



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE INUNDACIONES ASOCIADAS A EVENTOS EXTREMOS DE
PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE MORELIA, EN UN PERIODO
HISTÓRICO Y CONSIDERANDO EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Tesis

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

Presenta:

Ing. Luis David Navarro Arellano

Asesor:

Dra. María Lourdes González Arqueros

Co-Asesora:

Dra. Liliana García Romero

Mayo, 2025

Morelia, Michoacán, México.



Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), con su apoyo para realizar esta investigación.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la Facultad de Ingeniería Civil y al programa de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos que me formaron no solo como profesional, sino también como persona comprometida con la investigación y el servicio a la sociedad.

A mis asesores, por compartir amablemente sus conocimientos y orientarme con dedicación a lo largo de este proceso.

A mi mesa sinodal, por sus comentarios y diferentes puntos de vista los cuales mejoraron y enriquecieron este trabajo.

Al Grupo de Investigación Gestión Integral del Agua (GIA) y al Departamento de Hidráulica por abrirme las puertas al mundo de la investigación y brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo. Su acompañamiento, experiencia y compromiso han sido fundamentales en mi formación académica y en el desarrollo de este trabajo.

Al Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA), de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), por haberme recibido y orientado durante mi estancia en el extranjero.



Resumen

Con el paso de los años, los desastres naturales, como las inundaciones, han ido en aumento, generando un creciente interés en el estudio de los factores que influyen en su ocurrencia. Entre estos, las precipitaciones extremas han cobrado especial relevancia debido a su vinculación con el cambio climático. En Morelia, aunque la precipitación anual total ha mostrado una tendencia a la baja en la mayoría de las estaciones, los índices extremos como el RX1day y el percentil 99 han experimentado un aumento notable, evidenciando picos de lluvia más intensos en un solo día y en los umbrales más altos.

Eventos históricos como 2003, 2005, 2015 y 2018 ilustran este fenómeno. En 2003, una descarga extraordinaria de la presa desencadenó una inundación pese a precipitaciones moderadas; en 2005, lluvias de hasta 51 mm generaron desbordes en zonas bajas; en 2015, una lluvia acumulada de 142 mm, posiblemente potenciada por El Niño, provocó inundaciones de gran magnitud; y en 2018, el paso del huracán Willa dejó lluvias intensas que causaron inundaciones en colonias bajas cercanas a cauces y drenes. Bajo escenarios futuros de cambio climático se observó que estas áreas seguirán siendo susceptibles a inundarse. Las comparaciones entre RX5day y RX1day muestran que, aunque la extensión de la superficie inundada pueda ser similar a la de eventos anteriores, los tirantes y las zonas afectadas varían según el tipo de evento extremo que se pueda presentar ya que estas dependen tanto de la variabilidad espacial, así como la intensidad de estos. Este análisis ha contribuido a la comprensión de los factores que desencadenan las inundaciones en la ciudad de Morelia, lo cual resulta fundamental para orientar futuros estudios de planificación urbana y el diseño de estrategias de mitigación y adaptación.

Palabras Clave: Cambio Climático, Precipitaciones Extremas, Inundaciones, Ciudad de Morelia, ENOS.



Abstract

Over the years, natural disasters such as floods have increased, generating growing interest in studying the factors that influence their occurrence. Among these, extreme precipitation events have gained particular relevance due to their connection with climate change. In Morelia, although the total annual precipitation has shown a decreasing trend in most stations, extreme indices such as RX1day and the 99th percentile have experienced a significant increase, indicating more intense rainfall peaks in a single day and at the highest thresholds.

Historical events such as those in 2003, 2005, 2015, and 2018 illustrate this phenomenon. In 2003, an extraordinary dam discharge triggered a flood despite moderate rainfall; in 2005, rainfall of up to 51 mm caused overflows in low-lying areas; in 2015, an accumulated rainfall of 142 mm—possibly intensified by El Niño—led to severe flooding; and in 2018, Hurricane Willa brought heavy rains that caused flooding in low-lying neighborhoods near streams and drainage channels. Under future climate change scenarios, these areas are expected to remain susceptible to flooding. Comparisons between RX5day and RX1day show that although the extent of flooded areas may be similar to previous events, water depths and affected zones vary depending on the type of extreme event, as they are influenced by both spatial variability and intensity. This analysis has contributed to a better understanding of the factors that trigger floods in the city of Morelia, which is essential for guiding future urban planning studies and the development of mitigation and adaptation strategies.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Contenido

1	Introducción.....	13
2	Objetivos.....	14
2.1	Objetivo general.....	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	Hipótesis.....	15
4	Marco Teórico.....	16
4.1	Cambio Climático.....	16
4.1.1	Gases de efecto invernadero.....	16
4.1.2	Escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	16
4.1.3	Informes AR5 y AR6	17
4.1.4	Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) AR5	18
4.2	Fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS)	19
4.3	Tormentas severas	21
4.3.1	Precipitaciones extremas.....	21
4.4	Modelos Matemáticos	22
5	Antecedentes.....	24
6	Justificación	27
7	Zona de estudio	28
8	Metodología.....	29
8.1	Caracterización de la zona de estudio	29
8.1.1	Geomorfometría.....	30
8.1.2	Número de escurrimiento (N).....	33
8.2	Gestión y validación de datos climatológicos.....	35
8.2.1	Pruebas estadísticas	35
8.2.2	Llenado de datos diarios.....	39
8.3	Series con cambio climático.....	39
8.3.1	Corrección del sesgo	40
8.4	Determinación de Eventos Extremos de Precipitación (EEP)	41
8.5	Validación y calibración del modelo lluvia escurrimiento	48
8.5.1	Modelo TETIS.....	48
8.5.2	Modelo HEC-HMS	53



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

8.6 Gastos asociados a EEP	55
8.7 Modelo Hidráulico	55
8.8 Obtención de Mapas para el periodo histórico y futuro	57
9 Resultados.	57
9.1 Caracterización de la zona de estudio	57
9.1.1 Características geomorfológicas de la cuenca	58
9.1.2 Uso de suelo.....	60
9.1.3 Tipo de suelo	60
9.1.4 Mapa N	62
9.1.5 Geología	63
9.2. Gestión y validación de datos climatológicos.....	63
9.3 Determinación de eventos extremos de precipitación.....	66
9.3.1 Índice de concentración de precipitación.....	66
9.3.2 Índice morfométrico de torrencialidad	72
9.3.3 Índices extremos de precipitación.....	72
9.3.4 Inundaciones históricas para al periodo de 1944-2022	90
9.3.5 Índice Oceánico El Niño (ONI).....	99
9.3.6 Descargas de la Presa Cointzio.....	105
9.4 Obtención de series con cambio climático	107
9.4.1 Comparación del CMIP5 contra el CMIP6	110
9.5 Modelo TETIS	114
9.5.1 Mapa de elevación digital del terreno	114
9.5.2 Mapa de dirección del flujo	115
9.5.3 Mapa de celdas acumuladas	116
9.5.4 Mapa de pendientes	117
9.5.5 Mapa de velocidad en ladera.....	118
9.5.6 Mapas derivados del uso de suelo	119
9.5.7 Parámetros hidráulicos del terreno	125
9.6 Modelo HEC-HMS	129
9.6.1 Basin Models	129
9.6.2 Time-Series Data.....	130
9.6.3 Meteorologic Models.....	133
9.6.4 Control Specifications	133



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

9.6.5 Resultados de la simulación	134
9.6.6 Cambio climático	135
9.7 Modelo HEC-RAS	137
9.8 Inundaciones.....	138
10 Conclusiones.....	145
11 Referencias	150
ANEXOS	159



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 1. Escenarios SSP.	19
Tabla 2. Anomalías de precipitación en México forzadas por ENSO, (Guevara-Polo & Mijares-Fajardo, 2021).	20
Tabla 3. Clasificación de los diferentes tipos de precipitación (Prieto-González et al., 2021).	22
Tabla 4. Clasificación de cuencas de acuerdo a su tamaño.	30
Tabla 5. <i>Clasificación de la compacidad de una cuenca.</i> (INE,2004).	31
Tabla 6. Clasificación del factor de Horton.	32
Tabla 7. Selección del N de acuerdo a las características de la pendiente, uso y tipo de suelo.	34
Tabla 8. Rango de datos permisible (U) dependiendo del número de muestras (N).	36
Tabla 9. Valores de significancia para la prueba de t Student.	38
Tabla 10. Distribución de frecuencias en clases de 1mm.	42
Tabla 11. Relaciones para categorizar el índice morfométrico. (IDEAM, 2013).	44
Tabla 12. Relaciones entre variables para el índice morfométrico (IDEAM, 2013).	45
Tabla 13. Índices de precipitación extrema adaptado de (Peralta-Hernández et al., 2009).	46
Tabla 14. Índices extremos de precipitación extrema propuestos por (Xuebin Zhang Feng Yang et al., 2004).	47
Tabla 15. Características del modelo TETIS (Gómez, 2016).	49
Tabla 16. Calidad de ajuste.	53
Tabla 17. Resultados de las características geomorfológicas de las subcuencas.	59
Tabla 18. Características del tipo de suelo (Carreó, 2017).	61
Tabla 19. Estaciones meteorológicas.	64
Tabla 20. Resultados de las pruebas estadísticas.	65
Tabla 21. Índice de concentración de precipitación para datos no tratados.	67
Tabla 22. Índice de concentración de precipitación para datos tratados.	68
Tabla 23. Resultados de la prueba Saphiro Wilks.	71
Tabla 24. Resumen de categorización de índices morfométrico para cada cuenca.	72
Tabla 25. Tendencia y significancia de los índices extremos de precipitación por el grupo CCI/CLIVAR.	73
Tabla 26. Precipitaciones 5 días antes del evento de 2003.	92
Tabla 27. Precipitación acumulada en 5 días antes del evento de 2005.	94
Tabla 28. Precipitaciones acumuladas a 5 días para el evento de inundación del 2015.	96
Tabla 29. Precipitaciones acumuladas a 5 días para el evento de inundación del 2018.	98
Tabla 30. Comparación entre las Inundaciones y el índice ONI.	100
Tabla 31. Resultados de ajuste de las funciones de distribución de probabilidad, en rojo las funciones que no ajustaron.	101
Tabla 32. Lluvias máximas asociadas a cada periodo de retorno.	101
Tabla 33. Descargas mensuales promedio de la Presa Cointzio.	106
Tabla 34. Comparación de descargas promedio de la Presa Cointzio.	107
Tabla 35. Resultados de correlación para el mes de octubre.	109



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 36. Proyecciones máximas del índice RX1day para los distintos periodos.	109
Tabla 37. Clasificación de los distintos usos de suelo.....	120
Tabla 38. Duración de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos en la cuenca de Santiago Undameo.	122
Tabla 39. Resumen del factor de vegetación para la cuenca de Santiago Undameo.	123
Tabla 40. Valores de profundidad de raíces, almacenamiento en charcos e intercepción.	124
Tabla 41. Análisis de la precipitación diaria registrada en el 2018 para cada subcuenca.	130
Tabla 42. Tormenta a escala horaria durante el evento del 2018.	131
Tabla 43. distribución horaria de las precipitaciones en las subcuencas durante el evento del 2018.....	133
Tabla 44. Resultados de la simulación para el evento de 2018.	134
Tabla 45. Porcentaje de lluvia asociado a los días que conforman el RX5.	135
Tabla 46. Número de eventos de precipitación asociados a cada mes.	136
Tabla 47. Inundaciones históricas de la ciudad de Morelia para el periodo 1944-2023 adaptado de (Oseguera, 2014)	159



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Figura 1. Desastres de mayor impacto desde 1980 - 2017. Elaboración propia con base en datos de (CENAPRED, 2019).	25
Figura 2. Zona de estudio, elaboración propia.	28
Figura 3. Diagrama metodológico.	29
Figura 4. Curva de Lorenz de concentración de precipitación diaria.	42
Figura 5. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS (Francés et al., 2014).	50
Figura 6. Movimiento vertical y horizontal en el modelo TETIS (Francés et al., 2014)..	51
Figura 7. Cuenca hidrográfica del Río Grande.	58
Figura 8. Mapa de uso de suelo.	60
Figura 9. Tipo de suelo.	61
Figura 10. Mapa de N.	62
Figura 11. Geología de la cuenca.	63
Figura 12. Periodo de datos de las estaciones meteorológicas.	66
Figura 13. Periodo de datos seleccionado.	66
Figura 14. Distribución del CI para información sin tratamiento estadístico.	68
Figura 15. Distribución del CI para datos con tratamiento estadístico.	69
Figura 16. Relación del CI con el 25% de los días más lluviosos.	70
Figura 17. Clasificación de las cuencas de acuerdo a su torrencialidad.	71
Figura 18. Índice CDD para la estación 16080 por año.	74
Figura 19. Distribución del índice CDD en la zona de estudio.	74
Figura 20. Índice CWD por año para la estación 16081.	75
Figura 21. Distribución del índice CWD en la zona de estudio.	76
Figura 22. Índice PRCPTOT por año para la estación 16081.	77
Figura 23. Distribución del índice PRCPTOT en la zona de estudio.	77
Figura 24. Índice R10 por año para la estación 18081.	78
Figura 25. Distribución de la tendencia del índice R10.	79
Figura 26. Índice R20 por año para la estación 16081.	80
Figura 27. Distribución de la tendencia del índice R20.	80
Figura 28. Índice R25 por año para la estación 16081.	81
Figura 29. Índice R25 por año para la estación 16133.	82
Figura 30. Distribución de la tendencia del índice R25.	82
Figura 31. Índice R995p por año para la estación 16133.	83
Figura 32. Distribución de tendencias del índice R95p.	84
Figura 33. Índice R99p por año para la estación 16133.	85
Figura 34. Distribución de tendencias del R99p.	86
Figura 35. Índice Rx1day por año para la estación 16133.	87
Figura 36. Distribución de la tendencia del Rx1day.	87
Figura 37. Índice RX5day por año para la estación 16133.	88
Figura 38. Distribución de tendencias del Rx5day.	89
Figura 39. Índice SDII por año para la estación 16133.	90
Figura 40. Distribución de tendencias para el índice SDII.	90
Figura 41. Precipitación registrada el día de la inundación 2003.	92
Figura 42. Distribución del Rx5day inundación 2003.	93



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Figura 43. Precipitación registrada el día de inundación 2005.....	94
Figura 44. Distribución del RX5day inundación 2005.....	95
Figura 45. Precipitación registrada el día de la inundación 2015.	96
Figura 46. Distribución del RX5day inundación 2015.....	97
Figura 47. Precipitación registrada el día de la inundación 2018.	98
Figura 48. Distribución del RX5day inundación 2018.....	99
Figura 49. Fases del fenómeno El Niño y La Niña.	100
Figura 50. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 5 años.	102
Figura 51. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 10 años. ...	103
Figura 52. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 25 años. ...	104
Figura 53. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 50 años. ...	104
Figura 54. Desfogues de la Presa Cointzio (1996-2024).....	106
Figura 55. Proyección global del índice RX1day de acuerdo con CMIP6 (Copernicus, 2024).	107
Figura 56. Concentración del RX1day mensual de acuerdo con CMIP6 (Copernicus, 2024).	108
Figura 57. Proyecciones de cambio climático hasta el año 2100 (Copernicus, 2024).	108
Figura 58. Concentración del RX1day mensual de acuerdo con CMIP5 RCP 4.5 (Copernicus, 2024).....	111
Figura 59. Concentración del RX1day mensual de acuerdo con CMIP6 SSP2-4.5 (Copernicus, 2024).....	111
Figura 60. Proyecciones de cambio climático hasta el año 2100 CMIP5 RCP 4.5 (Copernicus, 2024).....	112
Figura 61. Proyecciones de cambio climático hasta el año 2100 CMIP6 SSP2-4.5 (Copernicus, 2024).....	113
Figura 62. Diagramas de cajas y bigotes sobre las series de cambio climático obtenidas por CMIP5 en el mes de octubre.....	113
Figura 63. Diagramas de cajas y bigotes sobre las series de cambio climático obtenidas por CMIP6 en el mes de octubre.....	114
Figura 64. Mapa del modelo digital de elevación de la cuenca Santiago Undameo. ...	115
Figura 65. Direcciones del flujo de la cuenca Santiago Undameo.	116
Figura 66. Mapa de celdas acumuladas de la cuenca Santiago Undameo.....	117
Figura 67. Mapa de pendientes de la cuenca Santiago Undameo.....	118
Figura 68. Mapa de la velocidad del flujo en ladera.	119
Figura 69. Mapa de usos de suelo, Santiago Undameo.....	120
Figura 70. Rangos típicos del valor kc para las cuatro etapas del crecimiento FAO (1998).....	121
Figura 71. Distribución mensual de los factores de vegetación de los cultivos en la cuenca de Santiago Undameo.	122
Figura 72. Mapa del almacenamiento superficial, Santiago Undameo.....	124
Figura 73. Mapa de Hu, Santiago Undameo.	126
Figura 74. Mapa de Ks, Santiago Undameo.	127
Figura 75. Mapa Kp, Santiago Undameo.	128



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Figura 76. Modelos de tipo agregado (A), Semidistribuido (B) y Distribuido (C), (Pascual & Díaz, 2016).	129
Figura 77. Representación de la cuenca en el Modelo HEC-HMS.....	130
Figura 78. Pluviograma a escala horaria de la precipitación ocurrida en el evento de 2018.	132
Figura 79. Gastos para el pedido futuro asociados al índice RX5 para el mes de Junio en el periodo cercano.....	137
Figura 80. Modelo hidráulico incorporando las condiciones de frontera (García-Ledesma et al., 2025).....	138
Figura 81. Modelación de las inundaciones ocurridas en 2018.....	139
Figura 82. Ortofoto de inundación 2018 (IMPLAN, 2025).	140
Figura 83. Modelación de las inundaciones ocurridas en 2015.....	141
Figura 84. Zonas de inundación para un T de 2 años (IMPLAN, 2025).	142
Figura 85. Modelación de las inundaciones a partir del índice RX5 para el mes de junio.	143
Figura 86. Modelación de las inundaciones a partir del índice RX1 para el mes de junio.	144
Figura 87. Comparación entre la cantidad de precipitación en las cuencas.....	145



1 Introducción

El cambio climático es un problema ambiental de competencia global con características únicas. Se espera que sus impactos mayores sean a largo plazo, involucrando interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos), procesos sociales, económicos y políticos de índole mundial (Martínez et al., 2004).

En los últimos años, los eventos relacionados con el cambio climático han generado impactos notables en diversos aspectos de la vida humana. Esto ha motivado a la sociedad y a las instituciones gubernamentales a enfocarse y preocuparse más por el cambio climático (García-Romero, 2015).

Las precipitaciones intensas tienen consecuencias significativas en diversos aspectos de sistemas naturales y humanos. En el caso de América del Norte, se han observado incrementos en precipitaciones extremas, y se pronostica que estas aumentarán aún más debido al calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero (Kirchmeier-Young & Zhang, 2020).

Entre los mayores retos a la seguridad hídrica de México se encuentra la protección contra inundaciones. En el año 2010 solamente, el costo de los daños ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos extremos ascendió a \$82,540 millones. En el mismo año en Nuevo León, los daños del huracán Alex representaron el 2.45% del PIB del estado, en ese año 739 municipios del país recibieron declaratoria de desastre natural por eventos hidrometeorológicos (CENAPRED, 2012).

En la ciudad de Morelia durante las últimas décadas, los efectos de los eventos climáticos extremos han sido más frecuentes, provocando que para el periodo 1955-2010 ésta se viera afectada por más de 165 inundaciones de diferentes magnitudes (Arreigue et al., 2012). Los impactos crecientes de eventos extremos y la necesidad de mitigación contra inundaciones en México, demandan del entendimiento de los factores que las generan para así poder brindar soluciones informadas y estrategias de adaptación para preservar la seguridad y el bienestar de las comunidades y el entorno.



2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar las inundaciones históricas en la ciudad de Morelia asociadas a eventos extremos de precipitación para identificar patrones de comportamiento y así, evaluar el impacto que el cambio climático podría tener en el aumento de la frecuencia e intensidad de estos eventos en el futuro.

2.2 Objetivos específicos

- Recopilar y analizar datos históricos de precipitación en Morelia, Michoacán, con el fin de identificar y caracterizar los eventos extremos de precipitación.
- Desarrollar un modelo distribuido de lluvia escurrimiento e hidráulico que integren variables topográficas, hidrológicas y meteorológicas para simular los procesos de inundación en la ciudad.
- Evaluar la precisión y validez de los modelos mediante comparaciones con eventos pasados.
- Investigar y analizar los posibles efectos del cambio climático en los patrones de precipitación y la intensidad de los eventos extremos en Morelia, Michoacán.
- Utilizar los resultados del modelo y las proyecciones del cambio climático para generar mapas de inundaciones históricas y futuros, identificando áreas de afectación.



3 Hipótesis

El análisis de las inundaciones en Morelia permitirá identificar los factores meteorológicos, hidrológicos y geomorfológicos que más influyen en su ocurrencia, y que, debido al cambio climático, estos eventos se presentarán con mayor intensidad y frecuencia el futuro.



4 Marco Teórico

4.1 Cambio Climático

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, nubosidad, a diferentes escalas de tiempo. Teóricamente estas variaciones son producidas por causas naturales y antropogénicas (Martínez et al., 2004).

4.1.1 Gases de efecto invernadero

El cambio climático es atribuido principalmente al alto índice de emisiones de Gases de Efecto Invernadero a la atmósfera, éstos son principalmente derivados del empleo de combustibles fósiles utilizados en las actividades humanas (carbón, petróleo, gasolinas y los combustibles derivados del petróleo), así como la tala inmoderada, incendios forestales y la contaminación del agua y el suelo. Sin embargo, no podemos atribuir el cambio climático únicamente a procesos empleados y actividades desarrolladas por el ser humano, también existen procesos de origen natural que pueden contribuir a la contaminación atmosférica y por ende a contribuir con el cambio climático (García-Romero, 2015).

4.1.2 Escenarios de emisiones de Gases de 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 (Flores, 2022).



4.1.3 Informes AR5 y AR6

El AR5 y el AR6 son los Quintos y Sextos Informes de Evaluación del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático), los cuales proporcionan un análisis exhaustivo del estado del conocimiento científico sobre el cambio climático. Estos informes son publicados cada 5 a 7 años por el IPCC y reúnen miles de estudios científicos revisados por pares. El IPCC es un organismo internacional de las Naciones Unidas dedicado a proporcionar evaluaciones sobre el cambio climático, sus impactos, riesgos futuros y posibles estrategias de mitigación.

El AR5 fue publicado entre 2013 y 2014. Es uno de los informes más influyentes en el campo del cambio climático y sentó las bases científicas para el Acuerdo de París de 2015.

De acuerdo con el IPCC (2014), los puntos clave del AR5 son los siguientes:

- El calentamiento global es indiscutible y las actividades humanas son su principal causa.
- El nivel del mar está subiendo, el hielo polar se está derritiendo y los eventos climáticos extremos son cada vez más comunes.
- Para limitar el calentamiento a 2°C por encima de los niveles preindustriales, se necesita una reducción significativa en las emisiones de GEI.

El AR6 comenzó a publicarse en 2021, con el primer informe del Grupo de Trabajo I y los informes de los otros grupos en 2022. Es el informe más actualizado y contundente sobre la ciencia del cambio climático hasta la fecha.

De acuerdo con el IPCC (2021), los puntos clave del AR6 son los siguientes:

- El calentamiento global causado por las actividades humanas ha alcanzado 1.1°C desde la era preindustrial, y está en camino de superar los 1.5°C en las próximas décadas si no se toman medidas urgentes.
- El impacto del cambio climático ya es visible y está afectando a todas las regiones del mundo, con eventos climáticos extremos cada vez más intensos y frecuentes.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

- Es posible reducir drásticamente las emisiones de carbono, pero se requieren cambios rápidos en todos los sectores, desde la energía hasta el transporte y la agricultura.

4.1.4 Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) AR5

Las trayectorias de concentración representativas (RCP) (Representative Concentration Pathways). 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 (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 (Moss et al., 2010).

- Escenario RCP 2.6 Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 W/m² 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/m² y 6 W/m² 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/m² 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) (Flores, 2022).

4.1.5 Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) AR6

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Los Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) son un marco desarrollado para complementar los Representative Concentration Pathways (RCPs) y proporcionar una visión más completa del futuro del cambio climático al integrar aspectos socioeconómicos junto con los escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. Estos escenarios ayudan a explorar cómo diferentes trayectorias socioeconómicas podrían afectar el cambio climático y cómo las políticas y las condiciones sociales podrían influir en las emisiones de gases de efecto invernadero y en la vulnerabilidad a los impactos climáticos (IPCC, 2021).

Los SSPs se dividen en cinco trayectorias diferentes, cada una de las cuales representa una combinación distinta de desafíos para la mitigación y adaptación al cambio climático (Tabla 1):

Tabla 1. Escenarios SSP.

SSP	Scenario (Likelihood ^[20])	Estimated warming (2041–2060)	Estimated warming (2081–2100)	Very likely Range in °C (2081–2100)
SSP1-1.9	very low GHG emissions: CO ₂ emissions cut to net zero around 2050	1.6 °C	1.4 °C	1.0 – 1.8
SSP1-2.6	low GHG emissions: CO ₂ emissions cut to net zero around 2075	1.7 °C	1.8 °C	1.3 – 2.4
SSP2-4.5	intermediate GHG emissions (likely): CO ₂ emissions around current levels until 2050, then falling but not reaching net zero by 2100	2.0 °C	2.7 °C	2.1 – 3.5
SSP3-7.0	high GHG emissions (unlikely): CO ₂ emissions double by 2100	2.1 °C	3.6 °C	2.8 – 4.6
SSP5-8.5	very high GHG emissions (highly unlikely): CO ₂ emissions triple by 2075	2.4 °C	4.4 °C	3.3 – 5.7

Estas trayectorias son utilizadas para generar las proyecciones sobre las variables climáticas.

4.2 Fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

El Niño Oscilación del Sur (ENOS), corresponde a un evento climático natural que se desarrolla en el océano Pacífico ecuatorial central, la fase cálida de ENOS conocida como El Niño se manifiesta, principalmente, por un aumento de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y una disminución de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico. Estas condiciones anómalas generan fuertes precipitaciones y cambios notables en el clima y las pesquerías, tanto en los países ribereños del Pacífico



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

sudoriental, como en otras partes del mundo. La fase inversa o fría de ENOS, conocida como La Niña, se caracteriza por presentar TSM más frías que lo normal, intensificación de los vientos alisios en el este del océano Pacífico y períodos de sequía (Maturana et al., 2004).

El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), que se manifiesta principalmente a través de un calentamiento o enfriamiento anormal de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental. Estas variaciones de la TSM alcanzan las costas norte y sur de América y traen consigo alteraciones significativas en los patrones climáticos, que se desarrollan incluso en algunas regiones muy apartadas del globo. Por su parte, el ciclo ENOS se desarrolla en forma aperiódica y en una escala de tiempo mayor que la corriente de El Niño, ya que su aparición se presenta a intervalos irregulares que oscilan aproximadamente entre los 3 y 7 años (Maturana et al., 2004).

En México, gran parte de la variabilidad climática está asociada a la ocurrencia de este fenómeno (Méndez et al., 2010). En la Tabla 2 se muestran las anomalías de precipitación que se le han atribuido a ENSO durante las temporadas de invierno y verano. Los periodos húmedos están asociados a anomalías de precipitación positiva, mientras que los periodos secos se relacionan con anomalías de precipitación negativa. Una anomalía de precipitación se refiere a una desviación con respecto a la precipitación promedio que se registra en un lugar; en este caso, en la zona referida. Para esta cuestión, se dividió el territorio nacional en dos zonas principales: norte y centro-sur, ya que la mayoría de los autores coincide en que periodos secos en el norte de México corresponden a periodos húmedos en el sur y viceversa (Méndez & Magaña, 2010).

Tabla 2. Anomalías de precipitación en México forzadas por ENSO, (Guevara-Polo & Mijares-Fajardo, 2021).

Región del país	Temporada	Fase de ENOS	Condición	Referencia
Norte	Verano	El Niño	Húmedo	(Seager et al., 2009; Stahle et al., 2012)
		La Niña	Seco	(Campos et al., 2020).



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

	Invierno	El Niño	Húmedo	(Torbenson et al., 2019; Stahle et al., 2020; Seager et al., 2009)
		La Niña	Seco	(Parazoo et al., 2015; Torbenson et al., 2019; Seager et al., 2009).
Centro y Sur	Verano	El Niño	Seco	(Méndez & Magaña, 2010; Stahle et al., 2012; Cavazos et al., 2020; Seager et al., 2009).
		La Niña	Húmedo	(Caso et al., 2007; Park et al., 2017; Cavazos et al., 2020; Méndez & Magaña, 2010).

4.3 Tormentas severas

Se puede definir a una tormenta severa como aquella tormenta que es susceptible de producir daños materiales importantes, muertes o ambos. Generalmente, las tormentas severas vienen acompañadas de lluvias intensas, vientos fuertes y pueden producir granizo, rayos y truenos, inundaciones repentinas e incluso, tornados. Si se presentan sobre el océano, también producen oleaje alto y marejada intensa (Prieto-González et al., 2021).

4.3.1 Precipitaciones extremas

Las precipitaciones intensas o extremas son casos en los que la cantidad de lluvia o nieve excede lo normal, lo que varía según la ubicación y la estación, y estos eventos aumentan con el cambio climático (United States Environmental Protection Agency, 2016). En Estados Unidos, las lluvias intensas ahora ocurren un 30% más a menudo que en 1948 (tienen lugar cada nueve meses en lugar de cada doce meses); también, son un 10% más intensas en promedio en dicho país (Environment America. Research y Policy Center, 2012). Las proyecciones muestran que dichas lluvias serán más frecuentes e intensas a medida que las temperaturas continúen aumentando (Witze, 2018).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) clasifica a la precipitación de acuerdo con su intensidad la cual es mostrada en la Tabla 3.



Tabla 3. Clasificación de los diferentes tipos de precipitación (Prieto-González et al., 2021).

Tipos de Precipitación	Características
Gotas de llovizna	Gotitas de agua con peso suficiente para caer, las cuales tienen entre 0.2 y 0.5 mm en diámetro.
Gotas de lluvia	Gotas de agua con diámetro 0.5 mm
Lluvia ligera	Lluvia máxima en mm acumulada en 24 horas, de 0.1 a 5 mm.
Lluvia moderada	Lluvia máxima en mm acumulada en 24 horas, de 5 a 20 mm.
Lluvia fuerte	Lluvia máxima en mm acumulada en 24 horas, de 20 a 70 mm.
Lluvia intensa	Lluvia máxima en mm acumulada en 24 horas, de 70 a 150 mm.
Lluvia torrencial	Lluvia máxima en mm acumulada en 24 horas, mayor a 150 mm.

4.3.2 Inundaciones

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define inundación como el rebase de los límites normales de confinamiento de una corriente u otro cuerpo de agua, o la acumulación de la misma sobre áreas que por lo general no están sumergidas. Las inundaciones incluyen las fluviales (asociadas con desbordamiento de ríos); súbitas (flashfloods); urbanas (p. ej., las provocadas por la falla del sistema de alcantarillado); pluviales (caracterizadas porque el agua acumulada proviene de la precipitación sobre la zona afectada, no de otros lugares, como de la parte alta de la cuenca); costeras, y asociadas con deslizamientos de glaciares (IPCC, 2012).

4.4 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).

4.4.2 Modelos de simulación hidrológica

Se puede definir el término "modelo" como una representación simplificada del mundo real, que permite tener una idea de lo que ocurre bajo ciertas circunstancias. En el caso de los modelos hidrológicos se intentan representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio, generalmente una cuenca, que transforman una precipitación en escorrentía. Un modelo hidrológico es una representación simplificada de una parte compleja de un sistema hidrológico por medio de un modelo matemático, por los parámetros de un modelo, variables y un concepto de modelo predefinido (Gómez, 2016).

De acuerdo con Gómez (2016), los modelos hidrológicos según su distribución espacial de parámetros pueden ser:

- Agregados: En la naturaleza las características físicas de una cuenca no son homogéneas, en los modelos agregados los parámetros asociados a estas características no cambian espacialmente dentro de la cuenca, es decir, se supone un valor típico o medio para toda la cuenca.
- Distribuidos: Estos modelos permiten variar el valor de sus parámetros espacialmente dentro de la cuenca. Es por esta razón que el nivel de detalle es mucho mayor, pero también requiere una mayor cantidad y calidad de datos que crece a medida que se aumenta el nivel de detalle.
- Semi-distribuidos: Estos modelos dividen la cuenca en subcuencas, las cuales a su vez son modeladas de manera agregada a pesar de no ser homogéneas.



5 Antecedentes

Las lluvias extremas son un fenómeno meteorológico que ha sido cada vez más frecuente en todo el mundo. Estas lluvias pueden causar inundaciones repentinas, deslizamientos de tierra y otros daños significativos a la infraestructura y a la vida humana.

Los factores que contribuyen a la ocurrencia de las lluvias extremas son complejos y variados. Uno de los principales factores es el cambio climático, que se ha relacionado con un aumento en la frecuencia y la intensidad de los eventos de lluvia extrema. Según el informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el incremento de la temperatura global ha significado un aumento en la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, lo que ha llevado a una mayor probabilidad de lluvias intensas (IPCC, 2021).

Entre 1980 y 2000 los desastres naturales por inundaciones provocadas por lluvias excepcionales ocurridos en México han dejado daños materiales por más de 10,000 millones de dólares. Las características físicas del territorio condicionaron que para el 2007, 74 ciudades, y 12 millones de habitantes estuvieran expuestos a efectos de ciclones tropicales, si bien la población en riesgo potencial por inundaciones asciende a 22 millones de personas. Por todo lo anterior la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) señala que México es un país vulnerable a los impactos del cambio climático (UNESCO, 2007).

A lo largo de su historia México ha sido afectado por diversos desastres naturales (Figura 1), dentro de estos se encuentran los provocados por fenómenos hidrometeorológicos, los cuales para el periodo de 2000 a 2018 representaron el 86.6 % de los daños y pérdidas registradas (CENAPRED, 2019).

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

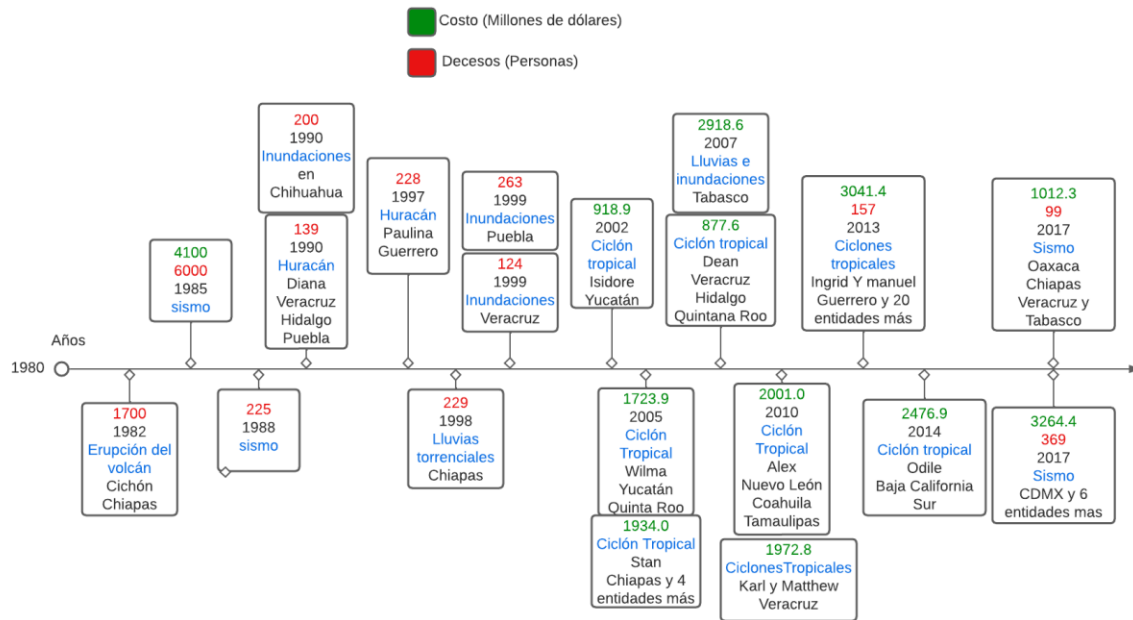


Figura 1. Desastres de mayor impacto desde 1980 - 2017. Elaboración propia con base en datos de (CENAPRED, 2019).

Los análisis de riesgos y de daños debidos a las inundaciones han recibido gran atención por parte de las ciencias de la tierra, las cuales, a través de diferentes metodologías, estudian la dinámica fluvial, establecen periodos de retorno de las lluvias y delimitan las zonas de riesgo de inundación, entre otras cosas, a través de modelos matemáticos y datos históricos de precipitaciones y de caudales (Garnica y Alcántara, 2004).

Debido a la problemática generada por los eventos extremos distintas organizaciones se han dado a la tarea de generar índices con el fin de clasificar y entender el comportamiento de éstos. El grupo de trabajo para la detección y atribución de cambios en el clima: Variabilidad y Predictibilidad Climática (CCI/CLIVAR) por sus siglas en inglés, desarrollaron un total de 21 Índices Extremos Climáticos (ICE), basados sobre datos diarios de precipitación y, temperatura máxima y mínima. La función principal de estos índices es evaluar los cambios en la intensidad, frecuencia y duración de los eventos de lluvia y temperatura (Valverde & Marengo, 2014).

En un estudio realizado en Brasil en 2014, se analizaron los ICE de precipitación sobre las mayores cuencas del territorio brasileño, en donde se determinó que el índice de



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

sequía (CDD) y los índices de precipitación de corta duración (RX1day y RX5day), ocurrieron con mayor frecuencia e intensidad durante los eventos de El Niño (ENOS) (Valverde & Marengo, 2014).

Roblero-Hidalgo et al. (2018) realizaron la aplicación del índice de concentración de precipitación diaria (CI), como un indicador para estimar el grado de agresividad o torrencialidad de la lluvia que existe en la cuenca y sus subcuencas hidrológicas del Río Grande de Morelia. Donde al realizar un promedio ponderado de este índice se pudo determinar que el CI corresponde a una cuenca torrencial.

Otros autores han optado por determinar la relación entre eventos extremos de precipitación e inundaciones. A partir de identificar el patrón espacial y temporal de la precipitación en la región de estudio, y obtener las fechas de estos eventos extremos para relacionarlos con fenómenos meteorológicos (Rivas-Gómez et al., 2022 y Ávila & Vide Javier, 2013). En el caso de Herrera et al. (2018) encontraron que en los meses de agosto, septiembre y octubre se presentan las mayores precipitaciones debido a un aumento en las temperaturas del golfo de México y del Caribe, lo que aumenta la probabilidad de generación de ciclones tropicales.

