



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN EL MUNICIPIO DE MORELIA MICHOACÁN.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE: MAESTRO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

PRESENTA:

ING. ANGEL FLORES PONCE
Ingeniero Civil

ASESOR:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE
Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

CO-ASESOR:

DRA. LILIANA GARCÍA ROMERO
Doctora en Ingeniería del Agua y Medioambiental

Morelia, Michoacán, México a Junio de 2022



DEDICATORIAS

A mi familia por el gran amor, apoyo, educación, fortaleza y respaldo que siempre me han brindado durante toda mi vida y en especial en mi etapa educativa de posgrado.

A esa gran fuente de energía y luz que es Dios.

Por la fuerza que me ha otorgado para seguir adelante y poder lograr mis metas a pesar de las dificultades de la vida.

A mis padres Irma e Isaías, por ser mis motores de vida y mi más grande inspiración, sin los cuales no podría estar llevando a cabo este trabajo.

A mi hermana Amirais, por ser mi mejor amiga, mi compañera de vida y más grande maestra de superación.

A Cesar, por ser mi amigo y compañero de vida, que ha sido de gran apoyo emocional para la realización de este trabajo.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y en especial a la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, por la educación y todos los conocimientos que me ha brindado en mi etapa de posgrado.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por toda su enseñanza, su apoyo y confianza que me ha brindado para mi formación académica y profesional; por su apoyo, orientación y guía en el desarrollo de esta tesis.

A la Dra. Liliana García Romero por su trabajo esfuerzo y dedicación que me ha brindado para mejorar en mi formación académica y profesional; por su orientación, constancia, apoyo, educación y guía en el desarrollo de esta tesis.

A mis amigos de la maestría, por su apoyo y amistad brindada durante esta etapa, por todos esos momentos mágicos que vivimos juntos y que siempre estarán en mi mente.

A los sinodales: Dr. Constantino Domínguez Sánchez, Dra. María Lourdes González Arqueros y Dr. Julio César Orantes Avalos, por su apoyo y revisión en el desarrollo de esta tesis.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. ESTADO DEL ARTE.....	21
2.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	21
2.2 HISTORIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	22
2.3 GASES EFECTO INVERNADERO Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL... 28	
2.4 EVIDENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	29
2.5 ESCENARIOS DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO . 30	
2.5.1 TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS (RCP).....	31
2.6 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL.....	32
2.7 MODELOS MATEMÁTICOS	34
2.7.1 MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA.....	36
2.7.2 MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ	36
2.8 SEQUÍAS	41
2.8.1 ÍNDICES DE SEQUÍA	42
2.8.2 ÍNDICE NORMALIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).....	44
2.8.3 ÍNDICE DE SEQUÍA DE LOS CAUDALES FLUVIALES (SDI).....	46
2.9 ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	47
2.9.1 VULNERABILIDAD	49
2.9.2 RIESGO.....	50
3. HIPÓTESIS.....	52
4. OBJETIVOS.....	53



4.1	OBJETIVO GENERAL.	53
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	53
5.	JUSTIFICACIÓN.....	54
6.	METODOLOGÍA.....	56
6.1	ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO.	57
6.2	RECOPIACIÓN, GESTIÓN Y CATALOGACIÓN DATOS (PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y ESCURRIMIENTO).	57
6.2.1	DATOS HISTÓRICOS.....	57
6.2.2	DATOS FUTUROS.....	59
6.3	EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.	60
6.3.1	ESQUEMA DE CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN MODELO LLUVIA- ESCURRIMIENTO PARA EL PERIODO HISTÓRICO.....	60
6.3.2	SIMULACIÓN MODELO LLUVIA - ESCURRIMIENTO PARA EL PERIODO FUTURO. ...	61
6.4	APLICACIÓN DE ÍNDICES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA Y HUMEDAD DE LOS PERIODOS HISTÓRICO Y FUTURO (PARA PRECIPITACIÓN Y ESCURRIMIENTO).	61
6.4.1	CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA.....	63
6.4.2	GENERACIÓN DE PARÁMETROS DE SEQUÍAS Y HUMEDAD.	63
6.5	FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN CON CONOCIMIENTO DEL RIESGO DE SEQUÍA Y HUMEDAD FUTURO.	63
6.5.1	OBTENCIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	65
6.5.2	OBTENCIÓN DEL RIESGO AL CAMBIO CLIMÁTICO.	65
7.	RESULTADOS.	66
7.1	ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	66
7.2	TRATAMIENTO DE DATOS.	73
7.2.1	PRESELECCIÓN DE ESTACIONES.	73
7.2.2	SELECCIÓN DE ESTACIONES PRINCIPALES.....	75
7.2.3	SELECCIÓN DE ESTACIONES	77
7.2.4	ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES DE LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN.	79



7.3	INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.....	80
7.4	SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO	81
7.5	MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	93
7.6	ETAPA DE CALIBRACIÓN.....	94
7.6.1	INDICADORES DE AJUSTE.....	94
7.7	RESULTADOS DE CALIBRACIÓN.....	96
7.7.1	SUBCUENCA DE SANTIAGO UNDAMEO	96
7.7.2	SUBCUENCA DE RÍO CHIQUITO	98
7.7.3	SUBCUENCA DE QUERÉNDARO.....	99
7.8	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	101
7.9	MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON CAMBIO CLIMÁTICO.....	103
7.10	OBTENCIÓN DE SEQUÍA Y HUMEDAD METEOROLÓGICA.....	106
7.10.1	APLICACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).....	106
7.10.2	APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA DE LOS CAUDALES FLUVIALES (SDI).....	119
7.11	CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUIAS METEOROLÓGICAS	121
7.11.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUIAS METEOROLÓGICAS HISTÓRICAS	121
7.11.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUIAS METEOROLÓGICAS FUTURAS CON CAMBIO CLIMÁTICO.....	123
7.12	FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN	128
7.12.1	VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	128
7.12.2	RIESGO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	142
7.12.3	FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN CON CONOCIMIENTO DEL RIESGO DE ABUNDANCIA Y ESCASEZ FUTURO CON CAMBIO CLIMÁTICO.....	150
7.12.4	APLICACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN LA ZONA (SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA Y PLANES INFORMATIVOS EN MEDIOS CLÁSICOS COMO LAS REDES SOCIALES)	173
8.	CONCLUSIONES	175
9.	RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	177
10.	ANEXOS	178
11.	REFERENCIAS.....	188



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas dentro del radio de los 80 km de la zona de estudio.....	74
Tabla 2. Características de las estaciones seleccionadas.....	76
Tabla 3. Resultados de pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia aplicadas a las series de precipitación.....	78
Tabla 4. Estaciones hidrométricas por la zona de estudio.....	80
Tabla 5. Datos de modelación de cambio climático de Francia.....	82
Tabla 6. Datos de modelación de cambio climático de Estados Unidos.....	82
Tabla 7. Datos de modelación de cambio climático de Reino Unido.....	83
Tabla 8. Datos de modelación de cambio climático de Alemania.....	83
Tabla 9. Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales.....	94
Tabla 10. Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales.....	95
Tabla 11. Rangos de ajuste para el Coeficiente de Correlación de Pearson.....	95
Tabla 12. Rangos para evaluación de las calibraciones del modelo.....	101
Tabla 13. Parámetros e indicadores de ajuste de las zonas modeladas.....	101
Tabla 14. Disminuciones en porcentaje de caudal de acuerdo con los RCP y sus periodos.....	103
Tabla 15. Rangos del SPI para sequía y humedad.....	106
Tabla 16. Aplicación de SPI para periodo 1979-2011 para la obtención de un año seco y un año húmedo.....	107
Tabla 17. Duración, intensidad y magnitud media de las sequias meteorológicas en la zona de estudio.....	121
Tabla 18. Duración, intensidad y magnitud media de las sequias meteorológicas en la zona de estudio periodo futuro con RCP 4.5.....	124
Tabla 19. Duración, intensidad y magnitud media de las sequias meteorológicas en la zona de estudio periodo futuro con RCP 8.5.....	126
Tabla 20. Indicadores que conforman el índice de exposición para la vulnerabilidad.....	128



Tabla 21. Indicadores que conforman el índice de sensibilidad para la vulnerabilidad	128
Tabla 22. Indicadores que conforman el índice de capacidad de adaptación para la vulnerabilidad	129
Tabla 23. Ponderaciones que conforman el índice de exposición para la vulnerabilidad	131
Tabla 24. Ponderaciones que conforman el índice de sensibilidad para la vulnerabilidad	131
Tabla 25. Ponderaciones que conforman el índice de capacidad de adaptación para la vulnerabilidad	132
Tabla 26. Ponderaciones de los indicadores de vulnerabilidad	138
Tabla 27. Medidas de adaptación a las humedades para Morelia Michoacán, enfocadas a los tomadores de decisiones.	154
Tabla 28. Medidas de adaptación a las sequías para Morelia Michoacán, enfocadas a los tomadores de decisiones.	158
Tabla 29 Medidas de adaptación a las humedades para Morelia Michoacán, enfocadas al sector poblacional.	164
Tabla 30 Medidas de adaptación a las sequías para Morelia Michoacán, enfocadas al sector poblacional.....	168
Tabla 31. Relación de la abundancia y escasez con el fenómeno del niño y la niña	179



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema general de la metodología	56
Figura 2. Localización del municipio de Morelia y la ciudad de Morelia, Michoacán.	66
Figura 3. Zona de estudio conformada por 33 subcuencas.....	67
Figura 4. Regiones hidrológicas administrativas presentes en la zona de estudio.	68
Figura 5. Regiones hidrológicas localizadas en la zona de estudio.....	69
Figura 6. Consejos de cuenca dentro de la zona de estudio.	69
Figura 7. Usos de suelo presentes en la zona de estudio.	70
Figura 8. Tipo de suelo dentro de la zona de estudio.....	71
Figura 9. Geología ubicada en la zona de estudio.	71
Figura 10. Acuíferos ubicados en la zona de estudio y a sus alrededores.	72
Figura 11. Presas, distritos de riego y cuerpos de agua dentro de la zona de estudio.	72
Figura 12. Ubicación de las estaciones en un radio de 80 km.....	73
Figura 13. Localización espacial de las estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio.....	79
Figura 14. Ubicación espacial de las estaciones hidrométricas.....	81
Figura 15. Mapa de deltas de precipitación para cambio climático.	84
Figura 16. Mapa de deltas de temperatura para cambio climático.	85
Figura 17. Deltas de precipitación para cada estación mediante interpolación. ...	86
Figura 18. Deltas de temperatura para cada estación mediante interpolación.	86
Figura 19. Comparación de la precipitación de un escenario RCP 4.5 a diferentes periodos.....	87
Figura 20. Comparación de la precipitación de un escenario RCP 8.5 a diferentes periodos.....	87
Figura 21. Comparación de la temperatura de un escenario RCP 4.5 a diferentes periodos.....	88



Figura 22. Comparación de la temperatura de un escenario RCP 8.5 a diferentes periodos.....	88
Figura 23. Mapa de precipitación media anual periodo 2030 para cambio climático por USDA.....	89
Figura 24. Comparación de modelo GFDL-M3 entre INECC y USDA Escenario RCP 4.5	90
Figura 25. Comparación de modelo GFDL-M3 entre INECC y USDA Escenario RCP 8.5	90
Figura 26. Comparación de modelo CNRMC-M5 entre INECC y USDA Escenario RCP 4.5.....	91
Figura 27. Comparación de modelo CNRMC-M5 entre INECC y USDA Escenario RCP 8.5.....	91
Figura 28. Comparación de modelo HADGEM2-ES entre INECC y USDA Escenario RCP 4.5.....	92
Figura 29. Comparación de modelo HADGEM2-ES entre INECC y USDA Escenario RCP 8.5.....	92
Figura 30. Subcuencas correspondientes a Santiago Undameo.....	96
Figura 31. Resultados mensuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12347.....	97
Figura 32. Resultados anuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12347.....	97
Figura 33. Resultados del año medio de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12347.....	97
Figura 34. Subcuenca correspondiente a río chiquito.	98
Figura 35. Subcuencas correspondientes a Queréndaro.	99
Figura 36. Resultados mensuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12314.....	100
Figura 37. Resultados anuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12314.....	100
Figura 38. Resultados del año medio de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12314.....	100



Figura 39. Asignación de parámetros a las subcuencas mediante similitud hidrológica en grupos.	102
Figura 40. Comparativa del año medio con escenario RCP 4.5 en Santiago Undameo.	104
Figura 41. Comparativa del año medio con escenario RCP 8.5 en Santiago Undameo.	104
Figura 42. Comparativa del año medio con escenario RCP 4.5 en Queréndaro.	105
Figura 43. Comparativa del año medio con escenario RCP 8.5 en Queréndaro.	105
Figura 44. Comparativa entre SPI 3, SPI 6, SPI 12 y SPI 24 en un año húmedo y su visualización espacial.	108
Figura 45. Comparativa entre SPI 3, SPI 6, SPI 12 y SPI 24 en un año seco y su visualización espacial.	108
Figura 46. Mapas de sequía y humedad de 1969 a 1980 de izquierda superior a derecha inferior.	109
Figura 47. Mapas de sequía y humedad de 1981 a 1998 de izquierda superior a derecha inferior.	110
Figura 48. Mapas de sequía y humedad de 1999 a 2019 de izquierda superior a derecha inferior.	111
Figura 49. Mapas de sequía y humedad de 2015 a 2026 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5.	112
Figura 50. Mapas de sequía y humedad de 2027 a 2039 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5.	113
Figura 51. Mapas de sequía y humedad de 2045 a 2069 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5.	114
Figura 52. Mapas de sequía y humedad de 2075 a 2099 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5.	115
Figura 53. Mapas de sequía y humedad de 2015 a 2039 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 8.5.	116
Figura 54. Mapas de sequía y humedad de 2045 a 2069 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 8.5.	117



Figura 55. Mapas de sequía y humedad de 2075 a 2099 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 8.5.....	118
Figura 56. Escasez y abundancias de la estación hidrométrica 12347 Santiago Undameo.....	119
Figura 57. Escasez y abundancias de la estación hidrométrica 12314 Queréndaro.	120
Figura 58. Duración media de la sequía meteorológica en meses en la zona de estudio.....	122
Figura 59. Intensidad media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio.....	122
Figura 60. Magnitud media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio.....	123
Figura 61. Duración media de la sequía meteorológica en meses en la zona de estudio periodo futuro RCP 4.5	124
Figura 62. Intensidad media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 4.5	125
Figura 63. Magnitud media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 4.5	125
Figura 64. Duración media de la sequía meteorológica en meses en la zona de estudio periodo futuro RCP 8.5	126
Figura 65. Intensidad media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 8.5	127
Figura 66. Magnitud media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 8.5	127
Figura 67. División para el análisis de los índices.	130
Figura 68. Mapa del índice de exposición histórica para la vulnerabilidad	133
Figura 69. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 4.5 para la vulnerabilidad	133
Figura 70. Mapa del índice de exposición periodo medio 2045-2069 escenario RCP 4.5 para la vulnerabilidad	134



Figura 71. Mapa del índice de exposición periodo largo 2075-2099 escenario RCP 4.5 para la vulnerabilidad	134
Figura 72. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5 para la vulnerabilidad	135
Figura 73. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5 para la vulnerabilidad	135
Figura 74. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5 para la vulnerabilidad	136
Figura 75. Mapa del índice de sensibilidad para la vulnerabilidad.....	136
Figura 76. Mapa del índice de capacidad adaptativa para la vulnerabilidad	137
Figura 77. Mapa del índice de la falta de capacidad adaptativa para la vulnerabilidad	137
Figura 78. Mapa del índice de vulnerabilidad al cambio climático periodo histórico	138
Figura 79. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 4.5	139
Figura 80. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 4.5	139
Figura 81. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 4.5	140
Figura 82. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5	140
Figura 83. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 8.5	141
Figura 84. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 8.5	141
Figura 85. Mapa del índice de riesgo a la humedad periodo histórico.....	142
Figura 86. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 4.5	143
Figura 87. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 4.5.....	143



Figura 88. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 4.5	144
Figura 89. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5	144
Figura 90. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 8.5.....	145
Figura 91. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 8.5	145
Figura 92. Mapa del índice de riesgo a la sequía periodo histórico.....	146
Figura 93. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 4.5	146
Figura 94. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 4.5.....	147
Figura 95. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 4.5	147
Figura 96. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5	148
Figura 97. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 8.5.....	148
Figura 98. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 8.5	149
Figura 99. Código QR plataforma adaptación al cambio climático en Morelia ...	180
Figura 100. Página principal formato web	180
Figura 101. Página principal formato móvil.....	181
Figura 102. Página Gallery formato web	181
Figura 103. Página Gallery formato móvil	182
Figura 104. Página Location formato web	182
Figura 105. Página Location formato móvil	183
Figura 106. Página Contact us formato web.....	183
Figura 107. Página Contact us formato móvil.....	184
Figura 108. Red social Facebook de Adaptación Climática Morelia.....	185



Figura 109. Código QR red social Facebook.....	186
Figura 110. Red social Instagram de Adaptación Climática Morelia.....	186
Figura 111. Código QR red social Instagram.....	186
Figura 112. Red social Twitter de Adaptación Climática Morelia.....	187
Figura 113. Código QR red social Twitter.....	187



RESUMEN

El cambio climático es un problema ambiental con características únicas, ya que es de competencia global, se plantea que sus impactos mayores serán a largo plazo e involucran interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos), procesos sociales, económicos y políticos de índole mundial.

El cambio climático trae consigo distintas afectaciones para el sector hídrico, entre ellas la presencia de fenómenos como las sequías y humedades más frecuentes e intensas, que afectan adversamente a la vegetación, los animales y al hombre y sus actividades, por lo que es necesario la realización de la evaluación de estos efectos.

Estos peligros naturales, exacerbados por el cambio climático, afectan cada vez más a las sociedades de todo el mundo y teniendo en cuenta los crecientes impactos generados, se otorga un peso sin precedentes a las acciones necesarias, tanto a nivel nacional como mundial, ya que esta aceleración de riesgos implica la necesidad de formular medidas de adaptación al cambio climático.

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y supone una presión adicional para nuestras sociedades y el medio ambiente. Por tanto, es tarea de países como México involucrarse en el estudio de éste y tratar de instrumentar a corto plazo aquellas acciones de política que permitan la adaptación de este.

En este trabajo, como caso particular, se evalúa la situación actual en temas de medidas de adaptación al cambio climático en la zona del municipio de Morelia, Michoacán, México; donde es imperativo la realización de este tipo de acciones, debido a la importancia que posee por ser una zona urbana con patrimonio cultural y atractivo turístico, en donde los efectos generados por el cambio climático están poniendo en mayor vulnerabilidad a los habitantes del sitio, así como a sus actividades cotidianas.

Es así como este documento tiene como objetivo abordar las medidas de adaptación que se tienen en la zona en estudio, respecto a las propuestas abordadas a nivel estado y a nivel país, mediante la recopilación de los planes, programas, leyes, guías y reglamentos que se emplean en la federación referente a la temática del cambio climático.

Palabras clave:

Sequía, humedad, impactos, riesgo, vulnerabilidad.



ABSTRACT

Climate change is an environmental problem with unique characteristics, since it is of global competence, it is proposed that its greatest impacts will be long-term and involve complex interactions between natural processes (ecological and climatic phenomena), social, economic, and political processes of a global nature.

Climate change brings with it different effects for the water sector, including the presence of phenomena such as droughts and more frequent and intense humidity, which adversely affect vegetation, animals and man and their activities, so it is necessary to carry out the evaluation of these effects.

These natural hazards, exacerbated by climate change, increasingly affect societies around the world and considering the growing impacts generated, unprecedented weight is given to the necessary actions, both nationally and globally, since this acceleration of risks implies the need to formulate measures to adapt to climate change.

Climate change is one of the greatest challenges of our time and puts additional pressure on our societies and the environment. Therefore, it is the task of countries such as Mexico to get involved in the study of this and try to implement in the short term those policy actions that allow the adaptation of this.

In this work, as a particular case, the current situation is evaluated in issues of adaptation measures to climate change in the area of the municipality of Morelia, Michoacán, Mexico; where it is imperative to carry out this type of actions, due to the importance it has for being an urban area with cultural heritage and tourist attraction, where the effects generated by climate change are making the inhabitants of the site more vulnerable, as well as their daily activities.

This is how this document aims to address the adaptation measures that are in the area under study, with respect to the proposals addressed at the state level and at the country level, through the compilation of the plans, programs, laws, guides, and regulations that are used in the federation regarding the issue of climate change.

Keywords:

Drought, humidity, impacts, risk, vulnerability.



1. INTRODUCCIÓN.

El agua es un elemento indispensable para la existencia de vida en nuestro planeta, todos los seres vivos que habitamos la Tierra necesitamos de ella para sobrevivir. Desafortunadamente la disponibilidad de este recurso en el planeta está disminuyendo, esto se debe al mal uso y poco tratamiento que damos a las aguas que utilizamos para satisfacer nuestras necesidades, y a las variables climáticas que limitan la disponibilidad del agua (García-Romero, 2015).

De acuerdo con Estrela (2012), el agua es un recurso estratégico para el desarrollo socioeconómico y la protección del medio ambiente, pero la escasez de agua, la calidad del agua, las inundaciones y las sequías son desafíos actuales que podrían empeorar debido al cambio climático.

El cambio climático es un problema ambiental con características únicas, ya que es de competencia global, se espera que sus impactos mayores serán a largo plazo involucrando interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos), procesos sociales, económicos y políticos de índole mundial (González, 2018).

Particularmente, en este trabajo se evaluarán cuantitativamente las series de precipitación y temperatura debido al impacto del cambio climático en la zona del municipio de Morelia, Michoacán; donde es imperativo la realización de estudios hidrológicos para conocer el estado hídrico actual debido a la importancia que posee por ser una zona urbana con patrimonio cultural y atractivo turístico.

El patrimonio cultural considera recursos tangibles (por ejemplo, monumentos, edificios históricos, paisajes culturales, sitios arqueológicos y objetos históricos) e intangibles (por ejemplo, conocimientos, artes escénicas, prácticas sociales, tradiciones y expresiones orales), heredados del pasado y creados a lo largo del tiempo por las personas y/o su interacción con el medio ambiente (UNESCO, 2017).

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y supone una presión adicional para nuestras sociedades y el medio ambiente. Desde pautas



meteorológicas cambiantes, que amenazan la producción de alimentos, hasta inundaciones catastróficas, los efectos del cambio climático son de alcance mundial y de una escala sin precedentes. Si no se toman medidas pertinentes y drásticas desde hoy, será más difícil y costoso adaptarse a estos efectos en el futuro (Naciones Unidas, 2018).

Como consecuencia del cambio climático, es probable que ocurran con mayor frecuencia inundaciones, sequías, vientos dañinos, temperaturas extremadamente altas, y altos niveles del mar y temperatura de la superficie. Estas condiciones, a su vez, tendrán un impacto adverso en la salud humana, la agricultura, la pesca, los recursos hídricos, la infraestructura como carreteras y edificios, servicios como el transporte y las comunicaciones, y en actividades económicas como el turismo (Hay & Mimura, 2006).

El cambio climático es un problema de interés y competencias global, y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no reducimos drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Actualmente, los impactos del cambio climático ya son perceptibles y quedan puestos en evidencia por datos como:

- El aumento de la temperatura global.
- La subida del nivel del mar.
- El progresivo deshielo de las masas glaciares.

Adicionalmente, también se están experimentando los impactos económicos y sociales, que serán cada vez más graves, tales como:

- Los daños en las cosechas y en la producción alimentaria.
- Las sequías.
- Los riesgos en la salud.
- Los fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones, tormentas y huracanes.

En términos generales como lo menciona Fernández (2005), una sequía corresponde a una situación de déficit de agua suficiente para afectar adversamente a la vegetación, los animales o el hombre y su actividad en una región determinada.



Las sequías son fenómenos naturales que afectan a diversas actividades humanas y sectores económicos; pueden influir en el medio ambiente y causar dificultades sociales, y sus consecuencias se pueden rastrear mucho después de que la cantidad de agua en la región se restablezca por la precipitación (Brenčić, 2016).

Las características menos predecibles de las sequías, es decir, su inicio, fin, frecuencia y severidad; pueden ocasionar que las sequías puedan representar tanto una amenaza como un desastre (Belayneh et al., 2016). Además, pueden representar un peligro natural para el medio ambiente, la economía y el desarrollo social (Ortega-Gómez et al., 2018).

Lo anterior pone de manifiesto que el cambio climático no se considera más un problema que compete sólo a los países desarrollados. Por tanto, es tarea de países como México involucrarse en el estudio de éste, y tratar de instrumentar a corto plazo aquellas acciones de política que permitan la adaptación ante este fenómeno. A mediano y largo plazo le corresponde crear estrategias y planes que le permitan adaptarse y contribuir a la mitigación del cambio climático. Para poder lograrlo es evidente que México necesita trabajar y desarrollarse en esta línea de investigación (García-Romero, 2015).

De acuerdo con Runhaar (2016), la adaptación al clima es el proceso de ajuste al cambio climático real o esperado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación busca moderar o evitar daños, o bien, aprovechar oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al cambio climático esperado y sus posibles efectos.

Sin embargo, de acuerdo con Kamperman & Biesbroek (2017), la mayor parte de la adaptación al cambio climático aún se encuentra en el nivel de reconocimiento o trabajo preliminar, esto se debe a que las barreras para tomar medidas de adaptación a menudo se atribuyen a la falta de marcos institucionales, políticas, leyes y regulaciones, incluidos mandatos poco claros (Fatorić & Biesbroek, 2020), y es por ello, que estas barreras se deben analizar para la selección de medidas de adaptación, así como definir la forma de emplearlas en los diferentes sectores de una misma zona.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Podemos definir al clima como un conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región, el cual está representado por el promedio del estado del tiempo incluyendo las variables superficiales de temperatura, precipitación o viento. Analíticamente, el clima es considerado como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante periodos de varias décadas. El clima es el promedio de muchos estados del tiempo en un lapso de meses, años o décadas. La constancia del tiempo puede determinar el tipo de clima en cierta área (García-Romero, 2015).

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio. En ocasiones puede ocurrir que un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura se desvíe de su valor medio de muchos años, hablando de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta resultado de la actividad humana. El clima puede variar de muchas formas, por tal motivo, pronosticarlo a largo plazo no es una tarea fácil (Martínez & Fernández, 2004).

Por su parte, el cambio climático es la variación estadísticamente significativa del clima con respecto al periodo histórico a una escala global o regional. Estos cambios se dan en los parámetros meteorológicos como la precipitación, temperatura, presión atmosférica y la nubosidad, a diferentes escalas de tiempo. Teóricamente estas variaciones son producidas por causas naturales y antropogénicas (Martínez & Fernández, 2004).



2.2 HISTORIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es un tema complejo y de enorme dificultad; por ello, los responsables de políticas necesitan una fuente de información objetiva acerca de las causas del cambio, sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas. Conscientes de esta necesidad, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) constituyeron en 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

El Grupo de Expertos, formado por más de 2,500 científicos procedentes de 190 países, es un órgano intergubernamental abierto a todos los países miembros del PNUMA y de la OMM, el cual decide su estructura, principios, procedimientos y programa de trabajo. Este organismo celebra reuniones plenarias aproximadamente una vez al año, en las que suelen participar centenares de representantes de gobiernos y de organizaciones participantes internacionales (Hernández, 2007).

La función principal del IPCC es evaluar la información importante para la comprensión del riesgo al cambio climático por inducción humana a nivel mundial, para lograrlo, se basa en la evaluación, publicación y revisión de literatura científica-técnica (Hernández, 2007).

El IPCC está organizado en tres grupos de trabajo y un grupo especial adicional. Los grupos de trabajo y el grupo especial cuentan con la asistencia de Unidades de apoyo técnico. El Grupo de trabajo I se ocupa de las bases físicas del cambio climático. El Grupo de trabajo II, del impacto del cambio climático y de la adaptación y la vulnerabilidad relativas a él, y el Grupo de trabajo III, de la mitigación del cambio climático. Los grupos de trabajo se reúnen en sesión plenaria al nivel de representantes de los gobiernos. El objetivo principal del Grupo especial sobre los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero es el de formular y perfeccionar una metodología para el cálculo y notificación de las emisiones y las absorciones nacionales de gases de efecto invernadero.



La contribución principal del IPCC es la presentación de reportes de evaluación que contienen aspectos científicos, técnicos, económicos y sociales asociados al sistema climático y al cambio climático. A la fecha se han presentado seis reportes:

- Primer Informe de Evaluación del IPCC 1990
- Segundo Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático 1995
- Tercer Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático 2001
- Cuarto Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático 2007
- Quinto Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático 2013-2014
- Sexto Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue adoptada en mayo de 1992 y entró en vigor en marzo de 1994. Los países adheridos hasta la actualidad son 197. Su objetivo es, entre otras cosas, reforzar la conciencia pública a escala mundial, así como la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático.

A partir de 1995 y cada año, se realiza la Conferencia de las Partes (CP) la cual se encarga de mantener los esfuerzos internacionales por resolver los problemas relacionados con el cambio climático a nivel global. Examina la aplicación de la Convención y los compromisos de las Partes en función de los objetivos de la Convención, los nuevos descubrimientos científicos y la experiencia conseguida en la aplicación de las políticas relativas al cambio climático. Una labor fundamental de la CP es examinar las comunicaciones nacionales y los inventarios de emisiones presentados por las Partes. Tomando como base esta información, la CP evalúa los efectos de las medidas adoptadas por las partes y los progresos realizados en el logro del objetivo último de la convención.

Actualmente, existen dos estrategias principales para hacer frente al cambio climático: la mitigación y la adaptación. La mitigación engloba todas las medidas y políticas destinadas a potenciar los sumideros de carbono y, limitar y reducir las



emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera (IPCC, 2014). Los GEI son considerados como la principal causa del cambio climático. La adaptación, por su parte, reconoce los impactos del cambio climático como inminentes y, por tanto, es necesario realizar ajustes en los sistemas humanos, ecológicos y de infraestructura para minimizar los daños provocados por dicho fenómeno para reducir la vulnerabilidad, e incrementar la resiliencia y la capacidad para enfrentar el cambio climático (IPCC, 2014).

Las variaciones en la temperatura, el nivel del mar y el deshielo, observadas y registradas en las últimas décadas en el hemisferio norte, y en particular en el trópico de cáncer, en el que se ubica México, confirman su alta vulnerabilidad ante el cambio climático. En general, en latitudes medianas y zonas subtropicales se prevén importantes disminuciones en la precipitación y por ende en el escurrimiento, lo que ocasionará escasez y presión sobre los recursos hídricos en tales regiones (Martínez & Patiño, 2012).

A pesar de que existe un reconocimiento a nivel mundial y nacional sobre los impactos del cambio climático, y una urgencia de adaptación como respuesta, la consciencia y priorización de la adaptación avanza lentamente y sigue siendo un aspecto secundario más que complementario.

La política de cambio climático, tanto nacional como internacional, ha estado dominada por la mitigación desde sus principios (Khan & Roberts, 2013). No obstante, durante la última década, la adaptación ha comenzado a figurar más en las negociaciones (De Gier, 2009), y a recibir mayor atención en la ciencia y la literatura (Bassett & Fogelman, 2013). Lo anterior, debido principalmente al sentido de urgencia de la adaptación como consecuencia de diversos eventos climáticos extremos, como huracanes, tifones, tornados, sequías, entre otros, con mayor frecuencia e intensidad en todo el planeta, y de la necesidad de actuar para hacer frente a sus impactos (Bassett & Fogelman, 2013).

En el ámbito internacional sobre el tema del cambio climático y más en temas relacionados con su adaptación se han generado varios programas para esta situación.



En el año 2001 se creó el Grupo de Expertos para los Países Menos Adelantados (GEPMA). Su objetivo es apoyar a los Países Menos Adelantados (PMA) a la hora de abordar los efectos adversos del cambio climático mediante los planes nacionales de adaptación y sus directrices técnicas para el proceso del plan nacional de adaptación (GEPMA, 2012).

En el año 2004 se realizó el informe de la conferencia de las partes sobre su décimo período de sesiones, celebrado en Buenos Aires del 06 al 18 de diciembre de 2004 por parte de las Naciones Unidas. En este informe se establecen las medidas de adaptación y de respuesta ante el cambio climático (Naciones Unidas, 2004).

El Programa de Trabajo de Nairobi (UNFCCC, 2006) habla sobre impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, y proporciona información de carácter científico, técnico y socioeconómico a los países a través de talleres y documentos.

El programa de trabajo de Nairobi (NWP) es un mecanismo de la Convención para facilitar y catalizar el desarrollo, la difusión y el uso de conocimientos que informarán y apoyarán las políticas y prácticas de adaptación.

En 2007, en El Plan de Acción de Bali se identificó la necesidad de acción para la adaptación, particularmente de acción mejorada en la provisión de recursos financieros, inversión y tecnología para respaldar la acción a la adaptación (PNUD, 2007).

En el Marco de Adaptación de Cancún (UNCC, 2010) se definieron objetivos y estructuras de gobernanza, incluyendo un Comité de Adaptación, un programa para ayudar a que los países menos desarrollados y en desarrollo elaboren sus Planes Nacionales de Adaptación. Además, se creó un Programa de Trabajo sobre Pérdidas y Daños asociados a los impactos del cambio climático en los países en desarrollo particularmente vulnerables, y un mecanismo de financiación.

El proceso del Plan Nacional de Adaptación (PNA) se estableció bajo el Marco de Adaptación de Cancún. Permite a las partes formular e implementar el PNA como un medio para identificar las necesidades de adaptación ante el cambio climático a



mediano y largo plazo, y desarrollar e implementar estrategias y programas para abordar esas necesidades. Es un proceso continuo, progresivo e iterativo que sigue un enfoque impulsado por los países, sensible al género, participativo y totalmente transparentes.

El Acuerdo de París (UNCC, 2015) tiene como objetivo fortalecer la respuesta al cambio climático global aumentando la capacidad de todos para adaptarse a los impactos adversos del cambio climático y fomentar la resiliencia climática. Define los objetivos globales sobre adaptación, los objetivos son:

- Mejorar la capacidad de adaptación y la resiliencia;
- reducir la vulnerabilidad, con miras a contribuir al desarrollo sostenible;
- y asegurar una respuesta de adaptación adecuada en el contexto del objetivo de mantener el calentamiento global promedio muy por debajo de 2 °C y continuar los esfuerzos para mantenerlo por debajo de 1.5 °C.

Por otra parte, en México se ha tenido cierta respuesta al cambio climático mediante la creación de leyes, planes y reglamentos; como la Ley General de Cambio Climático en 2012 que busca tener un ambiente sano y una vida de calidad y digna ambientalmente hablando.

También se creó la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, se trata de un organismo intersecretarial y permanente del Gobierno Federal Mexicano que tiene por objeto coordinar, proponer e implementar políticas públicas tendientes a disminuir las causas del cambio climático en México. La primera comisión de este tipo fue creada mediante decreto del expresidente Vicente Fox Quezada el 25 de abril de 2005, posteriormente se realizó una segunda reestructuración e instalación el 29 de enero de 2013.

Adicionalmente, surge el Plan Nacional de Desarrollo para el periodo 2007-2012, el cual es el documento que sirve de base y provee los lineamientos estratégicos de las políticas públicas formuladas por el presidente de la República a través de su equipo de Gobierno. Así como la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) (2007-2012), definida como el instrumento rector de la política nacional en el



mediano y largo plazo para enfrentar los efectos del cambio climático, y transitar hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono.

En el 2009 se generó el Programa Especial de Cambio Climático (PECC) (2009-2012), que es un instrumento de planeación de política nacional de Cambio Climático basado en un modelo de desarrollo sustentable inclusivo que incorpora la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono.

En el año 2012 se generó la Ley General de Cambio Climático que busca garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático.

Adicionalmente, se generó la instrumentación de la política nacional:

- Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Atlas de riesgo.
- PECC 2014-2017-2020.
- ENCC 10-20-40.
- Programas estatales de acción ante el cambio climático (PEAC).
- Planes de acción climática municipal (PACMUN).
- Fondo de cambio climático.
- Impuesto al carbono.

En el 2018 fue la estipulación del último reglamento de la ley de cambio climático del estado de Michoacán de Ocampo (LOAPEM, 2018).

De igual manera, se han realizado diferentes investigaciones en el municipio de Morelia con respecto al cambio climático y sus afectaciones, entre las que destacan las investigaciones realizadas por el Departamento de Hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Se han realizado investigaciones con respecto al diagnóstico de la vulnerabilidad ante el cambio climático y propuesta de programa de adaptación ante el cambio climático para el sector turístico, lo anterior por parte de la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANIDE) (Bolongaro et al., 2016; 2017).



2.3 GASES EFECTO INVERNADERO Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL

El cambio climático es atribuido principalmente al alto índice de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera, éstos son principalmente derivados del empleo de combustibles fósiles utilizados en las actividades humanas.

Se denomina GEI a aquellos capaces de atrapar la radiación infrarroja que escapa de la superficie de la Tierra hacia el espacio y transferirla, en forma de calor, al resto de los gases que forman la atmósfera. Esta capacidad depende de su estructura molecular y su tiempo de residencia en la atmósfera, antes de ser transformado en otro compuesto. Entre más compleja es su estructura y más grande su tiempo de residencia en la atmósfera, mayor es su Potencial de Calentamiento Global (PCG) (Martínez & Fernández, 2004).

Los principales GEI (con capacidad para influir en la concentración atmosférica) son el dióxido de carbono (CO_2) con un 76%, el metano (CH_4) con 13%, el óxido nitroso (N_2O) con 6%. y los halocarbonos con 5%. Entre los halocarbonos se encuentran los clorofluorocarbonos, como el freón (CCl_2F_2) que es uno de los gases controlados por el Protocolo de Montreal por sus efectos en la capa estratosférica de ozono; y los compuestos diseñados para sustituirlos, los hidroclorofluorocarbonos. El Potencial de Calentamiento Global de los GEI por acuerdo internacional se usa un escenario a 100 años. El compuesto de referencia es el CO_2 , y el PCG establece a cuántos gramos de CO_2 equivale un gramo de otro compuesto, es decir se realiza una normalización con respecto al CO_2 (IPCC, 2001, 2007).

Existen ahora, con un 90% de confianza, evidencias de que el calentamiento global observado se ha desarrollado desde el siglo XX de manera inequívoca, y que éste está asociado a las acciones humanas, principalmente a la quema de combustibles fósiles y a procesos de cambio de uso de suelo (fundamentalmente a la deforestación). Por tales motivos, las concentraciones de dióxido de carbono aumentaron en un 35% desde la época preindustrial, al año 2005, y, para el mismo periodo, las concentraciones del metano también aumentaron en un 148% y del óxido nitroso en un 18%. Estas alteraciones provocaron cambios en la composición



atmosféricas que se han visto reflejados en un aumento en la temperatura global de 0.74 °C, el aumento en el nivel medio del mar de 6 a 10 cm de 1961 a 2003, y el decrecimiento de la cubierta global de nieve y hielo, al grado que para el Ártico se reportó una pérdida de alrededor de 3.5 millones de kilómetros cuadrados en su superficie (IPCC, 2007).

2.4 EVIDENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

De acuerdo con el IPCC (2022) en su sexto informe, en los últimos decenios, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. La evidencia de los impactos del cambio climático es más sólida y completa para los sistemas naturales. Hay impactos en los sistemas humanos que también se han atribuido al cambio climático, con una contribución grande o pequeña del cambio climático distinguible de otras influencias.

Se ha detectado la influencia humana en el calentamiento de la atmósfera y el océano en alteraciones del ciclo global del agua, en reducciones de la cantidad de nieve y hielo, en la elevación media mundial del nivel del mar y en cambios en algunos fenómenos climáticos extremos. Esta evidencia de la influencia humana es mayor desde que se elaboró el Cuarto Informe de Evaluación. Es sumamente probable (90 a 99%) que la influencia humana haya sido la causa dominante del calentamiento global observado (Refsgaard et al., 2013).

Han sido en los últimos años donde se han registrado eventos que han sido atribuidos al cambio climático, por ello los impactos de un clima anómalo o extremo en diversos sectores de la actividad humana son lo que ha llevado a la sociedad, incluyendo a las instituciones de gobierno, a voltear la vista y preocuparse por el cambio climático (García-Romero, 2015).

No existe una manera de hacer pronósticos exactos del clima. En términos generales como lo menciona García-Romero (2015), las fuentes de incertidumbre no sólo provienen del aún limitado conocimiento que tenemos del sistema climático,



sino también provienen del hecho de que el cambio climático observado depende del uso que le demos en el futuro a los combustibles fósiles, a las tasas de deforestación, de las tendencias en cambio en el uso de suelo, además, y asociado a ello, del crecimiento poblacional, de los cambios en las economías globales y regionales, esto solo por citar algunos fenómenos sociales y económicos que determinarán la composición atmosférica futura.

Por esta razón, entre más alejado sea el tiempo para el que deseemos hacer proyecciones, la incertidumbre se vuelve más grande; los modelos climáticos con los que se cuentan comienzan a divergir en sus proyecciones, aunque estén fundamentados en las mismas leyes de la física y la química atmosférica, esto se debe también a que la variabilidad climática es diferente temporal y espacialmente. El problema se agrava si lo que se quiere es saber del clima futuro en regiones o localidades reducidas.

2.5 ESCENARIOS DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO

Un escenario de cambio climático es una descripción espacial y temporal, físicamente consistente, de rangos plausibles de las condiciones climáticas futuras, basada en un cierto número de suposiciones y en la actual comprensión científica de nuestro sistema climático (Labraga, 1998).

Su objetivo es exponer el conjunto de la información actualmente disponible sobre la posible evolución del clima, para poder aplicarla a las evaluaciones de impacto del cambio climático.

Los escenarios pueden representar una variable o un conjunto de variables como la precipitación, temperatura, población mundial actividad industrial, emisiones de CO₂, nivel medio del mar, entre otros. La mayoría de los escenarios son construidos con base en la evolución de las tendencias climáticas pasadas (Magaña y Caetano 2007; Hernández 2010).



Los escenarios más importantes son los desarrollados por el IPCC entre los años 1992 y 2012, mismos que tienen una base científica, y bajo ciertas condiciones, establecen la proyección de cambios de temperatura y precipitación.

Escenarios IS92 del IPCC. En 1992, el IPCC publicó un conjunto de escenarios de emisiones que servían de base para los modelos de la circulación global, con el fin de desarrollar proyecciones sobre el comportamiento futuro del cambio climático. Los denominados escenarios IS92 constituyeron un gran paso adelante. Fueron los primeros escenarios mundiales que proporcionaban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero (Hernández, 2014).

Escenarios SRES/IE-EE del IPCC. Según el IPCC (2001) y (2007) los escenarios presentan cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2) y para cada línea evolutiva, se desarrollaron varios escenarios distintos basados en diferentes evoluciones de las diferentes variables que intervienen en el cambio climático, como escenarios socioeconómicos, escenarios de cambio de uso en la tierra, escenarios de incremento de población, escenarios ambientales (temperatura y precipitación), y escenarios de incremento en el nivel del mar. Estos son el grupo de antiguos escenarios que fueron empleados para la obtención del cambio climático de acuerdo con el tercer e inicios del cuarto informe del IPCC, los cuales posteriormente serían reemplazados por los nuevos escenarios de las trayectorias de concentración representativas (RCP) empleados en el cuarto, el quinto y el sexto informe del IPCC.

2.5.1 TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS (RCP)

Las trayectorias de concentración representativas (RCP) (Representative Concentration Pathways (RCP)). Son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (R. Moss et al., 2008). La palabra representativa significa que cada trayectoria de representación ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. La palabra



trayectoria hace hincapié en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión (Richard H. Moss et al., 2010).

Las trayectorias de concentración representativas generalmente hacen referencia a la parte de la trayectoria de concentración hasta el año 2100, para las cuales los modelos de evaluación integrados han producido los correspondientes escenarios de emisión. Las trayectorias de concentración ampliadas describen ampliaciones de las trayectorias de concentración representativas entre 2100 y 2500 calculadas utilizando normas sencillas, generadas a partir de las consultas con las partes interesadas y no representan escenarios plenamente coherentes.

Escenario RCP 2.6 Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 W/m^2 antes de 2100, y posteriormente disminuye (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100).

Escenarios RCP 4.5 y RCP 6.0 Dos trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 W/m^2 y 6 W/m^2 después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las concentraciones después de 2150).

Escenario RCP 8.5 Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores superiores a 8.5 W/m^2 en 2100. Misma que sigue aumentando durante un lapso (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100 y sean constantes las concentraciones después de 2250).

2.6 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

Para analizar los impactos en el clima en nuestro planeta, se usa un modelo de circulación de la atmósfera en el que se impone una anomalía en la temperatura de superficie del mar y de tierra firme. Las alteraciones o anomalías climáticas que



dicho forzante produzca se obtienen comparando con aquella simulación en la que no se impone el forzante. Ésta ha sido la filosofía seguida en el uso de modelos del clima para determinar los impactos de los forzantes. Evidentemente, para que un modelo climático sea considerado útil para usarse como herramienta de análisis y generar simulaciones, al menos se requiere un aproximado del ciclo anual promedio del clima (Richard H. Moss et al., 2010).

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG), como lo menciona García-Romero (2015), son entonces, modelos matemáticos que dividen a la atmósfera en capas, cada capa en una cuadrícula; generando así una retícula de celdas en tres dimensiones. Con datos de temperatura y presión, entre otras variables, en cada una de estas celdas se estima cómo varían estos parámetros con el tiempo según las condiciones generales de los valores de las celdas vecinas.

Para el estudio del cambio climático se realiza un manejo de los forzantes radiativos, efectuándose simulaciones numéricas en donde se aumentan gradualmente las concentraciones de gases de efecto invernadero. Dependiendo de qué tipo de aumento en estos gases se proponga, será la respuesta en el clima que se obtenga. La mayoría de los modelos del clima sugieren que a mayor concentración de gases de efecto invernadero, mayor será la magnitud de la anomalía climática. No existe un experimento climático único para analizar el cambio climático, pues depende de cómo se piensa que serán las emisiones. Una buena descripción de qué son los modelos de circulación del clima aparece en el Tercer Reporte de Evaluación (TAR, por sus siglas en inglés) del Grupo I del IPCC. En ella se analizan los elementos de los modelos que, por su complejidad y también por su importancia en el clima, requieren consideración especial (IPCC, 2001).

Los Modelos de Circulación General Acoplados son programas de cómputo que reproducen la dinámica atmosférica en diferentes escalas incluyendo los efectos del océano y los continentes. Son herramientas versátiles y de suma utilidad que incluyen un complejo grupo de procesos, basados en leyes físicas. Con estas herramientas se realizan simulaciones bajo diferentes condiciones radiativas,



incluidas las de cambio climático mediante escenarios, como RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, con las cuales se generan proyecciones a futuro.

A través de los MCG y los escenarios de cambio climático, es posible obtener los datos de precipitaciones y temperaturas para una región en específico, siempre y cuando la resolución de los modelos lo permita (García-Romero, 2015).

2.7 MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos son utilizados para analizar la relación entre dos o más variables. Pueden ser utilizados para entender fenómenos naturales, sociales, físicos, etc. Dependiendo del objetivo buscado y del diseño del mismo modelo pueden servir para predecir el valor de las variables en el futuro, hacer hipótesis, evaluar los efectos de una determinada política o actividad, entre otros objetivos (Roldán, 2019).

Existen diversos tipos de modelos matemáticos.

De acuerdo con la información utilizada

- Heurístico: Basado en posibles explicaciones sobre las causas de los fenómenos observados.
- Empírico: Utiliza la información de la experimentación real.

Según tipo de representación

- Cualitativos o conceptuales: Se refieren a un análisis de la calidad o la tendencia de un fenómeno sin calcular un valor exacto.
- Cuantitativos o numérico: Los resultados obtenidos tienen un valor concreto que tiene un cierto significado (puede ser exacto o relativo).

Según la aleatoriedad

- Determinista: No tiene incertidumbre, los valores son conocidos.



- Estocástico: No se conoce con exactitud el valor de las variables en todo momento. Existe incertidumbre y por ende una distribución de probabilidad de los resultados.

Según su aplicación u objetivo

- Simulación o descriptivo: Simula o describe un fenómeno. Los resultados se enfocan a predecir qué sucederá una determinada situación.
- Optimización: Se utilizan para encontrar una solución óptima a un problema.
- De control: Para mantener el control de una organización o sistema y determinar las variables que deben ajustarse para obtener los resultados buscados.

Todo el proceso de modelado matemático se puede presentar idealmente como un ciclo, que a su vez se forma como un modelo del proceso de modelado. Hasta ahora ha existido una variedad de ciclos de modelado que se enfocan en diferentes aspectos. Los diferentes modelos son adecuados para fines específicos.

El punto de partida de los procesos de modelización es, por tanto, una situación del mundo real, que implica una situación problemática auténtica que se procesa con ayudas matemáticas. Esta situación se traslada a un modelo cognitivo de acuerdo con los conocimientos, objetivos e intereses de los modeladores. La simplificación, estructuración y clarificación de la representación mental resultante conducen a un modelo real y/o especificación del problema; deben hacerse suposiciones y deben derivarse correlaciones centrales. Un proceso de matematización traduce los objetos, las relaciones y los supuestos relevantes del modelo real a las matemáticas, lo que da como resultado un modelo matemático que se puede utilizar para resolver el problema identificado (Wess et al., 2021).



2.7.1 MODELOS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

La modelización hidrológica se ha convertido en un componente indispensable de la investigación y la gestión de los recursos hídricos en las grandes cuencas hidrográficas. Los modelos hidrológicos ayudan a comprender el estado actual y pasado de los recursos hídricos en la cuenca; además, proporcionan una forma de explorar las implicaciones de las decisiones de gestión y los cambios impuestos (como el cambio climático) (Johnston & Smakhtin, 2014).

Se puede afirmar que los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas, a partir de los cuales es posible estudiar la relación causa-efecto de la precipitación sobre una cuenca (Navarro, 2019).

Los modelos matemáticos de escurrimiento pueden aplicarse en la solución de problemas de recursos hídricos. Algunas de las aplicaciones más comunes son simulación de descarga natural, previsión operativa y predicción de los efectos de futuros cambios físicos en una cuenca de captación.

En esta investigación se utiliza la herramienta informática EVALUación de los recursos HÍDRICOS (EVALHID). Es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que se producen en las mismas (Arquiola & Solera, 2017), haciendo una valoración general de la cuenca sin considerar la distribución espacial de las variables y de los parámetros que intervienen en los cálculos, valores que son sustituidos por valores medios, es por ello que dicho modelo se limita para cuencas pequeñas y de tamaño medio, en donde puede existir cierta homogeneidad en clima, edafología y geología (García-Romero, 2015).

2.7.2 MODELO HIDROLÓGICO DE TÉMEZ

Al final de los años setentas se diseñó un modelo lluvia-escurrimiento de manera estacional, el cual contaba con un reducido número de parámetros a diferencia de



otros modelos que contaban con un gran número de parámetros y que su obtención o estimación es muy difícil de obtener, ante esta necesidad surge el modelo de Témez (Témez, 1977). Este modelo permite que se produzca excedente sin necesidad de que el suelo este totalmente saturado, además de realizar un reparto más realista del excedente, entre el agua que constituye el escurrimiento superficial y la recarga al acuífero.

Este modelo se puede aplicar a zonas de características iguales de manera estacional dando muy buenos resultados en escala mensual, además nos permite evaluar los recursos hídricos en grandes cuencas. El modelo simula los procesos implicados en la producción de escurrimiento mediante ecuaciones de transferencia y balance. Las principales variables implicadas son la evapotranspiración real, infiltración, humedad en el suelo, volumen de agua almacenada en los acuíferos, aportaciones superficiales y aportaciones subterráneas.

Témez es un modelo agregado de simulación de cuencas del tipo lluvia-escurrimiento. Este modelo no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, los cuales se sustituyen por valores medios.

Debido a esta simplificación, el modelo de Témez se utiliza solo para cuencas pequeñas e intermedias cuando éstas tienen cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica, para cuencas de gran tamaño es necesario realizar divisiones en cuencas más pequeñas, funcionando así como un modelo semiagregado (García-Romero, 2015).

Los componentes de este modelo se pueden resumir de la siguiente forma:

Se tiene como flujo de entrada la precipitación (P) [L]; los flujos de salida son: evapotranspiración real (E) [L], aportación superficial (A_{sup}) [L] y aportación Subterráneo (A_{sub}) [L]. La infiltración es el único tipo de flujo intermedio que tiene el modelo, que considera la cantidad de agua que pasa entre la parte superior del suelo a la zona inferior del acuífero, por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero; por último, tenemos que el almacenamiento intermedio



corresponde a la humedad del suelo y al volumen almacenado en el acuífero. Se considera que una fracción de agua que se precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (H_t) y que el resto, que se conoce como excedente (T_t); este se distribuye entre la aportación de origen superficial (A_{sup}) y la infiltración sobre el acuífero o recarga (R_t).

Se tiene que el excedente (T_T) es 0, si $P_o \geq P_t$, ya que toda el agua que se precipita se infiltra o se satura y, por tal motivo no queda volumen que se pueda escurrir, el caso contrario se presenta en la Ecuación [1].

[1]

$$T_t = \frac{(P_t - P_o)^2}{P_t - \delta_t - 2P_o}$$

Donde:

[2]

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + ETP_t$$

[3]

$$P_o = C(H_{max} - H_{i-1})$$

Siendo: H_{max} la capacidad máxima de almacenamiento del suelo [L], que depende de las características del suelo y la vegetación donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de H_{max} aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención de agua en el suelo y el espesor de este, que puede ser drenado por evapotranspiración. H_{t-1} el almacenamiento de agua en el suelo [L] en el instante $t-1$. ETP_t la evapotranspiración potencial máxima que se producirá en condiciones óptimas de humedad [L] en el intervalo de tiempo t ; C es el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional, que define el inicio de la escorrentía antes de que se alcance el máximo de humedad en el suelo H_{max} . Una vez estimado el excedente (T_t), la humedad en el suelo al final de cada mes se obtiene mediante la Ecuación [4]; la cual representa el cierre del balance entre el agua que queda en



el suelo y la ETP. Si el resultado es negativo la humedad del suelo al final del periodo es nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá desarrollado en su totalidad.

