran las variaciones en las precipitaciones con respecto a la serie histórica de referencia, donde se destacan las variaciones mínimas y máximas que van desde -10.10% a -40.83% para el RCP 4.5 y, para el RCP 8.5 variaciones de hasta -41.34% (Figura 69).

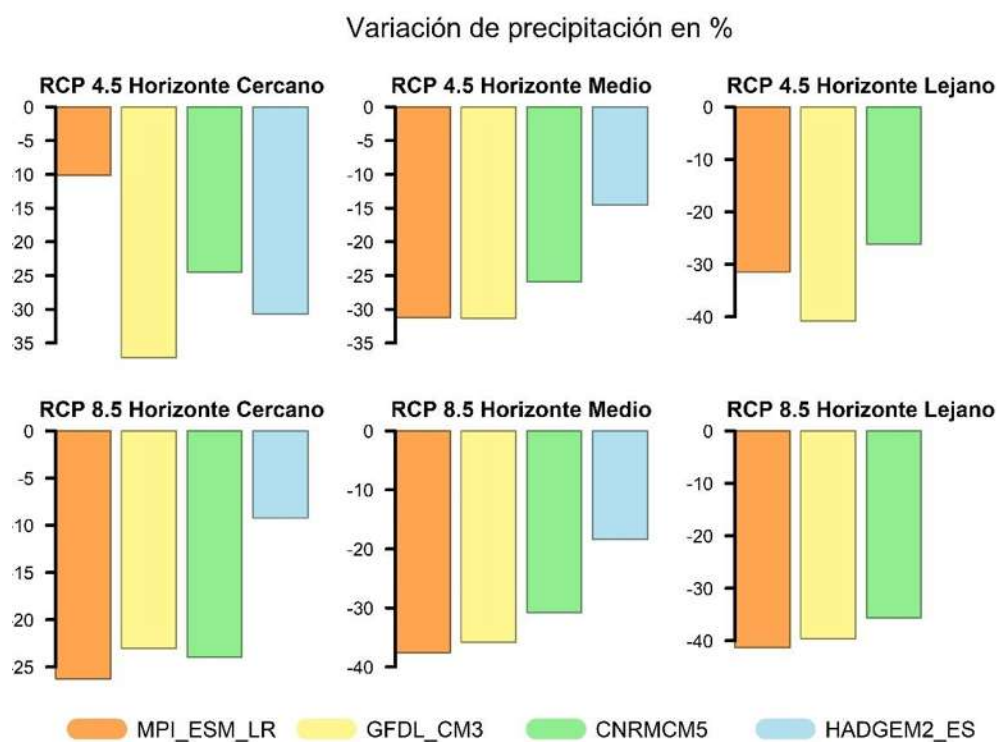


Figura 69. Variación de precipitación para los diferentes escenarios de cambio climático.

De forma similar, se presenta la variación de las temperaturas, donde se tiene un rango de valores con respecto a la serie original de referencia, la variación para el RCP 4.5 va desde el 1.46% hasta el 17.66% y, para el RCP 8.5 las fluctuaciones de la variación de la temperatura van desde valores de 2.10% hasta 27.80% (Figura 70).

Variación de temperatura en %

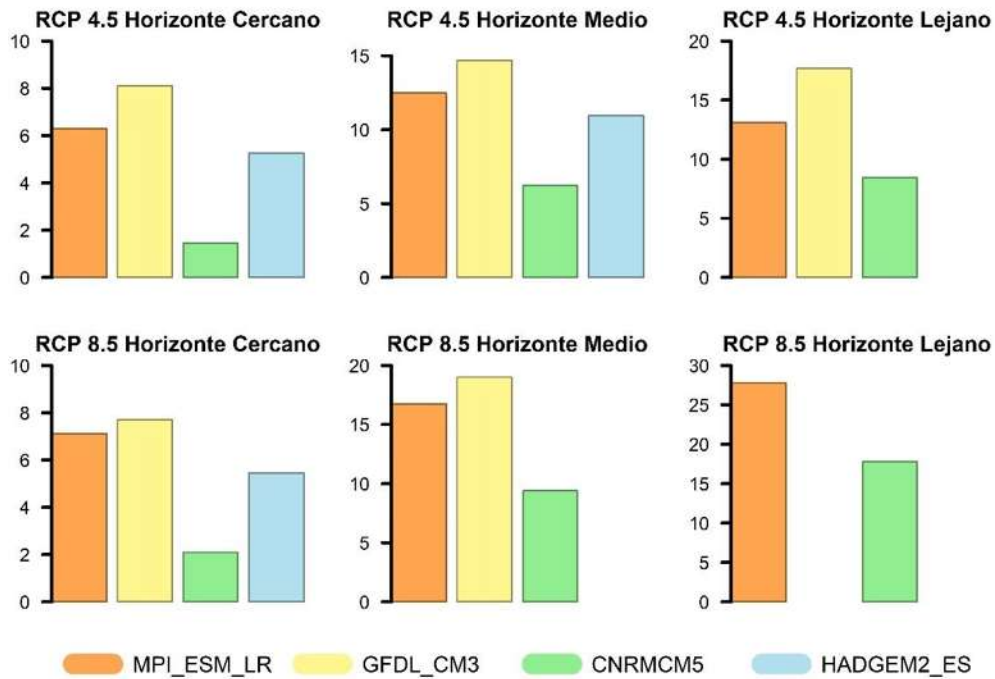


Figura 70. Variación de temperatura para los diferentes escenarios de cambio climático.

Con lo anterior, se realizan las modelaciones en WEAP en el esquema de cuencas agrupadas, con lo cual se obtienen las variaciones en los escurrimientos y en los flujos al acuífero, con los cuales, se determinarán entonces, los escenarios más desfavorables para la recarga. Se tiene entonces que la variación más crítica de las percolaciones pertenece al modelo HADGEM2_ES en el RCP 4.5 del horizonte cercano.

Las variaciones de las percolaciones van desde un aumento en un 6% hasta una disminución del 44% aproximadamente (Tabla 18); también se observa que el modelo HADGEM2_ES tiene un incremento en las percolaciones de un 6%; esto quiere decir que este modelo no es estable y que sus comportamientos varían de acuerdo con la combinación entre precipitación y temperatura; o sea, no se puede predecir el comportamiento en los escenarios faltantes.

Tabla 18. Variación en porcentaje de la percolación del acuífero bajo diferentes escenarios de cambio climático.

Modelo	RCP	Horizonte	Variación	Modelo	RCP	Horizonte	Variación
--------	-----	-----------	-----------	--------	-----	-----------	-----------

MPI_ESM_LR	4.5	Cercano	-21.24%	CNRMCM5	4.5	Cercano	-20.59%
		Medio	-14.77%			Medio	-30.61%
		Lejano	-14.63%			Lejano	-34.24%
	8.5	Cercano	-27.91%		8.5	Cercano	-11.03%
		Medio	-30.22%			Medio	-31.82%
		Lejano	-28.58%			Lejano	-35.92%
GFDL_CM3	4.5	Cercano	-28.77%	HADGEM2	4.5	Cercano	-44.23%
		Medio	-24.40%			Medio	-23.31%
		Lejano	-22.17%			Lejano	---
	8.5	Cercano	-7.78%		8.5	Cercano	6.40%
		Medio	-36.76%			Medio	---
		Lejano	---			Lejano	---

El comportamiento de las percolaciones a escala mensual se muestra en la Figura 71 y, como se puede observar, todos los modelos tienden a disminuir, excepto el HADGEM2_ES para RCP 8.5 de horizonte cercano, donde se tiene un incremento de aproximadamente el 6% del flujo hacia el acuífero.

El modelo GFDL_CM3 (Estados Unidos) tiene una consistencia en la disminución de las percolaciones, que coincide con los RCP y con los horizontes; sin embargo, no se cuenta con información del horizonte lejano para el RCP 8.5.

El modelo CNRMCM5 de Francia también tiene una tendencia similar, éste es el modelo más estable que se tiene y se cuenta con información para los diferentes RCP y horizontes que se trabajan en México.

Por su parte, el modelo MPI_ESM_LR de Alemania, presenta un aumento de los flujos al acuífero conforme avanza en los diferentes horizontes, esto es interesante debido a que, aunque todos se encuentran por debajo de la serie de referencia, el periodo más crítico para el acuífero se presenta en el horizonte cercano (para ambos RCP).

El modelo HADGEM2_ES es el que tiene un comportamiento más complejo, ya que presenta los valores más críticos y favorables, considerando que se tiene un aumento de un 6% en la

recarga en el horizonte cercano del RCP 8.5 y una disminución del 44% en el horizonte cercano del RCP 4.5. Sin embargo, de este modelo sólo se tiene información para cuatro escenarios, por lo que es complicado entender las tendencias que tendrán las recargas en el futuro cercano, medio y lejano.

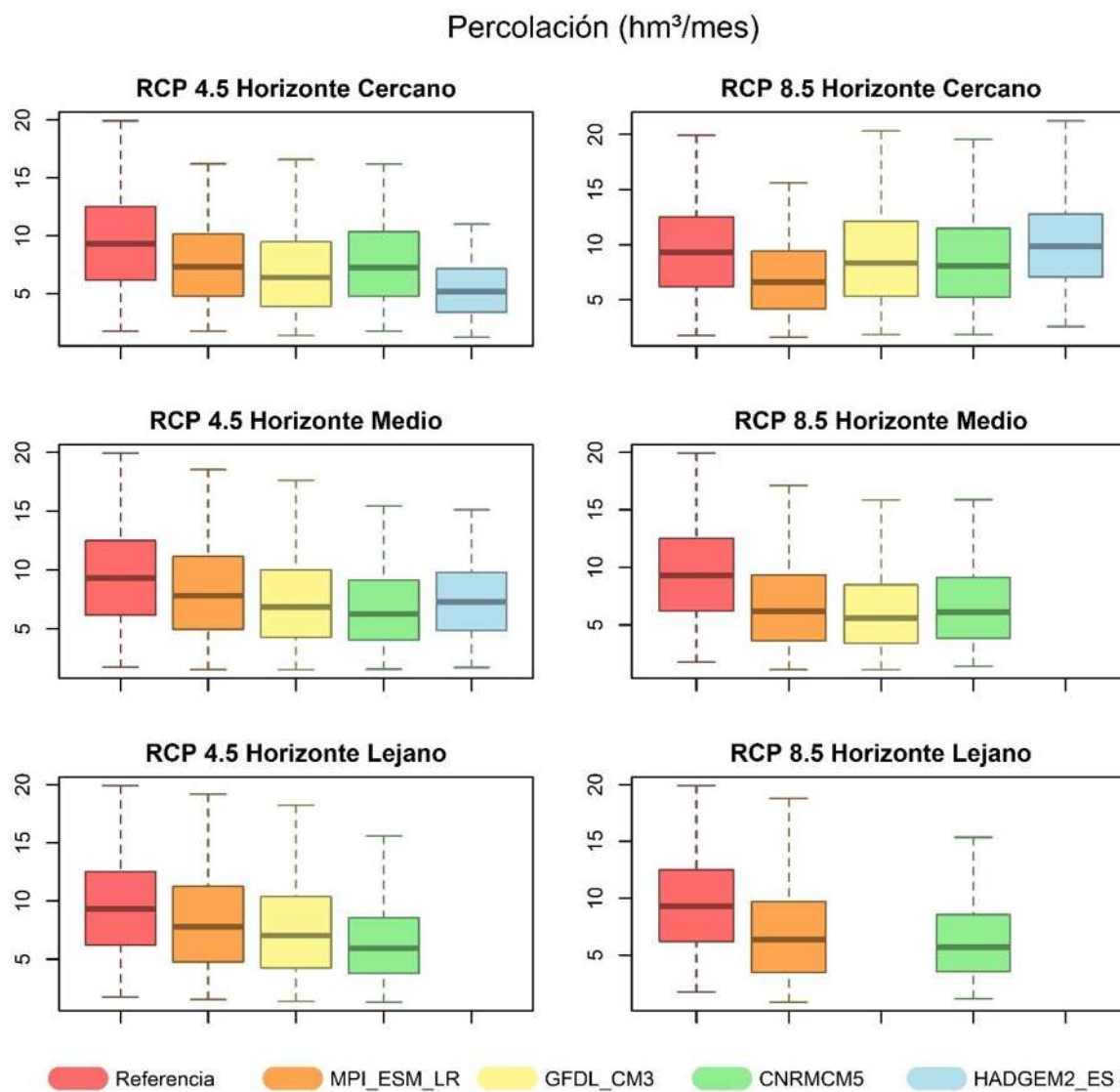


Figura 71. Variación de la percolación hacia el acuífero bajo los diferentes escenarios de cambio climático.

MODELACIÓN DE TRANSPORTE BAJO EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Se realizó la modelación en MODFLOW con el modelo más crítico seleccionado, el cual es HADGEM2_ES; con dicha modelación, se observa que al tener aproximadamente un decremento del 44% de las percolaciones, los niveles piezométricos se mantienen bajos (Figura 72), con valores cercanos y estables a 1900 m s.n.m.

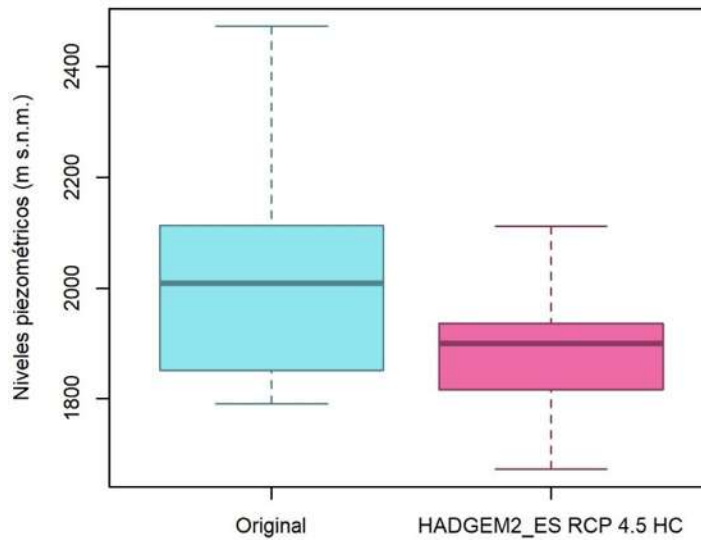


Figura 72. Variación de los niveles piezométricos bajo el efecto del cambio climático.