En resumen, las lluvias extremas y sus consecuencias representan un desafío cada vez mayor debido al cambio climático y a la vulnerabilidad de ciertas regiones. La comprensión de estos fenómenos, la evaluación de riesgos y daños, y el desarrollo de estrategias de mitigación son fundamentales para hacer frente a los impactos de las lluvias extremas en la sociedad y el medio ambiente.



6 Justificación

La ciudad de Morelia es un claro ejemplo latinoamericano del riesgo de desastre por inundaciones de la última década, en especial su periferia, la cual está siendo ocupada a través de viviendas auto-construidas que denotan la precariedad del hábitat en la ciudad (Hernández, et al. 2014).

Debido a que no se dispone de un marco matemático que explique satisfactoriamente el comportamiento del flujo dentro de la cuenca, la modelación hidrológica distribuida ha sido uno de los puntos de interés de la comunidad científica desde los años 80. Hoy en día, la modelación distribuida es una de las herramientas clave para la estimación y predicción de eventos de crecida (Francés et al., 2014).

En los últimos años, ha sido evidente un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos en diversas partes del mundo, posiblemente vinculado al cambio climático. Estos eventos han generado inundaciones, con consecuencias en vidas humanas y pérdidas económicas. Dentro de este contexto, la ciudad de Morelia ha sufrido los efectos de eventos de precipitación extrema, claro ejemplo fue el paso del huracán Willa en el 2018, que dejó al menos 40 colonias afectadas y presentando una inversión de 60 millones de pesos para la reparación de los daños (BATRES, 2018), aunque se han realizado diversos estudios relacionados a las inundaciones estos se han centrado en las consecuencias, pero no en las causas.

La presente investigación pretende llenar este vacío, aportando al conocimiento científico la identificación de las áreas más susceptibles a inundaciones y el análisis de cómo el cambio climático podría afectar la intensidad y frecuencia de estos fenómenos en el futuro. Estos resultados ofrecerán valiosa información para quienes toman decisiones en planificación urbana, gestión del riesgo de desastres y ejecución de estrategias de adaptación.

7 Zona de estudio

La ciudad de Morelia se localiza en el Estado de Michoacán, en la región central de la República Mexicana. La zona comprende un área urbana de 85 km² y se encuentra entre las coordenadas 19°38' y 19°50' N y los 101°06' y 101°18' W, con una altitud de 1920 msnm, cuenta con una población de 849,053 habitantes de acuerdo con el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020). Sus principales corrientes son el Río grande el cual desemboca en el lago de Cuitzeo y el Río Chiquito (Figura 2).

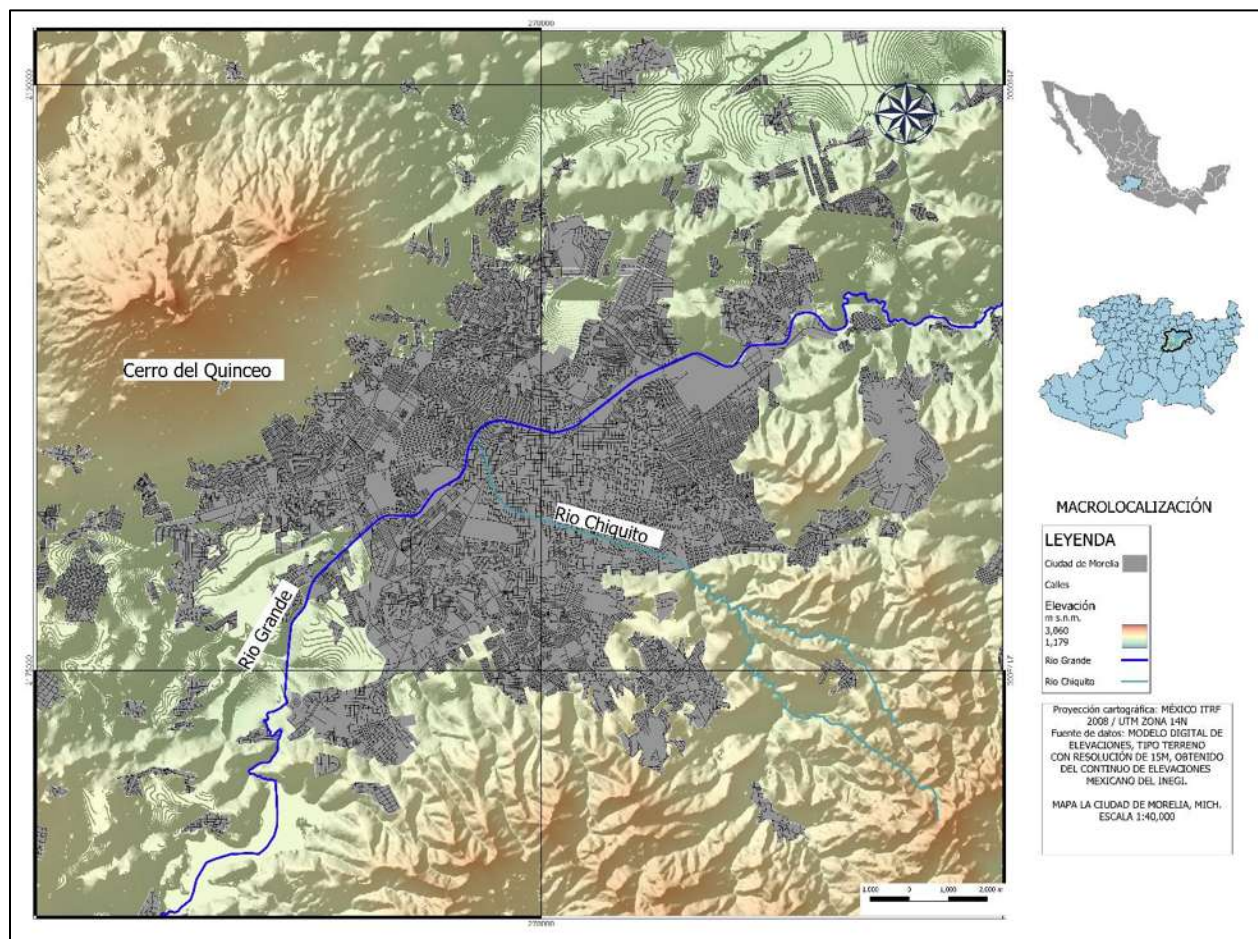


Figura 2. Zona de estudio, elaboración propia.

8 Metodología

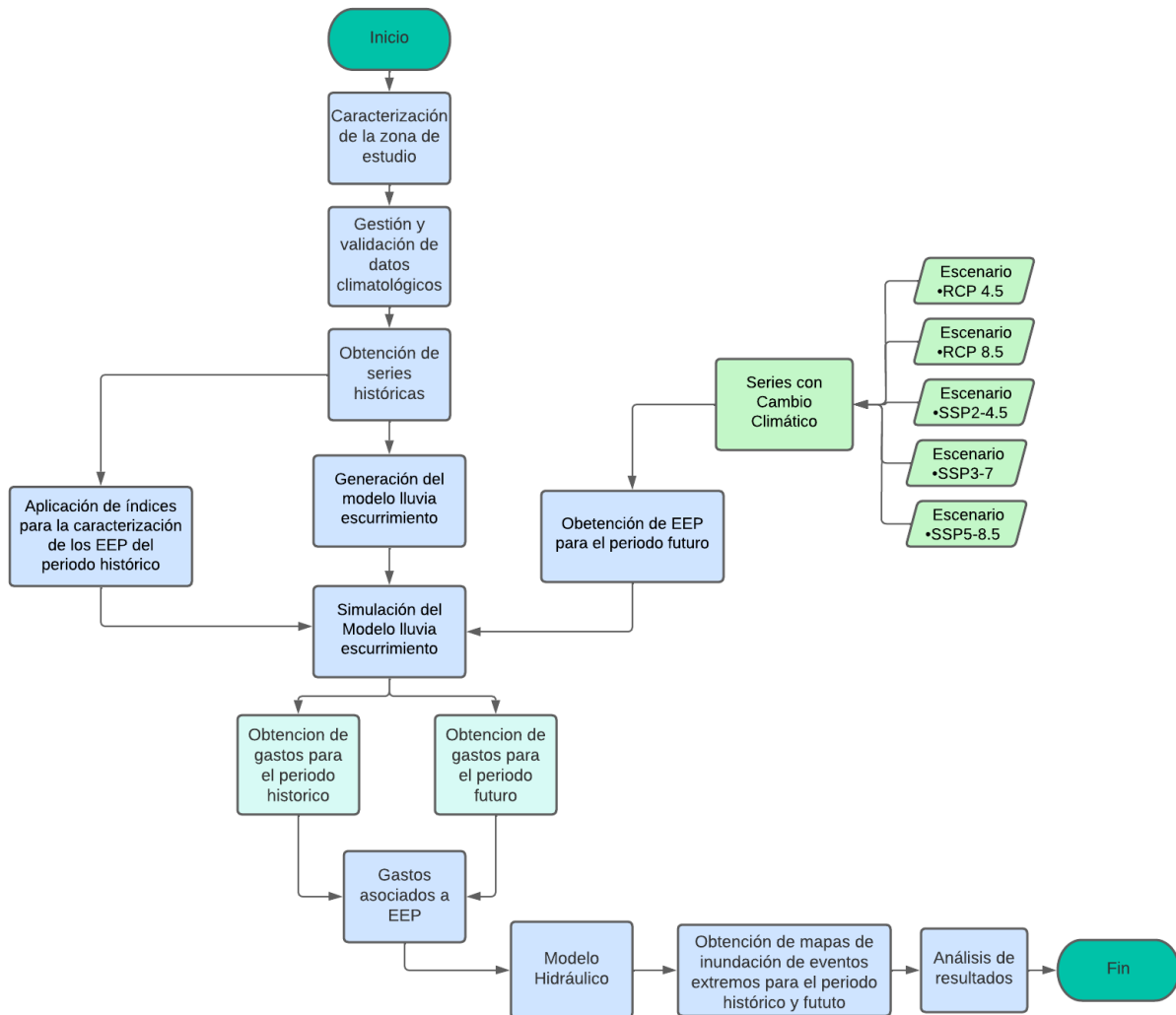


Figura 3. Diagrama metodológico.

8.1 Caracterización de la zona de estudio

Esta fase consiste en realizar un análisis geográfico y físico adecuado de la región de interés para así poder delimitar los alcances de nuestro estudio por medio de un sistema de información geográfica. En esta fase se centrará en la recopilación de los insumos necesarios para la generación del modelo lluvia escurrimiento, así como la determinación de las características geomorfológicas de las cuencas.



8.1.1 Geomorfometría

La caracterización morfométrica de las cuencas hidrográficas es una herramienta fundamental en el análisis de los procesos geomorfológicos y en la inferencia del comportamiento hidrológico de las mismas. Este tipo de estudios permite estimar parámetros clave como los caudales máximos, la erosión del suelo y la recarga de los acuíferos. Sin embargo, en muchos países en desarrollo, las investigaciones relacionadas con la morfometría de las cuencas son limitadas, a pesar de su relevancia. Su aplicación resulta especialmente valiosa en regiones no instrumentadas, donde los datos hidrológicos y climáticos son escasos o inexistentes, contribuyendo significativamente a la gestión de los recursos hídricos y al diseño de estrategias para mitigar riesgos ambientales (Del Águila y Mejía, 2023).

8.1.1.1 Área

El área de una cuenca se refiere a la superficie en proyección horizontal que está delimitada por su parteaguas. Este último corresponde a una línea imaginaria que conecta los puntos de mayor elevación topográfica, funcionando como un límite natural que separa la cuenca de las regiones adyacentes (Aparicio, 1992).

De acuerdo con Araque et al. (2019) las cuencas se pueden clasificar de la siguiente manera (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de cuencas de acuerdo a su tamaño.

Clasificación de la cuenca	Área km ²
Muy grande	> 5000
Grande	Entre 2500 y 5000
Intermedia Grande	Entre 500 y 2500
Intermedia Pequeña	Entre 250 y 500
Pequeña	Entre 25 y 250
Muy Pequeña	< 25

Adaptado de Araque et al. (2019).



8.1.1.2 Pendiente del cauce principal S_o

La pendiente media se define como la inclinación de una línea recta trazada desde el extremo aguas abajo de la corriente, de manera que las áreas por encima y por debajo del perfil del cauce queden equilibradas. Según Taylor y Schwarz, esta pendiente media puede estimarse considerando un canal con una sección transversal uniforme, cuya longitud y tiempo de recorrido sean equivalentes a los de la corriente analizada (Aparicio, 1992). En donde la pendiente media del cauce está definida por la ecuación [1].

$$S_o = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right] \quad [1]$$

Donde:

S_o : es la pendiente media del cauce principal.

L : es la longitud del cauce principal en m.

l_i : es la longitud del tramo en cuestión.

S_i : pendiente del tramo en cuestión.

8.1.1.3 Coeficiente de Compacidad

Definido por Gravelius, este índice corresponde a la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo cuya área sea igual a la superficie de la cuenca (Meza et al. 2014). El cual se muestra en la ecuación [2].

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad [2]$$

Donde:

K_c : Coeficiente de Compacidad.

P : Perímetro de la cuenca.

A : Área de la cuenca.

Tabla 5. Clasificación de la compacidad de una cuenca. (INE,2004).

Rango de K_c	Clases de Compacidad
1 - 1.25	Redonda a Oval redonda



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

1.25 – 1.50	Oval redonda a Oval oblonga
1.50 – 1.75	Oval oblonga a Rectangular oblonga

8.1.1.4 Razón de elongación (Re)

Esta relación se establece comparando el diámetro de un círculo cuya área sea equivalente al área de la cuenca con el diámetro de la longitud máxima de la cuenca. Su formulación se expresa mediante la ecuación [3] (Rojo, s.f.).

$$Re = 1.128 * \frac{\sqrt{A}}{L} \quad [3]$$

Donde:

A: área de la cuenca y L: longitud de la cuenca.

Si $Re = 1$ la cuenca tendría una forma redondeada.

8.1.1.5 Factor de Horton (Kf)

Es la proporción que se establece entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima el cual se determina con la ecuación [4].

$$Kf = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad [4]$$

Mediante el factor de Horton las cuencas se pueden clasificar de acuerdo a la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del factor de Horton.

Rango Kf	Forma	Susceptibilidad a avenidas torrenciales
<1	Cuenca alargada	Baja
=1	Cuenca cuadrada	Media
>1	Cuenca achatada	Alta

Un valor de Kf superior a la unidad indica un mayor grado de achatamiento de la cuenca o la presencia de un río principal relativamente corto. Esto se traduce en una tendencia a concentrar rápidamente el escurrimiento generado por una lluvia intensa, lo que facilita la formación de grandes caudales pico (Horton, 1945).



8.1.1.6 Tiempo de concentración (Tc).

El tiempo de concentración se define como el periodo requerido para que, durante una lluvia el agua de las áreas más alejadas de la cuenca llegue al punto de salida de esta, permitiendo que toda la cuenca participe simultáneamente en el escurrimiento (Llamas, 2011).

En la literatura existen muchas formas empíricas para calcular el Tc, dentro de estas se muestran las Ecuaciones [5, 6, 7, 8]:

Kirpich (Kirpich, 1940):

$$T_c = 0.0662 * \frac{L^{0.77}}{S_o^{0.385}} \quad [5]$$

Giandotti (Arbeláez, 1997):

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 * \sqrt{S_o * L}} \quad [6]$$

California (Upegui, 2011):

$$T_c = \left[\frac{0.87075 * L^3}{H} \right]^{0.385} \quad [7]$$

Témez (Témez, 1991)

$$T_c = 0.3 * \left[\frac{L}{S_o^{0.25}} \right]^{0.76} \quad [8]$$

En donde:

L: Longitud del cauce principal en Km

So: Pendiente media de del cauce (m/m)

H: Desnivel en (m)

8.1.2 Número de escurrimiento (N)

La mayoría de criterios para determinar los escurrimientos requieren que la cuenca esté aforada, lo que implica contar con mediciones de los caudales de salida en conjunto con los registros de precipitación. Sin embargo, en muchos casos, especialmente en gran parte de las cuencas del país que no están aforadas, estos datos no están disponibles. En tales situaciones, es imprescindible recurrir a métodos que permitan estimar la altura de lluvia efectiva a partir de la precipitación total y las características propias de la



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

cuenca. Estos métodos son esenciales para analizar y modelar el comportamiento hidrológico en áreas con datos limitados (Aparicio, 1992). El método propuesto por el U.S. Soil Conservation Service (SCS, 1957), conocido como el "método de los números de escurrimiento", se presenta como una herramienta que integra las características mencionadas anteriormente. Este método permite estimar la lluvia efectiva o el escurrimiento directo a partir de la precipitación total, considerando las propiedades de la cuenca, como el tipo de suelo, el uso del terreno, la cobertura vegetal y las condiciones de humedad antecedente mostrados en la Tabla 7 Su aplicabilidad lo convierte en una opción valiosa, especialmente en regiones donde los datos hidrológicos son limitados.

Tabla 7. Selección del N de acuerdo a las características de la pendiente, uso y tipo de suelo.

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno, en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin Cultivo	Surcos rectos	--	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	> 1	72	81	88	91
	Surcos rectos	< 1	67	78	85	89
	Contorneo	> 1	70	79	84	88
	Contorneo	< 1	65	75	82	86
Cereales	Terrazas	> 1	66	74	80	82
	Terrazas	< 1	62	71	78	81
	Surcos rectos	> 1	65	76	84	88
	Surcos rectos	< 1	63	75	83	87
	Contorneo	> 1	63	74	82	85
	Contorneo	< 1	61	73	81	84
	Terrazas	> 1	61	72	79	82
	Terrazas	> 1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	> 1	66	77	85	89
	Surcos rectos	< 1	58	72	81	85
	Contorneo	> 1	64	75	83	85
	Contorneo	< 1	55	69	78	83
Pastizales	Terrazas	> 1	63	73	80	83
	Terrazas	< 1	51	67	76	80
	-----	> 1	68	79	86	89
	-----	< 1	39	61	74	80
Pradera permanente	Contorneo	> 1	47	67	81	88
	Contorneo	< 1	6	35	70	79
	-----	< 1	30	58	71	78



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Bosques naturales						
Muy Ralo	-----	--	56	75	86	91
Ralo	-----	--	46	68	78	84
Normal	-----	--	36	60	70	77
Espeso	-----	--	26	52	62	69
Muy espeso	-----	--	15	44	54	61
Caminos						
De terracería	-----	--	72	82	87	89
Con superficie dura	-----	--	74	84	90	92

8.2 Gestión y validación de datos climatológicos

En este apartado se seleccionan las estaciones meteorológicas tomando en cuenta diferentes criterios según nos convengan, estos criterios pueden ser: Años efectivos (número de años de información con los que cuenta la estación sin importar que sean consecutivos), años en servicio (tiempo en el que la estación ha estado trabajando), porcentaje de vacíos (cuantos años pueden faltar en las series de precipitación, por lo regular se recomienda que mínimo se cuente con un total de 25 años efectivos). Para la obtención de la información hidrométrica se utilizará la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional, creada y gestionada a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Toda la información deberá ser tratada y validada por diversas pruebas estadísticas, de manera que se pueda garantizar la fiabilidad de la información utilizada.

8.2.1 Pruebas estadísticas

La validación de la información de precipitación es necesaria ya que debemos de corroborar que las series de precipitación con las que vamos a trabajar corresponden a series de precipitación, para ello, se deberá garantizar que las series sean homogéneas, independientes y sin tendencia.

La homogeneidad en las series de precipitación proporciona información sobre si corresponde a una misma población.

La independencia hace referencia a que la ocurrencia de algún valor de precipitación, no depende de algún otro dato que le precedió en el pasado, por ejemplo, si un año antes llueve mucho, quiere decir que en el año que le precede lo hará de la misma manera.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La tendencia ocurre cuando las series de precipitación tienen un comportamiento ascendente, descendente o algún salto (que años atrás tenga precipitaciones mayores y después de algún año estos valores sean menores o viceversa, lo que generaría un escalón en las series de precipitación), esto puede ocurrir cuando la serie no es homogénea o es dependiente; para tener una serie sin tendencia los valores de precipitaciones deben de ser aleatorios. A continuación, se describen a detalle las pruebas aplicadas:

- Test de secuencias

El procedimiento consiste en definir la mediana de la serie que se analiza, para lo cual los datos se ordenan según la magnitud, si el número de los valores (n) es impar, la mediana es el valor central; si n es par corresponde a la media aritmética de las dos magnitudes centrales. Con base en la mediana se marca la serie original con A si el dato es mayor y con B si es menor; las secuencias o sucesión (u) de los valores de A o B son contabilizadas y concluye que la serie es homogénea si u está en el intervalo que marca la Tabla 1 de acuerdo con el tamaño de la muestra (n). Si se obtiene un alto valor de u la no homogeneidad se puede deber a un exceso de la oscilación de la serie, en cambio si u es reducido puede haber tendencia o cambio en la media (Campos, 1998) los valores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Rango de datos permisible (U) dependiendo del número de muestras (N).

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

- Test de Helmer

En este método se ordena la serie consecutiva en años y se analiza el signo de las desviaciones con respecto a la media aritmética de los datos donde los datos consecutivos (cuando estén de un mismo lado de la media, ya sea mayor o menor) son

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

denominados (S) y cuando ocurre un cambio (pase de ser mayor que la media o viceversa) se le denominará (C). Este método debe aplicarse a la serie de datos mayor consecutiva, es decir no debe faltar un dato anual en el tramo escogido.

Una vez que se realiza el test se analiza que este cumpla el criterio con la Ecuación [9]:

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

Donde:

n = Número de datos.

S = Número de secuencias.

C = Número de Cambios.

- t Student

Cuando la falta de homogeneidad en una serie se atribuye a un cambio abrupto en la media, la prueba estadística de la t Student (WMO, 1966) se utiliza como una herramienta idónea para detectarla. Se sugiere, en primera instancia, generar un gráfico de la precipitación anual para visualizar el comportamiento temporal de la serie. De esta manera, se pueden identificar los periodos en los que se produce un salto, indicativo de un cambio en la tendencia media de la serie. Estos saltos influyen en el aumento o disminución de la media de las precipitaciones, dividiendo la serie en dos periodos, denotados como n1 y n2. Para cada uno de estos periodos, se lleva a cabo el cálculo de la media (X1 y X2, respectivamente) mediante el método propuesto por Campos Aranda (1998), la cual está definida por la Ecuación [10].

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{0.5}} \quad [10]$$

Dónde:

$\bar{x}_1, s_1$: son la media y la varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1 .

$\bar{x}_2, s_2$: son la media y la varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2 .

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t Student de dos colas y con $v=n_1+n_2-2$ grados de libertad y para un nivel de significancia: $\alpha= 0.05$ (Tabla 9).

Tabla 9. Valores de significancia para la prueba de t Student.

Grados de libertad	Nivel de significancia		Grados de libertad	Nivel de significancia	
	5%*	5%**		5%*	5%**
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101
2	2.92	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.08
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.86	2.306	25	1.708	2.06
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.228	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.048
12	1.782	2.179	29	1.699	2.045
13	1.771	2.16	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.753	2.131	60	1.671	2
16	1.746	2.12	120	1.658	1.98
17	1.74	2.11	∞	1.645	1.96
Prueba de una cola*			Prueba de dos colas**		

- Límites de Anderson

La cuantificación de la auto correlación o independencia temporal se realiza con base en el coeficiente de correlación (r_k) para un orden o desfase k el cual indica que tan fuerte está siendo afectado un evento por el anterior.

El número de desfases corresponde al número de valores que tendrá el correlograma (ρ) (Ecuación 11), en la cual σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de la serie X y Y , y n corresponde al número de datos de la muestra.

$$\rho = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad [11]$$

En donde β se calcula con la Ecuación [12].

$$\beta = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad [12]$$

Una vez calculado esto se determina los límites de Anderson para un nivel de confianza del 95% mostrada en la Ecuación [13].

$$r_{k(95\%)} = \frac{-1 \pm 1.645\sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad [13]$$

Para las estaciones meteorológicas, si menos del 10% de los valores del correlograma calculado superan los límites, se dice que la serie de datos es independiente (Navarro, 2019).

8.2.2 Llenado de datos diarios

La operación de llenado de datos se centra en completar las lagunas con información razonable y coherente desde una perspectiva estadística. Es importante destacar que estos métodos no buscan reproducir los datos perdidos, sino proporcionar estimaciones lógicas. A medida que disminuye la cantidad de datos faltantes en una serie histórica, se espera que los resultados muestren menor grado de incertidumbre. Sin embargo, al incorporar datos a la serie histórica, se introduce un componente de incertidumbre, ya que estos datos llenados no reflejan completamente los eventos reales (García-Romero, 2015).

Uno de los métodos más utilizados es el de interpolación de Ponderación Inversa de Distancia (IDW por sus siglas en inglés) (Adelson, 1981), La ecuación para completar los datos faltantes requiere la asignación de un peso a cada estación involucrada. Este peso se determina mediante el cálculo de la suma del Inverso de la Distancia Euclidiana (IDE) al cuadrado de las estaciones útiles que cubren el intervalo de datos faltantes (es decir, aquellas con información en el intervalo que se desea completar). El peso específico de cada estación en el proceso de llenado se obtiene dividiendo el inverso de la distancia Euclidiana al cuadrado de la estación seleccionada para el llenado entre la suma total del inverso de la distancia Euclidiana al cuadrado. Posteriormente, este peso se multiplica por el valor de precipitación correspondiente a dicho período Ecuación [14].

$$Dato\ faltante = \frac{\sum_{i=1}^n (precipitación\ i * (IDE_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (IDE)^2} \quad [14]$$

8.3 Series con cambio climático



Para la obtención de series diarias de precipitación con cambio climático, se descargó información de precipitación diaria del Atlas Copernicus, también conocido como Copernicus Climate Change Service (C3S), es una iniciativa de la Unión Europea que forma parte del programa Copernicus. Este programa es gestionado por el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF) y tiene como objetivo proporcionar información precisa y actualizada sobre el cambio climático para ayudar a los responsables de la toma de decisiones y a la sociedad en general.

8.3.1 Corrección del sesgo

La conceptualización imperfecta de los modelos climáticos y la discretización del mallado provocan que los pronósticos climáticos presenten sesgos sistemáticos. Por esta razón, las previsiones no deben utilizarse directamente en el estudio de impactos hidrológicos a escala de cuenca (Christensen et al., 2008; Teutschbein y Seibert, 2010, 2012). Entre los sesgos comunes en los pronósticos climáticos se encuentran la frecuencia excesiva de días húmedos con lluvias de baja intensidad, la estimación incorrecta de temperaturas extremas y la subestimación o sobreestimación de las variaciones estacionales de precipitación (Ines y Hansen, 2006; Terink et al., 2009).

Los modelos climáticos pueden tener sesgos y discrepancias con respecto a los datos observados históricos. Por lo que será importante corregir estos sesgos para obtener proyecciones más realistas. Al realizar una corrección de sesgo, se utiliza la mayor cantidad de datos posibles para que el factor de corrección refleje adecuadamente el comportamiento de la variable en un período suficientemente largo. Esto asegura que los pronósticos corregidos mantengan las características temporales de la serie histórica observada. Por esta razón, al corregir series de cambio climático, se suelen emplear periodos de control de 30 años, lo que confiere robustez a la corrección.

Crochemore et al. (2016) analizaron la capacidad de las previsiones de precipitación en subcuencas de Francia, corrigiendo el sesgo antes de calcular caudales mediante un modelo hidrológico. La calidad de las predicciones se evaluó utilizando los atributos de Fiabilidad, Refinamiento y Exactitud. Los resultados indicaron que los caudales representan de mejor manera los datos históricos cuando se emplean datos de

precipitación con corrección del sesgo. Entre los métodos de corrección analizados, el Escalamiento Lineal y el Mapeo de Cuantiles ofrecieron los mejores resultados.

8.3.1.1 Linear Scaling

La Ecuación [15] muestra el método de Linear Scaling (LS) el cual busca hacer coincidir la media mensual de los pronósticos con la de los datos observados (Lenderink et al., 2007). Este método ha sido frecuentemente utilizado debido a su simplicidad y rápida aplicación (Chen et al., 2013; Li et al., 2019; Mahmood et al., 2018; Ouyang et al., 2015; Teutschbein y Seibert, 2012).

$$Pr_{BC} = Pr_{pron} * \left[\frac{\mu_m * (Pr_{obs})}{\mu_m * (Pr_{pron})} \right] \quad [15]$$

Donde Pr_{BC} es la precipitación diaria corregida, Pr_{pron} es la precipitación diaria pronosticada, $\mu_m(Pr_{obs})$ y $\mu_m(Pr_{pron})$ son las medias mensuales de los datos observados y los pronósticos, respectivamente.

8.4 Determinación de Eventos Extremos de Precipitación (EEP)

Como se mencionó anteriormente, existen diversas maneras para analizar Eventos Extremos de Precipitación (EEP) para nuestro caso se pretende hacer uso de distintas técnicas para caracterizar dichos eventos.

Uno de los índices más utilizados para analizar la precipitación diaria en cuencas es el Índice de Concentración de Precipitación (CI) por sus siglas en inglés. Este índice propuesto por Martin-Vide (2004), hace uso de la curva de Lorenz para evaluar el peso relativo de los días más lluviosos en series de datos de precipitación diaria, La determinación de esta curva se basa en asignar a una literal "Y" el porcentaje acumulado de precipitación, al cual contribuye el porcentaje acumulado de días "X" en los que se registró dicho valor de precipitación (Tabla 10).

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 10. Distribución de frecuencias en clases de 1mm.

Clases	medios	n	$\sum n$	Pi	$\sum Pi$	$\sum ni (\%) = X$	$\sum Pi (\%) = Y$
0.1-0.9	0.5	582	582	291	291	19.13	1.26
1-1.9	1.5	404	986	606	897	32.4	3.9
2-2.9	2.5	257	1243	642.5	1539.5	40.85	6.69
3-3.9	3.5	234	1477	819	2358.5	48.54	10.25
4-4.9	4.5	192	1669	864	3222.5	54.85	14
5-5.9	5.5	144	1813	792	4014.5	59.58	17.44
6-6.9	6.5	136	1949	884	4898.5	64.05	21.28
7-7.9	7.5	129	2078	967.5	5866	68.29	25.48
8-8.9	8.5	106	2184	901	6767	71.77	29.4
9-9.9	9.5	85	2269	807.5	7574.5	74.56	32.9
10-10.9	10.5	84	2353	882	8456.5	77.33	36.74
11-11.9	11.5	63	2416	724.5	9181	79.4	39.88
12-12.9	12.5	71	2487	887.5	10068.5	81.73	43.74
13-13.9	13.5	57	2544	769.5	10838	83.6	47.08
68-68.9	68.5	1	3037	68.5	22541.5	99.8	97.92
70-70.9	70.5	1	3038	70.5	22612	99.84	98.23
73-73.9	73.5	1	3039	73.5	22685.5	99.87	98.55
75-75.9	75.5	1	3040	75.5	22761	99.9	98.88
80-80.9	80.5	1	3041	80.5	22841.5	99.93	99.23
82-82.9	82.5	1	3042	82.5	22924	99.97	99.59
95-95.9	95.5	1	3043	95.5	23019.5	100	100

Una vez obtenido el porcentaje de los días con lluvia $\sum ni (\%)$ o X y el porcentaje de cantidad de cantidad de lluvia $\sum Pi (\%)$ o Y, se procede a graficar la curva de Lorenz, tal como se observa en la Figura 4.

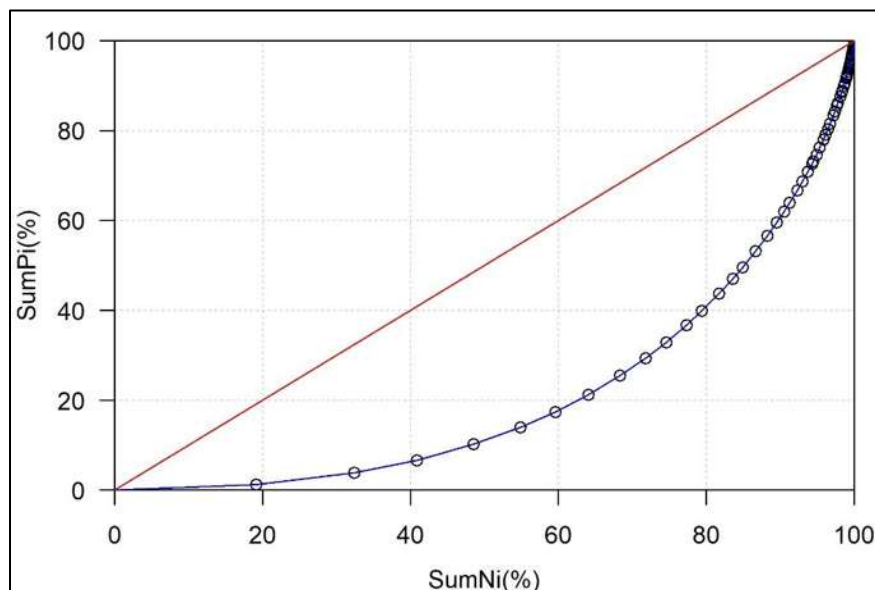


Figura 4. Curva de Lorenz de concentración de precipitación diaria.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La línea poligonal es denominada curva de Lorenz o de concentración, la cual Martín-Vide (2004) asocia a funciones de tipo exponencial, véase Ecuación [16]:

$$Y = aXe^{bx} \quad [16]$$

Donde a y b son constantes determinadas por medio del método mínimos cuadrados ver Ecuación [17] y [18]:

$$\ln a = \frac{\sum x_i^2 \sum \ln y_i + \sum x_i \sum x_i \ln x_i - \sum x_i^2 \sum \ln x_i - \sum x_i \sum x_i \ln y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad [17]$$

$$b = \frac{N \sum x_i \sum \ln y_i + \sum x_i \sum \ln x_i - N \sum x_i \sum \ln x_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad [18]$$

Ya definidas las constantes se procede a calcular el Área “A” mediante la integral definida por la Ecuación [19]:

$$A = \left[\frac{a}{b} e^{bx} \left(x - \frac{1}{b} \right) \right]_0^{100} \quad [19]$$

El área S está definida por la recta a 45° y la curva de Lorenz con base en esto el índice de concentración de precipitación diaria (CI) queda definido mediante la Ecuación [20]:

$$CI = S/5000 \quad [20]$$

Con el objetivo de otorgar un significado físico a los valores del CI en cuencas y sub-cuenca Roblero-Hidalgo et al. (2018) proponen establecer qué tan torrencial es una sub-cuenca en comparación con otra, generando un histograma de la distribución de los CI en la cuenca, en el cual si los datos tienen una forma de distribución normal esta clasificación podrá ser dividida por medio de cuartiles yendo desde: bajo torrencial, medio torrencial, torrencial y altamente torrencial.

La clasificación de una cuenca torrencial depende de múltiples factores, entre los cuales los parámetros morfométricos juegan un papel clave, ya que describen las características específicas de la cuenca y su respuesta ante eventos hidrológicos extremos (Vera y Valderrama). Además, la geomorfología de los cauces y el relieve de las cuencas tienen una influencia directa en la generación de avenidas torrenciales, dado que estos elementos determinan cómo el agua fluye y se concentra dentro de la cuenca (Ordoñez, 2011). Por su parte, la forma de la cuenca y las características de la red de drenaje son determinantes en las dinámicas de descarga, ya que influyen tanto en la velocidad del



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

escurrimiento superficial como en el comportamiento hidrológico general. Estos factores, considerados de manera conjunta, son esenciales para comprender las probabilidades de generación de eventos torrenciales y su impacto (CORNARE, 2012).

El Índice Morfométrico de Torrencialidad se define como una medida que relaciona diversos parámetros morfométricos, tales como el coeficiente de compacidad o forma, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje. Estos indicadores proporcionan información clave sobre la manera en que se concentra la esorrentía, la oportunidad de infiltración, así como la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos dentro de la cuenca. Además, este índice permite evaluar la eficiencia y rapidez con las que el agua y los sedimentos son evacuados de la cuenca tras un evento de precipitación, lo que a su vez facilita la inferencia del nivel de susceptibilidad de la cuenca a procesos torrenciales (Rivas y Soto, 2009).

Este índice toma en cuenta el área de la cuenca, la densidad del drenaje, relación de elongación y la pendiente media del cauce (Tabla 11).

Tabla 11. Relaciones para categorizar el índice morfométrico. (IDEAM, 2013).

Índice morfométrico	Área de la cuenca de drenaje (km ²)	Categorías				
		1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	<15	<1.5	1.51-2	2.01-2.5	2.51-3	>3
	16 a 50	<1.2	1.21-1.80	1.81-2	2.01-2.5	>2.5
	>50	<1	1.01-1.5	1.51-2	2.01-2.5	>2.5
		Baja	Moderada	Moderada Alta	Alta	Muy Alta
Pendiente media de la cuenca (%)	<15	<20	21-35	36-50	51-75	>75
	>50	<15	16-30	30-45	46-65	>65
		Accidentado	Fuerte	Muy Fuerte	Escarpado	Muy Escarpado
Coeficiente de compacidad		>1.625	1.5-1.376	1.375-1.251	1.250-1.126	1.12-1.00
		Oval-Oblongo a rectangular-oblonga	Oval-Redonda a oval-oblonga		Casi redonda a oval-redonda	

Una vez determinada la categoría de la cuenca con respecto a cada índice morfométrico se procede a definir su clasificación por medio de la Tabla 12 que relaciona los índices antes mencionados y clasifica la torrencialidad desde muy alta a muy baja.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 12. Relaciones entre variables para el índice morfométrico (IDEAM, 2013).

		Pendiente media de la cuenca							
		1	2	3	4	5			
D e n s i d a d d e d r e n a j e	1	111	121	131	141	151	1	c o e f i c i e n t e d e f o r m a	Muy baja
		112	122	132	142	152	2		Baja
		113	123	133	143	153	3		Moderada
		114	124	134	144	154	4		Alta
		115	125	135	145	155	5		Muy alta
	2	211	221	231	241	251	1		
		212	222	232	242	252	2		
		213	223	233	243	253	3		
		214	224	234	244	254	4		
		215	225	235	245	255	5		
	3	311	321	331	341	351	1		
		312	322	332	342	352	2		
		313	323	333	343	353	3		
		314	324	334	344	354	4		
		315	325	335	345	355	5		
	4	411	421	431	441	451	1		
		412	422	432	442	452	2		
		413	423	433	443	453	3		
		414	424	434	444	454	4		
		415	425	435	445	455	5		
	5	511	521	531	541	551	1		
		512	522	532	542	552	2		
		513	523	533	543	553	3		
		514	524	534	544	554	4		
		515	525	535	545	555	5		

Dentro del uso de índices, se puede observar el comportamiento de los EEP a lo largo del periodo, la mayoría de estos índices se dividen en tres grupos: frecuencia, intensidad y porcentaje extremo.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

De acuerdo con Peralta-Hernández et al. (2009) los indicadores de frecuencia, intensidad y precipitación extrema pueden ser calculados como se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13. Índices de precipitación extrema adaptado de (Peralta-Hernández et al., 2009).