[4]

$$H_t = \max \left\{ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t, 0 \right\}$$

La Ecuación [5] representa la evapotranspiración real que se produce (ET_t); esta se obtiene mediante la siguiente expresión:

[5]

$$ET_t = \min \left\{ H_{t-1} + P_t - T_t, ETP_t \right\}$$

Siempre que exista suficiente agua en el suelo, la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial. En caso de haberla, la humedad en el suelo al final del mes será nula. La infiltración del acuífero es función del excedente y de la infiltración máxima (I_{max}), que expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno, a través de la Ecuación [6], la cual es una expresión empírica.

[6]

$$I_t = I_{max} * \frac{T_t}{T_c + I_{max}}$$

A medida que el excedente aumenta, también lo hace la infiltración y ésta tiende a la infiltración máxima (I_{max}); por otra parte, la infiltración máxima no depende exclusivamente de las propiedades del terreno, sino de la intensidad y concentración de las precipitaciones. La aportación subterránea producida ($A_{sub,t}$), está formada por el drenaje del agua almacenada en el acuífero (V_t) por encima del umbral de salida de la red fluvial. Para simular el comportamiento del acuífero se plantea el modelo unicelular, el cual está basado en la función exponencial que representa la curva de agotamiento de un manantial. La variable de estado es el



volumen almacenado en el acuífero (V_t). El caudal cedido a la red superficial (Q_t) se obtiene mediante la Ecuación [7].

[7]

$$Q_t = \alpha * V_t$$

Donde α es una constante con dimensiones de $[T^{-1}]$. Si se aplica al acuífero una ecuación de balance de masa de tipo representado por la Ecuación diferencial ordinaria [8].

[8]

$$I_t - Q_t \frac{dV_t}{dt}$$

Donde: I_t son las entradas al acuífero en el tiempo t . Q_t son las salidas del acuífero en el tiempo t . V_t es el volumen almacenado en el acuífero en el tiempo t . De esta forma y sustituyendo la primera ecuación en la segunda y considerando R_t como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo se tiene la Ecuación [9].

[9]

$$R_t - \alpha * V_t = \frac{dV_t}{dt}$$

La resolución de esta ecuación diferencial, para la condición inicial de volumen inicial de acuífero, V_0 y para un caudal de recarga constante R , a la Ecuación [10].

[10]

$$V_t = V_0 e^{-\alpha * t} + \frac{R}{\alpha} (1 - e^{-\alpha * t})$$

Expresando el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$, se obtiene la Ecuación [11], la cual representa la curva de agotamiento del acuífero:

[11]

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha * t}$$

Este modelo subterráneo presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo, pero la desventaja de que supone una simplificación excesiva del sistema, por lo que no es



válido para modelar acuíferos cársticos, donde se han identificado más de una rama de descarga en el agotamiento del acuífero. El modelo de Témez, contempla el ajuste de cuatro parámetros: H_{max} , C , I_{max} y α ; los parámetros H_{max} y C regulan el almacenamiento de agua en el suelo, I_{max} separa la escorrentía superficial de la subterránea y el parámetro α regula el drenaje subterráneo. También deben definirse las condiciones iniciales de simulación, como es humedad inicial de suelo (H_0) y del almacenamiento inicial en el acuífero (que puede aproximarse a $V_0=Q_0/\alpha$). El efecto de los valores iniciales se reduce a medida que transcurre el tiempo, por lo que en realidad estos valores son poco significativos (Arquiola & Solera, 2017).

2.8 SEQUÍAS

En términos generales una sequía corresponde a una situación de déficit de agua suficiente para afectar adversamente a la vegetación, los animales o el hombre y su actividad en una región determinada. Tiene la particularidad de ser un fenómeno de desarrollo lento en el tiempo y de amplia cobertura espacial, lo que hace difícil precisar con exactitud tanto su duración como su extensión física. Estos límites pueden establecerse con propiedad una vez que la sequía ha transcurrido totalmente y se le observa desde una perspectiva histórica, pero no mientras ocurre el fenómeno, lo que dificulta la adopción de medidas concretas durante su desarrollo. Según este enfoque lo importante de las sequías son sus consecuencias y no tanto sus causas o sus propiedades intrínsecas. Para ser realista y operativa una definición apropiada de sequía debe considerar la realidad de cada lugar.

Las sequías no se parecen a la mayoría de los desastres naturales que son repentinos, breves y violentos como los terremotos, las crecidas, los huracanes, etc. Se trata más bien de un desastre que se desarrolla lentamente, acumulando sus efectos nocivos durante un periodo prolongado. El clima y la meteorología no son la única causa de las sequías, también dependen del comportamiento del sistema y de la sociedad afectada.



En un sentido general, una sequía es considerada como un estado de anormalmente escasa disponibilidad de agua en una región que se prolonga durante un periodo de tiempo significativo.

A pesar de que es evidente la existencia de gran cantidad de definiciones, la mayoría de ellas pueden clasificarse en unas pocas categorías: a) aquellas en las cuales la sequía se define cuando una cantidad absoluta de humedad (lluvia, caudales o humedad del suelo) es inferior a una cantidad determinada (por ejemplo cuando no llueve en 20 días consecutivos), b) las que consideran la desviación de las condiciones normales o del promedio por una cierta cantidad (por ejemplo cuando la lluvia en un periodo es menos que el 60% del promedio), y c) las definiciones según las cuales ocurre una sequía cuando la cantidad de agua disponible es insuficiente para satisfacer las necesidades. Esta última categoría de definiciones es bastante subjetiva, e indica que la ocurrencia de sequía puede cambiar en el tiempo en un mismo lugar, dependiendo del grado de utilización de los recursos.

A pesar de que puede parecer más razonable definir las sequías de una manera puramente estadística en base a la desviación de las condiciones normales, es difícil separar la idea de sequía de sus consecuencias (Fernández, 2005).

2.8.1 ÍNDICES DE SEQUÍA

Los indicadores son variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de las sequías. Cabe citar, por ejemplo, la precipitación, la temperatura, los caudales fluviales, los niveles de las aguas subterráneas y de los embalses, la humedad del suelo y el manto de nieve.

Los índices suelen ser representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos, entre los que se incluyen los indicadores enumerados. Tienen por objeto analizar el



estado cualitativo de las sequías en el entorno en un período de tiempo determinado. Desde el punto de vista técnico, los índices también son indicadores.

Vigilar el clima en diversas escalas temporales permite reconocer los períodos húmedos de corta duración dentro de las sequías de larga duración o los períodos secos de corta duración compleja, y brindar valiosos instrumentos para la comunicación con distintos públicos y usuarios, incluida la población general.

Los indicadores se utilizan para proporcionar un estudio cuantitativo de la gravedad, la localización, el desarrollo cronológico y la duración de los episodios de sequía. La gravedad se refiere a la desviación de la normalidad de un índice. Se puede establecer un umbral de gravedad a fin de determinar el momento en que una sequía ha comenzado, el momento en que ha terminado y la zona geográfica afectada. La localización se refiere a la zona geográfica en la que se registran las condiciones de sequía. Las fechas aproximadas de inicio y cese fijan el desarrollo cronológico y la duración. Los efectos vienen determinados por la interacción del fenómeno peligroso y los elementos expuestos (población, zonas agrícolas, embalses y sistemas de abastecimiento de agua), y las vulnerabilidades de esos elementos a las sequías.

En consecuencia, los índices de sequía, junto con la información complementaria sobre los activos expuestos y sus características relativas a la vulnerabilidad, son esenciales para seguir y prever los efectos y las consecuencias de las sequías. Hay índices que también pueden cumplir otra función esencial, en el sentido de que pueden facilitar una referencia histórica a los planificadores o las instancias decisorias (Svoboda & Fuchs, 2016).

En este estudio se hace uso de los índices de sequía publicados por la OMM (2016), como índice de sequía meteorológica se emplea el Índice Normalizado de Precipitación (SPI), así como para el índice de sequía hidrológica se emplea el Índice de Sequía de los Caudales Fluviales (SDI).



2.8.2 ÍNDICE NORMALIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).

Origen. El índice Normalizado de Precipitación (SPI) es el resultado de las investigaciones y trabajos desarrollados en 1992 en la Universidad del Estado de Colorado en Estados Unidos por McKee y otros. El resultado de su trabajo se presentó por primera vez en la 8ª Conferencia sobre Climatología Aplicada, celebrada en enero de 1993. La base de este índice es que se sustenta en las relaciones de la sequía con la frecuencia, la duración y las escalas temporales.

En 2009, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomendó a los países que utilizaran el SPI como principal índice de la sequía meteorológica para vigilar y seguir las condiciones de sequía (Hayes et al., 2011). Al dar a conocer el SPI como índice de uso general, la OMM brindó orientación a los países que pretendían establecer un nivel para la alerta temprana de sequías.

Características. Utiliza registros históricos de la precipitación de un lugar para establecer una probabilidad de precipitación que se puede calcular para las escalas temporales que se deseen, desde un mes hasta 48 meses o más. Como ocurre con otros indicadores climáticos, las series cronológicas de datos utilizadas para calcular el SPI no deben tener una duración específica (N. B. Guttman, 1998). Guttman en 1999 señaló que si hay datos adicionales presentes en una serie cronológica larga, los resultados de la distribución de la probabilidad serán más fiables porque habrá más episodios de humedad y sequía extrema incluidos. El SPI se puede calcular a partir de un registro mínimo de datos de 20 años, pero lo ideal es que la serie cronológica contenga al menos 30 años de datos, aunque haya datos faltantes.

El SPI tiene una escala de intensidad en la que se calculan valores positivos y negativos, que se correlacionan directamente con episodios de humedad y sequía. En cuanto a la sequía, los extremos de la distribución de la precipitación despiertan mucho interés, especialmente los episodios de sequía extrema, que son los episodios que se consideran infrecuentes para el clima de la región analizada.

Se denotan episodios de sequía cuando los resultados del SPI, independientemente de la escala temporal que se analice, son continuamente negativos y alcanzan el



valor de -1. Se considera que el episodio de sequía sigue en curso hasta que el SPI alcanza un valor de 0. McKee et al. (1993), señalan que la sequía comienza cuando el SPI es igual a -1 o inferior, pero no hay ningún criterio establecido, dado que algunos investigadores elegirán un umbral inferior a 0, pero este quizá no sea -1, mientras que otros clasificarán inicialmente la sequía a valores inferiores a -1.

Debido a la utilidad y flexibilidad del SPI, este índice puede calcularse con datos ausentes del período del registro de un lugar. En teoría, la serie cronológica debe ser lo más completa posible, pero los cálculos del SPI devolverán un valor “nulo” si no hay datos suficientes para calcular un valor, y el SPI comenzará a calcular el producto de nuevo cuando los datos estén disponibles. El SPI suele calcularse para escalas de 24 meses como máximo, y la flexibilidad del índice posibilita numerosas aplicaciones en relación con fenómenos que influyen en la agricultura, los recursos hídricos y otros sectores.

Parámetros de entrada. Precipitación.

El SPI, se basa en registros de lluvia y fue diseñado para ser un indicador espacial de la sequía; puede calcularse con distintas escalas de tiempo. En períodos cortos (meses) puede ser útil para el manejo agrícola, mientras que períodos largos (años), los resultados pueden ser importantes para el suministro de agua (Nathaniel B. Guttman, 1999). El SPI se calcula a partir de datos de precipitación mensual y se recomienda usarlo para un período continuo de al menos 30 años. Las escalas temporales más usuales son de 3, 6, 12, 24 o 48 meses. Por ejemplo, para anomalías de lluvia relacionados con variabilidad intraestacional se recomienda usar SPI-3 o SPI-6, mientras que para sequías persistentes se puede usar SPI-24 o SPI-48 (Méndez & Magaña, 2010).

Para la evaluación del SPI se utiliza la siguiente fórmula (Agnew, 2000).

[12]

$$SPI = \frac{X_{ik} - \bar{X}_i}{\sigma_i}$$

Dónde:



σ_i = Desviación estándar de estación observada.

X_{ik} = Precipitación de la estación observada y observación histórica.

X_i = Precipitación media de la estación observada.

El SPI es un indicador de sequía y no representa toda la compleja situación de aparición de sequía y sus consecuencias. Define las condiciones de la atmósfera como un déficit relativo de agua reflejado en la precipitación. Por lo tanto, los valores históricos de SPI deben interpretarse como un indicador de sequía meteorológica y no como una sequía en general. Se espera que algunos eventos clasificados como sequías meteorológicas por el SPI no se incluyan en archivos históricos y viceversa (Brenčić, 2016).

2.8.3 ÍNDICE DE SEQUÍA DE LOS CAUDALES FLUVIALES (SDI).

Origen. Creado por Nalbantis y Tsakiris (2009); para ello se basaron en la metodología y los cálculos del SPI.

Características. Emplea valores mensuales de los caudales fluviales y los métodos de normalización asociados al SPI para desarrollar un índice de sequía basado en datos de los caudales fluviales. Gracias a un producto similar al del SPI, se pueden analizar los períodos húmedos y secos, así como la gravedad de estos episodios.

El SDI se basa en los volúmenes de caudales o escurrimientos acumulados por períodos escalonados de 3, 6, 9 y 12 meses dentro de cada año hidrológico. Los períodos de tiempo superpuestos utilizados dentro de cada año hidrológico se presentan como periodos de referencia. Estos son de octubre a diciembre, de octubre a marzo, de octubre a junio, y de octubre a septiembre (un año hidrológico completo)(Esquivel-Arriaga et al., 2014).

Parámetros de entrada. Valores mensuales de los caudales fluviales y una serie histórica de una estación hidrométrica en estudio.



Aplicaciones. Se utiliza para vigilar y detectar episodios de sequía tomando como referencia una estación hidrométrica particular, que puede ser representativo o no de cuencas mayores.

Puntos fuertes. El programa es fácil de conseguir y de utilizar. Admite datos ausentes, y cuanto más prolongado sea el registro de los caudales fluviales, más precisos son los resultados. Como en el SPI, se pueden examinar varias escalas temporales.

Puntos débiles. Un único dato de entrada (caudales fluviales) no tiene en cuenta las decisiones de gestión, y los períodos sin caudal pueden distorsionar los resultados.

2.9 ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Como se ha mencionado anteriormente, las dos principales estrategias para hacer frente al cambio climático son: la mitigación y la adaptación.

La mitigación abarca todas las medidas y políticas destinadas a potenciar los sumideros de carbono y limitar y reducir las emisiones de GEI (IPCC, 2007, 2014, 2022), considerados la principal causa del cambio climático.

La adaptación, por su parte, reconoce los impactos del cambio climático como inminentes y, por tanto, es necesario realizar ajustes en los sistemas humanos, ecológicos y de infraestructura para minimizar los daños provocados por él para reducir la vulnerabilidad, e incrementar la resiliencia y la capacidad para enfrentar el cambio climático (IPCC, 2007, 2014, 2022).

Una adaptación al clima es el proceso de ajuste al cambio climático real o esperado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación busca moderar o evitar daños o aprovechar oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al cambio climático esperado y sus efectos (H. A. C. Runhaar et al., 2016).



La adaptación involucra cuestiones de distintos sectores de la sociedad y la economía, así como varias disciplinas, por ejemplo, la agricultura, la planeación urbana y regional, la conservación de la naturaleza, la gestión de riesgos, la salud, entre otras (Serrato, 2018).

No existe una única opción de adaptación general que se adapte a todo tipo de regulaciones de gestión de recursos naturales. Lo que sí se requiere son muchas medidas de adaptación diferentes y específicas que sean lo suficientemente flexibles para satisfacer todas las posibles necesidades de adaptación que puedan surgir en el futuro, y que al mismo tiempo no causen daños en los casos en que hacer uso de su potencial de adaptación no sea necesario medidas sin arrepentimiento (Anders et al., 2014).

Las opciones de adaptación pueden clasificarse en la intención, el momento de la acción y su alcance temporal y espacial. Otras opciones de especial interés incluyen no arrepentirse, y las decisiones de adaptación pueden caracterizarse por su flexibilidad, reversibilidad y solidez.

En la mayoría de los sectores algunas acciones de adaptación serán autónomas y otras serán planificadas. Los primeros tienden a ser tomados por individuos más que por agencias públicas, a menudo en respuesta a cambios en el entorno ambiental o cambios en las condiciones del mercado. Suelen consistir en medidas reactivas de duración a corto o medio plazo y, con frecuencia, son de alcance local. Por otro lado, las acciones planificadas normalmente las toman agencias públicas o grandes entidades del sector privado, a menudo en previsión del cambio climático y con una perspectiva a más largo plazo y un alcance espacial más amplio (Refsgaard et al., 2013).

Básicamente, la prevención proactiva es la regla, mientras que la respuesta reactiva debe seguir siendo la excepción. Por lo general, el monitoreo y la planificación específicos del cambio climático conducirán a la implementación de prácticas de gestión y prohibiciones de interferencia necesarias para evitar impactos negativos en un buen estado de conservación.



Si bien una medida de adaptación al cambio climático tiene uno o varios propósitos de implementación, la misma medida podría implicar efectos adicionales positivos y/o negativos en el sistema socio ecológico. Por ejemplo, la adaptación al aumento de las precipitaciones mediante la implementación de un sistema de drenaje puede implicar efectos positivos directos en términos de disminuir el riesgo de inundaciones, mientras que también puede implicar costos de inversión, afectando directamente la economía de manera negativa (Wiréhn et al., 2020).

La adaptación al cambio climático ha ampliado su concepto, pasando de la gestión de la manifestación directa de los peligros del cambio climático a enfoques basados en el riesgo. Estos incorporan una evaluación de la vulnerabilidad y la capacidad de adaptarse a los peligros (Gandini et al., 2016).

Un marco de riesgo para la adaptación podría integrar vulnerabilidades, riesgos y peligros clave, y facilitar el desarrollo de acciones de adaptación que aborden todo el sistema socio ecológico. Los planes de adaptación deberán desarrollarse e implementarse reconociendo la incertidumbre futura que requiere un proceso de implementación iterativo a medida que se acumula nueva experiencia e información (Hruska et al., 2017).

2.9.1 VULNERABILIDAD

Se considera a la vulnerabilidad como una función de tres grandes dimensiones: la exposición a la variabilidad y a los extremos climáticos, la sensibilidad de los sistemas sociales y la capacidad de adaptación de los grupos humanos que habitan en las regiones estudiadas.

La exposición se refiere a los eventos físicos y meteorológicos asociados con la variabilidad climática, a los que un sistema se exhibe, se enfrenta y se “expone” (IPCC, 2001). La sensibilidad es el grado en que un sistema resulta afectado por los eventos a los que está expuesto (IPCC, 2007). La sensibilidad refleja condiciones sociales, económicas, culturales, políticas y ambientales más amplias y depende de



los recursos a los que los actores puedan acceder. La capacidad de adaptación indica la habilidad de los sistemas para ajustarse a las condiciones del entorno y aumentar su rango de tolerancia.

La construcción de indicadores e índices ha sido ampliamente utilizada para cuantificar la vulnerabilidad y realizar comparaciones entre regiones. Algunas experiencias conjugan las tres dimensiones en un solo índice (Dong et al., 2015), elaboran un índice de alguna de ellas (Acosta et al., 2013) o sintetizan varios índices en uno (Dunford et al., 2015). Para muchos autores, los indicadores resultan pertinentes para realizar amplias comparaciones y para informar decisiones sobre la financiación de la adaptación (Mussetta, 2017).

La posibilidad de medir la vulnerabilidad es una dificultad ampliamente mencionada y se la asocia a problemas como la combinación de datos cualitativos y cuantitativos (Thomas, 2013); al carácter dinámico de los procesos biofísicos y sociales que dificulta predecir cambios en las variables relevantes y las leyes que las vinculan (Stern et al., 1992); a los criterios para ponderar las dimensiones analizadas debido a la importancia relativa de los componentes en cada región estudiada; y a los mecanismos disponibles para definir umbrales de vulnerabilidad que reflejen apropiadamente su relatividad, severidad y distribución (Adger, 2006). En la base de estas limitaciones, el principal reparo a los sistemas de indicadores como herramienta para estudiar la vulnerabilidad, es su incapacidad para dar cuenta de los procesos que dan forma y complejizan el fenómeno.

2.9.2 RIESGO

El riesgo es el potencial de consecuencias donde algo de valor está en juego y donde el resultado es incierto, reconociendo la diversidad de valores. El riesgo a menudo se representa como la probabilidad de que ocurran eventos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos si estos eventos o tendencias ocurren. El riesgo resulta de la interacción de vulnerabilidad y peligro (IPCC, 2014).



La evaluación de riesgos combina peligro y vulnerabilidad, para lo cual calculamos el riesgo como una multiplicación de las probabilidades de los fenómenos provocados por el cambio climático y las vulnerabilidades a estos cambios.

[13]

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} * \text{Vulnerabilidad}$$

Considerando como peligro a la ocurrencia potencial de una tendencia o suceso físico de origen natural o humano que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, provisión de servicios, ecosistemas y recursos ambientales (MITERD, 2015).

Así como a la vulnerabilidad siendo esta el estado de susceptibilidad del ecosistema o sistema socio-ecológico de estudio a las perturbaciones del cambio climático (MITERD, 2015).

El riesgo climático considera no solo el nivel potencial de daño sino también la probabilidad de que ocurra. Las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo son de vital importancia; no solo informan la toma de decisiones con respecto a los requisitos para respuestas adaptativas al cambio climático, sino que también pueden mostrar si los esfuerzos deben fortalecerse debido a los límites de la adaptación (Hay & Mimura, 2006).



3. HIPÓTESIS.

La evaluación de las sequías y abundancias de precipitación, bajo efectos del cambio climático, permitirá la generación de parámetros de recurrencia e intensidades de estos fenómenos meteorológicos y la formulación de medidas de adaptación en el municipio de Morelia, Michoacán.



4. OBJETIVOS.

4.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar las posibles sequías y abundancias de precipitación debidas al efecto del cambio climático a corto, mediano y largo plazo, mediante la implementación de modelos hidrológicos, para la formulación de propuestas de medidas de adaptación en el municipio de Morelia, Michoacán.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Obtener la precipitación y el escurrimiento para el periodo histórico, con la evaluación de las abundancias de precipitación y sequías en el municipio de Morelia.
- Obtener la precipitación y el escurrimiento para el periodo futuro considerando la existencia de cambio climático, con la evaluación de las abundancias de precipitación y sequías en el municipio de Morelia.
- Desarrollo de Medidas de Adaptación al Cambio climático en el municipio de Morelia.



5. JUSTIFICACIÓN.

El cambio climático es un tema de importancia mundial, ya que cada vez con más frecuencia se registran eventos meteorológicos extremos, los cuales han dejado severos daños, tanto económicos, como ecológicos y humanos.

Esta problemática sin duda podría llegar a afectar diferentes sectores económicos, políticos y sociales de cualquier sitio; la magnitud de dicha afectación dependerá de la vulnerabilidad de cada zona, lo que significa que las condiciones climáticas serán diferentes para cada sitio y las variables climáticas reflejarán estas afectaciones en distintas escalas.

El recurso hídrico es uno de los sectores que más preocupación muestran ante el fenómeno del cambio climático en todo el mundo. Actualmente los recursos hídricos existentes no son suficientes para abastecer las demandas de la sociedad, con fenómenos poco predecibles como lo es el cambio en el clima, y por ello la situación se vuelve más preocupante.

Debido a esto, es imprescindible realizar este tipo de investigaciones para formular medidas de adaptación que nos permitan disminuir estos daños generados por el cambio climático.

Resulta imperativo realizar un conjunto de estudios multidisciplinarios para conocer la situación actual del municipio de Morelia, Michoacán, de tal forma que se pueda obtener la disponibilidad del recurso hídrico, y de esta forma, poder ver la afectación que estos podrían sufrir por efectos del cambio climático existente.

Los episodios de sequía son consecuencia de la variabilidad climática y de la redistribución del agua dentro del ciclo hidrológico. A pesar de sus amplias, y en ocasiones impredecibles consecuencias, pueden incluirse entre los fenómenos hidrológicos científicamente menos comprendidos, lo que sigue estimulando diversas preguntas y actividades de investigación (Brenčič, 2016).

El análisis de las sequías y las abundancias de precipitación en Morelia, Michoacán es de suma importancia debido a que es una zona urbana con patrimonio cultural y



atractivo turístico (UNESCO, 1991), que se ve afectada por estas variaciones climáticas de precipitación y de temperatura, poniendo en mayor vulnerabilidad a los habitantes del sitio, así como a sus actividades cotidianas.

Su sentido de urgencia radica más en la adaptación que en la mitigación, puesto que las consecuencias de los impactos del cambio climático ya se experimentan y ya han ocasionado graves daños en los sistemas humanos y ecológicos, así como en la economía del país (Serrato, 2018).



6. METODOLOGÍA.

La metodología empleada en esta investigación se desarrollará a través de varias etapas. El esquema general de la metodología propuesta que se muestran en la Figura 1

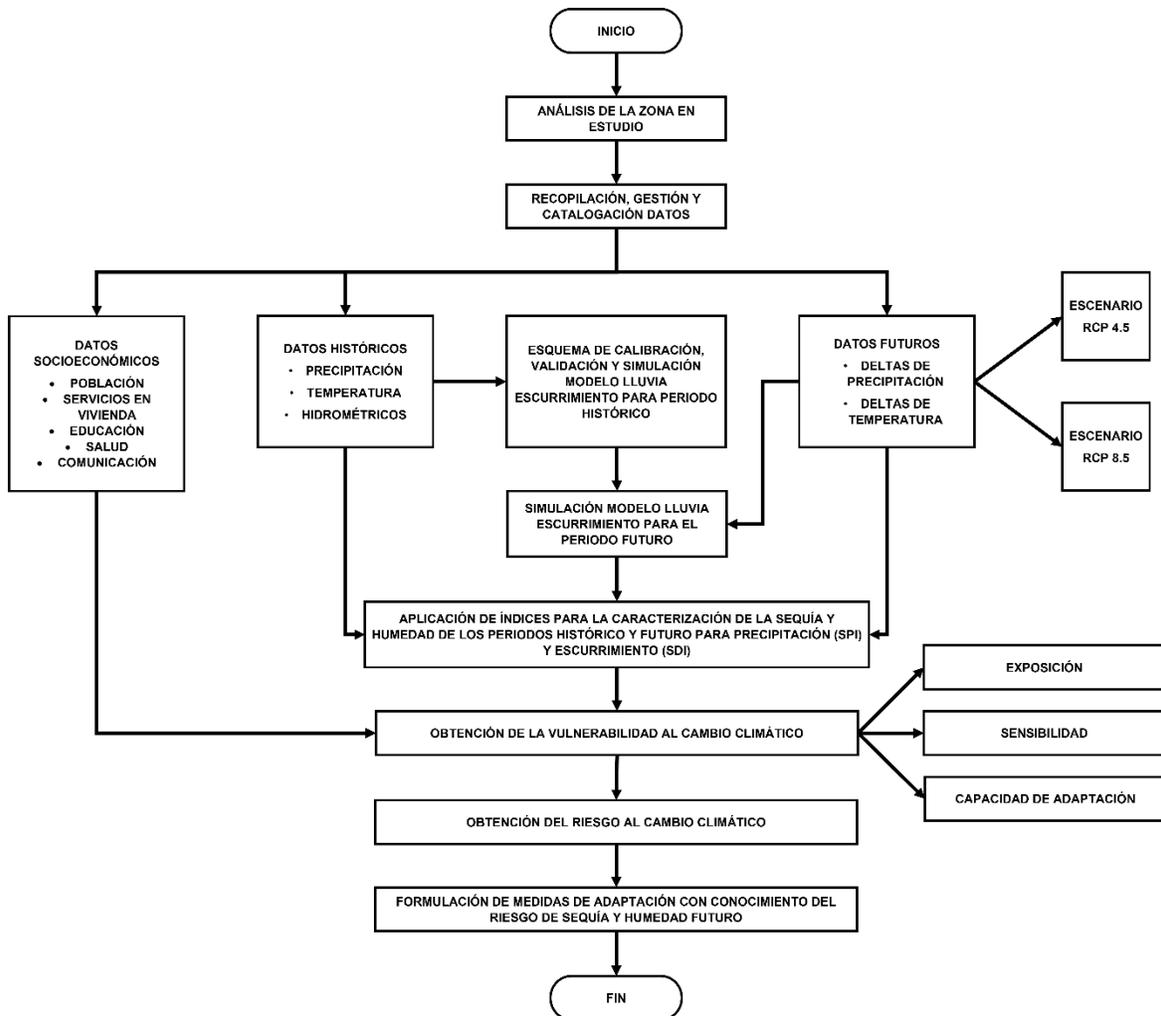


Figura 1 Esquema general de la metodología



6.1 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO.

Esta primera fase consiste en realizar un adecuado análisis geográfico de la zona de interés para ser analizada, y con ello obtener una correcta delimitación y caracterización de la misma. Este análisis de la zona que se desea estudiar permite conocer las características propias del sitio que concederán la toma de decisiones al momento de modelar y manipular información del lugar, así como comparar los resultados de la zona con información previa existente.

6.2 RECOPIACIÓN, GESTIÓN Y CATALOGACIÓN DATOS (PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y ESCURRIMIENTO).

El procesamiento de datos consiste en la recopilación de la información de la zona de estudio, en la cual no se cuenta con la adecuada indagación meteorológica, por lo que se hace la búsqueda de estos datos para trabajar con la máxima información posible.

La gestión de datos se divide en dos grupos:

- Datos históricos
- Datos futuros

Se considera como datos históricos los registrados de la zona, y los datos futuros son las series meteorológicas que consideran el efecto del cambio climático.

6.2.1 DATOS HISTÓRICOS.

Para realizar este proyecto fue necesario realizar una recopilación de información que sea suficiente para la elaboración de todos los procesos, por lo cual se debe de considerar y analizar cuál será la información que se requiere para la elaboración de los estudios y saber la procedencia de la información.



La obtención de la información de precipitación y temperatura de la zona se obtuvo de las estaciones meteorológicas que se ubican cerca o dentro de la zona de estudio, para estos datos se recurrirá a la base de datos de Clima Computarizado: Climate Computing Project (CLICOM, 2018). Al ser estaciones que no son automatizadas, los datos históricos de las precipitaciones y temperaturas contienen errores y vacíos, los cuales deben ser correctamente tratados por medio de la generación de series de precipitaciones y temperaturas históricas obtenidas.

A las estaciones obtenidas se les realizan las siguientes pruebas:

- Pruebas de homogeneidad

- T-Student (Campos Aranda, 1998).
- Cramer (Campos-Aranda, 1992).
- Bartlett (World Meteorological Organization, 1988).

- Pruebas de tendencia

- Pendiente de Regresión (Ostle & Mensing, 1975).
- Spearman (World Meteorological Organization, 1988).
- Mann Kendall (Kottegoda, 1980).

- Pruebas de independencia

- Límites de Anderson (Anderson & Darling, 1954).
- Wald-Wolfrashausen (Wald, 1947).

Por otra parte, se hace el procesamiento de la temperatura para generar el parámetro de evapotranspiración por el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

Para la obtención de la información hidrométrica se realiza mediante el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional y el cual fue creado a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual a través del Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA) ha venido actualizando la información de BANDAS (2016).



6.2.2 DATOS FUTUROS.

Actualmente en México, la mayoría de los estudios acerca del cambio climático se realizan utilizando el modelo Ensemble, que como su nombre lo dice resulta de una combinación de 15 MCG, que, regionalizados para nuestro país, dan la información de precipitaciones y temperaturas proyectadas a futuro. Estas herramientas son desarrolladas por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Las series de cambio climático puestas a disposición de los investigadores y del público en general por parte del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2018), son datos que han sido procesados con herramientas desarrolladas en otros países y regionalizados para poder utilizarlos en México.

Se integró un modelo ensemble a partir del valor de la mediana de los modelos de circulación general (MCG) reducidos en escala y calibrados de acuerdo con la metodología de Ruiz Corral (2016).

Los MCG proporcionan los cambios de temperatura y precipitación conocidos como deltas de las variables, los cuales pueden ser cifras negativas o positivas dependiendo de si es un incremento o un decremento de la variable.

Se generaron los mapas correspondientes a los deltas de precipitación y temperatura debidos al cambio climático, y se obtuvieron las variaciones en las series históricas mediante la influencia que tiene cada estación con estos valores.

La metodología seguida para el procesamiento de esta información, es el encontrado en publicaciones como García-Romero (2015) y Navarro (2019).



6.3 EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.

La evaluación los recursos hídricos y el impacto que el cambio climático que tiene sobre ellos, se estima a través de la simulación del ciclo hidrológico mediante un modelo del tipo lluvia-escurrimiento y la implementación de un sistema de información geográfica (SIG) y mediante la corrección de los mapas disponibles de precipitación y temperatura de acuerdo con las anomalías mensuales para los diferentes escenarios de cambio climático como lo hace Ferrer (2012) en sus modelos basados en SIG para la evaluación de la cantidad y calidad del agua.

La modelación del escurrimiento se realiza a través del módulo informático para la Evaluación de los Recursos Hídricos (EVALHID) (Arquiola & Solera, 2017; 2013) desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia. Este módulo permite la representación en escurrimiento a través de las ecuaciones del modelo de Témez (1977).

6.3.1 ESQUEMA DE CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN MODELO LLUVIA-ESCURRIMIENTO PARA EL PERIODO HISTÓRICO.

La aplicación de cualquier modelo lluvia-escurrimiento implica varias etapas que son importantes para que éste funcione de manera correcta:

- Calibración del modelo. Para obtener resultados confiables del modelo lluvia-escurrimiento, y que simule correctamente los procesos que ocurren en la cuenca, es necesario llevar a cabo la calibración del mismo, ajustando los parámetros de calibración de acuerdo con la sensibilidad de cada uno de ellos, de manera que se reproduzca fielmente una serie de referencia (datos históricos medidos).
- Validación del modelo. Una vez calibrado el modelo, se elige un periodo de datos para validar, que significa verificar que los resultados simulados por el modelo están apegados a lo que realmente sucede en la cuenca.



- Obtención de los escurrimientos (sin considerar el efecto del cambio climático). Al ingresar los datos al modelo calibrado y validado, se pueden hacer simulaciones para el periodo histórico y actual, obteniendo los escurrimientos superficiales que se generan en la cuenca, para el periodo de tiempo seleccionado o disponible.

6.3.2 SIMULACIÓN MODELO LLUVIA - ESCURRIMIENTO PARA EL PERIODO FUTURO.

Una vez que se ha realizado el proceso de calibración, simulación y validación del modelo lluvia-escorrimento para el periodo histórico, se precede a realizar la simulación del periodo futuro.

Esta simulación se hace ingresando las series de precipitación y evapotranspiración modificadas por los posibles efectos de cambio climático, y se incorporan en el modelo calibrado y validado para obtener las series posibles futuras con cambio climático.

6.4 APLICACIÓN DE ÍNDICES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA Y HUMEDAD DE LOS PERIODOS HISTÓRICO Y FUTURO (PARA PRECIPITACIÓN Y ESCURRIMIENTO).

Los índices de sequía, junto con la información complementaria sobre los activos expuestos y sus características relativas a la vulnerabilidad, son esenciales para seguir y prever los efectos y las consecuencias de las sequías. Hay índices que también pueden cumplir otra función esencial, en el sentido de que pueden facilitar una referencia histórica a los planificadores o las instancias decisorias (Svoboda & Fuchs, 2016).

La selección del índice adecuado se realiza de acuerdo con el objetivo perseguido en la investigación y a la información proporcionada por la OMM.



En esta investigación se seleccionó el índice normalizado de precipitación (SPI). Éste es un indicador de sequía meteorológica que no solo proporciona las sequías y sus intensidades, si no también sus humedades, para el uso del SPI se realizan diferentes pruebas y comparaciones entre los SPI-3, SPI-6, SPI-12 y SPI-24 que hacen uso de las series de precipitación a 3, 6, 12 y 24 meses respectivamente de acuerdo a diferentes metodologías empleadas como Belayneh et al. (2016), Das et al. (2020), Kubiak-Wójcicka & Bąk (2018), Mohammad et al. (2018) y Ortega-Gómez et al. (2018), para su correcto análisis.

También se seleccionó el Índice de Sequía de los Caudales Fluviales (SDI), éste es un indicador de sequía hidrológica y emplea valores mensuales de los caudales fluviales y los métodos de normalización asociados al SPI para desarrollar un índice de sequía basado en datos de los caudales fluviales. Gracias a un producto similar al del SPI, se pueden analizar los períodos húmedos y secos, así como la gravedad de estos episodios (Svoboda & Fuchs, 2016), además de ser un indicador de sequía implementado en distintas metodologías como Esquivel-Arriaga et al. (2014) y Nalbantis & Tsakiris (2009).

La aplicación de las sequías y abundancias se realiza mediante la aplicación de modelos de distribución espacial para poder apreciar el fenómeno sobre la superficie terrestre con una visualización gráfica.

Para realizar este tipo de distribuciones se realiza la modelación utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcMap 10.5 aplicando los valores a las estaciones meteorológicas georreferenciadas en estudio para la generación de los mapas correspondientes.

Al obtener los mapas de sequía para los diferentes SPI 3, 6, 12 y 24 meses, se realiza una comparativa y se analiza qué situación de sequía es la que se está buscando representar tal como lo presenta Santos (2019) en su investigación.



6.4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA.

El objetivo de la caracterización de las sequías meteorológicas es conocer la variabilidad espacial de las precipitaciones en la zona de estudio, con esto se busca saber la duración media que tienen las sequías en la zona, así como su magnitud e intensidad.

El proceso de la caracterización de sequías fue realizado mediante los datos obtenidos por medio de la herramienta informática MASHWIN (2019) el cual es un modelo de análisis estocástico de tipo mensual, destinado al estudio de series temporales de aportación pertenecientes a un sistema hidráulico (UPV, 2019).

6.4.2 GENERACIÓN DE PARÁMETROS DE SEQUÍAS Y HUMEDAD.

La generación de los parámetros de sequías y abundancias se realiza mediante la obtención y análisis de los niveles de sequía y de abundancia provocados por el cambio climático siguiendo referencias como el artículo “Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México”, en donde se realizan comparativas entre los diferentes escenarios de sequías obtenidos por los índices meteorológicos e hidrológicos para generar tendencias y rangos de los datos (Martínez & Patiño, 2012).

6.5 FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN CON CONOCIMIENTO DEL RIESGO DE SEQUÍA Y HUMEDAD FUTURO.

La formulación de las medidas de adaptación al cambio climático se realiza mediante el análisis del impacto que genera el cambio climático y la adaptación que se puede realizar para estos impactos.



El impacto es la alteración o modificación que causa la acción del cambio climático sobre el ambiente, como son los fenómenos meteorológicos generados por estas variaciones en el clima. El impacto del cambio climático está constituido por:

- *Tipo de problema*, es la cuestión planteada a partir de datos conocidos, con la finalidad de determinar el método que hay que seguir para obtener una solución.
- *Consecuencia*, acontecimiento derivado o que resulta de una problemática planteada, que trae consigo cambios en el sitio analizado.
- *Nivel de riesgo*, es la magnitud existente de un riesgo expresado mediante la combinación de la probabilidad de ocurrencia y la vulnerabilidad presente en el lugar de análisis, ante el acontecimiento de un fenómeno meteorológico.
- *Dominio de incertidumbre*, aborda las funciones asociadas con el análisis de riesgo y sus incertidumbres debidas a su origen de determinación.
 - *Fuente*, todo aquello originado a partir de otros datos analizados, tal como las proyecciones y modelaciones del clima.
 - *Naturaleza*, origen del manejo de información y obtención de resultados mediante fuentes empleadas para la evaluación del cambio climático.

Mientras que la acción a estos impactos es aceptar la ocurrencia del cambio climático, y acoplarlo a las actividades y entornos existentes, la cual se realiza mediante la propuesta de medidas de adaptación que integran las siguientes variables:

- *Opción*, posibilidad de elección de acciones, respecto a las necesidades y capacidades de respuesta, ante los efectos del cambio climático.
- *Tipo*, modelo que integra las características esenciales para ser empleado según sus requerimientos.
- *Nivel de costo*, es la media ponderada del precio de las acciones a emplearse.
- *Intención*, idea o cosa que una persona u organismo se propone a hacer, con cierta acción o comportamiento.



- *Acción*, indica la actividad que se realiza, la cual implicara un movimiento o cambio en un periodo de tiempo establecido.
- *Alcance temporal*, es el periodo de tiempo que abarcara la acción empleada, para conseguir resultados deseados o requeridos.
- *Alcance espacial*, indica el sitio donde se realizará la ejecución de la acción de adaptación, para conseguir los resultados requeridos.

En donde de acuerdo a los parámetros obtenidos y mediante una matriz de riesgos por el cambio climático, se realizan las propuestas de adaptación con sus respectivos alcances y restricciones (Gandini et al., 2016).

Esta formulación de medidas de adaptación al cambio climático ha sido empleada en diferentes literaturas como Bierbaum et al. (2013), Refsgaard et al. (2013), H. Runhaar et al. (2012) y Uittenbroek et al. (2016).

6.5.1 OBTENCIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO.

La revisión de bibliografía especializada nos lleva a sostener que no existen hasta ahora guías para evaluar la vulnerabilidad con base en indicadores que puedan considerarse como universales (Mussetta, 2017).

Por lo que, para la elaboración de los índices de vulnerabilidad al cambio climático, se han usado diferentes metodologías empleadas como Bonch-osmolovskiy & Heltberg (2011), Eakin & Bojórquez-Tapia (2008), Schilling et al. (2020), Vincent (2007), Acosta et al. (2013), Moss et al. (2001) y Malik et al. (2012), para su correcto análisis.

6.5.2 OBTENCIÓN DEL RIESGO AL CAMBIO CLIMÁTICO.

La evaluación de riesgos combina peligro y vulnerabilidad, obteniendo el riesgo como una multiplicación de las probabilidades de los fenómenos provocados por el cambio climático y las vulnerabilidades a estos cambios a través de la Ecuación [13]

7. RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante esta investigación, así como la discusión de los mismos.

7.1 ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El Municipio de Morelia es uno de los 113 municipios del estado de Michoacán de Ocampo.

El Municipio de Morelia se ubica en las coordenadas $19^{\circ}42'10''\text{N}$ $101^{\circ}11'32''\text{O}$, tiene una extensión total de 1,199.02 km² que equivalen al 2.03% de la extensión total de Michoacán.

Su cabecera es la ciudad de Morelia, que es también la capital del estado ubicada sobre la Región de Morelia como se puede ver en la Figura 2 y es un principal sitio de interés en la evaluación del cambio climático.

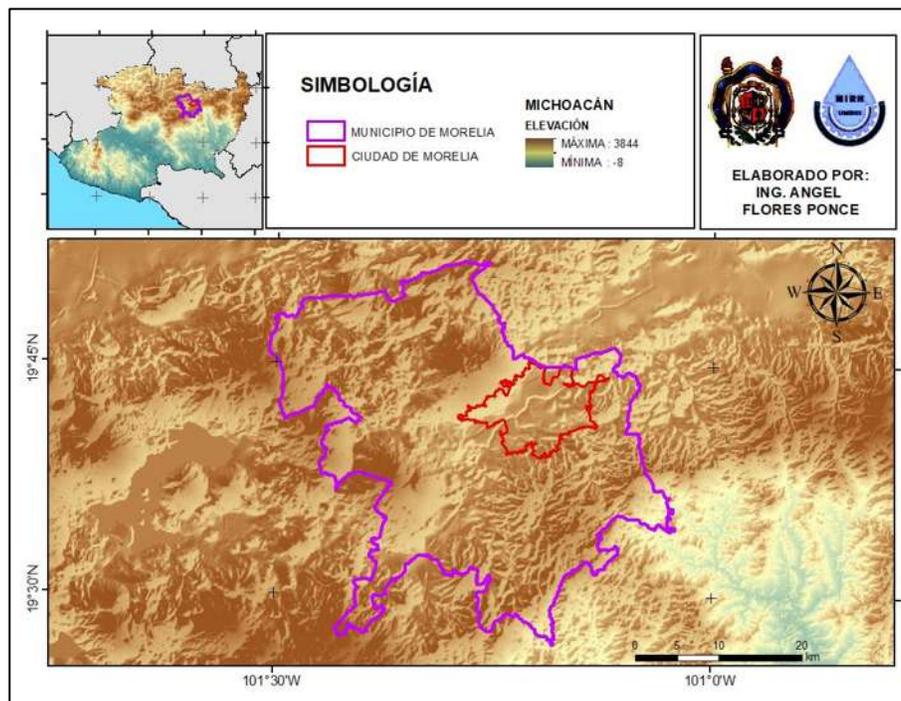


Figura 2. Localización del municipio de Morelia y la ciudad de Morelia, Michoacán.

Para el estudio del comportamiento hídrico en el municipio de Morelia se definió una cuenca hidrológica que abarca todo el municipio. La zona de estudio se ha discretizado en 33 subcuencas tal como se aprecia en la Figura 3.

La cuenca tiene un área de 2484 km², un perímetro de 336.87 km, una longitud de 63.3 km y sus coordenadas de su centro de gravedad son, Longitud: -101.274 y Latitud: 19.646.

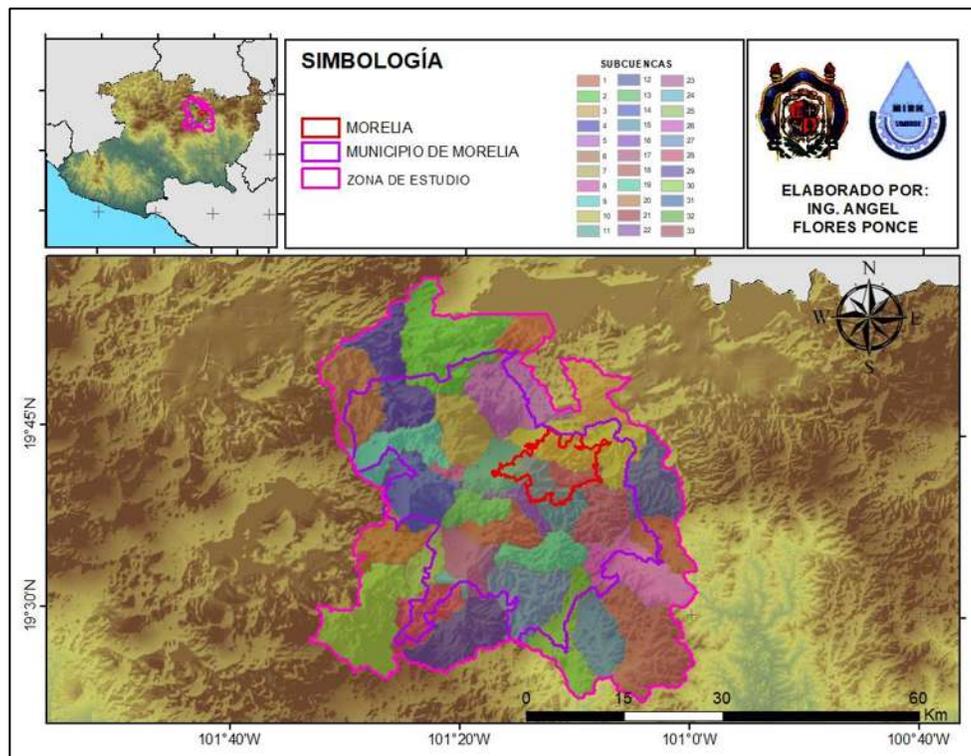


Figura 3. Zona de estudio conformada por 33 subcuencas.

En México la institución que se encarga de la gestión y aprovechamiento del agua es la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), que desempeña sus funciones administrativas mediante 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), de las cuales la zona de estudio se encuentra en la RHA IV-Balsas y la RHA VIII-Lerma Santiago Pacífico como se puede ver en la Figura 4.

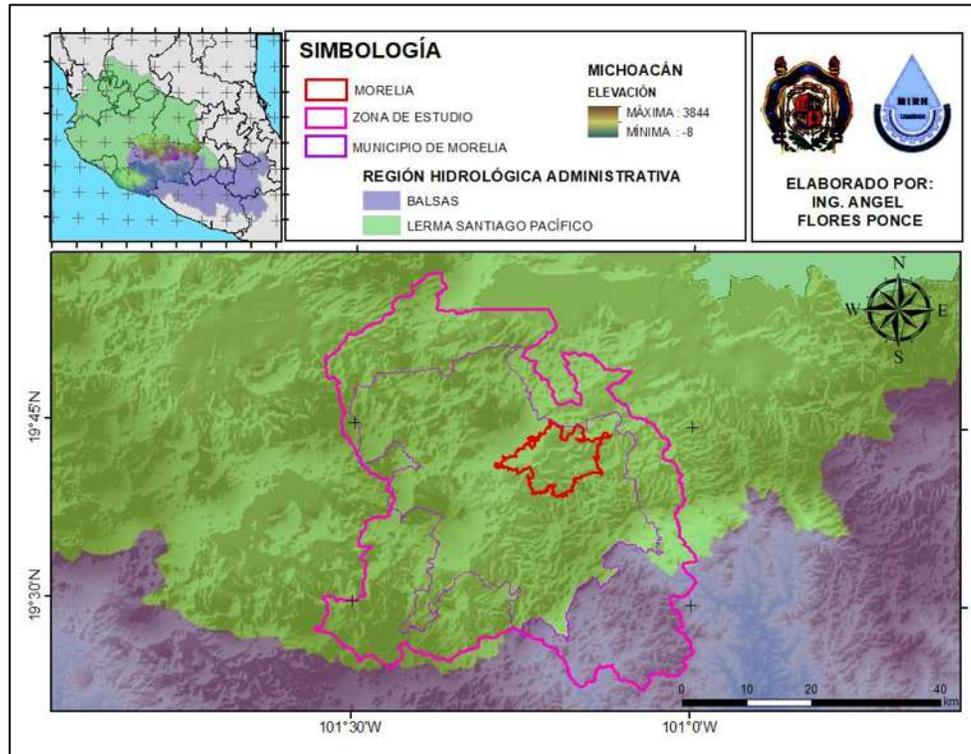


Figura 4. Regiones hidrológicas administrativas presentes en la zona de estudio.

Una Región Hidrológica Administrativa está integrada por varias Regiones Hidrológicas (RH), en las que las cuencas son las unidades para la gestión de los recursos. La zona de estudio pertenece a la RH XII-Lerma Santiago y la RH XVIII-Balsas como se muestra en la **Figura 5**.

De igual manera las RHA están conformadas por distintos Consejos de Cuenca, mismos que son los Encargados de canalizar la participación social en la gestión del agua, de los cuales la zona de estudio se encuentra en los consejos de cuenca IX Río Balsas y XV Lerma-Chapala tal como se muestra en la **Figura 6**.

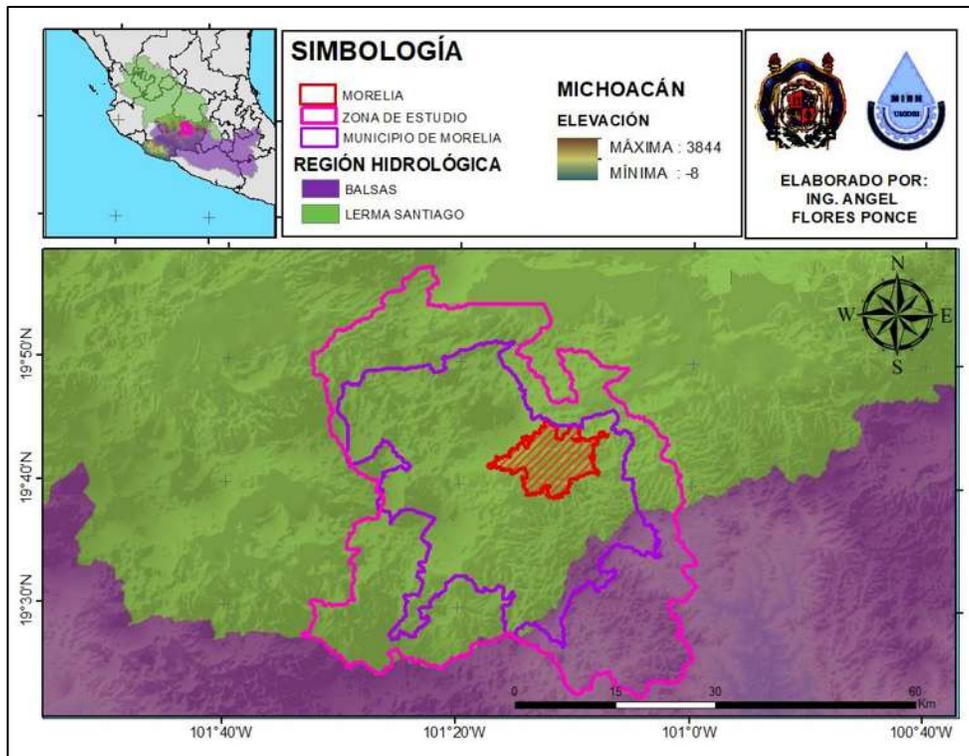


Figura 5. Regiones hidrológicas localizadas en la zona de estudio.

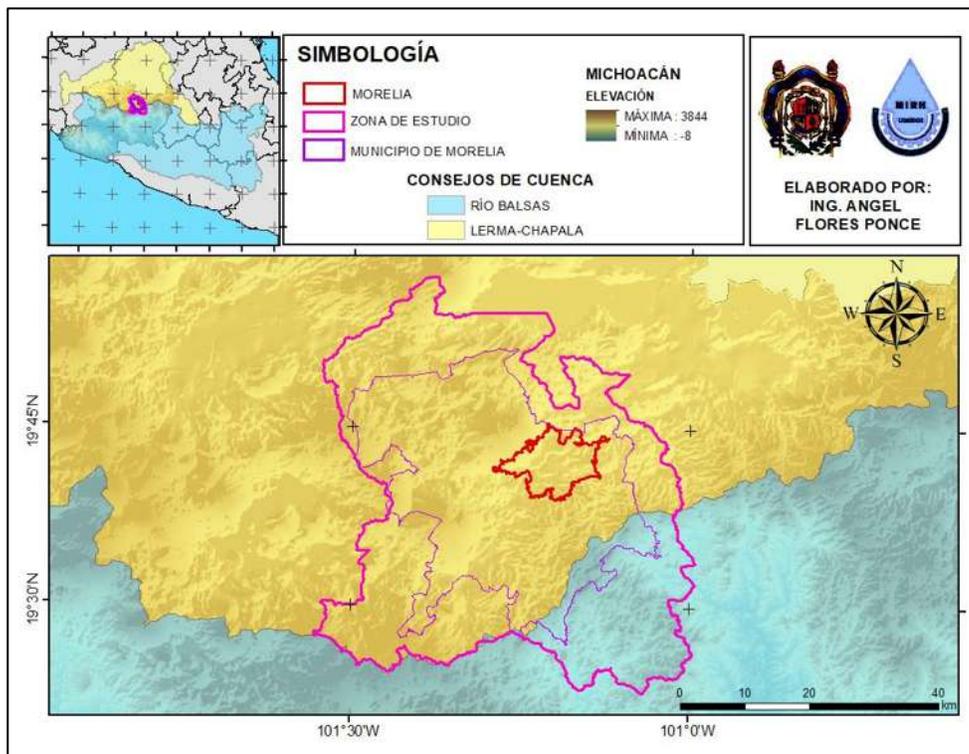


Figura 6. Consejos de cuenca dentro de la zona de estudio.