Se vuelve a realizar entonces la modelación en MT3D con la información de arsénico y del modelo subterráneo bajo el efecto del cambio climático, lo cual muestra las concentraciones de arsénico de la

Figura 73 a la Figura 76, donde se observa que el movimiento del flujo subterráneo tiene una dirección SW – NE; con lo que se valida la génesis del arsénico en la zona, el cual proviene de la porción NW del municipio de Morelia, que es donde se localiza el basurero a cielo abierto.

Se observa que, para cada periodo modelado, el comportamiento es similar al que se tiene en las modelaciones sin el efecto del cambio climático, lo que indica que no se tienen

variaciones importantes con respecto a las direcciones de flujo, pero son más claras y el arsénico llega a sitios más lejanos.

En cada uno de los escenarios anteriores se muestra claramente que la pluma del arsénico, producto del movimiento advectivo y difusivo, tienen la misma tendencia. Debido al efecto del sobre bombeo en la localidad de Morelia; el flujo cruza la ciudad y éste después sigue su dirección hacia la zona del Lago de Cuitzeo.

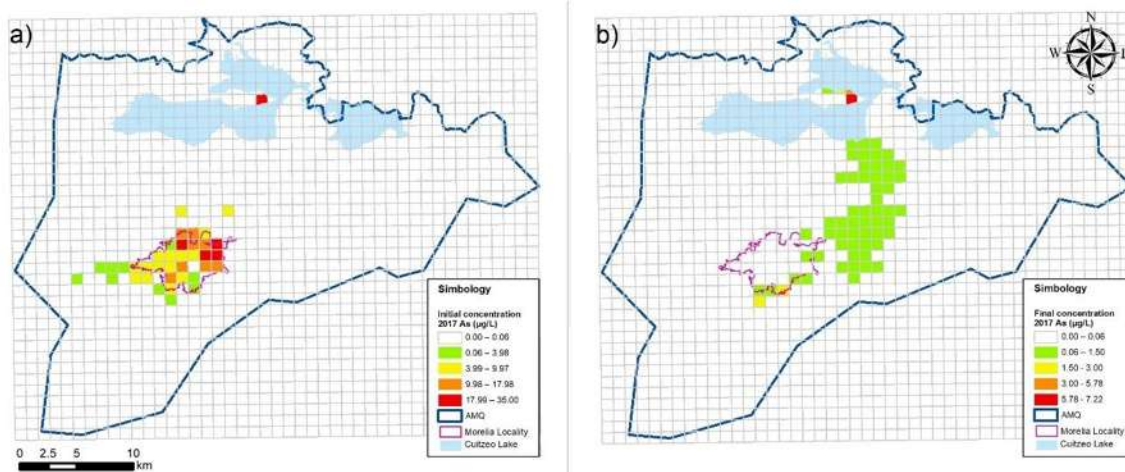


Figura 73. Variación de la concentración de arsénico en el año 2017.

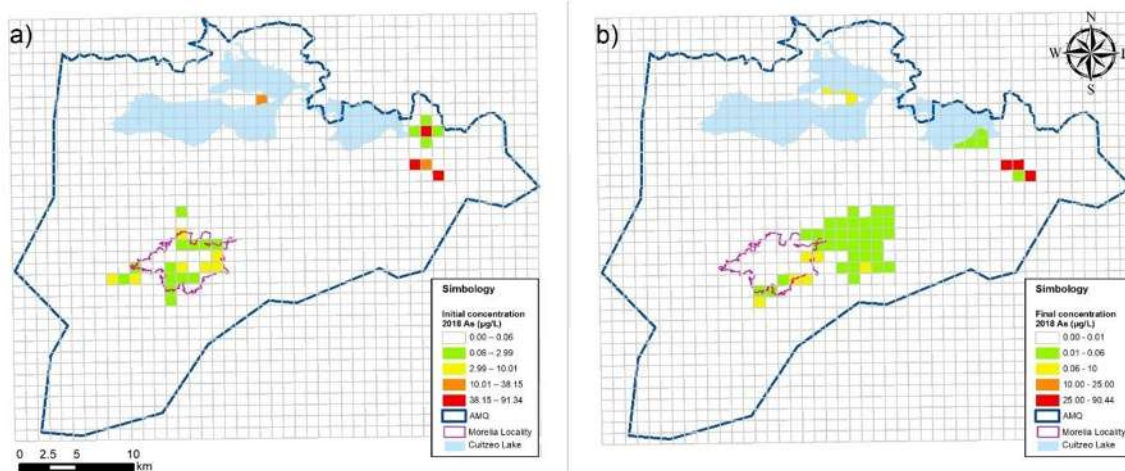


Figura 74. Variación de la concentración de arsénico en el año 2018.

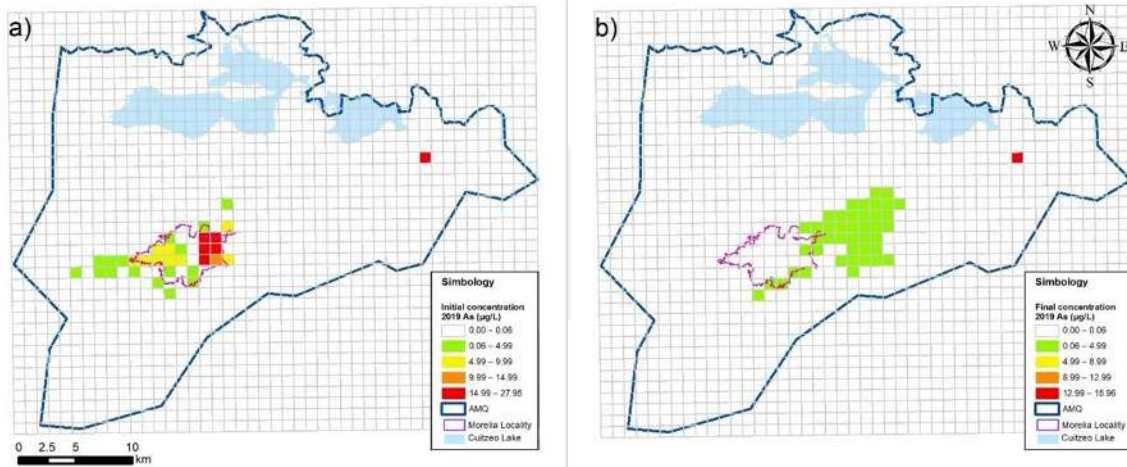


Figura 75. Variación de la concentración de arsénico en el año 2019.

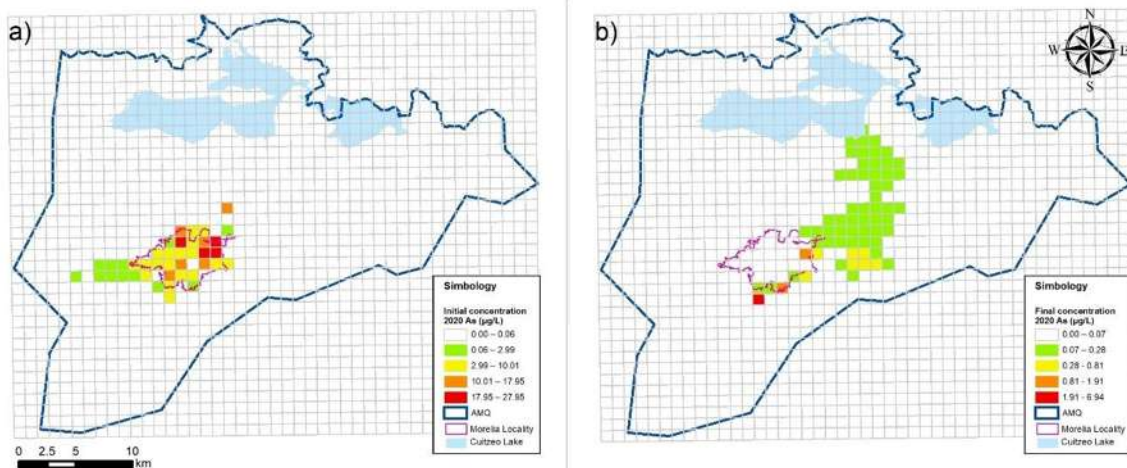


Figura 76. Variación de la concentración de arsénico en el año 2020.

Las direcciones de flujo que se marcan en el acuífero son importantes debido a que el tiradero de basura de Morelia se localiza al oeste de la localidad (Figura 47), lo que indica que las concentraciones que posteriormente se difunden en toda la localidad provienen de los lixiviados que percolan al acuífero, esto recordando que la dirección local del flujo es oeste – este; y también se puede considerar que parte del contaminante que se tiene en la porción norte del acuífero puede provenir de fuentes antropogénicas; ello no compite con la existencia geogénica del arsénico, pero si puede ser un factor del porqué en esos sitios se tienen concentraciones tan elevadas.

CONCLUSIONES

La gestión de la información meteorológica es necesaria debido a que estas series son la entrada al modelo superficial, por lo cual, si estas series no son revisadas con cuidado, se ingresa información de mala calidad que va a otorgar un resultado, pero este no será real.

Así mismo, la revisión gráfica de las estaciones hidrométricas es imprescindible debido a que las modelaciones deben realizarse a cuencas a régimen natural; ya que, si se tiene una cuenca a régimen alterado, se debe realizar una restitución a régimen natural lo que complica el proceso debido a la escasez de datos.

Es importante conocer el comportamiento de los cauces presentes en la zona, lo que permite comprender la manera en la que éstos se anidan de acuerdo con el funcionamiento hidráulico de la cuenca.

En zonas con escasez temporal de información la calibración del modelo es imperativo debido a que los parámetros no sólo se trasladan de forma espacial, si no también temporal (a periodos más actuales), por lo que los errores que podemos “arrastrar” son importantes.

Como se observa a lo largo de todo el proceso metodológico, se tiene la compilación de distintos métodos, lo que ayuda a que las series estén siendo modificadas y revisadas continuamente a lo largo de toda la metodología, asegurando la correcta selección de la información.

Esta metodología tuvo una correcta aplicación en las cuatro cuencas que se modelaron, por lo cual se tiene una validación general, lo cual es importante para zonas de LATAM, que tienen escasez de información temporal y espacial.

El código desarrollado en *RStudio* permitió reducir los tiempos de trabajo considerablemente, así como ser útil bajo diferentes escenarios (porcentaje de retorno al acuífero por riego y escenarios de cambio climático).

La modelación en Modflow permite entender el comportamiento del acuífero al inicio de la modelación y al final de los periodos de tiempo (después de 192 periodos o 16 años), con lo cual se debe de observar el descenso de los niveles estáticos en algunas zonas.

La calibración del modelo subterráneo se realiza por medio de la modificación de los parámetros hidrogeológicos (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento), así como de los niveles estáticos iniciales. Los resultados a su vez se comparan con los medidos en los años 2008, 2017 y 2022.

El modelo de MODFLOW se calibró considerando una corrección en los niveles piezométricos iniciales en el percentil 90; se consideró la conductividad hidráulica mínima y el coeficiente de almacenamiento máximo.

Este modelo se realizó como una modelación tradicional y como una modelación con la recarga PGR. La variación que se obtuvo comparando la modelación tradicional y por el mapa PGR fue inexistente, por lo que se tiene que cualquiera de las dos modelaciones es correcto.

Los pozos que superan los valores permisibles de arsénico por la normatividad vigente (NOM-127-SSA1-2021) son: Ciudad Industrial II, Centika, La Palma y Mercado de Abastos; el pozo Díaz Ordaz tiene valores muy cerca del límite.

El basurero de Morelia se encuentra en un sitio en donde el mapa PGR + DRASTIC tienen vulnerabilidad moderada. Las demás concentraciones no tienen una relación clara con el mapa DRASTIC o el PGR.

Con respecto al transporte del arsénico en la zona de estudio, se tiene que son constantes los flujos locales en a) porción de la localidad de Morelia en dirección SW – NE y, b) municipio de Zinapécuaro con dirección NE- SW. Cada uno de los diferentes periodos de estudio mostró diferentes concentraciones de As, siendo el año 2019 el más crítico en Zinapécuaro.

En la zona de Zinapécuaro hay presencia de agua termal, fluorada y con relación con el arsénico; esto a su vez se relaciona con el cinturón volcánico transmexicano que tiene presencia importante de As.

El arsénico que se encuentra presente en la zona de Ciudad Industrial proviene de la zona del basurero al noroeste de la ciudad de Morelia, esto se verifica por medio de las direcciones de flujo subterráneo que se muestra en MODFLOW, así como con la secuencia de Cheboratev que se cumple de acuerdo con el análisis del agua en la zona.

Para los escenarios de cambio climático, se tiene que la precipitación siempre disminuye en todos los escenarios y la temperatura aumenta. La combinación de ambas aplicadas en el modelo superficial (*Soil Moisture Method* en WEAP) permite identificar que el modelo de cambio climático más crítico es el HADGEM2_ES para un RCP 4.5 y un horizonte cercano; con dicho modelo se obtuvo una disminución de los flujos hacia el acuífero de un 44%.

Las direcciones de flujo que se tienen en el acuífero tienden a viajar hacia el centro de éste; por los bombeos excesivos que se tienen en la zona de estudio influyen para que el arsénico que se encuentra en la porción suroeste de la localidad de Morelia viaje en dirección este y posteriormente noreste, lo que permite que el arsénico se difunda en toda la localidad de Morelia.

El arsénico que se tiene en la porción de la localidad de Morelia es de origen antropogénico, mientras que el arsénico que se tiene en la porción de Zinapécuaro es geogénico.