Frecuencia (días/año)	Intensidad (mm/tiempo)	Porcentaje Máximo (%)
Frecuencia > 0,1 mm	Total anual	Total de los 4 mayores/total anual
Frecuencia > 1 mm	Mayor día	Total del 5% mayor/total anual
Frecuencia > 2 mm	Los tres días de mayor precipitación	Total del percentil 95/total anual
Frecuencia > 10 mm	4to evento de mayor precipitación	Total del percentil 99/total anual
Frecuencia > 25 mm	Media de los 4 eventos de mayor precipitación	
Frecuencia > 100 mm	Media del 5% de mayor precipitación	
Frecuencia > Percentil 95	Media de eventos en el percentil 95	
Frecuencia > Percentil 99	Media de eventos en el percentil 99	
Mayores días consecutivos de lluvia	Total anual/total de días de lluvia	

- *Indicadores de Frecuencia:* Estos índices hacen referencia a la ocurrencia o la cantidad de eventos de precipitación extrema en un período específico. El análisis de la frecuencia de eventos de precipitación extrema es fundamental para comprender el comportamiento del clima en un área determinada y cómo puede cambiar con el tiempo debido al cambio climático.
- *Indicadores de intensidad:* Se refiere a la magnitud o la cantidad de precipitación que ocurre durante un evento de lluvia o tormenta.
- *Porcentaje máximo:* Este índice permite observar la representación en porcentaje de los eventos máximos de precipitación con respecto del total anual.

Dentro de estos índices también se encuentran los propuestos por el grupo de trabajo (CCI/CLIVAR) mostrados en la Tabla 14, con los cuales se puede realizar un análisis de tendencias con el fin de observar el comportamiento de los eventos de precipitación.



Tabla 14. Índices extremos de precipitación extrema propuestos por (Xuebin Zhang Feng Yang et al., 2004)

ID	Nombre del índice	Definición	Unidad
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en un día	mm
Rx5day	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	Máximo mensual d precipitación en 5 días consecutivos	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por $PRCP \geq 1.0\text{mm}$) en un año	mm/día
R10	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que $PRCP \geq 10\text{mm}$	días
R20	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que $PRCP \geq 20\text{mm}$	días
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1\text{mm}$	días
CWD	Días consecutivos húmedos	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1\text{mm}$	días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación anual total en que $RR > 95$ percentil	mm
R99p	Días extremadamente húmedos	Precipitación anual total en que $RR > 99$ percentil	mm
PRCPTOT	Precipitación total anual	Precipitación anual total en los días húmedos ($RR \geq 1\text{mm}$)	mm

Por otra parte, se realizará un análisis como el que proponen Rivas et al. (2022), en el cual se elabora un listado de las inundaciones ocurridas en la ciudad incluyendo la precipitación ocurrida durante ese día, se ajusta una función de distribución de probabilidad a las series de precipitación para así determinar el periodo de retorno al que corresponde dicho evento.

En muchas ocasiones estos eventos extremos de precipitación están asociados al fenómeno ENOS, por lo que se puede comparar la fase de ENOS con los eventos extremos de precipitación y observar si tuvieron alguna relación entre sí.



Para evaluar la presencia del fenómeno ENOS, se emplea el Índice Oceánico El Niño (ONI, por sus siglas en inglés), el cual cuantifica la anomalía de temperatura en la Región 3.4 del Pacífico Central (5°N - 5°S , 120° - 179°O). Este índice calcula la desviación trimestral de la temperatura, y se identifica la presencia de El Niño cuando se registra una anomalía de 0.5°C o superior durante cinco trimestres consecutivos. En caso de que la anomalía sea negativa, es decir, de -0.5°C o más, se confirma la presencia del fenómeno opuesto conocido como La Niña (Martínez-Austria & Díaz-Jiménez, 2018).

8.5 Validación y calibración del modelo lluvia escurrimiento

8.5.1 Modelo TETIS

El modelo de TETIS, es un modelo conceptual, es decir, es flexible para adaptarse a múltiples escalas espaciales y temporales, diferentes condiciones de modelación y puede adaptarse de acuerdo con la información disponible para la simulación. El modelo está compuesto por dos submodelos, uno corresponde a la producción de la escorrentía, es decir calcula el agua que llega hasta la red de drenaje, mientras el otro submodelo transita la escorrentía dentro de la red de drenaje. Se considera que el modelo es distribuido puesto que divide la cuenca en pequeños elementos rectangulares y considera a éstos como la unidad de respuesta hidrológica. Para cada unidad de respuesta se definen 5 tanques correspondientes a los almacenamientos en el suelo, el acuífero, la escorrentía superficial, la red de drenaje y el agua interceptada (Gómez, 2016), en la Tabla 15 se muestran algunas características del modelo de TETIS.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 15. Características del modelo TETIS (Gómez, 2016).

Tipo	Entradas	Salidas	Procesos	Escala Espacial y temporal	Coberturas
Distribuido -Continuo.		1. Caudal estimado en puntos seleccionados.			
		2. Niveles de embalse.			
	1. Modelo digital de elevación del terreno.	3. Caudal de entrada al embalse.	1. Interceptación.		
	2. Series temporales del evento de precipitación.	4. Volumen observado y simulado del embalse.	2. Evapotranspiración.	Horaria, Diaria, Mensual y Anual	Coberturas Vegetales, Suelos, Geología.
	3. Evapotranspiración.	5. Volumen simulado de nieve en toda la cuenca.	3. Flujo en el suelo.		
	4. Altura equivalente de agua.	6. Flujos medios entre tanques de toda la cuenca.	4. Flujo Subterráneo.		
	5. Temperatura.	7. Almacenamientos medios de toda la cuenca.	5. Flujo Subsuperficial.		
	6. Aportes o retención de caudal.		6. Escorrentía superficial.		

En el modelo TETIS, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales, conectados entre sí. Además, se incluye un séptimo tanque para cauces cuando estos están presentes en la celda, como se puede observar en la Figura 5.

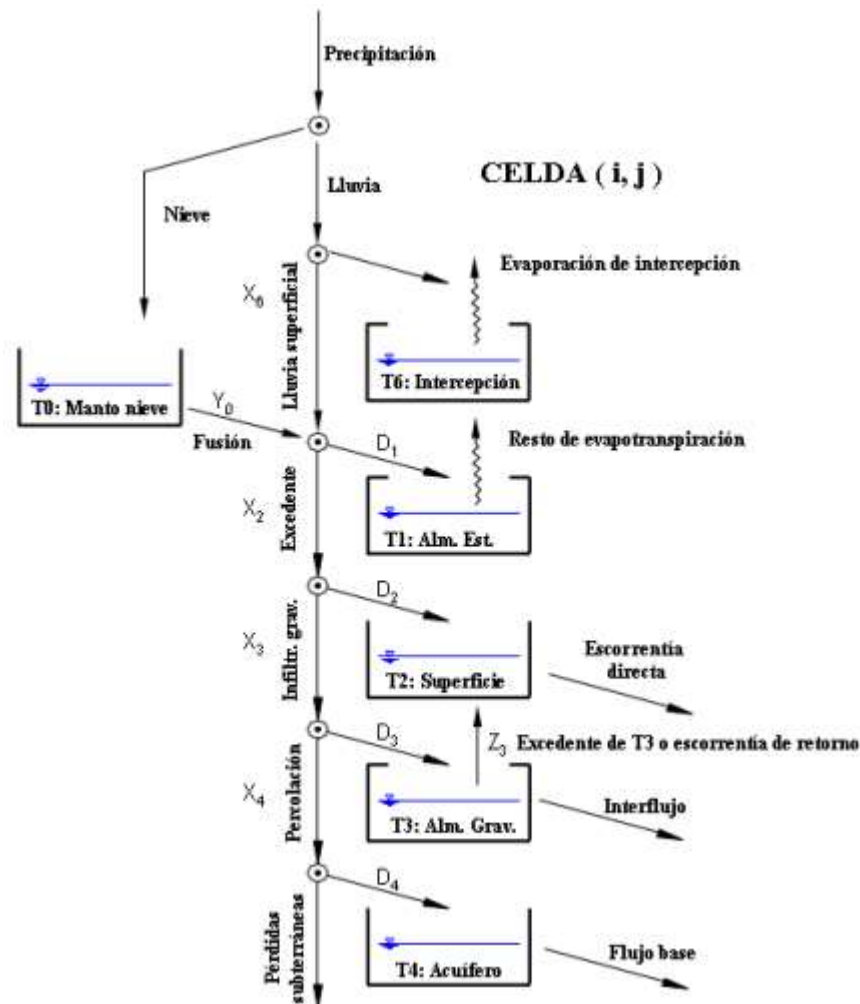


Figura 5. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS (Francés et al., 2014).

El modelo TETIS realiza un balance hídrico en cada celda para la producción de escorrentía, distribuyendo el agua en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales, más un séptimo tanque para cauces cuando estos están presentes. El flujo entre los tanques depende del agua almacenada en ellos, influenciado por el esquema conceptual adoptado, el tipo de tanque y las características morfológicas e hidrológicas de la celda. La conceptualización del modelo TETIS es una malla interconectada en tres dimensiones, donde los tanques inferiores drenan hacia el tanque correspondiente aguas abajo, siguiendo las direcciones del flujo propuestas por el MDE hasta alcanzar la red de drenaje. La longitud de interconexión máxima para cada tanque,

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

definida por el usuario, está asociada al tamaño de las laderas para la escorrentía y el flujo subsuperficial, y al punto inicial del flujo permanente en el cauce para el flujo base. El sistema presenta tres elementos diferenciados definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie, coincidiendo con la presencia de incisiones permanentes en el terreno donde se concentran los flujos.

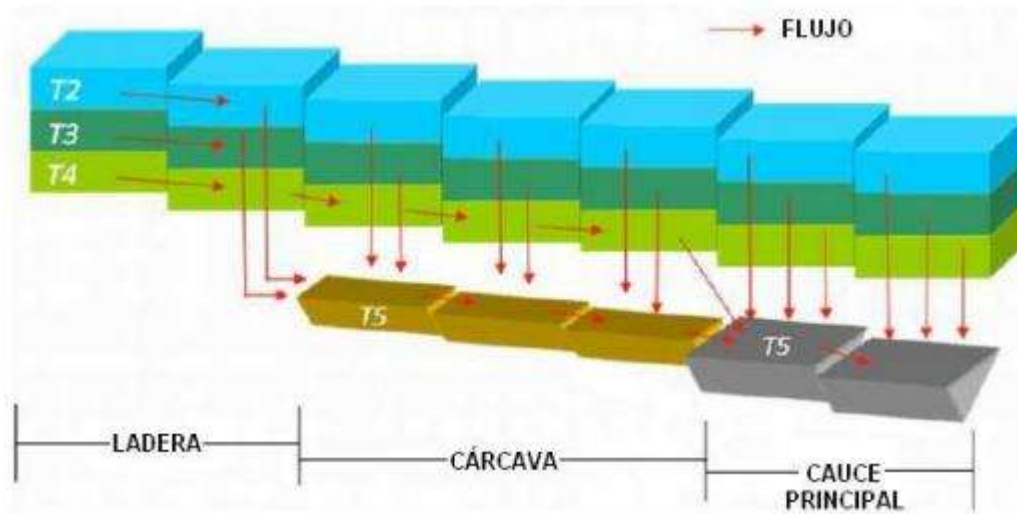


Figura 6. Movimiento vertical y horizontal en el modelo TETIS (Francés et al., 2014).

La calibración en los modelos es tratar de encontrar los valores óptimos con los cuales se puedan representar un modelo apegado a la realidad, todo esto dependerá de que tan precisos son los resultados simulados con los observados, para esto se tienen diferentes métodos por los cuales se evalúan estos valores, en esta investigación se usaran los siguientes:

- Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE).
- Eficiencia de Nash – Sutcliffe modificada (LN NSE).
- Coeficiente de correlación de Pearson (r).
- Coeficiente de Simetría (CS).

A continuación, se describirá brevemente cada uno de estos indicadores.

Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)

Se trata de un error cuadrático medio que otorga mayor importancia a los errores significativos, los cuales suelen ocurrir durante periodos de flujo elevado, aunque no

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

siempre. El índice de Eficiencia Normalizada (NSE) oscila entre -1 y 1. Un valor de NSE igual a 1 indica un ajuste perfecto. Cuando NSE es igual a 0, significa que el error tiene un orden de magnitud similar a la varianza de los datos observados, sugiriendo que la capacidad predictiva del modelo es comparable a la simple media de los datos. Valores por debajo de cero indican que la media tiene una capacidad predictiva superior al modelo, señalando un rendimiento deficiente del mismo (Navarro, 2019) ver Ecuación [21].

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - Q_{obs}(t))^2} \quad [21]$$

Eficiencia de Nash – Sutcliffe modificada (LN NSE).

Este coeficiente da mayor peso a los valores de flujos escasos, este coeficiente trabaja a base de logaritmos con el fin de reducir la sensibilidad generada por los valores extremos, con esto los valores grandes disminuyen y los que son bajos no son afectados tanto (Moriasi et al., 2007) ver Ecuación [22].

$$\ln NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [(\ln Q_{sim}(t)) - \ln (Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln (Q_{obs}(t)) - \ln (Q_{obs}(t))]^2} \quad [22]$$

Coeficiente de correlación de Pearson (r).

Esta prueba mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por el sesgo. El valor del coeficiente varía entre -1 y 1. El coeficiente r toma el valor de 1, momento denominado de correlación completa positiva, cuando los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con X e Y aumentando conjuntamente. Cuando los valores tienen una pendiente negativa el valor de r es -1, cuando el valor este cercano a cero quiere decir que no hay correlación entre las series (Moriasi et al., 2007) ver Ecuación [23].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(Q_{sim}(t) - mediaQ_{sim}) * (Q_{obs}(t) - mediaQ_{obs})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(Q_{sim}(t) - mediaQ_{sim})^2 * \sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - mediaQ_{obs})^2]}} \quad [23]$$

Coeficiente de Simetría (CS)

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Es una medida de la simetría del ajuste entre la simulación y la observación medias; esta característica, aunque simple, es importante preservarla en modelaciones de periodos largos. Si el valor de CS es 1, quiere decir que la serie observada y a serie simulada tiene la misma media (Navarro, 2019), Ecuación [24].

$$CS = 1[\max\left(\frac{mediaQ_{sim}}{mediaQ_{obs}}; \frac{mediaQ_{obs}}{mediaQ_{sim}}\right) - 1]^2 \quad [24]$$

En la Tabla 16 se muestran los valores de calidad de ajuste de los coeficientes.

Tabla 16. Calidad de ajuste.

CALIDAD	Coeficientes
Muy Buena	$0.75 < Coeficiente \leq 1$
Buena	$0.65 < Coeficiente \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < Coeficiente \leq 0.65$
No satisfactoria	$Coeficiente \leq 0.50$

8.5.2 Modelo HEC-HMS

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) es un modelo hidrológico lluvia-escorrentía desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). Este modelo está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía generado en un punto específico de la red fluvial debido a un episodio de lluvia. Su objetivo principal es predecir cómo la lluvia se convierte en escorrentía a través de un sistema hidrológico, permitiendo realizar análisis detallados sobre el comportamiento de las cuencas en respuesta a precipitaciones (López et al. 2012).

El modelo HEC-HMS trabaja con cuatro módulos fundamentales que definen la entrada de datos y la estructura de simulación de la cuenca (Pascual & Díaz, 2016):

1. Datos de entrada: Este módulo permite la entrada de datos necesarios para la simulación. Los datos ingresados son procesados por los distintos submódulos de modelado según los requerimientos de cada uno.



2. Modelo de cuenca: Representa la parte física de la cuenca. El usuario construye un modelo de cuenca añadiendo y conectando elementos hidrológicos, los cuales utilizan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que ocurren en la cuenca.
3. Modelo de precipitación: Calcula la precipitación en cada subcuenca, utilizando información puntual o distribuida espacialmente. Este módulo es capaz de modelar tanto precipitación líquida como sólida, y también evapotranspiración, la cual solo es necesaria cuando se simulan respuestas hidrológicas a lo largo de períodos de tiempo prolongados.
4. Módulo de control: Este módulo establece las especificaciones de control para cada ejecución de la simulación, como la fecha de inicio, la fecha de finalización y el intervalo de tiempo (minutos, horas o días) durante el cual se ejecutará la simulación.

De acuerdo con López et al. (2012) los elementos del modelo se fundamentan en relaciones matemáticas simples que intentan representar los procesos clave en la generación y distribución de los hidrogramas de escorrentía. Esto abarca la pérdida de agua, la conversión del exceso de precipitación en caudal superficial, la incorporación del flujo base y el desplazamiento del hidrograma a lo largo del cauce. El modelo parte de una representación espacialmente distribuida de la cuenca, configurada como una red interconectada de sistemas hidrológicos e hidráulicos (subcuencas y embalses) enlazados por cauces.

8.5.2.1 Generación de la escorrentía

Este proceso se refiere a la generación del hidrograma en el punto de drenaje de una cuenca, producto de la circulación de la lluvia efectiva sobre la superficie de la misma, siendo este componente el que representa la escorrentía superficial directa. Para calcular el hidrograma de escorrentía directa (López et al. 2012).

HEC-HMS ofrece varios métodos; en este estudio, se ha empleado la técnica del hidrograma unitario (HU), seleccionando específicamente el HU Adimensional del SCS debido a su sencillez y amplia aplicación en diversos escenarios.



El HU Adimensional del SCS fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) en los años 50, basándose en observaciones de numerosas cuencas agrícolas distribuidas por los Estados Unidos. Este método utiliza variables adimensionales, lo que le otorga un carácter universal: el caudal se expresa como la Ecuación [25] (Chow *et al.*, 1989):

$$Q_p = \frac{2.08 * A}{T_p} \quad [25]$$

Donde:

Q_p : caudal máximo generado en la cuenca estudiada en m^3/s

A : área de la cuenca en km^2

T_p : el tiempo asociado al caudal máximo el cual se determina mediante la Ecuación [26].

$$T_p = \frac{T_y}{2} + T_l \quad [26]$$

En donde T_y es la duración del pulso de lluvia y el tiempo de desfase de la cuenca, este último se define como el intervalo entre el centro de gravedad del pulso de lluvia y el momento en que se alcanza el caudal máximo. El tiempo de desfase, se calcula utilizando la Ecuación [27] según lo planteado por Ponce (1989).

$$T_l = \frac{L^{0.8}(2540 - 22.86 * N)^{0.7}}{14104 * N^{0.7} * I^{0.5}} \quad [27]$$

En la cual T_l esta expresado en horas, L es la longitud hidráulica en metros que comprende a la distancia desde el punto de salida hasta la parte divisoria de la cuenca, I hace referencia a la pendiente media de la cuenca en m/m , y N es el valor medio del número de curva obtenido para la cuenca.

8.6 Gastos asociados a EEP

Una vez que el modelo se encuentre armado, se procederá a realizar las simulaciones necesarias para obtener los caudales asociados al período histórico, así como los posibles caudales en el período futuro, considerando los efectos del cambio climático.

8.7 Modelo Hidráulico



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Un modelo hidráulico es una herramienta de simulación y análisis que se utiliza para estudiar el comportamiento del flujo de agua en sistemas hidráulicos, tales como ríos, canales, lagos y sistemas de drenaje urbano, entre otros. Estos modelos son útiles para una variedad de propósitos y aplicaciones en ingeniería, hidrología y planificación. En este apartado nos enfocaremos en la implementación de dichos modelos para el análisis de inundaciones, ya que con este modelo podremos simular distintos escenarios bajo distintas condiciones, permitiendo identificar las zonas propensas a inundaciones y evaluar la efectividad de estrategias de mitigación.

Hec-Ras (Hydrological Engineering Center - River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica que ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers y que en la actualidad es uno de los programas de referencia dentro de su campo. Este software se encuentra en continuo desarrollo y actualización, por lo que se van lanzando al mercado nuevas funcionales y mejores en cada nueva versión. El software Hec-Ras, está compuesto por cuatro tipos módulos diferentes (Delgado, 2016), estos módulos permiten el análisis de los ríos en los siguientes escenarios:

- Modelización de flujo en régimen permanente.
- Modelización de flujo en régimen no permanente.
- Modelización del transporte de sedimentos.
- Análisis de calidad de aguas.

Para este estudio, se utilizó HEC-RAS calcula la profundidad de la inundación y la velocidad con base en los hidrogramas de descarga de agua de inundación (Hydrologic Engineering Center, 2009). El modelo HEC-RAS se aplicó para un modelo hidráulico bidimensional y se resolvió utilizando las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D. El método de solución para ambas ecuaciones fue mediante diferencias finitas en volumen. La forma diferencial no estacionaria de la ecuación de conservación de masa es la siguiente (Ecuación 28).

$$r = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} \quad [28]$$

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Donde r es el término de fuente/sumidero, H es la elevación de la superficie (m); t es el tiempo, h_u y h_v son los flujos en las direcciones X e Y (m^2/s); recientemente, HEC-RAS incorpora completamente las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D (Costabile et al., 2020). Las ecuaciones [29] y [30] de aguas poco profundas se presentan en las siguientes expresiones.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 p g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial H}{\partial x} + pf + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \quad [29]$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) = - \frac{n^2 q g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial H}{\partial y} + qf + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \quad [30]$$

Donde p y q representan h_u y h_v (m^2/s); n es el coeficiente de rugosidad de Manning ($s \cdot m^{-1/3}$), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), ρ es la densidad del agua (kg/m^3), y τ_{xx} , τ_{yy} y τ_{xy} son los componentes del tensor de esfuerzos. Además, f es el parámetro de Coriolis (s^{-1}).

Una vez generado el modelo se modelarán los gastos que provengan de EEP tanto para el periodo histórico como para el futuro.

8.8 Obtención de Mapas para el periodo histórico y futuro

Una vez obtenidos los resultados de la modelación hidráulica asociada a los gastos debidos a EEP serán integrados a un sistema de información geográfica (SIG), permitiendo la representación cartográfica de los escenarios de inundación actuales y futuros en la ciudad de Morelia, Michoacán.

9 Resultados.

9.1 Caracterización de la zona de estudio

En los últimos años, la ciudad de Morelia ha experimentado diversos fenómenos hidrometeorológicos extremos que han ocasionado inundaciones. Por esta razón, esta investigación se enfocó en analizar las cuencas que contribuyen al flujo del Río Grande,

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

tanto antes como durante su recorrido por la ciudad de Morelia. El objetivo principal fue identificar las áreas con mayor concentración de precipitación. Para lograr esto, se delimitó una cuenca que abarcara la totalidad de la ciudad (Figura 7).

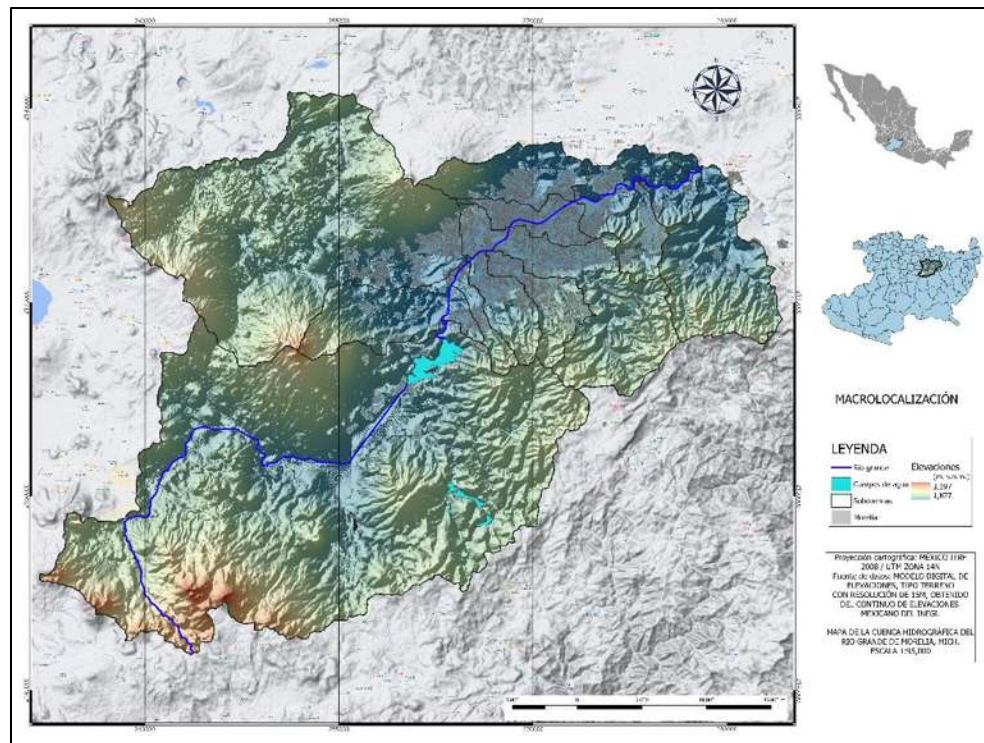


Figura 7. Cuenca hidrográfica del Río Grande.

La extensión total de la cuenca es de aproximadamente 1,392 km², caracterizada por elevaciones que oscilan entre 3,397 msnm y 1,887 msnm. En su interior, se encuentra el curso del Río Grande de Morelia, con una longitud estimada de 79.7 km. Destaca la relevancia del aporte hídrico proveniente de la corriente del Río Chiquito, factor determinante en el caudal del Río Grande.

9.1.1 Características geomorfológicas de la cuenca

En la Tabla 17 se presentan características geomorfológicas de la cuenca principal y sus subcuencas (SubC1 a SubC18). En cuanto al área, la Subcuenca 1 es la más grande (663.65 km²), mientras que la 4, 5 y 8 son las más pequeñas (≤ 10 km²), lo que influye

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

en el tiempo de respuesta hidrológica. Las pendientes medias varían, siendo mayores en la subcuenca 12 y 17, más suaves como 6 y 8, afectando la velocidad del flujo.

Las formas de las subcuencas, evaluadas mediante el coeficiente de compacidad y la razón de elongación, muestran que 14 y 17 son las más alargadas. El tiempo de concentración (T_c), calculado por diferentes métodos, es mayor en subcuencas grandes, por ejemplo, las subcuencas 1, 2 y 3 que superan las 3 horas según Kirpich.

Tabla 17. Resultados de las características geomorfológicas de las subcuencas.

	CUENCA	SubC1	SubC2	SubC3	SubC4	SubC5	SubC6	SubC7	SubC8	SubC9
Área (km ²)	1392.32	663.65	47.65	308.55	10.05	10.71	40.21	20.53	2.48	81.64
Perímetro (km)	232.37	193.50	48.81	104.16	18.19	29.20	43.05	34.51	8.82	58.50
Lc (km)	79.71	55.12	30.73	27.86	4.62	4.34	14.31	4.01	2.73	20.17
S ₀	0.0112	0.0202	0.0223	0.0118	0.0024	0.0040	0.0013	0.0130	0.0186	0.0289
Desnivel (m)	1225.00	1114.00	897.00	805.91	238.91	136.14	764.26	85.51	122.15	583.00
En función de la superficie	Intermedia-Grande	intermedia-grande	pequeña	Intermedia-Pequeña	Muy pequeña	Muy pequeña	Pequeña	Muy pequeña	Muy pequeña	pequeña
Coeficiente de compacidad	1.76 La cuenca tiende a ser alargada	2.12 La cuenca tiende a ser alargada	1.99 La cuenca tiende a ser alargada	1.67 La cuenca tiende a ser alargada	1.62 La cuenca tiende a ser alargada	2.52 La cuenca tiende a ser alargada	1.91 La cuenca tiende a ser alargada	2.15 La cuenca tiende a ser alargada	1.58 La cuenca tiende a ser alargada	1.83 La cuenca tiende a ser alargada
Razon de elongación	0.53 Cuenca alargada	0.53 Cuenca alargada	0.25 Cuenca alargada	0.71 Cuenca alargada	0.78 Cuenca alargada	0.85 Cuenca alargada	0.50 Cuenca alargada	1.27 Cuenca redondeada	0.65 Cuenca alargada	0.51 Cuenca alargada
Factor de Horton	0.22 Alargada	0.22 Estrecha	0.05 Alargada	0.40 Alargada	0.47 Alargada	0.57 Alargada	0.20 Alargada	1.27 Achatada	0.33 Alargada	0.20 Alargada
Tc (horas)										
kirpich	9.59	6.50	3.60	3.35	0.67	0.78	1.58	0.85	0.47	2.61
Giandotti	9.60	6.96	3.08	4.93	1.59	2.10	2.12	3.26	1.18	3.44
California	9.64	6.53	3.62	3.36	0.67	0.78	1.59	0.85	0.47	2.62
Teméz	19.62	13.26	8.34	8.75	3.02	2.62	8.07	1.97	1.37	5.77
	SubC10	SubC11	SubC12	SubC13	SubC14	SubC15	SubC16	SubC17	SubC18	
Área (km ²)	10.60	18.62	11.72	10.20	86.82	26.68	24.31	11.30	6.11	
Perímetro (km)	20.16	24.36	19.24	23.22	73.87	38.88	30.61	26.95	13.48	
Lc (km)	3.32	9.69	6.74	6.09	21.24	12.74	11.46	9.88	4.59	
S ₀	0.0143	0.0228	0.0325	0.0142	0.0207	0.0275	0.0254	0.0311	0.0052	
Desnivel (m)	206.60	362.60	325.36	48.77	439.00	545.80	441.75	648.69	201.12	
En función de la superficie	Muy pequeña	Muy pequeña	Muy pequeña	Muy pequeña	pequeña	pequeña	Muy Pequeña	Muy pequeña	Muy pequeña	
Coeficiente de compacidad	1.75 La cuenca tiende a ser alargada	1.59 La cuenca tiende a ser alargada	1.58 La cuenca tiende a ser alargada	2.05 La cuenca tiende a ser alargada	2.24 La cuenca tiende a ser alargada	2.12 La cuenca tiende a ser alargada	1.75 La cuenca tiende a ser alargada	2.26 La cuenca tiende a ser alargada	1.54 La cuenca tiende a ser alargada	
Razon de elongación	1.11 Cuenca redondeada	0.50 Cuenca alargada	0.57 Cuenca alargada	0.59 Cuenca alargada	0.50 Cuenca alargada	0.46 Cuenca alargada	0.49 Cuenca alargada	0.38 Cuenca alargada	0.61 Cuenca alargada	
Factor de Horton	0.96 Estrecha	0.20 Alargada	0.26 Alargada	0.28 Alargada	0.19 Estrecha	0.16 Alargada	0.19 Alargada	0.12 Alargada	0.29 Alargada	
Tc (horas)										
kirpich	0.48	1.34	0.92	1.70	3.09	1.58	1.51	1.10	0.71	
Giandotti	1.56	2.09	1.65	3.92	4.12	2.13	2.19	1.39	1.48	
California	0.49	1.35	0.93	1.71	3.11	1.58	1.52	1.10	0.71	
Teméz	1.67	3.46	2.45	2.66	6.39	4.11	3.85	3.31	2.60	

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

9.1.2 Uso de suelo

Se realizó un mapa de uso de suelo en el cual se presentan principalmente áreas conformadas de por bosque que se caracterizan por su alta capacidad de retener agua y pastizales, seguido de uso agrícola y la gran mancha urbana de la ciudad de Morelia que a diferencia de los anteriores estos cuentan con muy poca capacidad de retención (Figura 8).

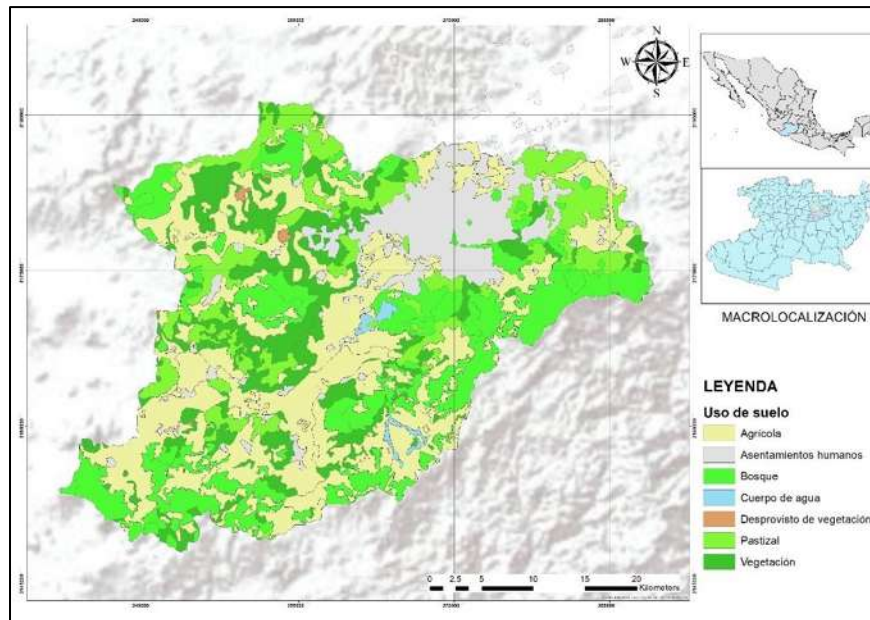


Figura 8. Mapa de uso de suelo.

9.1.3 Tipo de suelo

En la Figura 9 se muestra el mapa de tipo de suelo en el cual se presentan principalmente acrisoles en las partes altas de la cuenca y luvisoles en la parte central a esta.

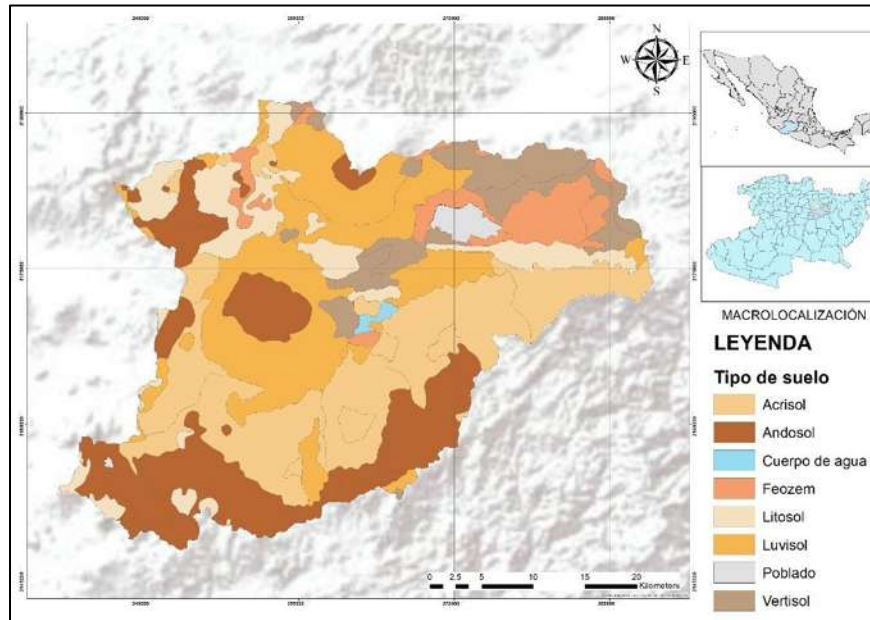


Figura 9. Tipo de suelo.

En la Tabla 18 se muestran algunas características del tipo de suelo con respecto a su saturación.

Tabla 18. Características del tipo de suelo (Carreó, 2017).

Suelos	Características	Tipo de saturación
Andosoles	Suelos derivados de ceniza volcánica	Elevada capacidad de retención del agua
Acrisoles	Suelos ácidos de baja productividad	Elevada capacidad de retención del agua
Luvisoles	Suelos sujetos a erosión	Tiene alto impedimento a la percolación de agua
Vertisoles	Suelos salinos oscuros de textura fina y muy fina	Se encharcan cuando están muy mojados
Feozem	Suelos con alto contenido de materia orgánica. De fertilidad alta par agricultura temporal	Elevada capacidad de retención del agua
Leptosoles	Suelos limitados en profundidad por roca dura o material calcáreo. Lo que puede explicarse por la presencia de materiales parentales altamente resistentes, abundancia de cenizas volcánicas, topografía accidentada o superficies geomorfológicas muy jóvenes.	Tiene alto impedimento a la percolación de agua

9.1.4 Mapa N

Después de elaborar los mapas de uso y tipo de suelo, se generó el mapa de número de escurrimiento para la zona de estudio. Este mapa asigna valores por píxel según el uso del suelo, tipo de suelo y pendiente. Los valores del número de escurrimiento oscilan entre 0 y 100, donde un valor de 100 indica que toda la precipitación se convierte en escorrentía superficial.

En el caso de la cuenca del Río Grande (Figura 10), los valores varían desde 26 en las zonas altas de la cuenca, caracterizadas por una mayor cobertura vegetal que favorece la infiltración, hasta valores cercanos a 91 en áreas urbanizadas, como la ciudad de Morelia. En estas zonas de menor vegetación y alta impermeabilidad, el número de escurrimiento es significativamente más alto debido a la baja capacidad de infiltración.