La Figura 7 presenta el uso de suelo que se tiene en la zona, entre los que destacan el uso agrícola y bosque, así como también se cuenta con área urbana en la cual se encuentra la ciudad de Morelia.

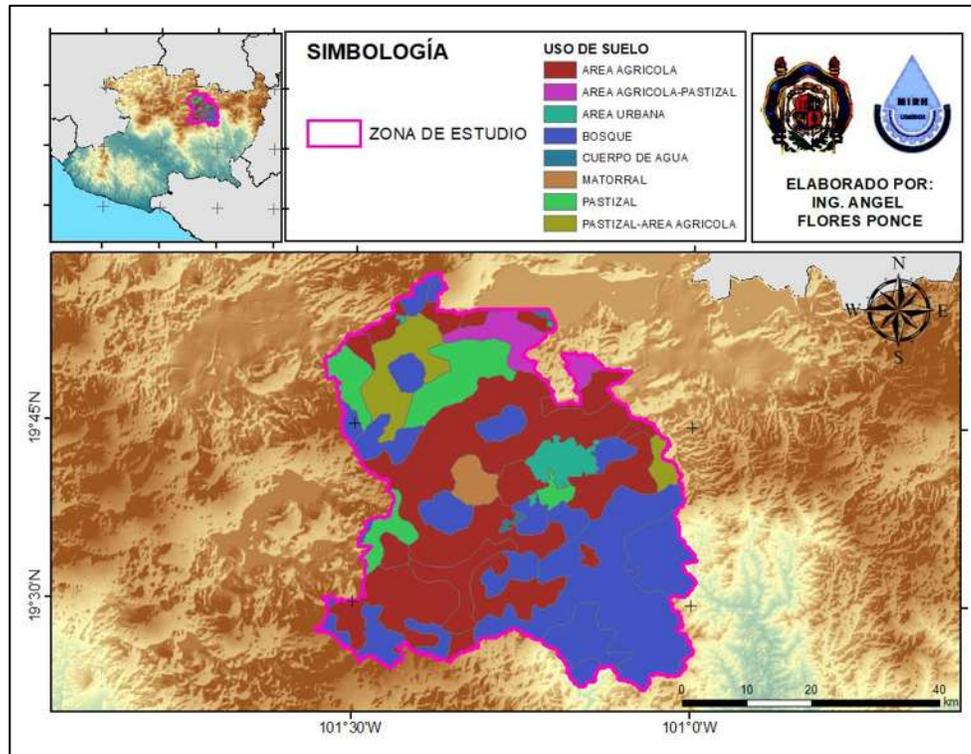


Figura 7. Usos de suelo presentes en la zona de estudio.

En la Figura 8 se presenta el tipo de suelo que se tiene en la zona de estudio. Los suelos predominantes son los Feozem que son suelos de textura media, así como el vertisol y el luvisol de tipo fino.

La geología de la zona está conformada principalmente por rocas basálticas, andesitas y tobas, la composición geológica de la zona se puede apreciar detalladamente en la Figura 9.

Los acuíferos que tienen relación con la zona de estudio son el acuífero Morelia-Queréndaro, Zacapu, Lagunillas Pátzcuaro, Huetamo y Tacámbaro-Turicato entre otros, mismos que se pueden apreciar en la **Figura 10**.

En la zona también se pueden localizar cuerpos de agua, distritos de riego y presas como la de Cointzio (Figura 11). Todos estos datos son esenciales para la modelación hidrológica de la cuenca.

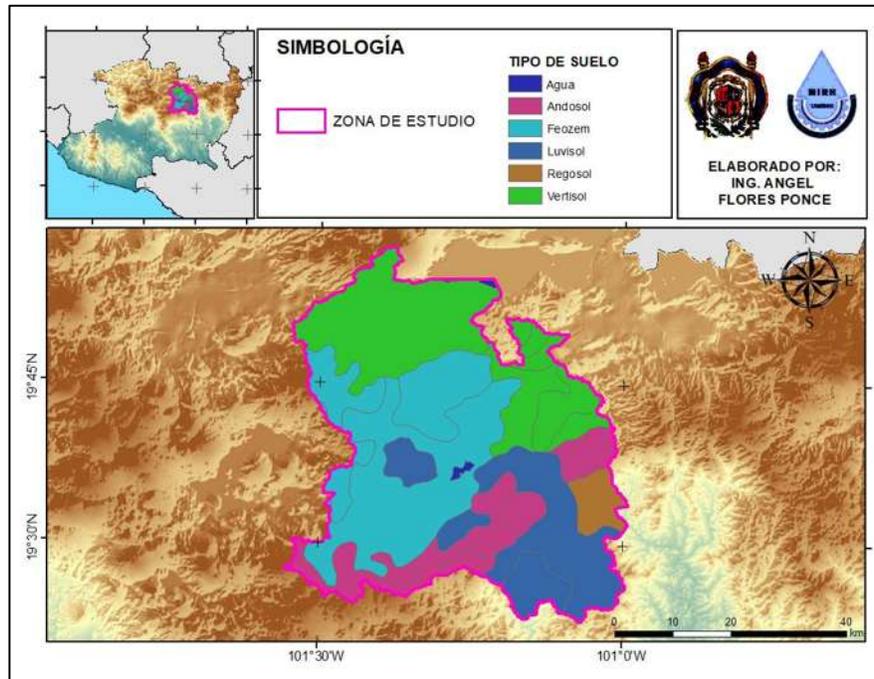


Figura 8. Tipo de suelo dentro de la zona de estudio.

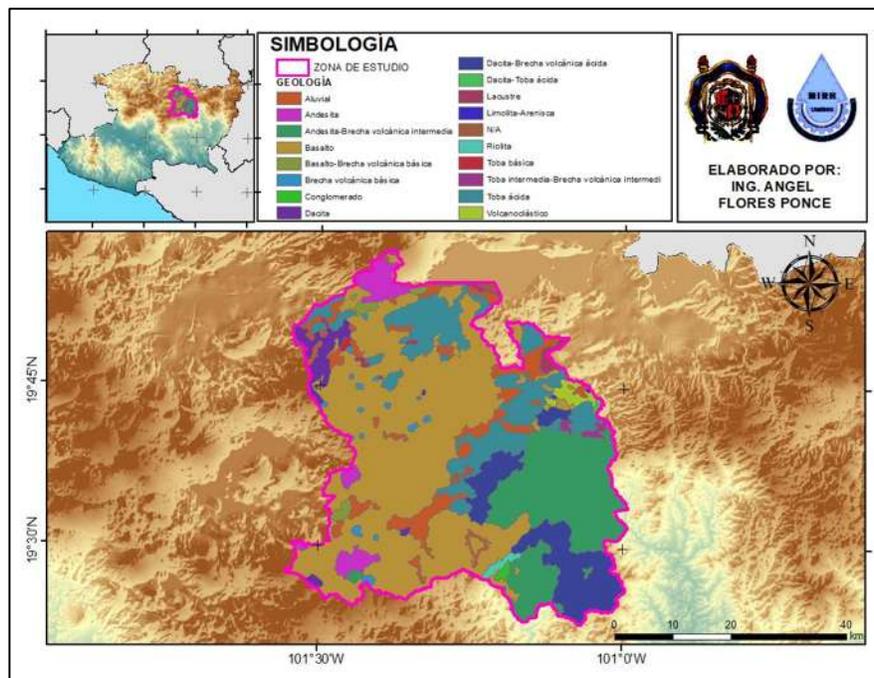


Figura 9. Geología ubicada en la zona de estudio.

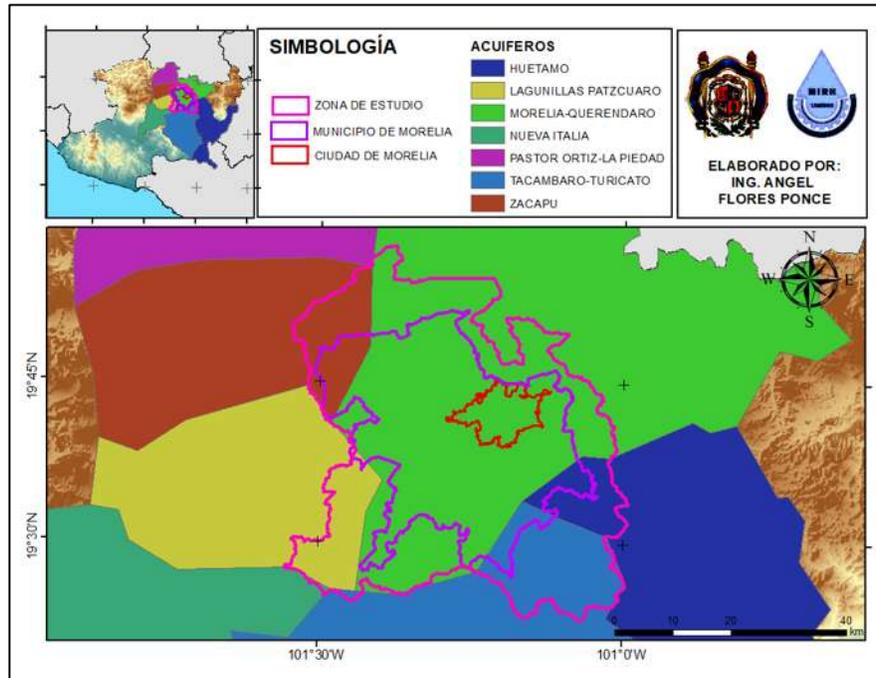


Figura 10. Acuíferos ubicados en la zona de estudio y a sus alrededores.

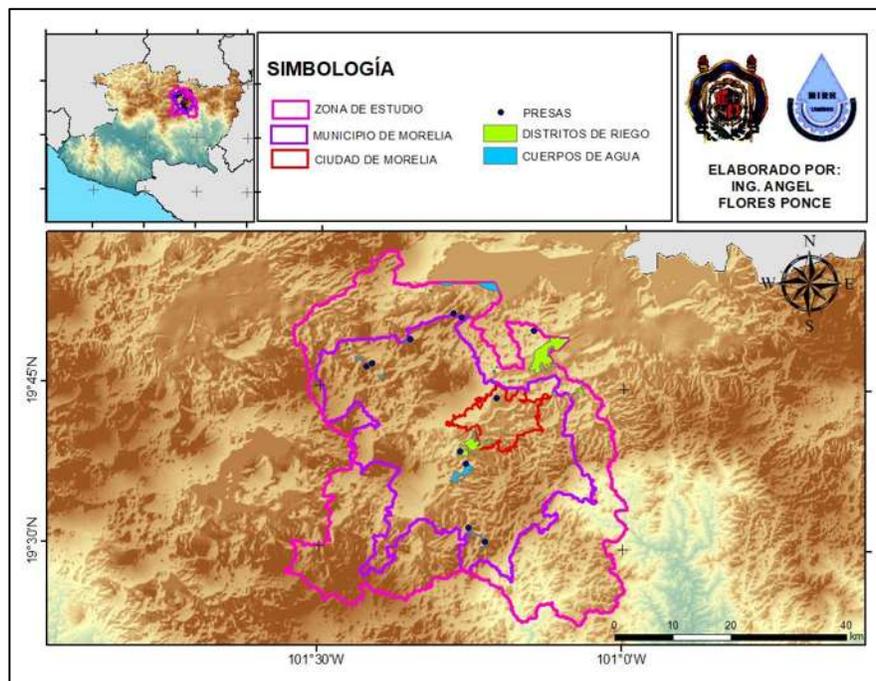


Figura 11. Presas, distritos de riego y cuerpos de agua dentro de la zona de estudio.

7.2 TRATAMIENTO DE DATOS.

7.2.1 PRESELECCIÓN DE ESTACIONES.

Se identificaron las estaciones meteorológicas cercanas al municipio de Morelia. Para ello se consideró un radio de 80 km desde el centro de gravedad de la zona de estudio. Una vez localizadas las estaciones se realizó la descarga de información de la base de datos climatológica nacional CLImate COMputing Project (CLICOM) (2018), de donde se obtienen concretamente los registros históricos tanto de precipitación como de temperatura.

Como se muestra en la Figura 12 se ubicaron las estaciones meteorológicas dentro del rango en estudio, siendo un total de 68 estaciones, las cuales se presentan a continuación en la Tabla 1.

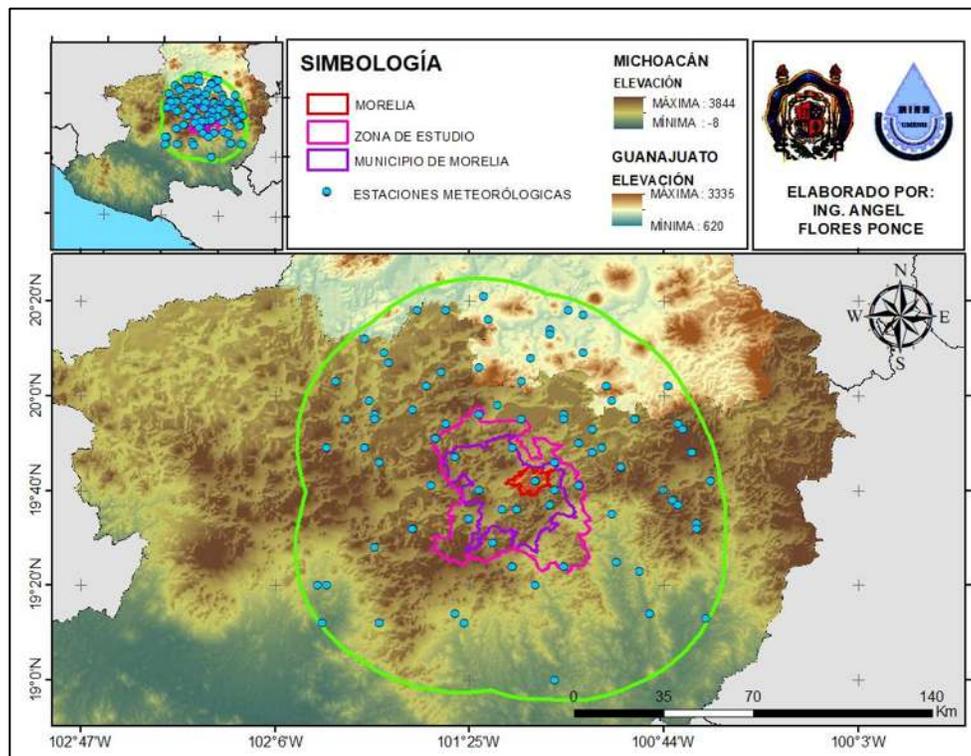


Figura 12. Ubicación de las estaciones en un radio de 80 km.



Tabla 1. Estaciones meteorológicas dentro del radio de los 80 km de la zona de estudio.

N°	ID ESTACIÓN	NOMBRE	COORDENADAS	
			X	Y
1	11002	ACAMBARO, ACAMBARO	320527.03	2216357.31
2	11010	CERANO, YURIRIA	250755.19	2224395.48
3	11021	EL SABINO, SALVATIERRA	288740.71	2244525.68
4	11027	IRAMUCO, ACAMBARO (SMN)	299594.57	2210930.38
5	11047	MOROLEON, MOROLEON	269617.23	2227728.03
6	11071	SANTA MARIA YURIRIA(DGE)	277071.98	2236957.82
7	11072	SANTA RITA, JARAL DEL P	283572.20	2246334.66
8	11097	SANTA MARIA (YURIRIA)	277113.21	2238808.94
9	11114	EL REFUGIO, ACAMBARO	297709.55	2216411.10
10	11133	SANTA MARIA SANABRIA	252876.25	2252070.63
11	11146	LAS JICAMAS, V. SANTIAGO	254474.30	2242829.90
12	11156	EL DORMIDO, S. MARAVATIO	289169.37	2229418.74
13	16001	ACUITZIO DEL CANJE, (SMN)	255037.26	2156070.94
14	16002	AGOSTITLAN, CD. HIDALGO	330341.02	2160682.05
15	16004	ALVARO OBREGON, (SMN)	287018.90	2194393.74
16	16005	ANGAMACUTIRO, (SMN)	215982.88	2230483.84
17	16012	CAJONES, GABRIEL ZAMORA	191491.52	2125643.14
18	16016	CARRILLO PUERTO, A. O.	281871.39	2203694.71
19	16017	CASA BLANCA, PURUANDIRO	238872.52	2246727.47
20	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	335746.60	2179103.10
21	16022	COINTZIO, MORELIA	263963.91	2168847.38
22	16023	COPANDARO DE GALEANA,	226038.42	2208155.65
23	16027	CUITZEO, CUITZEO	257535.67	2209528.13
24	16028	CUITZILLO GRANDE,	278172.60	2187108.72
25	16045	EL TEMASCAL, CHARO	286796.84	2177787.42
26	16049	ETUCUARO, MADERO (SMN)	281171.38	2146495.60
27	16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	238219.16	2202427.00
28	16052	HUINGO, ZINAPECUARO	308060.28	2203372.55
29	16055	JESUS DEL MONTE, MORELIA	278034.59	2176037.69
30	16057	JIMENEZ, VILLA JIMENEZ	212078.59	2206533.03
31	16080	MORELIA, MORELIA (SMN)	271067.16	2179828.01
32	16081	MORELIA, MORELIA (DGE)	271101.21	2179822.33
33	16084	PANINDICUARO,	210423.80	2212110.81
34	16086	PASTOR ORTIZ, PURUANDIRO	228412.63	2246889.06
35	16087	PATZCUARO, PATZCUARO	225371.49	2162007.65
36	16092	PSA. AGOSTITLAN, CD. H.	330369.77	2162560.65
37	16096	PSA. MALPAIS, QUERENDARO	302608.24	2185009.04
38	16097	PSA. PUCUATO, CD. HIDALGO	321705.99	2171880.90
39	16098	PSA. SABANETA, CD. HIDALGO	323435.40	2170029.97



40	16100	PUENTE SAN ISIDRO,	234621.53	2196970.78
41	16104	PURUANDIRO, PURUANDIRO	236755.29	2222760.64
42	16105	QUIRIO, INDAPARAPEO	292202.71	2190629.68
43	16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	270584.11	2139227.98
44	16114	S. MIGUEL DEL MONTE, MOR.	276228.92	2170512.84
45	16117	SANTA FE DEL RIO,	209068.52	2236159.86
46	16118	SANTA FE, QUIROGA	232596.74	2178506.73
47	16119	STA. RITA, COPANDARO DE G.	266175.38	2203907.56
48	16120	SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA	258716.93	2168906.15
49	16123	TACAMBARO, TACAMBARO	240645.69	2128555.47
50	16133	TURICATO, TURICATO	246422.53	2165389.96
51	16135	TUZANTLA, TUZANTLA (SMN)	333517.61	2125611.91
52	16136	TZITZIO, TZITZIO	298906.55	2166575.64
53	16139	VILLA MADERO, MADERO	261910.77	2146727.19
54	16140	VILLA MADERO, MADERO	261922.12	2146715.84
55	16142	ZACAPU, ZACAPU (DGE)	208384.94	2193669.38
56	16145	ZINAPECUARO, ZINAPECUARO	325451.67	2199495.75
57	16146	ZIRAHUEN, VILLA ESCALANTE	211241.70	2154849.60
58	16152	CD. HIDALGO, CD. HIDALGO	335746.60	2179114.44
59	16155	COPANDARO, JIMENEZ	281894.26	2205550.99
60	16159	EL ROSARIO, ANGAMACUTIRO	217655.34	2226746.73
61	16171	ZACAPU, ZACAPU (SMN)	208362.25	2193680.73
62	16188	TIRINDARO, ZACAPU	213525.49	2188046.01
63	16225	VILLA JIMENEZ, V. JIMENEZ	212059.76	2204687.17
64	16234	GALEANA, PURUANDIRO	231439.07	2217314.41
65	16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	318247.48	2175588.51
66	16250	HUANDACARO, CUITZEO	262534.89	2192882.33
67	16254	TEREMENDO, MORELIA	241521.91	2189456.51
68	16255	UCAREO, MORELIA	323724.27	2201358.02

7.2.2 SELECCIÓN DE ESTACIONES PRINCIPALES

Una vez localizadas las estaciones climatológicas, se establecieron los criterios de selección (un primer filtro) de estaciones:

- Cercanía a la zona de estudio.
- Porcentaje de vacíos en la serie.
- Intervalo de tiempo operando.
- Número de datos.



Estos criterios están enfocados a la selección de estaciones que cuenten con información actual, fiable y suficiente. De esta forma se obtuvieron inicialmente 68 estaciones, de las cuales únicamente 37 cuentan con información confiable. A este grupo de estaciones, se les denominará estaciones principales y secundarias, clasificadas en función de las características de cada estación. En la Tabla 2 se muestra el listado y características de las estaciones seleccionadas.

Tabla 2. Características de las estaciones seleccionadas.

Nº	ID ESTACION	NOMBRE	DISTANCIA AL CENTROIDE	%VACIOS	INTERVALO OPERANDO	NÚMERO DE DATOS	TIPO
1	11002	ACAMBARO, ACAMBARO	72640.63175	7.59	1937-2016	79	2
2	11010	CERANO, YURIRIA	51554.16084	5.56	1962-2016	54	2
3	11071	SANTA MARIA YURIRIA(DGE)	64867.91311	6.38	1939-2016	94	2
4	16001	ACUITZIO DEL CANJE	19048.89437	27.78	1961-2015	54	2
5	16016	CARRILLO PUERTO, A. O.	36011.22505	11.11	1969-2014	45	2
6	16022	COINTZIO, MORELIA	5680.617224	9.09	1940-2006	66	2
7	16027	CUITZEO, CUITZEO	35772.09565	10.87	1923-2015	92	1
8	16028	CUITZILLO GRANDE,	21198.81767	5.26	1969-2007	38	2
9	16045	EL TEMASCAL, CHARO	25553.33746	2.04	1965-2014	49	2
10	16049	ETUCUARO, MADERO (SMN)	33781.67152	6.82	1944-1988	44	2
11	16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	36777.6209	1.52	1948-2014	66	2
12	16052	HUINGO, ZINAPECUARO	55037.48189	2.70	1941-2015	74	2
13	16055	JESUS DEL MONTE, MORELIA	16633.60965	5.00	1935-2015	80	1
14	16080	MORELIA, MORELIA (SMN)	11188.57634	6.90	1986-2015	29	2
15	16081	MORELIA, MORELIA (DGE)	11214.65553	1.47	1947-2015	68	1
16	16084	PANINDICUARO,	63762.91704	20.29	1946-2015	69	2
17	16087	PATZCUARO, PATZCUARO	38087.77652	13.04	1969-2015	46	2
18	16096	PSA. MALPAIS, QUERENDARO	42534.32194	16.90	1944-2015	71	2
19	16097	PSA. PUCUATO, CD. HIDALGO	60213.77542	10.77	1950-2015	65	2
20	16098	PSA. SABANETA, CD. HIDALGO	62032.46271	4.76	1952-2015	63	2
21	16100	PUENTE SAN ISIDRO,	35392.02798	2.17	1947-1993	46	2
22	16105	QUIRIO, INDAPARAPEO	34901.48533	5.77	1963-2015	52	2
23	16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	35912.02796	3.23	1922-2015	93	1
24	16114	S. MIGUEL DEL MONTE, MOR.	15103.37572	23.08	1963-2015	52	2
25	16118	SANTA FE, QUIROGA	29284.10607	9.80	1963-2014	51	2
26	16120	SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA	5800.56177	3.70	1953-2007	54	2
27	16123	TACAMBARO, TACAMBARO	49994.5622	4.49	1922-2011	89	2



28	16133	TURICATO, TURICATO	17377.61442	2.17	1969-2015	46	2
29	16136	TZITZIO, TZITZIO	38103.9969	13.04	1969-2015	46	2
30	16139	VILLA MADERO, MADERO	27255.08669	2.44	1943-1984	41	2
31	16145	ZINAPECUARO, ZINAPECUARO	68827.36927	11.96	1923-2015	92	2
32	16146	ZIRAHUEN, VILLA ESCALANTE	53802.87564	14.71	1947-2015	68	2
33	16155	COPANDARO, JIMENEZ	37569.99697	17.07	1969-2010	41	2
34	16159	EL ROSARIO, ANGAMACUTIRO	68623.97944	4.65	1972-2015	43	2
35	16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	56741.49492	8.57	1980-2015	35	2
36	16250	HUANDACARO, CUITZEO	18929.48832	18.75	1982-2014	32	2
37	16254	TEREMENDO, MORELIA	25294.47233	3.03	1982-2015	33	2

7.2.3 SELECCIÓN DE ESTACIONES

A las 37 estaciones seleccionadas, se les aplicaron pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia para clasificar las estaciones en principales y secundarias. Estas pruebas permiten garantizar que la información de las estaciones sea confiable y de calidad, y consecuentemente que la etapa de modelación esté respaldada por información fiable. Las pruebas que se aplicaron son las siguientes:

-Pruebas de homogeneidad

- T-Student (Campos Aranda, 1998).
- Cramer (Campos-Aranda, 1992).
- Bartlett (World Meteorological Organization, 1988).

-Pruebas de tendencia

- Pendiente de Regresión (Ostle & Mensing, 1975).
- Spearman (World Meteorological Organization, 1988).
- Mann Kendall (Kottegoda, 1980).

-Pruebas de independencia

- Límites de Anderson (Anderson & Darling, 1954).
- Wald-Wolfrashausen (Wald, 1947).



Una vez realizadas las pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia, de las 37 estaciones meteorológicas que dieron como resultado del primer filtro denominadas estaciones principales y secundarias, solo 12 estaciones cumplieron con las pruebas realizadas, al ser sus resultados los óptimos para la investigación, las cuales se enlistan en la Tabla 3 y se pueden visualizar espacialmente en la Figura 13.

Tabla 3. Resultados de pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia aplicadas a las series de precipitación.

ESTACIÓN	NOMBRE	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regresión	Spearman	Mann Kendall	L. Anderson	Wald-wolfowitz
11010	CERANO, YURIRIA	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
11071	SANTA MARIA YURIRIA	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16052	HUINGO, ZINAPECUARO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
16081	MORELIA, MORELIA	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16087	PATZCUARO, PATZCUARO	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
16123	TACAMBARO, TACAMBARO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16133	TURICATO, TURICATO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16159	EL ROSARIO, ANGAMACUTIRO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16254	TEREMENDO, MORELIA	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente

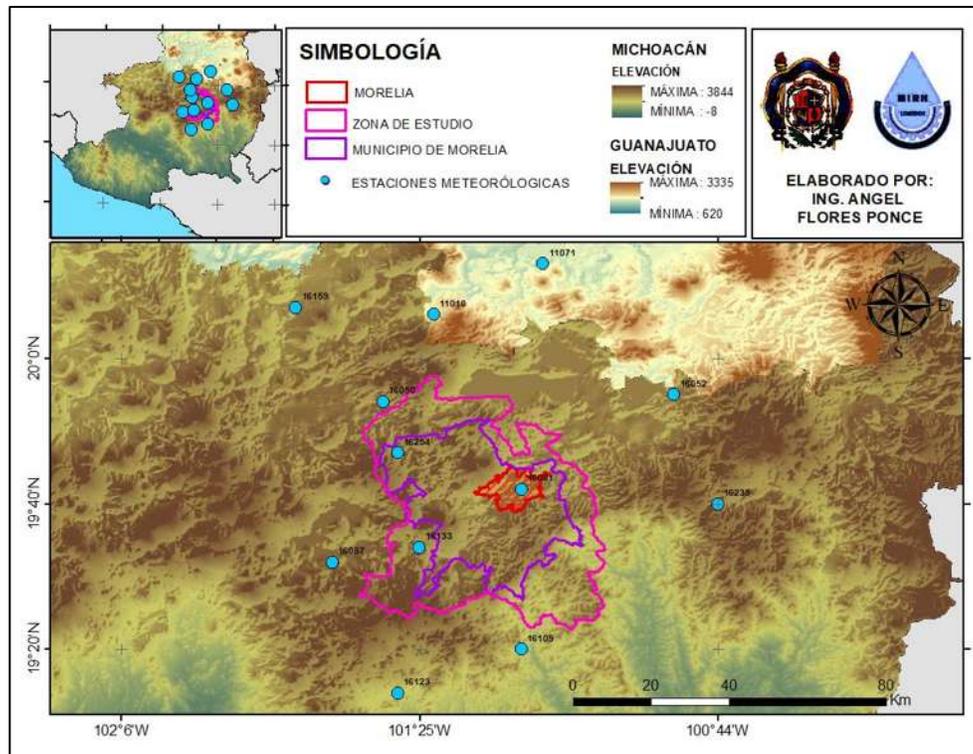


Figura 13. Localización espacial de las estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio.

7.2.4 ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES DE LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN.

Después de obtener los resultados de las pruebas se hizo la selección de las estaciones que cumplieron con los parámetros, así como con los criterios de evaluación. Posteriormente, las series seleccionadas fueron sometidas al proceso de estimación de datos faltantes.

El llenado de datos faltantes se realiza a través de la implementación de métodos estadísticos que sean razonables de acuerdo con las características de la información disponible.

El método más utilizado para hacer este llenado es mediante la determinación de la correlación espacial existente entre las estaciones. Estos valores de correlación se presentan mediante una matriz, la cual se denomina matriz de correlación espacial.



A través de ella es posible identificar las estaciones que presentan un valor de correlación alto mayor de 0.80 (Aparicio, 1992).

El llenado de datos faltantes para las 12 estaciones fue mediante el método del Inverso de la Distancia Euclidiana al Cuadrado (IDW) (Watson & Philip, 1985), en el cual se comienza con valores conocidos y se estiman los puntos desconocidos mediante interpolación asumiendo que los valores más cercanos están más relacionados que otros con su función.

7.3 INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.

Dentro de la zona de estudio se encuentran dos estaciones hidrométricas. La primera estación con clave 12224 “Río Chiquito” y la segunda estación con clave 12347 “Santiago Undameo”. Además, se encuentra la estación 12314 “Queréndaro” en la zona circundante.

La información de las series de caudales de las estaciones hidrométricas fueron extraídas del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS 2016).

En la Tabla 4 se presenta las estaciones hidrométricas seleccionadas, así como sus coordenadas y su descripción, y en la Figura 14 se puede visualizar su distribución espacial.

Tabla 4. Estaciones hidrométricas por la zona de estudio.

CLAVE	NOMBRE	COORDENADAS		DESCRIPCIÓN
		LATITUD	LONGITUD	
12224	RÍO CHIQUITO	19.695833	-101.190277	Sobre corriente del río chiquito
12347	SANTIAGO UNDAMEO	19.601388	-101.288055	Sobre corriente del río grande Morelia
12314	QUERÉNDARO	19.811666	-100.889444	Sobre corriente del río Queréndaro

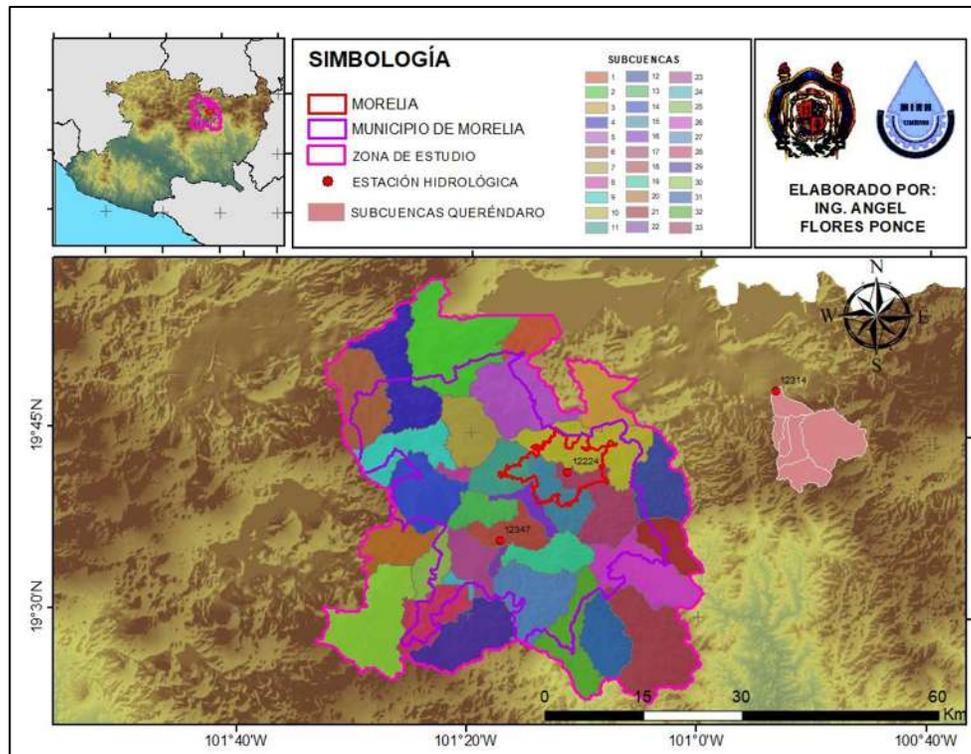


Figura 14. Ubicación espacial de las estaciones hidrométricas.

7.4 SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO

A través de la plataforma del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC,2018), se obtiene la información de cambio climático tanto para precipitación como para temperatura para las trayectoria de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés) de 4.5 y 8.5, etiquetados a partir de un posible rango de valores de forzamiento radiactivo en el año 2100 (4.5 y 8.5 W/m^2 , respectivamente) para periodos de corto (2015-2039), mediano (2045-2069) y largo plazo (2075-2099) utilizando los datos de los Modelos de Clima Global de los países de:

- Francia.
- Estados Unidos.
- Reino Unido.



□ Alemania.

En las Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8 se muestran los modelos utilizados, institución, país de procedencia, escenarios, periodos y variables utilizadas.

Tabla 5. Datos de modelación de cambio climático de Francia.

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
CNRMC-M5	Centre National de Recherches Meteorologiques	Francia	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato

Tabla 6. Datos de modelación de cambio climático de Estados Unidos.

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato



Tabla 7. Datos de modelación de cambio climático de Reino Unido.

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
HADGEM2-ES	Met Office Hadley Center	Reino Unido	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato

Tabla 8. Datos de modelación de cambio climático de Alemania.

MCG	INSTITUCIÓN	PAIS	RCP	PERIODO	VARIABLE CLIMÁTICA	VALOR
MPI-ESM-LR	Max Plank Institute for Meteorology	Alemania	RCP 4.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
			RCP 8.5	2015-2039	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2045-2069	Precipitación (mm)	No Dato
					Temperatura media (°C)	Dato
				2075-2099	Precipitación (mm)	Dato
					Temperatura media (°C)	Dato



La obtención de las series de cambio climático se realizó con los Modelos de Clima Global (MCG) de estos países, debido a que México no tiene su propio modelo, por lo que se procede a la descarga de los cuatro modelos aplicados por el INECC para posteriormente realizar una mediana estadística y generar valores para México.

Para este proceso se tuvieron que analizar un total de 3456 pixeles con una resolución de 50 km de información para los cuatro modelos, para poder generar una mediana estadística de los mismos y aplicarlo en México.

La decisión de utilizar la mediana estadística de los cuatro modelos se debe a que la mayoría de los modelos tienen valores similares, y solo en algunos pixeles de información registran ligeras variaciones, por lo que se creyó conveniente obtener un valor que considere los cuatro.

Esta información se obtuvo de los mapas de precipitación (Figura 15) y de temperatura (Figura 16) con el sistema operativo de ArcMap. Posteriormente se aplicaron a los datos históricos de precipitación y temperatura.

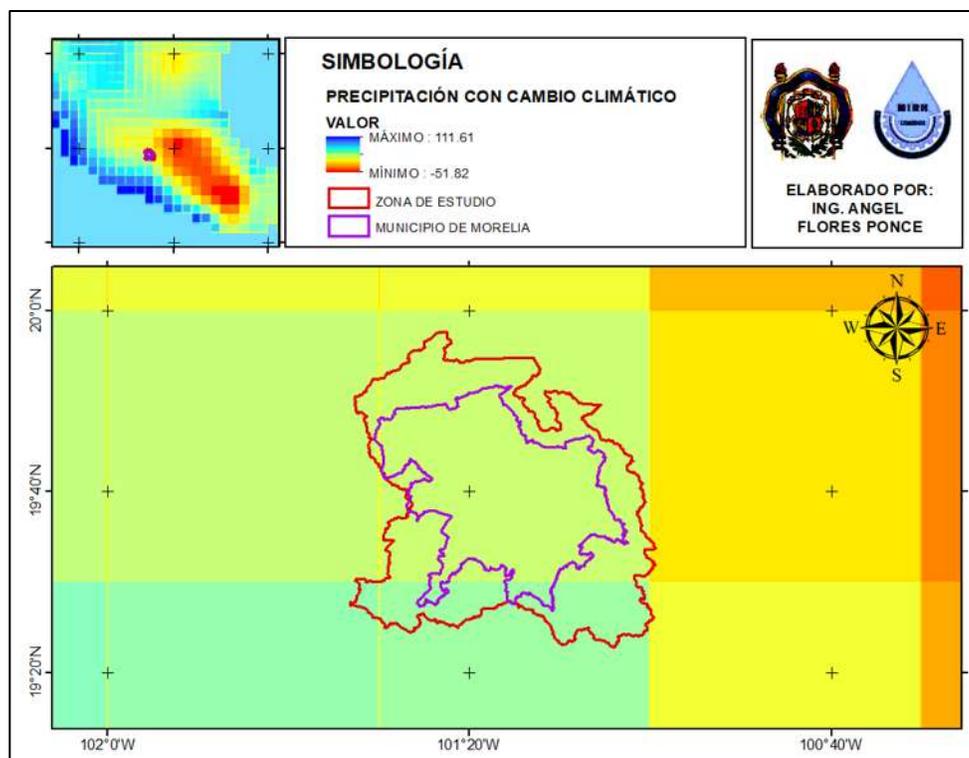


Figura 15. Mapa de deltas de precipitación para cambio climático.

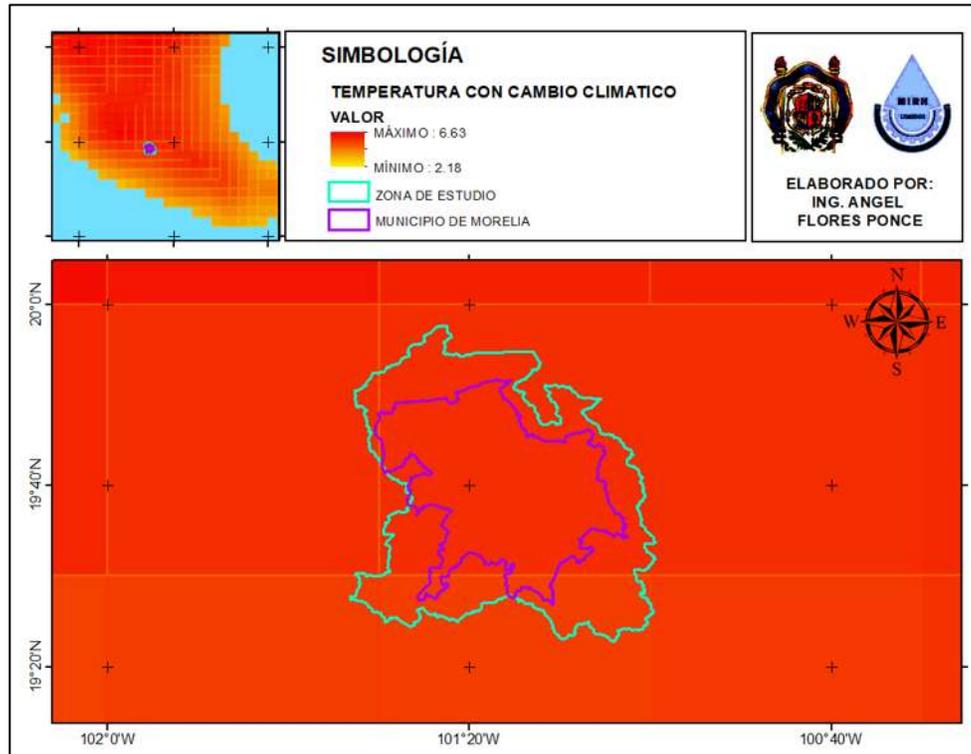


Figura 16. Mapa de deltas de temperatura para cambio climático.

La obtención de las variantes en el clima conocidas como deltas para cada estación se realizó mediante la interpolación espacial de las estaciones correspondiente a cada mes de precipitación y de temperatura de cada periodo de tiempo como se puede ver en las Figura 17 y Figura 18.

Con los diferentes Escenarios RCP y los diferentes periodos, se hace una comparativa gráfica con respecto de los valores históricos, para poder apreciar los periodos de cambio posibles para la región (Figura 19, Figura 20, Figura 21 y Figura 22).

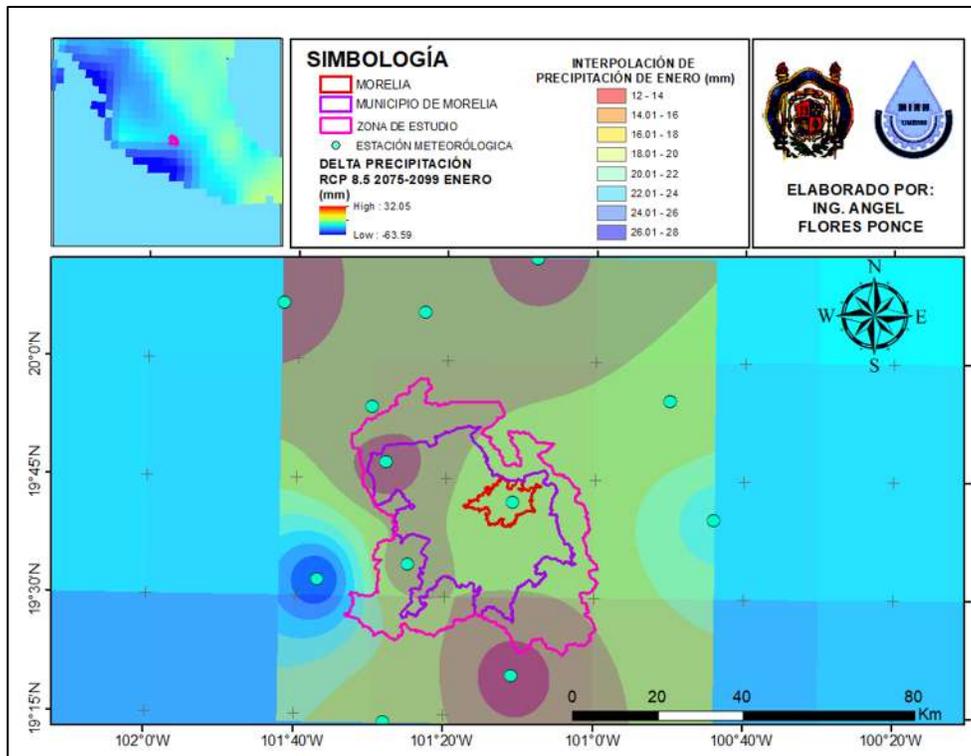


Figura 17. Deltas de precipitación para cada estación mediante interpolación.

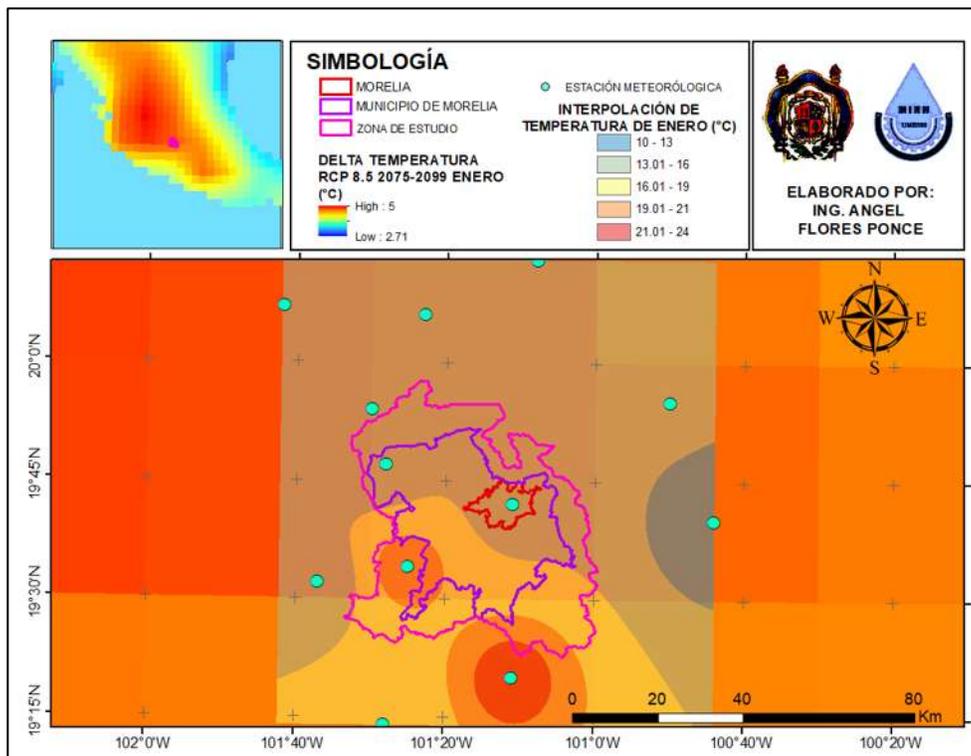


Figura 18. Deltas de temperatura para cada estación mediante interpolación.

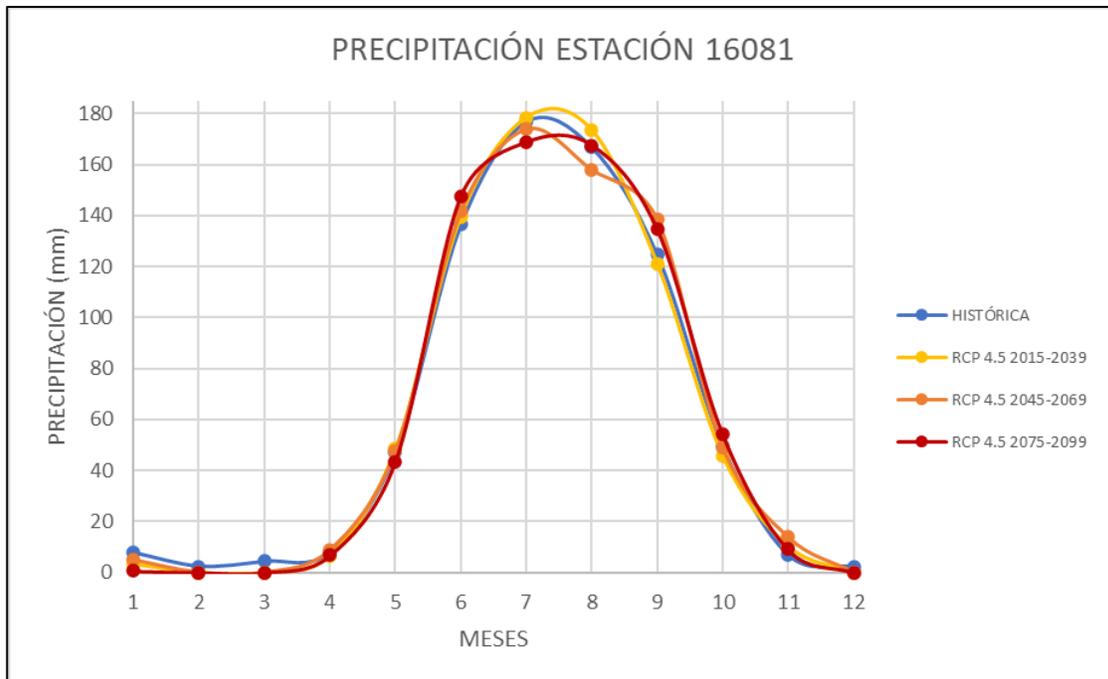


Figura 19. Comparación de la precipitación de un escenario RCP 4.5 a diferentes periodos.

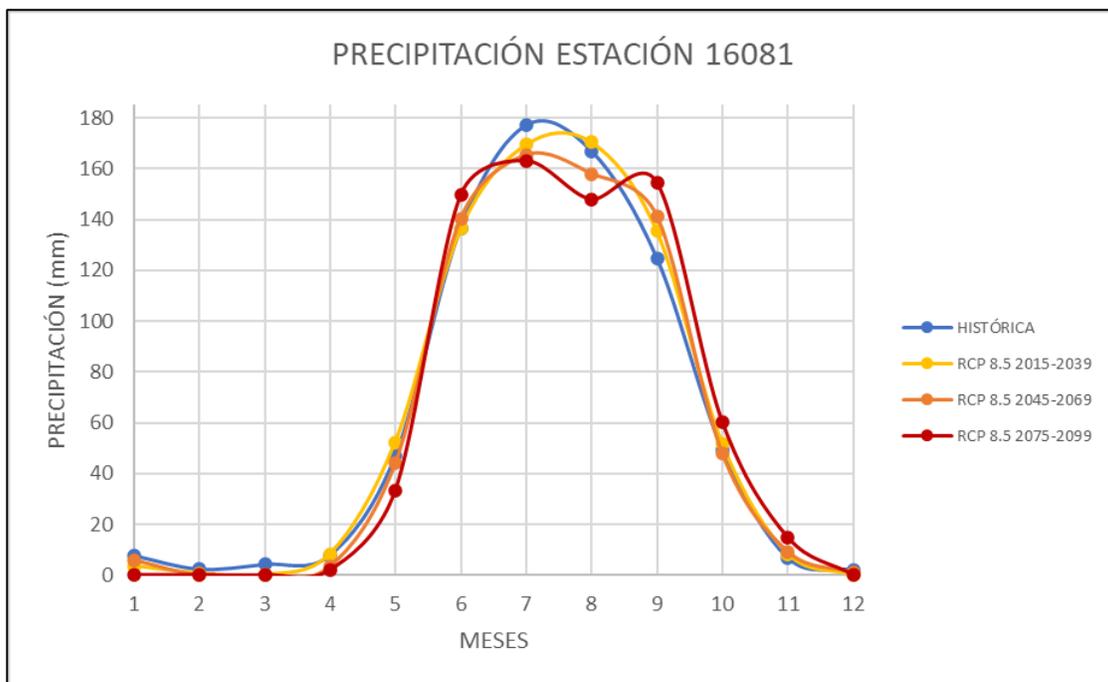


Figura 20. Comparación de la precipitación de un escenario RCP 8.5 a diferentes periodos.

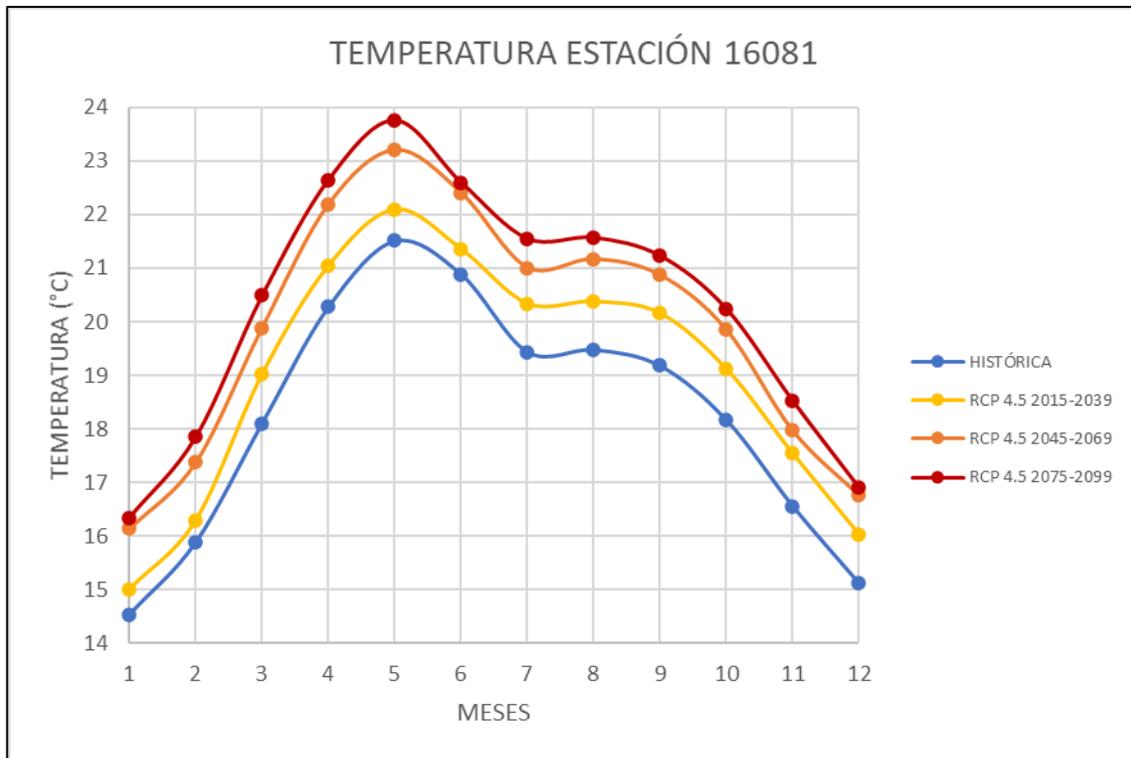


Figura 21. Comparación de la temperatura de un escenario RCP 4.5 a diferentes periodos.