En el caso del municipio de Morelia, las concentraciones elevadas en la porción noreste de la localidad de Morelia llegan difundiéndose desde la porción suroeste del mismo municipio, donde se tiene la presencia del tiradero a cielo abierto, donde el ingreso de arsénico proviene de los lixiviados del basurero.

Las concentraciones de arsénico bajo el efecto del cambio climático tienen un comportamiento interesante debido a que en ella se presentan dos mecanismos de transporte: advectivo y difusivo. Por medio de la advección el contaminante llega a celdas

más alejadas (en comparación con la modelación del periodo actual), pero las concentraciones son más bajas.

Con respecto al transporte del arsénico en la zona de estudio, se tiene que son constantes los flujos locales en a) porción de la localidad de Morelia en dirección SW – NE y, b) municipio de Zinapécuaro con dirección NE- SW. Cada uno de los diferentes periodos de estudio mostró diferentes concentraciones de As, siendo el año 2018 el más crítico en Zinapécuaro.

Con los resultados de cambio climático se realizó una modelación en Modflow, con lo que se obtuvo una disminución del 4% en los niveles piezométricos con respecto a los originales. Así mismo, se utilizó MT3D para entender el comportamiento del arsénico en un escenario crítico en términos de disminución de volúmenes de agua y se observa que los comportamientos del contaminante siguen la secuencia de Cheboratev, la cual permite entender las direcciones de flujo que se tienen en el acuífero.

La información obtenida a partir de las modelaciones coincide con la literatura revisada, lo que indica que los flujos en el acuífero han sido validados.

El dominio de la página del repositorio digital que contiene los mapas interactivos es aspeligrosidadamq.com

REFERENCIAS

- Abbas, S. A., Xuan, Y. & Bailey, R. T. (2022). Assessing Climate Change Impact on Water Resources in Water Demand Scenarios Using SWAT-MODFLOW-WEAP. *Hydrology*, 9(10), 164. <https://doi.org/10.3390/hydrology9100164>
- Adla, S., Tripathi, S. & Disse, M. (2019). Can we calibrate a daily time-step hydrological model using monthly time-step discharge data? *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091750>
- Alsevavni, I. N. & Almohseen, K. A. (2017). INTEGRATED APPLICATION OF (MODFLOW) AND (WEAP) MODEL IN NINEVEH PROVINCE. *The Journal of The University of Duhok*, 20(1), 680–690. <https://doi.org/10.26682/sjuod.2017.20.1.59>
- Alvarado Pérez, K. A. & Lucas Urbina, O. (2017). *Medición de Niveles Estáticos en el acuífero Morelia - Queréndaro*.
- Ang, R. & Oeurng, C. (2018). Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Science*, 32(1), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.002>
- Arellano-Lara, F. & Escalante-Sandoval, C. A. (2014). Multivariate delineation of rainfall homogeneous regions for estimating quantiles of maximum daily rainfall: A case study of northwestern Mexico. *Atmosfera*, 27(1), 47–60. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71100-2](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71100-2)
- Awawdeh, M., Obeidat, M. & Zaiter, G. (2015). Groundwater vulnerability assessment in the vicinity of Ramtha wastewater treatment plant, North Jordan. *Applied Water Science*, 5(4), 321–334. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0194-6>
- Bazzi, H., Ebrahimi, H. & Aminnejad, B. (2021). A comprehensive statistical analysis of evaporation rates under climate change in Southern Iran using WEAP (Case study:

- Chahnimeh Reservoirs of Sistan Plain). *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1339–1352. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.030>
- Bedekar, V., Morway, E. D., Langevin, C. D. & Tonkin, M. (2016). *MT3D-USGS Version 1: A U.S. Geological Survey Release of MT3DMS UPdated with New and Expanded Transport Capabilities for Use with MODFLOW*.
- Birkle, P. & Merkel, B. (2000). Environmental Impact by Spill of Geothermal Fluids at the Geothermal Field of Los Azufres, Michoacán, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 124(3/4), 371–410. <https://doi.org/10.1023/A:1005242824628>
- Birkle, Peter, Bundschuh, J. & Sracek, O. (2010). Mechanisms of arsenic enrichment in geothermal and petroleum reservoirs fluids in Mexico. *Water Research*, 44(19), 5605–5617. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.05.046>
- Campos-Aranda, D. F. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos-Aranda, D. F. (2007). *Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento* (Universidad Nacional Autónoma de México, Ed.).
- Chen, M., Izady, A. & Abdalla, O. A. (2017). An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, 544, 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.011>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1993). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- COESPO. (2020). *Proyecciones Municipales 2020 - 2030*. <http://coespo.michoacan.gob.mx/proyecciones-municipales-2020-2030/>
- CONAGUA. (2007). *Actualización Hidrogeológica de los acuíferos Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia - Queréndaro y Pastor Ortíz*.

CONAGUA. (2009). *Plan de Gestión Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo*.

CONAGUA. (2020). *Red Nacional de Medición de Calidad del Agua*.
<https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua#:~:text=%E2%80%9CRED%20NACIONAL%20DE%20MEDICI%C3%93N%20DE,cuerpos%20de%20agua%20del%20pa%C3%ADs.&text=Se%20incluyen%20par%C3%A1metros%20fisisicoqu%C3%ADmicos%20y,tipo%20de%20cuerpo%20de%20agua>

CONAGUA. (2023a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán*.

CONAGUA. (2023b). *Base de datos del REPDA*. Consulta La Base de Datos Del REPDA.
<https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

Cook, P. G., Shanafield, M., Andersen, M. S., Bourke, S., Cartwright, I., Cleverly, J., Currell, M., Doody, T. M., Hofmann, H., Hugmann, R., Irvine, D. J., Jakeman, A., McKay, J., Nelson, R. & Werner, A. D. (2022). Sustainable management of groundwater extraction: An Australian perspective on current challenges. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101262>

Cótlar Ávalos, H., Galindo Alcántar, A., González Mora, I. D., Pineda López, R. F. & Ríos Patrón, E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos para su manejo y gestión*.

Dehghanipour, A. H., Zahabiyoun, B., Schoups, G. & Babazadeh, H. (2019). A WEAP-MODFLOW surface water-groundwater model for the irrigated Miyandoab plain, Urmia lake basin, Iran: Multi-objective calibration and quantification of historical drought impacts. *Agricultural Water Management*, 223, 105704. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105704>

Diagrammes (6.77). (2014). Universidad de Avignon.

- Doorenbos, J. (1976). Agro-meteorological field stations. . *Food and Agriculture Organization of the United Nations* , 27.
- El Moneam, M. A. (2023). Review of artificial recharge prospects for augmentation of groundwater in Egypt: A case study of El Bustan extension area. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(7), 101995. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101995>
- Fernández Eguiarte, Zavala Hidalgo, Romero Centro, Conde Álvarez & Trejo Vázquez. (2015). *Actuazliación de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica*.
- Fotovat, M., Porhemmat, J., Sedghi, H. & Babazadeh, H. (2019). Evaluation of weap-modflow model as an integrated water resources management model for sustainable development (a case study: Gharesoo at doab-merek, kermanshah, iran). *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 52(1), 167–183. <https://doi.org/10.22059/cej.2019.260084.1495>
- García-Romero, L., Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Belda, E., Andreu, J. & Sánchez-Quispe, S. T. (2019). Optimization of the multi-start strategy of a direct- search algorithm for the calibration of rainfall- runoff models for water-resource assessment. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091876>
- Garduño Monroy, V. H., Giordano, N., Ávila Olivera, J. A., Hernández Madrigal, V. M., Sámano Nateras, A. & Díaz Salmerón, J. E. (2012). Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. *Urbanización, Vulnerabilidad y Riesgo*, 197–222.
- González-Arqueros, M. L., Domínguez-Vázquez, G., Alfaro-Cuevas-Villanueva, R., Israde-Alcántara, I. & Buenrostro-Delgado, O. (2021). Hazardous Solid Waste Confined in Closed Dump of Morelia: An Urgent Environmental Liability to Attend in Developing Countries. *Sustainability*, 13(5), 2557. <https://doi.org/10.3390/su13052557>

- Goshime, D. W., Haile, A. T., Rientjes, T., Absi, R., Ledésert, B. & Siegfried, T. (2021). Implications of water abstraction on the interconnected Central Rift Valley Lakes sub-basin of Ethiopia using WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100969>
- Guerrero-Morales, J., Fonseca, C. R., Gómez-Albores, M. A., Sampedro-Rosas, M. L. & Silva-Gómez, S. E. (2020). Proportional variation of potential groundwater recharge as a result of climate change and land-use: A study case in Mexico. *Land*, 9(10), 1–22. <https://doi.org/10.3390/land9100364>
- Hammer, D. E. & Kadlec, R. H. (1986). A model for wetland surface water dynamics. *Water Resources Research*, 22(13), 1951–1958. <https://doi.org/10.1029/WR022i013p01951>
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process*.
- Hernández Hernández, M. A., Navarro Farfán, M. del M. & Jiménez Magaña, J. (2021). *Medición de parámetros físico-químicos del agua subterránea de la ciudad de Morelia*.
- Hernández-Hernández, M. A., González-Sosa, J. R., Navarro-Farfán, M. del M. & García-Ledesma, I. A. (2022). Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las fuentes de agua potable en la Ciudad de Morelia (Michoacán, México). *VII Congreso Colombiano de Hidrogeología*.
- Hernández-Mena, L., Panduro-Rivera, M. G., Díaz-Torres, J. de J., Ojeda-Castillo, V., Real-Olvera, J. del, López-Cervantes, M., Pacheco-Domínguez, R. L., Morton-Bermea, O., Santacruz-Benítez, R., Vallejo-Rodríguez, R., Osuna-Laveaga, D. R., Bandala, E. R. & Flores-Payán, V. (2021). GIS, Multivariate Statistics Analysis and Health Risk Assessment of Water Supply Quality for Human Use in Central Mexico. *Water*, 13(16), 2196. <https://doi.org/10.3390/w13162196>

- Hughes, J. D., Russcher, M. J., Langevin, C. D., Morway, E. D. & McDonald, R. R. (2022). The MODFLOW Application Programming Interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling and Software*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257>
- IMTA. (2007). *Actualización Hidrogeológica de los acuíferos Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia Queréndaro y Pastor Ortiz*.
- IMTA. (2017). *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. <https://www.imta.gob.mx>
- Israde-Alcantara, I., Delgado, O. B. & Chavez, A. C. (2005). Geological Characterization and Environmental Implications of the Placement of the Morelia Dump, Michoacán, Central Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(6), 755–764. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464665>
- Jafari, T., Kiem, A. S., Javadi, S., Nakamura, T. & Nishida, K. (2021). Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100822>
- Khadri, S. F. R. & Pande, C. (2016). Ground water flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0049-7>
- Khoshkhou, Y., Jansson, P. E., Irannejad, P., Khalili, A. & Rahimi, H. (2015). Calibration of an energy balance model to simulate wintertime soil temperature, soil frost depth, and snow depth for a 14year period in a highland area of Iran. *Cold Regions Science and Technology*, 119, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.07.008>
- Lakshmi, G. & Sudheer, K. P. (2021). Parameterization in hydrological models through clustering of the simulation time period and multi-objective optimization based

calibration. *Environmental Modelling and Software*, 138.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104981>

Lerat, J., Thyer, M., McInerney, D., Kavetski, D., Woldemeskel, F., Pickett-Heaps, C., Shin, D. & Feikema, P. (2020). A robust approach for calibrating a daily rainfall-runoff model to monthly streamflow data. *Journal of Hydrology*, 591.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125129>

López, D. L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M. A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L. & Ormachea, M. (2012). Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of The Total Environment*, 429, 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.043>

Martínez, P. E., Martínez, P. & Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Mundi-Prensa .

Mather, J. R. (1975). Estimation of areal average precipitation using different network densities and averaging techniques. *Publication in Climatology* , XXVIII(2).

Matus Silva, O. D. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua* [Tesis de Maestría]. CATIE.

Miguel Merino, J. & Paredes Arquiola, J. (2016). *Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Júcar (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de precipitación-escorrentía*. Universitat Politècnica de València.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (1983). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. In *Transactions of the ASABE* (Vol. 50, Issue 3).

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed

Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Mussa, K. R., Mjemah, I. C. & Machunda, R. L. (2020). Open-source software application for hydrogeological delineation of potential groundwater recharge zones in the singida semi-arid, fractured aquifer, central Tanzania. *Hydrology*, 7(2).
<https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY7020028>

Navarro-Farfán, M. del M., García-Romero, L., Martínez-Cinco, M. A., Domínguez-Sánchez, C. & Sánchez-Quispe, S. T. (2024). Methodology for the assessment of poor-data water resources. *PeerJ*, 12, e17755. <https://doi.org/10.7717/peerj.17755>

Navarro-Farfán, M. del M., García-Romero, L., Martínez-Cinco, M. A., Hernández-Hernández, M. A. & Sánchez-Quispe, S. T. (2024). Comparison between MODFLOW Groundwater Modeling with Traditional and Distributed Recharge. *Hydrology*, 11(1), 9.
<https://doi.org/10.3390/hydrology11010009>

Nava-Ruiz, C. & Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién*, 16(3), 140–147.

Nazeer, A., Maskey, S., Skaugen, T. & McClain, M. E. (2022). Simulating the hydrological regime of the snow fed and glacialised Gilgit Basin in the Upper Indus using global precipitation products and a data parsimonious precipitation-runoff model. *Science of the Total Environment*, 802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149872>

Ochoa-González, G. H., Carreón-Freyre, D., Cerca, M. & López-Martínez, M. (2015). Assessment of groundwater flow in volcanic faulted areas. A study case in Queretaro, Mexico. *Geofísica Internacional*, 54(3), 199–220.
<https://doi.org/10.1016/j.gi.2015.04.016>

Osuna-Martínez, C. C., Armienta, M. A., Bergés-Tiznado, M. E. & Páez-Osuna, F. (2021). Arsenic in waters, soils, sediments, and biota from Mexico: An environmental review.

Science of The Total Environment, 752, 142062.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142062>

Pérez-Villareal, J., Ávila- Olivera, J. A. & Israde-Alcantara, I. (2018). Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 675–688.