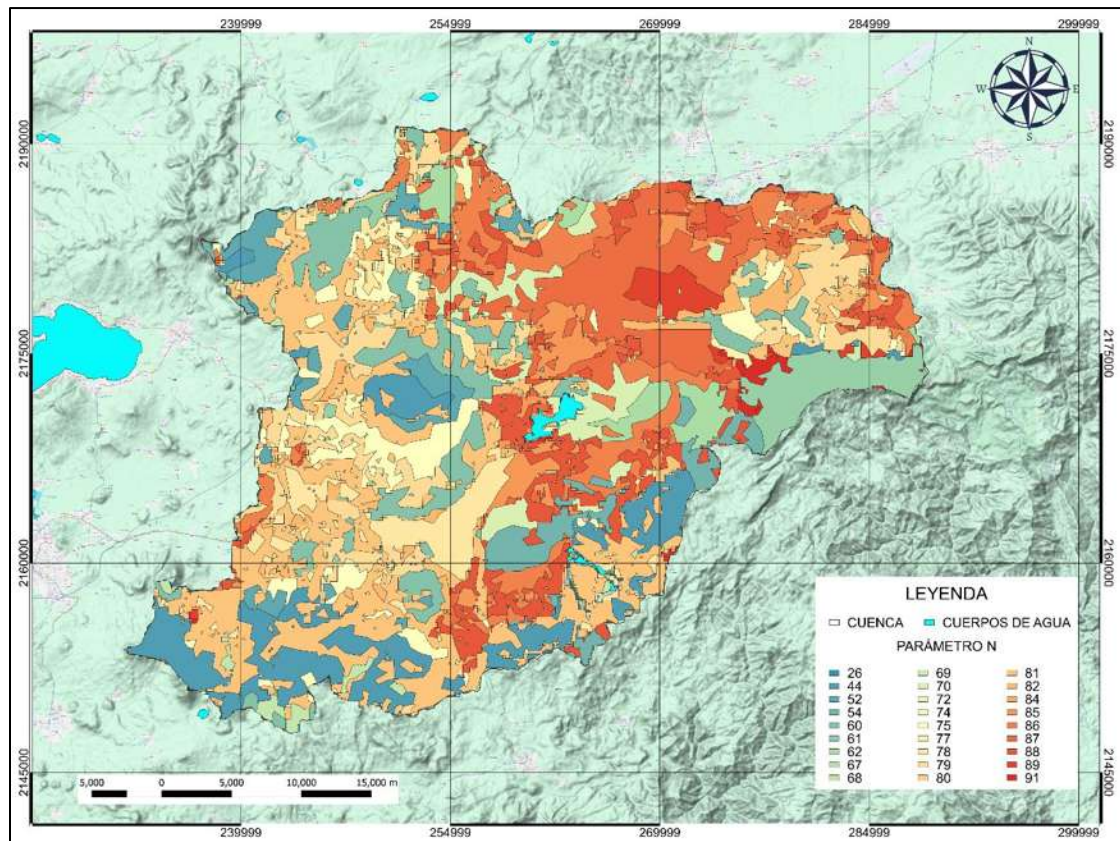


Figura 10. Mapa de N

9.1.5 Geología

En la Figura 11 se muestra la geología de la cuenca que esta principalmente formada por basaltos que van de norte a sur en la parte oeste de la cuenca, estas rocas se caracterizan por ser rocas ígneas extrusivas, seguido de este se encuentra distintos tipos de andesitas ubicadas en la zona este de la cuenca, estas rocas se caracterizan por no sen tan porosas y su poca capacidad para retener el agua.

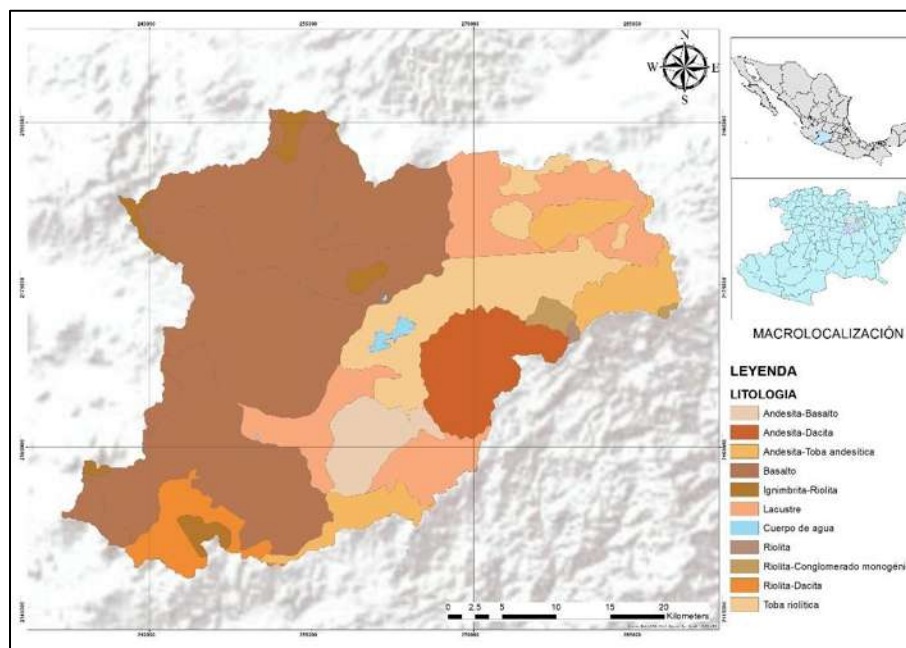


Figura 11. Geología de la cuenca.

9.2. Gestión y validación de datos climatológicos

Para llevar a cabo el análisis en este estudio, se emplearon un total de 32 estaciones meteorológicas (Tabla 19), provenientes de la base de datos CLICOM (Climate Computing Project). La validación de la información de precipitación resulta crucial para garantizar la calidad de las series con las que trabajamos. Esta validación abarca la homogeneidad, independencia y ausencia de tendencia en los conjuntos de datos.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 19. Estaciones meteorológicas.

#	ID	NOMBRE	LONG.	LAT.	ALTITUD (msnm)
1	16001	ACUITZIO DEL CANJE, (SMN)	-101°20'	19°20'	2070
2	16004	ALVARO OBREGON, (SMN)	-101°2'	19°2'	1846
3	16010	BARTOLINAS, TACAMBARO	-101°26'	19°26'	1242
4	16016	CARRILLO PUERTO, A. O.	-101°5'	19°5'	2050
5	16022	COINTZIO, MICH	-101°3'	19°6'	2096
6	16049	ETUCUARO, MADERO (SMN)	-101°5'	19°5'	1612
7	16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	-101°30'	19°30'	1950
8	16055	JESUS DEL MONTE, MORELIA	-101°7'	19°7'	1250
9	16080	MORELIA, MORELIA (SMN)	-101°11'	19°11'	1941
10	16081	MORELIA, MORELIA	-101°11'	19°11'	1908
11	16087	PATZCUARO, PATZCUARO	-101°37'	19°37'	2043
12	16091	PLANTA BOMBEO A. ZINZIMEO	-101°59'	19°59'	1840
13	16100	PUENTE SAN ISIDRO,	-101°32'	19°32'	1989
14	16105	QUIRIO, INDAPARAPEO	-101°59'	19°59'	1830
15	16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	-101°11'	19°11'	1020
16	16114	S. MIGUEL DEL MONTE, MOR.	-101°8'	19°8'	2000
17	16116	SAN SEBASTIAN, QUERENDARO	-101°57'	19°57'	2070
18	16118	SANTA FE, QUIROGA	-101°33'	19°33'	1700
19	16119	STA.RITA, COPANDARO DE G.	-101°14'	19°14'	1700
20	16120	SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA	-101°18'	19°18'	2000
21	16123	TACAMBARO, TACAMBARO	-101°28'	19°28'	1755
22	16133	TURICATO, TURICATO	-101°25'	19°25'	795
23	16136	TZITZIO, TZITZIO	-101°55'	19°55'	1850
24	16139	VILLA MADERO, MADERO	-101°16'	19°16'	2227
25	16140	VILLA MADERO, MADERO	-101°16'	19°16'	2135
26	16146	ZIRAHUEN, VILLA ESCALANTE	-101°45'	19°45'	1850
27	16155	COPANDARO, JIMENEZ	-101°5'	19°5'	1981
28	16231	LAS CRUCES, PURUANDIRO	-101°23'	19°23'	2070
29	16241	TEFETAN, TZITZIO	-101°54'	19°54'	1577
30	16247	CAPULA, MORELIA	-101°23'	19°23'	1708
31	16250	HUANDACARO, CUITZEO	-101°16'	19°16'	2285
32	16254	TEREMENDO, MORELIA	-101°28'	19°28'	2350

Se realizaron diversas pruebas para evaluar la calidad de las series, entre las cuales se incluyen el Test de Secuencias, el Test de Helmert, t Student y los Límites de Anderson, en la Tabla 20 se presenta un resumen de las estaciones climatológicas seleccionadas, 16 resultaron ser las que cuentan con mejor información.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 20. Resultados de las pruebas estadísticas.

Clave	Estación	Secuencias	Helmert	t Student	Límites de Anderson	Period Inicial	Periodo Final
16016	CARRILLO PUERTO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente	01/09/1969	31/12/2015
16022	COINTZIO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente	01/04/1940	31/12/2006
16055	JESUS DEL MONTE	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente	01/11/1935	30/09/2015
16080	MORELIA (OBS)	Homogénea	Homogénea	Homogénea	independiente	01/05/1986	31/10/2015
16081	MORELIA	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Independiente	08/05/1947	31/10/2015
16087	PATZCUARO	Homogenea	Homogénea	Homogénea	Independiente	01/01/1969	31/10/2015
16091	ALVARO OBREGON (DGE)	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente	01/10/1966	30/06/2015
16105	QUIRIO	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	independiente	13/06/1963	30/09/2015
16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	Homogenea	Homogénea	Homogénea	independiente	01/01/1922	31/10/2015
16114	SAN MIGUEL DEL MONTE	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	independiente	01/12/1963	30/09/2015
16120	SANTIAGO UNDAMEO	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Independiente	22/12/1953	31/10/2007
16133	TURICATO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	independiente	01/01/1969	30/04/2015
16136	TZITZIO	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	independiente	01/01/1969	31/10/2015
16146	ZIRAHUEN	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	independiente	01/10/1947	31/12/2015
16155	COPANDARO (CFE)	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	independiente	01/11/1969	30/09/2010
16254	TEREMENDO	Homogénea	Homogénea	Homogénea	independiente	01/01/1982	30/11/2015

Las estaciones seleccionadas fueron las que pasaron las pruebas estadísticas mencionadas con anterioridad; en la Figura 12 se puede observar mediante cada barra el periodo de datos de precipitación para cada estación meteorológica, las barras de color verde indican las estaciones que pasaron las pruebas de validación estadística, por el contrario, las de color azul son las que no lo hicieron.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

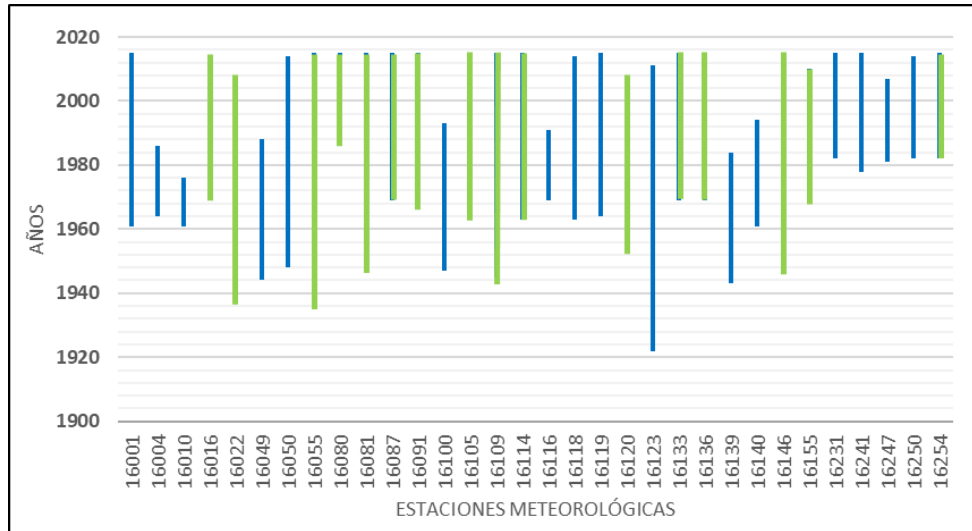


Figura 12. Periodo de datos de las estaciones meteorológicas.

En la Figura 13 se muestra el periodo seleccionado el cual comprende desde el año 1963 hasta el 2015. Las barras en color azul, muestran el periodo de datos con el que cuenta la estación y en color naranja se muestran los periodos de información que fueron llenados por medio del método de IDW.

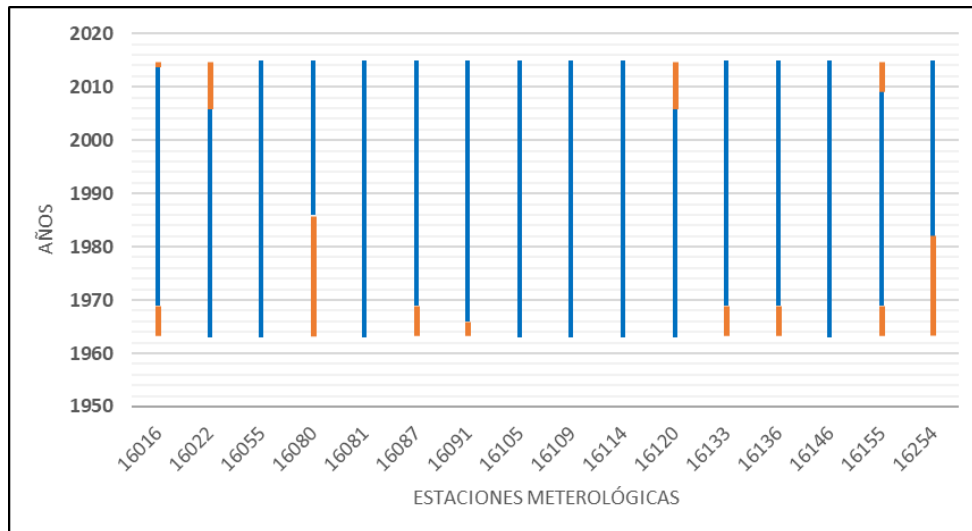


Figura 13. Periodo de datos seleccionado.

9.3 Determinación de eventos extremos de precipitación

9.3.1 Índice de concentración de precipitación.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Una vez definidas las series de precipitación, se realizó el cálculo del índice de concentración de precipitación diaria mediante la curva de concentración; Con el fin de realizar una comparación entre los datos validados y los no validados se optó por calcular el índice para ambos casos (información con y sin tratamiento estadístico), el cual fue calculado en primera instancia para las 32 estaciones sin tratamiento estadístico Tabla 21.

Tabla 21. Índice de concentración de precipitación para datos no tratados.

Estación	a	b	CI	Pi 25%	Estación	a	b	CI	Pi 25%
16001	0.064	0.027	0.54	63.56	16116	0.069	0.027	0.52	61.72
16004	0.121	0.021	0.46	56.08	16118	0.099	0.023	0.47	54.51
16010	0.061	0.028	0.53	62.07	16119	0.094	0.023	0.49	59.72
16016	0.075	0.026	0.52	61.83	16120	0.065	0.027	0.53	62.48
16022	0.051	0.029	0.55	64.77	16123	0.090	0.024	0.49	57.99
16049	0.091	0.024	0.49	58.39	16133	0.062	0.028	0.53	62.80
16050	0.075	0.026	0.51	60.82	16136	0.056	0.028	0.54	64.08
16055	0.136	0.020	0.43	53.19	16139	0.087	0.024	0.50	59.35
16080	0.043	0.031	0.57	66.49	16140	0.083	0.025	0.50	59.63
16081	0.052	0.029	0.55	64.82	16146	0.123	0.021	0.44	51.99
16087	0.061	0.028	0.54	62.38	16155	0.089	0.024	0.49	59.36
16091	0.074	0.026	0.52	62.20	16231	0.080	0.025	0.50	59.56
16100	0.050	0.030	0.56	64.99	16241	0.085	0.025	0.48	54.36
16105	0.052	0.029	0.55	64.58	16247	0.074	0.026	0.51	60.87
16109	0.079	0.025	0.50	59.38	16250	0.060	0.028	0.54	63.01
16114	0.094	0.024	0.48	56.64	16254	0.098	0.023	0.48	55.73

En la Figura 14 se puede apreciar la distribución espacial del CI, los índices de concentración más altos se encuentran localizados sobre la ciudad de morelia y van de norte a sur sobre la cuenca en estudio.

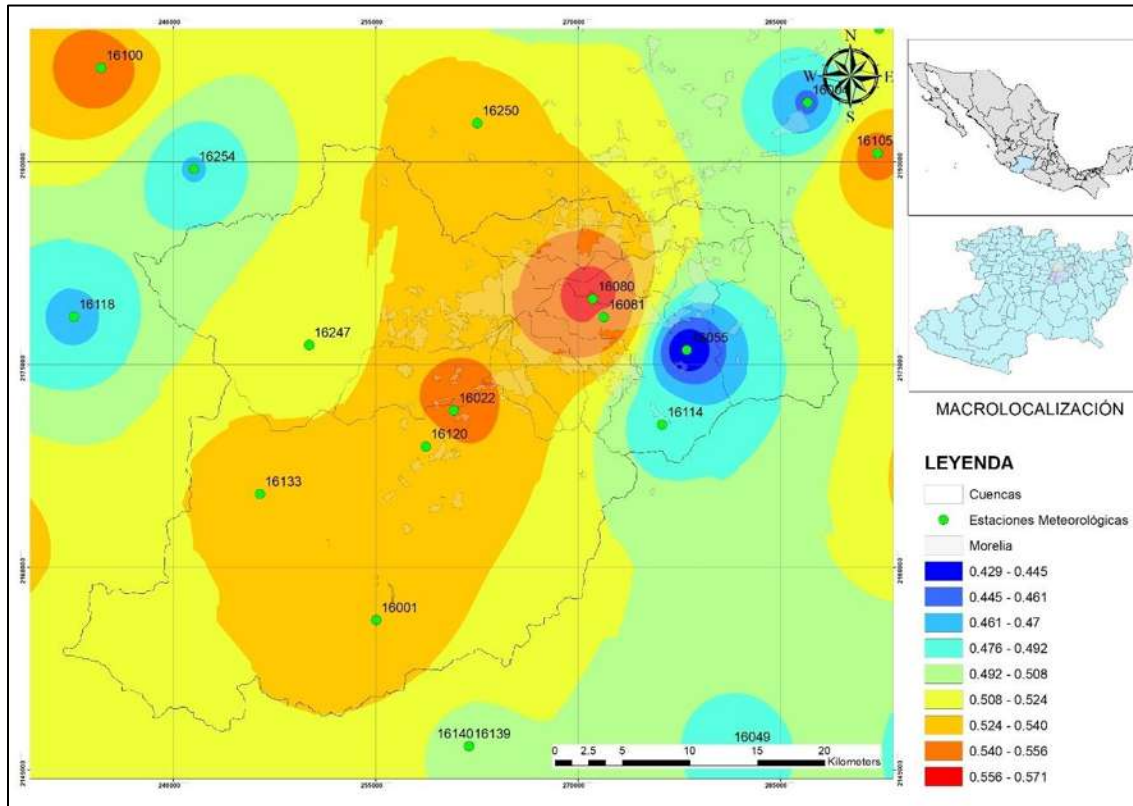


Figura 14. Distribución del CI para información sin tratamiento estadístico.

De igual manera, se calculó el CI para las 16 estaciones meteorológicas validadas los cuales son mostrados en la Tabla 22, donde se puede apreciar que la precipitación asociada al 25% de los datos ha aumentado en algunas estaciones, tal es el caso de la estación 16081 que pasó de 59.63% a 64.82%.

Tabla 22. Índice de concentración de precipitación para datos tratados.

Estación	Series validadas			
	A	b	CI	Pi 25%
16016	0.0633	0.0272	0.54	63.23
16022	0.0424	0.0312	0.57	66.64
16055	0.1066	0.0225	0.46	54.44
16080	0.0357	0.0329	0.59	68.26
16081	0.0488	0.0298	0.56	65.37
16087	0.0529	0.0291	0.55	63.18
16091	0.0615	0.0275	0.54	63.88
16105	0.0496	0.0297	0.56	65.12

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

16109	0.0723	0.026	0.52	60.7
16114	0.0666	0.0269	0.52	60.29
16120	0.0559	0.0285	0.55	64.12
16133	0.0509	0.0294	0.56	65.63
16136	0.042	0.0312	0.58	67.6
16146	0.0844	0.0247	0.49	55.83
16155	0.0669	0.0267	0.53	62.14
16254	0.0627	0.0275	0.53	61.38

En la Figura 15 se muestra la distribución espacial para esta condición en la cual se puede apreciar que el CI se distribuye de una forma más homogénea en la zona.

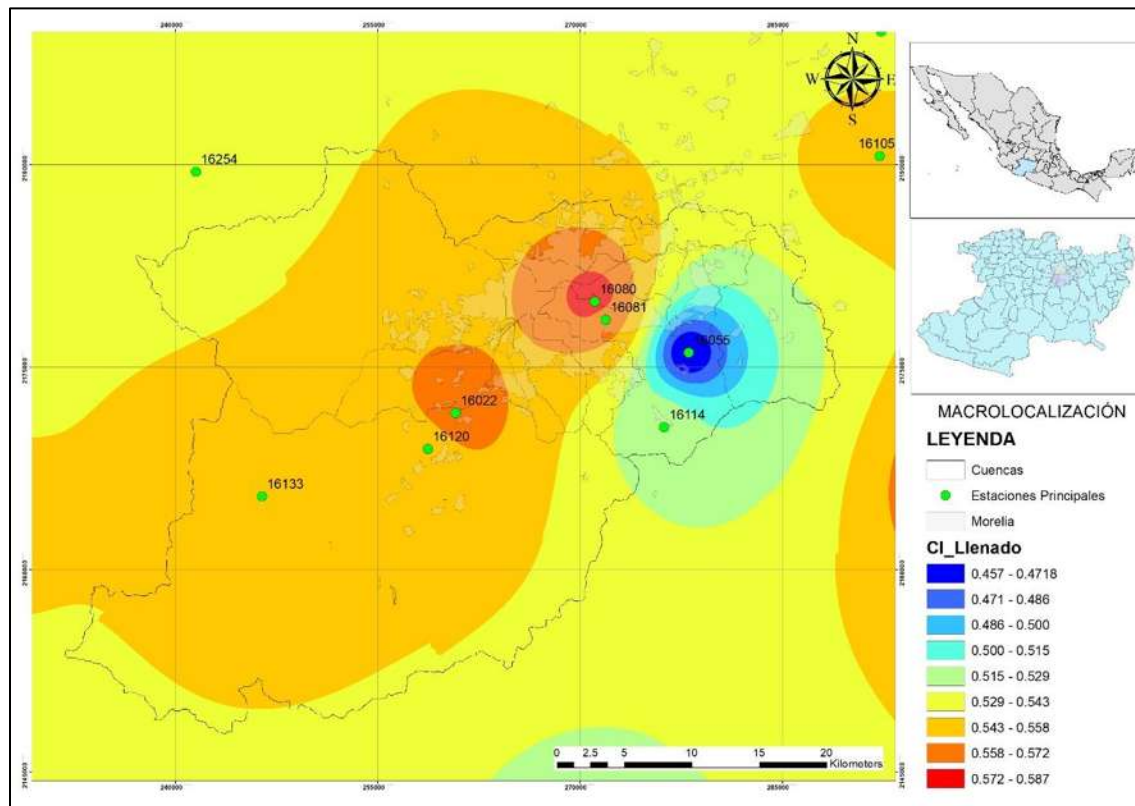


Figura 15. Distribución del CI para datos con tratamiento estadístico.

De igual forma la distribución del CI se presenta con mayor intensidad sobre la ciudad de Morelia teniendo una mayor concentración de norte a sur, a diferencia de la primera condición se puede observar que se eliminaron zonas de concentración mínima ya que,

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

al estar utilizando información en un mismo periodo histórico esta tiende a ser homogénea.

Martin-Vide (2004), asocia una relación lineal entre la precipitación del 25% de los días más lluviosos y el valor del CI por lo que se decidió comparar estas dos relaciones encontrando que para la condición con tratamiento de datos se tiene un mejor comportamiento viéndose reflejado en el coeficiente de determinación el cual es igual a 0.96 en comparación del de información sin tratamiento estadístico el cual resulto de 0.95 (Figura 16).

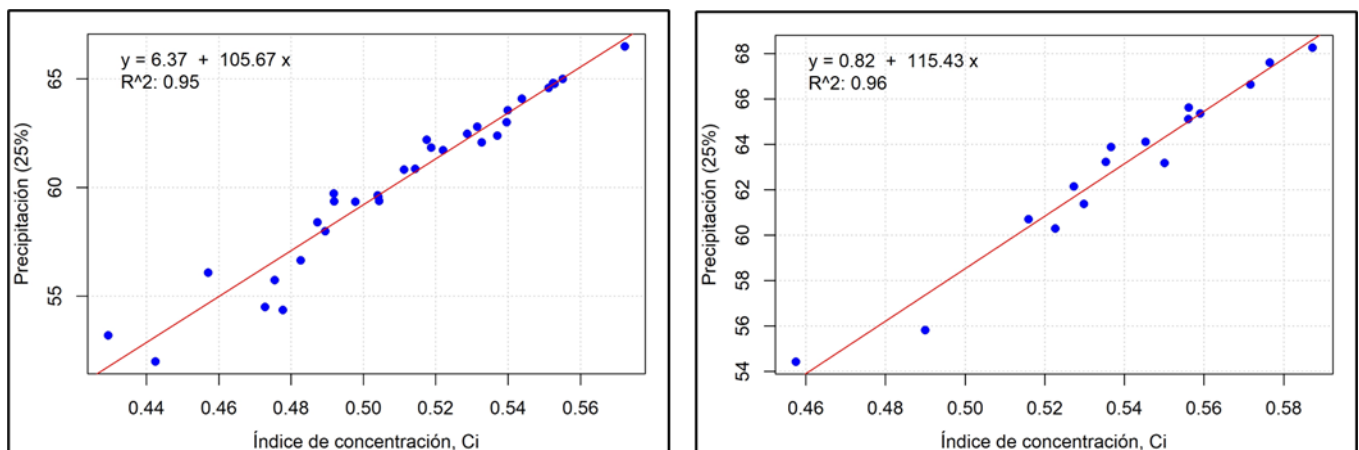


Figura 16. Relación del CI con el 25% de los días más lluviosos.

De acuerdo con Roblero-Hidalgo et al. (2018) con el fin de darle una representación física a los valores obtenidos de los CI, se opta por clasificar a las cuencas de acuerdo a su torrencialidad para lo cual se debe de demostrar que los valores obtenidos del CI se ajustan función de distribución normal, por lo que se realizó una prueba de Saphiro Wilks por medio de la paquetería de R en donde se comprobó la normalidad de estos valores, por lo que la asignación del grado de torrencialidad se da por medio de cuartiles como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados de la prueba Saphiro Wilks.

Shapiro-Wilk normality test	
W = 0.94252, p-value = 0.3811	
CI	Grado de torrencialidad
0.457-0.526	Bajo torrencial
0.526-0.541	Medio torrencial
0.541-0.557	Torrencial
0.557-0.587	Altamente torrencial

Una vez definidos los intervalos para los grados de torrencialidad se procede a realizar la clasificación de las cuencas de acuerdo a su valor medio del CI como se muestra en la Figura 17.

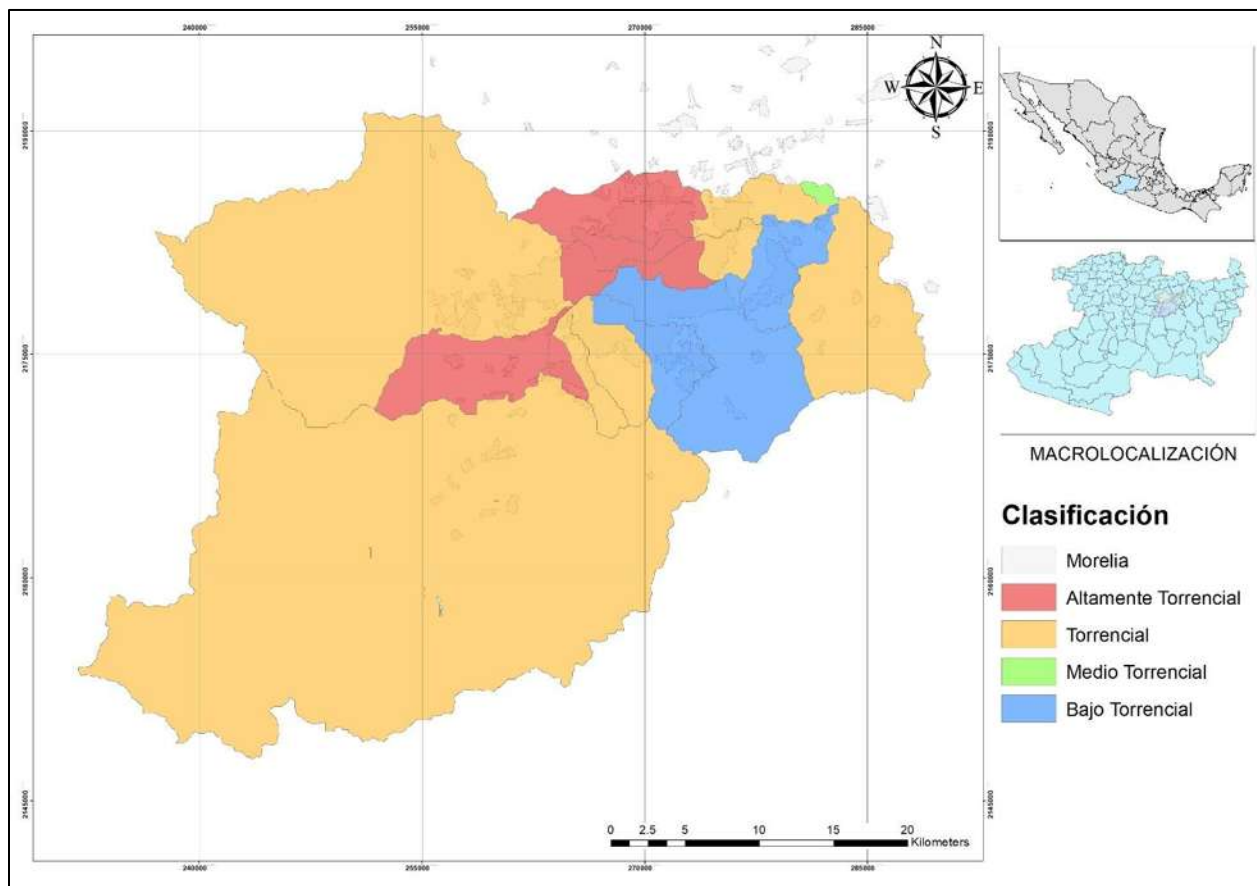


Figura 17. Clasificación de las cuencas de acuerdo a su torrencialidad.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Los valores del CI oscilan entre los 0.44 y 0.57, lo que correspondería al clima templado subhúmedo que se presenta en la zona de estudio, el cual tiene una temperatura media entre los 10-18°C en invierno, 25°C en primavera, y 800 mm de lluvia anual promedio.

9.3.2 índice morfométrico de torrencialidad

Tras determinar las características geomorfológicas de la cuenca, se seleccionaron las tres variables requeridas para clasificar las diferentes categorías en las que se agrupan las cuencas. Como se muestra en la Tabla 24, se observó una mayor variabilidad en el área, la cual está estrechamente relacionada con la densidad de drenaje. Por otro lado, tanto la pendiente como el coeficiente de compacidad se ubicaron principalmente en las categorías 1 y 2. Esto indica que, de acuerdo con su morfología, las cuencas analizadas presentan niveles de torrencialidad bajos o muy bajos.

Tabla 24. Resumen de categorización de índices morfométrico para cada cuenca.

Cuenca	Área (km ²)	Densidad de drenaje (km/km ²)	Categoría	Pendiente del cauce principal (%)	Categoría	Coeficiente de Compacidad	Categoría		Clasificación
Subcuenca 1	663.65	1.51	3	2.02%	1	2.12	1	311	baja
Subcuenca 2	47.65	1.36	2	2.23%	1	1.99	1	211	baja
Subcuenca 3	308.55	1.63	3	1.18%	1	1.67	1	311	baja
Subcuenca 4	10.05	0.88	1	0.24%	1	1.62	2	112	muy baja
subcuenca 5	10.71	0.78	1	0.40%	1	2.52	1	111	muy baja
Subcuenca 6	40.21	0.97	1	0.13%	1	1.91	1	111	muy baja
Subcuenca 7	20.53	0.74	1	1.30%	1	2.15	1	111	muy baja
Subcuenca 8	2.48	0.22	1	1.86%	1	1.58	2	112	muy baja
Subcuenca 9	81.64	1.15	2	2.89%	1	1.83	1	211	baja
Subcuenca 10	10.60	0.95	1	1.43%	1	1.75	1	111	muy baja
Subcuenca 11	18.62	0.99	1	2.28%	1	1.59	1	111	muy baja
Subcuenca 12	11.72	0.86	1	3.25%	1	1.58	2	112	muy baja
Subcuenca 13	10.20	0.47	1	1.42%	1	2.05	1	111	muy baja
Subcuenca 14	86.82	1.18	2	2.07%	1	2.24	1	211	baja
Subcuenca 15	26.68	0.82	1	2.75%	1	2.12	1	111	muy baja
Subcuenca 16	24.31	0.87	1	2.54%	1	1.75	1	111	muy baja
Subcuenca 17	11.30	0.59	1	3.11%	1	2.26	1	111	muy baja
Subcuenca 18	6.11	0.27	1	0.52%	1	1.54	2	112	muy baja
Cuenca	1392.32	1.53	3	1.12%	1	1.76	1	311	baja

9.3.3 índices extremos de precipitación

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a cada uno de los índices de precipitación extrema propuestos por el grupo CCI/CLIVAR, las tendencias que

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

indican una disminución en los índices extremos de precipitación para cada estación se reflejan mediante valores negativos, mientras que aquellas que indican un aumento de precipitación se representan con valores positivos. En la Tabla 25 el nivel de significancia estadística de cada coeficiente de correlación se destaca mediante el uso de asteriscos.

Tabla 25. Tendencia y significancia de los índices extremos de precipitación por el grupo CCI/CLIVAR.

Estación	Elevación msnm	Tendencias de los índices										
		CDD	CWD	PRCTOT	R10	R20	R25	R95p	R99p	Rx1day	RX5day	SDII
16016	1840	0.322	-0.191**	-0.832	-0.019	0.016	0.021	1.355	1.726*	0.328*	0.328*	0.02**
16022	2096	0.568**	0.235*	-1.097	-0.103**	-0.019	-0.054*	-1.936*	-0.73	-0.244*	-0.315	-0.016
16055	2180	-0.112	0.041	2.851	0.118	-0.007	0.121*	3.741*	2.92*	0.535*	0.575*	0.011
16080	1913	0.266	-0.047	-1.607	-0.015	-0.004	0.034	1.505	0.904	0.171	0.058	0.034*
16081	1908	0.036	-0.038	-2.65**	-0.11**	-0.022	0.004	0.125	0.034	-0.096	-0.158	0.002
16087	2140	0.474	-0.123**	2.5	0.109	0.106*	0.074*	2.718	1.253	0.305	0.104	0.042*
16091	1840	0.505	-0.117*	-3.479*	-0.084	-0.012	-0.003	-0.296	-0.4	-0.024	-0.133	0.003
16105	1858	0.397	-0.067	-3.291*	-0.096**	-0.043	-0.021	-0.504	-0.482	0.152	0.227	0.001
16109	1444	1.45*	0.008	-8.227*	-0.226**	-0.237*	-0.156*	-4.063*	-0.979	-0.512*	-1.193*	-0.047
16114	1965	0.441	-0.1	-0.8445*	-0.444*	-0.226*	-0.016	-0.881	-0.575	-0.001	-0.552	-0.056*
16120	2130	0.330	0.316*	-0.914	-0.149*	-0.048	-0.03	-1.285	-0.699	-0.105	-0.352	-0.032*
16133	740	0.449	-0.417*	-0.582	0	0.109*	0.084*	3.48*	1.48*	0.536*	0.617*	0.082*
16136	1565	0.434	0.138	13.699	0.392**	0.331**	0.289**	8.864	3.353**	0.503*	1.395*	0.061
16146	2090	0.134	0.061	0.554	-0.088	-0.022	-0.038	-1.289	-0.359	0.058	-0.473	-0.048**
16155	1980	0.621*	-0.054	-3.169*	-0.156*	-0.042	-0.027	-0.964	0.109	-0.085	-0.357**	-0.019
16254	2188	1.068*	-0.771*	-4.376*	0.053	0.13*	0.085*	3.929*	1.865*	0.543*	0.622*	0.099*
Tend(+)%		93.75	37.50	25.00	31.25	31.25	50.00	50.00	56.25	56.25	50.00	62.50
Tend(-)%		6.25	62.50	75.00	68.75	68.75	50.00	50.00	43.75	43.75	50.00	37.50

Significación del coeficiente de correlación (*) $p < 0.050$, (**) $p < 0.010$

9.3.3.1 Días consecutivos secos (CDD)

Al analizar los resultados de tendencia proporcionados en la Tabla 25, se destaca que el 93.75% de las estaciones ubicadas en la zona de estudio están experimentando una tendencia positiva. Es relevante destacar que, en cuatro estaciones específicas, esta tendencia positiva es estadísticamente significativa.

En la Figura 18 se muestra el comportamiento por año de este índice para el caso de la estación 16080 ubicada en la ciudad de Morelia, se puede apreciar que el máximo número de días secos ha pasado de estar entre los 40 a 80 días para el año 1970 a estar entre los 60-100 días/año.

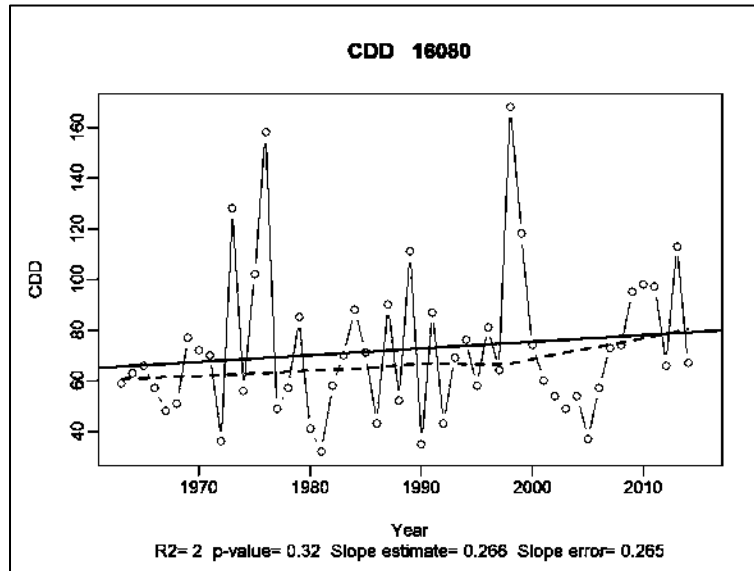


Figura 18. Índice CDD para la estación 16080 por año.

En la Figura 19 se observa la representación espacial de las tendencias en este índice, en donde las tendencias mayores se encuentran en las partes altas de la cuenca.