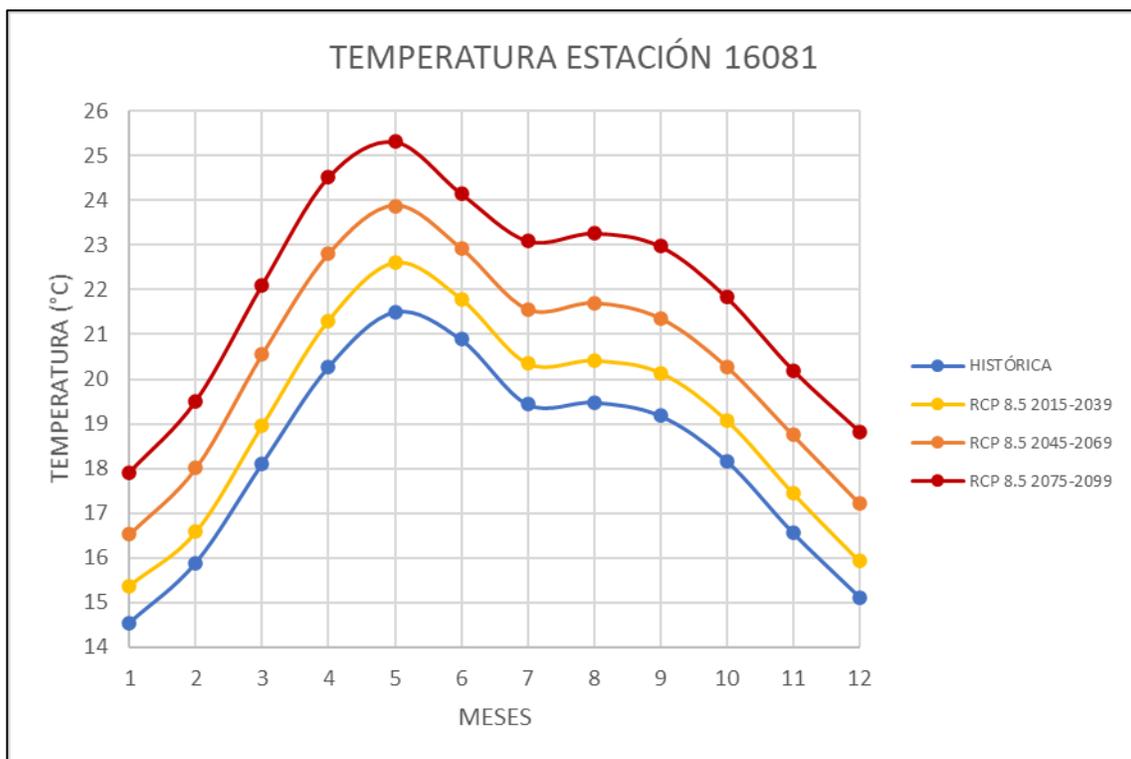


Figura 22. Comparación de la temperatura de un escenario RCP 8.5 a diferentes periodos.

De igual manera se realizó el análisis de píxeles con una resolución de 1 km, para los Modelos CNRMC-M5 Francia, GFDL-CM3 Estados Unidos y HADGEM2-ES Reino Unido, mismos que fueron elaborados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) por sus siglas en inglés, en el Proyecto Research on Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and México (2021), los cuales solo presentan la información de temperatura en escala media anual y precipitación anual futura con cambio climático para los periodos 2030, 2060 y 2090.

El análisis de esta información se realizó con la finalidad de comparar los resultados de la información proporcionada por el INECC y por el USDA debido a sus diferentes escalas de resolución de píxeles y de análisis de tiempo.

Posteriormente, se procedió a la descarga de información proporcionada por el USDA como se ve en la Figura 23 de los mapas con resolución a 1 km.

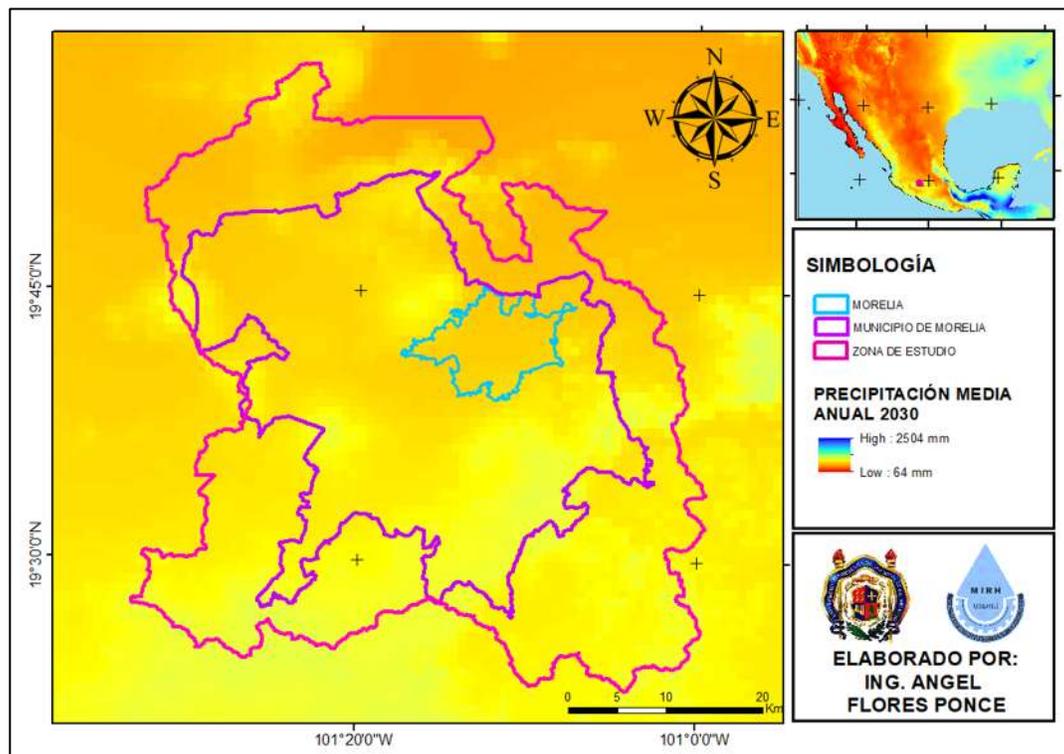


Figura 23. Mapa de precipitación media anual periodo 2030 para cambio climático por USDA.



Teniendo los resultados del INECC y el USDA, se realizó la comparativa de los diferentes escenarios empleados en las estaciones meteorológicas en estudio, obteniendo lo que se muestra en la Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

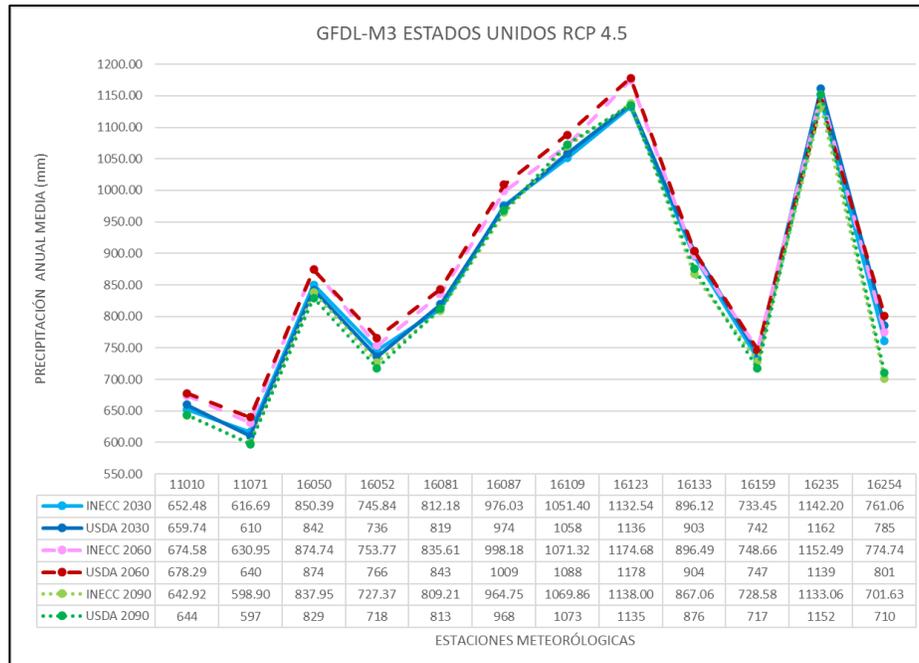


Figura 24. Comparación de modelo GFDL-M3 entre INECC y USDA Escenario RCP 4.5

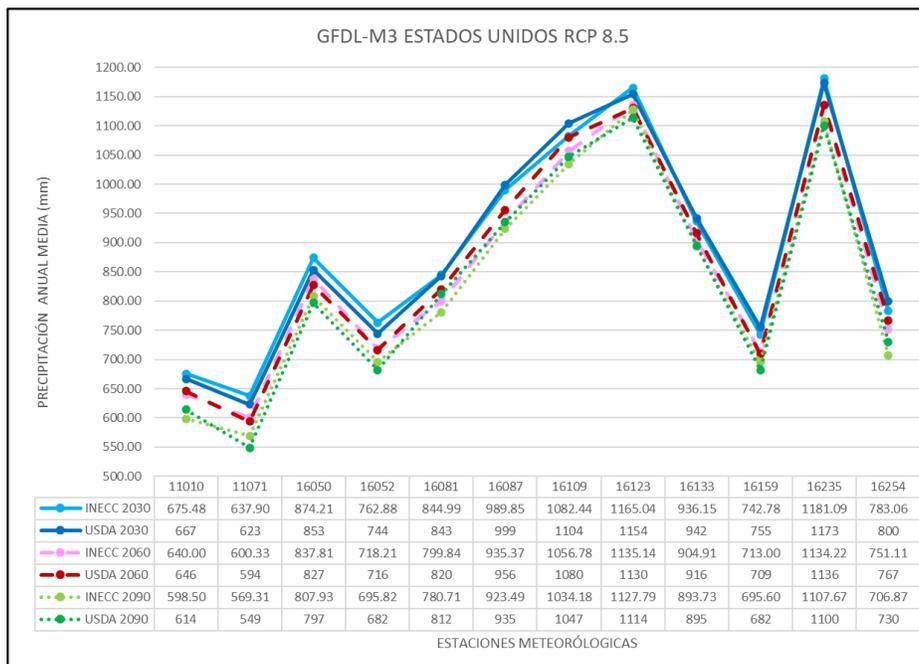


Figura 25. Comparación de modelo GFDL-M3 entre INECC y USDA Escenario RCP 8.5

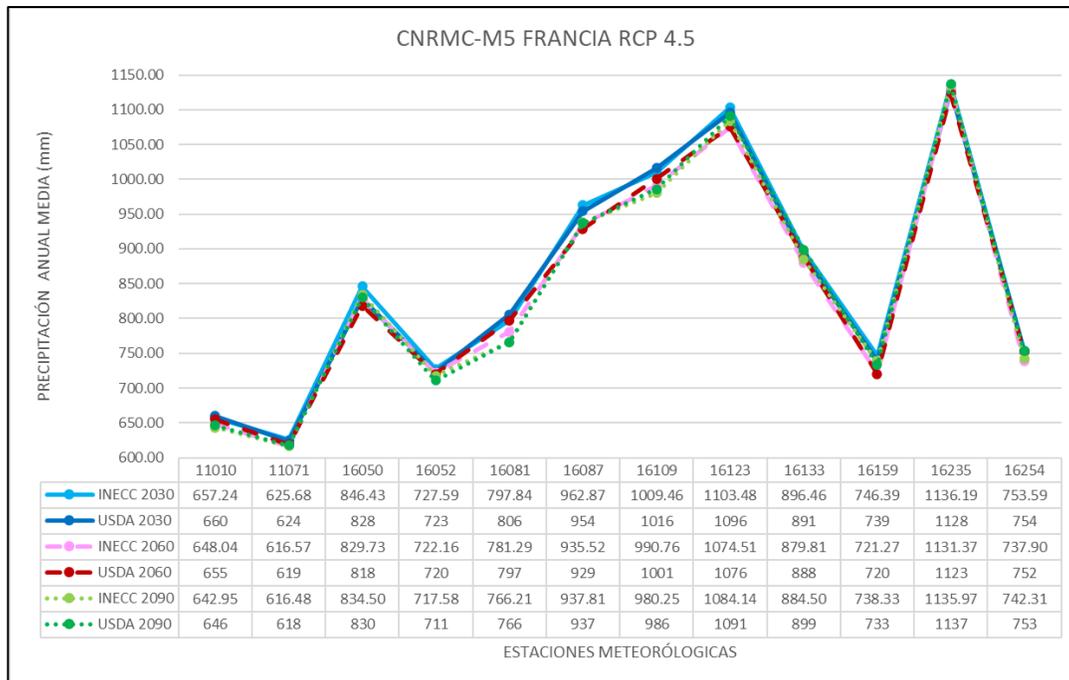


Figura 26. Comparación de modelo CNRMC-M5 entre INECC y USDA Escenario RCP 4.5

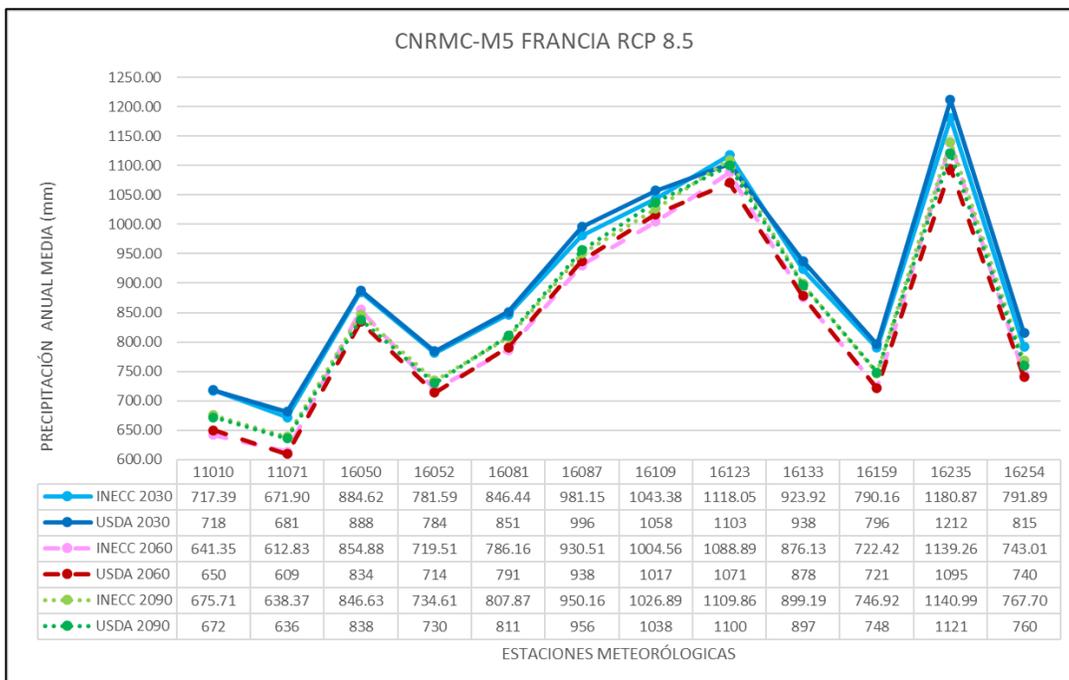


Figura 27. Comparación de modelo CNRMC-M5 entre INECC y USDA Escenario RCP 8.5

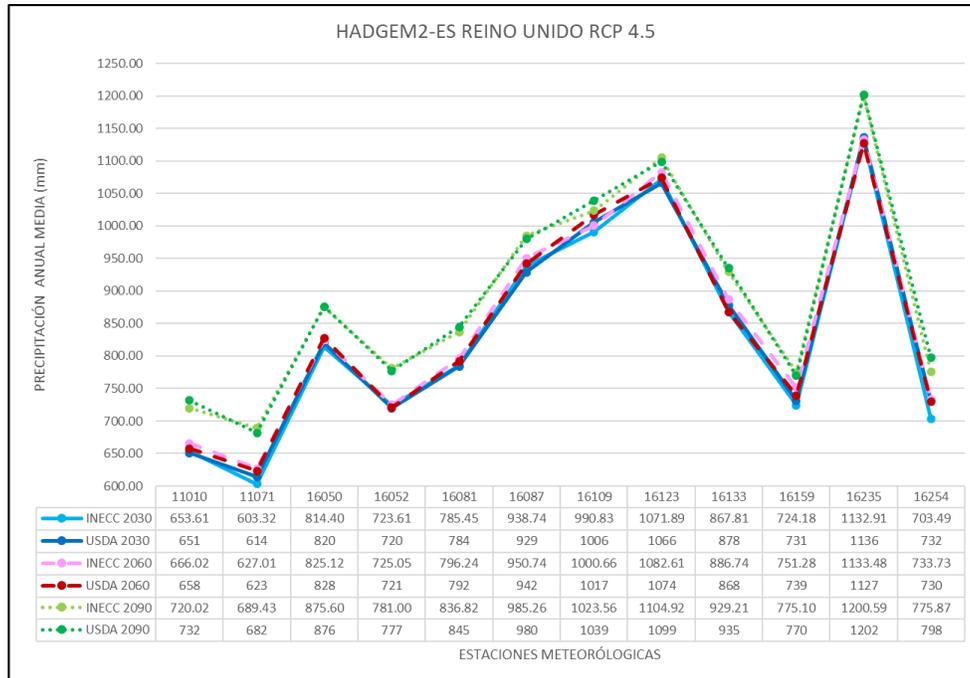


Figura 28. Comparación de modelo HADGEM2-ES entre INECC y USDA Escenario RCP 4.5

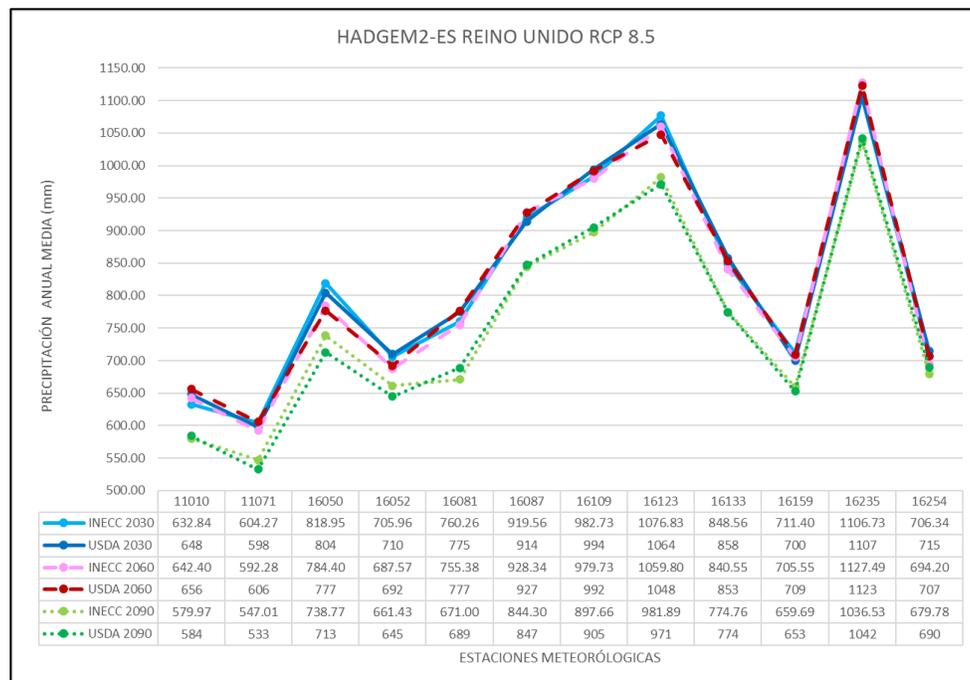


Figura 29. Comparación de modelo HADGEM2-ES entre INECC y USDA Escenario RCP 8.5



Al comparar ambos valores obtenidos se puede observar que presentan gran similitud entre sus valores, por lo que se puede considerar que la obtención de los deltas de cambio, mediante interpolaciones de las resoluciones de 50 km es muy parecida a los valores proporcionados por la resolución de 1km. En esta investigación fue necesario utilizar la información no solo a escala anual, sino de periodo mensual, por ello se procedió a utilizar la información proporcionada por el INECC.

7.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA.

El proceso que se realizó para la modelación de los escurrimientos en la cuenca de estudio fue mediante la implementación de herramientas informáticas desarrolladas por la Universidad Politécnica de Valencia, denominada EVALHID, misma que a su vez permite la aplicación del modelo matemático de Témez.

La herramienta informática EVALHID, es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que se producen en las mismas (Arquiola & Solera, 2017), haciendo una valoración general de la cuenca sin considerar la distribución espacial de las variables y de los parámetros que intervienen en los cálculos, valores que son sustituidos por valores medios, es por ello que dicho modelo se limita para cuencas pequeñas y de tamaño medio, en donde puede existir cierta homogeneidad en clima, edafología y geología (García-Romero, 2015).

Para realizar esta modelación se hace uso de las subcuencas mostradas en la Figura 3, así como de las estaciones hidrométricas para la obtención de caudales y las estaciones meteorológicas para las series de precipitación y evapotranspiración potencial.



7.6 ETAPA DE CALIBRACIÓN.

La calibración del modelo se realizó a través de un algoritmo de optimización de búsqueda local acoplado con un método de muestreo aleatorio. Se trata del algoritmo Hipercubo Latino Y Rosenbrock (García-Romero et al., 2019). Este algoritmo se encuentra en una aplicación informática compatible con el programa EVALHID que funciona como un calibrador automático.

7.6.1 INDICADORES DE AJUSTE.

Para obtener información fiable en los resultados, las simulaciones en relación con los datos observados de las estaciones hidrométricas, se utilizan cuatro índices de bondad de ajuste, mismos que vienen incluidos en el calibrador automático y se describen a continuación.

Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos medidos (Nash y Sutcliffe, 1970).

[14]

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - Y_{i\text{ sim}})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - \bar{Y}_{\text{ obs}})^2 \right]}$$

Tabla 9. Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriasi et al., 2007).

CALIDAD DE AJUSTE	NSE ó E
MUY BUENA	0.75 < NSE ≤ 1
BUENA	0.65 < NSE ≤ 0.75
SATISFACTORIA	0.50 < NSE ≤ 0.65
NO SATISFACTORIA	NSE ≤ 0.50



Nash-Sutcliffe modificado. Es la transformación logarítmica del flujo (ln NSE); este indicador da mayor peso a los caudales bajos. Mediante esta transformación logarítmica, los picos se disminuyen y los valores más bajos se mantienen. El índice ln NSE presenta mayor sensibilidad a las sobrevaloraciones y a las infravaloraciones del modelo (García-Romero, 2015).

[15]

$$\ln NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_{i\text{obs}}) - \ln(Y_{i\text{sim}}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_{i\text{obs}}) - \ln(\bar{Y}_{\text{obs}}))^2} \right]$$

Tabla 10. Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriasi et al., 2007).

CALIDAD DE AJUSTE	NSE
MUY BUENA	0.75 < NSE ≤ 1
BUENA	0.65 < NSE ≤ 0.75
SATISFACTORIA	0.50 < NSE ≤ 0.65
NO SATISFACTORIA	NSE ≤ 0.50

El coeficiente de Correlación de Pearson (r^2) mide la covariabilidad de los valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor de este coeficiente varía entre -1 y 1 . Cuando el coeficiente r^2 toma el valor de 1 se tiene una correlación completa positiva, es decir, todos los datos describen una línea recta con pendiente positiva (García-Romero, 2015).

[16]

$$r^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{\text{sim}}(t) - \bar{Q}_{\text{sim}})(Q_{\text{obs}}(t) - \bar{Q}_{\text{obs}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{\text{sim}}(t) - \bar{Q}_{\text{sim}})^2 \sum_{t=1}^n (Q_{\text{obs}}(t) - \bar{Q}_{\text{obs}})^2}}$$

Tabla 11. Rangos de ajuste para el Coeficiente de Correlación de Pearson.

CALIDAD DE AJUSTE	r^2
MUY BUENA	0.90 < r^2 ≤ 1
BUENA	0.75 < r^2 ≤ 0.89
SATISFACTORIA	0.50 < r^2 ≤ 0.74
NO SATISFACTORIA	r^2 ≤ 0.50

7.7 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN.

La calibración del modelo superficial se presentará para cada subcuenca a través de los siguientes apartados.

7.7.1 SUBCUENCA DE SANTIAGO UNDAMEO

Las subcuencas que tiene como punto de calibración la estación hidrométrica 12347, se denominaron grupo 1, las cuales tienen un área de influencia de 746.59 km² y se pueden observar en la Figura 30.

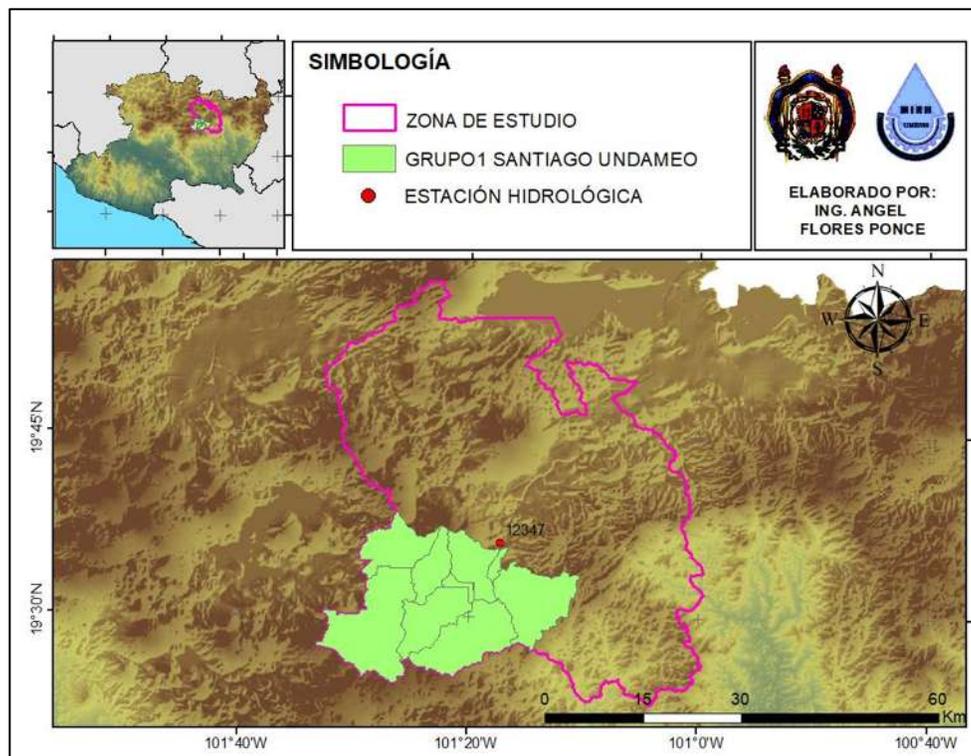


Figura 30. Subcuencas correspondientes a Santiago Undameo.

Los resultados obtenidos de la calibración se muestran en comparativa con los datos observados en las estaciones en la Figura 31, Figura 32 y Figura 33.

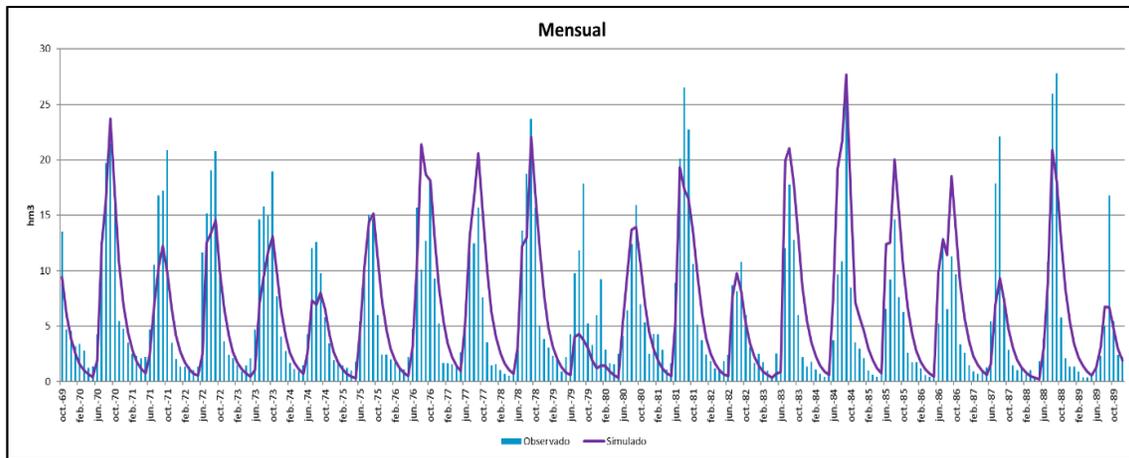


Figura 31. Resultados mensuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12347.

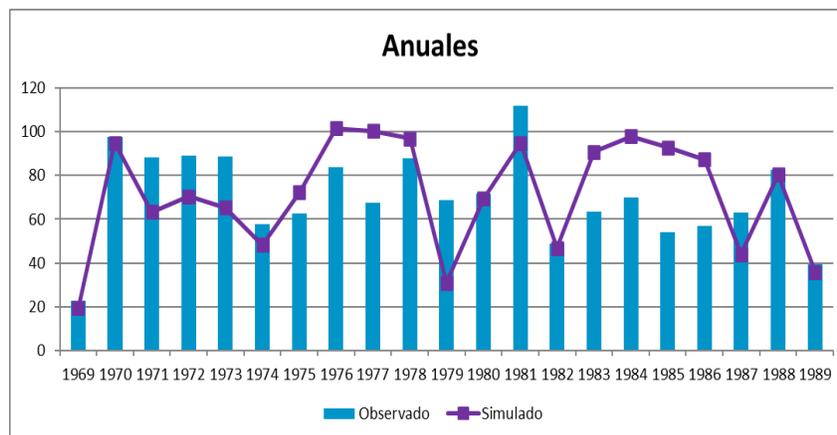


Figura 32. Resultados anuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12347.

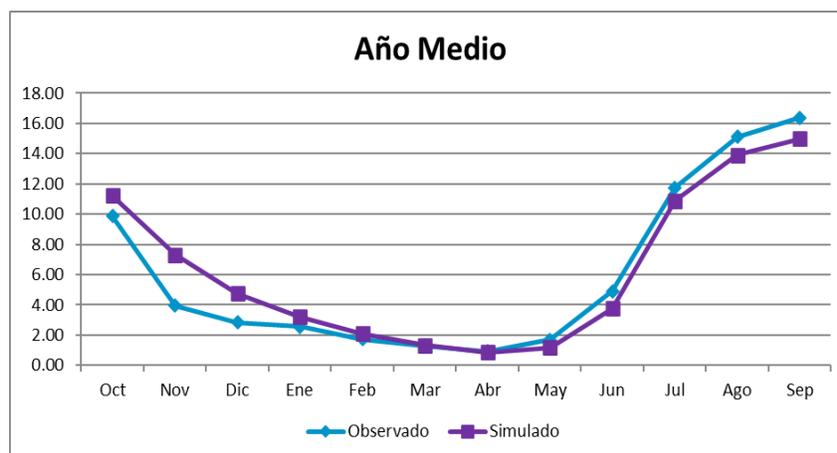


Figura 33. Resultados del año medio de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12347.

7.7.2 SUBCUENCA DE RÍO CHIQUITO

Esta zona de calibración se considera la subcuenca de río chiquito (Figura 34), la cual tiene como punto de calibración la estación hidrométrica 12224 y tienen un área de influencia de 85.55 km².

Esta estación no pudo ser calibrada de manera óptima, debido a que no se encuentra a régimen natural y no hay datos suficientes para realizar una restitución de los caudales (López, 1993) que permitan una calibración aceptable en la zona. Se decidió que la calibración de la estación 12314 se realizara por similitud hidrológica. Esta decisión está fundamentada en un análisis multivariado, donde se encontró por similitud hidrológica esta subcuenca tiene gran parecido con la subcuenca de Queréndaro, misma que se describe en el apartado siguiente.

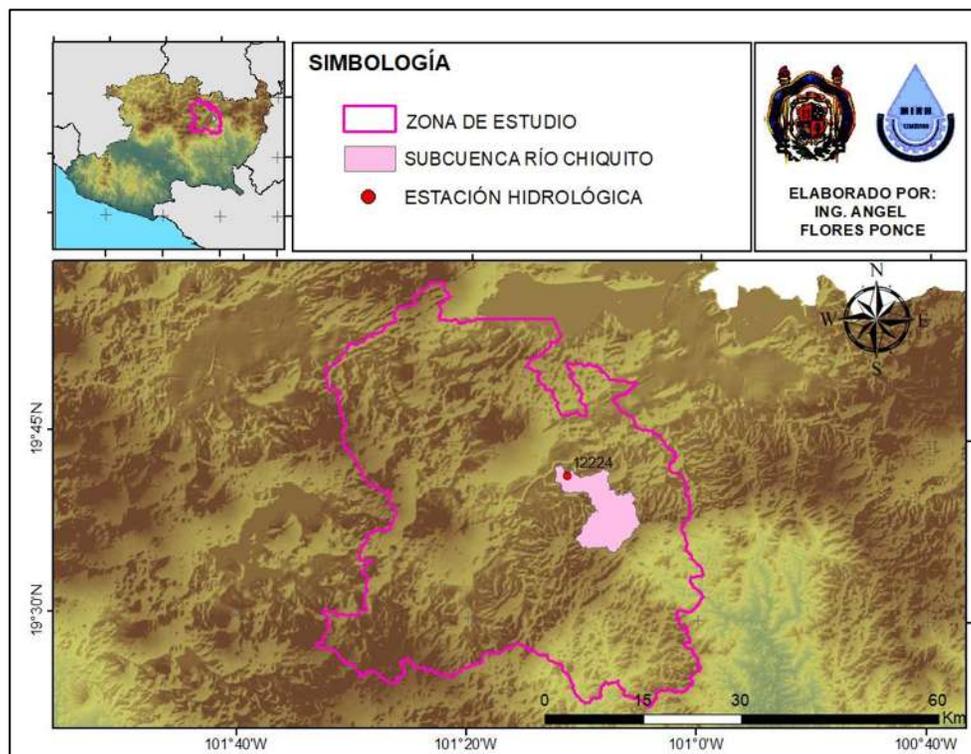


Figura 34. Subcuenca correspondiente a río chiquito.

7.7.3 SUBCUENCA DE QUERÉNDARO.

Esta zona de calibración se considera como el grupo 2, están consideradas las subcuencas que tiene como punto de calibración la estación hidrométrica 12314, que tienen una superficie de influencia de 136.95 km² (Figura 35).

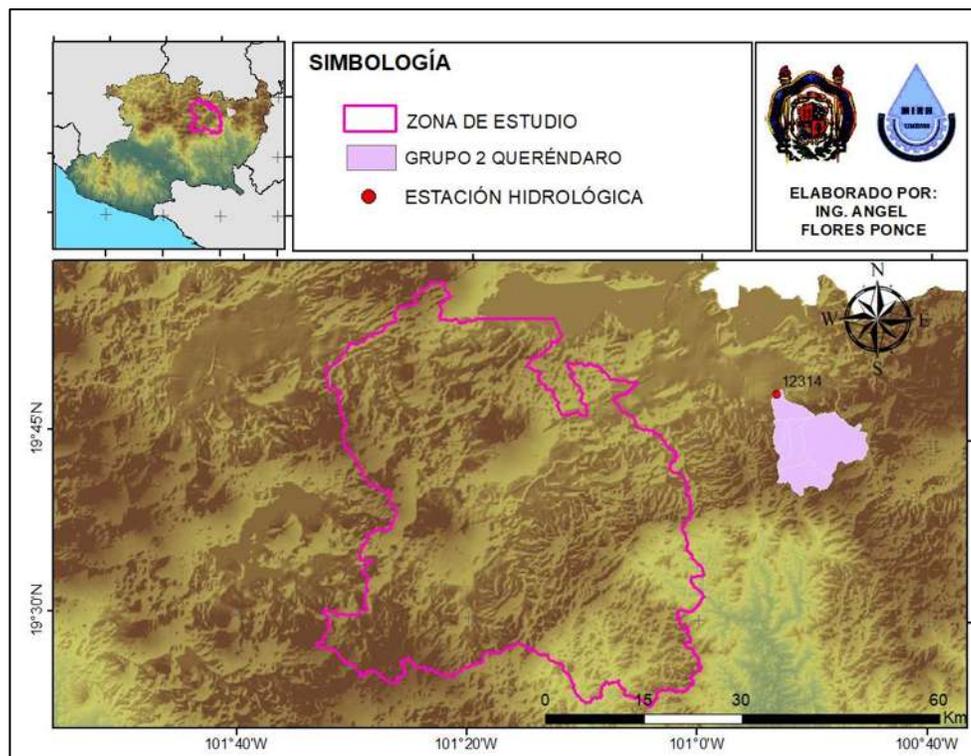


Figura 35. Subcuencas correspondientes a Queréndaro.

Los resultados obtenidos de la calibración se muestran en comparativa con los datos observados en las estaciones en la Figura 36, Figura 37 y Figura 38.

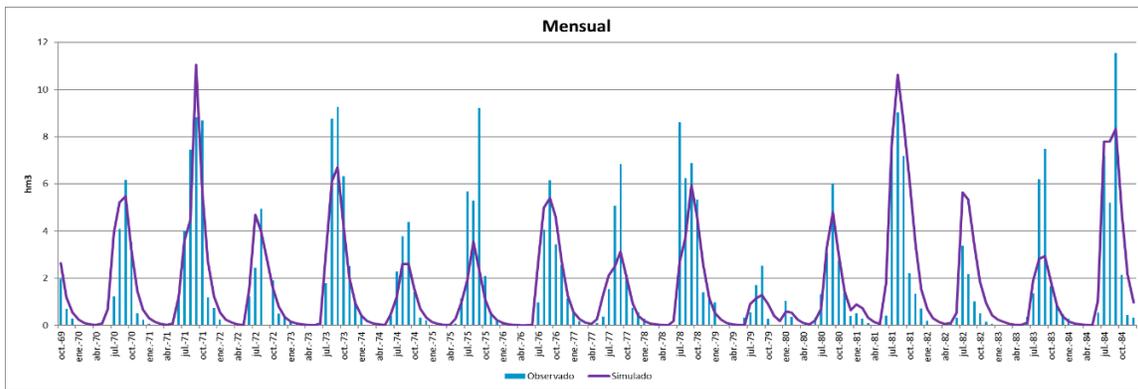


Figura 36. Resultados mensuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12314.

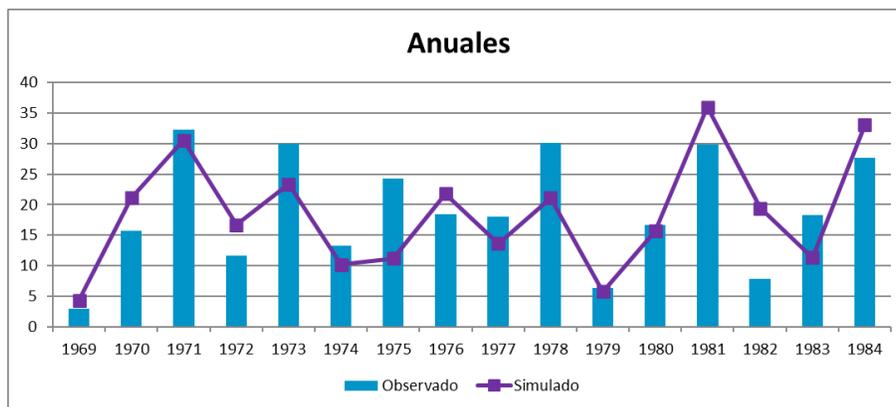


Figura 37. Resultados anuales de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12314.

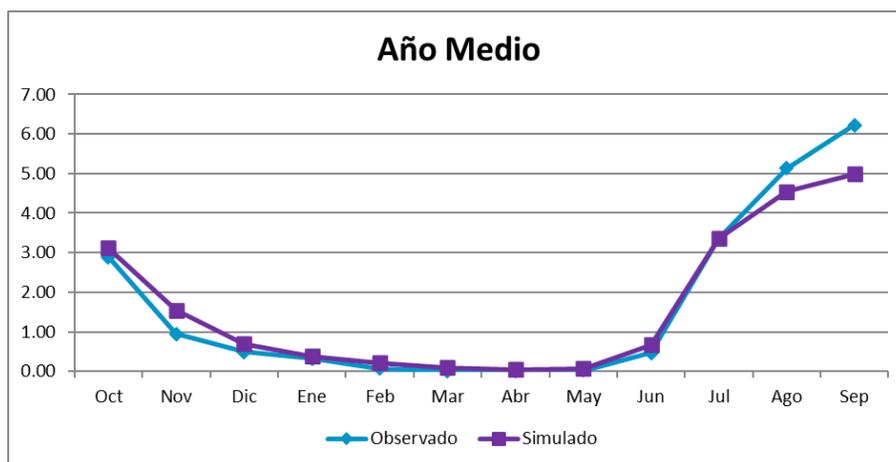


Figura 38. Resultados del año medio de la calibración de las subcuencas correspondientes a la estación 12314.



7.8 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Una vez realizada la calibración y la modelación de los caudales, se procede a comparar los resultados, así como comprobar la fiabilidad de estos y puedan considerarse satisfactorios, para con esto dar por validada la información obtenida.

La información se presenta en la Tabla 12 con los rangos y su calidad, así como la

Tabla 13 con el resumen de evaluación mediante los indicadores de ajuste que fueron descritos anteriormente para clasificar si fue satisfactoria la calibración.

Tabla 12. Rangos para evaluación de las calibraciones del modelo.

CALIDAD DE AJUSTE	NSE ó E	r ²	NSE	SIMETRÍA
MUY BUENA	0.75<NSE≤1	0.90<r ² ≤1	0.75<NSE≤1	0.90<r ² ≤1
BUENA	0.65<NSE≤0.75	0.75<r ² ≤0.89	0.65<NSE≤0.75	0.75<r ² ≤0.89
SATISFACTORIA	0.50<NSE≤0.65	0.50<r ² ≤0.74	0.50<NSE≤0.65	0.50<r ² ≤0.74
NO SATISFACTORIA	NSE≤0.50	r ² ≤0.50	NSE≤0.50	r ² ≤0.50

Tabla 13. Parámetros e indicadores de ajuste de las zonas modeladas.

SUBCUENCA	PARÁMETROS				INDICADORES			
	H _{máx}	C	l _{máx}	α	NASH-SUTCLIFFE	NASH-SUTCLIFFE MODIFICADO	COEFICIENTE DE PEARSON	SIMETRÍA
SANTIAGO UNDAMEO (GRUPO 1)	565.999	0.1	285.122	0.445	0.56	0.63	0.78	0.99
QUERÉNDARO (GRUPO 2)	359.081	0.1	297.066	0.799	0.71	0.59	0.84	0.99

De acuerdo con los resultados obtenidos y los valores resultantes de la aplicación de los índices de bondad de ajuste, se puede considerar que se obtuvieron

calibraciones satisfactorias, buenas y muy buenas, por lo que se da por buena la calibración del modelo.

Una vez definidos los parámetros efectivos de las subcuencas calibradas, por similitud hidrológica, se asignaron los parámetros a las subcuencas que carecen de la información mínima necesaria para ser calibradas. Esta asignación se realizó a través del análisis de las condiciones de uso de suelo, tipo de suelo, precipitación media y temperatura de las subcuencas calibradas, para ser comparadas con las condiciones de las subcuencas que no tienen parámetros efectivos establecidos. De esta comparativa, se definió a que grupo debía pertenecer cada una de estas subcuencas y poder asignarle el conjunto de parámetros efectivos correspondientes como se muestra en la Figura 39.

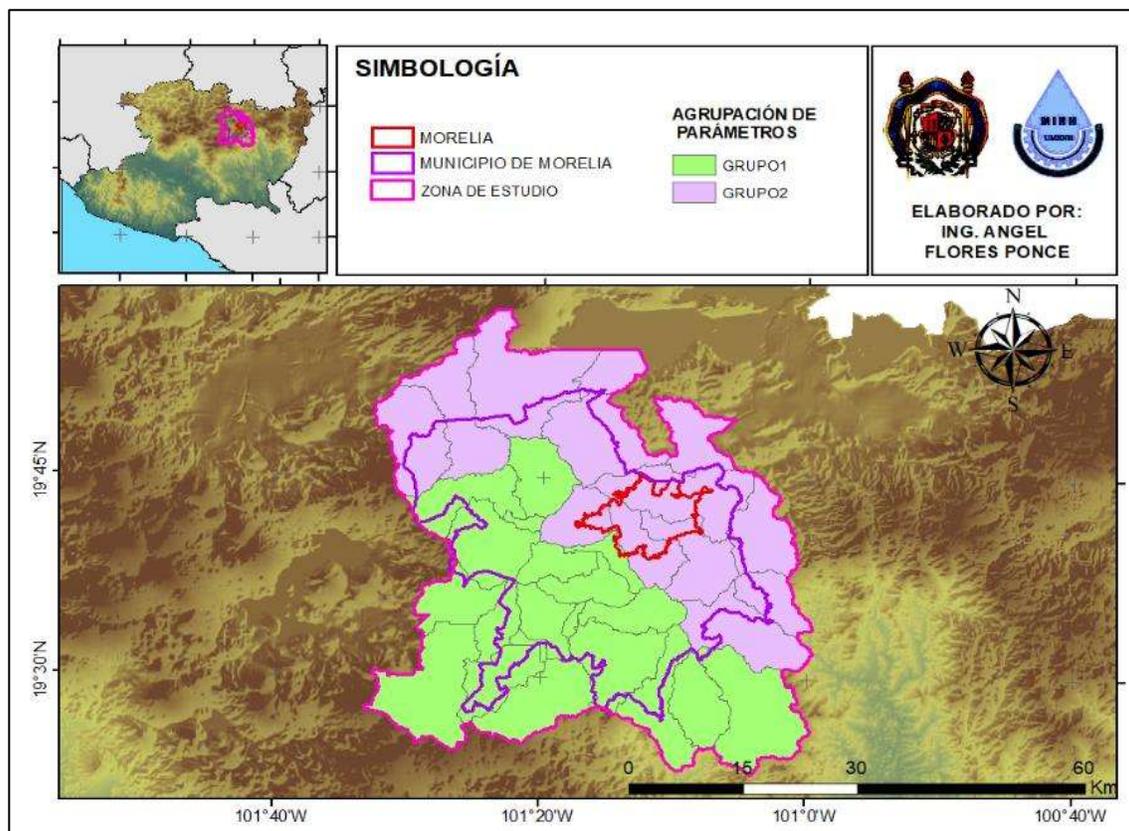


Figura 39. Asignación de parámetros a las subcuencas mediante similitud hidrológica en grupos.



7.9 MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON CAMBIO CLIMÁTICO.

Una vez obtenidos los valores de los parámetros efectivos del modelo lluvia-escurrencimiento (modelo calibrado), se procede al análisis de la disponibilidad hídrica en la cuenca bajo los probables efectos del cambio climático, sustituyendo las series de precipitación y evapotranspiración históricas por las series de precipitación y evapotranspiración con efectos del cambio climático en el modelo calibrado. De esta forma se obtienen los caudales en la cuenca considerando los efectos del cambio climático.

Al aplicar las series modificadas por cambio climático para los dos escenarios RCP y para los tres periodos de tiempo en comparativa con los históricos, se aprecia que se tienen disminución de caudales los cuales se muestran en la Tabla 14 y que en el escenario RCP 8.5 las disminuciones son mayores que en el 4.5.

Tabla 14. Disminuciones en porcentaje de caudal de acuerdo con los RCP y sus periodos.

DISMINUCIÓN SANTIAGO UNDAMEO			
Escenario RCP\PERIODO	2015-2039	2045-2069	2075-2099
RCP 4.5	3.65%	13.61%	18.28%
RCP 8.5	14.69%	24.89%	26.82%
DISMINUCIÓN QUERÉNDARO			
Escenario RCP\PERIODO	2015-2039	2045-2069	2075-2099
RCP 4.5	5.91%	13.92%	15.24%
RCP 8.5	6.91%	18.60%	20.19%

En la Figura 40 se muestran los resultados obtenidos para la modelación del escenario RCP 4.5 para la estación de Santiago Undameo mientras que en la Figura 41 se muestra su modelación para el escenario RCP 8.5, de igual manera se presentan en la Figura 42 los datos obtenidos para la modelación del escenario RCP



4.5 para la estación de Queréndaro y en la Figura 43 los resultados para el escenario RCP 8.5 de la misma estación.

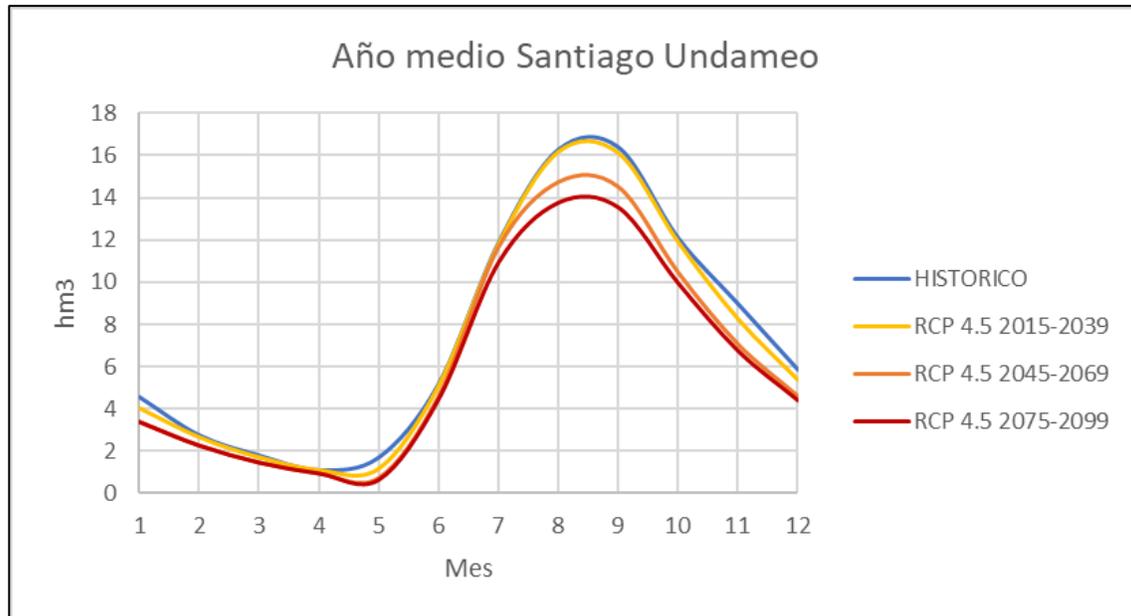


Figura 40. Comparativa del año medio con escenario RCP 4.5 en Santiago Undameo.

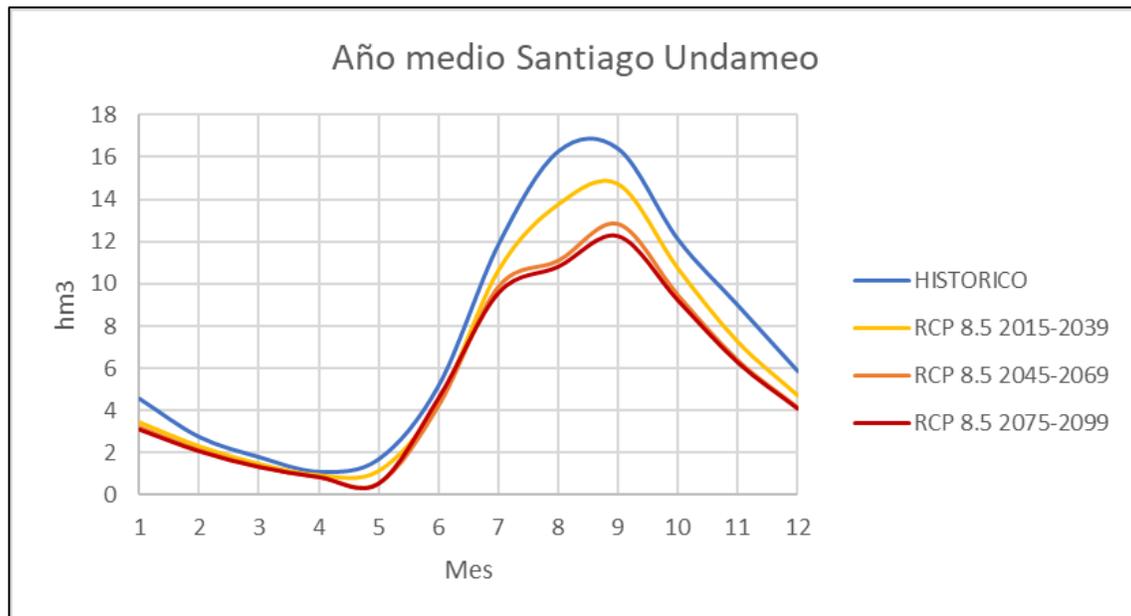


Figura 41. Comparativa del año medio con escenario RCP 8.5 en Santiago Undameo.

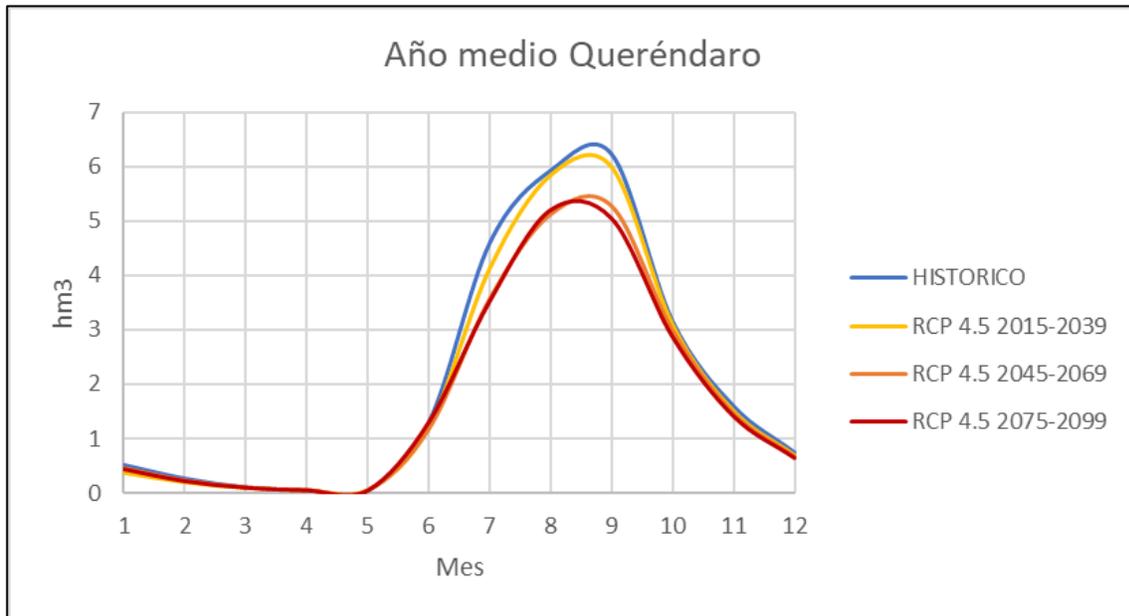


Figura 42. Comparativa del año medio con escenario RCP 4.5 en Queréndaro.