PNDU. (2006). *Informe sobre Desarrollo Humano 2006: Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua*.

Rodríguez-Cantú, L. N., Martínez-Cinco, M. A., Balderas-Cortés, J. J., Mondaca-Fernández, I., Navarro-Farfán, M. del M. & Meza-Montenegro, M. M. (2022). Arsenic-contaminated drinking water and associated health risks in children from communities located in a geothermal site of Michoacán, México: Monte Carlo probabilistic method. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 28(3–4), 408–432.
<https://doi.org/10.1080/10807039.2022.2054771>

Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. & Lane, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications.

Sánchez-Quispe, Sonia Tatiana, Navarro-Farfán, M. del M. & García-Romero, L. (2021). Methodology for the processing of meteorological and hydrometric data at the basin scale. In *CIERMMI Women in Science TXVI Engineering and Technology* (pp. 107–145). ECORFAN.

Sánchez-San Román, J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea* (1st ed.). Universidad de Salamanca.

Sandoval Rodríguez, D. (2022). *Mantos acuíferos en México enfrentan sobreexplotación y salinización*.

- Sathe, S. S. & Mahanta, C. (2019). Groundwater flow and arsenic contamination transport modeling for a multi aquifer terrain: Assessment and mitigation strategies. *Journal of Environmental Management*, 231, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.057>
- Schuol, J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R. & Yang, H. (2008). Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 352(1–2), 30–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025>
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua., NOM-127_SSA1_2021 (2021).
- SEMARNAT. (2018). *Estadísticas de Agua en México*.
- Sharma, K. D., Singh, H. P. & Pareek, O. P. (1983). Rainwater infiltration into a bare loamy sand. *Hydrological Sciences Journal*, 28(3), 417–424. <https://doi.org/10.1080/02626668309491980>
- Siegel, S. (2015). *Estadística No Paramétrica* (4th ed.). Trillas.
- Sikdar, P. K. & Chakraborty, S. (2017). Numerical modelling of groundwater flow to understand the impacts of pumping on arsenic migration in the aquifer of North Bengal Plain. *Journal of Earth System Science*, 126(2), 29. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0799-x>
- SMN. (2023). *Información estadística climatológica. Servicio Meteorológico Nacional*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Solera Solera, A. & Andréu Álvarez, J. (2004). *Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistemática de recursos hídricos*. Universitat Politècnica de València.

- Stockholm Environment Institute. (2009). *Guía Metodológica. Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el modelo WEAP*.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* , 38(1), 55–94.
- Torres, A. I., Rivera Hernández, J. R., Giarratano, E., Faleschini, M., Green Ruiz, C. R. & Gil, M. N. (2019). Potentially toxic elements and biochemical components in surface sediments of NW Mexico: An assessment of contamination and trophic status. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110633. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110633>
- Torres Díaz, M. C., Basulto Solís, Y. Y., Cortés Esquivel, J., García Uitz, K., Koh Sosa, Á., Puerto Romero, F. & Pacheco, J. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 189–203.
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>
- Triviño Pérez, A. & Ortiz Rojas, S. (2004). Metodología para la Modelación Distribuida de la Escorrentía Superficial y Delimitación de Zonas Inundables en Ramblas y Ríos-Rambla Mediterráneos. *Investigaciones Geográficas*, 35, 67–83.
- Uchenna, U. P., Lancia, M., Viaroli, S., Ugbaja, A. N., Galluzzi, M. & Zheng, C. (2023). Groundwater sustainability in African Metropolises: Case study from Calabar, Nigeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101314>
- UMSNH. (2008). *Muestreo y calidad de Agua en 7 pozos de la ciudad de Morelia*.
- Vasileva, T. (2019). An assessment of potential groundwater recharge zones in Bulgaria. In *GEOLOGICA BALCANICA* (Vol. 48, Issue 1).

- Vázquez-Vázquez, M. J., Cortés-Martínez, R. & Alfaro-Cuevas, R. (2015). Arsenic occurrence and water quality in recreational thermal springs at Araro Mexico. *The International Journal of Science & Technology*, 5, 1–5.
- Villalobos-Castañeda, B., Alfaro-Cuevas, R., Cortés-Martínez, R., Martínez-Miranda, V. & Márquez-Benavides, L. (2010). Distribution and partitioning of iron, zinc, and arsenic in surface sediments in the Grande River mouth to Cuitzeo Lake, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1–4), 331–346. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1005-7>
- WMO. (1966). *Climatic change: report of a working group of the Commission for Climatology. Technical note No. 79.*
- Yin, S., Yang, L., Wen, Q. & Wei, B. (2022). Temporal variation and mechanism of the geogenic arsenic concentrations in global groundwater. *Applied Geochemistry*, 146, 105475. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105475>
- Zhang, H., Huang, G. H., Wang, D. & Zhang, X. (2011). Multi-period calibration of a semi-distributed hydrological model based on hydroclimatic clustering. *Advances in Water Resources*, 34(10), 1292–1303. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.06.005>
- Zheng, C. & Wang, P. P. (1999). *MT3DMS: A modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater System; Documentation and User's Guide.* U.S.Army Corps of Engineers.

ANEXO A. SUSTENTO MATEMÁTICO DE LA VALIDACIÓN DE ESTACIONES

VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Es importante resaltar que la importancia de las estaciones meteorológicas en una región, ya que, la precipitación como elemento que define las condiciones climáticas de un área cualquiera es incuestionable.

Los datos de precipitación obtenidos por instrumentos requieren, sin embargo, tratamientos específicos al objeto de hacerlos más confiables. Diversas técnicas se han desarrollado a través del tiempo para procesar esta variable climática. En este apartado se realiza una propuesta de las pruebas que pueden aplicarse a los datos de precipitación para garantizar su fiabilidad para su uso en otros estudios.

Para Salas et al.(1980), la no homogeneidad en los datos es común en las series de tiempo hidrológicas; es inducida por los seres humanos o producida por factores naturales de perturbación significativos, evolutivos o repentinos (como los desastres naturales o la regulación de los sistemas). Además, los datos hidrológicos pueden tener errores sistemáticos significativos que producen series inconsistentes, esto significa que no cumplen con alguna de las propiedades de homogeneidad o independencia.

Las series temporales de precipitación deberán demostrar homogeneidad en sus datos. Esto se logra a través de la implementación de la prueba de Secuencias (Mather, 1975), la prueba de Helmer (Doorenbos, 1976), o Curva Masa Doble (Martínez et al., 2006), o Wald-Wolfowitz (Siegel, 2015); además de pruebas específicas como t de Student (WMO, 1966), o Cramer (WMO, 1966). Se dice que una serie es homogénea cuando las pruebas demuestran que los elementos presentes en la muestra provienen estadísticamente de una misma población. De igual forma, la serie de precipitaciones debe demostrar independencia. Esta propiedad se evalúa a través de la prueba de los Límites de Anderson (Salas et al., 1980). Se dice que una serie es independiente, cuando se demuestra que la probabilidad de que la ocurrencia de

cualquier dato de precipitación presente en la muestra no dependa de la ocurrencia del valor de precipitación subsecuente o precedente en el tiempo o en el espacio.

Varias características de las series temporales, como la media, la desviación estándar y las correlaciones seriales, pueden verse afectadas cuando una tendencia y/o un salto positivo o negativo (deslizamiento) se producen en series hidrológicas por falta de homogeneidad e independencia, generando una mayor incertidumbre asociada a los datos. Además, hay que añadir que, cuanto más larga es una serie de precipitaciones, mayor es la probabilidad de que se incurra en la homogeneidad de la serie, producida por actividades humanas o por una interrupción accidental de la naturaleza; o en la no independencia de las series, atribuyendo esta problemática a errores a sistemáticos (inconsistencia).

Homogeneidad

Las pruebas de homogeneidad se pueden clasificar en dos grupos, paramétricas y no paramétricas. Éstas últimas son pruebas menos rigurosas que las primeras, pero mucho más sencillas de realizar. Con base en lo anterior, se puede hablar de pruebas generales y pruebas específicas. Entre las pruebas generales (o no paramétricas) se encuentran: prueba de Secuencias, prueba de Helmert y Curva Masa Doble; y como pruebas específicas (o paramétricas) se encuentran: t de Student, Cramer y Wald-Wolfowitz (Campos-Aranda, 1984).

Es recomendable aplicar, como primera aproximación, las pruebas generales. Si existen discrepancias en los resultados obtenidos (una indique homogeneidad y la otra no), entonces se procede con la aplicación de las pruebas específicas a fin de esclarecer si la estación es homogénea o no cumple con dicha característica. Las pruebas particulares son generalmente pruebas basadas en la probabilidad, donde se determina la homogeneidad de la serie a partir de una hipótesis nula (H_0) y una regla para aceptar o rechazar H_0 con base en una probabilidad asociada.

Adicionalmente, las pruebas de homogeneidad pueden clasificarse en dos grupos:

- Las pruebas que no requieren de una estación adicional para determina la homogeneidad de sus datos, donde el análisis se efectúa con los datos propios de la estación: Prueba de Helmert, Secuencias, t de Student y Cramer.
- Las pruebas que requiere al menos una estación auxiliar cercana para realizar el análisis: prueba de la Curva Masa Doble y Wald-Wolfowitz.

En los apartados siguientes se desarrolla el fundamento teórico de cada prueba y un ejemplo de aplicación.

Prueba de Secuencias

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada dato con respecto a la mediana muestral, y comparar el número de cambios permitidos (u) con base en el tamaño de la muestra (n). Existe un número de cambios permitidos dependiendo del tamaño de la muestra. Si el número de cambios registrados está entre los valores establecidos en los rangos presentados en la Tabla 19, entonces se dice que la serie es homogénea(Mather, 1975), en caso contrario la serie es no homogénea.

Tabla 19. Rangos de cambios permitidos para la prueba de Secuencias, según el número de datos.

n	u	n	u	n	u	n	u
12	5 – 8	22	9 – 14	32	13 – 20	50	22 – 30
14	5 – 10	24	9 – 16	34	14 – 21	60	26 – 36
16	6 – 11	26	10 – 17	36	15 – 22	70	31 – 41
18	7 – 12	28	11 – 18	38	16 – 23	80	35 – 47
20	8 – 13	30	12 – 19	40	16 – 25	100	45 – 57

Para la prueba de Secuencias, necesitaremos entonces obtener la mediana de la serie continua de acuerdo con el número de datos que se tienen. En este sentido, continuamos comparando la serie ordenada cronológicamente con el valor de la media o mediana, por lo que si el valor en la serie es menor que la mediana se coloca una L (lower, menor) o M (major, mayor); acto seguido, proseguimos en marcar las secuencias que se forman con la columna de L/M, teniendo en cuenta que cuando se tiene un cambio de L a M o viceversa, se incrementa en uno el número de secuencias que se forman.

Prueba de Helmert

Esta prueba consiste en un procedimiento sencillo donde la serie debe estar ordenada cronológicamente y se analiza el signo de las desviaciones de cada dato con respecto a la media aritmética de la serie. Si una desviación con cierto signo es seguida por otra del mismo signo, entonces se dice hay una secuencia "S", en caso se considera un cambio "C". Una vez analizada toda la serie, se contabiliza el número de cambios y el número de secuencias, y se aplica la desigualdad de la Ecuación [8]. Si la desigualdad se cumple, la estación puede considerarse como homogénea (Doorembos, 1976).

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1} \quad [9]$$

Prueba de la Curva Masa Doble

El método de la Curva Masa Doble (Martínez et al., 2006) consiste en comprobar si los registros de una estación pluviométrica han sufrido variaciones que conduzcan a valores erróneos. Estas variaciones pueden deberse a un cambio en la ubicación instrumental, una variación en las condiciones periféricas del lugar de medición o un cambio en el operador del equipo del observador que efectúa las lecturas.

El método de la curva masa considera que, en una zona meteorológica homogénea, los valores de precipitación que ocurren en diferentes puntos de esa zona en períodos anuales o estacionales guardan una relación de proporcionalidad que puede representarse gráficamente. Esa representación consiste en identificar la estación que queremos controlar (estación principal), y obtener el valor de la precipitación anual. Para el contraste, será necesario contar con al menos una estación base cuya serie de datos anuales debe coincidir con el de la estación a controlar.

Para cada estación (principal y estación base), en cada año, a partir del primero con registro, se obtiene el acumulado de la estación base (sí es más de una, entonces se promedian los valores de las estaciones base y se acumulan por años sucesivos), y el acumulado de la estación a controlar.

Luego, en un sistema de ejes ortogonales, se grafica en ordenadas los valores de precipitación anual acumulada de la estación a controlar y en abscisas los de precipitación media anual acumulada de la estación base. Si los registros no han sufrido variaciones, los puntos se alinean en una recta de pendiente única y uniforme, por lo tanto, no será necesario efectuar correcciones. Si por el contrario hay variaciones en la pendiente de la recta, significa que parte de la serie contiene valores erróneos por lo cual el registro de datos debe ser corregido a partir del año en el que cambia la pendiente de la recta antes de que puedan ser utilizados. Para este caso, es necesario obtener un Factor de Corrección que es proporcional a la variación de la pendiente de la recta (Figura 77).

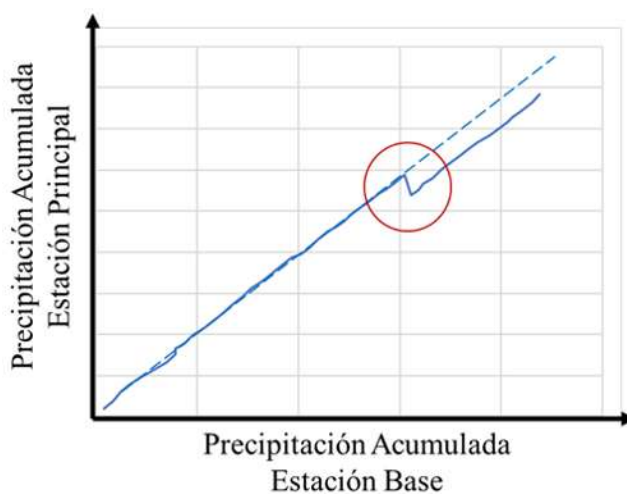


Figura 77. Representación de la prueba de Curva Masa Doble.