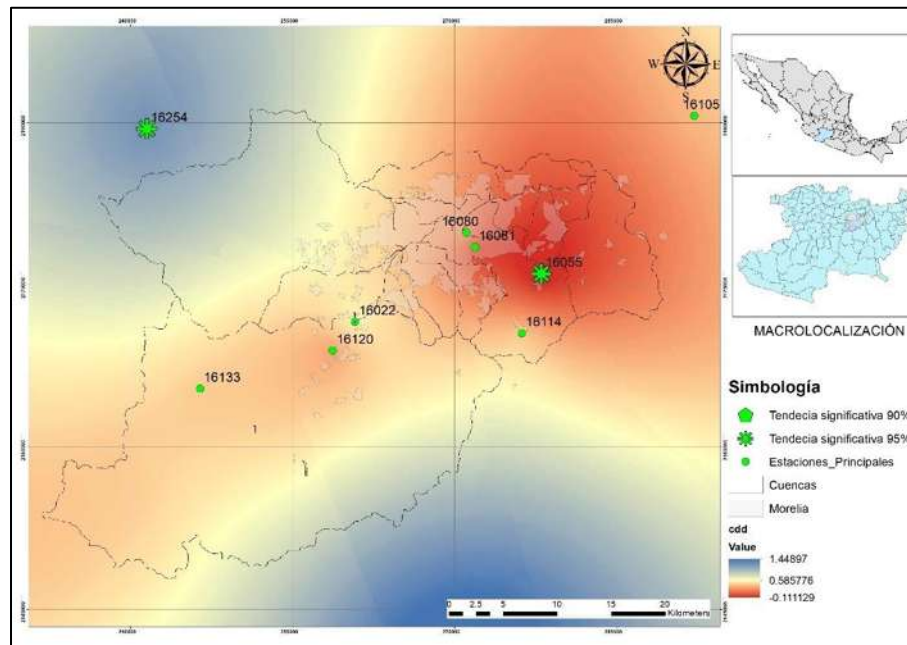


Figura 19. Distribución del índice CDD en la zona de estudio.

9.3.2.2 Días consecutivos húmedos (CWD)

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Para este caso se obtuvo que el 62.5% de las estaciones ubicadas en la zona de estudio están experimentando una tendencia negativa. Lo cual corresponde a los resultados del índice CDD, el número de estaciones que presentan tendencia estadísticamente significativa son 7 de las cuales 2 son positivas y 5 negativas.

En la Figura 20 se muestra el comportamiento por año de este índice para el caso de la estación 16081 igualmente ubicada en la ciudad de Morelia, se puede apreciar que el máximo número de días húmedos ronda entre los 8 y 12 días.

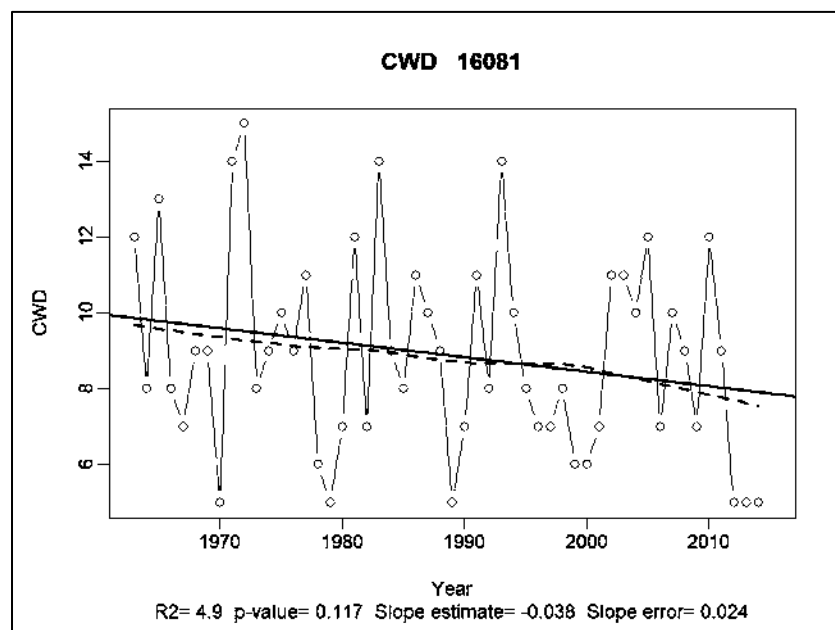


Figura 20. Índice CWD por año para la estación 16081.

En la Figura 21 se puede apreciar la representación espacial de las tendencias en este índice sobre la zona de estudio, se puede apreciar las tendencias positivas hacia la zona este de la cuenca y negativas en la zona oeste, en las que se observa que las tendencias significativas se localizan centro y oeste de la cuenca.

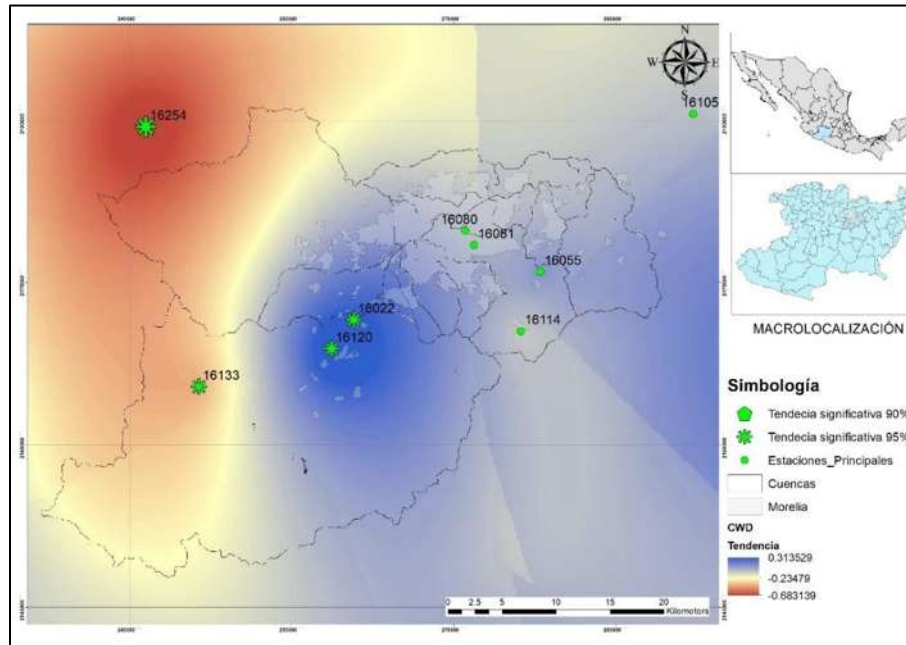


Figura 21. Distribución del índice CWD en la zona de estudio.

9.3.2.3 Precipitación total anual (PRCPTOT)

Para el PRCPTOT solo el 25% de las estaciones ubicadas en la zona de estudio están experimentando una tendencia positiva y el 75% restante negativa. Que de igual manera corresponde a los resultados del índice CDD, y se refleja en una disminución de la lluvia total anual, en este caso el número de estaciones que presentan tendencia estadísticamente significativa son 7, todas estas siendo negativas.

En la Figura 22 se muestra el comportamiento por año de este índice para el caso de la estación 16081, los valores de la precipitación anual han disminuido notablemente que para la década de 1070 se mantenían dentro de los 800 y 1000 mm/año y ahora se encuentran entre los 600-800 mm/año.

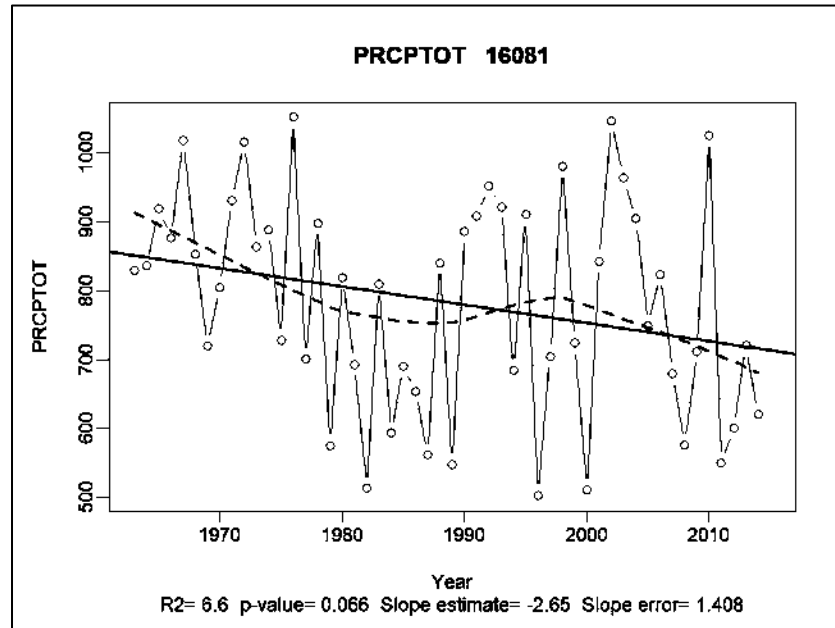


Figura 22. Índice PRCPTOT por año para la estación 16081.

La Figura 22 muestra cómo se está distribuyendo la tendencia en la precipitación total anual en la cual se puede apreciar que notablemente existe una tendencia a la baja con zonas de tendencia significativa.

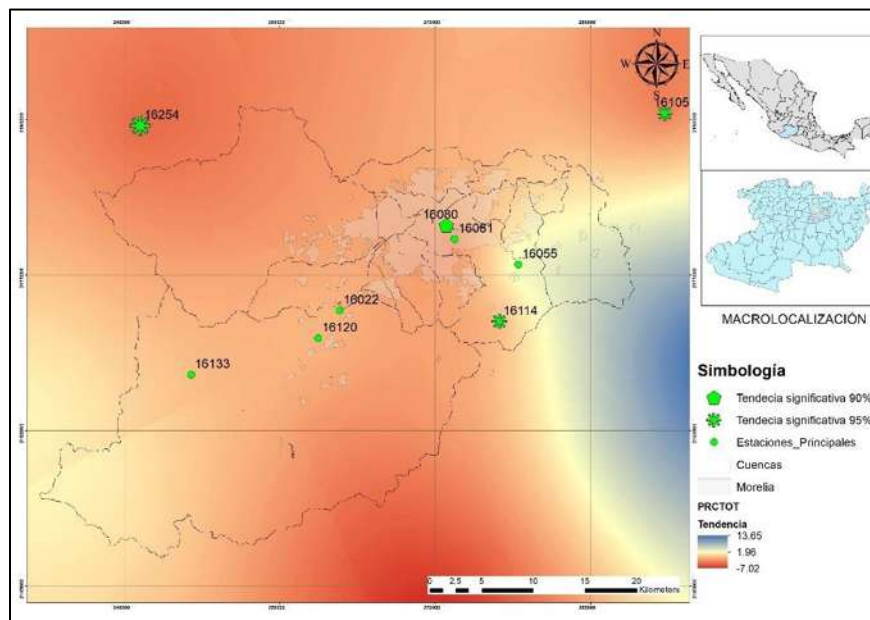


Figura 23. Distribución del índice PRCPTOT en la zona de estudio.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

9.3.2.4 Precipitación mayor a 10 mm por año (R10)

Este índice cuenta con un 75% de las estaciones que experimentan una tendencia negativa. El número de estaciones que presentan tendencia estadísticamente significativa son 8, de las cuales 1 es positiva, se puede apreciar que este índice está muy relacionado con el PRCPTOT ya que los eventos por arriba de este umbral son los que definen en gran parte la precipitación total anual.

En la Figura 24 se muestra el comportamiento por año de este índice para la estación 16081, el número de precipitaciones mayores a 10 mm/día. Los cuales han pasado de rondar los 25-35 días ahora estar entre los 20-25.

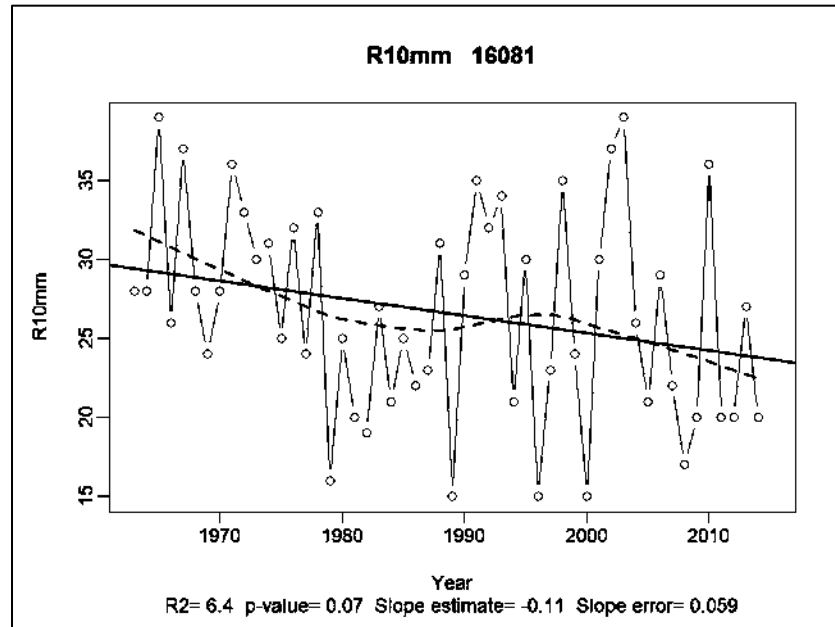


Figura 24. Índice R10 por año para la estación 18081.

La distribución de este índice es mostrada en la Figura 25 en la cual se observa que las principales zonas que se está disminuyendo el número de precipitaciones en este límite son la zona centro de la cuenca, pero existe un aumento de estas en las zonas altas de la misma.

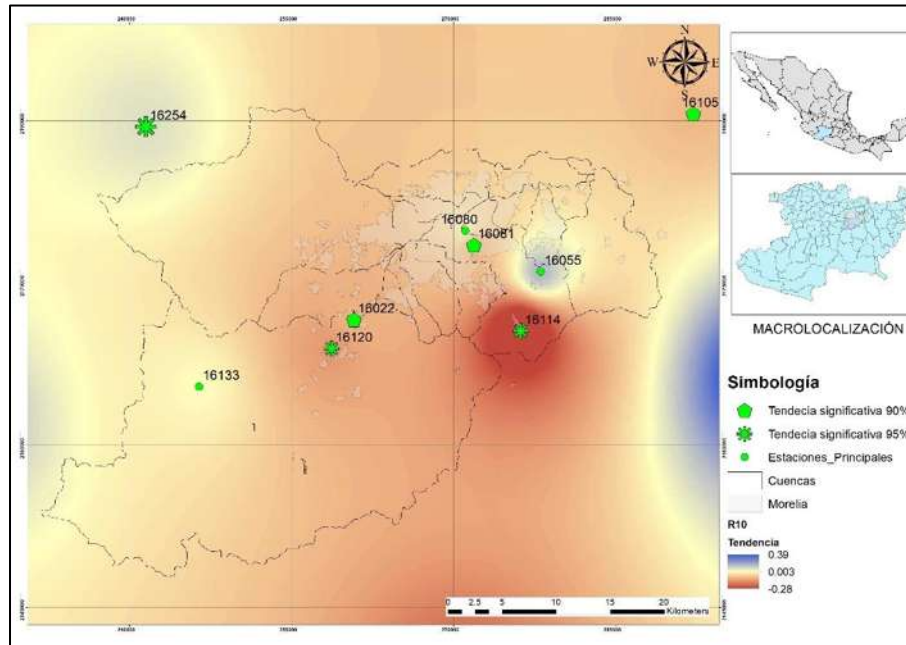


Figura 25. Distribución de la tendencia del índice R10.

9.3.2.5 Precipitación mayor a 20 mm por año (R20)

El análisis de este índice resultó muy similar al de R10 ya que se tiene el mismo porcentaje en las tendencias con un 31.25% en tendencia negativa y 68.75% en las positivas. Pero en este caso el número de estaciones con tendencia significativa disminuyó ahora solo se cuenta con 6 estaciones de las cuales la mitad corresponden a positivas y la otra mitad a negativas.

En la Figura 26 se muestra el comportamiento por año de este índice para el caso de la estación 1608, donde se puede apreciar que en épocas pasadas se tenían en su gran mayoría hasta as de 10 eventos y ahora estamos entre los 5 y 10.

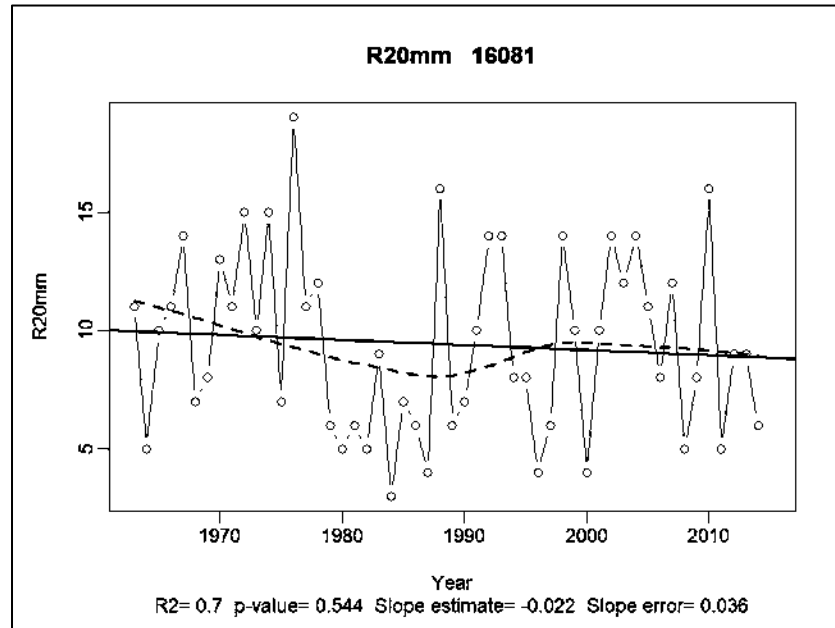


Figura 26. Índice R20 por año para la estación 16081.

La Figura 27 muestra la distribución de la tendencia que se está teniendo en los eventos mayores a 20 mm/día en la que se observa la un aumento en la zona oeste decremento en la zona sur y y nuevamente aumento en la zona este.

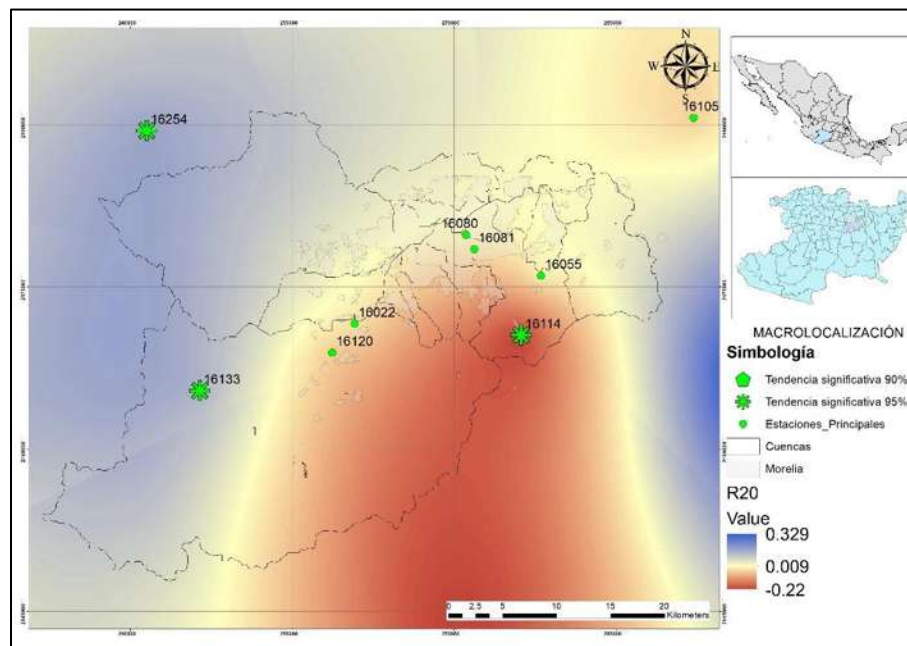


Figura 27. Distribución de la tendencia del índice R20.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

9.3.2.6 Precipitación mayor a 25 mm por año (R25)

Los resultados de este índice mostraron que ahora las tendencias están cambiando con respecto de los eventos de intensidad menor a la de este índice ya que ahora un 50% de las estaciones presenta tendencias positivas y el otro 50% negativas, por lo que se puede decir es que las precipitaciones a partir de este límite se están haciendo más presentes, el número de estaciones con tendencia significativa son un total de 7 de las cuales solo 2 son negativas.

La Figura 29 muestra el comportamiento de este número de precipitaciones por año y podemos observar que por lo regular se ha mantenido en el rango de 2 a 10 eventos por año lo que la tendencia no casi nula.

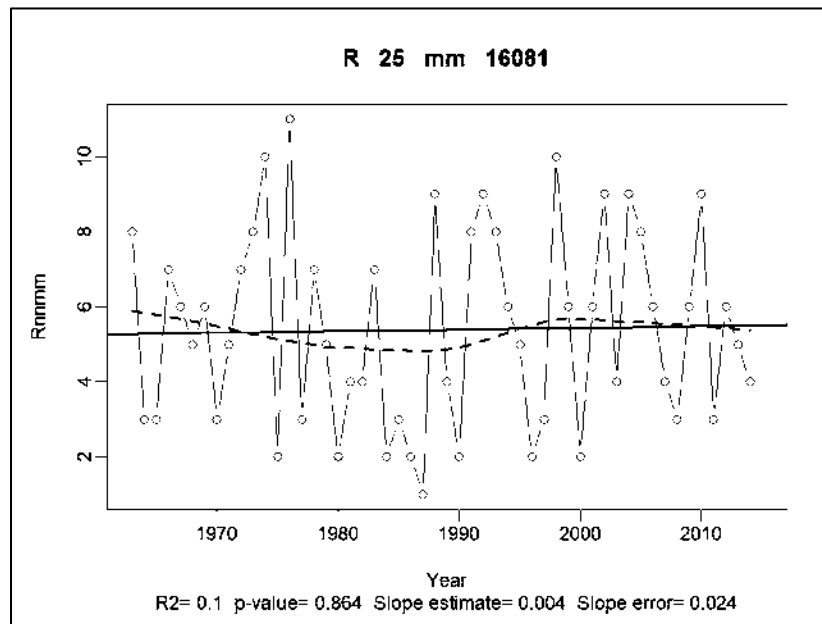


Figura 28. Índice R25 por año para la estación 16081

Haciendo una comparación con la estación 16033 mostrada en la Figura 29 la cual se encuentra aguas arriba de la cuenca podemos apreciar notablemente que el número de eventos que esta por arriba de este límite va en aumento, pasando de estar entre 5 a 10 eventos por año a ahora alcanzar hasta los 20.

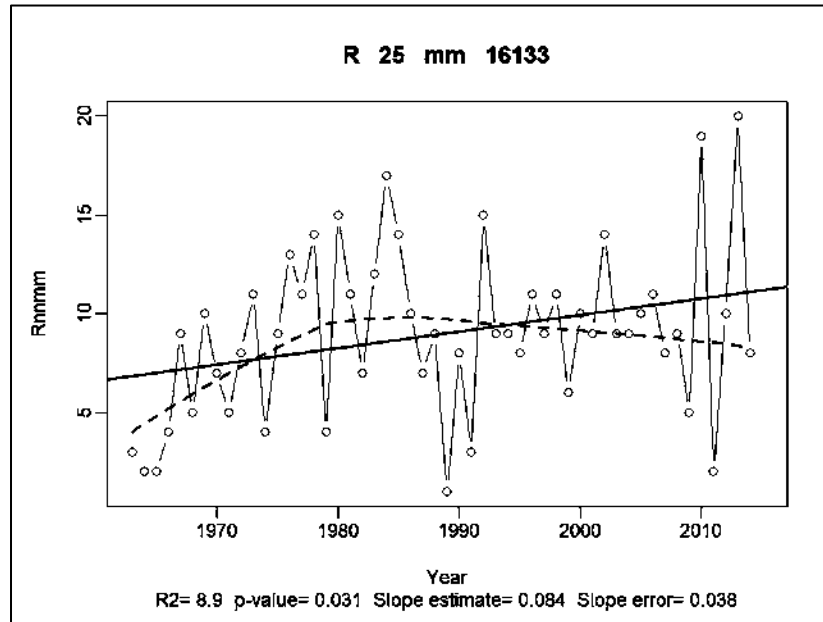


Figura 29. Índice R25 por año para la estación 16133

En la Figura 30 podemos apreciar el comportamiento de estas tendencias en las que las principales zonas que presentan una tendencia positiva se presentan en la zona este y oeste de la cuenca se puede apreciar que 4 de las estaciones que cuentan con tendencia significativa se encuentran prácticamente dentro de la cuenca.

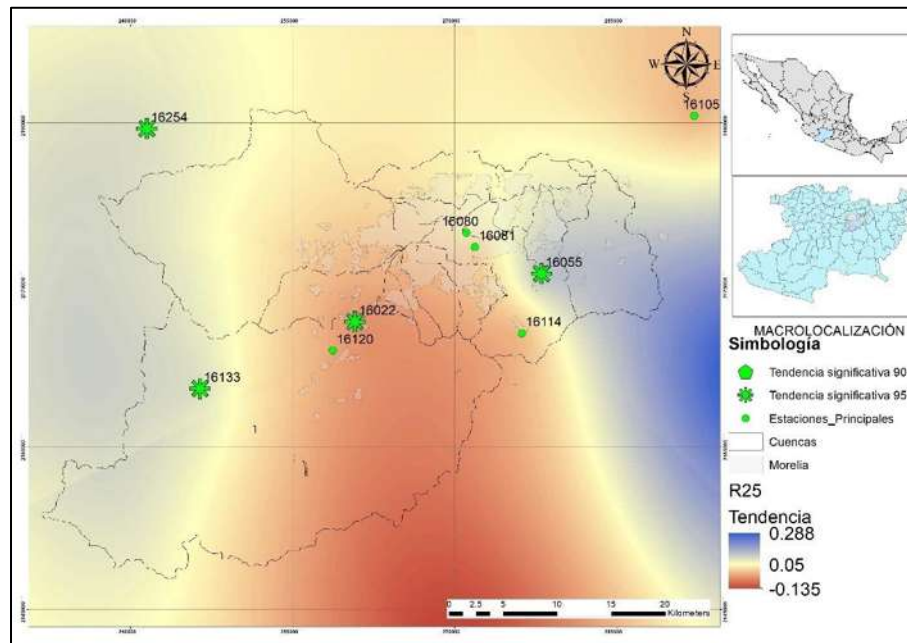


Figura 30. Distribución de la tendencia del índice R25.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

9.3.2.7 Precipitación mayor al percentil 95 (R95p)

Los resultados del análisis en este índice nos mostraron que las tendencias se mantuvieron con el mismo signo que con el de R25 solo su magnitud cambió esto puede deberse a que los eventos por arriba de ese umbral ya son muy pocos, en este índice la tendencia significativa fue de 6 estaciones en las cuales 3 son positivas y 2 negativas.

Para el caso de este índice la Figura 31 muestra la estación 16133 ubicada aguas arriba de la cuenca, se observa como la cantidad de precipitación asociada a estos eventos va en aumento que para los años 1970 y 1980 se mantenía entre 50 y 300 mm/año y ahora se llega a cantidades de 200 a 500 mm/año.

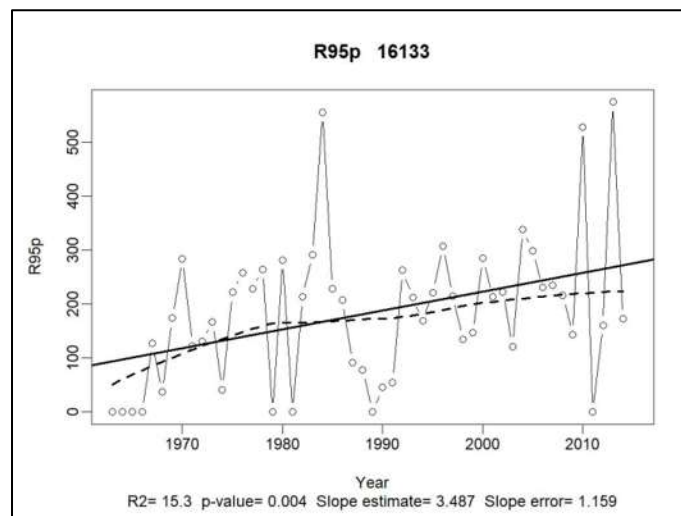


Figura 31. Índice R995p por año para la estación 16133.

La Figura 32 muestra la distribución de las tendencias en este índice corroborando nuevamente que se las tendencias positivas se están concentrando aguas arriba de cuenca.

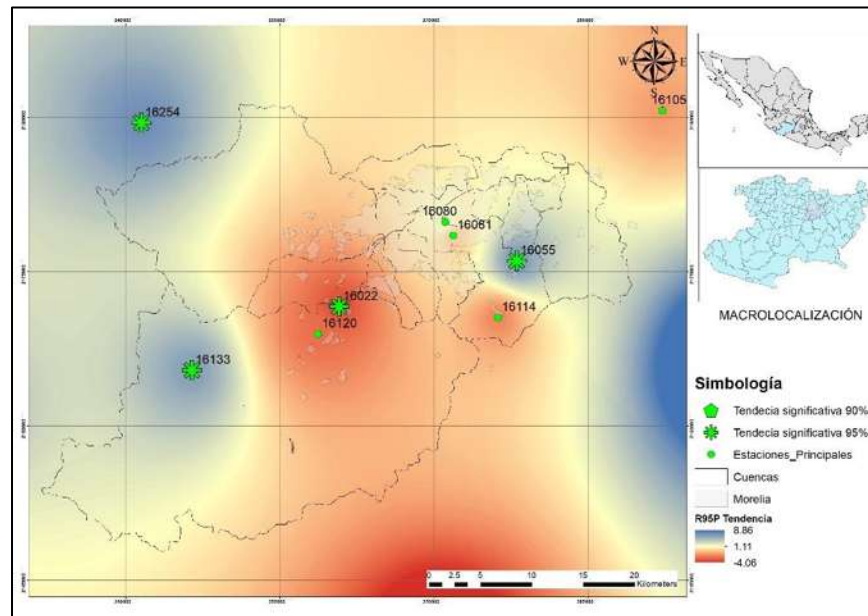


Figura 32. Distribución de tendencias del índice R95p.

9.3.2.7 Precipitación mayor al percentil 99 (R99p)

Sobre este índice los resultados arrojan que la tendencia positiva va en aumento ya que ahora se tiene un 56.25% de las estaciones presentándola, en su gran mayoría las estaciones mantuvieron su tendencia, aunque muchas de las negativas comenzaron a tener una disminución en su magnitud.

En el caso de este índice las precipitaciones acumuladas de eventos asociadas a este percentil se encontraban entre los 50 a 150 mm, y en la última década este ha aumentado hasta los 250 mm (Figura 33).

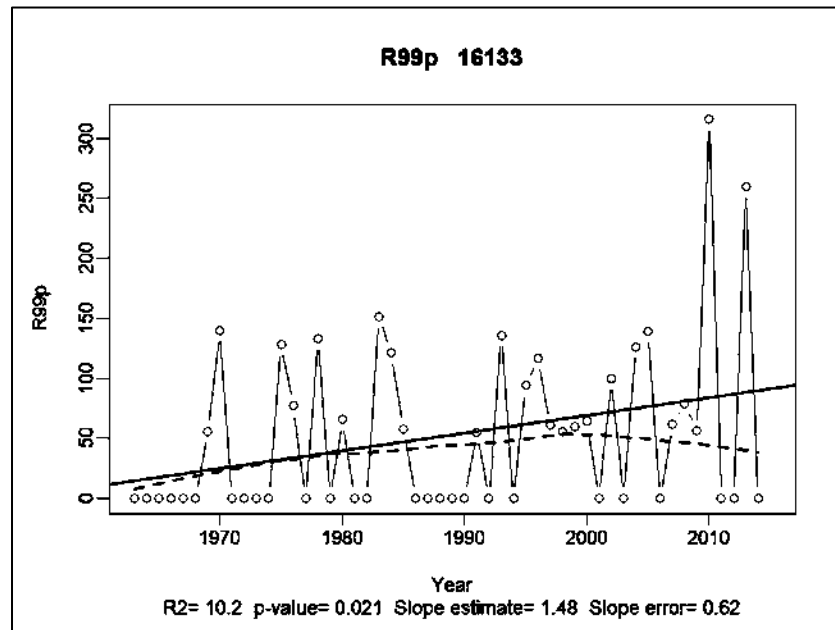


Figura 33. Índice R99p por año para la estación 16133.

La distribución de tendencias sobre este índice es muy similar a la del R99p ya que ambas se enfocan en los eventos con mayor precipitación, la diferencia con el R99p es que las tendencias son más fuertes hacia la tendencia positiva presentando una mayor área en la zona de estudio (Figura 34).

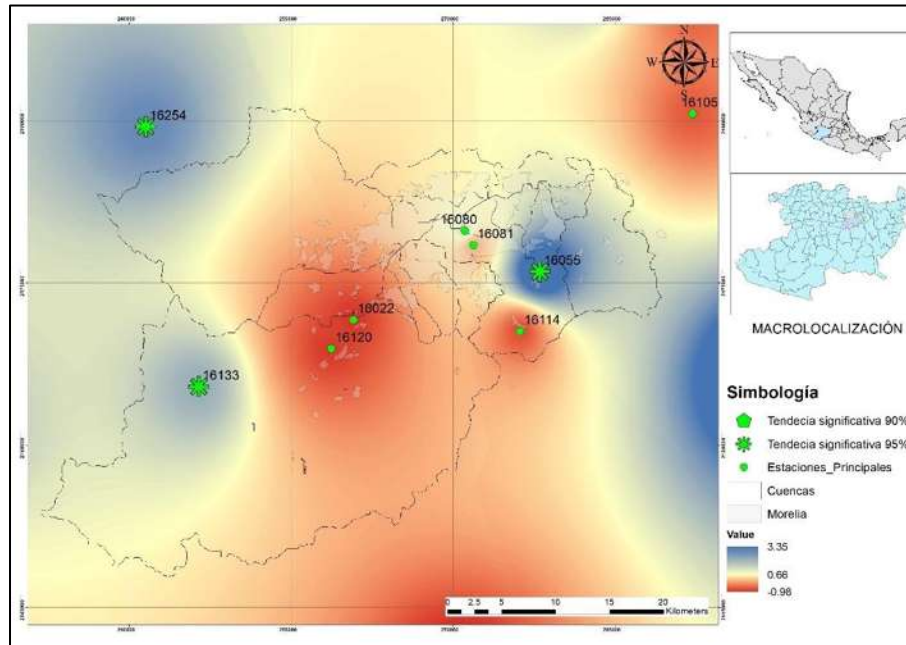


Figura 34. Distribución de tendencias del R99p.

9.3.2.8 Precipitación máxima en un día por año (Rx1day).

Al igual que en el R99p el porcentaje de estaciones con tendencia positiva y negativa se mantuvo con un 56.25% y 43.75% respectivamente. Esto debido a que los dos índices se enfocan en analizar los eventos de precipitación más grandes ocurridos a lo largo del año, en la Figura 35 se aprecia que los eventos dentro de los 70 y 100 mm/año cada vez se hacen más notables, y su distribución de tendencias se mantiene igual que la del R99p mostrada en la Figura 36.

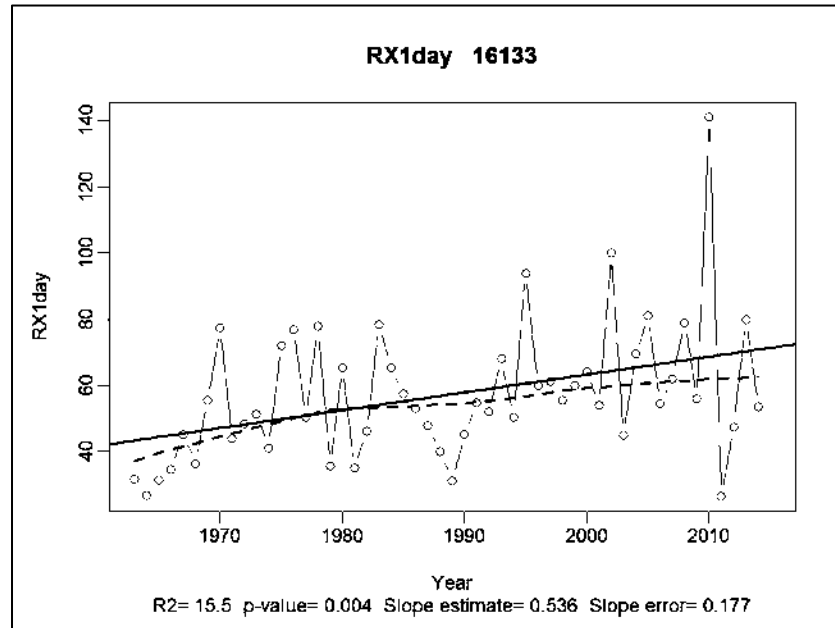


Figura 35. Índice Rx1day por año para la estación 16133.

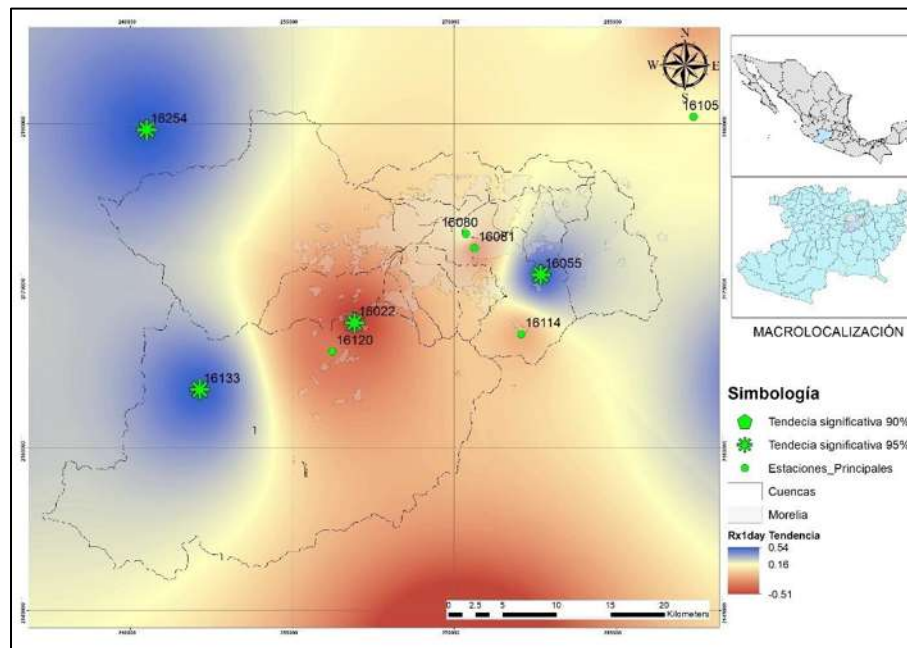


Figura 36. Distribución de la tendencia del Rx1day.