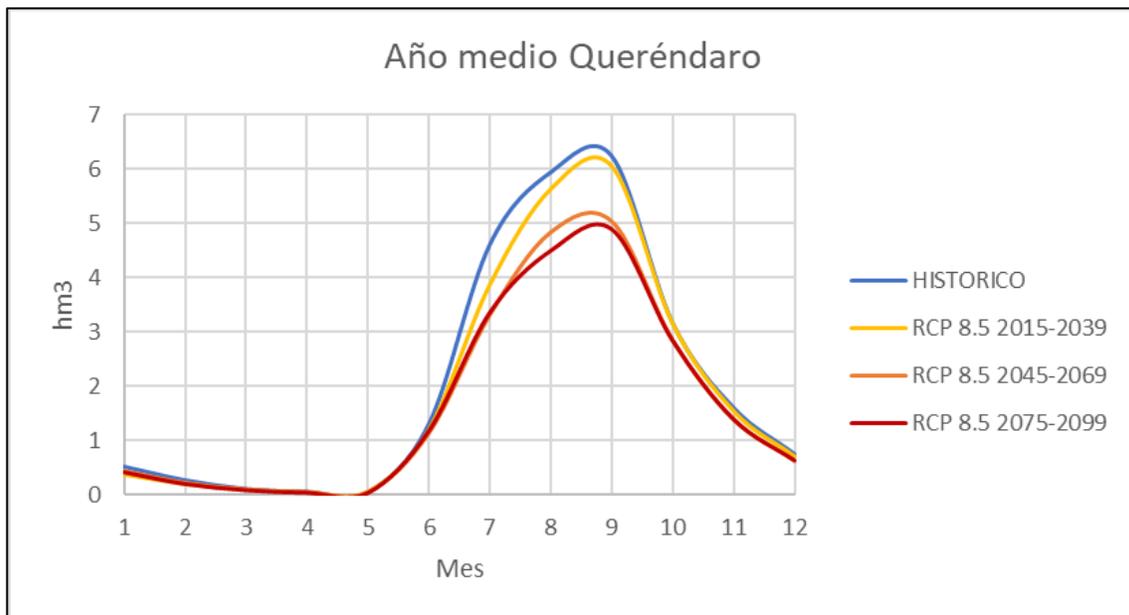


Figura 43. Comparativa del año medio con escenario RCP 8.5 en Queréndaro.



7.10 OBTENCIÓN DE SEQUÍA Y HUMEDAD METEOROLÓGICA.

7.10.1 APLICACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).

Para el cálculo de la abundancia y escasez meteorológica se hace uso del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el cual se aplica el SPI-12 en primera instancia para visualizar un año con sequía y un año con humedad, ya que es el que considera los doce meses del año, para posteriormente teniendo el año seco y el año húmedo hacer uso de los diferentes SPI 3,6,12 y 24 para ver cuál es el mejor para trabajar en la zona de estudio.

Para el criterio del SPI para sequía y humedad se consideran los siguientes rangos:

Tabla 15. Rangos del SPI para sequía y humedad.

2.0	≥	SPI		Extremadamente húmedos
1.5	≥	SPI	< 2.0	Muy húmedo
1.0	≥	SPI	< 1.5	Moderadamente húmedo
-1.0	≥	SPI	< 1.0	Normal
-1.5	>	SPI	≤ -1.0	Moderadamente seco
-2.0	>	SPI	≤ -1.5	Muy seco
	>	SPI	≤ -2.0	Extremadamente seco

Al aplicar el índice se obtienen las sequías y humedades que se muestran en la Tabla 16 por lo que se decidió tomar como año seco a 1979 y año húmedo al 2010 para hacer la comparativa de los SPI.



Tabla 16. Aplicación de SPI para periodo 1979-2011 para la obtención de un año seco y un año húmedo.

Año	11010	11071	16050	16052	16081	16087	16109	16123	16133	16159	16235	16254
1979	-0.16	-1.08	-2.39	-2.6	-1.17	-0.97	-0.04	-0.83	-2.58	-1.33		
1980	-0.36	-0.28	-0.09	0.5	0.29	0.09	0.62	0.33	0.82	0.79	-1.65	
1981	0.26	0.02	0.24	-0.2	-0.33	0.52	1.61	1.24	1.16	0.28	1.61	
1982	-0.85	-0.53	-1.22	-2.76	-1.62	-1.17	-0.01	-0.03	-1.13	-0.24	0.11	-0.7
1983	-0.84	1.01	0.18	-0.52	0.36	0.17	0.6	0.72	0.43	-0.73	-2.05	-0.22
1984	0.19	-0.12	0.55	-0.46	-1.02	-0.27	0.22	0.18	0.96	-0.65	-0.05	0.62
1985	-0.44	-0.06	-0.93	-0.21	-0.33	-1.14	-0.16	-0.45	0.2	-0.34	0.59	-1.24
1986	-0.37	0.02	1.38	-0.19	-0.6	-0.32	-0.33	-0.89	0.47	0.43	0.33	0.09
1987	-1.5	-1.64	-0.71	-0.28	-1.28	-0.61	-1.79	-1.91	-1.64	-0.81	-0.47	-1.05
1988	-2.27	-1.66	-1.13	-0.24	0.57	-1.09	0.38	1.29	-0.04	0.63	-0.13	0.14
1989	-3.14	-0.79	-0.56	-1.11	-1.34	-1.2	-0.31	-0.51	-1.87	-1.1	-0.53	0.45
1990	0.27	0.87	0.18	0.93	0.84	1.03	0.49	-1.87	0.7	-0.4	1.3	-0.13
1991	1.05	1.03	0.37	1.01	0.97	-0.82	0.85	-0.25	-0.75	0.46	0.92	-0.13
1992	0.52	0.26	0.76	1.44	1.2	1.72	0.03	1.74	0.94	2.16	1.51	1.61
1993	0.09	-0.02	0.28	0.98	1.04	0.11	0.06	0.3	0.5	1.42	-0.09	-0.96
1994	0.27	0.43	-1.18	0.13	-0.37	-0.19	-0.81	-0.14	-0.54	-0.62	-0.32	-1.48
1995	-2.11	0.56	0.04	1.3	0.12	0.4	1.93	0.54	0.11	0.25	0.3	-0.06
1996	0.06	-0.65	-1.4	-0.78	-1.69	0.11	0.05	-0.17	-1.18	-0.74	-1.1	-1.1
1997	-0.2	-0.85	-0.33	-0.11	-0.25	0.38	0.73	-1.34	-0.9	0.2	0.38	-1.64
1998	-1.01	0.53	0.84	2.01	1.34	2.06	1.78	0.34	-0.06	1.19	0.08	-0.47
1999	0.09	-1.01	-1.03	-0.47	-0.14	-1.05	0.89	-0.44	0.08	-0.86	-0.61	-0.12
2000	-0.75	-2.59	-0.24	-0.79	-1.65	1.81	-2.78	-0.6	0.47	-1.21	-0.66	-0.05
2001	-1.11	-0.73	1.03	-0.21	0.59	3.48	-0.76	-1.18	-0.13	-0.5	1	2.26
2002	0.44	-0.25	1.34	0.67	1.67	-0.28	-1.83	-0.16	0.74	0.3	0.3	2.09
2003	1.05	-0.02	1.94	1.86	1.25	-0.08	0.81	-0.02	-0.67	0.18	1.37	0
2004	0.87	0.28	2.05	1.65	0.95	1.55	-1.4	1.18	0.32	0.13	1.1	0.7
2005	-0.12	-0.72	-0.43	-0.14	0.03	-1.31	-0.11	0.55	0.53	-1.7	-0.59	-0.32
2006	1.15	0.49	0.19	0.52	0.77	0.26	-0.4	1.83	0.06	0.05	-0.19	-0.29
2007	0.09	0.2	0.53	0.29	-0.39	-0.53	-0.76	0.13	-0.54	-1.19	-0.54	0.18
2008	-0.26	0	-0.63	0.12	-1.14	-1.14	-2.9	-0.47	0.01	-0.01	-0.15	-0.69
2009	-0.42	-0.26	-0.3	-0.21	-0.2	-0.01	-1.24	-0.16	-1.12	-0.52	-2.87	-0.73
2010	0.86	1.78	0.16	0.62	1.57	1.71	-0.14	3.15	2.72	-0.48	0.7	2
2011	-0.69	-0.39	-1.76	-1.26	-1.33	-0.77	-0.07	-0.88	-1.21	-2.69	-1.01	-1.32

La comparativa entre el SPI 3, 6,12 y 24 muestra que el SPI 6 es un buen indicador de humedades, así como también de sequías, pero el índice que represento de una mejor manera la trayectoria durante el año, tanto de la sequía como de la humedad, fue el SPI 12 ya que al considerar los 12 meses hace que sus valores sean mejores representantes del comportamiento meteorológico de la zona y se puede visualizar sus efectos a mediano plazo. Por otro lado, el SPI 3 y el SPI 6 son mejores en la previsión de efectos de escasos y abundancia a corto plazo, y el SPI 24 es mejor representante de la situación meteorológica a largo plazo, por lo que, por su mejor representación de la abundancia y la escasez, así como por considerar un plazo medio se eligió el SPI 12 para su uso en esta investigación. Dichas comparativas entre los diferentes SPI para un año húmedo y un año seco se muestran en las Figura 44 y Figura 45.

Una vez seleccionado el SPI 12 se procedió a realizar los cálculos de sequía y humedad para las 12 estaciones y el periodo histórico de 1969 a 2019.

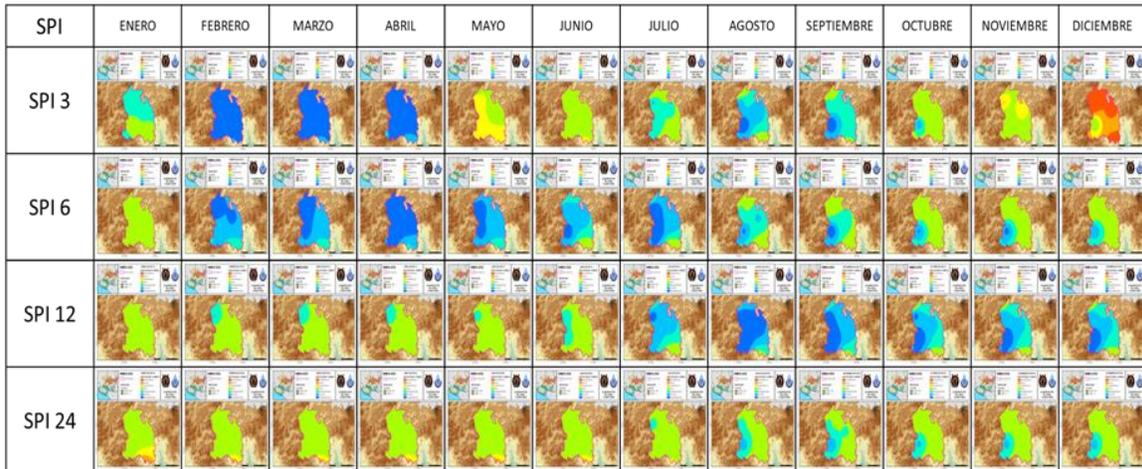


Figura 44. Comparativa entre SPI 3, SPI 6, SPI 12 y SPI 24 en un año húmedo y su visualización espacial.

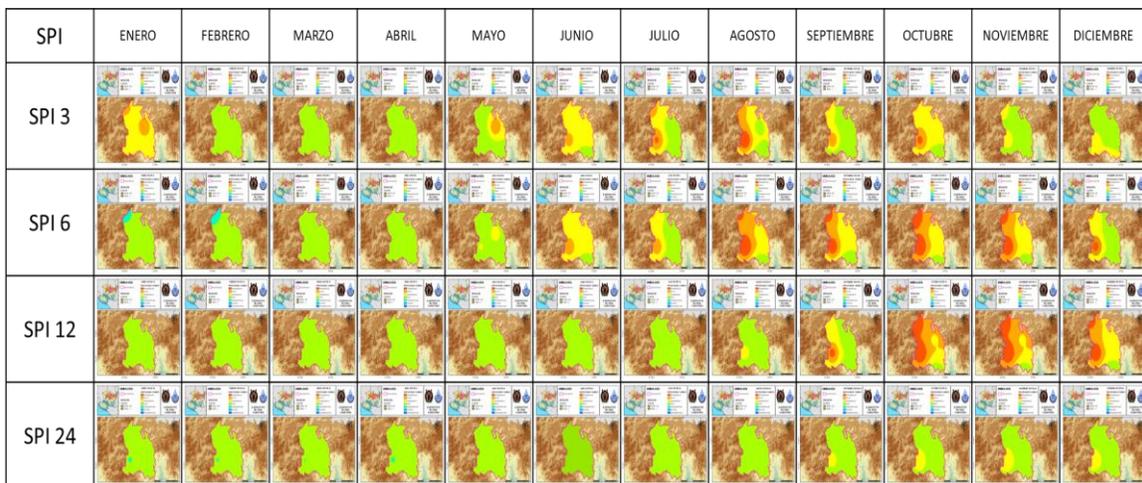


Figura 45. Comparativa entre SPI 3, SPI 6, SPI 12 y SPI 24 en un año seco y su visualización espacial.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS SEQUÍAS Y HUMEDADES HISTÓRICAS.

Obtenidos los SPI históricos se procede a la realización de los mapas georreferenciados de la zona para la evaluación de las sequías y humedades presentadas en la zona, los cuales se presentan en mapas anuales en la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 para el periodo 1969 al 2019.



Figura 46. Mapas de sequía y humedad de 1969 a 1980 de izquierda superior a derecha inferior.

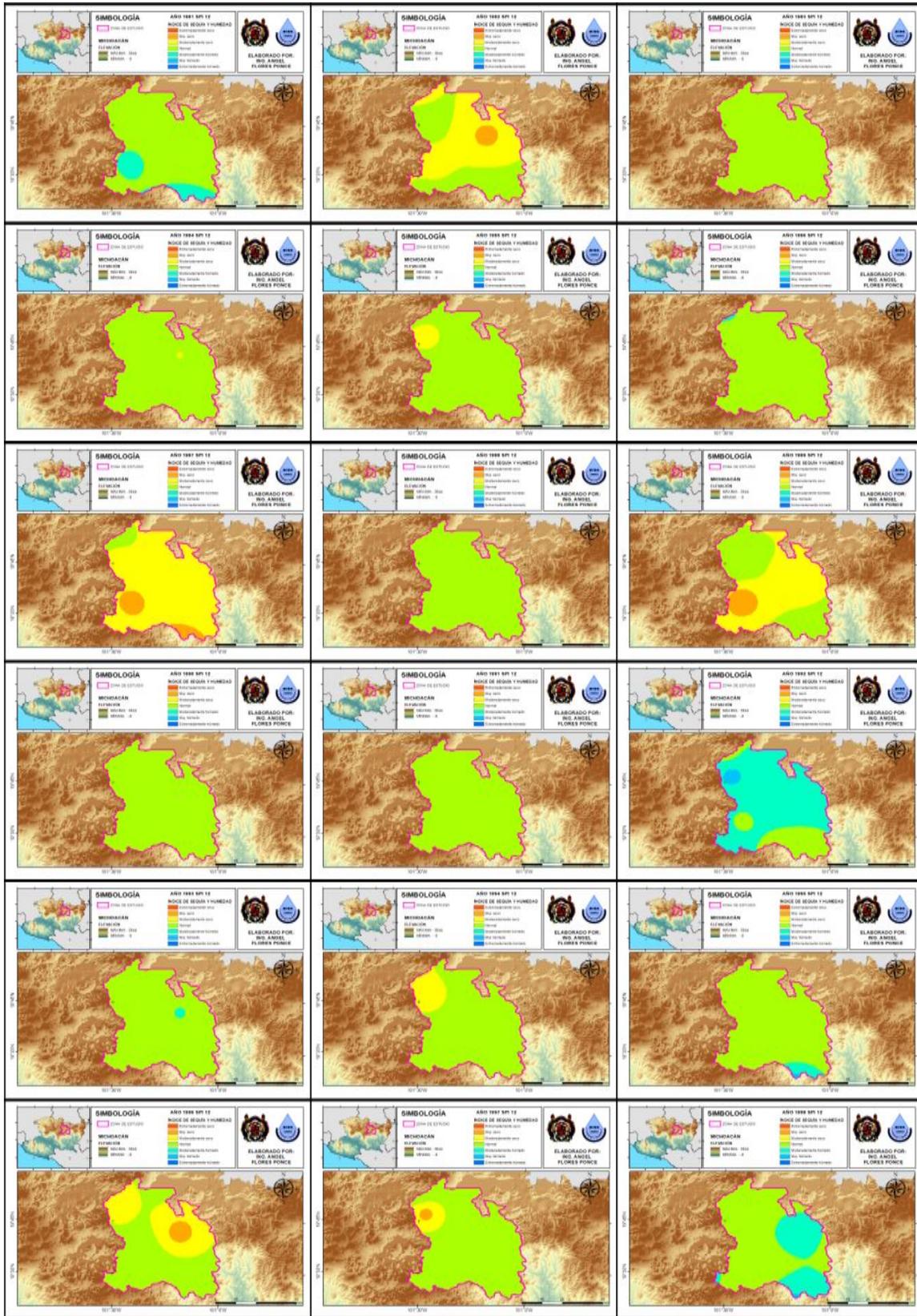


Figura 47. Mapas de sequía y humedad de 1981 a 1998 de izquierda superior a derecha inferior

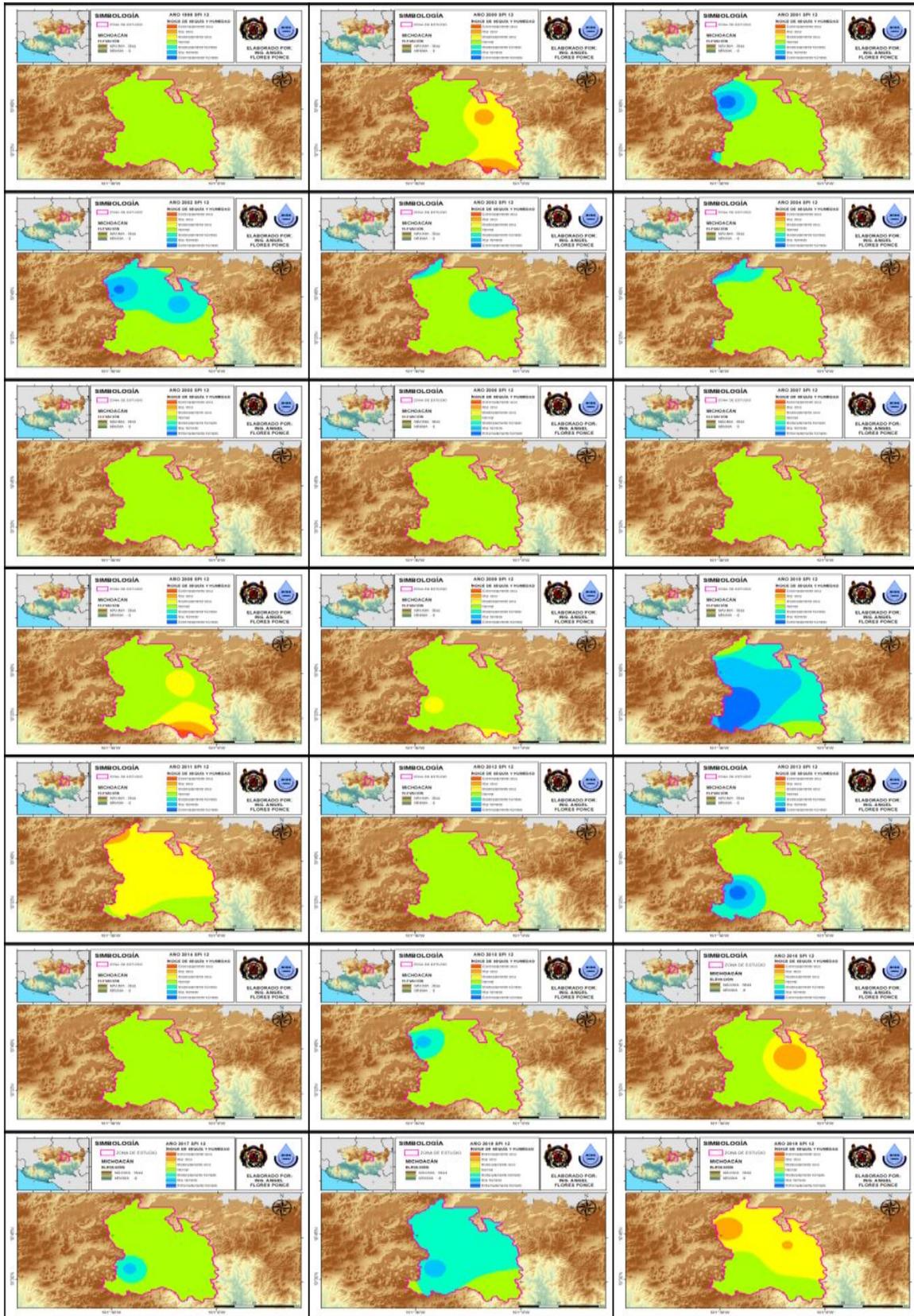


Figura 48. Mapas de sequía y humedad de 1999 a 2019 de izquierda superior a derecha inferior

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS SEQUÍAS Y HUMEDADES FUTURAS CON CAMBIO CLIMÁTICO.

Se procedió a obtener los SPI de las series de precipitación futuras con cambio climático para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 para los periodos de tiempo corto plazo 2015 – 2039, mediano plazo 2045 – 2069 y largo plazo 2075 – 2099.

En la Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52 se presentan los posibles casos de sequía y de humedad para el escenario RCP 4.5, mientras que en las Figura 53, Figura 54 y Figura 55 se presentan las sequías y humedades posibles para el escenario RCP 8.5.

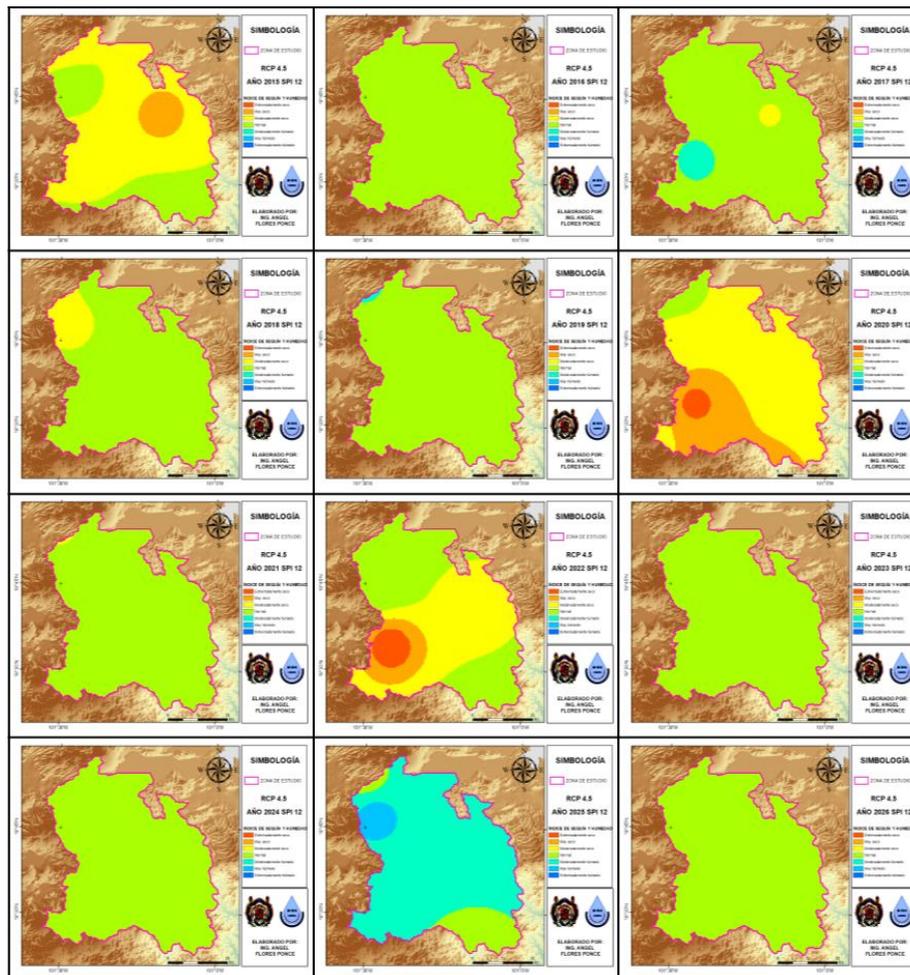


Figura 49. Mapas de sequía y humedad de 2015 a 2026 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5

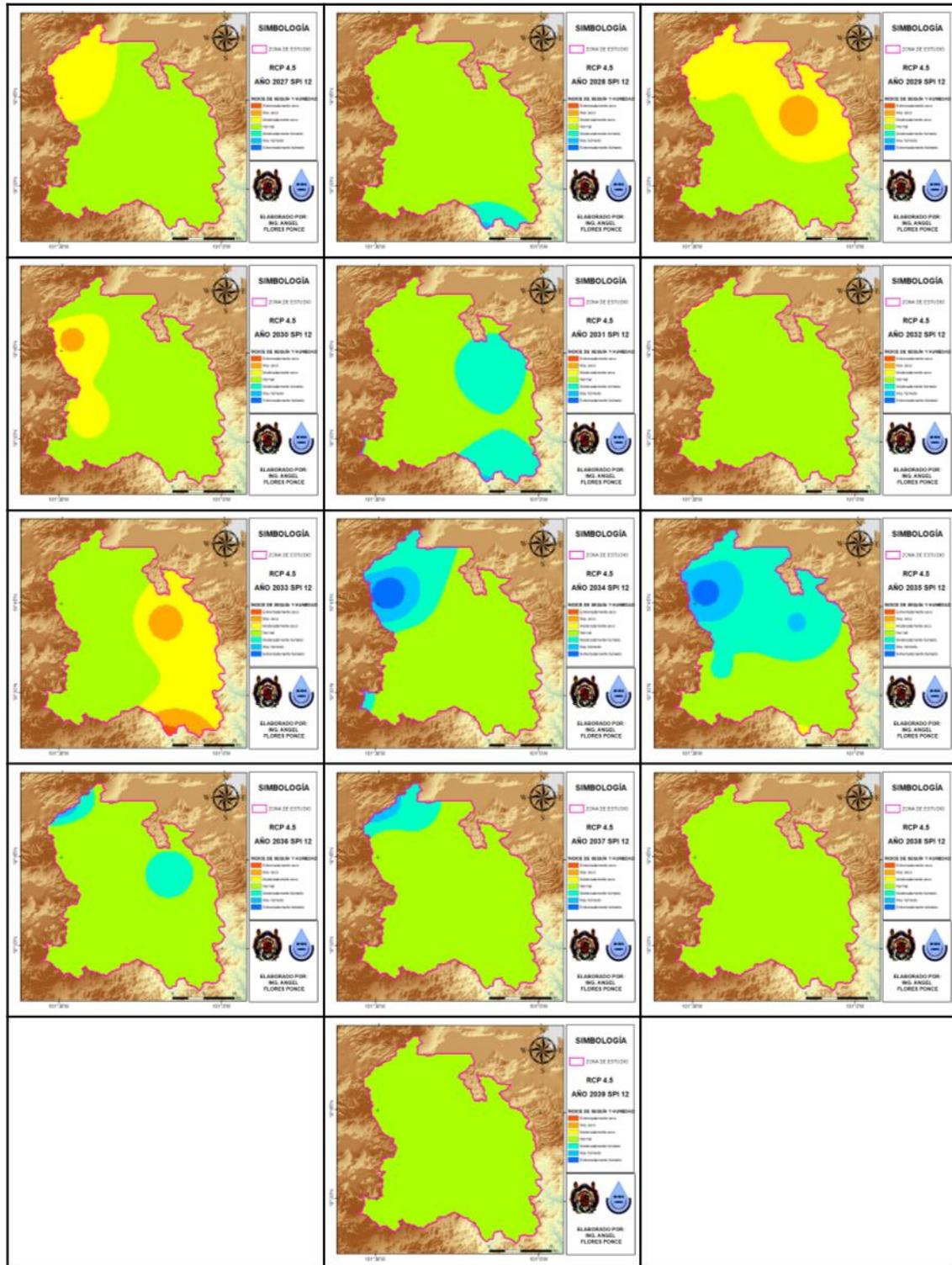


Figura 50. Mapas de sequía y humedad de 2027 a 2039 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5

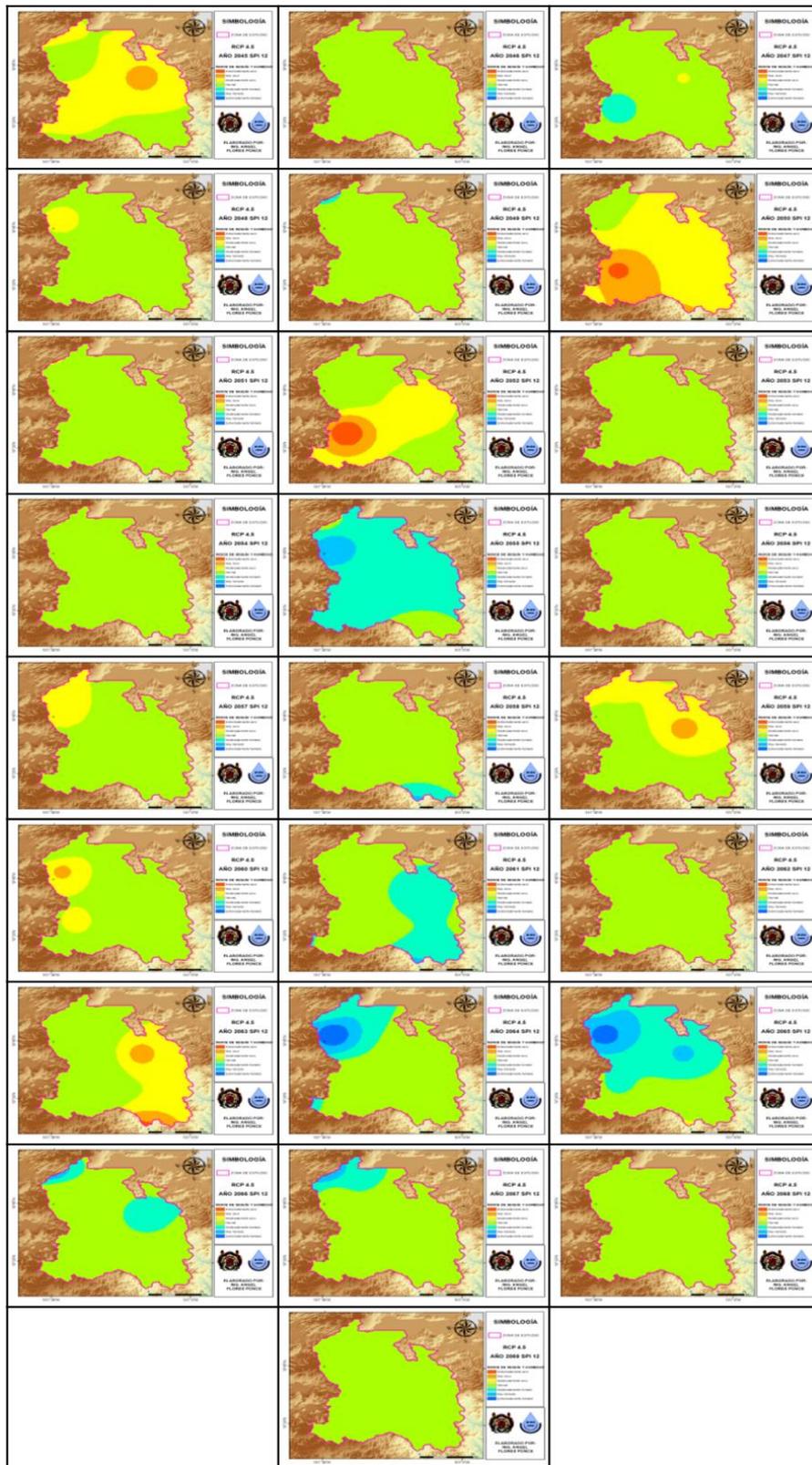


Figura 51. Mapas de sequía y humedad de 2045 a 2069 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5

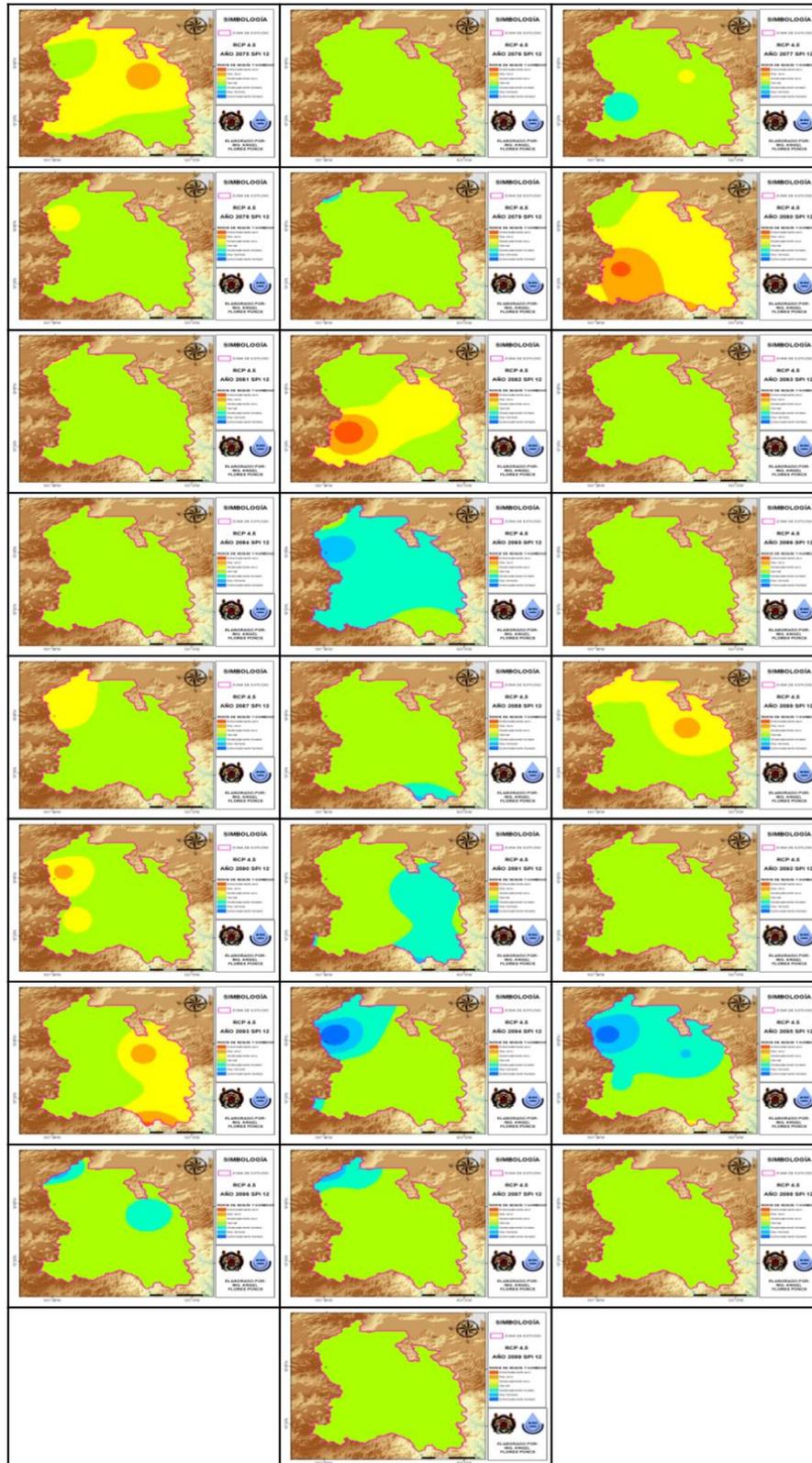


Figura 52. Mapas de sequía y humedad de 2075 a 2099 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 4.5

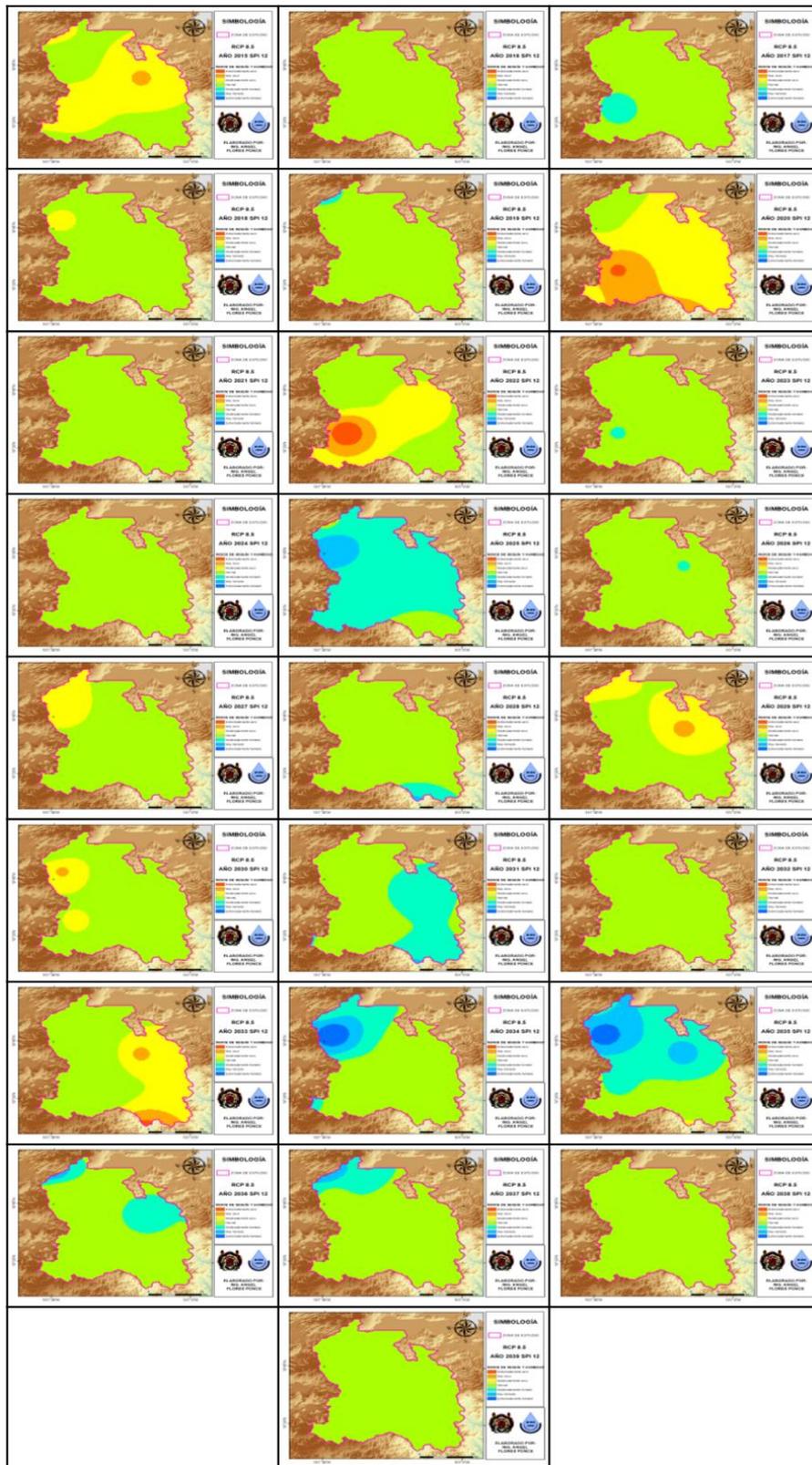


Figura 53. Mapas de sequía y humedad de 2015 a 2039 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 8.5

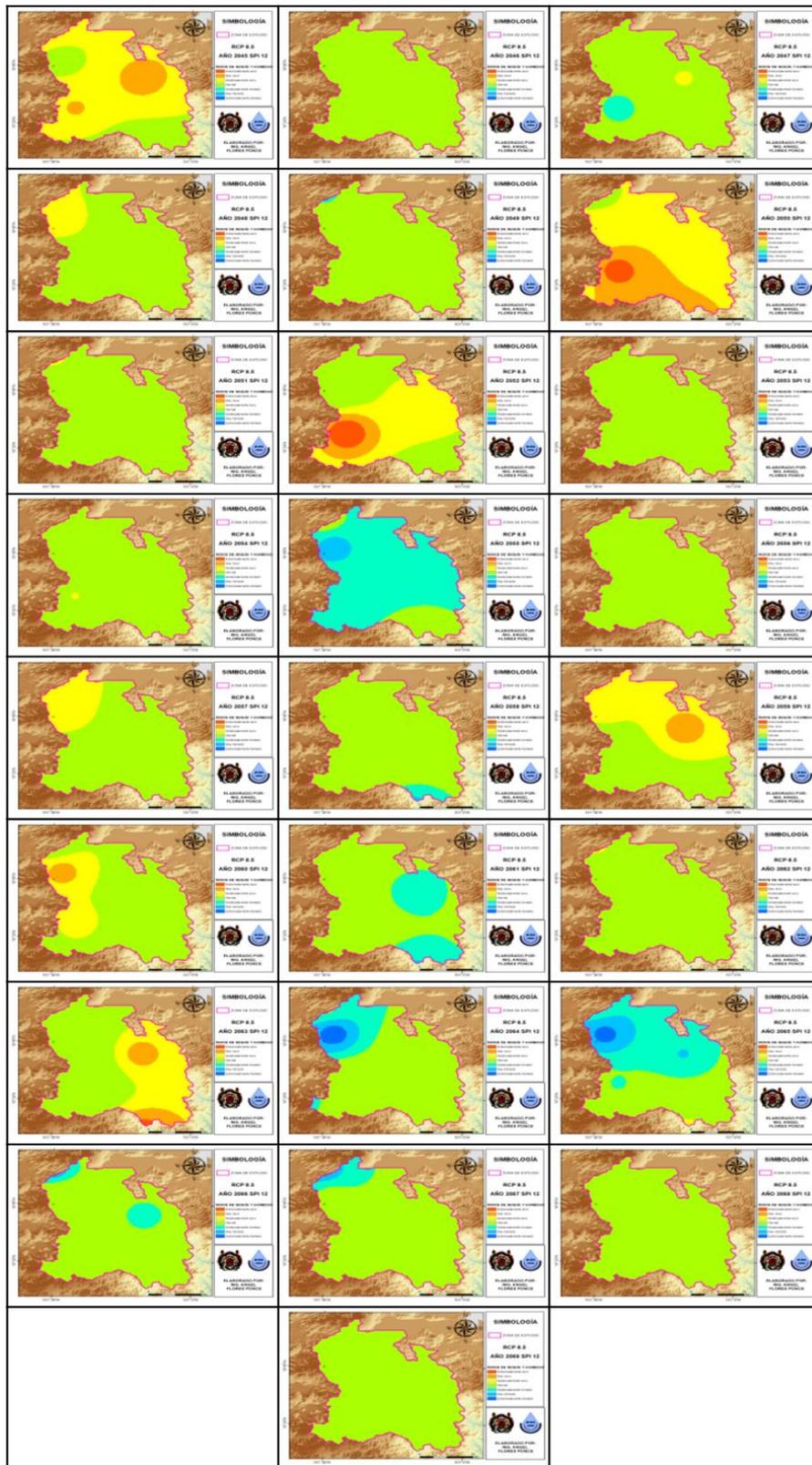


Figura 54. Mapas de sequía y humedad de 2045 a 2069 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 8.5

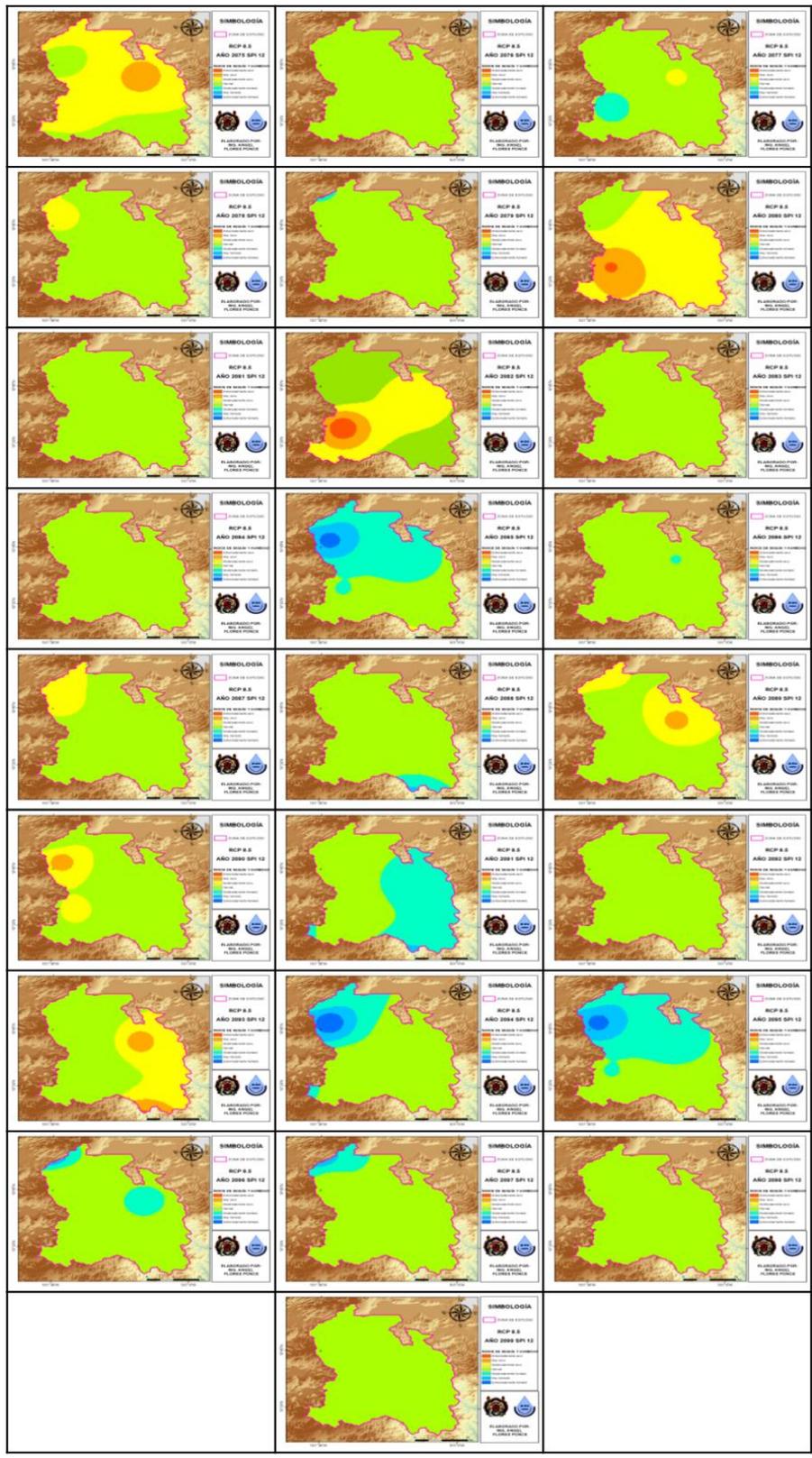


Figura 55. Mapas de sequía y humedad de 2075 a 2099 de izquierda superior a derecha inferior con escenario RCP 8.5



7.10.2 APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA DE LOS CAUDALES FLUVIALES (SDI).

El Índice de Sequía de los Caudales Fluviales (SDI) es un índice de sequías hidrológicas basado en los caudales fluviales, la mayor de sus ventajas es que sigue el mismo procedimiento que el SPI, pero en lugar de emplear los valores de la precipitación se usan valores de caudales fluviales.

Al igual que el SPI, en ocasiones es usado no solo para conocer la escasez si no también las abundancias, siguiendo los mismos parámetros que el SPI.

Para la investigación se mantiene el periodo de los 12 meses de estudio, por lo que de igual manera se utilizara el SDI 12 para las dos estaciones hidrométricas con las que se ha trabajado “Santiago Undameo” y “Queréndaro”.

Mediante las series de caudales se obtienen las sequías hidrológicas de Santiago Undameo en la Figura 56 y de Queréndaro en la Figura 57.

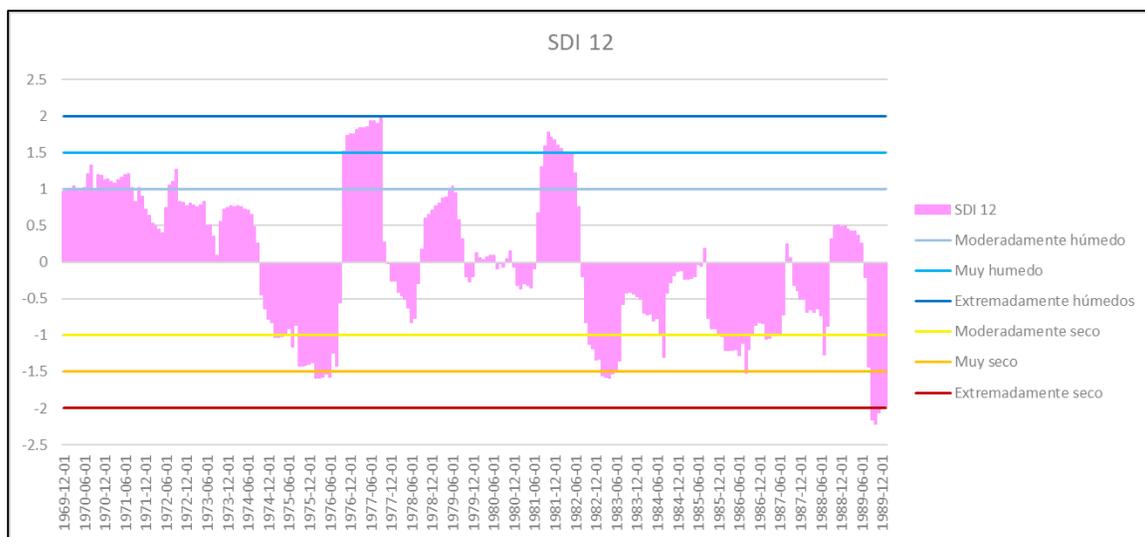


Figura 56. Escasez y abundancias de la estación hidrométrica 12347 Santiago Undameo.

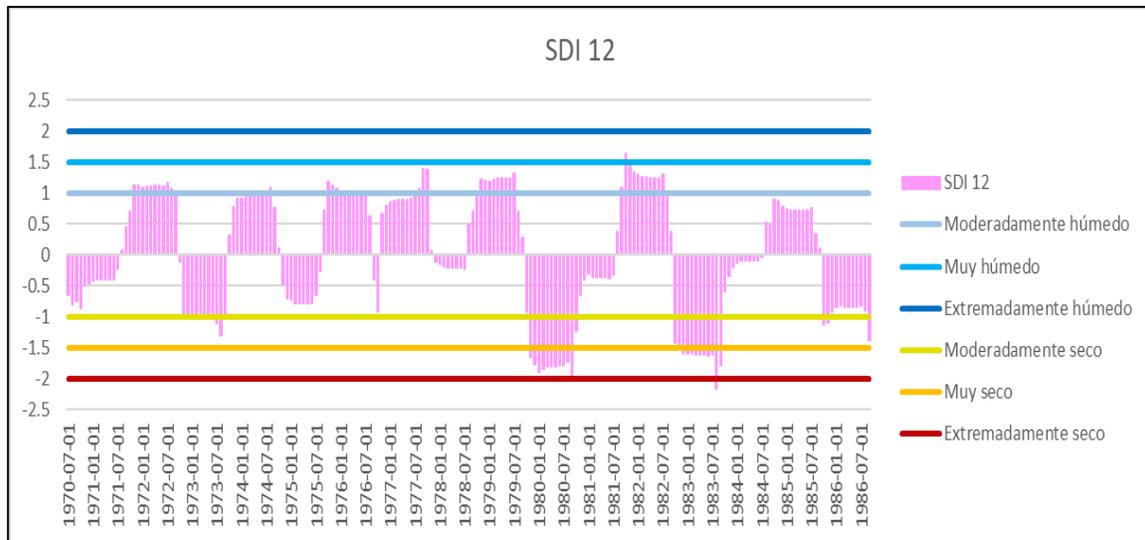


Figura 57. Escasez y abundancias de la estación hidrométrica 12314 Queréndaro.

Una vez obtenidas las sequías y humedades en la zona de estudio, se recopiló información de los fenómenos del Niño y la Niña, y se realizó una comparativa entre la relación de estos eventos, que puede consultarse en el **ANEXO 1**.



7.11 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUIAS METEOROLÓGICAS

El objetivo de la caracterización de las sequias meteorológicas es conocer la variabilidad espacial de las precipitaciones en la zona de estudio, con esto se busca saber la duración media que tienen las sequías en la zona, así como también la magnitud que tienen y su intensidad.

El proceso de la caracterización fue realizado mediante los datos obtenidos por medio de la herramienta informática MASHWIN (2019) el cual es un modelo de análisis estocástico de tipo mensual, destinado al estudio de series temporales de aportación pertenecientes a un sistema hidráulico.