Prueba estadística t de Student

Cuando la causa de la pérdida de homogeneidad de la serie se debe a un abrupto cambio en la media, la prueba paramétrica de la *t* de Student es especialmente útil. Así que, en primer lugar, lo que se recomienda es realizar una gráfica de las precipitaciones anuales, en la cual se pueda observar el comportamiento de la serie con respecto al tiempo, de esta forma, podemos delimitar los periodos de tiempo en los que se tenga un salto (cambio en la tendencia de la media de la serie) y que, haga que la media de las precipitaciones incremente o disminuya; tal que, se tendrán dos periodos n_1 y n_2 , cada uno con el cálculo del valor de la media x_1 y x_2 respectivamente.

Esta prueba es poderosa para detectar la inconsistencia en la media, además de ser un test robusto (excepto cuando la longitud de los dos periodos seleccionados para comparación de sus medias es desigual, pues entonces la distribución de los datos puede no ser sesgada).

Se entiende que una prueba es robusta cuando es insensible a la forma de distribución de probabilidades de la serie. Debido a lo anterior, se recomienda aplicar la prueba de la t de Student, que los valores de n_1 y n_2 de cada media que se compara \bar{x}_1 y \bar{x}_2 , no sean similares (Campos-Aranda, 1984).

La estadística de la t de Student está definida por la Ecuación [8] (WMO, 1966):

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad [10]$$

Siendo S_1^2 y S_2^2 las varianzas de x_i en los dos periodos de registro, respectivamente. Entonces, $n_1 S_1^2$ puede ser calculada con la Ecuación [8].

$$n_1 S_1^2 = \sum_1^{n_1} x_i^2 - \frac{1}{n_1} \left(\sum_1^{n_1} x_i \right)^2 \quad [11]$$

Y de manera similar se puede calcular $n_2 S_2^2$.

El valor absoluto de t_d se compara generalmente con el valor de t de la distribución t de Student de dos colas con $\nu = (n_1 + n_2 - 2)$ grados de libertad y con un 5% de nivel de significancia. Los valores de t se concentran en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de significancia para los valores de la Distribución de la t de Student y Cramer.

Grados de Libertad	Nivel de Significancia		Grados de Libertad	Nivel de Significancia	
	5% *	5% **		5% *	5% **
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101

2	2.920	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.080
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.860	2.306	25	1.708	2.060
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.228	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.048
12	1.782	2.179	29	1.699	2.045
13	1.771	2.160	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.753	2.131	60	1.671	2.000
16	1.746	2.120	120	1.658	1.980
17	1.740	2.110	∞	1.645	1.960

* Prueba de una cola
** Prueba de dos colas

Prueba Estadística de Cramer

Algunas veces, puede ser más conveniente comparara la media de toda la serie y la media de una cierta parte del registro, para investigar la homogeneidad; para tal propósito la prueba de Cramer es bastante útil, cuando los periodos de n_1 y n_2 son tan parecidos que la prueba de t de Student pierde validez (Campos Aranda, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998).

En la prueba de Cramer se requieren los valores de media aritmética \bar{x} (Ecuación [12]) y desviación típica o desviación estándar S (Ecuación [8]) del registro total de n valores:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad [12]$$

$$S = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad [13]$$

Por otra parte, \bar{x}_k es la media del periodo de n' valores (subperiodo de n), que tenga mayor diferencia con respecto a la media (\bar{x}) de la serie completa (n); de tal forma que el valor t_k se calcula de acuerdo a la formulación mostrada desde la Ecuación [14] a la Ecuación [8] (WMO, 1966):

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=k-1}^{i=k+n} x_i}{n'} \quad [14]$$

$$\tau_k = \frac{(\bar{x}_k - \bar{x})}{S} \quad [15]$$

$$t_k = \left[\frac{n'(n-2)}{n - n'[1 + (\tau_k)^2]} \right]^{1/2} \cdot (\tau_k) \quad [16]$$

Al igual que se planteó para las pruebas de Secuencias y Helmert, se recomienda que las pruebas de t de Student y Cramer se hagan a la par, ya que: i) son complementarias, ii) parten del entendimiento de la gráfica de la serie de precipitaciones totales anuales y, iii) el valor de significancia con el cual se compara es el mismo (Tabla 20).

Prueba Estadística de Wald - Wolfowitz

Esta prueba permite determinar si existe alguna diferencia entre dos series de lluvias anuales de tamaño N_1 y N_2 (procedentes de dos estaciones meteorológicas distintas). Para aplicar la prueba deberá generarse una única serie mezclando los datos procedentes de las dos estaciones y se ordenen de forma creciente. Posteriormente, se determina el número de secuencias o rachas de la serie ordenada. Una secuencia se define como cualquier sucesión de valores de la misma serie, los cuales se indican con X para la estación en que se investiga la homogeneidad y con Y para la estación auxiliar (Campos Aranda, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998).

Cuando las muestras son pequeñas ($N_1, N_2 \leq 20$) la Tabla 4.11 presenta los valores críticos del número de secuencias, de manera que si se encontró un número de rachas (r) igual o

menor que el valor tabulado, las series serán diferentes debido a una cierta causa, en un nivel de significancia del 5%.

Esta prueba es complementaria a cualquier otra prueba estadística para homogeneidad de una estación meteorológica, tal como Cramer o *t* de Student. Entonces, si la probabilidad obtenida para esta prueba supera el porcentaje de significancia (5% o 10%), se tiene que una serie es homogénea y la otra no homogénea; por el contrario, si el valor de la probabilidad se encuentra dentro del rango del nivel de significancia, se tiene que las dos series serán homogéneas o no homogéneas. Lo anterior se determina conociendo la homogeneidad o no homogeneidad de la serie por medio de los resultados de la prueba de *t* de Student o Cramer.

Tabla 21. Valores críticos del número de secuencias en el test de Wald-Wolfowitz, para muestras pequeñas.

N1/N2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2											2	2	2	2	2	2	2	2	2
3					2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
4				2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
5			2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5
6		2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6
7		2	2	3	3	3	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
8		2	3	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	7
9		2	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8
10		2	3	3	4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9
11		2	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9
12	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10
13	2	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	9	10	10	10	10
14	2	2	3	4	5	5	6	7	7	8	8	9	9	9	10	10	10	11	11
15	2	3	3	4	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	11	12
16	2	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	9	10	10	11	11	11	12	12
17	2	3	4	4	5	6	7	7	8	9	9	10	10	11	11	11	12	12	13
18	2	3	4	5	5	6	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13
19	2	3	4	5	6	6	7	8	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	13
20	2	3	4	5	6	6	7	8	9	9	10	10	11	12	12	13	13	13	14

Fuente: elaboración propia.

Cuando N_1 o $N_2 > 20$, no se puede utilizar la Tabla 21, entonces se evalúa la estadística z , de acuerdo con la Ecuación [8] (Siegel, 2015).

$$z = \frac{\left| r - \left(\frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2} + 1 \right) \right| - 0.50}{\sqrt{\frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)^2(N_1 + N_2 - 1)}}} \quad [17]$$

Si el valor calculado de z en la Ecuación 4.9 tiene una probabilidad asociada ' p ', leída directamente en la Tabla 4.12, igual o menor que el nivel de significancia adoptado (5% y 10%) las series serán diferentes y, por lo tanto, si se sabe que una de ellas es homogénea, la otra será no homogénea. Entonces, de acuerdo con los valores presentes en la Tabla 22, se recomienda que el valor absoluto de z sea mayor o igual a 1.65 para un valor de significancia del 5% y mayor o igual a de 1.29 para un valor de significancia del 10%.

Tabla 22. Probabilidades asociadas ' p ' auxiliares en la prueba de Wald-Wolfowitz.

Z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367

1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007

Independencia

Límites de Anderson

Se dice que los datos de una muestra son independientes cuando el valor de uno de ellos no repercute en el valor del siguiente dato en una misma serie. Para determinar los límites de probabilidad de series independientes, se utiliza la prueba de los Límites de Anderson con un 95% de confianza (Anderson, 1941).

La independencia de la serie se determina a través de un gráfico denominado correlograma. Éste se construye a través de la estimación de los propios límites de confianza, denominados Límites de Anderson, de ahí el nombre de la prueba.; y de la determinación de los coeficientes de autocorrelación (r) que se grafican en las ordenadas, mientras que en eje de las abscisas se grafican los tiempos de retraso de la serie o desfases (k). El número de desfases depende del número de datos de la serie, es decir que, a mayor número de datos, se necesita un mayor número de desfases para evaluar la independencia de la serie, y puede calcularse con la Ecuación [8]. Ambos elementos, Límites de Anderson y los coeficientes de autocorrelación (r_k), dependen de los tiempos de retraso de la serie (Salas, Yevjevich, & Lane, 1980).

$$k = \frac{n}{3} \quad [18]$$

Para calcular el correlograma, se debe considerar que a partir de la serie original de datos (X) se genera una serie modificada (Y) que depende del desfase (k) que se aplique a la serie. De esta forma, para un mismo k , se tiene una serie X y una serie Y .

Entonces, según el número de desfases (k), será el número de valores que se tienen en el correlograma (ρ), representados en la Ecuación [19] y Ecuación [8]; donde σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las series X y Y , respectivamente y n representa el número de datos de la serie.

$$r_k = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad [19]$$

Donde:

$$\beta = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad [20]$$

Para determinar los límites de probabilidad de series independientes (o persistentes para series de caudales), es decir los límites, superior e inferior, de Anderson (Anderson, 1941) con un 95% de nivel de confianza, se calculan utilizando la Ecuación [8].

$$l_{r(95\%)} = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{n - k - 1}}{n - k} \quad [21]$$

Si al aplicar la prueba con un nivel de significancia del 5%, se tiene que la serie es dependiente (no independiente), se recomienda utilizar un nivel de significancia del 1% (Ecuación [8]).

$$l_{r(99\%)} = \frac{-1 \pm 2.326 \sqrt{n - k - 1}}{n - k} \quad [22]$$

En cuanto a las estaciones meteorológicas, sí y solo si, menos del 10% de los valores del correlograma calculado sobrepasan los límites de confianza, se dice que la serie de datos es independiente.

Cuando esta prueba se aplica a las estaciones hidrométricas, no se busca independencia de la serie, más bien se evalúa su dependencia debido a la naturaleza de la información.

En las series de volúmenes de escurrimiento o caudales debe existir una dependencia de los datos (debido a la regulación de los sistemas) que se traduce en una relación del dato evaluado con aquél que lo precede. Tal dependencia se incrementa a medida que el intervalo de muestreo de una serie se reduce, de manera que existe más dependencia entre valores sucesivos mensuales que entre magnitudes anuales (Campos Aranda, Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento, 2007).

Por ello, la interpretación de la dependencia de una serie de caudales requiere que al menos el 90% de valores del correlograma se encuentren por fuera de los Límites de Anderson, entonces se dice que la serie es persistente (dependiente).

VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Estaciones a Régimen Natural

Las series hidrométricas a régimen natural son dadas por la serie histórica de caudales que hubieran circulado por dicho lugar en caso de que no existiera ninguna intervención humana en la cuenca. Las acciones antropogénicas son todos los trabajos de regulación o utilización del agua superficial o subterránea que alteren la cuantía del caudal que habría circulado por el río (Solera Solera & Andréu Álvarez, 2004).

Entonces, si se configura un modelo matemático para la simulación del funcionamiento de este y, se alimenta este con las series a régimen natural, el resultado serán las series simuladas también en régimen natural.

En México, no se cuenta con la información necesaria para realizar una restitución a régimen natural; razón por la cual, se plantea trabajar con estaciones hidrométricas sin alteración, con las cuales se crean cuencas altas o de cabecera. Estas cuencas, son áreas aledañas a la divisoria del agua o parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca y, en esta zona se forman los primeros escurrimientos luego que el suelo haya retenido o absorbido el agua según su capacidad (Cótler Ávalos et al., 2013).

Al partir de series hidrométricas en las que no existen acciones antropogénicas, es necesario revisar que no existan obras importantes en la cuenca; además del comportamiento de la serie hidrométrica en sí. Por ello, además de realizar las pruebas de homogeneidad y persistencia, se realiza una revisión visual de las series de caudales a través del tiempo; así pues, para las cuencas generadas a partir de las estaciones hidrométricas, se obtiene el coeficiente de escurrimiento y se calcula el módulo relativo.

Revisión Visual de las Series de Escurrimiento

Como menciona Campos Aranda en su libro: Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento(2007), la hidrología define a una serie cronológica o serie de tiempo como una sucesión de observaciones que miden la variación en el tiempo de algún aspecto de un fenómeno, tal como es el caudal o volumen de un cauce, el nivel de agua en un lago o embalse, etc. En hidrología solo se aceptan dos componentes: la determinística y la aleatoriedad o estocástica.

La componente determinística es aquella que puede ser evaluada para propósitos de predicción y consiste principalmente de comportamientos del tipo de tendencia y forma cíclica o periódica, además de cambios súbitos, llamados saltos que son inhomogeneidades de un tipo particular. En cambio, la componente estocástica está constituida por oscilaciones irregulares y efectos aleatorios que no pueden ser explicados físicamente en forma estricta y requieren de los conceptos probabilísticos para su descripción. En la Figura 78 se esquematizan series cronológicas con varios tipos de componentes determinísticas.