9.3.2.10 Precipitación máxima acumulada en 5 días por año (Rx5day)

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

En el estudio de las inundaciones este índice resulta de gran importancia debido a que las inundaciones pueden presentarse por la acumulación de lluvias por varios días lo cual genera que el suelo llegue a su capacidad máxima de absorción, además de la acumulación de flujo en los cauces, los resultados de este índice nos arrojaron una tendencia en las estaciones del 50% positiva y 50% negativa, de estas de las cuales 7 cuentan con significancia estadística, de las cuales 5 son positivas y 4 negativas.

La cantidad de precipitación acumulada en 5 días ha ido incrementando considerablemente con valores que han aumentado desde los 100 hasta los 200 mm en 5 días (Figura 37).

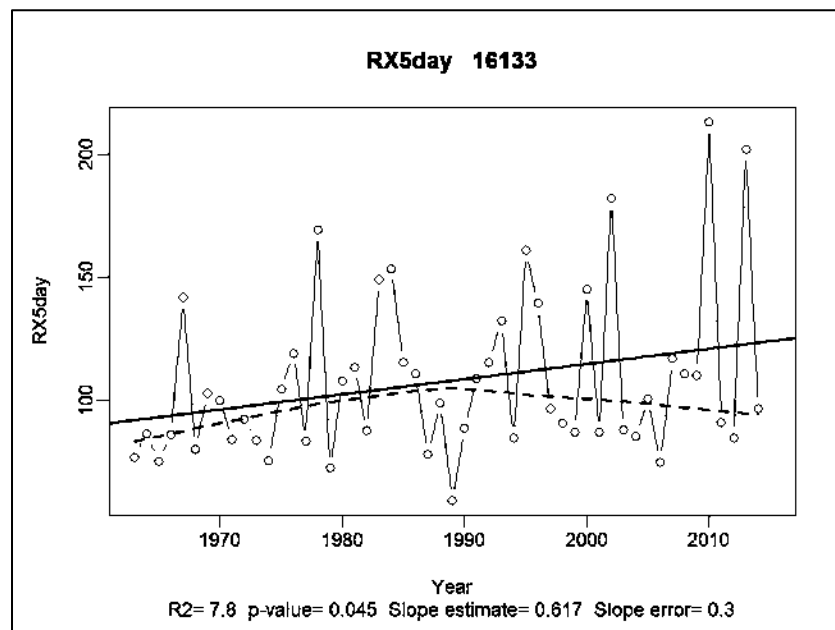


Figura 37. Índice RX5day por año para la estación 16133.

La Figura 37 muestra que la distribución de tendencias en este índice se mantiene como en las del RX1day, presentándose con mayor intensidad en las partes altas de las cuencas.

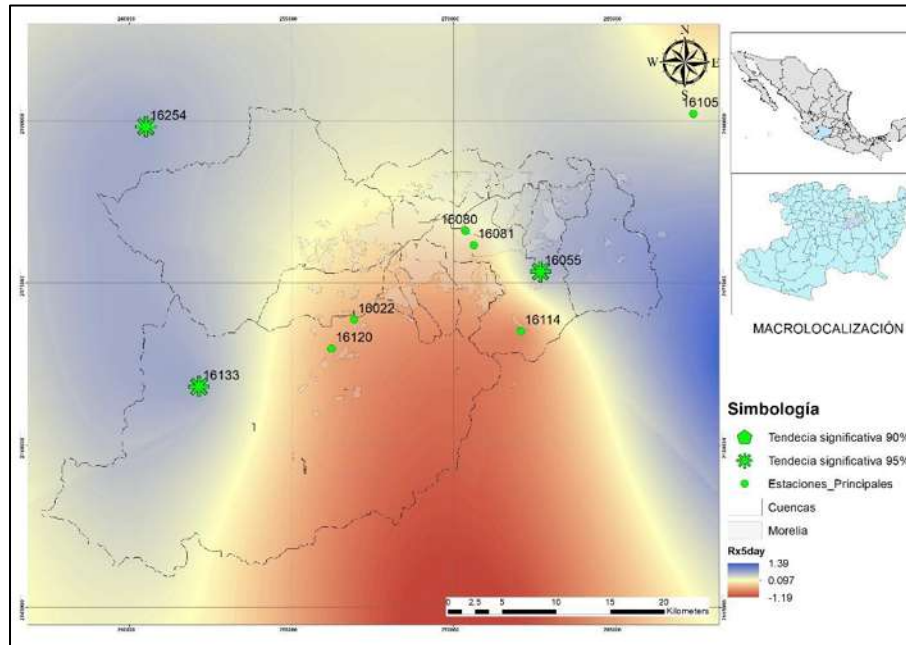


Figura 38. Distribución de tendencias del Rx5day.

9.3.2.11 Precipitación total anual dividida sobre el número de días húmedos (SDII)

Este índice nos ayuda a observar la relación que existe entre los días de precipitación y el total anual, por lo que un aumento en este índice quiere decir que la precipitación se está concentrando en un número de días menor, los resultados arrojaron que el 62.5% de las estaciones están presentando una tendencia positiva y otro 37.5% negativa, dentro de estas 8 cuentan con significancia estadística siendo 5 positivas y 3 negativas. La Figura 39 muestra que la relación entre la lluvia anual y el número de días húmedos para los años de 1970 y 1980 se mantenía entre los 9 y 14 mm/día y en la actualidad estos están rondando los 10 a 20 mm/año.

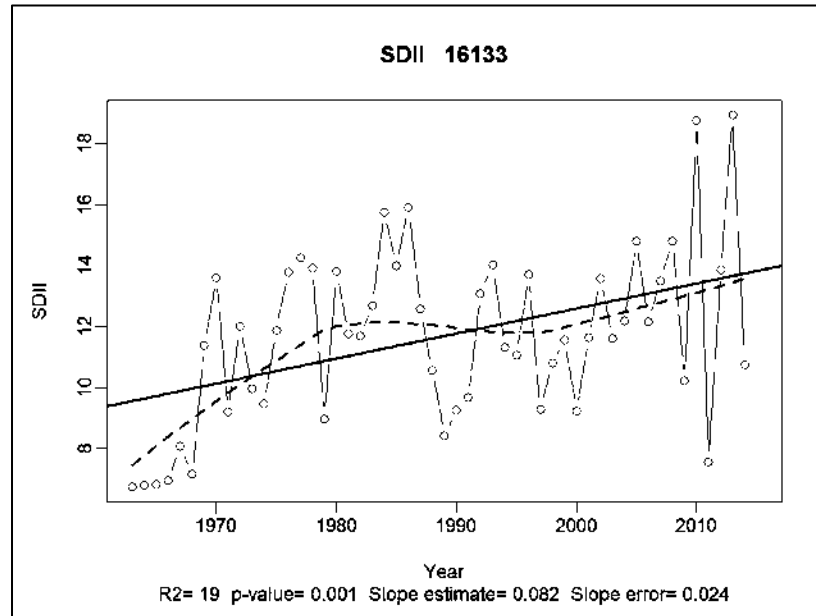


Figura 39. Índice SDII por año para la estación 16133.

En este caso las distribuciones se dividen de N-W positivas y S-E negativas donde se puede apreciar que 4 estaciones con significancia estadística (Figura 40).

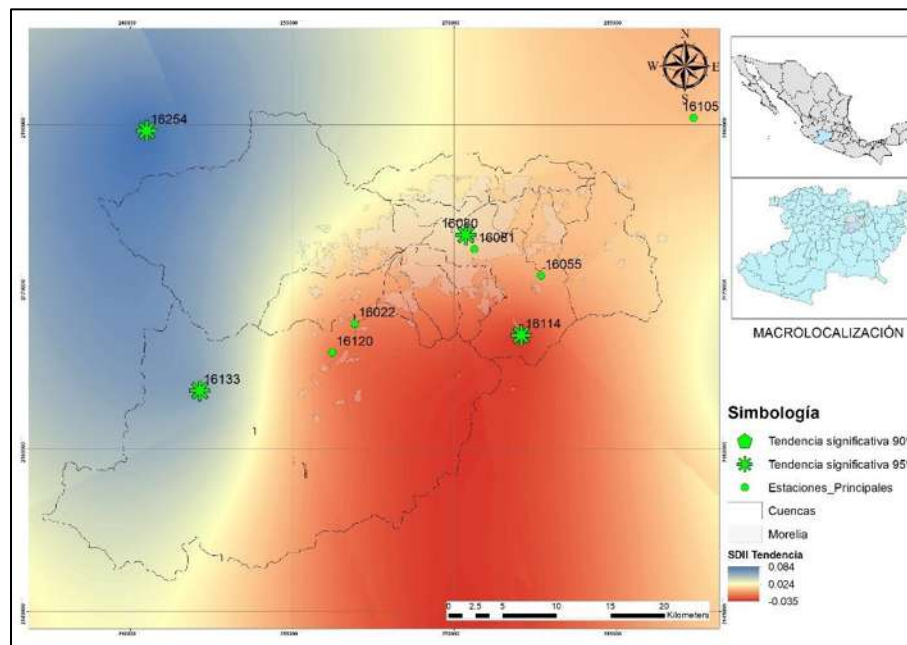


Figura 40. Distribución de tendencias para el índice SDII.

9.3.4 Inundaciones históricas para al periodo de 1944-2022



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Es bien sabido que a lo largo del tiempo la ciudad de Morelia ha presentado una gran cantidad de eventos de inundación, es por esto que se realizó una búsqueda exhaustiva para generar una recopilación de estos, en la Tabla 47 del apartado de anexos se muestra el resumen de las inundaciones históricas que ha tenido la ciudad de Morelia, de las cuales sobresalen los eventos ocurridos en el año 2003, 2005, 2015 y 2018 a continuación se relata lo sucedido.

9.3.3.1 Año 2003

El 17 de septiembre del año 2003 periódicos relatan que una fuerte tromba provocó inundaciones y el desbordamiento de ríos en al menos diez colonias de Morelia, alcanzando niveles de agua superiores a un metro. La Secretaría de Salud desplegó brigadas médicas para ofrecer asistencia y prevención a los afectados, incluyendo la verificación de la calidad del agua para consumo humano. Se aplicaron medidas de saneamiento básico y tratamiento químico en áreas inundadas. Decenas de familias fueron evacuadas, y las labores de rescate continuaron en las colonias más afectadas. Se contempló solicitar la aplicación del plan DN-III del Ejército Mexicano para reforzar las operaciones de socorro (Proceso, 2003).

En la Figura 41 se muestra la distribución de precipitación el día de la inundación, en la que se puede observar que la mayor parte de la precipitación se concentró sobre la Ciudad de Morelia.

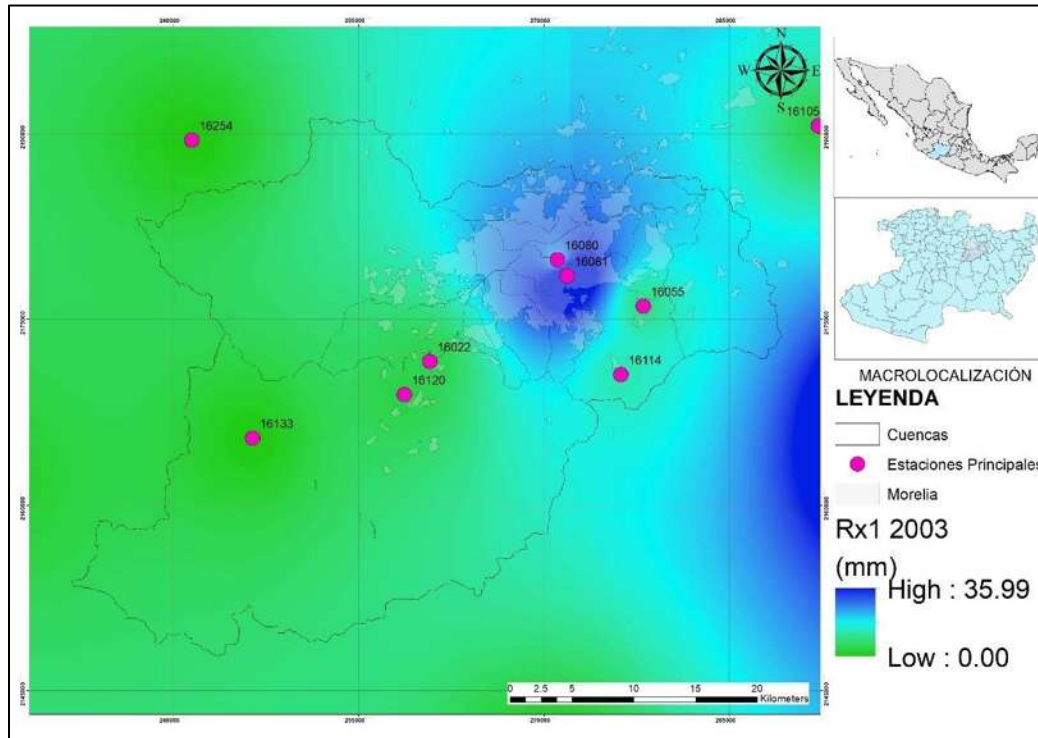


Figura 41. Precipitación registrada el día de la inundación 2003.

En la Tabla 26 se presenta el Rx5day para las distintas estaciones, se puede observar que en la mayoría de las estaciones comenzó a llover antes de que se produjera el acontecimiento, la lluvia máxima registrada durante ese día fue de 30 mm presentado por la estación 16081, el promedio de las lluvias acumuladas en 5 días fue de 43.6 mm.

Tabla 26. Precipitaciones 5 días antes del evento de 2003.

Fecha	16016 p(mm)	16022 p(mm)	16055 p(mm)	16080 p(mm)	16081 p(mm)	16087 p(mm)	16091 p(mm)	16105 p(mm)	16109 p(mm)	16114 p(mm)	16120 p(mm)	16133 p(mm)	16136 p(mm)	16146 p(mm)	16155 p(mm)	16254 p(mm)
13/09/2003	1.5	1.6	5.1	5.9	1.2	14.9	4.19	2.7	10	52	13.8	2.5	6.5	9	7.8	2.7
14/09/2003	32	8.2	0	1.6	0.6	6.3	16.93	16.5	3	8	1.2	0	7.5	10	5.0	0
15/09/2003	0	1.3	3.1	20	16.4	6.8	2.30	0	0	4	8	0	10.5	8	4.9	0
16/09/2003	6.5	45.5	0	9.7	4.2	19.6	8.59	8.9	16	13	43.1	0	0.5	18	16.1	12.3
17/09/2003	15.5	2.3	5.1	11.3	30.2	0.8	8.49	2.1	0	7	2.1	0	36	6	5.7	0
RX5day	55.5	58.9	13.3	48.5	52.6	48.4	40.50	30.2	29	84	68.2	2.5	61	51	39.60	15

La Figura 42 muestra el Rx5day sobre la zona de estudio, se puede observar que esta precipitación se concentró en las zonas altas de la cuenca.

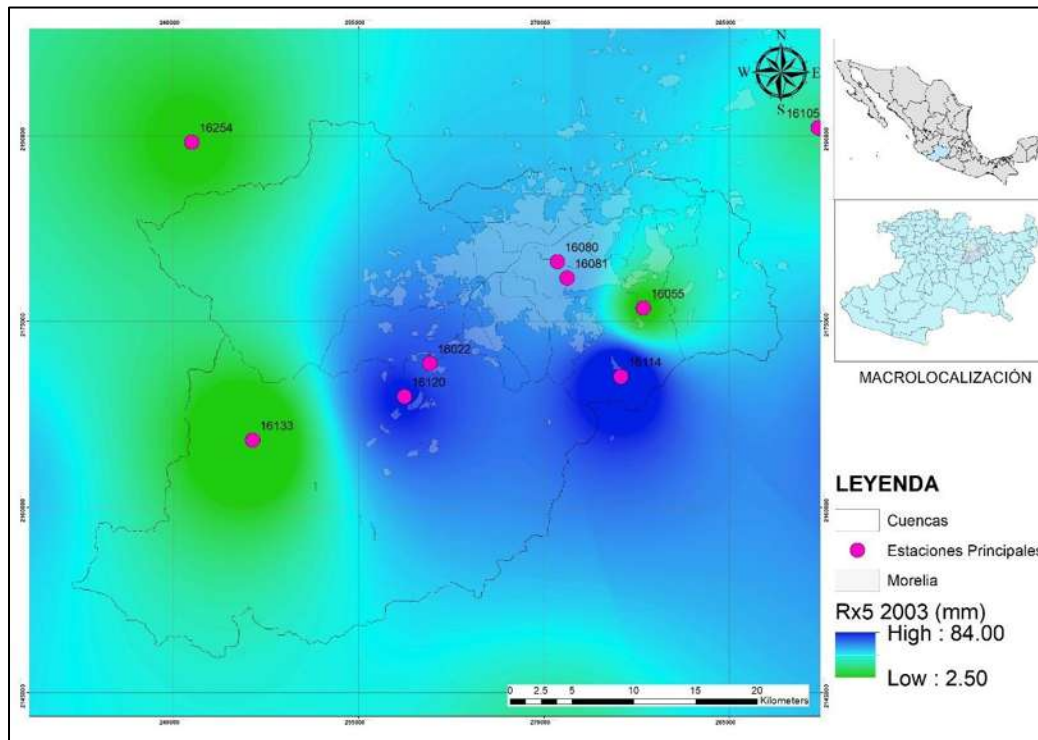


Figura 42. Distribución del Rx5day inundación 2003.

9.3.3.2 Año 2005

El 1 de septiembre de 2005 periódicos relataron lo siguiente: Una intensa tromba azotó la región norte de la ciudad de Morelia anoche, provocando fuertes inundaciones en 30 colonias y dejando a alrededor de 700 familias incomunicadas en la colonia Infonavit Quinceo. Se desconoce el número exacto de damnificados, pero las autoridades, respaldadas por el Ejército Mexicano y Protección Civil, están brindando asistencia a la población afectada. La Cruz Roja informó sobre una persona desaparecida, y se estima que al menos 500 casas resultaron afectadas, lo que podría llevar a la declaración de emergencia para la zona norte de la ciudad debido a este fenómeno meteorológico, catalogado como el más grave de la temporada de lluvias hasta ahora (La Jornada, 2005).

El día de esta inundación se puede observar que, la precipitación de igual forma que con la ocurrida en el 2003 se concentró en la Ciudad de Morelia llegando hasta los 45 mm (Figura 43).

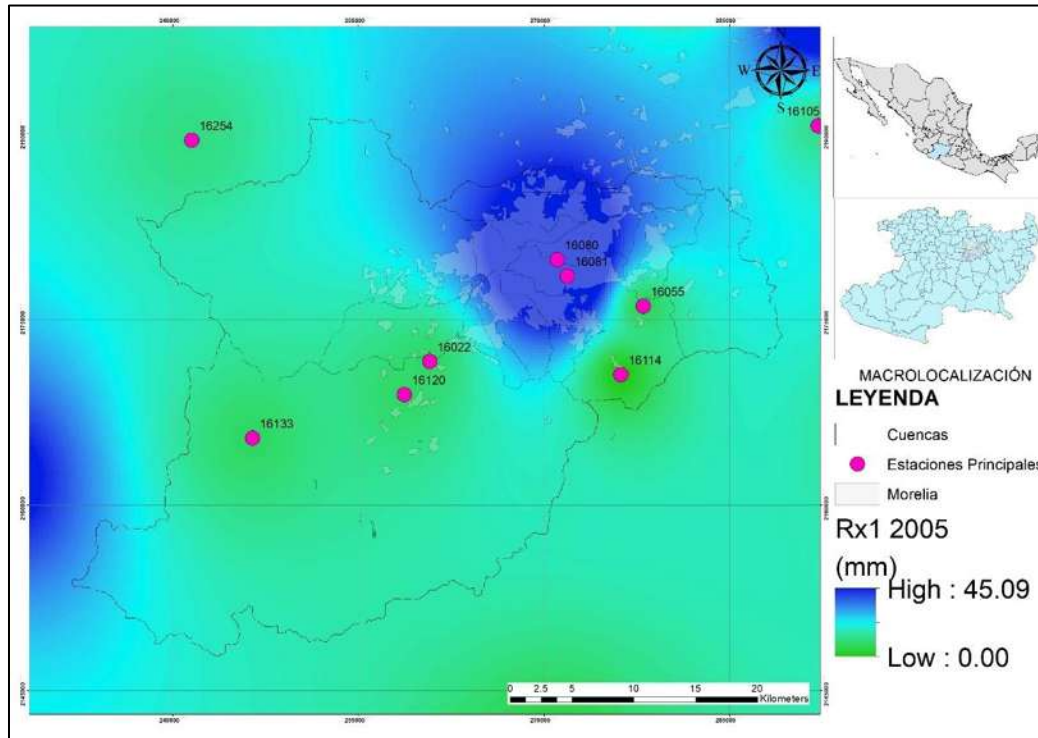


Figura 43. Precipitación registrada el día de inundación 2005.

De igual forma se analizaron los 5 eventos de precipitación anteriores a la inundación de 2005 para todas las estaciones donde el mayor evento el día de la inundación fue de 45 mm en la estación 16081 mostrado en la Tabla 27, a su vez el promedio de las precipitaciones acumuladas en 5 días fue de 51.5 mm.

Tabla 27. Precipitación acumulada en 5 días antes del evento de 2005.

Fecha	16016 p(mm)	16022 p(mm)	16055 p(mm)	16080 p(mm)	16081 p(mm)	16087 p(mm)	16091 p(mm)	16105 p(mm)	16109 p(mm)	16114 p(mm)	16120 p(mm)	16133 p(mm)	16136 p(mm)	16146 p(mm)	16155 p(mm)	16254 p(mm)
28/08/2005	1	8.8	17	0	0	6.9	0	6.4	0	0	8.8	2.3	1.5	0	5.0	7.2
29/08/2005	0	0	1.5	26.5	28.3	0	0	0	0	28	0	0	5	4.6	4.8	0
30/08/2005	62.2	0	71	0	0	0.3	0	12.2	0	0	0	0	0.4	0.3	10.6	15.6
31/08/2005	25	34.6	1	15.4	20	17.3	24.6	35.3	0	0	34.6	0	16	16.5	17.1	12.1
01/09/2005	5.6	5	4.1	45.1	42	32.4	38.4	7.8	2	0	5.1	5	6	0	13.4	7.1
Rx5day	93.8	48.4	94.6	87	90.3	56.9	63	61.7	2	28	48.5	7.3	28.9	21.4	50.89	42

En la Figura 44 se puede observar que las precipitaciones se concentraron en la ciudad llegando hasta los 94 mm en 5 días.

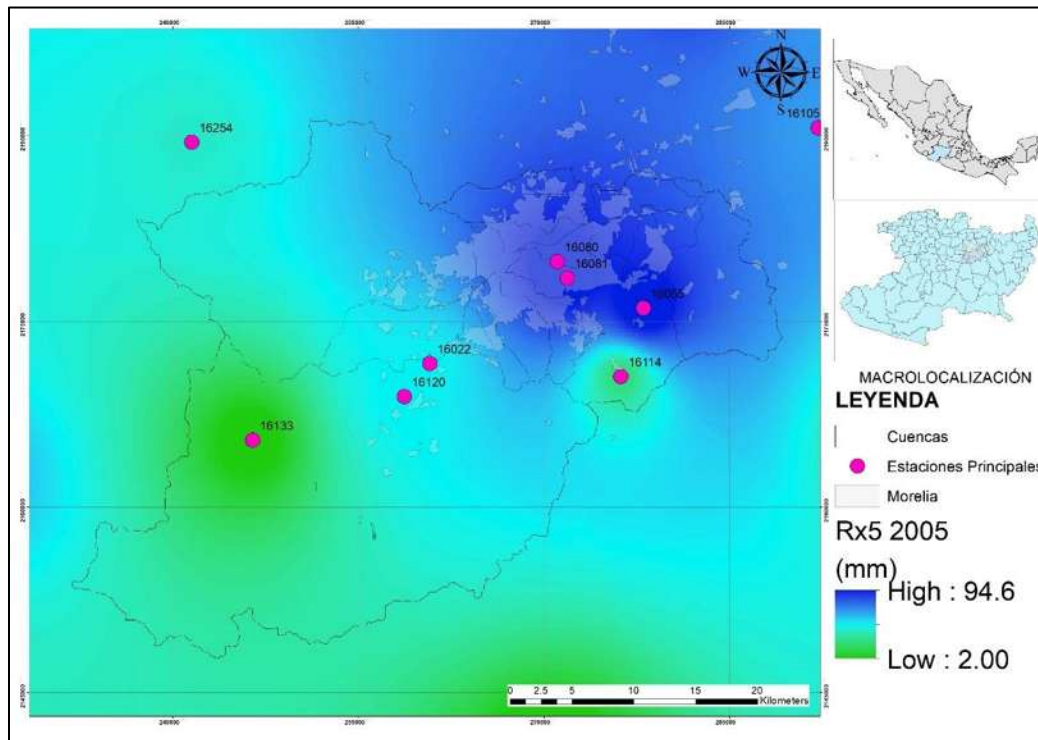


Figura 44. Distribución del RX5day inundación 2005.

9.3.3.3 Año 2015

El 16 de marzo de 2015 periódicos reportaron que, en Michoacán, el Ejército implementó el Plan DN-III en respuesta a los daños causados por fuertes lluvias en cuatro comunidades. Protección Civil reportó encharcamientos en 25 de las 32 colonias con alto riesgo de inundaciones en la capital michoacana, ubicadas en zonas bajas y en los márgenes de los ríos Grande y Chiquito, que están al máximo de su capacidad, protección civil y bomberos tuvieron que evacuar a personas de las cuales sus casas resultaron afectadas (EXCELSIOR, 2015).

En la Figura 45 se puede observar que el día de la inundación la precipitación se concentró en la zona S-W de la cuenca y se fue distribuyendo a lo largo de esta en dirección N-E, llegando a tener precipitaciones de entre los 16 y 130 mm.

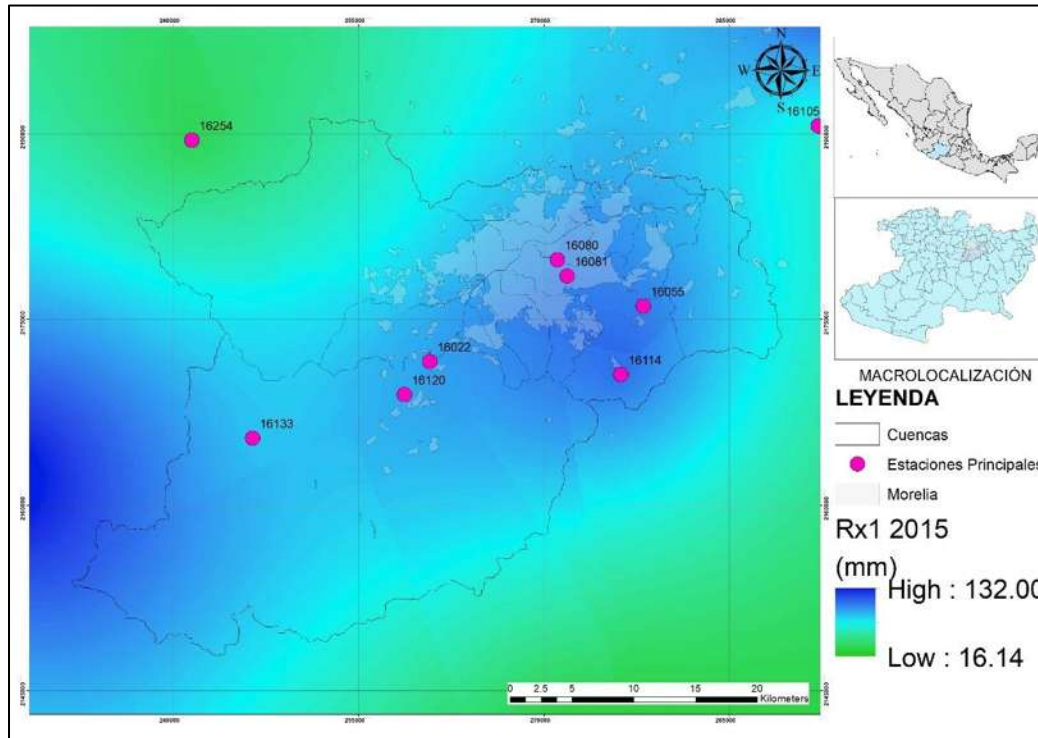


Figura 45. Precipitación registrada el día de la inundación 2015.

En la Tabla 28 se presentan las lluvias acumuladas en 5 días, la inundación se presentó la fecha de 15 pero las lluvias siguen hasta el día 16 es por esto que se tomó hasta ese día, en el día que ocurrió la inundación la precipitación máxima que se presentó fue de 104 mm en la estación 16109, a su vez el promedio de los 5 días de lluvia acumulados fue de 142.9 mm.

Tabla 28. Precipitaciones acumuladas a 5 días para el evento de inundación del 2015.

	16016	16022	16055	16080	16081	16087	16091	16105	16109	16114	16120	16133	16136	16146	16155	16254
Fecha	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)	p(mm)
12/03/2015	5.737	10.82	13.7	17.5	9	1.3	7	0	24.6	6	10.26	0	4.5	0	5.564	3.7
13/03/2015	15.83	6.112	0	0	0	0	0	16.6	30.5	0	8.075	40	65	43	24.94	44.6
14/03/2015	47.63	29.13	14.7	30	15	21.6	18	99.2	10.5	22	31.16	40	76	48	60.02	113.2
15/03/2015	65.21	65.65	73	70	63.7	132	104	21.3	0	90	64.44	53.5	23.5	26	47.67	7.6
16/03/2015	15.83	31.22	77	29.5	21	0.6	24	0	0	23	29.01	1.5	0	23	12.99	0
Rx5day	150.2	142.9	178.4	147	108.7	155.5	153	137.1	65.6	141	143	135	169	140	151.2	169.1

La Figura 46 muestra cómo se distribuyó la precipitación acumulada en 5 días, se puede apreciar que esta se concentró principalmente en la zona norte de la cuenca llegando hasta los 178 mm.

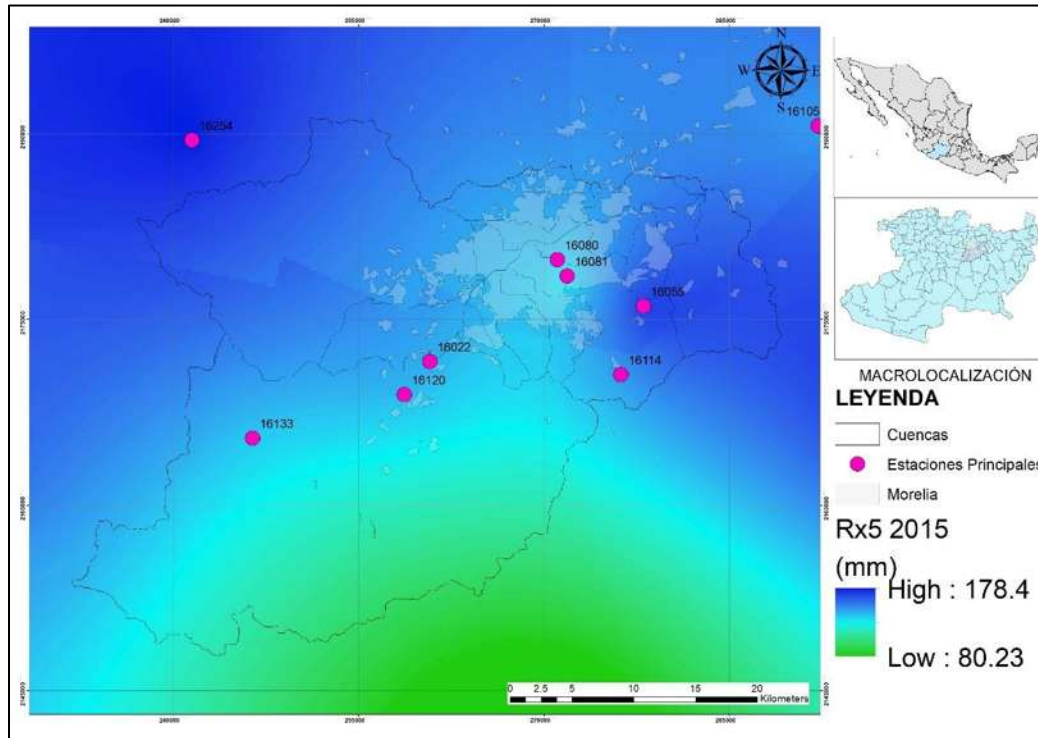


Figura 46. Distribución del RX5day inundación 2015.

9.3.3.4 Año 2018

22 de octubre de 2018 periódicos reportaron que, Debido a las intensas lluvias, las autoridades de Protección Civil reportaron que el Río Grande se desbordó en Morelia, mientras que otros drenes y ríos de la zona alcanzaron el 100% de su capacidad. Colonias como Ventura Puente, Carlos Salazar, Jacarandas, Los Manantiales e Industrial resultaron gravemente afectadas, con niveles de agua superando el metro de altura en algunos sectores. El desbordamiento también provocó inundaciones en la avenida Madero, afectando áreas cercanas como Héroes Republicanos, Villas de Morelia, Niño Artillero y Fidel Velázquez, así como la calzada La Huerta, la avenida Siervo de la Nación y Granjas de la Huerta (Televisa, 2018).

En el caso de este evento solo se tiene información de 11 estaciones meteorológicas de las cuales dos cuentan con información a escala horaria, en la Figura 47 se puede observar que la precipitación se concentró principalmente en la ciudad de Morelia llegando hasta los 47 mm.

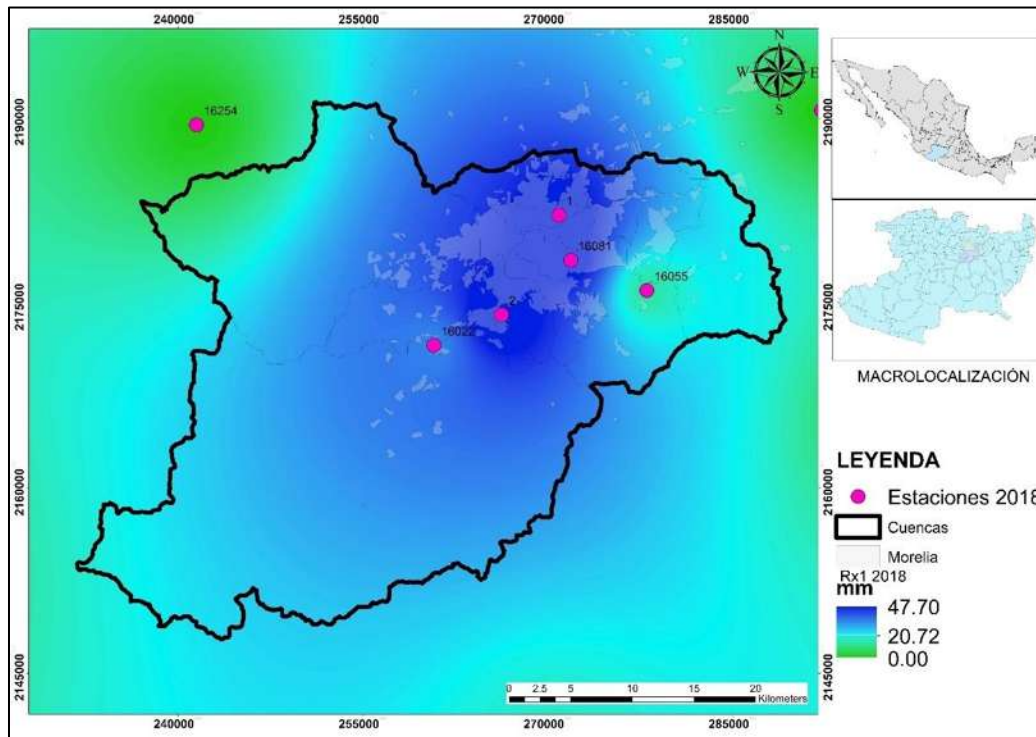


Figura 47. Precipitación registrada el día de la inundación 2018.

De igual forma se analizaron los 5 eventos de precipitación anteriores a la inundación de 2018 para dichas estaciones donde el mayor evento el día de la inundación fue de 47.7 mm en la estación Unam mostrado en la Tabla 20, a su vez el promedio de las precipitaciones acumuladas en 5 días fue de 76.96 mm. Presentando las mayores concentraciones aguas arriba de la cuenca (Figura 48).

Tabla 29. Precipitaciones acumuladas a 5 días para el evento de inundación del 2018.

Fecha	16022 p(mm)	16055 p(mm)	16081 p(mm)	Unam p(mm)	16091 p(mm)	16105 p(mm)	16109 p(mm)	Tec Conagua p(mm)	16136 p(mm)	16146 p(mm)	16254 p(mm)
18/10/2018	3	2.1	0	0.3	0	0	64.5	0.3	0	6	0
19/10/2018	0	3.5	0.5	7.8	0	1.3	38	14.1	3.7	8	0
20/10/2018	18.5	13.5	9	9	0	2.2	0	12.5	7.6	16	14.7
21/10/2018	15.5	61.7	6.7	13.1	3	13	39.5	12	29.5	17	8.6
22/10/2018	31	13.5	43.5	47.7	14	0.2	17	46	2.2	4	0
Rx5day	68	94.3	59.7	77.9	17	16.7	159	84.9	43	51	23.3

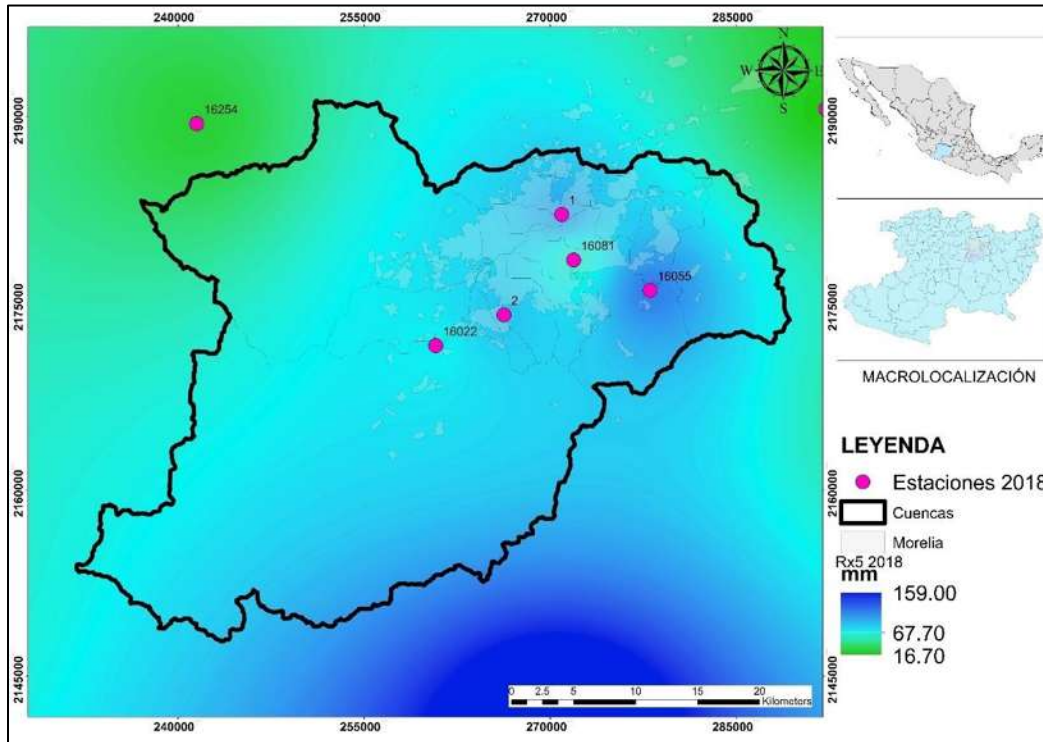


Figura 48. Distribución del RX5day inundación 2018.