7.11.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUIAS METEOROLÓGICAS HISTÓRICAS

Mediante el análisis de las estaciones meteorológicas se obtuvieron los valores de la Tabla 17 y se representaron espacialmente en las **Figura 58** su duración, **Figura 59** su intensidad y **Figura 60** su magnitud.

Tabla 17. Duración, intensidad y magnitud media de las sequias meteorológicas en la zona de estudio.

ESTACIÓN	NOMBRE	DURACIÓN MEDIA (MESES)	INTENSIDAD MEDIA (mm)	MAGNITUD MEDIA (mm)
11010	CERANO, YURIRIA	4.3	19.23	70.27
11071	SANTA MARIA YURIRIA	3.8	17.4	59.48
16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	4.1	23.84	78.43
16052	HUINGO, ZINAPECUARO	4.4	20.79	74.92
16081	MORELIA, MORELIA	3.8	20.41	63.02
16087	PATZCUARO, PATZCUARO	4.2	25.62	92.14
16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	4.9	28.08	123.85
16123	TACAMBARO, TACAMBARO	4.8	31.87	134.7
16133	TURICATO, TURICATO	4.6	24.91	99
16159	EL ROSARIO, ANGAMACUTIRO	4.3	21.08	77.89
16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	4.1	32.16	105.25
16254	TEREMENDO, MORELIA	3.8	18.89	65.33

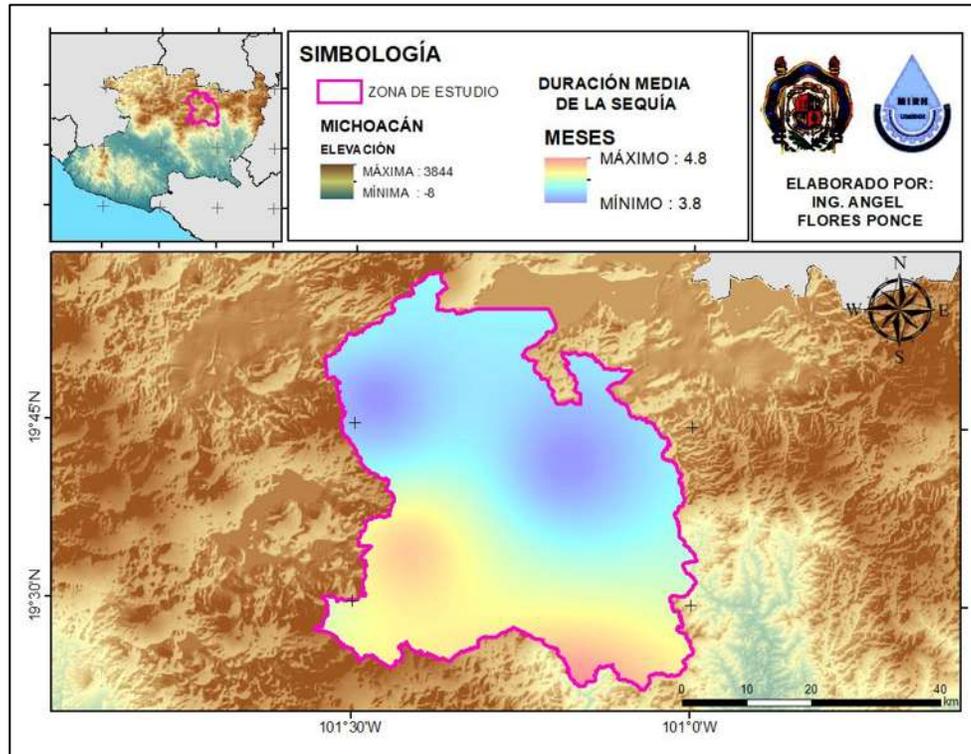


Figura 58. Duración media de la sequía meteorológica en meses en la zona de estudio.

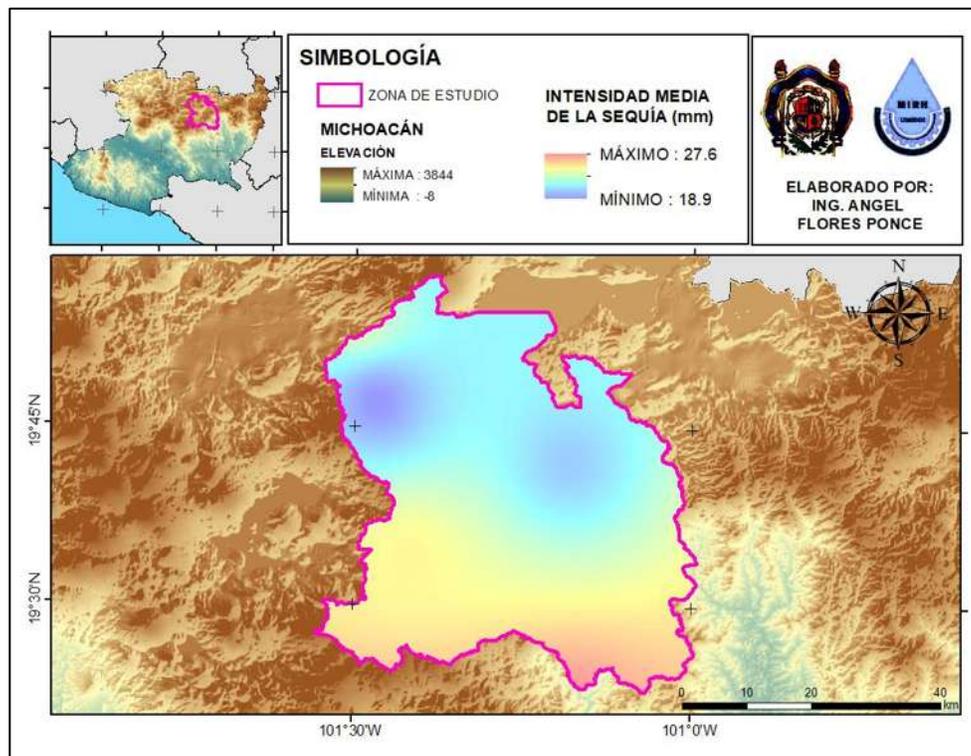


Figura 59. Intensidad media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio.

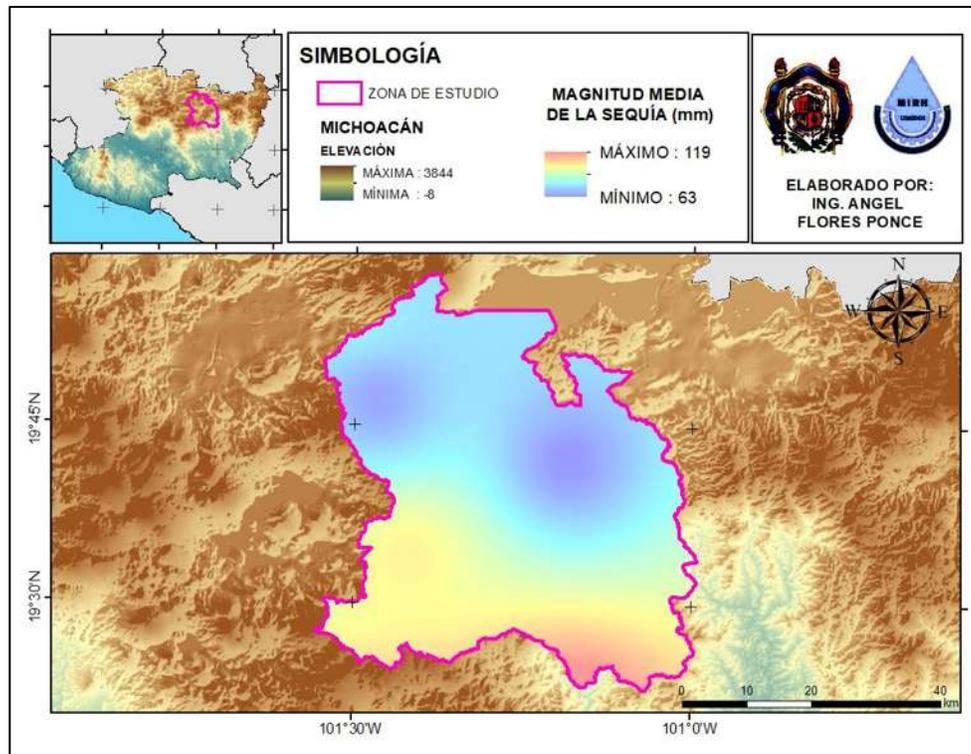


Figura 60. Magnitud media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio.

7.11.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUIAS METEOROLÓGICAS FUTURAS CON CAMBIO CLIMÁTICO.

Mediante el análisis de las estaciones meteorológicas se obtuvieron los valores de su duración, intensidad y magnitud (Tabla 18) y se representaron espacialmente en la Figura 61, Figura 62 y Figura 63 respectivamente para el RCP 4.5.

Así como los valores de su duración, intensidad y magnitud (Tabla 19), representados espacialmente respectivamente en las Figura 64, Figura 65 y Figura 66 para el RCP 8.5.



Tabla 18. Duración, intensidad y magnitud media de las sequías meteorológicas en la zona de estudio periodo futuro con RCP 4.5.

ESTACIÓN	NOMBRE	DURACIÓN MEDIA (MESES)	INTENSIDAD MEDIA (mm)	MAGNITUD MEDIA (mm)
11010	CERANO, YURIRIA	4.6	21.51	88.19
11071	SANTA MARIA YURIRIA	4.6	18.55	76.25
16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	4.5	27.52	103.42
16052	HUINGO, ZINAPECUARO	5.1	24.48	103.02
16081	MORELIA, MORELIA	4.6	23.68	94.21
16087	PATZCUARO, PATZCUARO	5	30.27	129.74
16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	5.3	31.44	151.67
16123	TACAMBARO, TACAMBARO	5	36.61	164.35
16133	TURICATO, TURICATO	5.4	28.2	131.28
16159	EL ROSARIO, ANGAMACUTIRO	5.2	22.97	105.36
16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	4.5	36.72	137.39
16254	TEREMENDO, MORELIA	4.6	21.51	88.19

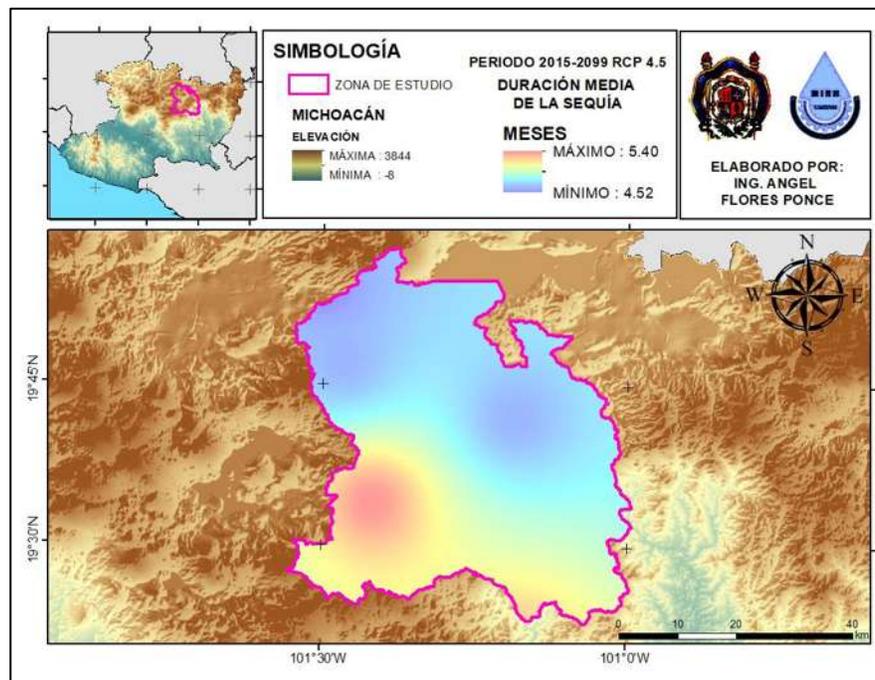


Figura 61. Duración media de la sequía meteorológica en meses en la zona de estudio periodo futuro RCP 4.5

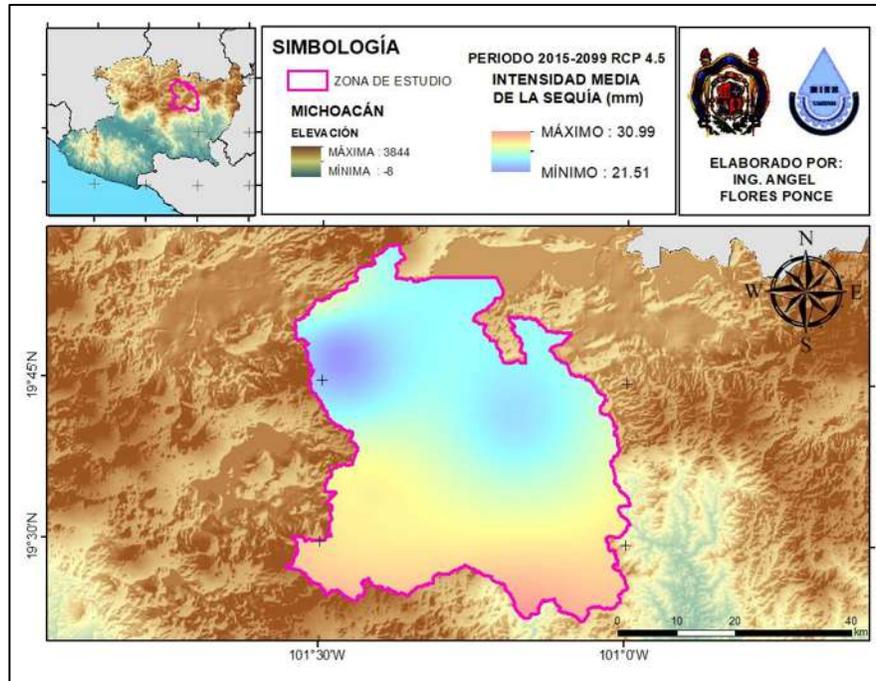


Figura 62. Intensidad media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 4.5

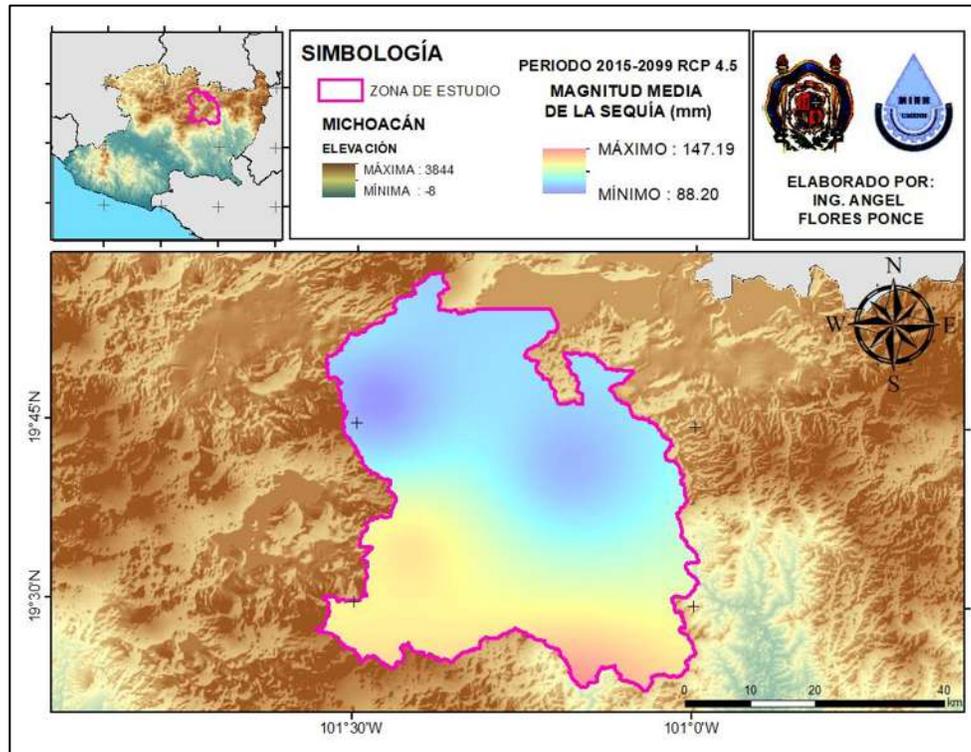


Figura 63. Magnitud media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 4.5



Tabla 19. Duración, intensidad y magnitud media de las sequías meteorológicas en la zona de estudio periodo futuro con RCP 8.5.

ESTACIÓN	NOMBRE	DURACIÓN MEDIA (MESES)	INTENSIDAD MEDIA (mm)	MAGNITUD MEDIA (mm)
11010	CERANO, YURIRIA	4.7	21.62	91.72
11071	SANTA MARIA YURIRIA	4.4	18.54	73.34
16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	4.5	26.87	104.78
16052	HUINGO, ZINAPECUARO	5.1	24.77	103.12
16081	MORELIA, MORELIA	4.6	23.39	95.22
16087	PATZCUARO, PATZCUARO	4.8	30.46	129.88
16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	5.4	31.21	152.92
16123	TACAMBARO, TACAMBARO	5.1	36.76	165.27
16133	TURICATO, TURICATO	5.6	28.09	134.56
16159	EL ROSARIO, ANGAMACUTIRO	5.3	23.31	107.7
16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	4.5	36.71	137.76
16254	TEREMENDO, MORELIA	4.7	21.62	91.72

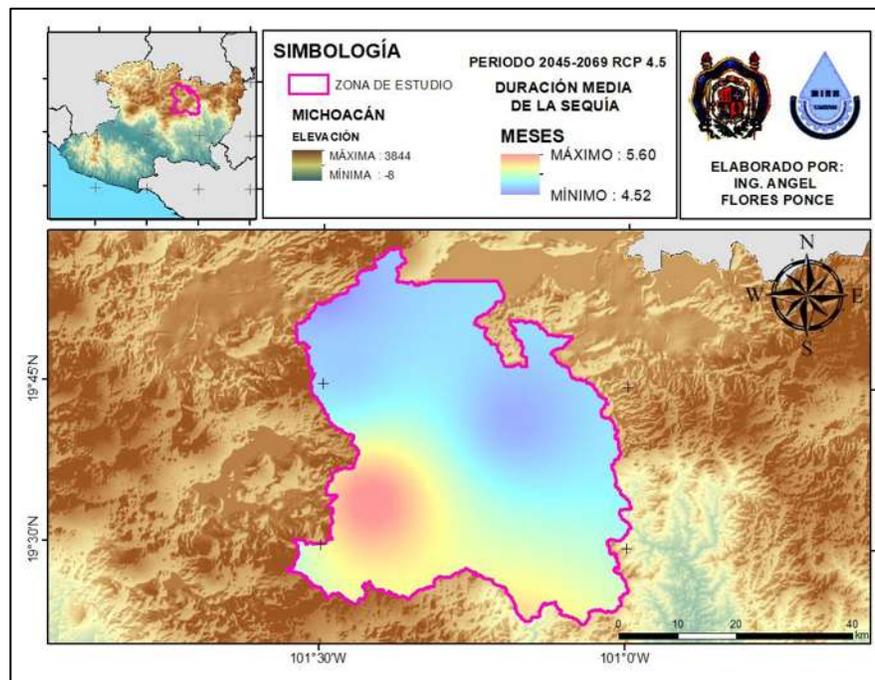


Figura 64. Duración media de la sequía meteorológica en meses en la zona de estudio periodo futuro RCP 8.5

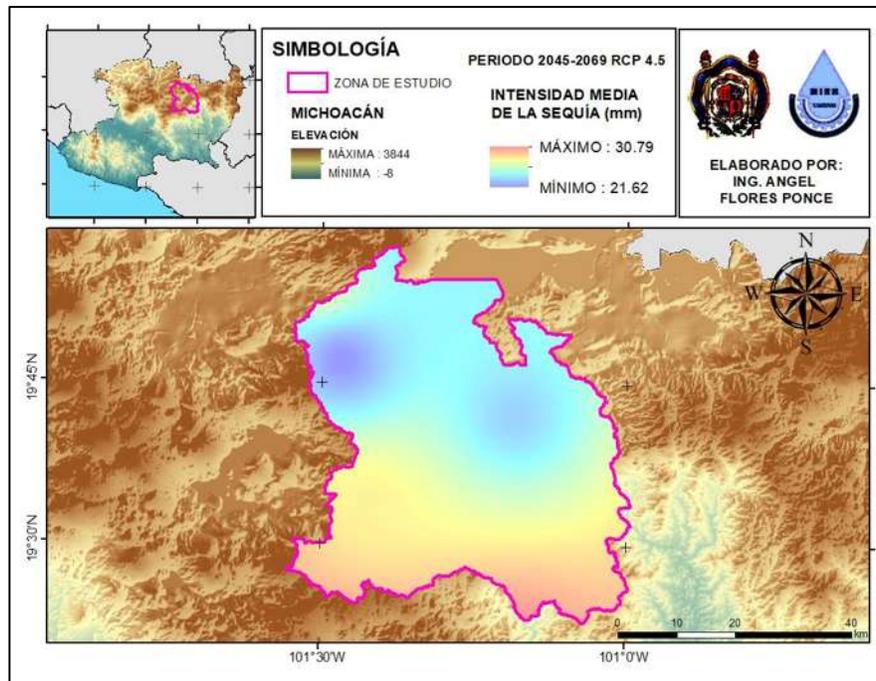


Figura 65. Intensidad media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 8.5

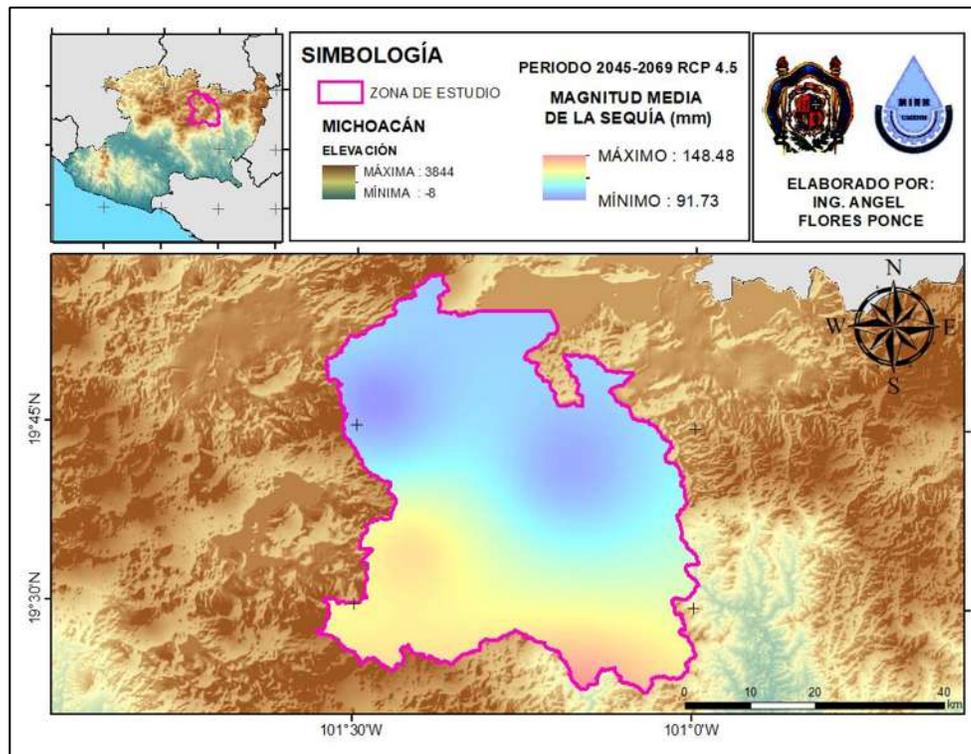


Figura 66. Magnitud media de la sequía meteorológica en (mm) en la zona de estudio periodo futuro RCP 8.5



7.12 FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

7.12.1 VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

Se considera a la vulnerabilidad como una función de tres grandes dimensiones: la exposición a la variabilidad y a los extremos climáticos, la sensibilidad de los sistemas sociales y la capacidad de adaptación de los grupos humanos que habitan en las regiones estudiadas.

Para el análisis de la vulnerabilidad de la zona de estudio se hizo uso de índices, mismos que están conformados por diferentes variables relacionadas con la zona y la información que proporciona la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el índice de exposición se utilizó la información obtenida del análisis de la zona la cual se muestra en la Tabla 20, para la sensibilidad y la capacidad adaptativa se utilizó la información obtenida del INEGI (2021) y se presenta en la Tabla 21 y Tabla 22.

Tabla 20. Indicadores que conforman el índice de exposición para la vulnerabilidad

EXPOSICIÓN		
ÍNDICE	CLAVE	INDICADOR
DESVIACIÓN DE DATOS CLIMATOLÓGICOS	sdT	Desviación estándar de la temperatura promedio
	sdP	Desviación estándar de la precipitación promedio
RANGO EN LA TEMPERATURA	rT	Rango entre la temperatura máxima y mínima
PORCENTAJE DE SER ROPENSO A FENÓMENOS METEOROLÓGICOS	Fp	Porcentaje de propenso a humedad
	Dp	Porcentaje de propenso a sequía

Tabla 21. Indicadores que conforman el índice de sensibilidad para la vulnerabilidad

SENSIBILIDAD		
ÍNDICE	CLAVE	INDICADOR
POBLACIÓN	POBTOT-P_5YMAS (POB5MEN)	Población menor de cinco años
	POB65_MAS	Población mayor de 65 años
	PCON_DISC	Población con discapacidad



SERVICIOS	VPH_S_ELEC	Viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica
	VPH_AGUAFV	Viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda
	VPH_NODREN	Viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje

Tabla 22. Indicadores que conforman el índice de capacidad de adaptación para la vulnerabilidad

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN		
ÍNDICE	CLAVE	INDICADOR
EDUCACIÓN	P15SEC_CO	Población con educación básica; Población de 15 años y más con secundaria completa
	P_15YMAS-P15YM_AN (P15NOAN)	Población de 15 años y más no analfabeta
TASA DE EMPLEO	PEA	Población de 12 años y más económicamente activa
SALUD	PDER_SS	Población afiliada a servicios de salud
	PAFIL_IPRIV	Población afiliada a servicios de salud en una institución privada
COMUNICACIÓN, PREPARACIÓN TECNOLÓGICA	VPH_PC	Viviendas particulares habitadas que disponen de computadora, laptop o tablet
	VPH_CEL	Viviendas particulares habitadas que disponen de teléfono celular
	VPH_INTER	Viviendas particulares habitadas que disponen de Internet

Para el análisis de los diferentes indicadores y su presentación, la zona de estudio fue dividida en Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), Distritos y Subcuencas para hacer la evaluación correspondiente, dicha división se presenta en la Figura 67.

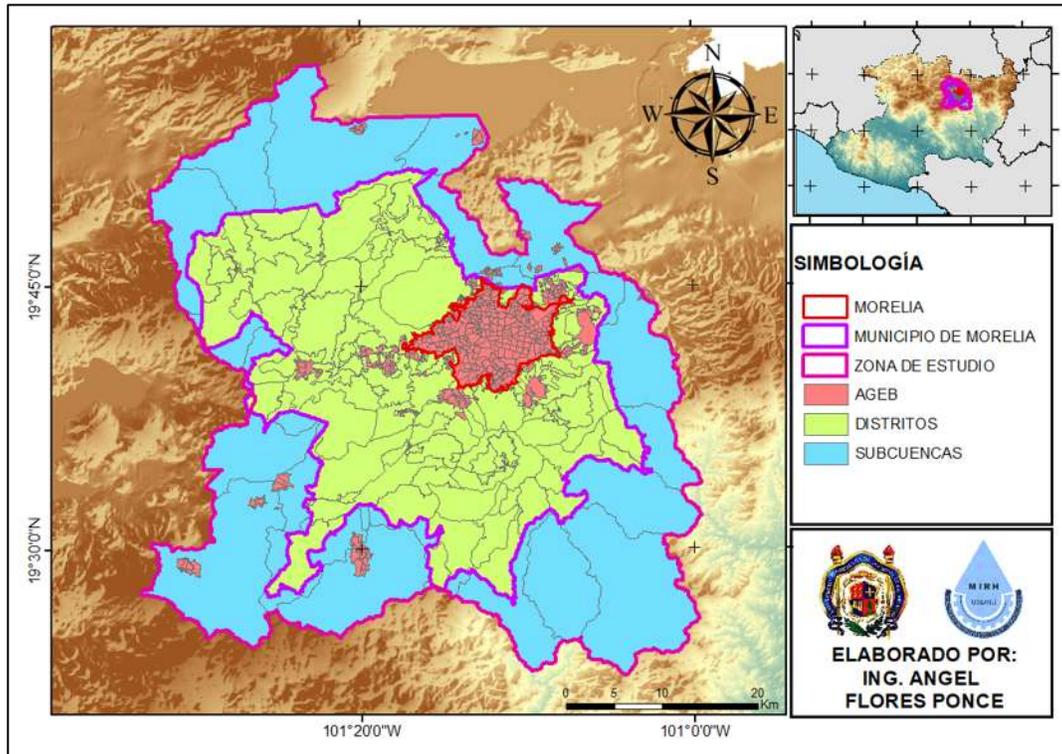


Figura 67. División para el análisis de los índices.

Para la obtención de los indicadores se realizó el análisis de componentes principales (Peres-Neto et al., 2005) con las variables que los conformaban para asignar ponderaciones a cada uno de ellos con respecto a su correlación con la zona de estudio.

Para llevar a cabo el análisis de componentes principales se hizo uso del software RStudio (2003) en el cual se ingresan las variables en estudio y mediante sus correlación se obtienen las componentes principales, tomando como la componente uno a la que más representa los valores de dichas variables, asignándole las ponderaciones de esta componente principal a las variables en estudio, dichas ponderaciones correspondientes se presentan en la Tabla 23, Tabla 24 y

Tabla 25.



Tabla 23. Ponderaciones que conforman el índice de exposición para la vulnerabilidad

EXPOSICIÓN			
ÍNDICE	PONDERACIÓN	INDICADOR	PONDERACIÓN
DESVIACIÓN DE DATOS CLIMATOLÓGICOS	6.00%	Desviación estándar de la temperatura promedio	35.00%
		Desviación estándar de la precipitación promedio	65.00%
RANGO EN LA TEMPERATURA	6.00%	Rango entre la temperatura máxima y mínima	100%
PORCENTAJE DE SER PROPENSO A FENÓMENOS METEOROLÓGICOS	88.00%	Porcentaje de propenso a humedad	55.00%
		Porcentaje de propenso a sequía	45.00%

Tabla 24. Ponderaciones que conforman el índice de sensibilidad para la vulnerabilidad

SENSIBILIDAD			
ÍNDICE	PONDERACIÓN	INDICADOR	PONDERACIÓN
POBLACIÓN	92.00%	Población menor de cinco años	22.00%
		Población mayor de 65 años	35.00%
		Población con discapacidad	43.00%
SERVICIOS	8.00%	Viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica	59.00%
		Viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda	25.00%



	Viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje	16.00%
--	---	--------

Tabla 25. Ponderaciones que conforman el índice de capacidad de adaptación para la vulnerabilidad

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN			
ÍNDICE	PONDERACIÓN	INDICADOR	PONDERACIÓN
EDUCACIÓN	26.00%	Población con educación básica; Población de 15 años y más con secundaria completa	54.00%
		Población de 15 años y más no analfabeta	46.00%
TASA DE EMPLEO	24.00%	Población de 12 años y más económicamente activa	100%
SALUD	30.00%	Población afiliada a servicios de salud	99.00%
		Población afiliada a servicios de salud en una institución privada	1.00%
COMUNICACIÓN, PREPARACIÓN TECNOLÓGICA	20.00%	Viviendas particulares habitadas que disponen de computadora, laptop o tablet	27.00%
		Viviendas particulares habitadas que disponen de teléfono celular	39.00%
		Viviendas particulares habitadas que disponen de Internet	34.00%

Después de obtener las ponderaciones correspondientes de cada indicador que conformó el índice de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa, se procedió a realizar los mapas de estos, los cuales están en una escala de cero a uno con rangos en muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto como se muestra de la Figura 68 a la Figura 77.

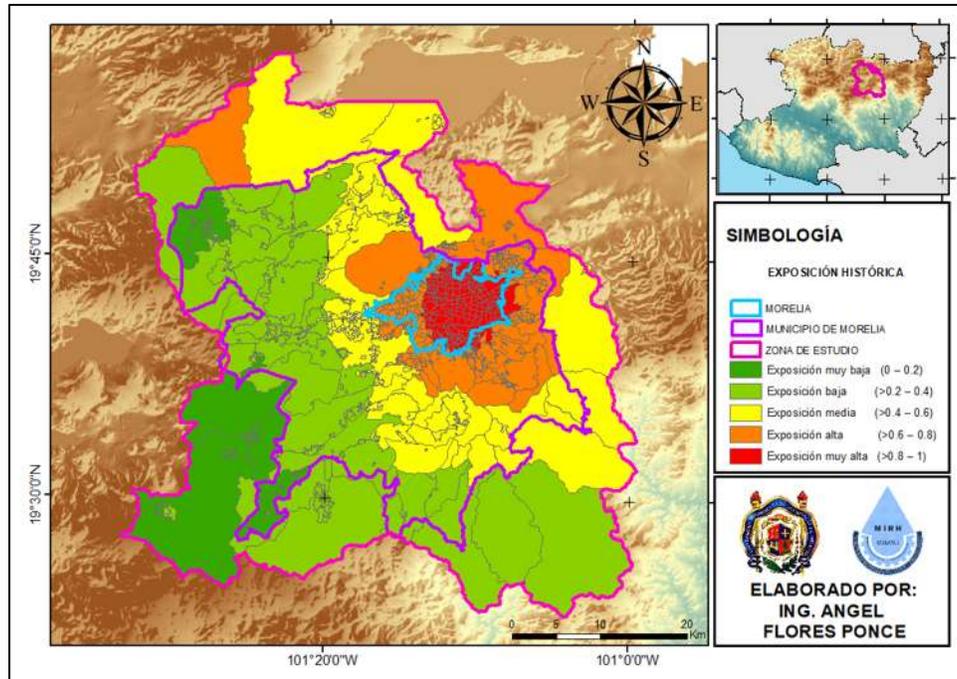


Figura 68. Mapa del índice de exposición histórica para la vulnerabilidad

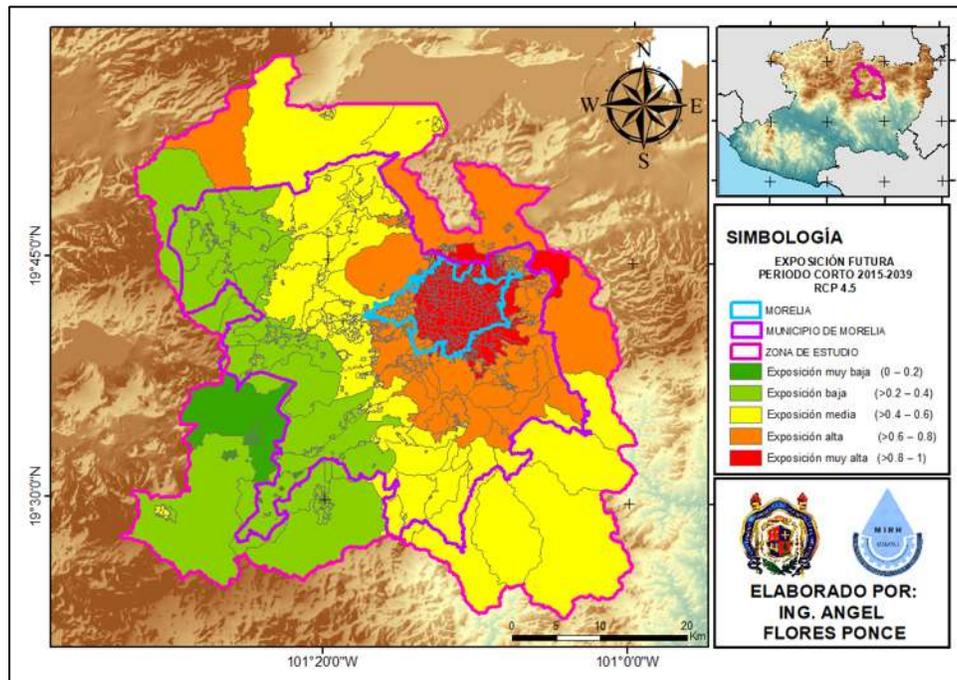


Figura 69. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 4.5 para la vulnerabilidad

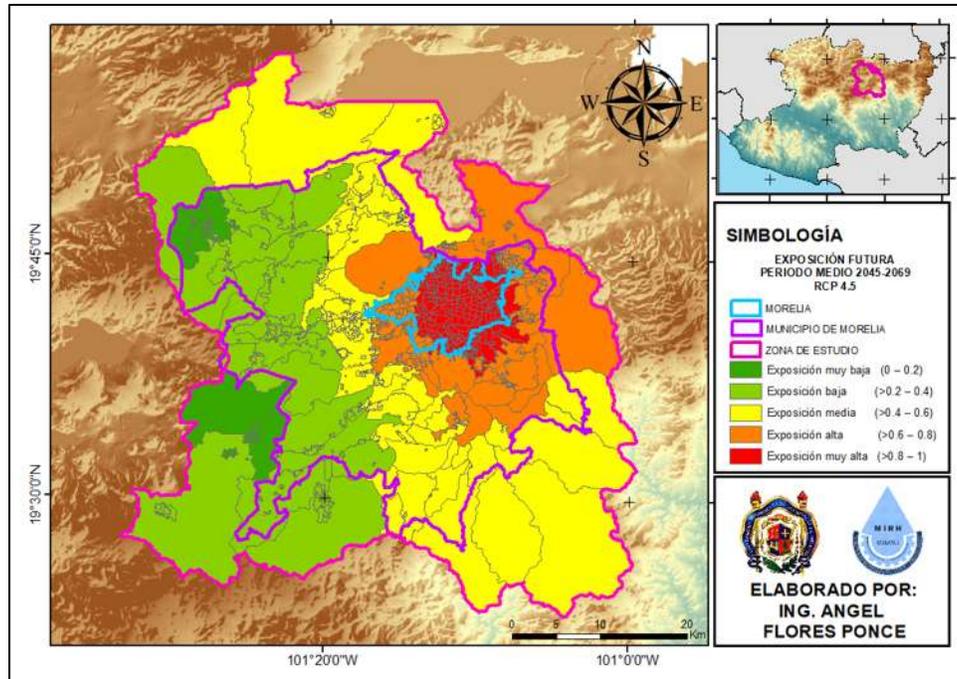


Figura 70. Mapa del índice de exposición periodo medio 2045-2069 escenario RCP 4.5 para la vulnerabilidad

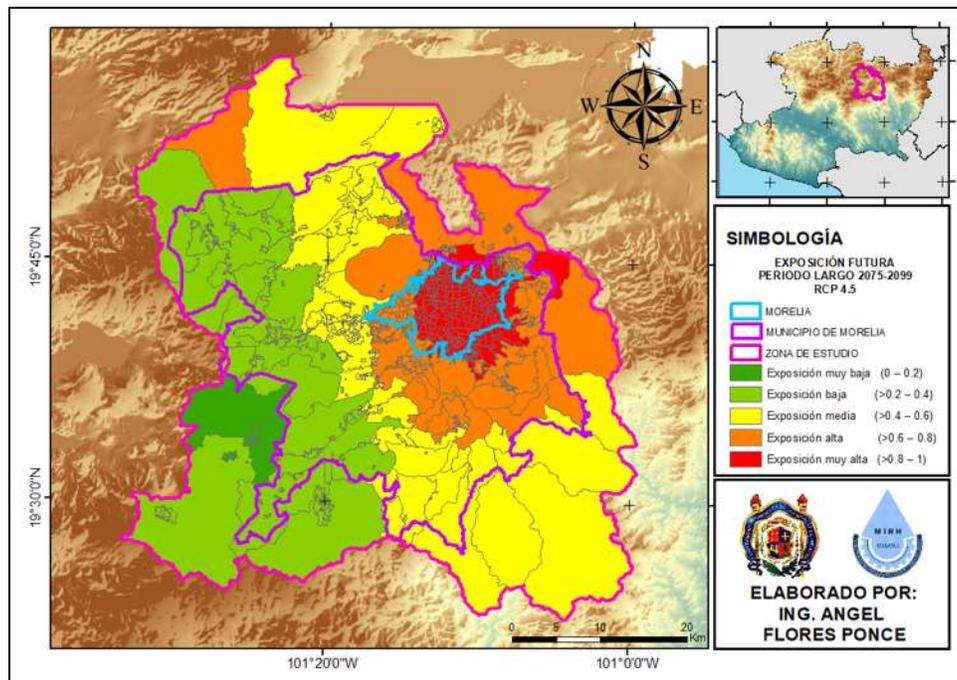


Figura 71. Mapa del índice de exposición periodo largo 2075-2099 escenario RCP 4.5 para la vulnerabilidad

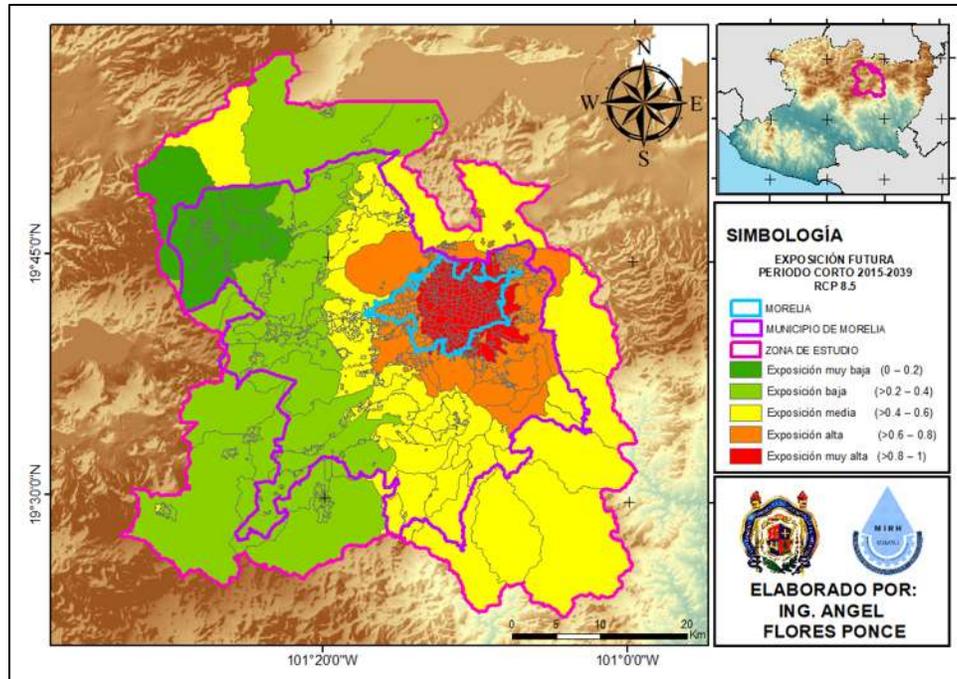


Figura 72. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5 para la vulnerabilidad

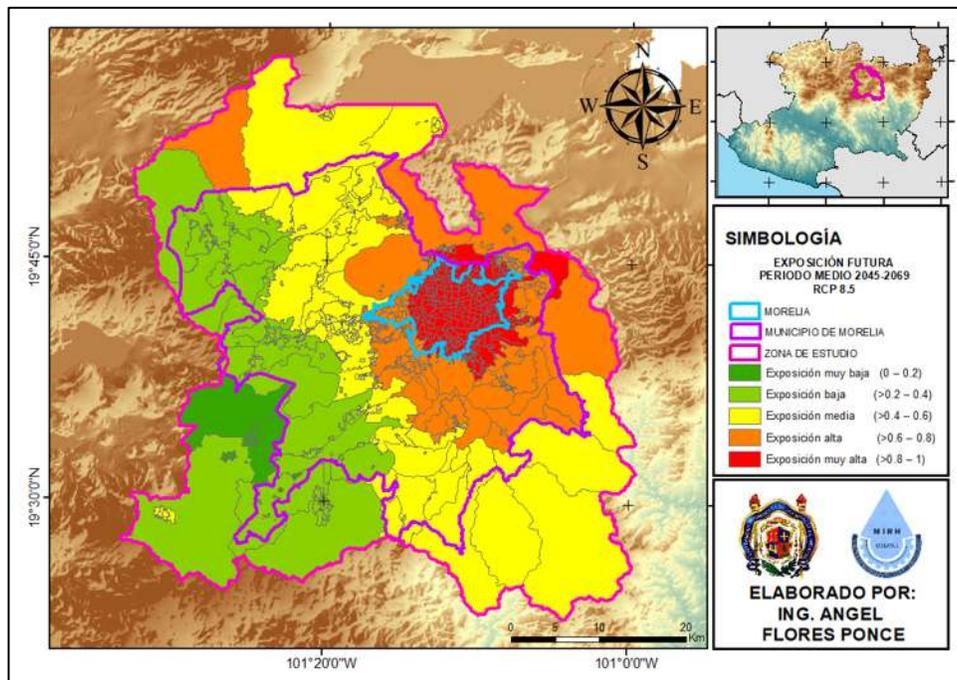


Figura 73. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5 para la vulnerabilidad

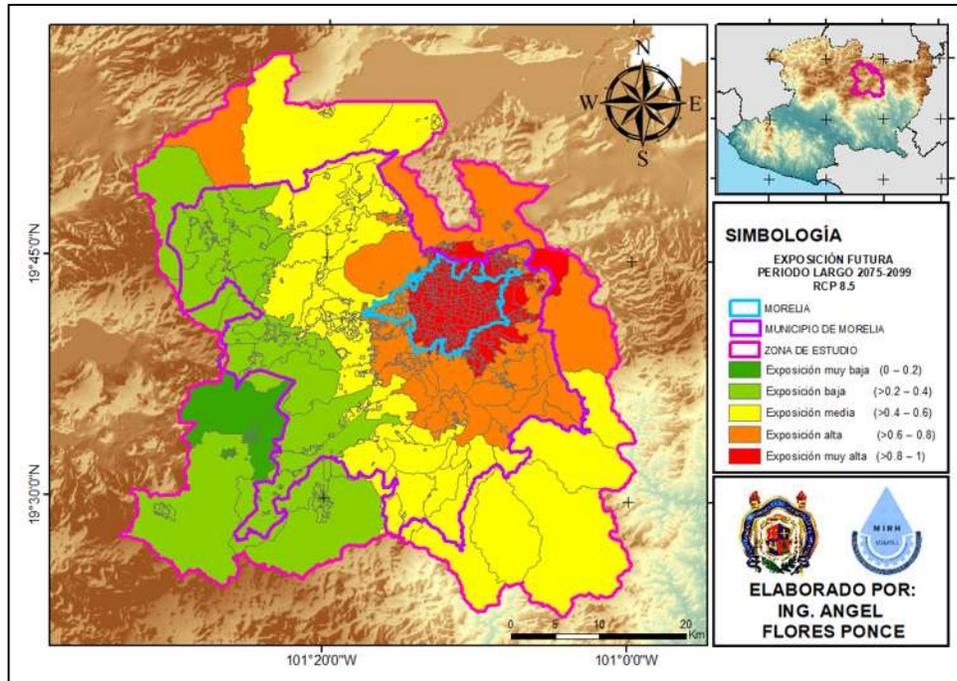


Figura 74. Mapa del índice de exposición periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5 para la vulnerabilidad

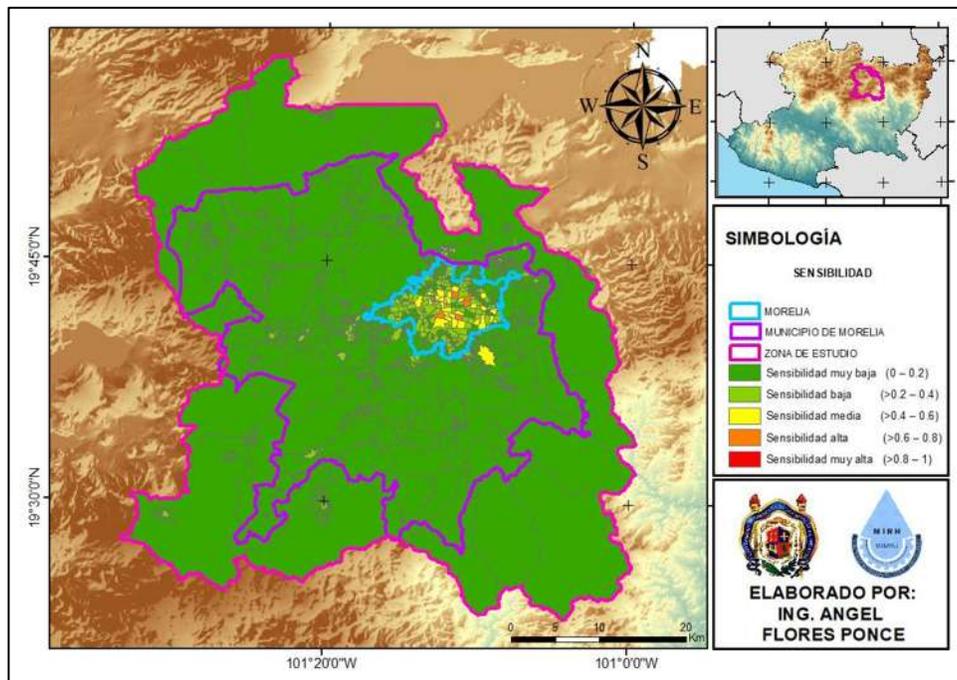


Figura 75. Mapa del índice de sensibilidad para la vulnerabilidad

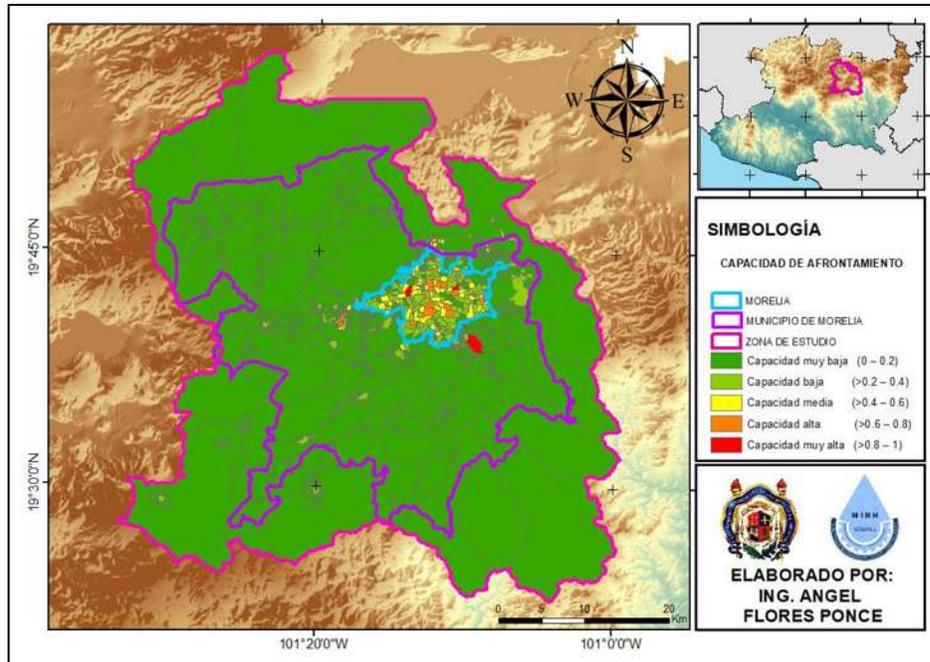


Figura 76. Mapa del índice de capacidad adaptativa para la vulnerabilidad

Para el índice de vulnerabilidad se requiere que el indicador de capacidad adaptativa sea de la falta de capacidad que se tiene para la adaptación y afrontar el cambio climático, por lo que se obtendría un mapa como el de la Figura 77.

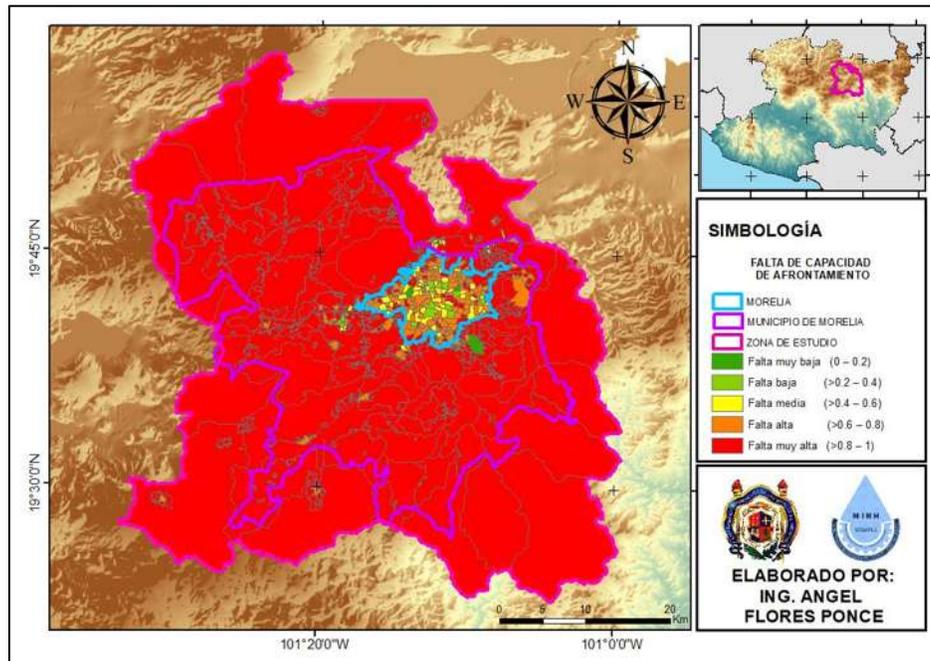


Figura 77. Mapa del índice de la falta de capacidad adaptativa para la vulnerabilidad

Al obtener todos los posibles índices de exposición, sensibilidad y falta de capacidad de adaptación, se procedió al análisis de componentes principales de estos indicadores y obtener sus ponderaciones correspondientes que conformen el índice de vulnerabilidad, las cuales se muestran en la Tabla 26, así como se presentan los mapas de vulnerabilidades de la Figura 78 a la Figura 84.