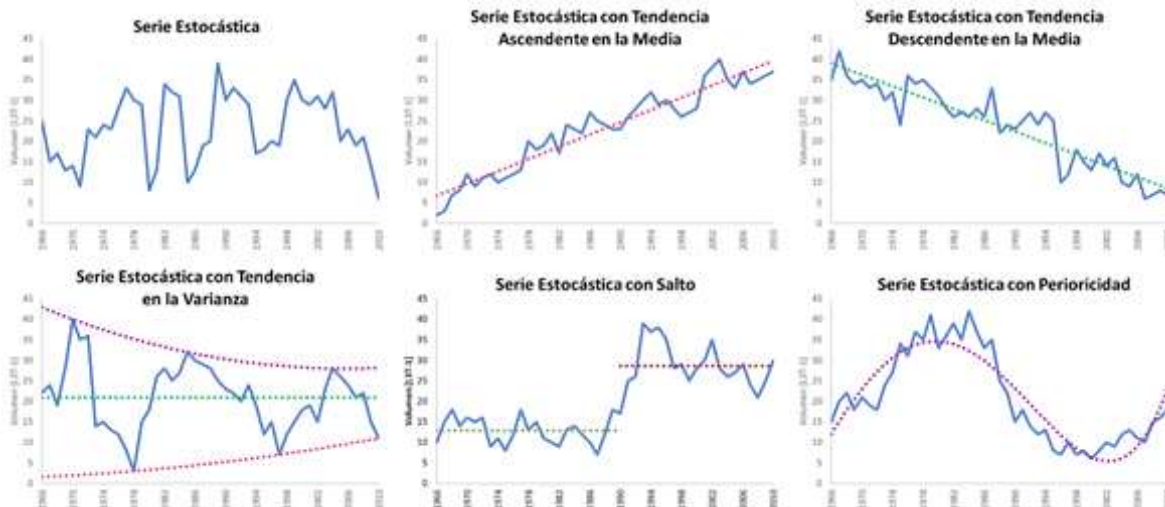


Figura 78. Series cronológicas con varios tipos de componentes determinísticas.

En general, las tendencias en las series cronológicas de escurrimientos anuales pueden resultar de cambios en el ambiente hidrológico que produce la serie o de alteraciones que provienen de variaciones graduales naturales o que son inducidas por el hombre. Ya sea que la tendencia en la serie de tiempo se deba a cambios en la cuenca o a errores en la medición, el hecho es que origina que la serie sea catalogada como inconsistente. En algunas ocasiones, la tendencia en la media puede ser bastante obvia, sin embargo, en la mayoría de los casos se tiene cierta duda si los efectos del error sistemático sospechados son significativos o no; razón por la cual, resulta imperativo realizar pruebas numéricas como es la persistencia.

Aparte de la tendencia, pueden ocurrir cambios súbitos denominados saltos, los cuales pueden ser el resultado de eventos naturales catastróficos como terremotos o incendios forestales, o consecuencias de obras hidráulicas construidas en la cuenca. En general, la presencia de un salto en la serie indica que de alguna manera se ha perdido la homogeneidad del registro, es decir que ahora las observaciones que lo integran provienen de dos poblaciones, tal vez diferentes estadísticamente y por ello, habrá que probar si se perdió o no la homogeneidad.

Coeficiente de Escurrimiento

Chow, et al. (1993) definió el coeficiente de escurrimiento como la relación entre el escurrimiento directo y la intensidad promedio de la precipitación de una tormenta. Sin embargo, a causa de la variabilidad de la intensidad de precipitación, este valor es difícil de determinar utilizando la información observada, por lo que también puede definirse como la relación entre el volumen de escurrimiento directo y el volumen de precipitación en la cuenca, en un periodo de tiempo dado, tal que se tiene la Ecuación [8]:

$$C_e = \frac{V_E}{V_P} \quad [23]$$

Donde V_E es el volumen anual y V_P es el volumen anual precipitado en la zona.

El coeficiente de escurrimiento es una variable poco precisa, debido a que implica una relación fija entre el escurrimiento y la precipitación de la cuenca, lo cual no se cumple en realidad. La proporción de lluvia total que fluirá como escurrimiento superficial depende de la permeabilidad del suelo y de la pendiente de la zona.

Otra forma de comprenderlo es obteniendo el parámetro K con la relación existente entre la lámina escurrida en mm (E) y la precipitación en mm (P), como se muestra en la Ecuación [8].

$$K = \frac{E}{P} \quad [24]$$

Tanto para C_e y K , debe cumplirse que: $K < 1$ y $C_e < 1$; esto debido a que el escurrimiento de una cuenca debe de ser menor que las precipitaciones presentes.

Modos en las Aportaciones

Sánchez San Román (2017) menciona que en los datos de aforo se pueden presentar distintos modos, como: caudales diarios, mensuales o anuales, aportación, lámina de agua equivalente y caudal específico (Figura 79). Estos dos últimos permiten relacionar el escurrimiento y la

precipitación con el área de estudio y es por ello, que se utiliza como un parámetro de comprensión de las estaciones hidrométricas en revisión.

Caudales diarios: que pueden corresponder a la lectura diaria de una escala limnimétrica o corresponder a la ordenada media del gráfico diario de un limnógrafo.

Caudales mensuales o mensuales medios: para un año concreto, es la media de todos los días de ese mes. Para una serie de años, se refiere a la media de todos los valores de octubre, todos los valores de noviembre, etc. para toda la serie estudiada.

Para un año concreto, el caudal anual o anual medio (módulo) es la media de todos los días de ese año, para la serie de años se refiere a la media de todos los años de la serie considerada.

La aportación normalmente es referida a un año (aportación anual), aunque a veces la referimos a un mes (aportación mensual). Es el volumen de agua aportado por el cauce en el punto considerado durante un año o un mes (hm^3).

La lámina de agua equivalente es el espesor de agua que se obtendría repartiéndolo sobre toda la cuenca el volumen de la aportación anual (en mm). Se obtiene dividiendo la aportación anual por la superficie de la cuenca. Es útil especialmente cuando queremos comparar la esorrentía con las precipitaciones. Si la cuenca es hidrológicamente cerrada y los datos proceden de más de 20 años, este valor debe ser similar a las precipitaciones no evapotranspiradas (P-ETR).

El caudal específico es el caudal por unidad de superficie. Representa el caudal aportado por cada km^2 de cuenca. Se calcula dividiendo el caudal (normalmente caudal medio anual por la superficie de la cuenca o subcuenca considerada ($\text{litros/seg}\cdot\text{km}^2$); este parámetro también se conoce como módulo relativo y como se observa en la Ecuación [8] se obtiene con el módulo o caudal (M) en litros por segundo y con el área de la cuenca (S) en km^2

$$M_r = \frac{M}{S} \quad [25]$$

El módulo relativo permite comparar el caudal de diversas cuencas, siendo sus superficies distintas (Sánchez-San Román, 2017). Las áreas de montaña proporcionan más de 20 litros/seg·km², mientras que, en las partes bajas de la misma cuenca se generan solamente 4 o 5 litros/seg·km². Así mismo, sabemos que:

- Si el módulo relativo es menor a 5 litros/seg·km², se tiene una escasez de agua.
- Si el módulo relativo se encuentra en el rango de 5 a 15 litros/seg·km², se dice que se encuentra en valores medios y,
- Si el módulo relativo es mayor a 15 litros/seg·km², los valores son elevados y es posible que se esté considerando mal un parámetro.

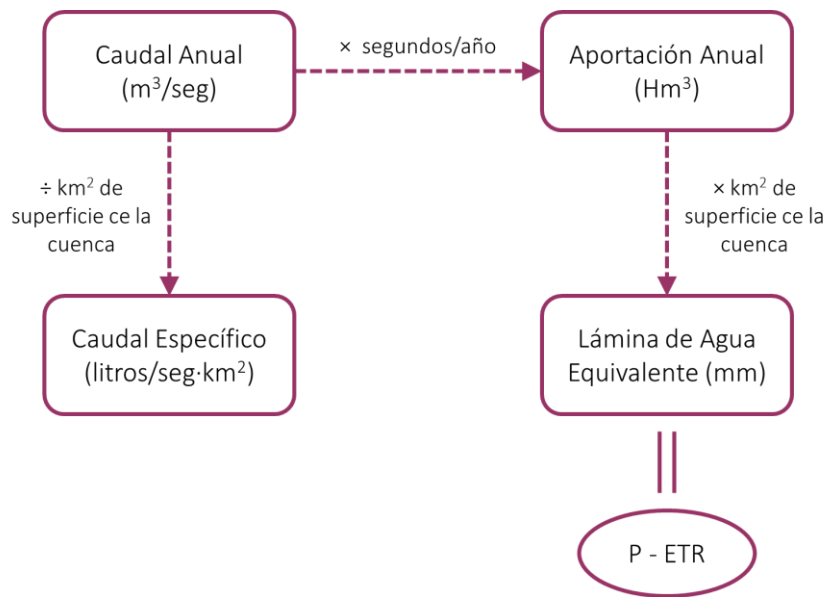


Figura 79. Relación sobre los parámetros obtenidos con los aforos en las cuencas.

ANEXO B. INFORMACIÓN GENERAL DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS

En la Tabla 23, se presentan las 30 estaciones meteorológicas que se estudiaron. En las estaciones se aplicaron las pruebas estadísticas para verificar la consistencia.

Tabla 23. Estaciones seleccionadas y que se utilizarán para la modelación superficial.

	ESTACIÓN	NOMBRE	SERVICIO	EFFECTIVO	VACÍOS	PMA
1	16002	Agostitlán	56	52.2	6.8%	1336.28
2	16022	Cointzio	66	60	9.1%	811.44
3	16028	Cuitzillo Grande	38	36.5	3.9%	654.85
4	16045	El Temazcal	49	48.3	1.4%	1309.04
5	16055	Jesús del Monte	79	76.6	3.0%	867.08
6	16080	Morelia (SMN)	29	27.4	5.5%	736.10
7	16081	Morelia (DGE)	68	67.1	1.3%	781.68
8	16087	Pátzcuaro	46	39.8	13.5%	954.46
9	16096	Malpaís	74	59.2	20.0%	713.52
10	16105	Quirio, Indaparapeo	52	49.2	5.4%	693.89
11	16109	San Diego Curucpatle	93	90.2	2.9%	1050.30
12	16136	Tzitzio	46	39.7	13.7%	1234.31
13	16235	Huajumbaro	35	31.2	10.9%	1171.34
14	16250	Huandacareo	32	26.6	16.9%	908.90
15	16254	Teremendo	33	32.5	1.5%	693.71
16	11002	Acámbaro	79	75.4	4.6%	753.95
17	16052	Huingo	74	72.3	2.3%	739.25
18	11077	Tarandacuao	74	71.5	3.4%	767.92
19	16027	Cuitzeo	92	82.9	9.9%	669.22
20	16145	Zinapécuaro	92	81.3	11.6%	804.57
21	16050	Huaniqueo	66	64.8	18.2%	853.54
22	11072	Santa Rita	55	54.7	5.5%	706.24
23	11060	Salvatierra	79	71.7	9.2%	719.59
24	11071	Santa María (DGE)	76	69.9	8.0%	673.31
25	11076	Presa Solís	55	52.2	5.1%	725.85
26	11010	Cerano	54	50.5	6.5%	719.83
27	16016	Carrillo Puerto	45	42	6.7%	696.58
28	16155	Copándaro	40.9	34.6	15.5%	816.99
29	16084	Panindícuaro	68.9	39.1	43.3%	799.34
30	16142	Zacapu	42.2	33.5	20.6%	872.63

De forma similar, en la Tabla 24, se muestran los resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia realizadas a las estaciones meteorológicas.

Tabla 24. Resultados de las pruebas de consistencia en las estaciones meteorológicas.

	ESTACIÓN	NOMBRE	PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA						
			SECUENCIAS	HELMERT	STUDENTS	CRAMER	CURVA MASA DOBLE	WALD-WOLFOWITZ	LIMITES DE ANDERSON
1	16002	Agostitlán	H	H	NH	H	H	H	IND
2	16022	Cointzio	H	H	H	H	H	NH	IND
3	16028	Cuitzillo Grande	H	H	H	H	H	NH	IND
4	16045	El Temazcal	H	H	H	H	H	H	IND
5	16055	Jesús del Monte	H	H	H	H	H	NH	IND
6	16080	Morelia (SMN)	H	H	NH	H	H	H	IND
7	16081	Morelia (DGE)	H	NH	H	H	H	H	IND
8	16087	Pátzcuaro	H	H	NH	H	H	NH	IND
9	16096	Malpaís	H	H	H	H	H	NH	IND
10	16105	Quirio, Indaparapeo	H	NH	H	H	H	NH	IND
11	16109	San Diego Curucpatle	H	H	H	H	H	H	IND
12	16136	Tzitzio	H	H	H	H	H	H	IND
13	16235	Huajumbaro	H	H	H	H	H	H	IND
14	16250	Huandacareo	H	H	H	H	H	NH	IND
15	16254	Teremendo	H	H	H	H	H	NH	IND
16	11002	Acámbaro	H	H	H	H	H	H	IND
17	16052	Huingo	H	H	H	H	H	H	IND
18	11077	Tarandacuao	H	H	H	NH	NH	H	IND
19	16027	Cuitzeo	H	H	H	H	H	H	IND
20	16145	Zinapécuaro	H	H	H	NH	NH	H	IND
21	16050	Huaniqueo	H	H	H	H	H	H	IND
22	11072	Santa Rita	H	H	H	H	NH	NH	IND
23	11060	Salvatierra	H	H	H	H	H	H	IND
24	11071	Santa María (DGE)	H	H	H	H	NH	H	IND
25	11076	Presa Solís	H	H	H	H	NH	H	IND
26	11010	Cerano	H	H	H	H	NH	H	IND
27	16016	Carrillo Puerto	H	H	H	H	H	H	IND
28	16155	Copándaro	H	H	H	H	H	H	IND
29	16084	Panindícuaro	H	H	H	H	H	H	IND
30	16142	Zacapu	H	H	H	H	H	H	IND

Los resultados de las pruebas de homogeneidad y persistencia muestran que hay estaciones con saltos, lo cual se puede verificar por medio de las pruebas de Secuencias y Helmert en las estaciones de Queréndaro, Santiago Undameo y Vertedor Gugorrones, lo cual indica que se debe de tener cuidado con las modelaciones, pero, no es una limitante para su aplicación.