9.3.5 Índice Oceánico El Niño (ONI).

Con base en datos del Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) (National Water Service, 2023), se elaboró una gráfica en la cual se definen los periodos en lo que se presentan los fenómenos del Niño y La Niña, cuando se rebasa el umbral 0.5 (color rojo), se está en la fase del Niño y cuando se rebasa el umbral -0.5 (color azul) se está en la fase de La Niña, presentados en la Figura 49.

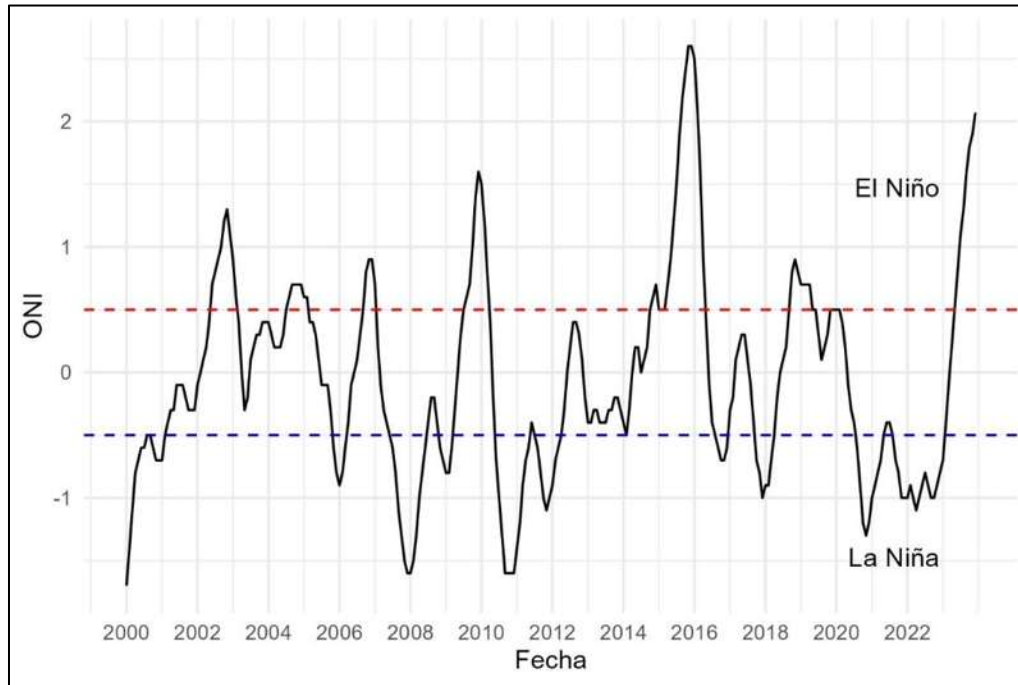


Figura 49. Fases del fenómeno El Niño y La Niña.

La Tabla 30 muestra la comparación entre la fecha la inundación y el fenómeno en cuestión y se determinó que el evento de 2015 es el único que se encuentra dentro de una de una fase, siendo esta la de El Niño.

Tabla 30. Comparación entre las Inundaciones y el índice ONI.

Fecha de inundación	Valor ONI	Fase
Septiembre 2003	0.3	Neutral
Septiembre 2005	-0.1	Neutral
Marzo 2015	0.5	El Niño
Octubre 2018	0.2	Neutral

Con los datos obtenidos, ahora podemos afirmar que el fenómeno del ENOS no tiene una influencia directa sobre las inundaciones extremas en la ciudad de Morelia. Sin embargo, es importante mencionar que el dato atípico relacionado con El Niño indica que en el centro y sur de México no se tiene claridad sobre los factores que lo provocan justo como lo mencionan los distintos autores.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Para poder realizar el cálculo de los periodos de retorno asociado a las precipitaciones máximas de cada una de las estaciones se hizo uso del software HidroEsta (Villón Bejar, 2005), el cual cuenta con funciones de distribución de probabilidad, para el caso de estudio se tomaron 4 distribuciones con el fin de poder hacer una comparación entre ellas y así realizar la selección de la que mejor ajusta, en la Tabla 31 se muestra el resultado del ajuste de las funciones de distribución comparándose con la prueba no paramétrica de smirnov kolmogorov (Villón Bejar, 2005), el delta de tablas para el caso de fue de 0.1886, por lo que los valores inferiores a este delta son los que tienen el mayor ajuste en los datos.

Tabla 31. Resultados de ajuste de las funciones de distribución de probabilidad, en rojo las funciones que no ajustaron.

Función de distribución	Estaciones Meteorológicas																	
	16016	16022	16055	16080	16081	16087	16091	16105	16109	16114	16120	16133	16136	16146	16155	16254		
						Resultado prueba de Smirnov Kolmogorov												
Funcion Normal	0.194	0.087	0.244	0.172	0.136	0.124	0.067	0.144	0.073	0.095	0.082	0.095	0.086	0.143	0.136	0.14		
LogNormal 2 parametros	0.133	0.07	0.168	0.136	0.099	0.069	0.078	0.073	0.079	0.082	0.078	0.051	0.077	0.077	0.196	0.115		
Gamma 2 parametros	0.156	0.078	0.194	0.152	0.111	0.074	0.065	0.096	0.062	0.075	0.071	0.065	0.086	0.091	0.178	0.123		
Gumbel	0.126	0.063	0.174	0.122	0.084	0.098	0.095	0.091	0.059	0.088	0.099	0.056	0.1	0.097	0.207	0.105		

Una vez seleccionada la función de distribución de probabilidad se procedió a calcular los periodos de retorno de lluvias extremas para 5, 10, 25 y 50 años que de acuerdo con (CONAGUA, 2017) son los periodos utilizados para el diseño de obras asociadas eventos pluviales, en la Tabla 32 se muestra precipitaciones máximas de las estaciones las cuales van desde los 48 mm para un T de 5 años y hasta los 138 mm para un T de 50 años.

Tabla 32. Lluvias máximas asociadas a cada periodo de retorno.

Estación	Precipitaciones en mm asociadas a los distintos periodos de retorno en años			
	5	10	25	50
16016	54.21	63.69	75.68	84.57
16022	52.87	60.66	70.5	77.8
16055	48.31	55.66	64.74	71.37
16080	58.02	67.14	78.66	87.2
16081	55.42	63.15	72.92	80.16
16087	60.31	71.68	86.16	97.04

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

16091	48.92	53.25	58.15	61.46
16105	52.86	60.17	69.08	75.53
16109	73.52	87.52	105.2	118.32
16114	59.67	70.61	84.44	94.7
16120	51.91	57.55	63.98	68.36
16133	71.9	83.54	98.02	108.68
16136	80	97.57	120.57	138.26
16146	62.03	75.09	92.07	105.01
16155	47.55	57.8	58.39	62
16254	49.81	59.62	72.03	81.23

Con las precipitaciones máximas de cada una de las estaciones se realizaron mapas de distribución de esas precipitaciones máximas con el fin de observar cómo se están comportando espacialmente, con esto se pueden ubicar las zonas con una probabilidad mayor de presentar una tormenta atípica en un N número de años.

En la Figura 50 se presenta la distribución de precipitaciones máximas asociadas a un periodo de retorno en 5 años para la zona de estudio en donde se puede apreciar que estas precipitaciones tienen mayor probabilidad de ocurrir en la zona sur, aguas arriba de la cuenca con precipitaciones de hasta 70 mm.

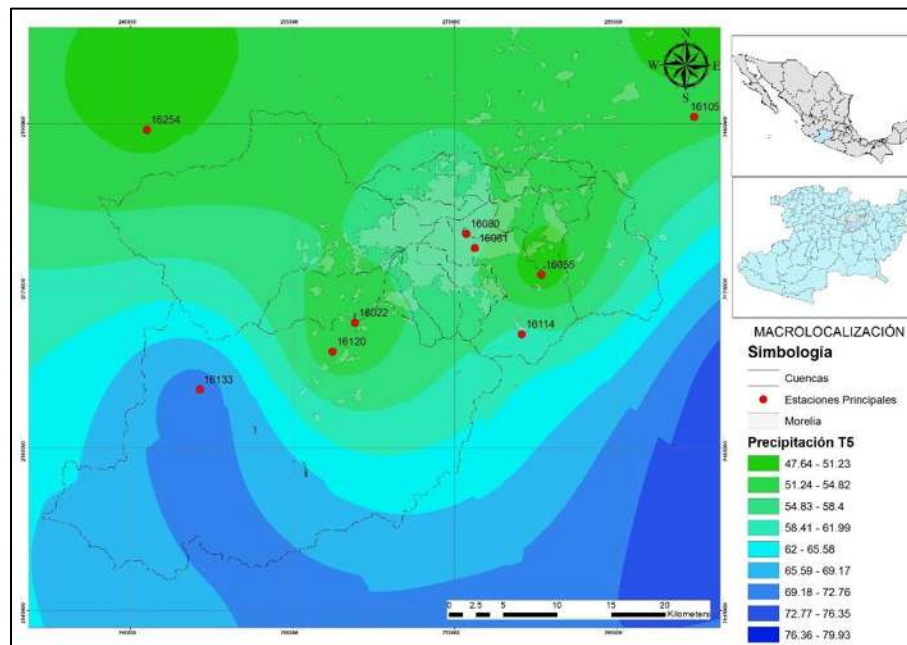


Figura 50. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 5 años.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

En el caso de la de la precipitación máxima asociada a un T de 10 años se mantienen la distribución que, en la primera, pero ahora las precipitaciones máximas tienen a estar más a las afueras de la cuenca en este caso van desde los 53 mm hasta los 97 mm (Figura 51).

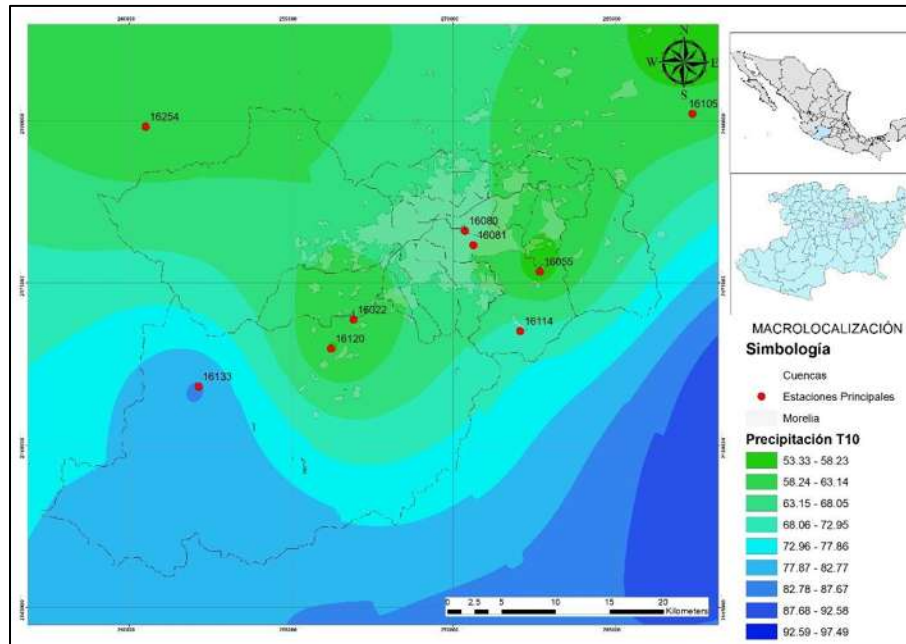


Figura 51. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 10 años.

En la Figura 52 se puede apreciar la misma tendencia en las precipitaciones máximas, lo que se aprecia es que una de las estaciones está teniendo un incremento aproximadamente de 20 mm por cada 5 años lo que hace que las curvas máximas estén tendían a aumentar hacia a esa zona, a diferencia de las precipitaciones máximas que se tienen en la ciudad de Morelia las cuales van a aumentando aproximadamente en 6mm por cada 5 años de periodo de retorno.

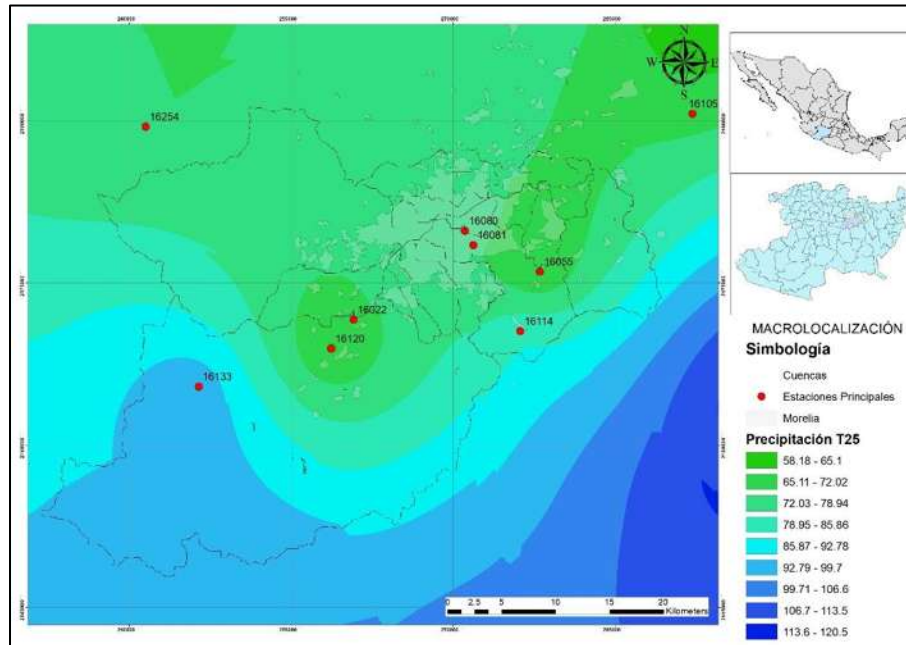


Figura 52. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 25 años.

Por último, se puede observar en la Figura 53 las precipitaciones máximas asociadas a un periodo de retorno de 50 años en donde las precipitaciones máximas ubicadas en la zona urbana de la ciudad de Morelia rondan los 70-78 mm de precipitación y en la zona suroeste las precipitaciones máximas llegan hasta los 138 mm.

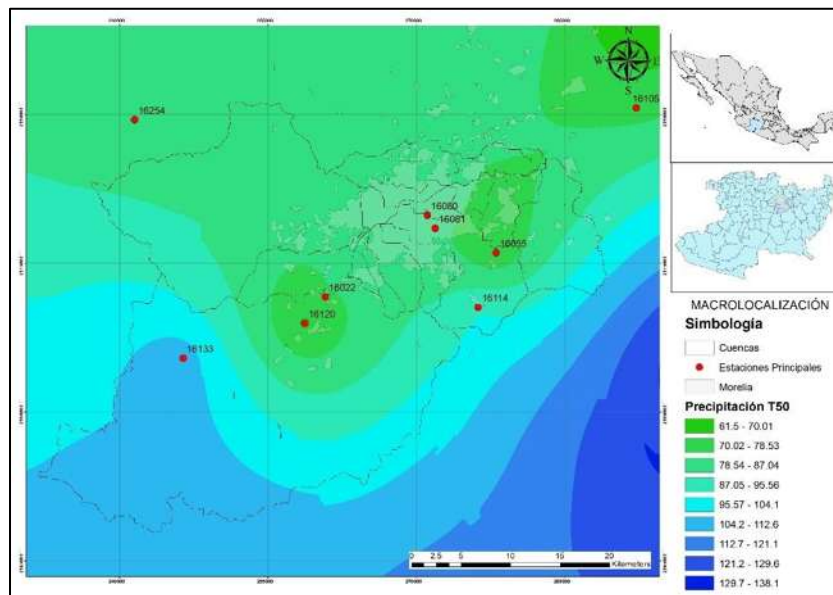


Figura 53. Distribución de precipitaciones máximas asociadas a un T de 50 años.



Realizando una comparación entre las inundaciones ocurridas en los años 2003, 2005 y 2015 se observó que las precipitaciones que dieron origen a estos eventos están asociadas a un periodo de retorno de entre 5 y 10 años para las inundaciones del 2003 y 2005, en el caso de la inundación del 2015 esta se asocia a inundaciones en un periodo de retorno de entre 25 y 50 años.

9.3.6 Descargas de la Presa Cointzio

Las presas son estructuras construidas para retener y gestionar el flujo de agua en ríos y embalses, desempeñando un papel crucial en el suministro de agua, generación de energía hidroeléctrica, riego y control de inundaciones. Sin embargo, las descargas de agua desde estas estructuras también pueden ser una causa significativa de inundaciones, especialmente cuando no se manejan adecuadamente.

En el caso de la zona de estudio se encuentra la Presa Cointzio ubicada en la cuenca del río Chiquito, a unos 14 kilómetros al suroeste de la ciudad de Morelia. Fue construida con el propósito principal de abastecer de agua potable a la ciudad de Morelia y sus alrededores. Además, la presa juega un papel importante en la regulación del caudal del río y en la prevención de inundaciones en la región.

De la página del Sistema de Información Hidrológica (SIH), (CONAGUA, 2023), se descargaron los datos del funcionamiento de la Presa Cointzio. En este análisis se examinaron las descargas de la presa desde 1996 hasta el 2024, las cuales se muestran en la Figura 54.

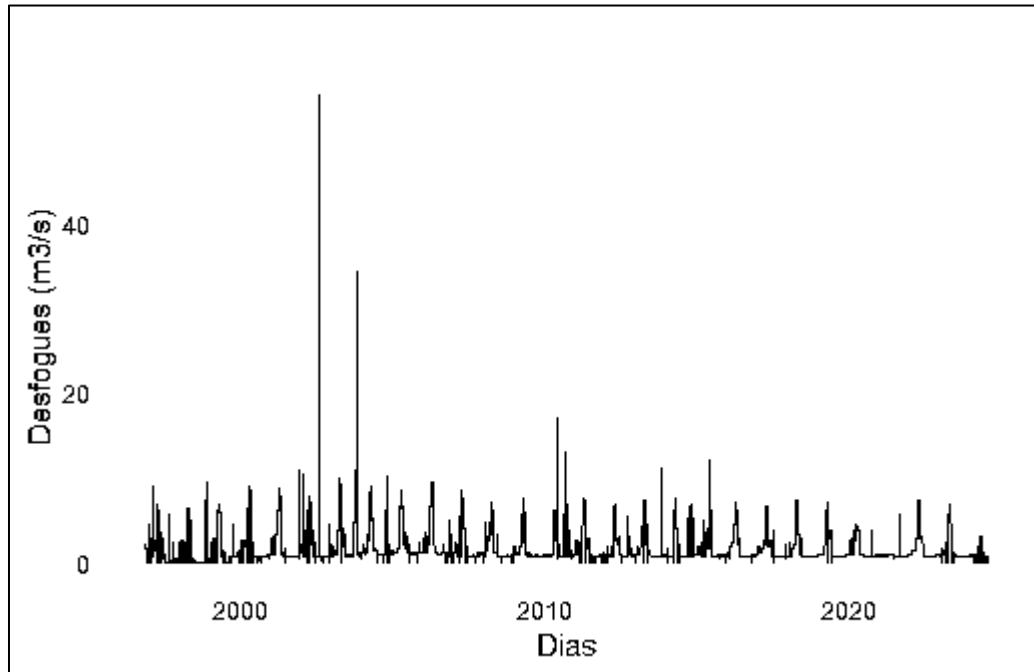


Figura 54. Desfogues de la Presa Cointzio (1996-2024).

En la Tabla 33 se puede observar que los meses en los que se tiene una mayor descarga es durante las temporadas de invierno y primavera, presentándose en abril el promedio máximo con $4.73 \text{ m}^3/\text{s}$, y agosto siendo el mes donde se tiene la menor descarga con $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 33. Descargas mensuales promedio de la Presa Cointzio.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio (m^3/s)	1.29	1.50	3.78	4.73	1.80	0.82	0.67	0.76	0.97	1.21	0.83	0.92

Al comparar las descargas de la presa durante las fechas de las inundaciones (ver Tabla 34), se observó que solo en la inundación ocurrida el 17 de septiembre de 2003 el caudal proveniente de la presa fue cinco veces mayor que el promedio para ese mes. En contraste, con los otros eventos de inundación, la descarga de la presa se mantuvo por debajo del promedio. Por lo tanto, podemos decir que, con la excepción de la inundación mencionada, las descargas de la presa no han sido un factor directamente detonante en

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

la ocurrencia de estas inundaciones pero que si juega un papel muy importante para el control de estas.

Tabla 34. Comparación de descargas promedio de la Presa Cointzio

Fecha de inundación	Caudales en m^3/s		
	Promedio/día	Promedio/mes	Mediana/mes
17 Septiembre 2003	4.99	0.97	0.63
01 Septiembre 2005	0.96	0.97	0.63
16 Marzo 2015	0.65	3.78	3.71
22 Octubre 2018	0.60	1.21	0.65

9.4 Obtención de series con cambio climático

Debido a que se pudo observar una tendencia en aumento del índice RX1day en la zona de estudio, se decidió utilizar la base de datos de Copernicus. Dentro de esta base de datos, seleccionamos los modelos del CMIP6 ya que estos proporcionan proyecciones detalladas del índice RX1day para diferentes regiones del mundo, en la Figura 55 se puede apreciar en color más oscuro las zonas que tendrán un aumento en este índice.

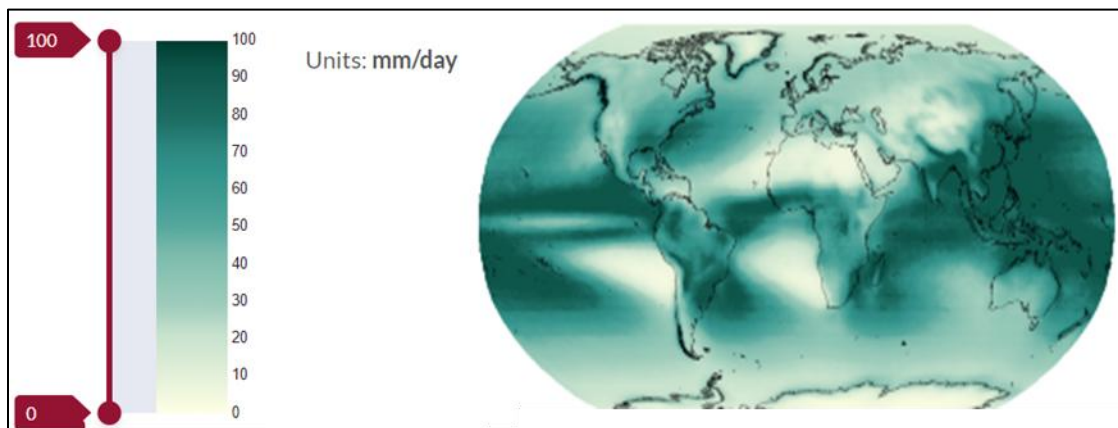


Figura 55. Proyección global del índice RX1day de acuerdo con CMIP6 (Copernicus, 2024).

De acuerdo con Figura 56 pudimos observar el comportamiento del índice RX1day a escala mensual, se observó que presenta un crecimiento en ciertos meses del año. En particular, se identificaron cuatro meses junio, julio, septiembre y octubre, donde el índice

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

muestra un incremento más pronunciado. Esta variación estacional resalta los períodos del año en los que los eventos de precipitación extrema tienden a ser más intensos.

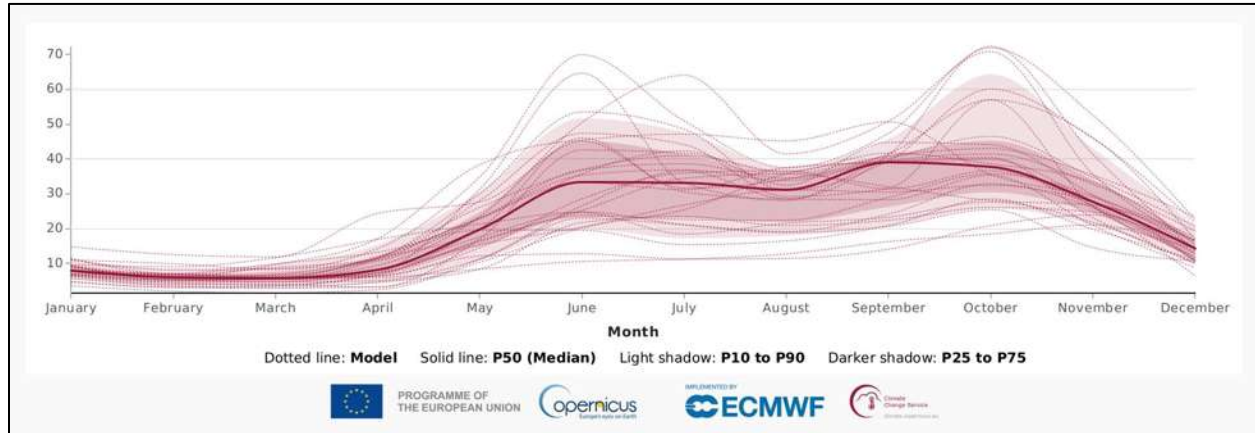


Figura 56. Concentración del RX1day mensual de acuerdo con CMIP6 (Copernicus, 2024).

Debido a que en los meses de junio, julio, septiembre y octubre es donde se presentan la mayor concentración de estos eventos se optó por escoger estos meses para generar los eventos con cambio climático, en la figura se muestran los 27 modelos con proyecciones del índice RX1day hasta el año 2100.

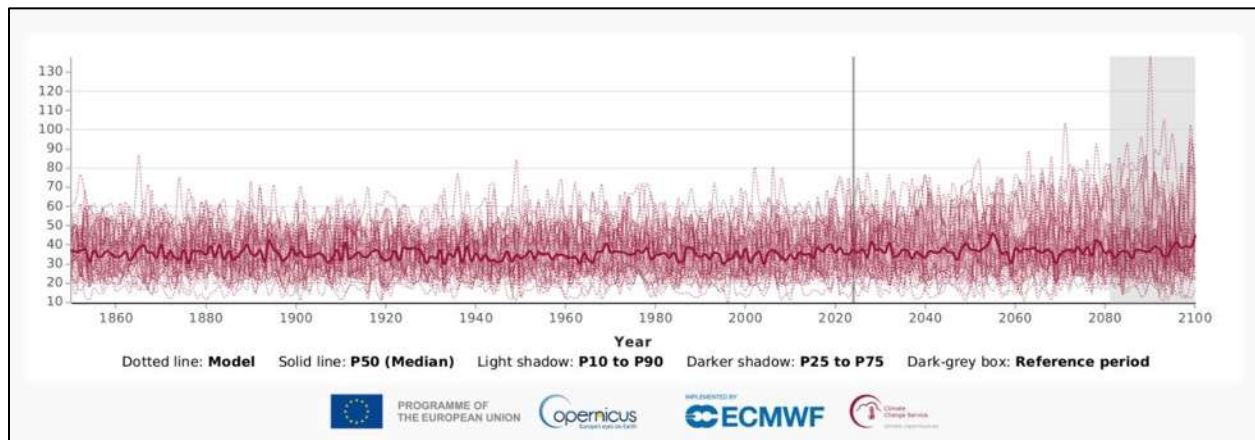


Figura 57. Proyecciones de cambio climático hasta el año 2100 (Copernicus, 2024).

Se realizó un análisis de correlación entre los datos de modelos de cambio climático y los datos de estaciones reales en un período de control de 30 años, que va de 1963 hasta 1993, con el objetivo de identificar cuáles modelos presentaban la mejor

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

correlación. Este análisis nos permitió determinar qué modelos eran más adecuados para representar la serie original de datos. Sin embargo, las correlaciones no fueron tan altas debido a que se trata de información a escala diaria, lo que complica que exista una correlación perfecta. En la Tabla 35 se muestran los resultados de correlación para el mes de octubre, donde los azules oscuros representan una mejor correlación y los amarillos una correlación más baja.

Tabla 35. Resultados de correlación para el mes de octubre.

Modelo	Estación															
	16016	16022	16055	16080	16081	16087	16091	16105	16109	16114	16120	16133	16136	16146	16155	16254
M1	-0.450	-0.189	-0.370	-0.084	-0.070	-0.123	-0.238	-0.293	-0.182	-0.063	-0.259	-0.169	-0.371	-0.012	-0.362	-0.312
M2	0.286	0.128	0.019	0.100	0.101	-0.023	0.186	0.036	0.140	-0.045	0.072	0.096	0.393	0.015	0.280	0.292
M3	-0.263	-0.131	-0.283	-0.126	-0.134	-0.115	-0.219	-0.062	-0.054	-0.122	-0.137	-0.027	-0.340	-0.086	-0.032	-0.053
M4	-0.128	0.124	0.096	-0.031	-0.052	0.061	0.143	0.091	-0.093	0.223	0.032	-0.063	-0.346	0.054	0.040	0.205
M5	0.055	-0.015	0.084	0.297	0.317	0.383	0.405	0.046	0.255	0.228	0.122	0.158	0.458	0.125	0.136	-0.049
M6	0.326	0.025	-0.181	0.038	0.042	-0.196	-0.034	-0.138	-0.090	-0.146	-0.045	-0.293	-0.019	-0.197	-0.071	-0.044
M7	0.109	-0.144	-0.168	-0.324	-0.337	-0.107	-0.014	-0.162	-0.161	-0.112	-0.135	0.121	-0.016	0.070	0.087	0.059
M8	0.139	-0.205	-0.115	0.063	0.070	-0.222	0.044	-0.094	-0.024	-0.140	-0.129	-0.432	0.298	-0.452	-0.305	0.001
M9	-0.238	-0.146	-0.195	-0.237	-0.227	-0.210	-0.039	-0.203	-0.020	-0.197	-0.199	-0.192	0.221	-0.295	-0.243	-0.108
M10	-0.005	-0.231	-0.190	0.163	0.158	-0.002	-0.309	-0.111	0.032	-0.127	-0.143	-0.096	0.068	-0.044	-0.100	-0.202
M11	0.130	0.170	0.168	0.273	0.257	0.020	-0.043	0.061	0.004	0.094	0.012	-0.069	-0.312	-0.007	0.028	0.272
M12	-0.300	0.004	-0.210	-0.031	-0.015	-0.064	0.010	0.019	0.246	-0.146	0.100	0.017	0.121	-0.050	-0.278	-0.373
M13	0.146	0.441	0.131	0.433	0.437	0.432	0.333	0.192	0.256	0.210	0.486	0.522	0.284	0.476	0.335	0.042
M14	0.059	-0.178	-0.227	-0.019	-0.002	-0.142	-0.065	-0.107	-0.323	-0.154	-0.198	-0.113	0.082	-0.143	-0.210	-0.098
M15	0.295	0.283	0.135	0.431	0.447	0.111	0.149	0.168	0.194	0.126	0.233	0.224	0.025	0.291	0.248	-0.149
M16	-0.267	0.060	-0.067	0.031	0.040	-0.115	-0.173	-0.030	0.194	-0.036	-0.022	0.103	-0.102	-0.045	-0.074	-0.141
M17	-0.027	0.174	0.111	0.191	0.199	0.136	0.161	0.162	0.196	0.419	0.020	-0.115	0.059	0.183	0.017	0.235
M18	-0.140	-0.292	-0.324	-0.170	-0.158	-0.170	-0.072	-0.097	-0.196	0.030	-0.387	-0.009	-0.215	-0.083	-0.025	-0.254
M19	0.172	0.040	0.183	0.109	0.114	0.181	-0.097	-0.072	-0.183	0.126	0.016	0.180	-0.138	0.187	0.281	-0.031
M20	-0.067	0.009	0.024	-0.012	-0.027	-0.110	-0.010	0.253	-0.083	0.136	-0.050	0.035	0.112	0.006	-0.074	0.159
M21	-0.135	0.096	0.121	0.381	0.388	0.215	0.155	0.164	-0.012	0.444	-0.081	0.060	-0.236	0.167	0.087	-0.046
M22	-0.103	-0.144	-0.487	-0.289	-0.300	-0.084	-0.184	-0.251	-0.149	-0.235	-0.094	0.040	-0.189	-0.030	-0.041	0.060
M23	-0.317	-0.276	-0.518	-0.284	-0.274	-0.181	-0.108	-0.189	-0.121	-0.333	-0.151	-0.179	0.146	-0.212	-0.429	-0.307
M24	0.102	0.053	0.110	0.204	0.190	0.188	0.095	0.195	0.233	0.078	0.026	0.273	0.134	0.272	0.188	0.211
M25	-0.065	0.192	0.062	0.169	0.160	0.337	0.173	0.279	0.057	0.234	0.296	0.144	-0.002	0.254	0.169	0.111
M26	-0.128	0.212	-0.055	0.263	0.257	0.022	0.090	0.035	0.139	0.055	0.124	0.086	-0.073	-0.050	-0.159	0.073
M27	0.141	0.436	0.198	0.219	0.208	0.559	0.412	0.196	0.602	0.288	0.515	0.474	0.098	0.520	0.504	0.462
M28	-0.135	0.058	-0.416	0.309	0.314	0.060	0.083	-0.011	0.083	0.089	-0.046	0.106	-0.004	0.083	-0.037	-0.014

Una vez seleccionado el modelo con la mejor correlación, se procedió a realizar la corrección del sesgo. Este paso fue fundamental para ajustar la serie proyectada de cambio climático a la serie original de datos observados. La corrección del sesgo permite mejorar la precisión de las proyecciones, asegurando que las características estadísticas de las series proyectadas sean consistentes con las de las series históricas. De esta manera, se logra una mejor representación de las condiciones climáticas futuras. En la Tabla 36 se muestra los valores del RX1day para el mes de octubre para un periodo cercano, medio y largo.

Tabla 36. Proyecciones máximas del índice RX1day para los distintos periodos.

Modelo	Estación	Periodo (años)		
		Cercano (2021- 2040)	Medio (2041- 2060)	Largo (2081- 2100)



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

M6	16016	48.738	45.726	69.228
M13	16022	43.053	53.203	77.484
M27	16055	50.279	54.438	50.924
M13	16080	50.365	62.239	90.645
M15	16081	58.272	51.497	42.460
M27	16087	56.626	61.310	57.353
M27	16091	55.443	60.030	56.155
M25	16105	45.884	52.806	52.225
M27	16109	80.957	87.654	81.996
M21	16114	63.194	58.888	53.019
M27	16120	58.879	63.750	59.635
M13	16133	63.305	78.230	113.933
M5	16136	51.523	68.343	86.868
M27	16146	58.203	63.017	58.950
M27	16155	56.342	61.003	57.065
M27	16254	43.905	47.537	34.241

9.4.1 Comparación del CMIP5 contra el CMIP6

Con el fin de determinar la diferencia que existe entre cada uno de los modelos acoplados del CMIP5 que utiliza las trayectorias del AR5 (RCP) y el CMIP6 que incorpora las del AR6 (SSP) se realizó una comparativa de los datos proyectados para la zona de estudio. El escenario SSP2-4.5 del CMIP6 podría ser un mundo en el que se logran algunos avances importantes en la mitigación del cambio climático, pero no a la velocidad necesaria para evitar un calentamiento de entre 2.5°C y 3°C para finales de siglo. Las políticas climáticas actuales, aunque muestran progreso en áreas como las energías renovables, la electrificación del transporte y la inversión en tecnologías limpias, aún no son lo suficientemente ambiciosos o equitativos para cumplir con los objetivos más estrictos del Acuerdo de París. Factores como la dependencia continua de los combustibles fósiles, la desigualdad en la acción climática y las crisis geopolíticas hacen que el escenario SSP2-4.5 sea el más probable en nuestro futuro cercano.

Por lo anterior mencionado se tomó decisión de comparar ambos modelos en este escenario. El primer paso fue compararlos de manera estacional, Las proyecciones de precipitación máxima diaria acumulada muestran diferencias importantes entre CMIP5 (Figura 58) y CMIP6 (Figura 59). En CMIP6, los valores máximos proyectados (P50)

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

parecen ser más altos en comparación con CMIP5, lo que sugiere un incremento en la intensidad de los eventos extremos. Aunque ambos conjuntos de modelos presentan patrones similares en la distribución estacional, con picos en meses específicos, las proyecciones de CMIP6 tienden a mostrar un rango de incertidumbre más amplio, indicando mayor variabilidad entre modelos. Además, el cambio en los escenarios utilizados (RCP4.5 en CMIP5 y SSP2-4.5 en CMIP6) podría influir en estas diferencias. En general, las proyecciones de CMIP6 parecen resaltar un aumento más marcado en los eventos de precipitación extrema, reflejando una tendencia más alarmante en el contexto del cambio climático.