Tabla 26. Ponderaciones de los indicadores de vulnerabilidad

VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO		
EXPOSICIÓN	SENSIBILIDAD	FALTA DE CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN
33%	2%	65%

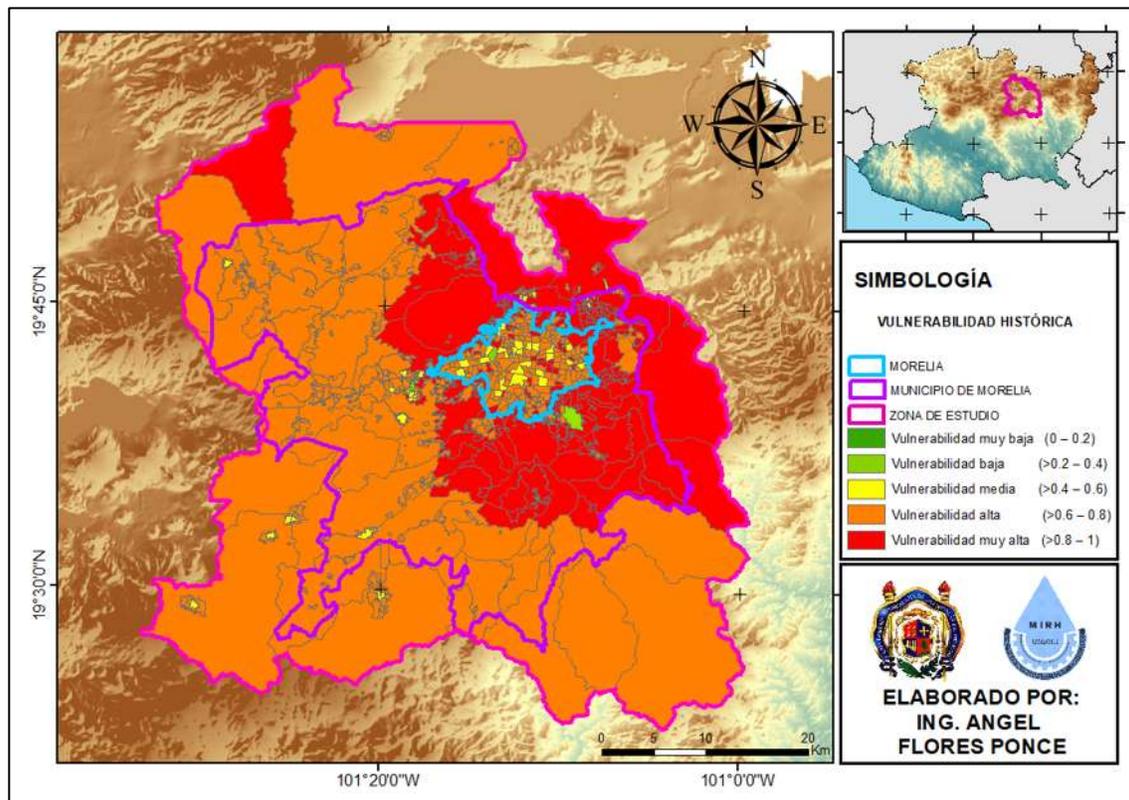


Figura 78. Mapa del índice de vulnerabilidad al cambio climático periodo histórico

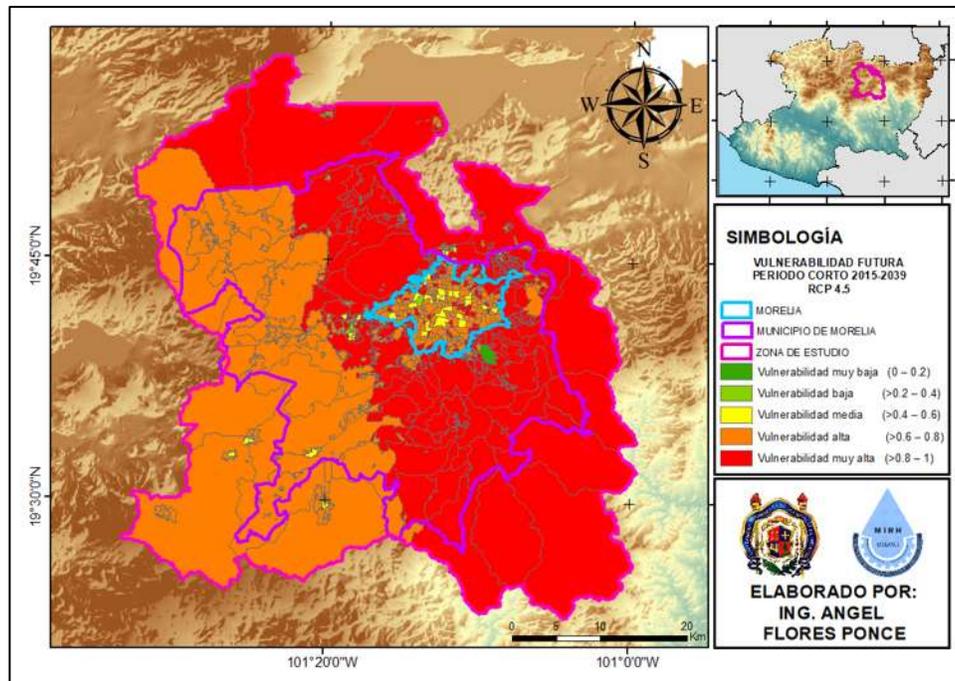


Figura 79. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo corto 2015-2039
escenario RCP 4.5

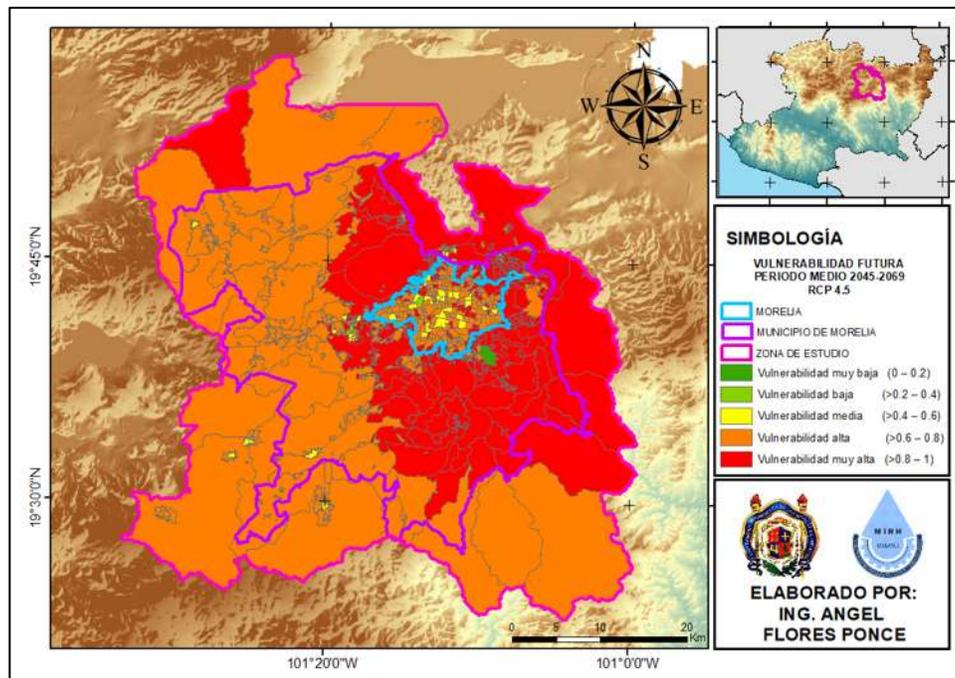


Figura 80. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo medio 2045-
2069 escenario RCP 4.5

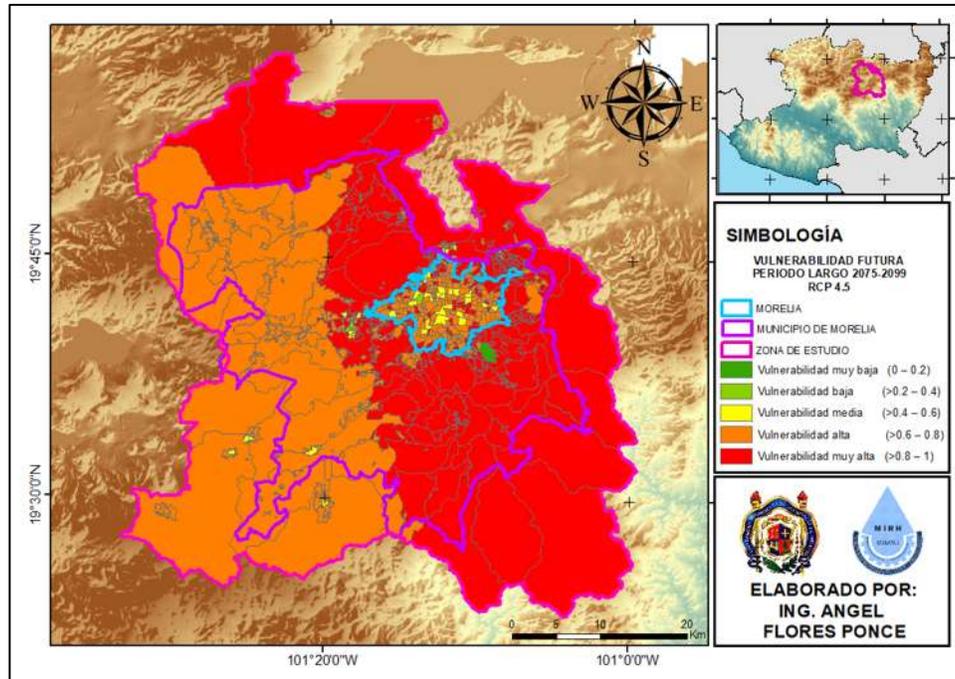


Figura 81. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo largo 2075-2099
escenario RCP 4.5

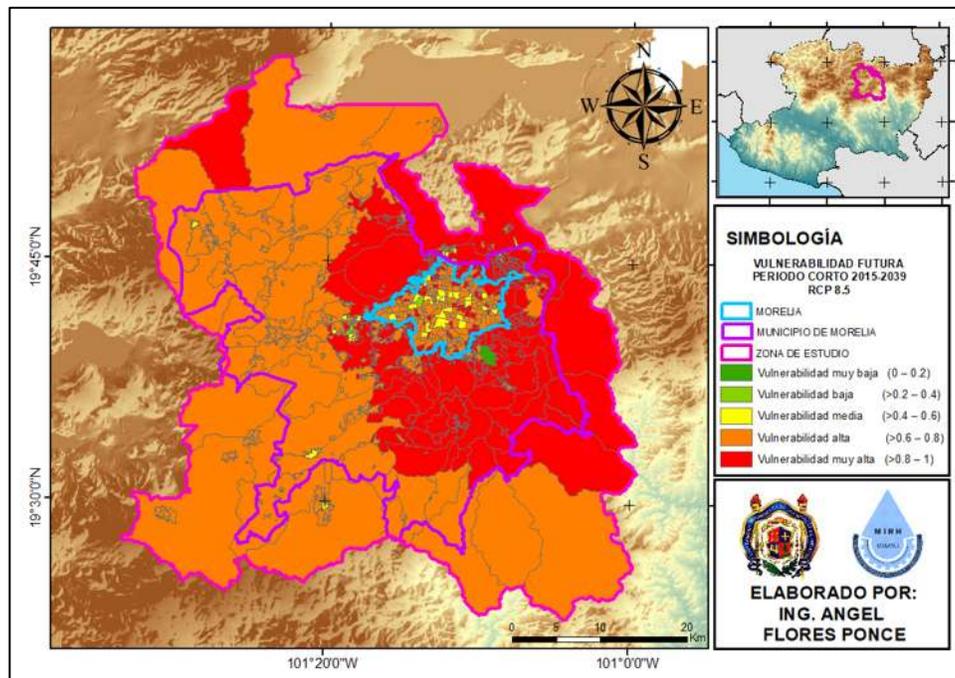


Figura 82. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo corto 2015-2039
escenario RCP 8.5

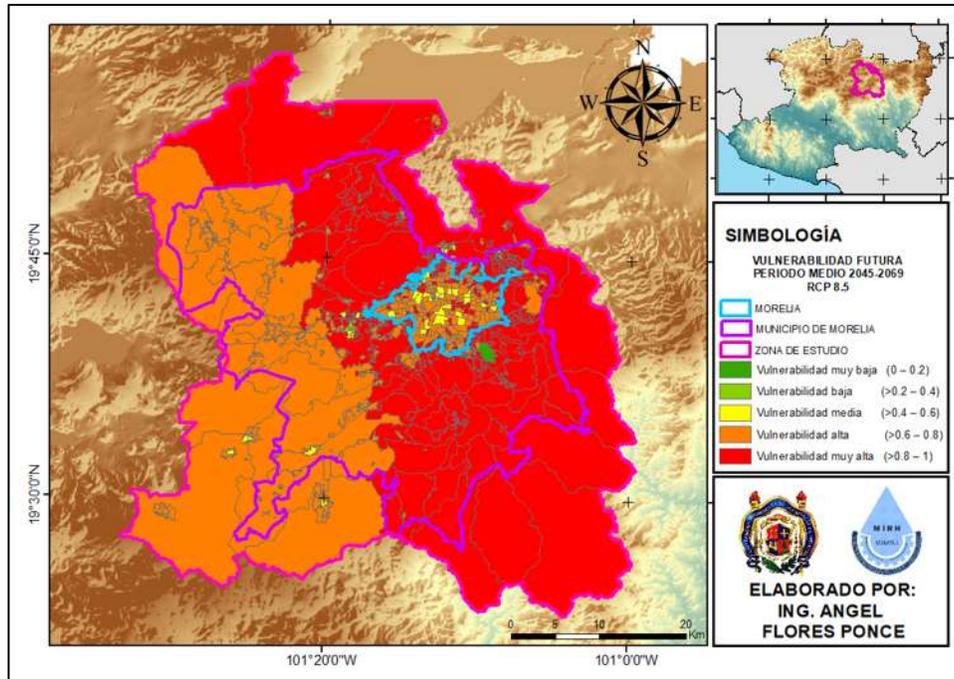


Figura 83. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 8.5

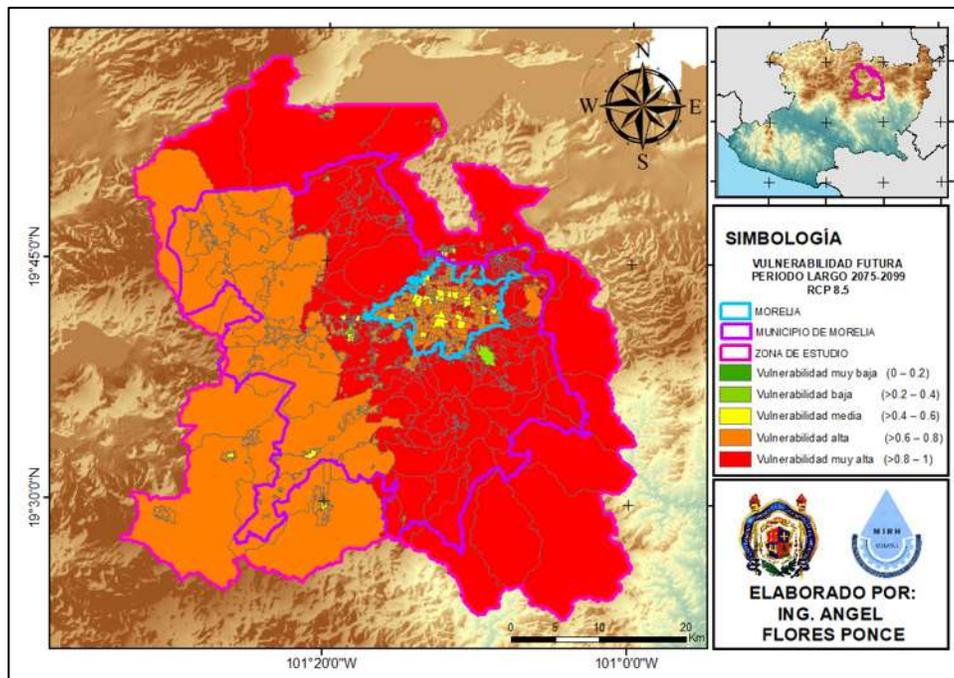


Figura 84. Mapa del índice de vulnerabilidad futura al cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 8.5

7.12.2 RIESGO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

La evaluación de riesgos combina peligro y vulnerabilidad, para lo cual calculamos el riesgo como una multiplicación de las probabilidades de los fenómenos provocados por el cambio climático y las vulnerabilidades a estos cambios Ecuación [13].

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} * \text{Vulnerabilidad}$$

Al tener los posibles escenarios de vulnerabilidad de acuerdo con los periodos futuros y a los escenarios de los RCP 4.5 y 8.5, así como las probabilidades de ocurrencia tanto de sequía como de humedad se realizaron los mapas de riesgo para la zona, los cuales se muestran de la Figura 85 a la Figura 98.

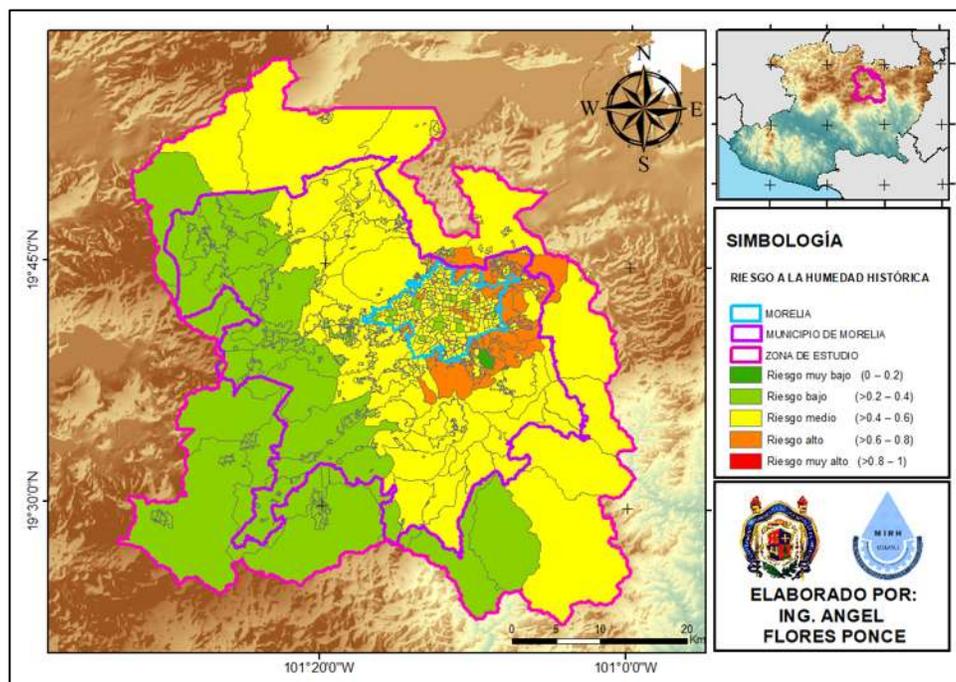


Figura 85. Mapa del índice de riesgo a la humedad periodo histórico

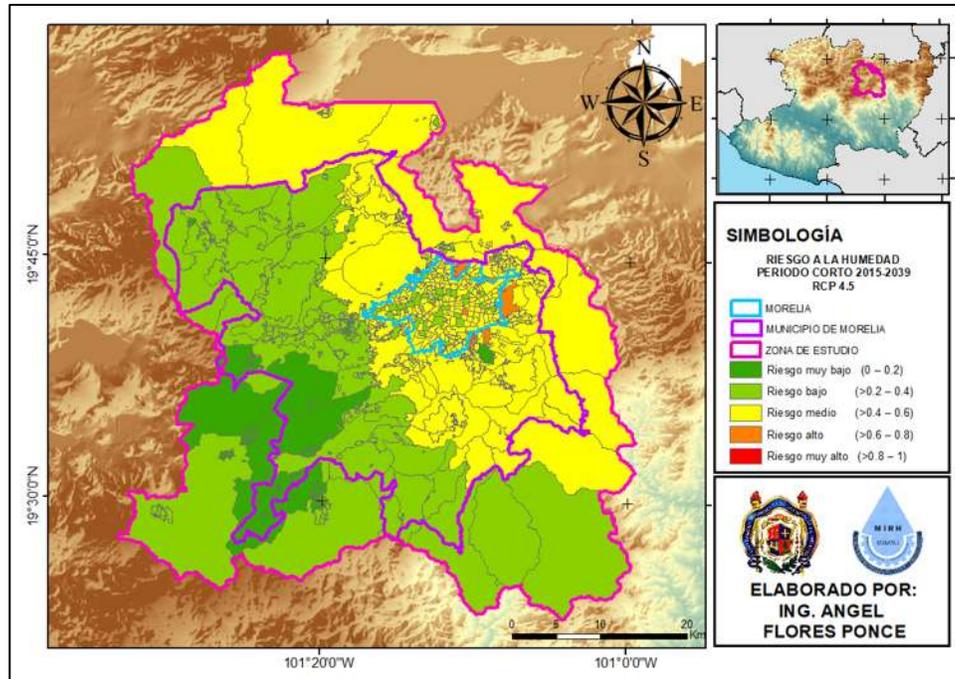


Figura 86. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 4.5

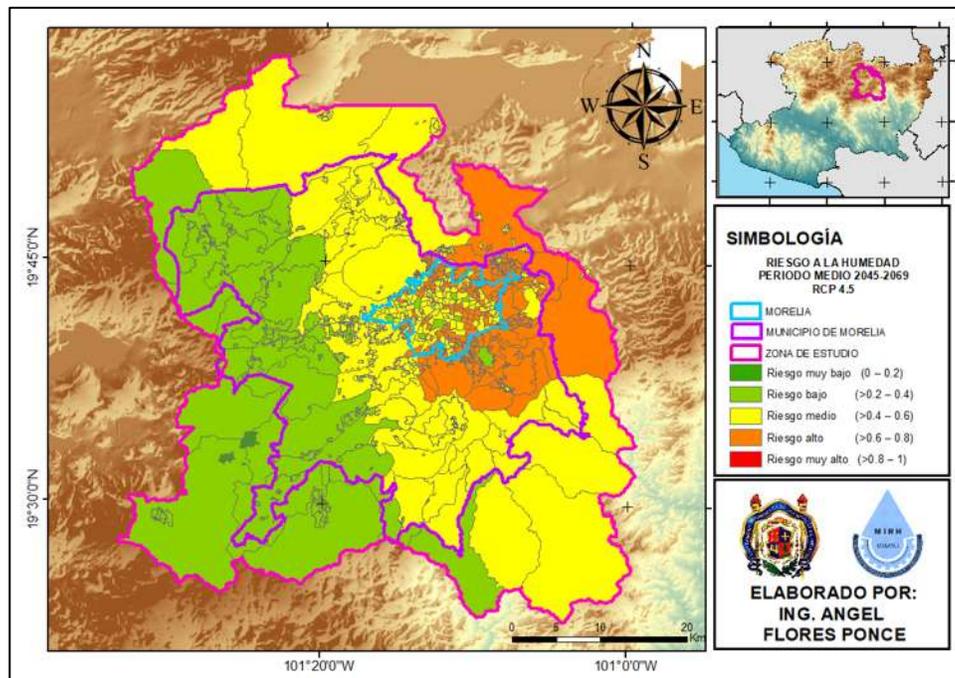


Figura 87. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 4.5

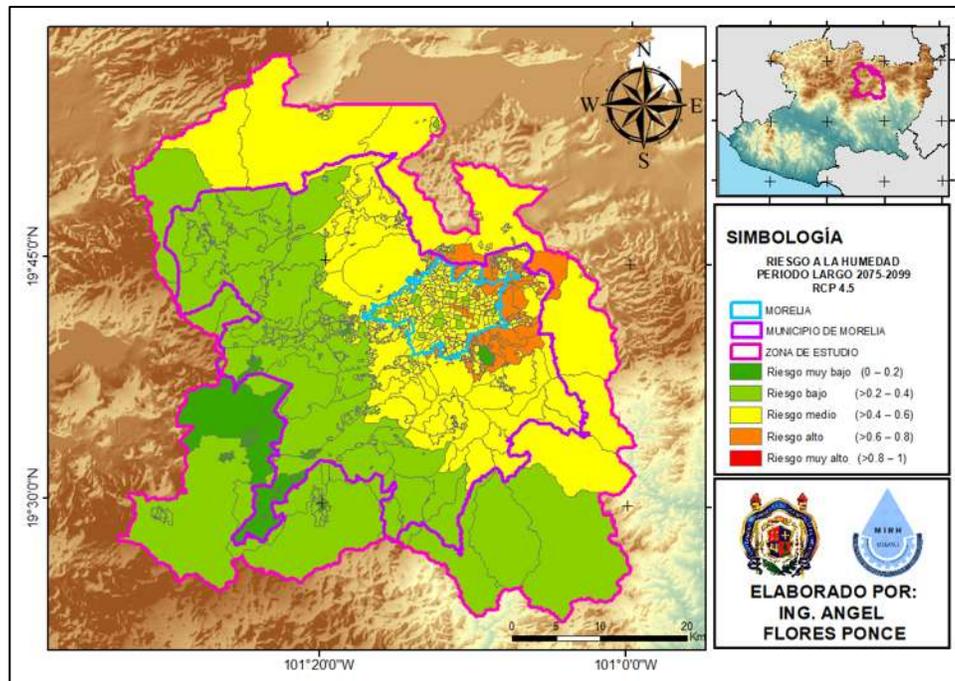


Figura 88. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 4.5

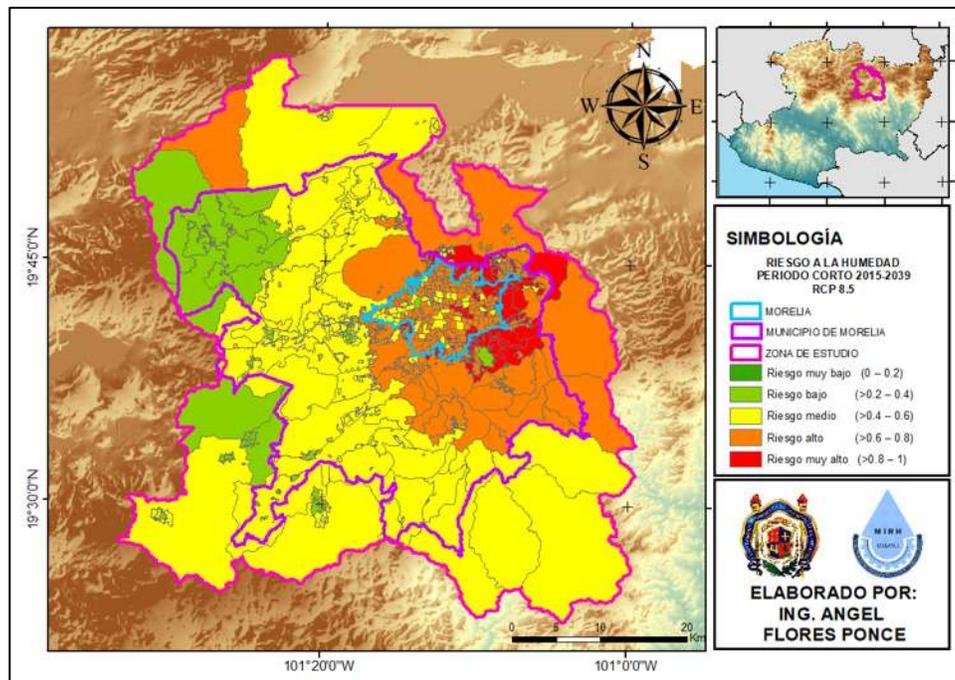


Figura 89. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5

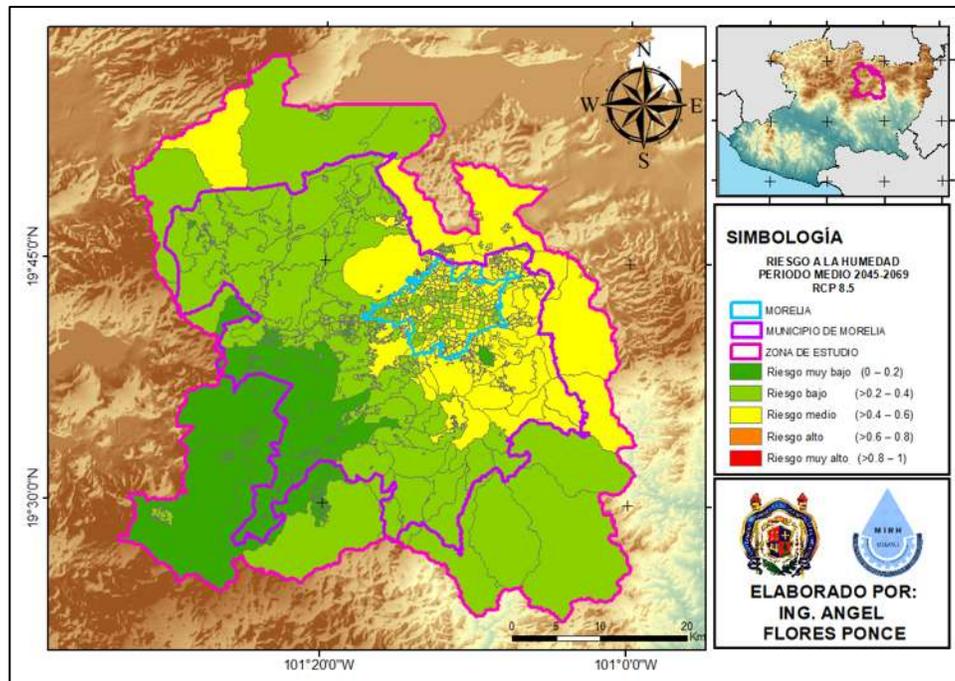


Figura 90. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 8.5

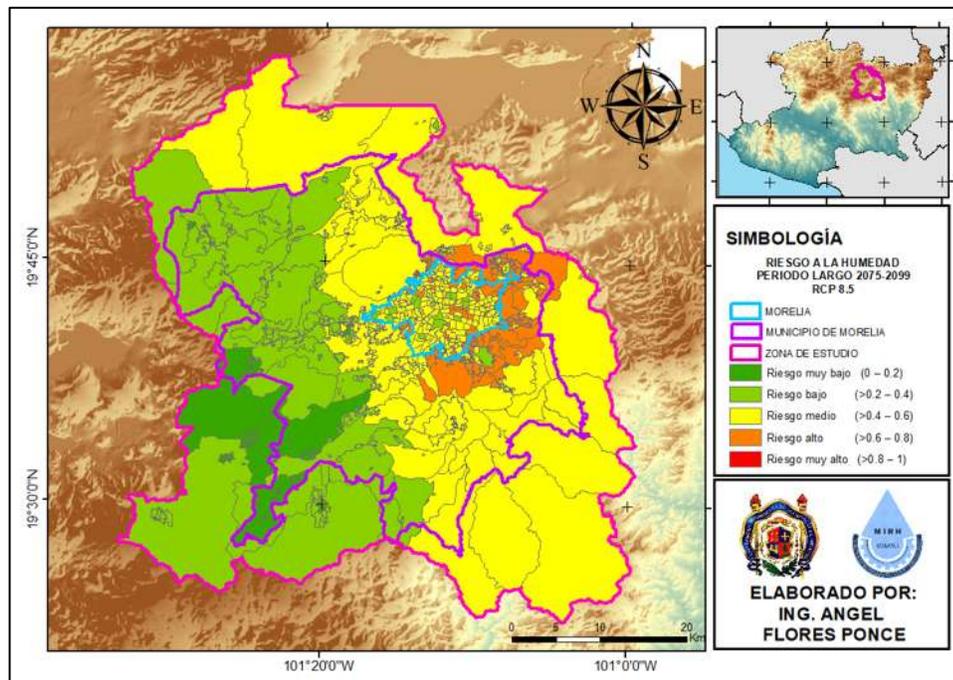


Figura 91. Mapa del índice de riesgo futuro a la humedad por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 8.5

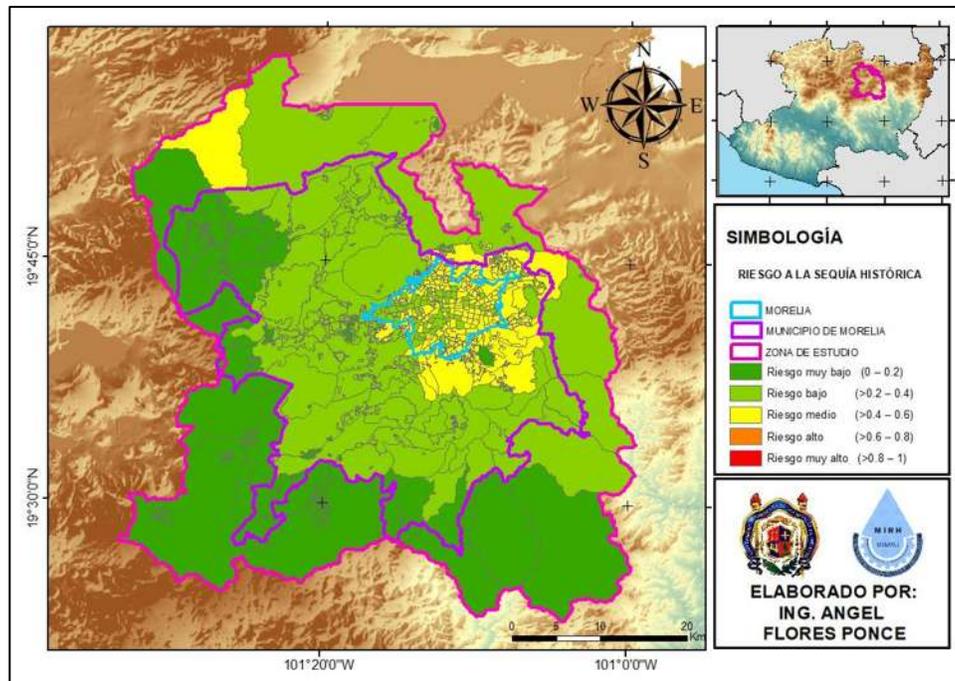


Figura 92. Mapa del índice de riesgo a la sequía periodo histórico

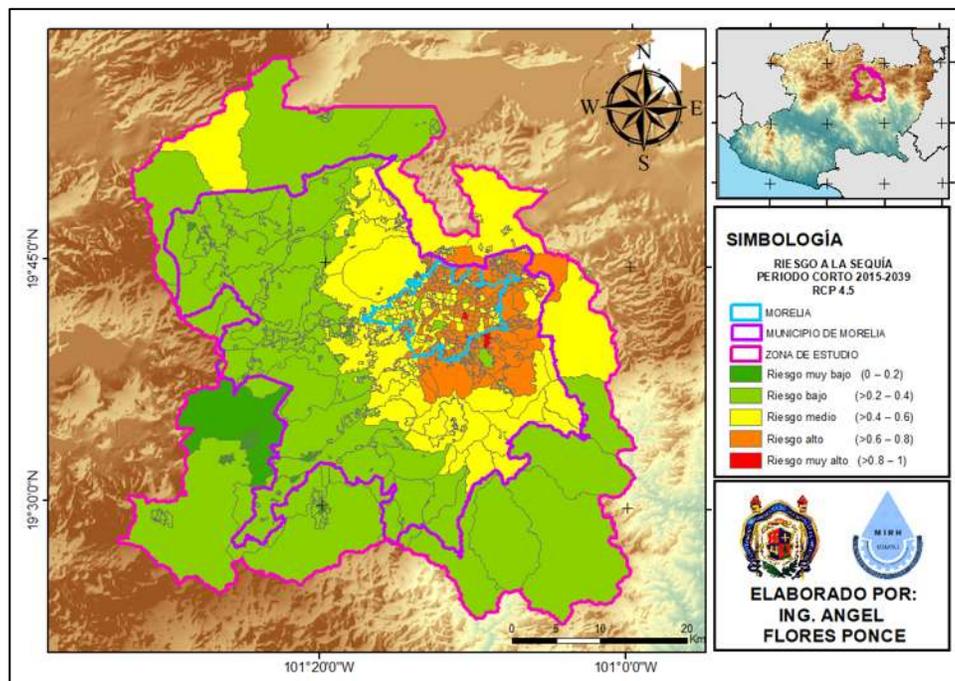


Figura 93. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo corto
2015-2039 escenario RCP 4.5

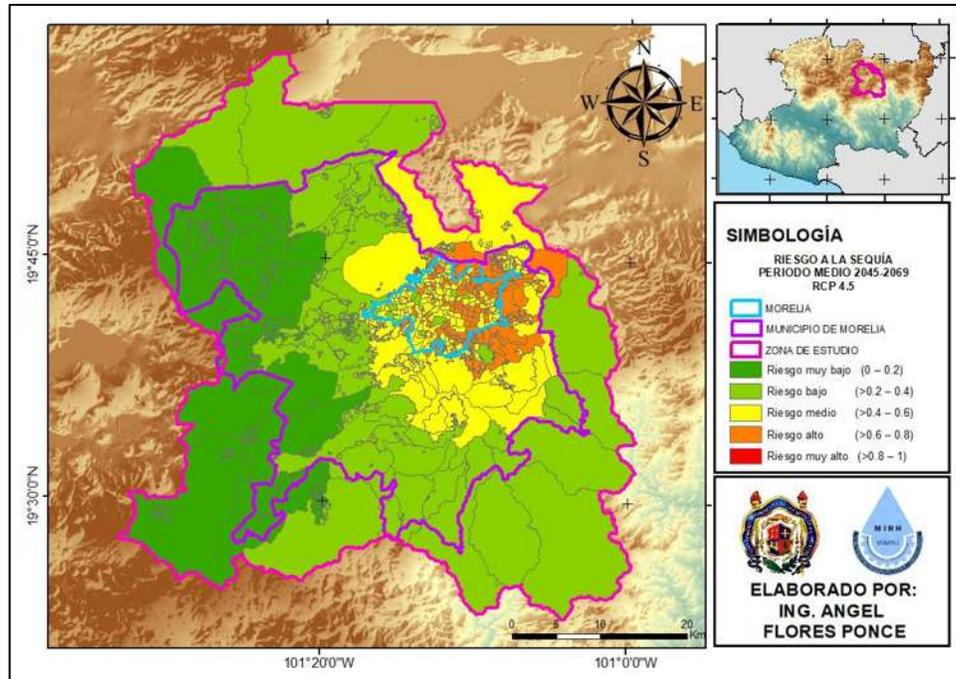


Figura 94. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 4.5

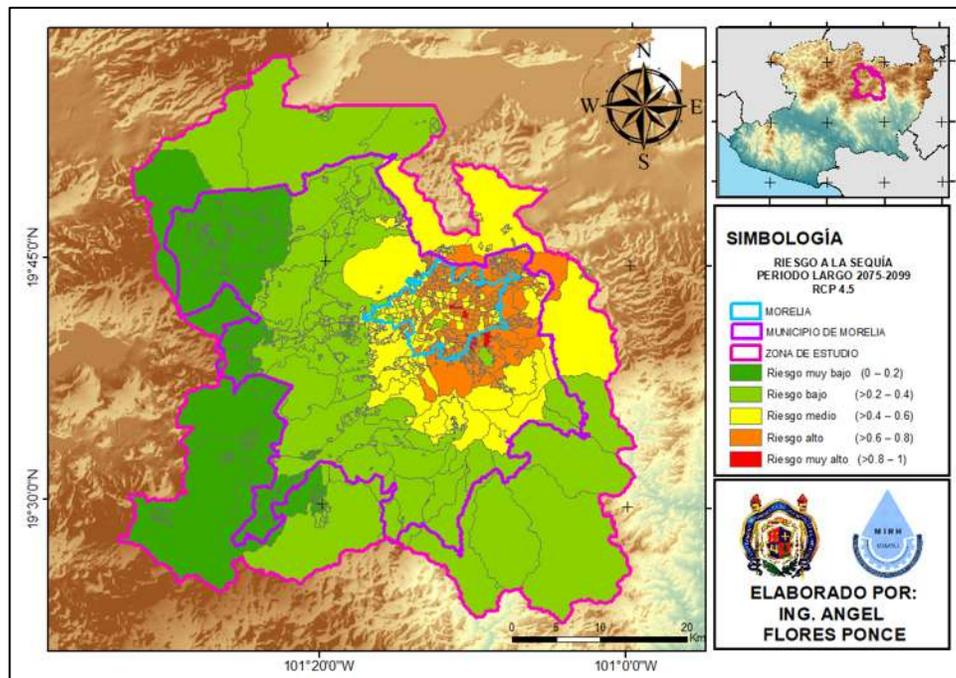


Figura 95. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 4.5

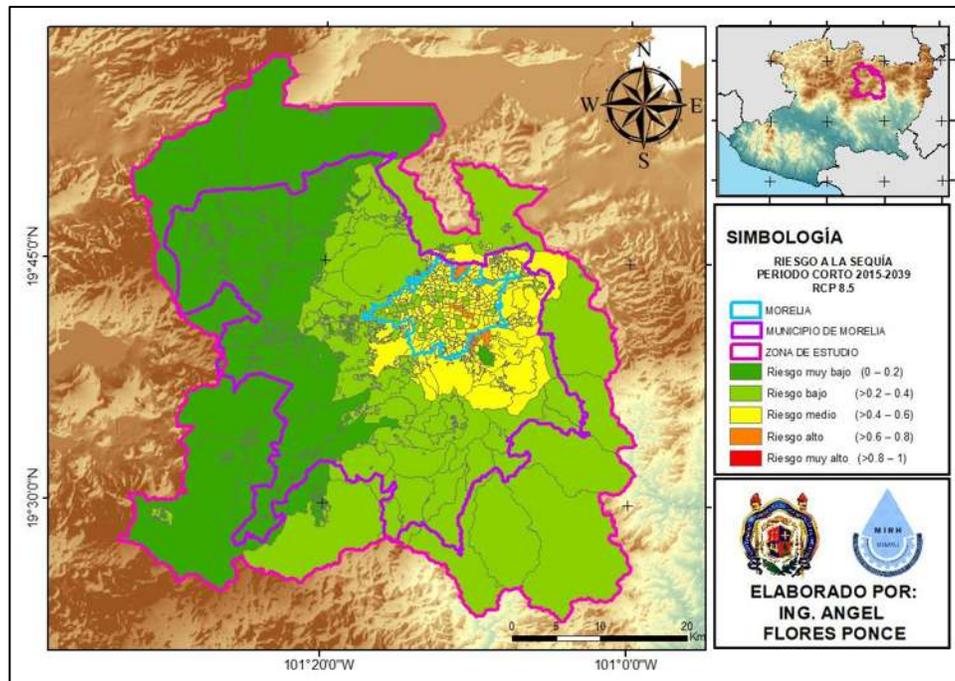


Figura 96. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo corto 2015-2039 escenario RCP 8.5

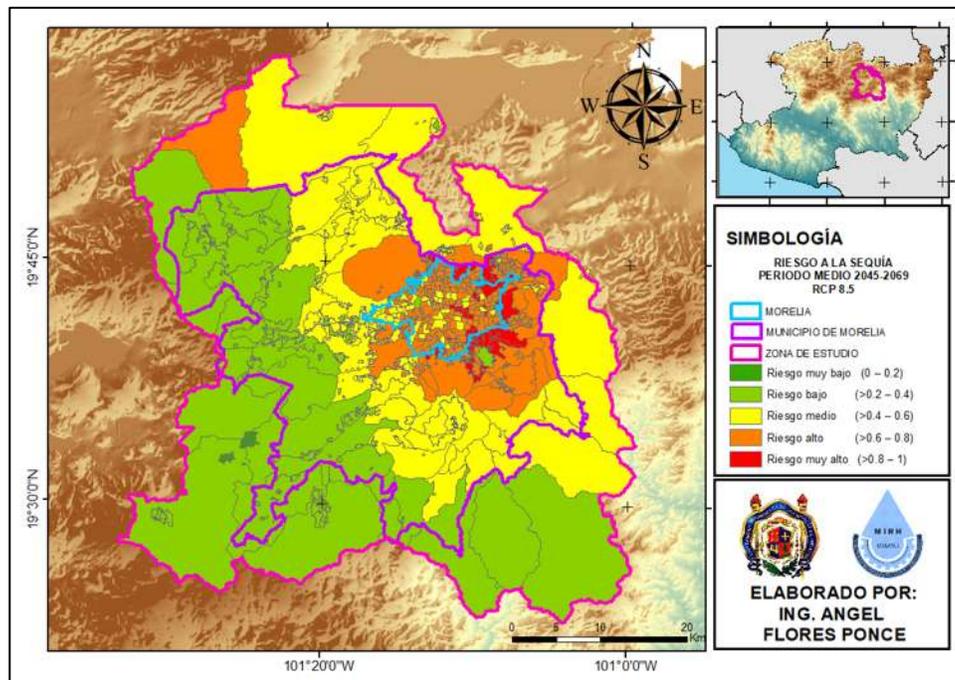


Figura 97. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo medio 2045-2069 escenario RCP 8.5

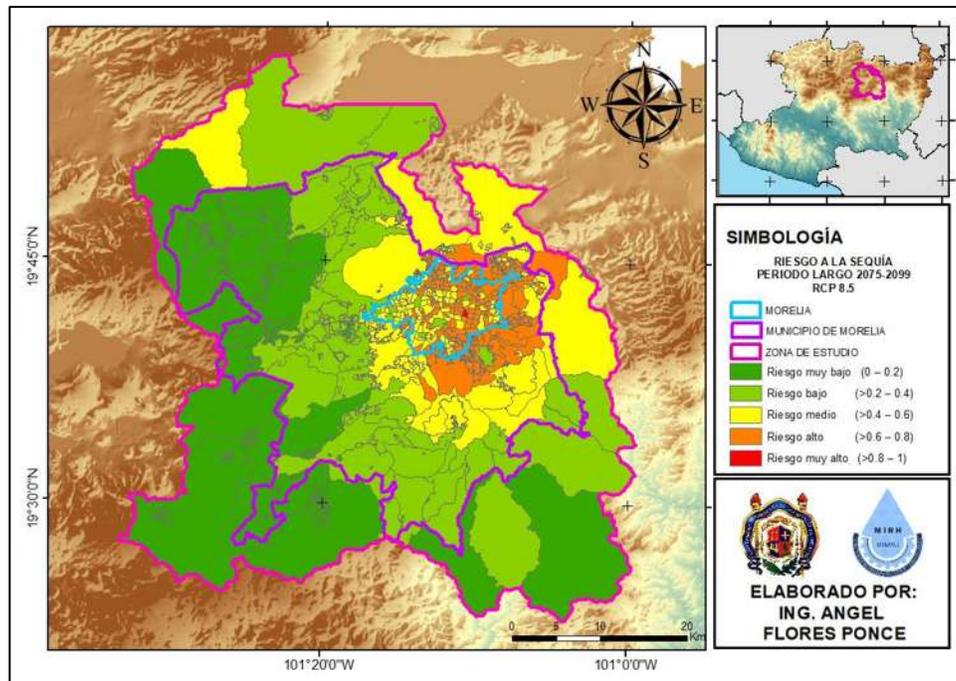


Figura 98. Mapa del índice de riesgo futuro a la sequía por el cambio climático periodo largo 2075-2099 escenario RCP 8.5

Como se observó en los mapas de los riesgos posibles futuros a la sequía y a la humedad, se puede apreciar que en la zona de estudio se presentan todos los posibles riesgos desde un riesgo muy bajo, hasta un riesgo muy alto ante los posibles escenarios de cambio climático, por lo que, al formular las medidas de adaptación ante estos posibles riesgos, se deberá considerar un amplio rango de alternativas existente para cada escenario.



7.12.3 FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN CON CONOCIMIENTO DEL RIESGO DE ABUNDANCIA Y ESCASEZ FUTURO CON CAMBIO CLIMÁTICO.

La formulación de las medidas de adaptación al cambio climático se realizó mediante el análisis del impacto que genera el cambio climático y la adaptación que se puede realizar para dichos impactos.

El apartado del impacto que se tendrá por el cambio climático está conformado por los siguientes elementos:

-Tipo de problema. Se analizan los problemas debido a los cambios en la precipitación, los cuales generan incrementos o disminuciones en los niveles de precipitación óptimos de la zona.

-Consecuencia. El aumento en la precipitación es generador de humedades que pueden traer consigo la existencia de inundaciones en la zona. Así como las disminuciones de precipitación traen consigo escasez que es generadora de sequías en el sitio.

-Nivel de riesgo. El nivel de riesgo fue obtenido mediante la elaboración de los mapas de riesgo ante las sequías y ante la humedad en la zona de estudio, producto de la obtención, manejo y modelación de la información meteorológica histórica y las posibles series futuras considerando el efecto del cambio climático. Los niveles de riesgo se han clasificado en cinco clases, las cuales son nivel de riesgo muy bajo estando en un nivel de 0 a 0.2, nivel de riesgo bajo estando entre >0.2 a 0.4, nivel de riesgo medio estando en el rango >0.4 a 0.6, nivel de riesgo alto ubicándose en un nivel >0.6 a 0.8 y el nivel de riesgo muy alto en el rango >0.8 a 1.

-Dominio de incertidumbre. Aborda la incertidumbre de la fiabilidad de los datos debidas a su origen de determinación y procesamiento. La incertidumbre ha sido reconocida durante muchos años por el IPCC de la ONU como crucial (IPCC, 2007, 2014, 2022).

-Fuente. La obtención de los niveles de riesgo ante los fenómenos de las sequías y humedades han sido adquiridas mediante la descarga, manejo y procesamiento



de las series meteorológicas históricas y de las series futuras posibles por el efecto del cambio climático, con dicha información se han conseguido los niveles de vulnerabilidad y las probabilidades de ocurrencia de estos fenómenos, mediante los cuales se han obtenido los mapas de riesgo en la zona de estudio, así como sus niveles de clasificación y acción.

-Naturaleza. El origen de los resultados es de manera epistémica debido a que los conceptos epistémicos incluyen el concepto de conocimiento, opinión fundada, justificación, probabilidad (epistémica) y otros conceptos que son usados con el fin de dar razón de opiniones y enunciados de conocimiento (Audi, 1996). La incertidumbre epistémica es la incertidumbre debida al conocimiento imperfecto y se puede reducir al obtener más conocimiento a través de la investigación, la recopilación de datos y el modelado.

Aceptada la existencia del cambio climático y obtenidos sus niveles de riesgo, se procede a realizar la matriz de riesgos y sus posibles medidas de respuesta de acuerdo con las actividades y entornos existentes, presentado en los siguientes apartados:

-Opción. Acciones de adaptación propuestas respecto a las necesidades y capacidades de respuesta, ante los efectos del cambio climático y los niveles de riesgo obtenidos.

-Tipo. Modelo que integra las características esenciales para ser empleado según sus requerimientos el cual puede ser de manera estructural o no estructural. Se considera de tipo estructural cuando estamos hablando de una construcción estructural que apunta a lograr edificaciones aptas y resistentes que cumplan con sus funciones frente a los factores de la naturaleza como lo es la lluvia. Mientras que los de tipo no estructural son los que no forman parte integral del sistema de edificación, entre los que se encuentran instalaciones básicas, elementos arquitectónicos no estructurales y los equipos o mobiliarios que pueden ser empleado ante situaciones establecidas.



-Nivel de costo. En los costos se han empleado 3 niveles que son bajo, medio y alto, en relación con el costo monetario que se requiere para llevar a cabo las opciones de adaptación.

-Intención. En la mayoría de los sectores algunas acciones de adaptación serán autónomas y otras serán planeadas. Los primeros tienden a ser tomados por individuos más que por agencias públicas, a menudo en respuesta a cambios en el entorno ambiental o cambios en las condiciones del mercado. Suelen consistir en medidas reactivas de duración a corto o medio plazo y, con frecuencia, son de alcance local. Por otro lado, las acciones planificadas normalmente las toman agencias públicas o grandes entidades del sector privado, a menudo en previsión del cambio climático y con una perspectiva a más largo plazo y un alcance espacial más amplio (Refsgaard et al., 2013).

-Acción. Indica la actividad que se realiza en un periodo de tiempo establecido, los cuales pueden ser de manera proactiva, concurrente o reactiva.

Proactiva, se refiere a tomar acciones anticipatorias antes de que ocurran los desastres provocados por el clima, anticipándose a su suceso y actuando antes de que acontezca.

Concurrente, son las medidas que pueden ser empleadas antes, durante o posteriormente que ha ocurrido el fenómeno y que se pueden emplear de manera simultánea con otras medidas y de acuerdo con el momento en que se ponga en práctica será su alcance temporal como espacial y su efectividad.

Reactiva, será la acción que se ponga en práctica una vez que ha ocurrido el fenómeno para ver los resultados esperados.

-Alcance temporal. Es el periodo de tiempo que abarcara la acción para conseguir resultados deseados y se clasifica en tres periodos, el primero es la reacción a corto plazo, el segundo es a mediano plazo y el tercero es a largo plazo.

El corto plazo es la medida más baja de tiempo, el cual tiene una extensión como máximo hasta un año.



El mediano plazo considera su alcance en un periodo de tiempo entre uno y cinco años.

El largo plazo es el que considera obtener los resultados en un periodo mayor a los cinco años después de ser puesto en marcha.

-Alcance espacial. El sitio donde se realizará la ejecución de la adaptación considera un alcance espacial ya sea localizado o uno de extendido poblacional. Entendiéndose como localizado a las medidas que pueden ser empleadas en lugares pequeños u específicos como son viviendas, calles o manzanas poblacionales, mientras que las medidas aplicadas a nivel extendido poblacional son las que se pueden emplear en colonias o municipios completos.

Dichas propuestas de medidas de adaptación al cambio climático se presentan en dos rubros, el primer rubro se enfoca en los tomadores de decisiones considerando al sector gubernamental y al institucional, el segundo rubro considera al sector poblacional.

Las medidas de adaptación enfocadas en los tomadores de decisiones, se presentan en la Tabla 27 para las humedades y en la

Tabla 28 para las sequías, mientras que las medidas formuladas para el sector poblacional se presenta en la Tabla 29 para las humedades y en la Tabla 30 para las sequías. En dichas tablas se presenta la matriz de riesgo donde se analizan los impactos del cambio climático para los fenómenos de las humedades y las sequías en sus distintos niveles de riesgo, junto con las medidas de adaptación propuestas a estos niveles obtenidos para los distintos sectores.