Tabla 25. Resultados de las pruebas de homogeneidad y persistencia para las estaciones hidrométricas.

No.	ESTACIÓN	NOMBRE	AÑOS EN SERVICIO	AÑOS CON INFO	SERIE MÁS LARGA	SECUENCIAS	HELMERT	LÍMITES DE ANDERSON
1	12014	Pasarela Villa Jiménez	31	22	17	H	H	NP
2	12162	Compuertas Chicas	86	45	17	H	H	NP
3	12221	Atapaneo	67	58	54	H	H	NP
4	12274	Monterrubio	52	46	42	H	H	NP
5	12314	Queréndaro	52	32	27	NH*	H	NP
6	12347	Santiago Undameo	64	59	48	NH+	H	NP
7	12367	Vertedor Gugorrones	24	24	24	H	NH*	0.5NP
8	12376	Salvatierra	73	67	39	H	H	NP
9	12415	Puente San Isidro	46	46	46	H	H	NP
10	12466	Jerécuaro	64	49	42	H	H	NP
11	12588	El Plan	59	50	30	H	H	NP
12	12620	Tarímbaro	22	19	19	H	H	NP

ANEXO C. CÓDIGO EN R PARA GENERACIÓN DE SERIES DE RECARGA.

```
#Seleccionamos las carpetas y archivos en los que trabajaremos
setwd("D:/DOCUMENTOS/DIQ/AVANCES/MODFLOW/R_modflow")
MB <- read.csv("input_cuenca.csv")
IB <- read.csv("infiltraciones_original.csv")
AG <- read.csv("agricola.csv")
#
#-----
#INICIAMOS EL CÓDIGO
#
#Creamos el ciclo "for" para establecer los porcentajes de retorno de
riego
for (pp in 1:4) {
  PERCENT <- c(0.1, 0.2, 0.3, 0.4)
#Creamos un directorio para cada uno de los escenarios de porcentajes de
retorno
  path <- "D:/DOCUMENTOS/DIQ/AVANCES/MODFLOW/INPUT_MATRICES/"
  folder <- paste("RECARGA_ORIGINAL_P", (PERCENT[pp]*100), sep = "")
  dir.create(file.path(dirname(path), folder))
  setwd(paste("D:/DOCUMENTOS/DIQ/AVANCES/MODFLOW/", folder, sep = ""))
#Del archivo de infiltración, se lee la columna de flujo al acuífero y se
suman
#aquellas infiltraciones que se encuentren dentro de la misma celda, la
cual se
#establece en otra columna.
for (mes in 1:300) {
n <- length(MB[, 1])
y <- c()
for (j in 1:(n)) {
for (i in 1:12){
if (MB[j, 2] == i)
  x <- MB[j, 3] * as.numeric(IB[mes, i+1]) / 1000
}
  y <- c (y, x)
}
mult <- data.frame(FID = MB[, 1], INF = y)
INFILT <- as.data.frame(mult[, 2])
VI <- aggregate(.~ mult[, 1], INFILT, sum)
#
#-----
#CREAMOS LA MALLA
#
#Una vez sumada la información, se debe de cambiar a la matriz con la que
se representa
#en MODFLOW, la cual es una matriz de 45 columnas y 38 filas, iniciando
con el cero en
#la parte inferior izquierda
MESH_O <- matrix(0, 38, 45, byrow = T)
z <- 0:44
for ( k in 37:1){
  z <- z+45
  MESH_O[k,] <- z
}
MESH_O[38,] <- 0:44
#
#-----
#SUSTITUYENDO INFILTRACIÓN EN MALLA
#
#-----
```

```

#Aquí, sustituimos el valor de la infiltración en la malla que hemos
creado
MESH <- matrix(0, 38, 45, byrow = T)
p <- length(VI[, 1])
for (l in 1:p){
  q <- which(MESH_O == VI[l, 1], arr.ind=T)
  MESH [q] <- VI[l, 2]
}
#
#-----
# RETORNO DE RIEGO AGRICOLA
#
#Realizamos la misma sumatoria de volúmenes en cada una de las celdas que
se tienen para la malla
#y lo sustituimos en la malla, de tal forma que se tienen ahora dos
mallas
EXT <- as.data.frame(AG[, 2])
VA <- aggregate(.~ AG[, 1], EXT, sum)
MESH_A <- matrix(0, 38, 45, byrow = T)
p_A <- length(VA[, 1])
for (l in 1:p_A){
  q_A <- which(MESH_O == VA[l, 1], arr.ind=T)
  MESH_A [q_A] <- VA[l, 2]
}
#
#-----
#CORREGIMOS LAS UNIDADES CON LAS QUE TRABAJAREMOS EN MODFLOW, (M/DÍA)
#
#Dividimos entre 400 por la conversión de mm a m, considerando el área de
la celda (4km^2)
MESH_R <- (MESH_A / (4000 * 365) ) * PERCENT[pp]
#Sumamos las dos mallas y hacemos la corrección de las unidades de
infiltración entre el área
MESH_INF_FINAL = MESH_R + (MESH/(30*4))
#
#-----
#ESCRIBIMOS LOS ARCHIVOS COMO TIPO ".txt" DELIMITADO POR TABULACIONES
PARA PODER LEERLOS EN MODFLOW
#
#Escribimos la tabla en el formato establecido
write.table(MESH_INF_FINAL, "apoyo.txt", sep = "\t", row.names = F,
col.names = F)
MESH_M <- readLines("apoyo.txt")
#Agregamos una fila al inicio donde se designan el número de columnas y
el número de filas
nombre <- paste("P", (PERCENT[pp]*100), "_R", mes, ".txt", sep = "")
r <- file(nombre)
id <- ("45 \t 38")
cat(id, MESH_M, file = r, sep = "\n")
close(r)
}
}
#
#-----
#FIN DEL CÓDIGO

```

ANEXO D. DIAGRAMAS QUÍMICOS DE REPRESENTACIÓN ISOTÓPICA

Los diagramas presentados a continuación fueron desarrollados con ayuda del software Diagrammes, el cual es un software de uso libre, creado por la Universidad de Avignon, Francia (*Diagrammes*, 2014).

- Diagrama de Piper (Figura 80)
- Diagrama de Schöeller (Figura 84)
- Diagrama de Stabler (Figura 85)
- Diagrama de Stiff (Figura 86)
- Diagrama de Chadha [$\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4 = f(\text{Ca+Mg-Na-K})$] (Figura 87)

El diagrama de Piper (Figura 80) puede ser comparado con la Figura 81.

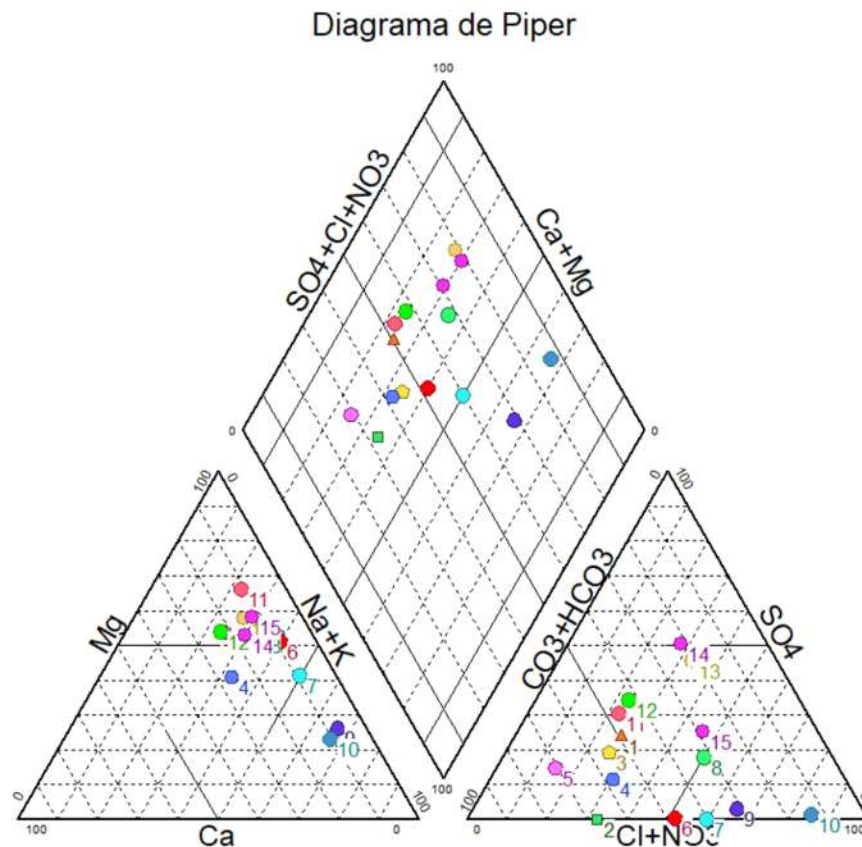


Figura 80. Diagrama de Piper.

Se puede observar que la mayoría (8, 12, 13, 14 y 15) se encuentran en la zona de aguas cloruradas, sulfatadas cálcicas y magnésicas. Dentro de la misma zona, se localizan en el límite con la zona de aguas bicarbonatadas, cálcicas y magnésicas los pozos 1, 11 y 6, mientras que el pozo 7 se encuentra en la frontera con la zona de aguas cloruradas sódicas y potásicas o sulfatadas sódicas.

Ahora bien, los pozos 9 y 10 se localizan en la zona de aguas cloruradas sódicas y potásicas o sulfatadas sódicas y, los pozos 2, 3, 4 y 5 se encuentran en la zona de aguas bicarbonatadas, cálcicas y magnésicas.

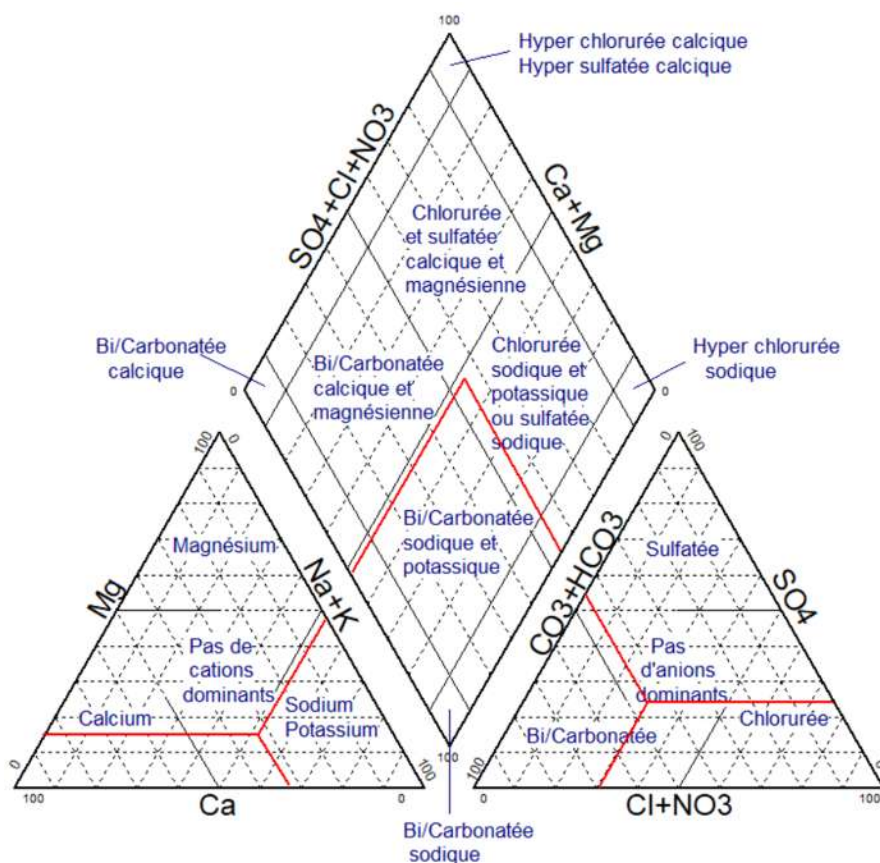


Figura 81. Zonas delimitadas por el diagrama de Piper (*Diagrammes*, 2014).

Se puede observar en los diagramas que casi no hay muestras de agua dentro de las zonas de equilibrio, ya que, en teoría, las zonas tienen una distribución no homogénea. Y, en el diagrama principal, las muestras se encuentran cerca de la zona de equilibrio entre las aguas: 1) cloruradas, sulfatadas cálcicas y magnésicas, 2) bicarbonatadas cálcicas y magnésicas y, 3) cloruradas sódicas, potásicas o sulfatadas sódicas.

De nuevo, los pozos que se encuentran en la zona de aguas cloruradas, sulfatadas cálcicas y magnésicas, se pueden asociar la reducción de yesos u oxidación de sulfatos.

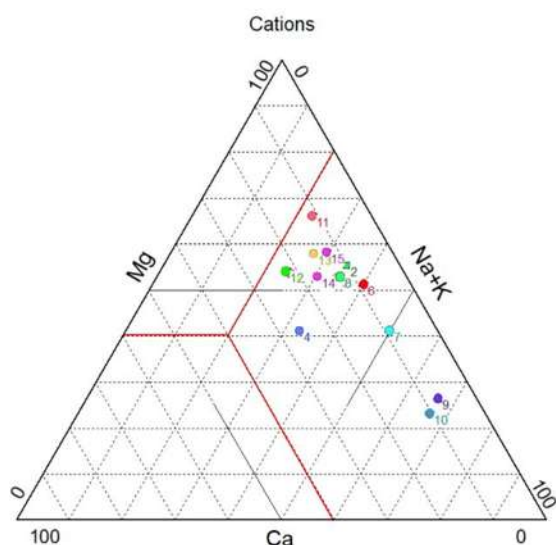


Figura 82. Diagrama de Cationes.

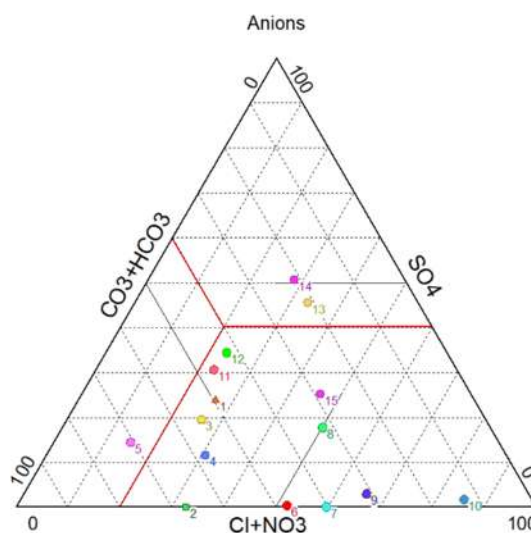


Figura 83. Diagrama de Aniones

Como se muestra en el diagrama de Cationes (Figura 82), se tiene que todas las muestras de agua tienen una tendencia a mantenerse cerca de las aguas magnésicas, sódicas y potásicas, mientras. Lo cual tiene una coherencia bien establecida con respecto al diagrama de Piper principal. Por otra parte, en el diagrama de Aniones (Figura 83, se observa que las aguas se presentan en las 3 zonas establecidas, siendo el pozo 5 el único que se localiza en la zona de aguas bicarbonatadas; los pozos 13 y 14 dentro de la zona de aguas sulfatadas y, por último, las demás se encuentran en la zona de aguas cloruradas, extendidas hacia las sulfatadas y con tendencia (pozos 1, 2, 3, 4, 11 y 12) hacia los bicarbonatos.

Los diagramas de Schöeller y Stabler se presentan juntos debido a que se pueden apoyar en la explicación; la diferencia es que el diagrama de Schöeller se presenta con unidades de mg/l y el diagrama de Stabler con miliequivalentes.

En el diagrama de Schöeller (Figura 84), se muestra que el valor más bajo que se presenta es el de los sulfatos, y al mismo tiempo, los bicarbonatos son los más elevados; sólo los pozos 2, 6 y 7 presentan valores bajos de sulfatos, los demás tienen un comportamiento bastante similar, con tendencias parecidas.

El diagrama de Stabler (Figura 85) indica el contenido de iones mayoritarios en una muestra de agua a manera de diagrama de barras, de tal forma en la que también se puede verificar el cierre del balance iónico, el cual debe ser menor al 5%; en el caso de las muestras presentadas, el error más grande que se tiene es de 6.07% en el pozo 11, seguido de un 5.49% en el pozo 14; todos los demás tienen un error menor al 5%.

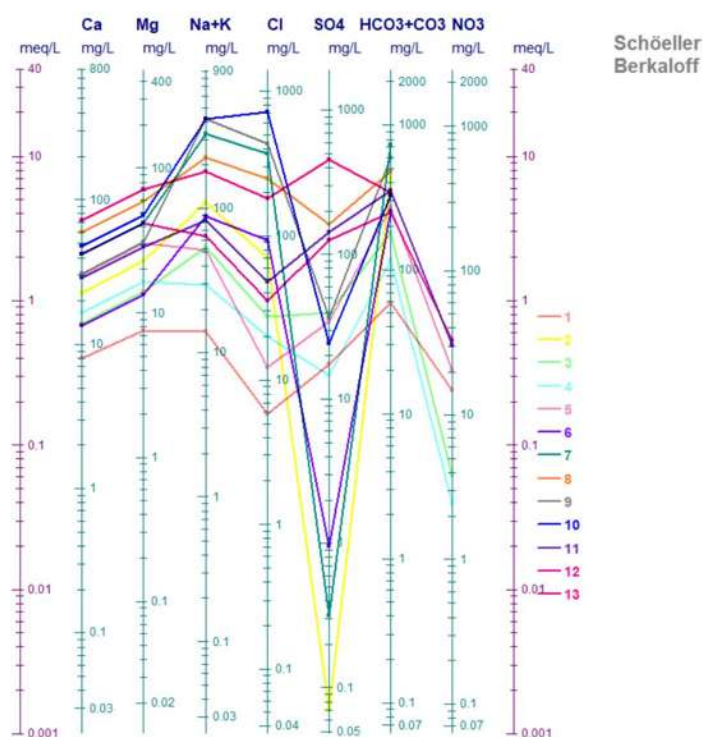


Figura 84. Diagrama de Schöeller.

Stabler

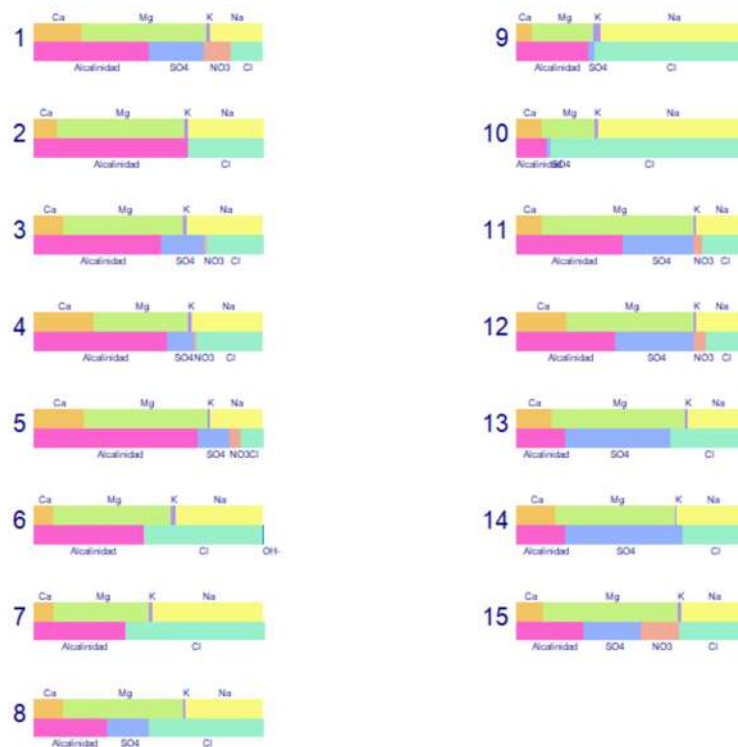


Figura 85. Diagrama de Stabler.

En el diagrama de Stif (Figura 86), se observa que se presentan 3 tipos de formas: punta de flecha, Mr. "T" y visto bueno hacia atrás, pese a que en algunas muestras las formas no son tan claras, se ha tratado de asignar una forma según lo más parecido.

- Punta de flecha, lo cual representa, al agua subterránea natural, con los pozos 1, 4, 5, 6, 13, 14
- Mr. "T", que representan salmuera o agua de mar (o en este caso con bastantes sales), con los pozos 9 y 10.
- Visto bueno hacia atrás, mostrando así el intercambio iónico, con los pozos 2, 3, 5, 7, 8, 11, 12 y 15.

En general, podemos ver que la presencia de calcio y bicarbonatos son muy bajos, lo que genera, una "V" invertida del lado derecho y una "B" invertida del lado izquierdo; esto sin considerar el comportamiento de los demás compuestos.

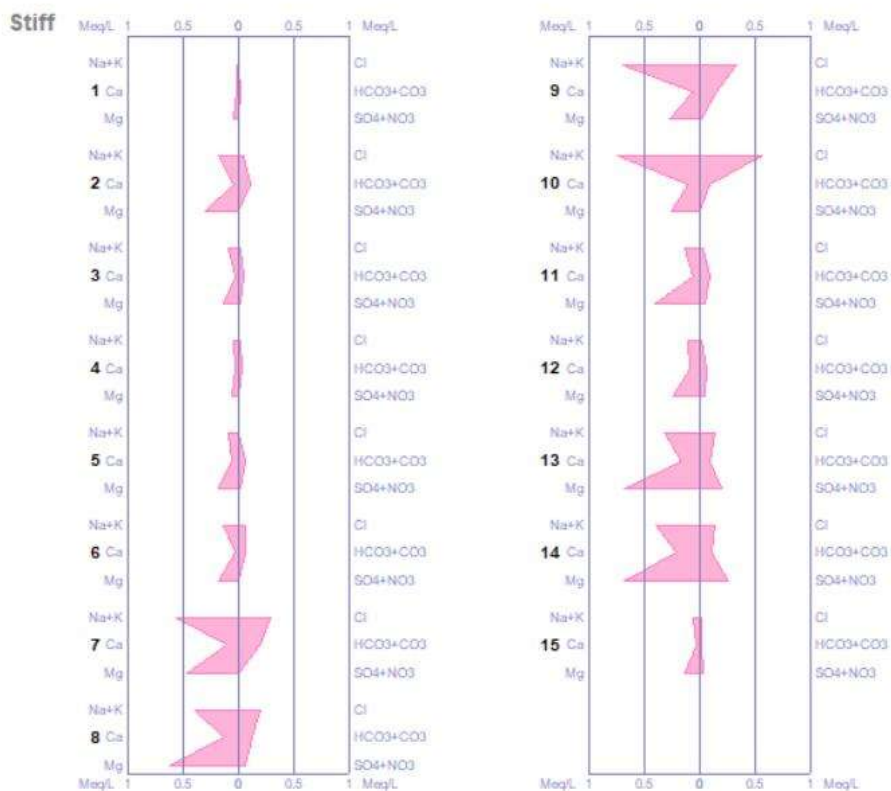


Figura 86. Diagrama de Stiff.

Para el diagrama de Chadha (Figura 87), se agregan las líneas que nos apoyan a delimitar el tipo de agua en la que se encuentra la muestra de acuerdo con el cuadrante en el que se posiciona la misma.

Así, se determina que el pozo 7 se encuentra en la frontera de las aguas sódicas bicarbonatadas (zona 1) y aguas cálcicas, magnéticas y bicarbonatadas (zona 2).

Algo similar sucede con los pozos de agua 1, 12 y 15, los cuales se encuentran cercanos a la frontera entre aguas cálcicas, magnéticas y bicarbonatadas (zona 2) y a las aguas cálcicas, magnéticas sulfatadas (zona 4).

El pozo 10 es el único que se encuentra en la zona de agua sódica clorurada (zona 3); mientras que los pozos 8, 13 y 14 se localizan en la zona 4, que representan las aguas cálcicas, magnéticas sulfatadas.

Por último, los pozos restantes (2, 3, 4, 5, 6 y 11) se encuentran en la zona 2, representando las aguas cálcicas, magnéticas y bicarbonatadas.

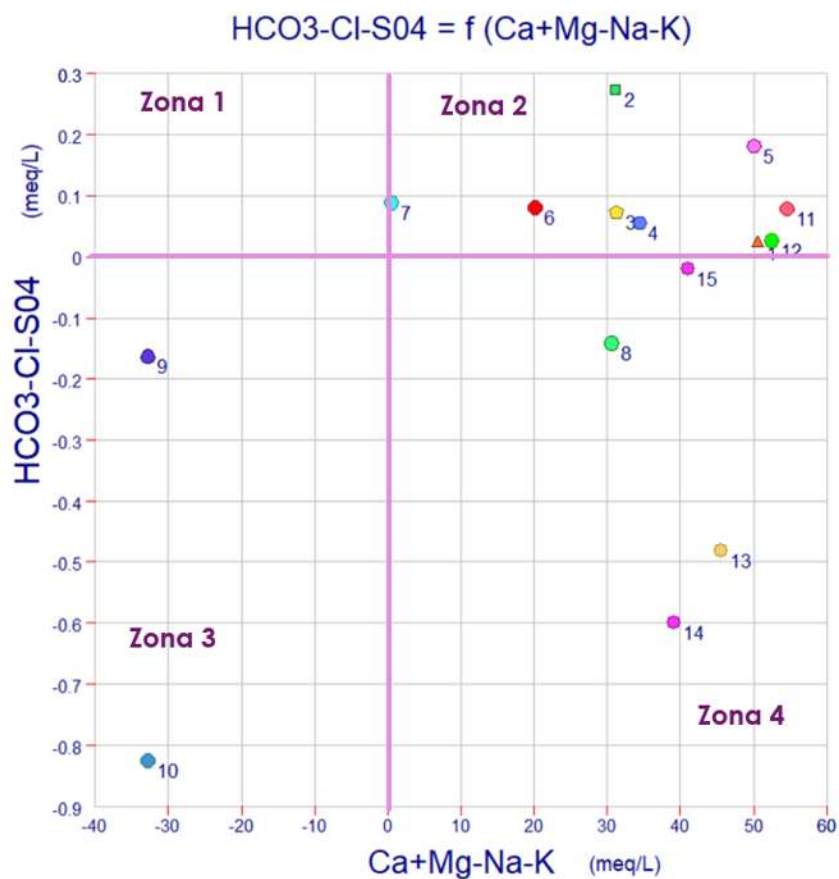


Figura 87. Diagrama de Chadha.

NOMBRE DEL TRABAJO

**Transporte y Destino de Arsénico en el A
cuífero Morelia-Queréndaro por medio d
e Modelación Subterráneo**

AUTOR

María del Mar Navarro Farfán

RECUENTO DE PALABRAS

37510 Words

RECUENTO DE CARACTERES

196050 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

164 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

9.7MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 7, 2024 10:03 AM CST

FECHA DEL INFORME

Oct 7, 2024 10:05 AM CST

● **31% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 31% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 17% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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



A quien corresponda,

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

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

Datos del manuscrito que se presenta a revisión

Programa educativo	Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química	
Título del trabajo	Transporte y destino de arsénico en el acuífero Morelia-Queréndaro por medio de modelación subterránea	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Maña del Mar Navano Farfán	mana.navano@umich.mx
Director	Marco Antonio Martínez Cinco	marco.martinez@umich.mx
Codirector	Sonia Tatiana Sánchez Quispe	quispe@umich.mx
Coordinador del programa	José Apolinar Cortés	jose.apolinar@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

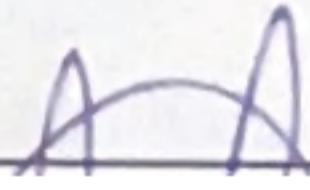
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	
Traducción al español	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Maña del Mar Navarro Farfán 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 4 de octubre del 2024. 