Tabla 27. Medidas de adaptación a las humedades para Morelia Michoacán, enfocadas a los tomadores de decisiones.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO					ADAPTACIÓN						
TIPO DE PROBLEMA	CONSECUENCIA	NIVEL DE RIESGO	DOMINIO DE INCERTIDUMBRE		OPCIÓN	TIPO	NIVEL DE COSTO	INTENCIÓN	ACCIÓN	ALCANCE TEMPORAL	ALCANCE ESPACIAL
			FUENTE	NATURALEZA							
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad moderada generadoras de inundaciones	Muy Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Ayudas o subvenciones de la Administración General del Estado	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Realizar planes de ordenamiento urbano-ambiental que consideren los niveles de riesgo	No Estructural	Bajo Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Campañas de educación (formal e informal)	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad moderada generadoras de inundaciones	Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Invertir en equipamiento y el desarrollo de recursos humanos para el sistema de alerta hidrológico	No Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
					Reparación y cambio de tuberías en mal estado	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional



					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad media generadoras de inundaciones	Medio	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Sistema de captación de agua de lluvia	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Barreras anti-inundación temporales	Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Dispositivos de bloqueo temporal	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Creación de áreas de inundación controlada.	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Reactiva	Mediano plazo	Localizado
					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
Aumento de las precipitaciones en distintas	Aumento de las abundancias de humedad extrema	Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de	Epistémico	Generación de presas rompe picos para evitar los impactos de inundación	Estructural	Alto	Planeada	Proactiva Concurrente	Largo plazo	Extendido poblacional y por sectores



épocas del año	generadoras de inundaciones	Muy Alto	índices de sequía y humedad		Construcción de diques, muros estancos y barreras permanentes	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Localizado
					Terraplenes y movimientos de tierra integrados en el paisaje	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Localizado
					Sistemas de circulación y filtrado de agua	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
					Creación de sistemas de drenaje	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad extrema generadoras de inundaciones	Muy Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Realizar obras adicionales de defensa contra inundaciones y de conducción o retención de los excedentes hídricos	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
					Mejorar el uso del territorio como estrategia para disminuir la vulnerabilidad	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Largo plazo	Extendido poblacional



			Instalaciones de depuración de aguas	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Largo plazo	Extendido poblacional
			Articular las acciones de adaptación con otras acciones operativas que se plasman, ya sea en programas de desarrollo (Programas de Manejo de Cuencas, Programas y Proyectos de Riego, Programas de Salud, etc.)	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
			Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
			Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional



Tabla 28. Medidas de adaptación a las sequías para Morelia Michoacán, enfocadas a los tomadores de decisiones.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO					ADAPTACIÓN						
TIPO DE PROBLEMA	CONSECUENCIA	NIVEL DE RIESGO	DOMINIO DE INCERTIDUMBRE		OPCIÓN	TIPO	NIVEL DE COSTO	INTENCIÓN	ACCIÓN	ALCANCE TEMPORAL	ALCANCE ESPACIAL
			FUENTE	NATURALEZA							
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía moderada	Muy Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Promover el reúso de agua residual tratada y su intercambio por agua de primer uso	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Vigilar y proteger las zonas de recarga.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Promover el reúso de agua mediante campañas dirigidas a los sectores productivos y sociedad.	No Estructural	Bajo	Planeada	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Calendarización de riego	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Hacer uso de medidas ahorradoras de agua, como los riegos nocturnos.	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Crear conciencia en la sociedad sobre el uso responsable del agua.	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Establecer incentivos para reúso del agua	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional



					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía moderada	Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Promover el reúso de agua mediante campañas dirigidas a los sectores productivos y sociedad.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Mejorar la medición del suministro y el consumo del agua.	Estructural	Bajo Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Reducir pérdidas en los sistemas hidráulicos de todos los usos	Estructural	Bajo Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Regular el mercado del agua.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
					Optimizar el funcionamiento de la infraestructura de tratamiento existente.	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Localizado
					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional



					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía media	Medio	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Reúso de agua tratada para zonas de riego	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Evitar las fugas o pérdida de agua de los canales de distribución del agua.	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Localizado
					Reúso de aguas tratadas para el riego de parques públicos	No Estructural	Bajo	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Reúso de agua a nivel industrial	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Realizar los estudios necesarios para identificar las zonas potenciales para el reúso del agua en la Región.	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional Localizado
					Tecnologías de bajo consumo en el sector industrial	Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva	Mediano plazo	Localizado
					Impulsar la reparación de fugas y tecnologías domésticas en zonas críticas	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Extendido poblacional Localizado



					Mejorar la medición del suministro de agua para uso agrícola, público urbano e industrial.	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional Localizado
					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional Localizado
					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional Localizado
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía extrema	Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Captación y recolección de agua de lluvia en los tejados de las viviendas	Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Rehabilitar y ampliar la infraestructura de almacenamiento	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Extendido poblacional
					Transferir agua entre cuencas en condiciones sustentables.	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Localizado
					Recargar artificialmente los acuíferos en condiciones sustentables.	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Localizado
					Tecnologías de bajo consumo en el sector agropecuario	Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Localizado
					Estimular la descarga cero en empresas.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado



					Construir, adquirir e instalar equipo de medición y control del agua	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Desarrollar nuevos sistemas ahorradores de agua.	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía extrema	Muy Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Reducir la evaporación en embalses	Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Localizado
					Establecer mecanismos legales que fomenten la captación y aprovechamiento de agua pluvial.	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Extendido poblacional
					Estimular la descarga cero en empresas	Estructural	Alto	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Localizado
					Apoyar la adquisición de nueva maquinaria y equipo de conservación.	No Estructural	Alto	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional



				Revisar las concesiones y asignaciones otorgadas en función de los estudios actualizados de disponibilidad del agua.	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
				Generalizar la compra de derechos para recuperación ambiental de las cuencas.	No Estructural	Alto	Planeada	Proactiva Concurrente	Largo plazo	Localizado
				Promover el establecimiento de impuestos locales por contaminación de aire, agua y suelo.	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
				Desarrollar modelos de calidad del agua superficial.	No Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
				Desarrollar modelos de calidad del agua subterránea.	No Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
				Diseñar los incentivos económicos, fiscales y financieros para el uso de fuentes alternas.	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Mediano plazo	Extendido poblacional
				Crecimiento urbanístico sostenible.	No Estructural	Alto Medio	Planeada	Proactiva Concurrente	Largo plazo	Extendido poblacional
				Sistemas de Alerta Temprana	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional



				Planes informativos en Medios clásicos de comunicación, redes sociales y Apps.	No Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
--	--	--	--	--	----------------	------------	-------------------	--------------------------------	-------------	-----------------------

Tabla 29 Medidas de adaptación a las humedades para Morelia Michoacán, enfocadas al sector poblacional.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO				ADAPTACIÓN							
TIPO DE PROBLEMA	CONSECUENCIA	NIVEL DE RIESGO	DOMINIO DE INCERTIDUMBRE		OPCIÓN	TIPO	NIVEL DE COSTO	INTENCIÓN	ACCIÓN	ALCANCE TEMPORAL	ALCANCE ESPACIAL
			FUENTE	NATURALEZA							
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad moderada generadoras de inundaciones	Muy Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Válvulas anti-retorno. Instalación permanente.	Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Protección contra el retorno de aguas residuales. Instalación temporal.	Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Colocar plantas de interior absorbentes de humedad.	No Estructural	Bajo Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Contar con una excelente ventilación cruzada y ventiladores, ayuda a que la casa este libre de humedad.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado



					Revisar empaques de las ventanas y el sellado de las mismas, evitando así filtraciones de agua y humedad entre los paños de vidrio o la estructura misma.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Limpiar la azotea y sus desagües, así como la calle y sus atarjeas para que no se tapen con basura.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Revise cuidadosamente su casa para cerciorarse de que no haya peligro.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad moderada generadoras de inundaciones	Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Sellado e impermeabilización de paredes exteriores y soleras	Estructural	Bajo Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Elevación o sellado de umbrales de entrada	Estructural	Bajo Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Llenar recipientes con agua limpia, en caso de que el agua de la llave se contamine.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Procure un lugar para proteger a sus animales.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado



					No dejar solos a los niños, personas de la tercera edad o personas con capacidades diferentes. Si lo hace, infórmelo a sus vecinos.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad media generadoras de inundaciones	Medio	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Sistema de captación de agua de lluvia	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Localizado
					Mover a un lugar alto los elementos de más valor.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Dispositivos de bloqueo temporal	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Reparación y cambio de tuberías en mal estado	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Creación de áreas de inundación controlada.	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Colocar documentos importantes en una bolsa de plástico para que no se destruyan con el agua.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Mantenerse alerta a los comunicados de las autoridades y las medidas establecidas por la Dirección de Protección Civil.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad extrema	Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de	Epistémico	Tener a mano una linterna y asegurarse de que tenga pilas.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado



épocas del año	generadoras de inundaciones	Muy Alto	índices de sequía y humedad		Escuche su estación de radio o canal de televisión local para saber si hay novedades.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Llevar adentro las cosas que tenga afuera (muebles de jardín, parrillas, botes de basura) o amarrarlas bien a un lugar fijo.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Si está en la calle, tener precaución al caminar sobre agua, ya que las tapas de las cámaras de agua suelen salirse debido a la presión, y puede caer en dicho hueco.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Cerciórese de que sus aparatos eléctricos estén secos antes de conectarlos.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
Aumento de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de las abundancias de humedad extrema generadoras de inundaciones	Muy Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Identificar una ruta de evacuación, y otras vías alternativas y estar preparado para evacuar.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Tener a mano el kit para emergencias.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Guardar en un buen lugar algo de comida, agua y ropa.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado



				Cortar la luz, agua y gas y evacuar si la situación lo amerita o las autoridades así lo indican.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
				Evitar manejar por áreas inundadas y agua estancada. Tan solo quince centímetros de agua pueden hacer perder el control del vehículo.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
				Reporte inmediatamente sobre los posibles heridos a los servicios de emergencia.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional

Tabla 30 Medidas de adaptación a las sequías para Morelia Michoacán, enfocadas al sector poblacional.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO				ADAPTACIÓN							
TIPO DE PROBLEMA	CONSECUENCIA	NIVEL DE RIESGO	DOMINIO DE INCERTIDUMBRE		OPCIÓN	TIPO	NIVEL DE COSTO	INTENCIÓN	ACCIÓN	ALCANCE TEMPORAL	ALCANCE ESPACIAL
			FUENTE	NATURALEZA							
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía moderada	Muy Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Instalación de aireadores con limitadores de flujo en todos los grifos del hogar.	Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Calendarización de riego	No Estructural	Bajo Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional



					Hacer uso de medidas ahorradoras de agua, como los riegos nocturnos.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Crear conciencia en la sociedad sobre el uso responsable del agua.	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional
					Sembrar césped, cubiertas de suelo, arbustos y árboles nativos y/o resistentes a sequía.	No Estructural	Bajo Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Mediano plazo	Extendido poblacional
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía moderada	Bajo	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Utilizá sistemas de riego que permitan una mejor utilización del agua.	Estructural	Alto Medio	Planeada Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Reemplazo de las arandelas en los grifos para arreglar las fugas.	Estructural	Bajo Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Escoger electrodomésticos más eficientes en cuanto al uso de energía y agua.	No Estructural	Bajo Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					No utilizar elementos ornamentales que consumen agua (como fuentes) a menos que usen agua reciclada.	No Estructural	Bajo	Planeada Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					No dejar la llave abierta mientras se cepilla los dientes, se lava la cara o se afeita.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado



					Ahorrar consumo en las labores de limpieza del hogar y de utensilios.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					No divulgue ni haga caso de rumores.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva	Corto plazo	Localizado
					Reúso de aguas grises domésticas	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Utilizar ahorradores de agua en todos los grifos y duchas.	Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Agendá los números locales de Protección Civil, Bomberos y Policía.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Extendido poblacional
					Emplear un inodoro de bajo volumen que utilice menos de la mitad del agua usada por modelos antiguos.	Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Operar las lavadoras solamente cuando están completamente cargadas o configure el nivel del agua de acuerdo con el tamaño con la tanda.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía media	Medio	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico							
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía extrema	Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de	Epistémico	Captación y recolección de agua de lluvia en los tejados de las viviendas	Estructural	Bajo Medio	Planeada Autónoma	Proactiva Concurrente	Corto plazo	Extendido poblacional



épocas del año			índices de sequía y humedad		Envolver las tuberías de agua con material aislante para reducir la pérdida de calor y evitar roturas.	Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Evitar descargas innecesarias del inodoro.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Optar por duchas breves en vez de baños en la tina.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Escuche su estación de radio o canal de televisión local para saber si hay novedades.	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
Disminución de las precipitaciones en distintas épocas del año	Aumento de la escasez de precipitación generadoras de sequía extrema	Muy Alto	Proyección de cambio climático con parámetros hidrometeorológicos y modelación de índices de sequía y humedad	Epistémico	Solicitar ayuda del gobierno	No Estructural	Bajo	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Tener a mano el kit para emergencias.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Guardar en un buen lugar algo de comida, agua y ropa.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Proactiva Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
					Cortar la luz, agua y gas y evacuar si la situación lo amerita o las autoridades así lo indican.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado



				Si su vivienda está en la zona afectada, podrá regresar a ella cuando las autoridades lo indiquen.	No Estructural	Alto Medio	Autónoma	Concurrente Reactiva	Corto plazo	Localizado
--	--	--	--	--	----------------	------------	----------	----------------------	-------------	------------



7.12.4 APLICACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN LA ZONA (SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA Y PLANES INFORMATIVOS EN MEDIOS CLÁSICOS COMO LAS REDES SOCIALES)

Una vez obtenidas las medidas de adaptación ante el cambio climático para las sequías y las humedades, y debido a que para todos los niveles de riesgo se propone la implementación de un sistema de alerta temprana y planes informativos en medios clásicos como las redes sociales, se implementaron estas medidas para ponerlas en marcha.

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Un sistema de alerta temprana es una medida de adaptación al cambio climático que utiliza sistemas de comunicación integrados con el fin de ayudar a las comunidades a prepararse para los peligros relacionados con el clima (Naciones Unidas, 2021).

Para la implementación de esta medida de adaptación al cambio climático y con la obtención de los mapas de riesgo en la zona se pone esta información a disposición pública a través de la plataforma web:

<https://adaptacionmorelia.com/> (Código QR Figura 99 presentada en ANEXO 2)

El diseño de la plataforma y sus páginas que la conforman se presentan en el **ANEXO 2**.



PLANES INFORMATIVOS EN MEDIOS CLÁSICOS COMO LAS REDES SOCIALES

Actualmente, las redes sociales son el principal medio utilizado por la población para mantenerse en contacto, es por esto que poner a disposición la información de los mapas de los índices implementados para la obtención de vulnerabilidad, así como los mapas de riesgo a los fenómenos de sequía y humedad, estos medios son los más adecuados para interactuar con la sociedad y que tenga conocimiento de lo puesto en estudio, las plataformas empleadas y su acceso se presentan en el **ANEXO 3**.



8. CONCLUSIONES

La adaptación al cambio climático es un tema sumamente relevante, con un gran número de puntos de acción y toma de decisiones, los cuales hacen que sea un tema que siempre está en continuo desarrollo, debido a la importancia que tiene en la actualidad y que en épocas futuras será esencial su conocimiento y su empleo.

El municipio de Morelia Michoacán posee gran importancia por ser una zona urbana y de gran atractivo turístico, lo que lo hace susceptible al cambio climático y donde es esencial la implementación de medidas de adaptación desde un punto de vista autónomo como sociedad y habitantes del sitio, como de uno de tipo planeado donde se involucra la necesidad de la acción de sectores públicos que pongan en marcha estas medidas para los cambios en el clima que son cada día más notorios y a los que nos debemos de adaptar.

La obtención de la precipitación y los escurrimientos para el periodo histórico, así como para el futuro permitieron la evaluación de las abundancias de precipitación y sequías en el municipio de Morelia, a través de las cuales se pudo obtener las vulnerabilidades ante el cambio climático, así como sus respectivos riesgos, dando paso a al desarrollo de medidas de adaptación al cambio climático.

La obtención de la información requerida para la realización de esta investigación requirió mayor cantidad de procesos y pruebas para disponer de información de calidad, debido a la falta de equipos necesarios y óptimos en México para obtener estas series de datos, así como la implementación de índices y modelos aplicados en la investigación, se vieron limitados respecto a la cantidad de información y variables disponibles para su análisis.

Las medidas de adaptación es un área de estudio el cual sigue en desarrollo y es tan extensamente posible de análisis como el investigador lo desee, ya que puede ser abordado de distintas áreas de interés desde un interés del sector salud, como para uno de edificación, para un sector agrícola, para el sector social, entre muchos otros.



Debido a que no existe una única metodología para la generación de medidas de adaptación, así como para la obtención de las vulnerabilidades esenciales para el conocimiento del riesgo en la zona y que en México actualmente no se cuenta con una aplicación ni metodología única para estas variables, hace que las posibilidades de obtención de medidas de adaptación se incrementen tanto como el usuario lo desee.

La generación de medidas de adaptación al cambio climático en el municipio de Morelia es de gran aporte tanto para la sociedad, como para los tomadores de decisiones, debido a que con el conocimiento de estos riesgos y las medidas que se pueden aplicar para cada uno de ellos, permite que la población pueda actuar ante estas necesidades de acción frente a estos fenómenos.



9. RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

En la actualidad todos los estudios deberían de ir acompañados por los efectos del cambio climático, debido a que es un tema que cada día toma más importancia para todos.

La implementación de las medidas de adaptación debe de ser de acuerdo con las necesidades de los habitantes del sitio, así como de sus posibilidades físicas y económicas.

Debido a que es un tema que sigue en desarrollo y con una cantidad inmensa de posibilidades existe la posibilidad de generar líneas de investigación que consideren diferentes sectores y variables, ya sea para reforzar esta investigación con otros aspectos o para analizar sectores distintos.

Al ser un tema actual es posible realizar investigaciones de interés de acuerdo con lo que sucede en el momento de análisis, en este caso existe una gran área de estudio para la relación del cambio climático con el sector salud y con el de la agricultura y ganadería, entre ellos un tema en auge es el cambio climático y su relación con el COVID- 19 y como adaptarse a estos cambios.

De igual manera existe el interés de la obtención del efecto del cambio climático en las estructuras y en los patrimonios históricos y como adaptarse a ellos.



10. ANEXOS

ANEXO 1

RELACIÓN DE ABUNDANCIAS Y ESCASEZ CON LOS FENÓMENOS DEL NIÑO Y LA NIÑA.

El fenómeno del Niño o simplemente El Niño, es un fenómeno o evento de origen climático relacionado con el calentamiento del Pacífico oriental ecuatorial, el cual se manifiesta erráticamente cíclico que consiste en realidad en la fase cálida del patrón climático del Pacífico ecuatorial denominado El Niño-Oscilación del Sur donde la fase de enfriamiento recibe el nombre de La Niña (Dewitte & Takahashi, 2019).

La ocurrencia de los fenómenos del niño y la niña se obtuvo del National Weather Service Climate Prediction Center de Estados Unidos (NOAA, 2021) y por el Australian Government Bureau of Meteorology (BOM, 2021), estos se pusieron en comparación con los años que existió humedad o sequía en la zona de estudio, obteniendo lo que se muestra en la Tabla 31.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la humedad y sequía ocurridos en la zona de estudio, así como la información recopilada de los fenómenos del niño y la niña, se puede observar que no hay una relación directa entre estos fenómenos, en algunos años coincide que en la existencia de sequías suceda mientras esta la ocurrencia del fenómeno del niño y que la ocurrencia de humedades este durante la existencia del fenómeno de la niña, pero no todos los años es así, en algunos años incluso ocurre lo contrario.



Tabla 31. Relación de la abundancia y escasez con el fenómeno del niño y la niña

AÑO	Abundancia y escasez	Fenómenos del Niño y la Niña
1969	Moderadamente seco	Niño
1970	Normal	Niña
1971	Moderadamente húmedo	Niña
1972	Moderadamente húmedo	Niño
1973	Moderadamente húmedo	Niña
1974	Moderadamente húmedo	Niña
1975	Normal	Niña
1976	Muy húmedo	Niño
1977	Normal	Niño
1978	Normal	No Fenómenos
1979	Extremadamente seco	Niño
1980	Normal	No Fenómenos
1981	Moderadamente húmedo	No Fenómenos
1982	Muy seco	Niño
1983	Normal	Niña
1984	Normal	Niña
1985	Moderadamente seco	No Fenómenos
1986	Normal	Niño
1987	Muy seco	Niño
1988	Normal	Niña
1989	Muy seco	No Fenómenos
1990	Normal	No Fenómenos
1991	Normal	Niño
1992	Muy húmedo	No Fenómenos
1993	Moderadamente húmedo	No Fenómenos
1994	Moderadamente seco	Niño
1995	Moderadamente húmedo	Niña
1996	Muy seco	No Fenómenos
1997	Muy seco	Niño
1998	Moderadamente húmedo	Niña
1999	Normal	Niña
2000	Extremadamente seco	Niña
2001	Extremadamente húmedo	No Fenómenos
2002	Extremadamente húmedo	Niño
2003	Moderadamente húmedo	No Fenómenos
2004	Moderadamente húmedo	Niño
2005	Normal	Niña
2006	Normal	Niño
2007	Normal	Niña
2008	Extremadamente seco	Niña
2009	Moderadamente seco	No Fenómenos
2010	Extremadamente húmedo	Niña
2011	Muy seco	Niña
2012	Normal	No Fenómenos
2013	Extremadamente húmedo	No Fenómenos
2014	Normal	Niño
2015	Muy húmedo	Niño
2016	Muy seco	Niña
2017	Muy húmedo	Niña
2018	Muy húmedo	Niño
2019	Muy seco	No Fenómenos

ANEXO 2

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

La plataforma está conformada por la página principal que da una introducción al usuario para que conozca la información que se le proporciona en el sitio, esta página está diseñada para desplegarse desde una computadora (Figura 100) o desde un dispositivo móvil (tal como se aprecia en la Figura 101).



Figura 99. Código QR plataforma adaptación al cambio climático en Morelia



Figura 100. Página principal formato web



Figura 101. Página principal formato móvil

En la pestaña de *Gallery* se presentan los mapas de los índices implementados para la obtención de vulnerabilidad, así como los mapas de riesgo a los fenómenos de sequía y humedad, en su versión web (Figura 102) y su versión móvil (Figura 103).

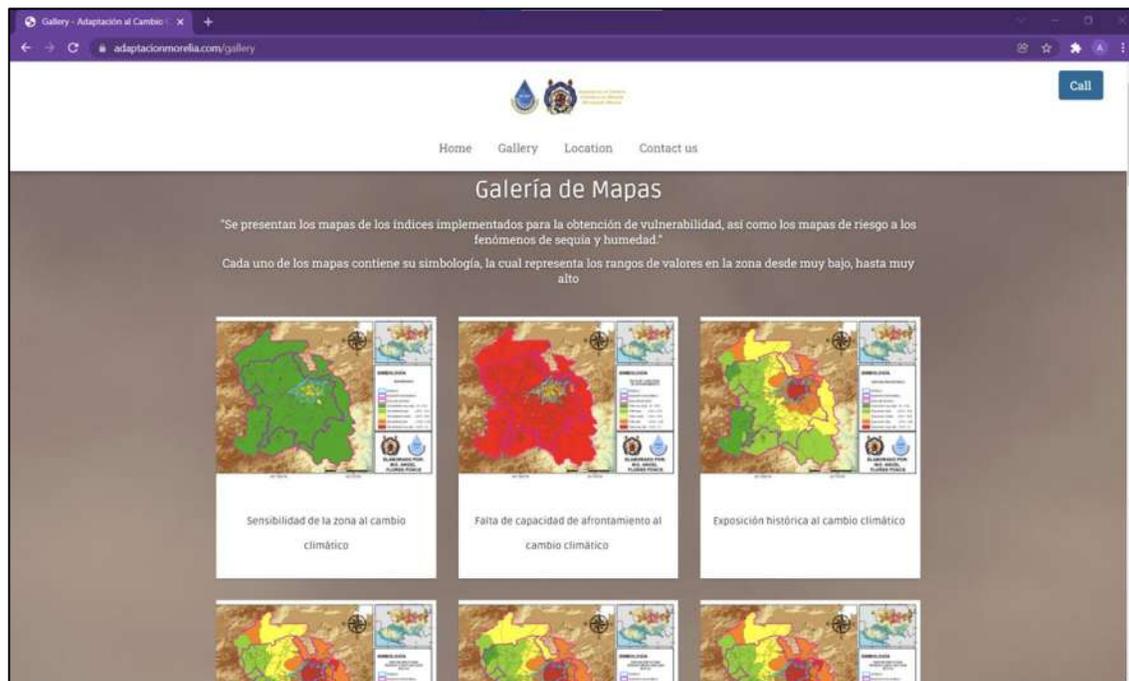


Figura 102. Página Gallery formato web



Figura 103. Página Gallery formato móvil

En la pestaña *Location* aparece una descripción del grupo de investigación, sus integrantes, y el lugar donde se realizó la investigación, en su versión web (Figura 104) y su versión móvil (Figura 105).

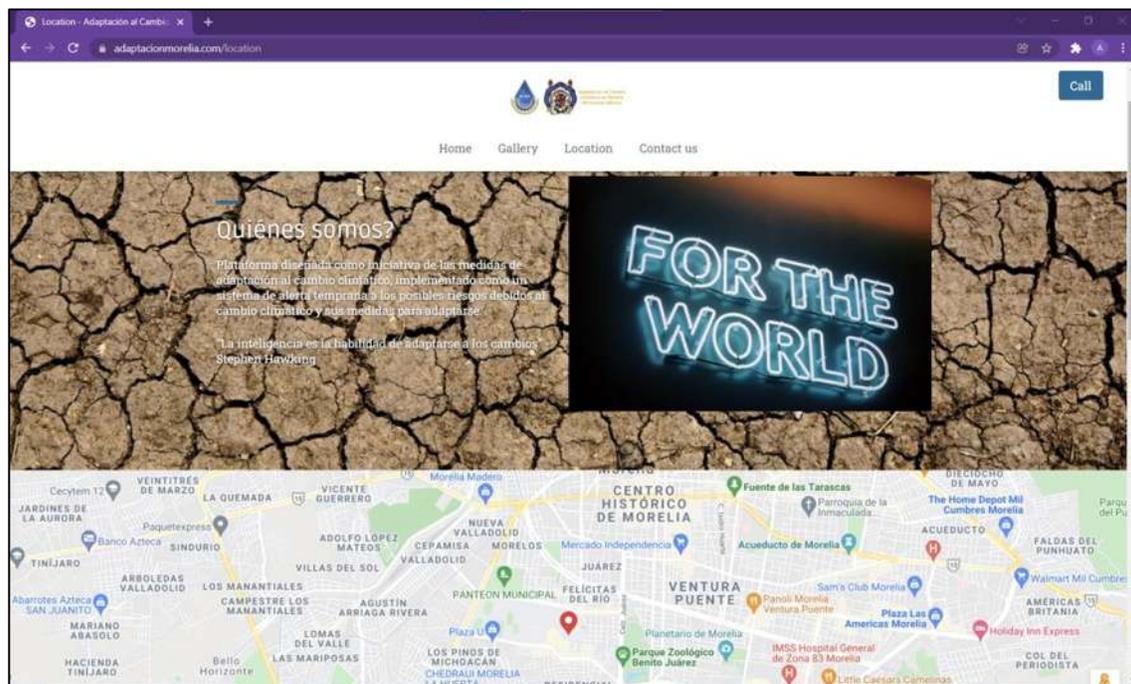


Figura 104. Página Location formato web



Figura 105. Página Location formato móvil

En la pestaña *Contact us* se presenta la ventana que permite contactar con los investigadores para atender dudas o comentarios, así como la suscripción a la plataforma y recibir información de futuras publicaciones relacionadas con el tema, en su versión web (Figura 106) y su versión móvil (Figura 107).

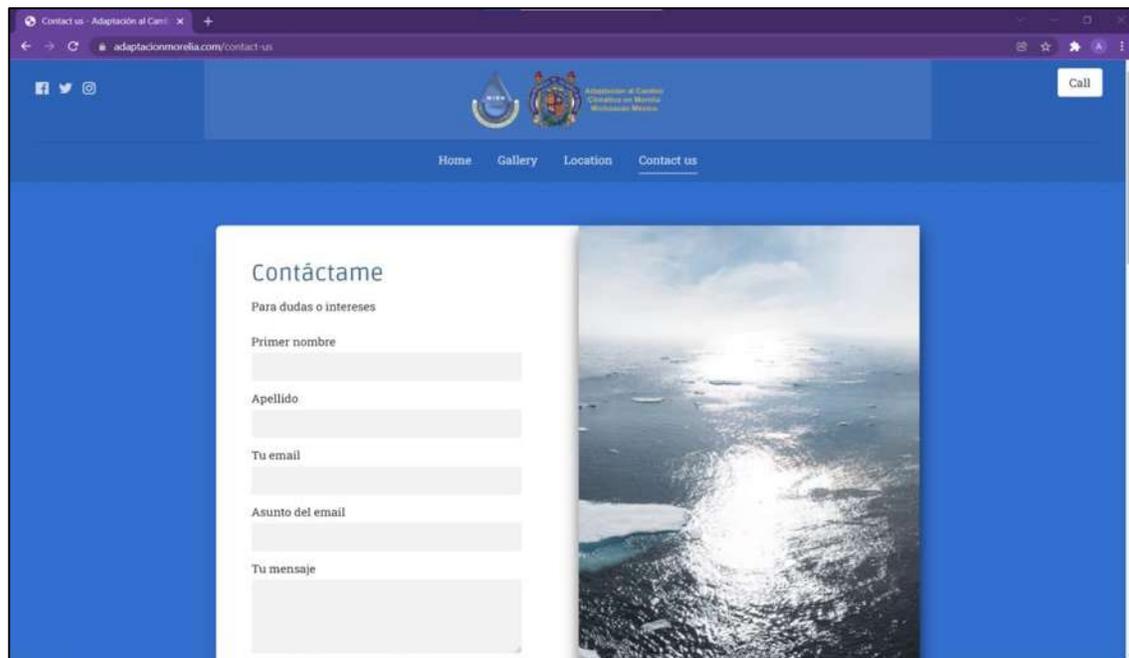


Figura 106. Página Contact us formato web



Figura 107. Página Contact us formato móvil

ANEXO 3

PLANES INFORMATIVOS EN MEDIOS CLÁSICOS COMO LAS REDES SOCIALES

En la Figura 108 se visualiza la plataforma de la red social Facebook (código QR Figura 109) , en la Figura 110 se muestra la red social empleada de Instagram (código QR Figura 111) y en la Figura 112 se visualiza la red social Twitter (código QR Figura 113), donde se compartieron los resultados. Las redes sociales fueron ancladas a la plataforma web para mantenerse en contacto y en un mismo sistema.

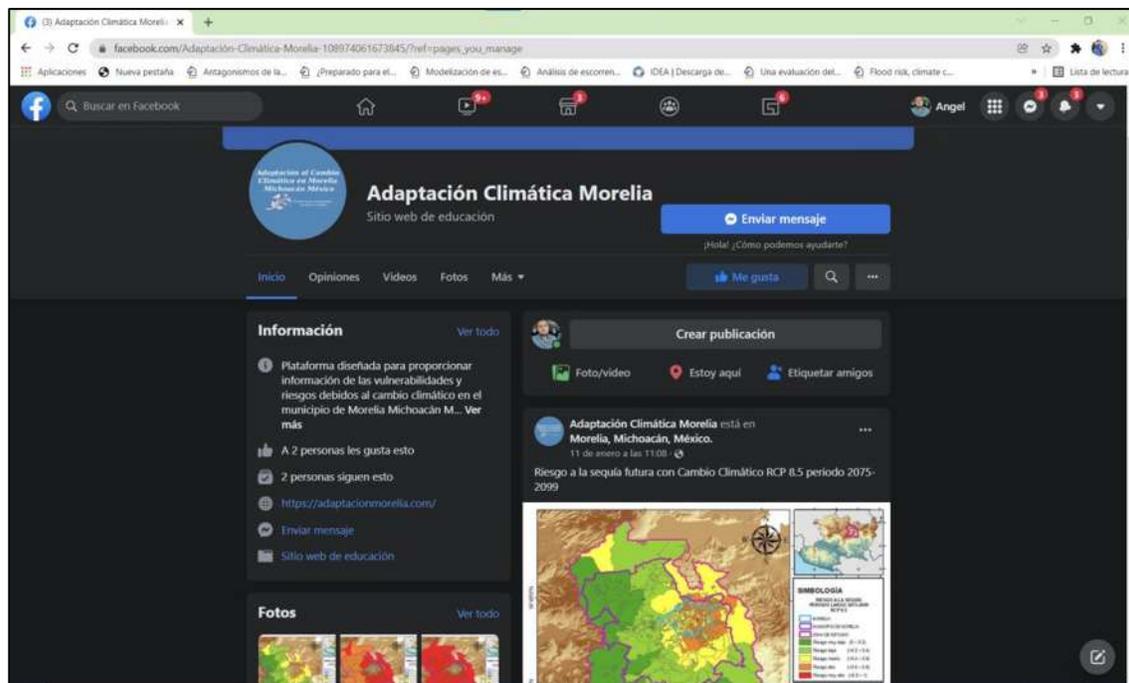


Figura 108. Red social Facebook de Adaptación Climática Morelia



Figura 109. Código QR red social Facebook

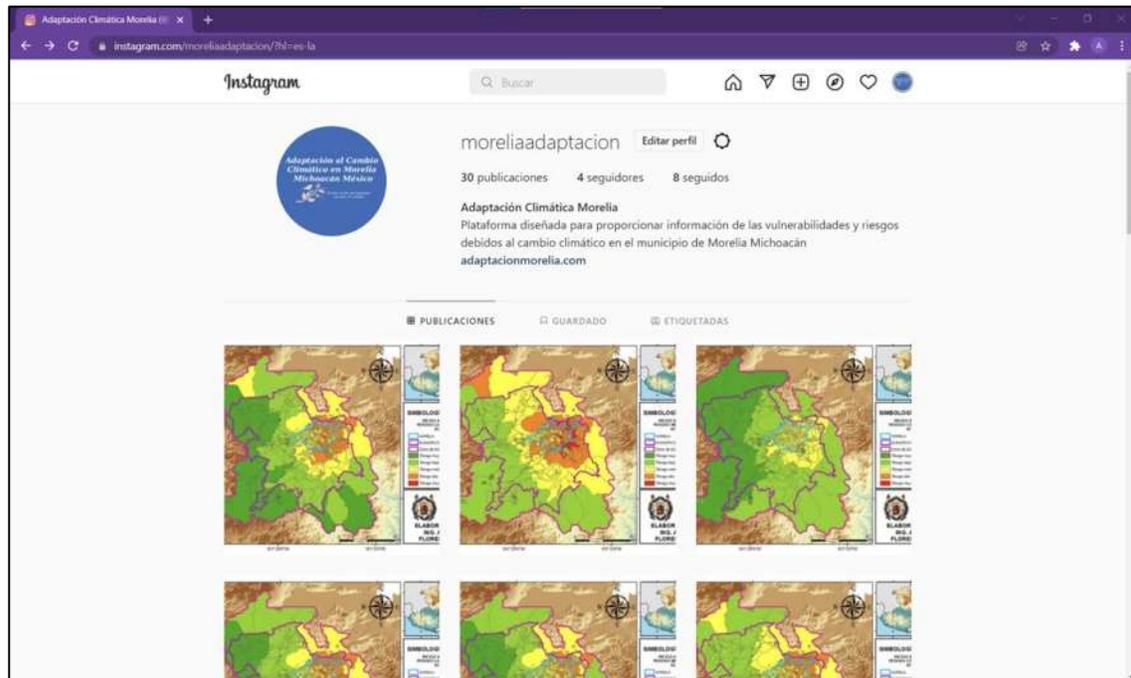


Figura 110. Red social Instagram de Adaptación Climática Morelia



Figura 111. Código QR red social Instagram

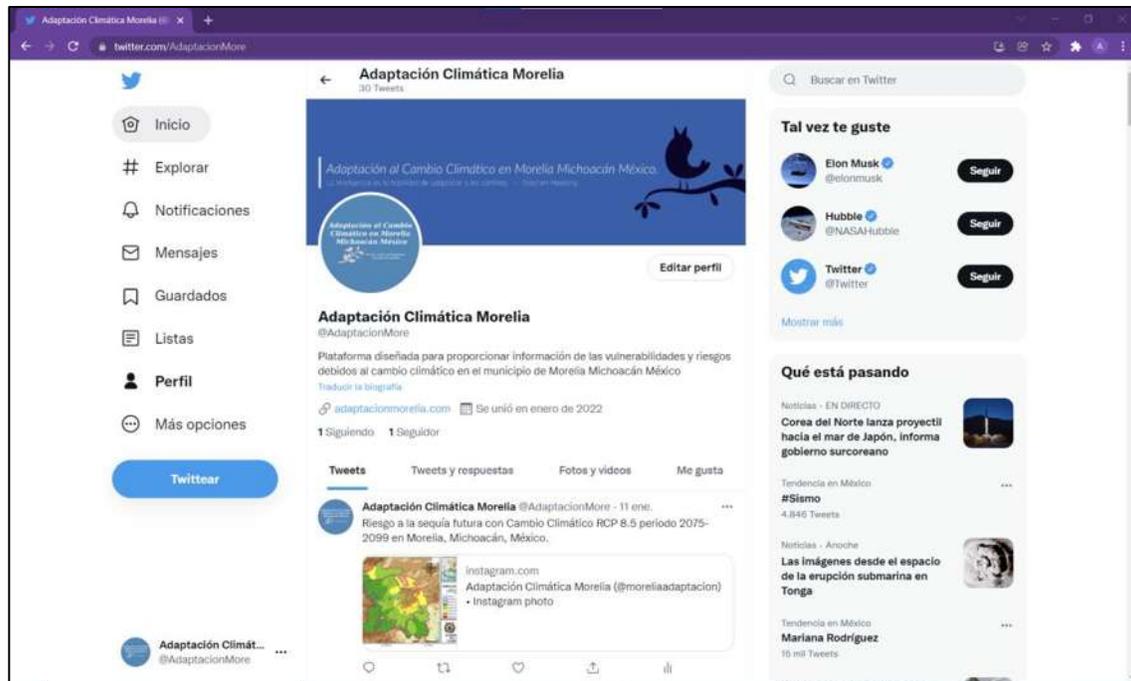


Figura 112. Red social Twitter de Adaptación Climática Morelia



Figura 113. Código QR red social Twitter



11. REFERENCIAS.

- Acosta, L., Klein, R. J. T., Reidsma, P., Metzger, M. J., Rounsevell, M. D. A., Leemans, R., & Schröter, D. (2013). A spatially explicit scenario-driven model of adaptive capacity to global change in Europe. *Global Environmental Change*, 23(5), 1211–1224. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.03.008>
- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Agnew, C. (2000). Using the SPI to Identify Drought. *University College London, London, United Kingdom*.
- Anders, I., Stagl, J., Auer, I., & Pavlik, D. (2014). Climate Change in Central and Eastern Europe. En *Advances in Global Change Research* (Vol. 58). https://doi.org/10.1007/978-94-007-7960-0_2
- Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1954). A Test of Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49(268), 765. <https://doi.org/10.2307/2281537>
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Arquiola, J. P., & Solera, A. S. (2017). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Manual de Usuario v1.1. *Universidad Politécnica de Valencia*, 19.
- BANDAS. (2016). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). CONAGUA.
- Bassett, T., & Fogelman, C. (2013). Deja vu or something new? The adaptation. *Geoforum*, 48,42-53.
- Belayneh, A., Adamowski, J., & Khalil, B. (2016). Short-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet transforms and machine learning methods. *Sustainable Water Resources Management*, 2(1), 87–101. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0040-5>



- Bierbaum, R., Smith, J. B., Lee, A., Blair, M., Carter, L., Chapin, F. S., Fleming, P., Ruffo, S., Stults, M., McNeeley, S., Wasley, E., & Verduzco, L. (2013). A comprehensive review of climate adaptation in the United States: More than before, but less than needed. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(3), 361–406. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9423-1>
- Bolongaro, A., M., A. H., A.Z., M. G., M.I., M. G., & Novion, S. C. (2017). *Propuesta de programa de adaptación ante el cambio climático para el municipio de Morelia, Michoacán*. 13, 1–78.
- Bolongaro, A., Márquez García, A. Z., Torres Rodríguez, V., Anglés Hernández, M., Origel Gutiérrez, G., Márquez, M. I., García. (2016). Diagnóstico de la vulnerabilidad ante el cambio climático del destino turístico de Morelia, M. E. B. C., & A., R. (2016). *Diagnostico de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático del Destino Turístico de Morelia, Michoacán*. 13, 1–286.
- BOM. (2021). *Australian Government Bureau of Meteorology*. <http://www.bom.gov.au/climate/enso/enlist/index.shtml>
- Bonch-osmolovskiy, M., & Heltberg, R. (2011). Mapping vulnerability to climate change. *The World Bank, January*.
- Brenčič, M. (2016). Extreme Historical Droughts in the South-Eastern Alps - Analyses Based on Standardised Precipitation Index. *Acta Geophysica*, 64(5), 1731–1754. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0017>
- Campos-Aranda, D. F. (2011). Transferencia de información de crecientes mediante regresión lineal múltiple. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 239–247.
- Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. En *Universidad Autónoma de San Luis Potosí* (p. 550 págs.).
- CLICOM. (2018). *Climate Computing Project*. CICESE. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Congreso general de los estados Unidos Mexicanos. (2020). Ley General de Cambio Climático. *Dof*, 1–45.



- Das, J., Gayen, A., Saha, P., & Bhattacharya, S. K. (2020). Meteorological drought analysis using Standardized Precipitation Index over Luni River Basin in Rajasthan, India. *SN Applied Sciences*, 2(9), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03321-w>
- De Gier, T. (2009). State of the art on the legal and policy literature on adaptation to climate change: towards a research agenda state of the art on the legal and policy literature on adaptation to climate change. *State of the art on the legal and policy literature on.*
- Dewitte, B., & Takahashi, K. (2019). Diversity of moderate El Niño events evolution: role of air–sea interactions in the eastern tropical Pacific. *Climate Dynamics*, 52(12), 7455–7476. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4051-9>
- Dong, Z., Pan, Z., An, P., Wang, L., Zhang, J., He, D., Han, H., & Pan, X. (2015). A novel method for quantitatively evaluating agricultural vulnerability to climate change. *Ecological Indicators*, 48(January), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.032>
- Dunford, R., Harrison, P. A., Jäger, J., Rounsevell, M. D. A., & Tinch, R. (2015). Exploring climate change vulnerability across sectors and scenarios using indicators of impacts and coping capacity. *Climatic Change*, 128(3–4), 339–354. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1162-8>
- Eakin, H., & Bojórquez-Tapia, L. A. (2008). Insights into the composition of household vulnerability from multicriteria decision analysis. *Global Environmental Change*, 18(1), 112–127. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.09.001>
- Esquivel-Arriaga, G., Bueno, P., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M., & Esquivel-arriaga, O. (2014). Evaluation of hydrological drought index in watersheds of North-Center Mexico. *Agrofaz*, 14(2), 53–60.
- Estrela, T., Pérez-Martin, M. A., & Vargas, E. (2012). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en Espagne. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154–1167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>



- Fatorić, S., & Biesbroek, R. (2020). Adapting cultural heritage to climate change impacts in the Netherlands: barriers, interdependencies, and strategies for overcoming them. *Climatic Change*, 162(2), 301–320. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02831-1>
- Fernández, B. (2005). *Sequiías: Caracterización y Mitigación*.
- Ferrer, J., Pérez-Martín, M. A., Jiménez, S., Estrela, T., & Andreu, J. (2012). GIS-based models for water quantity and quality assessment in the Júcar River Basin, Spain, including climate change effects. *Science of the Total Environment*, 440, 42–59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.032>
- Gandini, A., Garmendia, L., & San Mateos, R. (2016). Hacia ciudades históricas sostenibles: adaptación a los riesgos del cambio climático. *PROBLEMAS DE EMPRENDIMIENTO Y SOSTENIBILIDAD*.
- García-Romero, L. (2015). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan, Michoacán*. MCIA.
- 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>
- GEPMA. (2012). *Grupo de Expertos para los Países Menos Adelantados “PLANES NACIONALES DE ADAPTACIÓN”*. United Nations.
- González, I. (2018). *Evaluación del riesgo de sequía operativa, en el sistema de recursos hídricos de la cuenca del río tepalcatepec*. MCIA.
- Guttman, N. B. (1998). Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113–121. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>
- Guttman, Nathaniel B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*,



35(2), 311–322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>

Hay, J., & Mimura, N. (2006). Supporting climate change vulnerability and adaptation assessments in the Asia-Pacific region: an example of sustainability science. *Sustainability Science*, 1(1), 23–35. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0011-8>

Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485–488. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>

Hernández. (2007). *Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar*. (Tesis doct).

Hernández, J. (2014). EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA GESTIÓN DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DE UN SISTEMA DE RECURSOS HIDRICOS DESARROLLADO, CASO CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA. *UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO*.

Hruska, T., Huntsinger, L., Brunson, M., Li, W., Marshall, N., Oviedo, J. L., & Whitcomb, H. (2017). *Rangelands as Social–Ecological Systems*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46709-2_8

INECC. (2018). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. INECC. <https://www.gob.mx/inecc>

INEGI. (2021). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. <https://www.inegi.org.mx/>

IPCC. (2001). Climate change 2001 synthesis report. *Environmental Progress*, 21(3), O9–O9. <https://doi.org/10.1002/ep.670210305>

IPCC. (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change. En *Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/446727a>

IPCC. (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change “Impacts, adaptation,



and vulnerability". En *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC. (2022). Cambio Climático 2022: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. En IPCC. Prensa de la Universidad de Cambridge.

Johnston, R., & Smakhtin, V. (2014). Hydrological Modeling of Large river Basins: How Much is Enough? *Water Resources Management*, 28(10), 2695–2730. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0637-8>

Kamperman, H., & Biesbroek, R. (2017). Measuring Progress on Climate Change Adaptation Policy by Dutch Water Boards. *Water Resources Management*, 31(14), 4557–4570. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1765-8>

Khan, M., & Roberts, T. (2013). Adaptation and international climate policy. *Wires Climate Change*, 171–189.

Kottegoda, N. T. (1980). *Stochastic water resources technology*. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-03467-3>

Kubiak-Wójcicka, K., & Bał, B. (2018). Monitoring of meteorological and hydrological droughts in the Vistula basin (Poland). *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11), 87–100. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7058-8>

Labraga, J. (1998). Escenario de cambio climático para la Argentina. *Revista Ciencia Hoy*, 8(44), 18–25.

LOAPEM. (2018). Reglamento de la ley de cambio climático del estado de Michoacán de Ocampo. *Periódico Oficial del Estado*, 52, 25.

López, J. (1993). *Restitución de datos de aforo al régimen natural. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*. Barcelona: Editorial CIMNE.

Malik, S. M., Awan, H., & Khan, N. (2012). Mapping vulnerability to climate change and its repercussions on human health in Pakistan. *Globalization and Health*, 8, 1–10. <https://doi.org/10.1186/1744-8603-8-31>



Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio climático una visión desde México*. (S. del medio ambiente y recursos naturales e instituto nacional de Ecología. (ed.); Primera Ed). Secretaria del medio ambiente y recursos naturales e instituto nacional de ecología.

Martínez, & Patiño. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5–20.

McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES. *Eighth Conference on Applied Climatology*.

Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175–1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>

MITERD, M. para la T. E. y el R. D. (2015). *Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España*.

Mohammad, A. H., Jung, H. C., Odeh, T., Bhuiyan, C., & Hussein, H. (2018). Understanding the impact of droughts in the Yarmouk Basin, Jordan: monitoring droughts through meteorological and hydrological drought indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(5). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3433-6>

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., ... Zurek, M. (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies: IPCC Expert Meeting Report: 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, the Netherlands. En *Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva*.

Moss, R H, Brenkert, A. L., & Malone, E. L. (2001). VULNERABILITY TO CLIMATE CHANGE A Quantitative Approach. *Online, September*, 70.

Moss, Richard H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van



- Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Mussetta, P. (2017). *Vulnerabilidad al cambio climático: Dificultades en el uso de indicadores en dos cuencas de Colombia y Argentina*. January. <https://doi.org/empiria.36.2017.17862>
- Naciones Unidas. (2004). *Naciones Unidas. Convención Marco sobre el Cambio Climático*. Naciones Unidas.
- Naciones Unidas. (2018). *Naciones Unidas. Cambio climático*. Naciones Unidas.
- Naciones Unidas. (2021). *Acción por el clima*. <https://www.un.org/es/climate-change/climate-solutions/early-warning-systems>
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881–897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>
- Navarro, M. del M. (2019). *Evaluación con cambio climático de escenarios de demanda para las masas subterráneas en los acuíferos asociados al campo geotérmico cerritos colorados*. MCIA.
- NOAA. (2021). *National Weather Service Climate Prediction Center, Episodios fríos y cálidos por temporada*. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Ortega-Gómez, T., Pérez-Martín, M. A., & Estrela, T. (2018). Improvement of the drought indicators system in the Júcar River Basin, Spain. *Science of the Total Environment*, 610–611, 276–290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.250>
- Ostle, B., & Mensing, R. W. (1975). Regression analysis. *Statistics in research*, 165–



236.

Paredes, J., Solera, A., Andreu, J., & Lerma, N. (2013). *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Índice. 50.

Peres-Neto, P. R., Jackson, D. A., & Somers, K. M. (2005). How many principal components? stopping rules for determining the number of non-trivial axes revisited. *Computational Statistics and Data Analysis*, 49(4), 974–997. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.06.015>

PNUD. (2007). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo La Hoja de Ruta de Bali: Los temas claves en negociación*. Naciones Unidas.

Refsgaard, J. C., Arnbjerg-Nielsen, K., Drews, M., Halsnæs, K., Jeppesen, E., Madsen, H., Markandya, A., Olesen, J. E., Porter, J. R., & Christensen, J. H. (2013). The role of uncertainty in climate change adaptation strategies-A Danish water management example. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(3), 337–359. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9366-6>

Roldán, P. (2019). *Modelo matemático*. Economipedia.com. <https://economipedia.com/definiciones/modelo-matematico.html>

RStudio, Paradis, E., & Ahumada, J. A. (2003). R para Principiantes. *Evolution*.

Ruiz Corral, J. A., Medina García, G., Rodríguez Moreno, V. M., Sánchez Gonzáñes, J. de J., Villavicencio García, R., Durán Puga, N., Grageda Grageda, J., & García Romero, G. E. (2016). Regionalización del cambio climático en México / Regionalization of climate change in México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2451–2464.

Runhaar, H. A. C., Uittenbroek, C. J., van Rijswijk, H. F. M. W., Mees, H. L. P., Driessen, P. P. J., & Gilissen, H. K. (2016). Prepared for climate change? A method for the ex-ante assessment of formal responsibilities for climate adaptation in specific sectors. *Regional Environmental Change*, 16(5), 1389–1400. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0866-2>

Runhaar, H., Mees, H., Wardekker, A., van der Sluijs, J., & Driessen, P. P. J. (2012).



- Adaptation to climate change-related risks in Dutch urban areas: Stimuli and barriers. *Regional Environmental Change*, 12(4), 777–790. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0292-7>
- Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., da Silva, R. M., & dos Santos, D. C. (2019). Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(2), 545–562. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1619-9>
- Schilling, J., Hertig, E., Trambly, Y., & Scheffran, J. (2020). Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Regional Environmental Change*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7>
- Serrato, S. V. A. (2018). Sinergias y tensiones entre la adaptación y mitigación del cambio climático: la política climática de México. *Revista Pensamiento Jurídico*, 0(48), 103–129.
- Stern, P. C., Young, O. R., & Druckman, D. (1992). *Global Environmental Change*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1792>
- Svoboda, M., & Fuchs, B. A. (2016). Manual de indicadores e índices de sequía. En *Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías*.
- Témez, J. R. (1977). *Modelo matemático de transformación precipitación aportación*. ASINEL.
- Thomas, J. E. (2013). Evaluación de la vulnerabilidad social ante amenazas naturales en Manzanillo (Colima). Un aporte de método. *Investigaciones Geograficas*, 81(100), 79–93.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *GEOGRAPHICAL REVIEW*, 55–94.
- UNCC. (2010). *United Nations Climate Change. Planes nacionales de adaptación*. United Nations.



- UNCC. (2015). *United Nations Climate Change. Acuerdo de París*. United Nations.
- UNESCO. (1991). *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, "Centro histórico de Morelia"*.
<https://whc.unesco.org/es/list/585>
- UNESCO. (2017). *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, "Directrices operativas para la implementación de la Convención del Patrimonio Mundial"*. (p. 172). UNESCO World Heritage Centre.
- UNFCCC. (2006). *Programa de trabajo de Nairobi sobre los efectos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático*. Naciones Unidas.
- UPV. (2019). *Modelo De Análisis De Series Hidrológicas*. Upv.Es.
- USDA. (2021). *Investigación sobre el cambio climático forestal: efectos potenciales del calentamiento global en los bosques y las relaciones entre el clima de las plantas en el oeste de América del Norte y México*.
<http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>
- Vincent, K. (2007). Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale. *Global Environmental Change*, 17(1), 12–24.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.11.009>
- Wald, A. (1947). *Sequential analysis*. J. Wiley & sons, Incorporated.
- Watson, D., & Philip, G. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geo-Processing*, 2, 315–327.
- Wess, R., Klock, H., Siller, H. S., & Greefrath, G. (2021). Measuring Professional Competence for the Teaching of Mathematical Modelling: A Test Instrument. En *International Perspectives on the Teaching and Learning of Mathematical Modelling*.
- Wiréhn, L., Käyhkö, J., Neset, T. S., & Juhola, S. (2020). Analysing trade-offs in adaptation decision-making—agricultural management under climate change in Finland and Sweden. *Regional Environmental Change*, 20(1).



<https://doi.org/10.1007/s10113-020-01585-x>

World Meteorological Organization. (1988). World Meteorological Organization. Technical Regulation. En *Ensuring Quality to Gain Access to Global Markets: A Reform Toolkit* (Número 2). https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1372-6_ch7