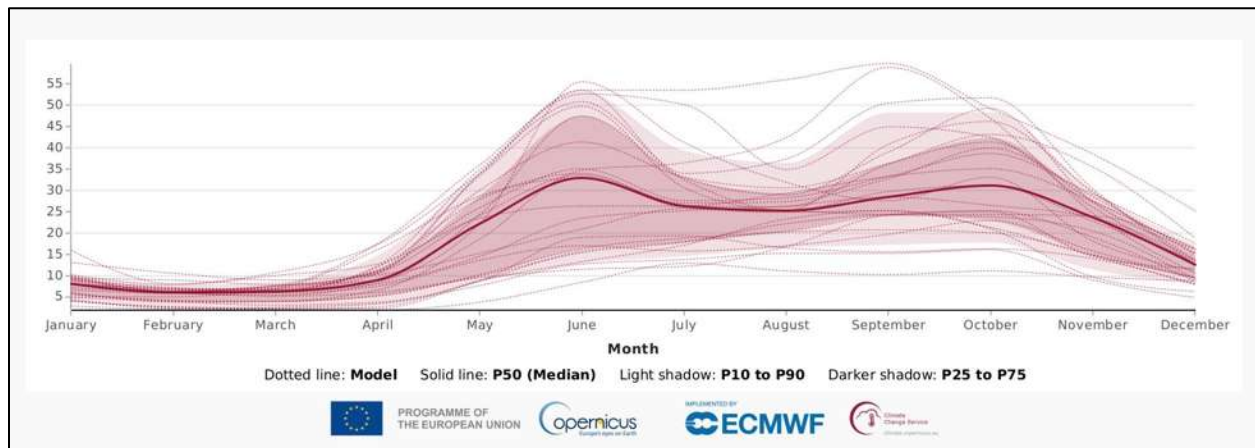


Figura 58. Concentración del RX1day mensual de acuerdo con CMIP5 RCP 4.5 (Copernicus, 2024).

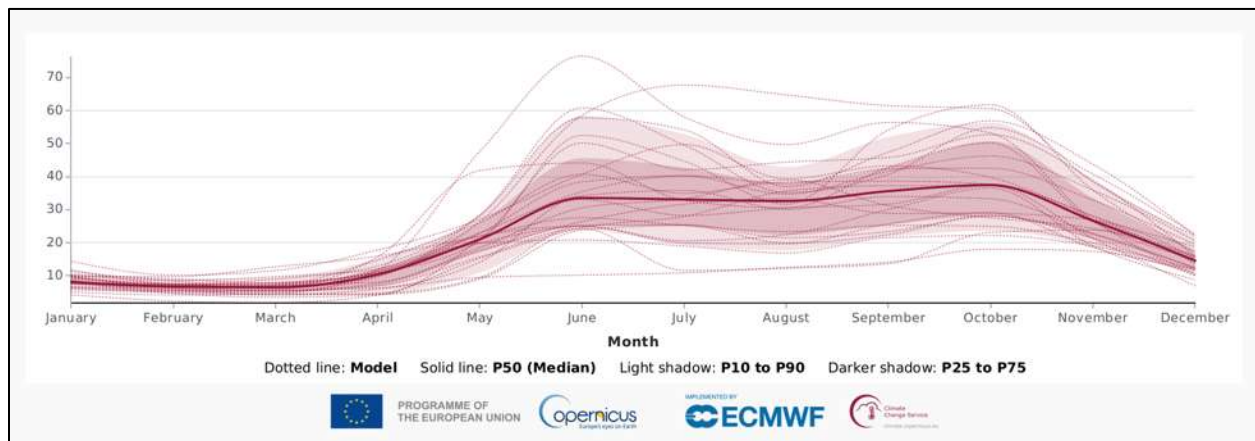


Figura 59. Concentración del RX1day mensual de acuerdo con CMIP6 SSP2-4.5 (Copernicus, 2024).

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Se decidió comparar ambos modelos en el mes de septiembre, ya que es uno de los meses en los que en ambas graficas estacionales se puede observar un aumento en las precipitaciones, aunque ambos presentan una estructura similar la variabilidad en los modelos individuales y la amplitud de la incertidumbre (P10-P90) parecen mayores en CMIP5 (Figura 60), mientras que CMIP6 (Figura 61) muestra proyecciones más controladas o menos dispersas. Además, aunque ambas medianas sugieren un incremento en la precipitación máxima hacia el futuro, las diferencias en la magnitud proyectada y la reducción de incertidumbre en CMIP6 podrían deberse a la incorporación de factores socioeconómicos más detallados en SSP2-4.5. Esto refleja cómo los avances en los modelos climáticos y socioeconómicos han refinado las proyecciones para evaluar mejor los impactos del cambio climático.

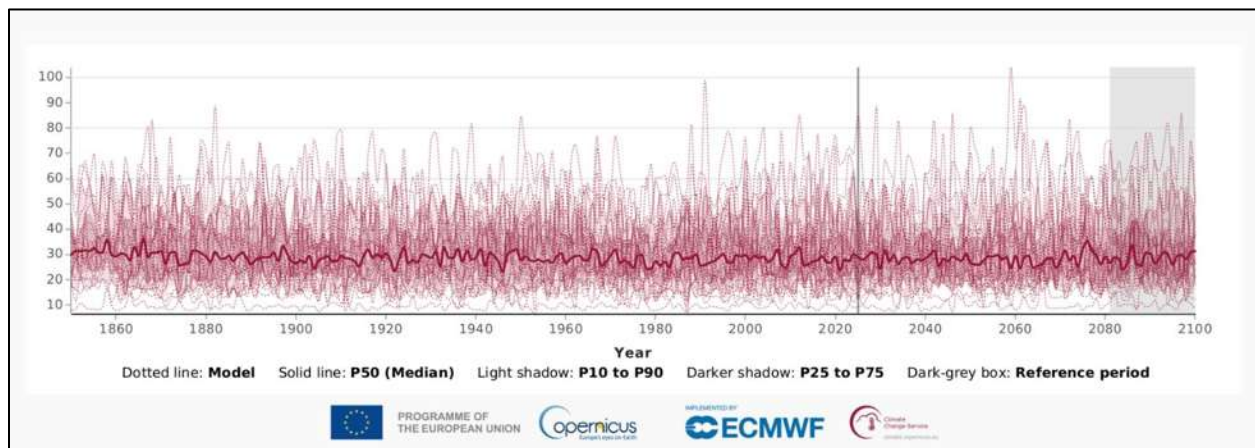


Figura 60. Proyecciones de cambio climático hasta el año 2100 CMIP5 RCP 4.5 (Copernicus, 2024).

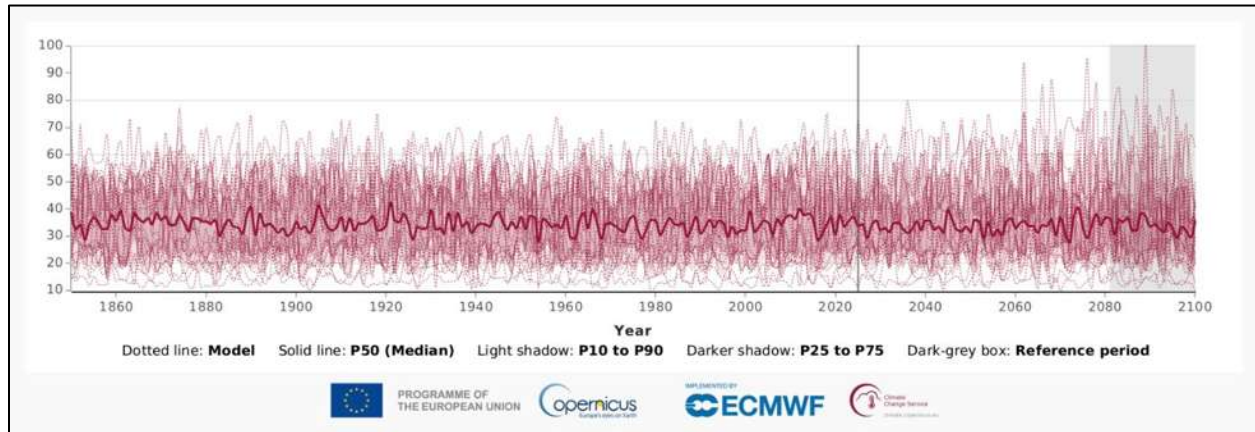


Figura 61. Proyecciones de cambio climático hasta el año 2100 CMIP6 SSP2-4.5 (Copernicus, 2024).

Finalmente, se calcularon las series de precipitación máxima para ambos escenarios siguiendo el proceso previamente descrito, y se elaboraron diagramas de cajas y bigotes. Como ejemplo, se presenta el análisis del mes de octubre, el cual evidencia que la incertidumbre en el modelo CMIP5 (Figura 62) es mayor en comparación con CMIP6 (Figura 63). Esto se refleja en la gran cantidad de valores atípicos presentes en los datos de CMIP5 en todos los meses, contrastándose con la menor dispersión observada en CMIP6.

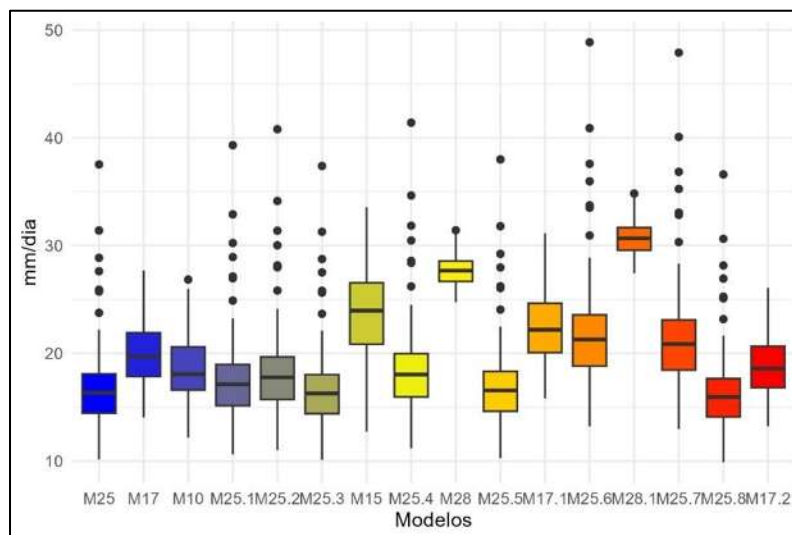


Figura 62. Diagramas de cajas y bigotes sobre las series de cambio climático obtenidas por CMIP5 en el mes de octubre.

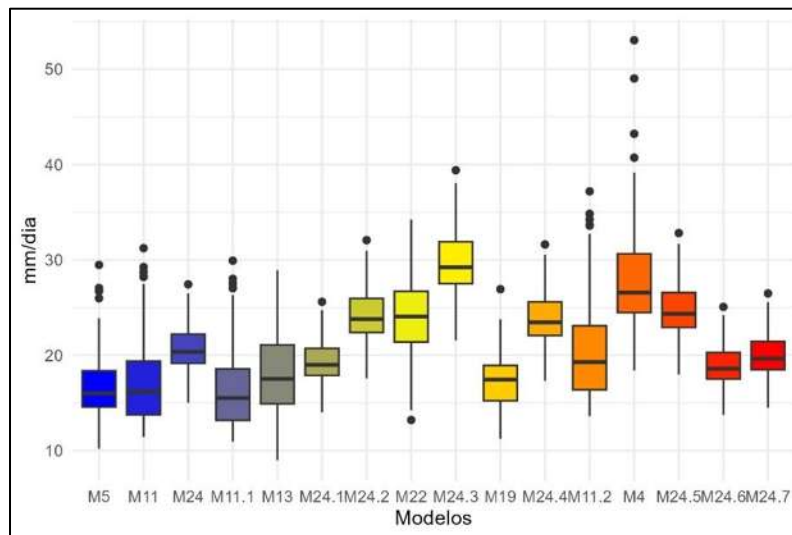


Figura 63. Diagramas de cajas y bigotes sobre las series de cambio climático obtenidas por CMIP6 en el mes de octubre.

9.5 Modelo TETIS

El modelo TETIS requiere parámetros que reflejen la variabilidad espacial de las características del suelo, el sustrato y la cobertura vegetal de la cuenca. Para determinar estos parámetros, se elaboran mapas basados en la información medioambiental disponible. Estos mapas deben ser coherentes con la topografía, el uso del suelo, la cobertura vegetal y otras características físicas del entorno de la cuenca. Para la generación de este modelo se seleccionó la cuenca de Santiago Undameo, que se encuentra aguas arriba de la presa de Cointzio, ya que es una de las que se encuentra menos antropizada.

9.5.1 Mapa de elevación digital del terreno

Se descargó información del terreno utilizando el visualizador GMTED View del USGS (USGS, 2024), se seleccionó el ráster con una resolución de 7.5 arcos de segundo, que proporciona una cobertura detallada de la elevación de la zona de estudio de 250m x 250m. Este nivel de resolución es adecuado para el buen funcionamiento del modelo ya que al trabajar con muy altas resoluciones este puede llegar a tener problemas en el

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

tiempo del modelado, ya que el modelo TETIS trabaja con archivos en forma de matrices los siguientes mapas se determinaron a la misma resolución, en la Figura 64 se muestra el MDE de la cuenca Santiago Undameo donde los colores más oscuros representan las partes más altas de la cuenca y las claras son principalmente donde se encuentra la zona de cultivo.

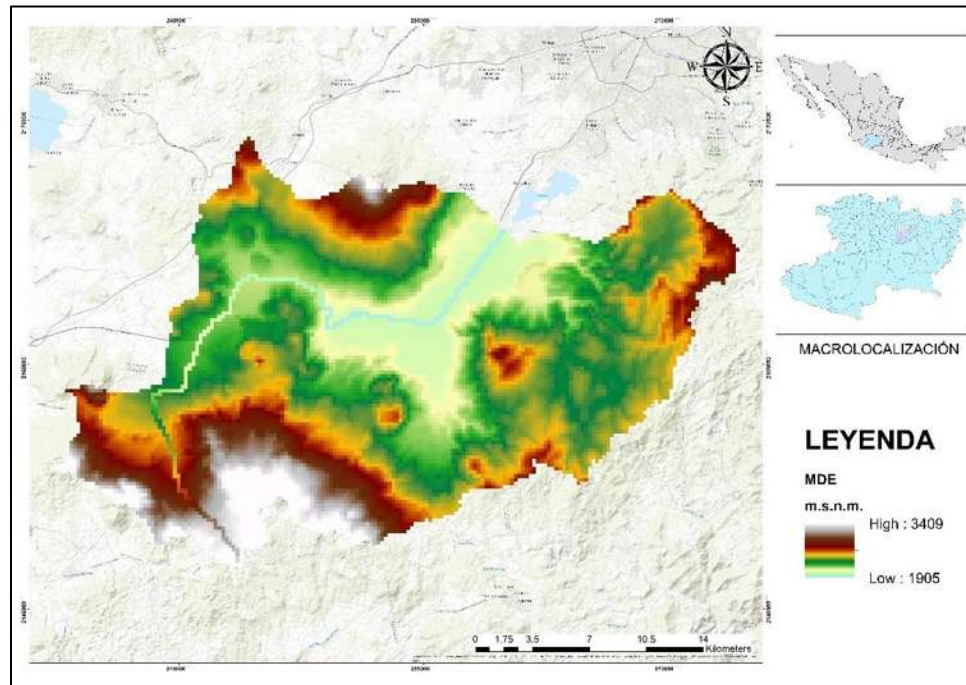


Figura 64. Mapa del modelo digital de elevación de la cuenca Santiago Undameo.

9.5.2 Mapa de dirección del flujo

La Figura 65 muestra el mapa de dirección del flujo el cual es una representación cartográfica que muestra las direcciones en las que el agua se mueve sobre la superficie terrestre. Utilizando datos de elevación, este mapa ilustra cómo el agua fluye desde áreas elevadas hacia áreas más bajas, facilitando la comprensión de patrones de escorrentía y drenaje en un terreno.

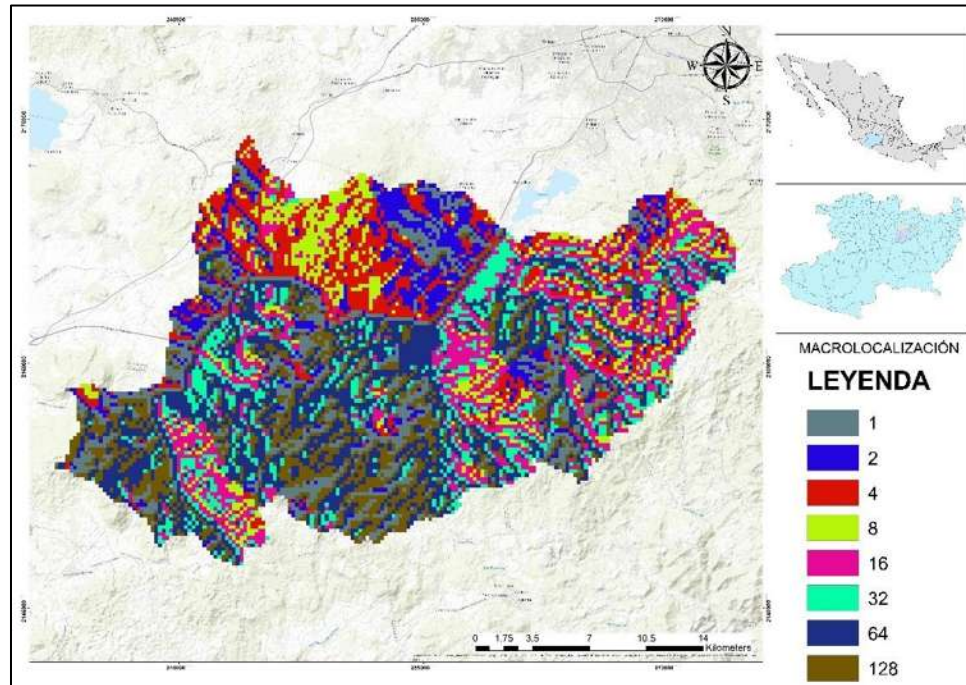


Figura 65. Direcciones del flujo de la cuenca Santiago Undameo.

9.5.3 Mapa de celdas acumuladas

La Figura 66 muestra el mapa de celdas drenantes acumuladas en el cual se puede observar la cantidad total de celdas que contribuyen al drenaje a través de cada celda en el ráster. En otras palabras, cada celda en este mapa tiene un valor que representa el número total de celdas que drenan hacia ella. Para calcular este mapa, se utiliza el mapa de dirección del flujo, que indica cómo el agua se desplaza desde cada celda hacia las celdas adyacentes.

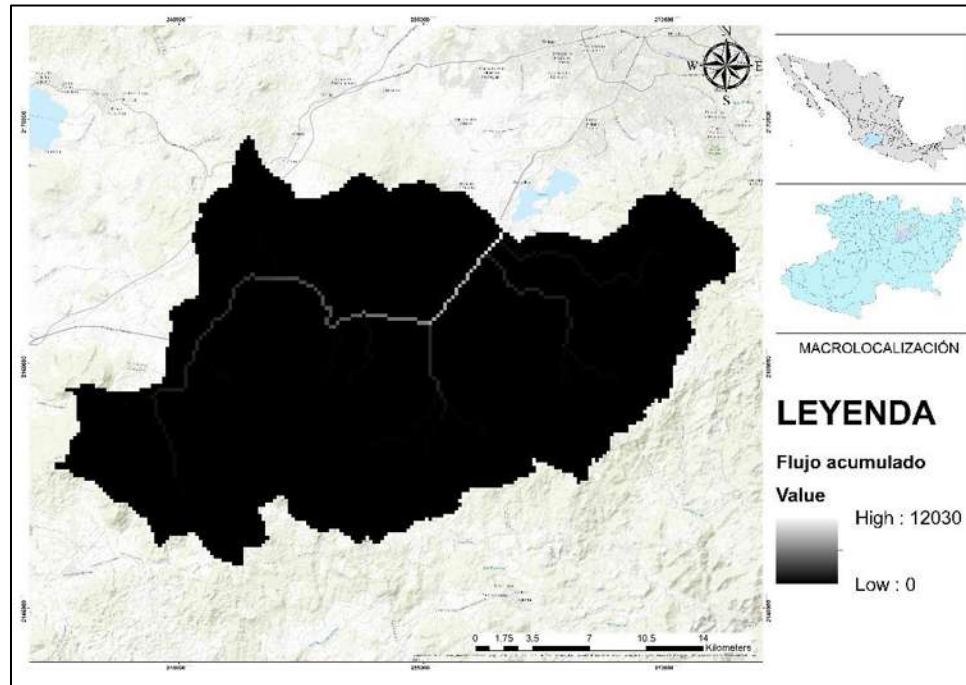


Figura 66. Mapa de celdas acumuladas de la cuenca Santiago Undameo

9.5.4 Mapa de pendientes

Utilizando datos de elevación, se generó un mapa de pendientes (ver Figura 67) indica el grado de inclinación de la superficie terrestre en cada celda del ráster, expresado generalmente en grados o porcentajes. Las pendientes se calculan a partir de las diferencias de elevación entre celdas adyacentes, revelando áreas de terreno inclinado o plano. Para el caso del modelo TETIS, es necesario que el mapa de pendientes esté en unidades de metros por metro (m/m).

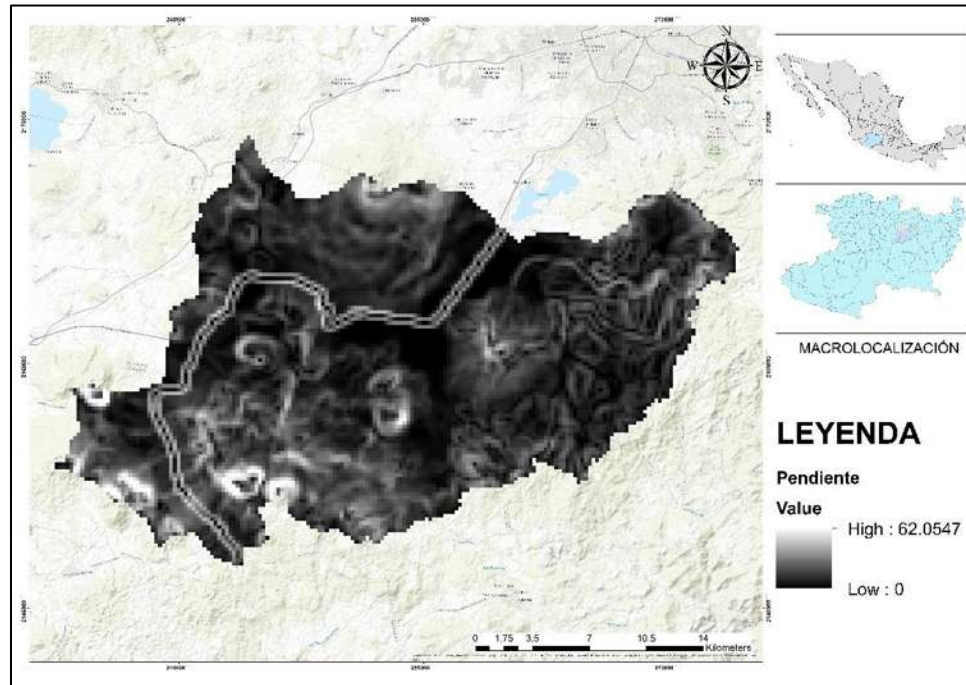


Figura 67. Mapa de pendientes de la cuenca Santiago Undameo.

9.5.5 Mapa de velocidad en ladera

En este caso la velocidad del flujo en laderas se considera como estacionaria, aunque varía en función de la pendiente del terreno. Para calcular esta velocidad, se utiliza una la Ecuación [31] que toma en cuenta la inclinación de la pendiente, reflejando cómo la topografía influye en el movimiento del agua. La fórmula empleada permite ajustar la velocidad del flujo en función de las características del terreno, garantizando que el modelo represente con precisión las dinámicas hidrológicas en diferentes tipos de pendientes ver Figura 68.

$$v = 1.414 * \sqrt{\text{pendiente} \left(\frac{m}{m} \right)} \quad [31]$$

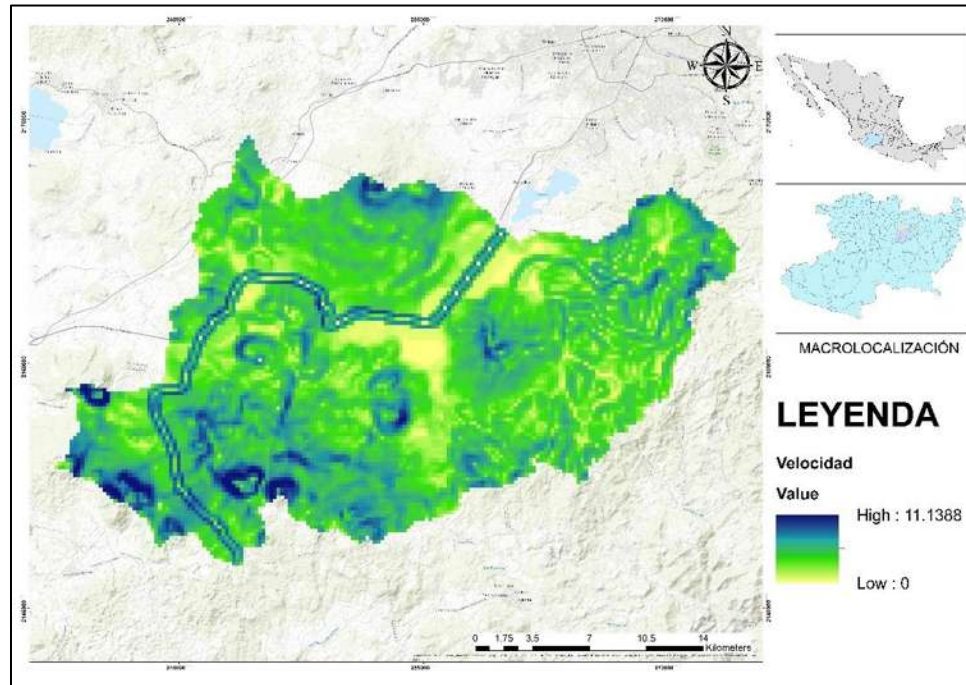


Figura 68. Mapa de la velocidad del flujo en ladera.

9.5.6 Mapas derivados del uso de suelo

9.5.6.1 Mapa de cobertura de suelo

Del mapa de uso de suelo realizado con anterioridad, se realizó un recorte para la cuenca de Santiago Undameo, este fue rasterizado y resampleado a la resolución de 250m x 250m (ver Figura 69), se reclasificó el mapa en un total de 11 usos de suelo los cuales incluyen los principales cultivos que se tienen en la zona (ver Tabla 37)

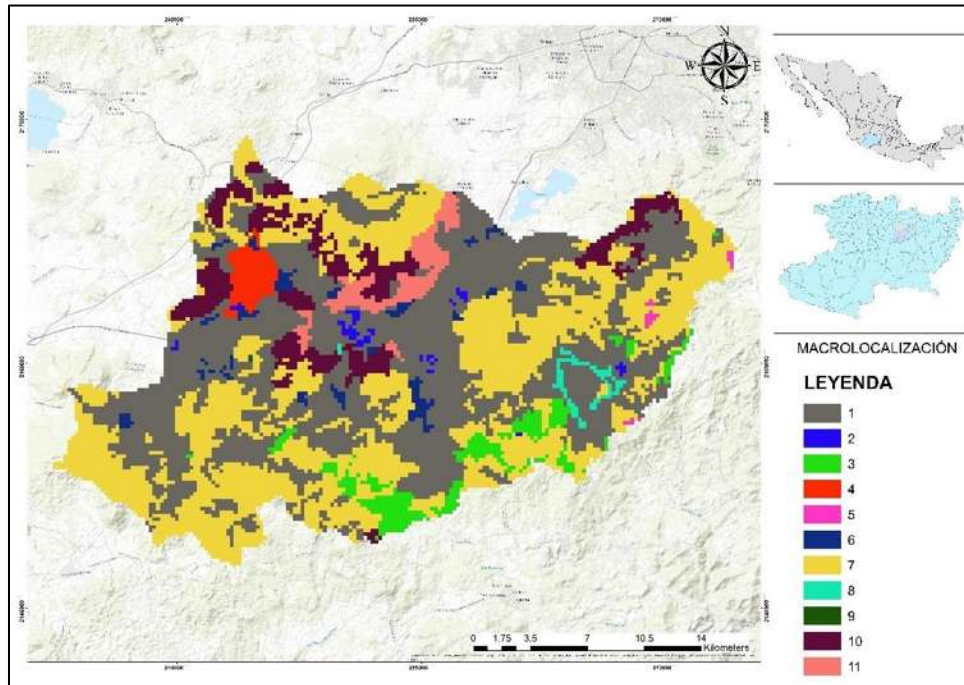


Figura 69. Mapa de usos de suelo, Santiago Undameo.

Tabla 37. Clasificación de los distintos usos de suelo.

Id	Categoría
1	Maiz
2	Jitomate y Avena
3	Aguacate
4	Fresa
5	Mango
6	Asentamientos humanos
7	Bosque
8	Cuerpo de agua
9	Desprovisto de vegetación
10	Pastizal inducido
11	Vegetación caducifolia

9.5.6.2 Factor de vegetación

El factor de vegetación mide la contribución del cultivo a sus necesidades hídricas, considerando el tipo de cultivo, su desarrollo y las condiciones climáticas. Para calcular este factor, se emplea la metodología definida por la FAO, que se centra en determinar la duración de las cuatro fases de desarrollo del cultivo, como se ilustra en la Figura 70. Este factor es crucial para ajustar las demandas hídricas en el modelo, y se incluirá en el modelo en formato de texto para garantizar una representación precisa de las necesidades del cultivo a lo largo de su ciclo de crecimiento.

- Fase Inicial: Dura desde la siembra hasta que el cultivo alcanza un 10% de cobertura del suelo con hojas.
- Fase de Desarrollo del Cultivo: Comienza al final de la fase inicial y se extiende hasta que el cultivo cubre el 70-80% del suelo.
- Fase Media: Se prolonga hasta el inicio de la maduración del cultivo.
- Fase Final: Va desde el comienzo de la maduración hasta la recolección del cultivo.

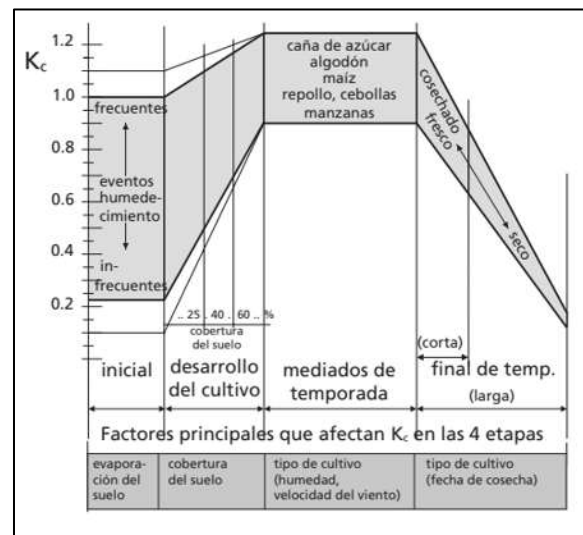


Figura 70. Rangos típicos del valor k_c para las cuatro etapas del crecimiento FAO (1998).

Michoacán se caracteriza por ser un estado con una gran diversidad agrícola y forestal. En particular, la región de Santiago Undameo destaca por su producción de diversos

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

cultivos, entre los cuales se encuentran el maíz, jitomate, avena, mango, aguacate y fresas. Esta zona no solo se beneficia de su riqueza agrícola, sino que también cuenta con extensos bosques que incluyen diferentes tipos de pino y encino en la Tabla 38 se muestra la duración de las etapas de desarrollo de los principales cultivos de la cuenca.

Tabla 38. Duración de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos en la cuenca de Santiago Undameo.

Período del cultivo	Jitomate		Avena		Maíz		Aguacate		Fresa		Mango	
	Longitud (días)	Kc	Longitud (días)	Kc	Longitud (días)	Kc	Longitud (días)	Kc	Longitud (días)	Kc	Longitud (días)	Kc
Inicial	35	0.6	20	0.3	30	0.7	20	0.6	20	0.4	60	0.75
Desarrollo	40	Crecimiento	25	Crecimiento	40	Crecimiento	70	Crecimiento	50	Crecimiento	90	Crecimiento
Mediados de temporada	50	1.15	60	1.15	50	1.15	120	0.85	90	0.85	120	0.7
Final de temporada	30	0.8	30	0.25	30	0.3	60	0.75	20	0.75	95	0.7
Total	155		135		150		270		180		365	
Fecha de siembra	Abril/Mayo		Marzo		Abril		Marzo		Marzo			

Con las distintas etapas de crecimiento de los cultivos se generó la distribución mensual del Kc en donde se puede apreciar que la mayor necesidad hídrica de las plantas se encuentra dentro de los meses de abril a septiembre los cuales se muestran en la Figura 71.

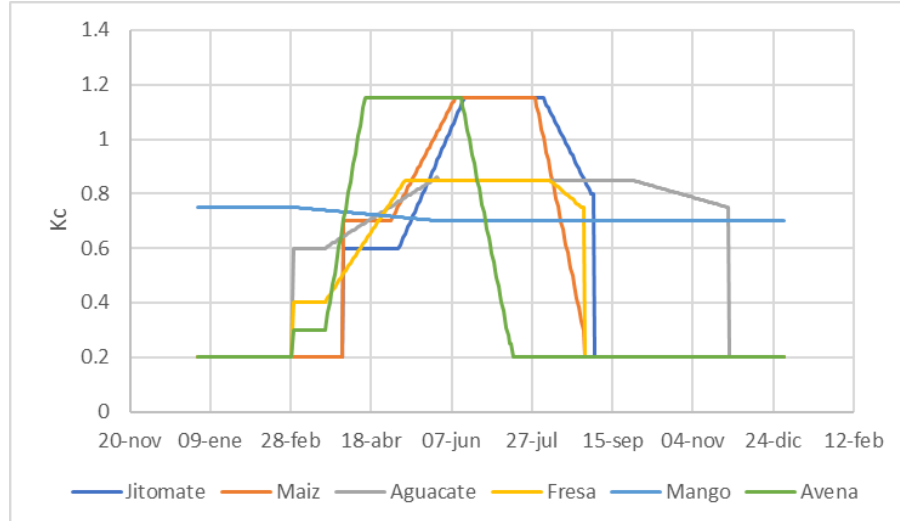


Figura 71. Distribución mensual de los factores de vegetación de los cultivos en la cuenca de Santiago Undameo.

En la Tabla 39 se muestra el resumen de los valores de Kc mensuales para todos los usos de suelo presentes en la cuenca, en el caso del jitomate y avena estos se promediaron entre si ya que comparten espacio en los mismos pixeles.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 39. Resumen del factor de vegetación para la cuenca de Santiago Undameo.

Categorías	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Maíz	0.20	0.20	0.20	0.70	0.88	1.14	1.15	0.64	0.20	0.20	0.20	0.20
Jitomate y Avena	0.20	0.20	0.29	0.82	0.95	1.05	0.72	0.60	0.23	0.20	0.20	0.20
Aguacate	0.20	0.20	0.61	0.70	0.81	0.85	0.85	0.85	0.85	0.82	0.69	0.20
Fresa	0.20	0.20	0.42	0.64	0.84	0.85	0.85	0.75	0.20	0.20	0.20	0.20
Mango	0.75	0.75	0.74	0.72	0.71	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Asentamientos humanos	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Bosque	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cuerpo de agua	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Desprovisto de vegetación	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Pastizal inducido	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Vegetación caducifolia	0.60	0.60	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	0.60

9.5.6.3 Intercepción

La intercepción se refiere a la cantidad de agua retenida por objetos y/o vegetación durante una precipitación, que luego se evapora directamente sin alcanzar el suelo. Para determinar la intercepción, se utilizó el mapa de usos de suelo, reclasificándolo con valores obtenidos de estudios previos. Este parámetro se introducirá en el modelo TETIS mediante un fichero de texto, junto con el factor de evapotranspiración ET.

9.5.6.4 Almacenamiento superficial

El almacenamiento superficial es la suma del almacenamiento en charcos y el almacenamiento por pendiente, para su cálculo se utilizó el mapa de usos de suelos y el MDE respectivamente haciendo uso de la Ecuación [32].

$$\text{Almacenamiento debido a la pendiente (mm)} = 10 - 1.3 * \text{pendiente} \left(\frac{m}{m} \right); \text{pendiente} < 0.075 \left(\frac{m}{m} \right) \quad [32]$$

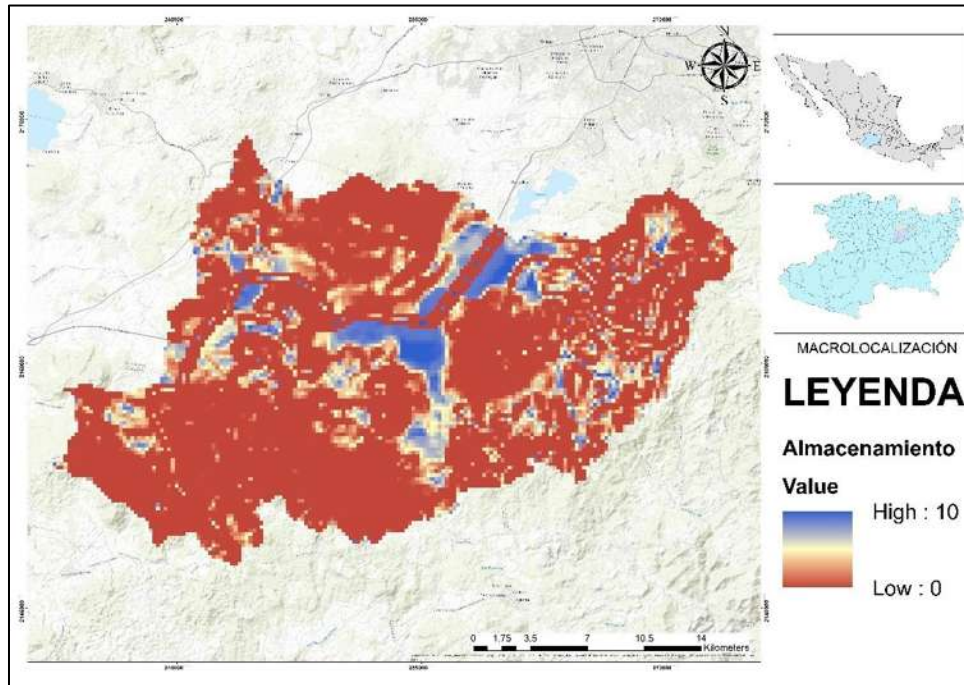


Figura 72. Mapa del almacenamiento superficial, Santiago Undameo.

9.5.6.5 Profundidad de las raíces

la profundidad de las raíces se refiere a la extensión vertical del sistema radicular de las plantas dentro del suelo. Este parámetro influye directamente en la capacidad de las plantas para acceder al agua y almacenada en el suelo, para la determinación de este parámetro se utilizó bibliografía de estudios anteriores.

Tabla 40. Valores de profundidad de raíces, almacenamiento en charcos e intercepción.

Categoría	Raíces (m)	Almacenamiento charco (mm)	Intercepción (mm)
Maiz	0.8	6	1
Jitomate y Avena	0.75	6	1
Aguacate	1.5	6	1
Fresa	0.5	6	1
Mango	1.5	6	1
Asentamientos humanos	0.06	0	0
Bosque	1.25	4	9



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Cuerpo de agua	0	0	0
Desprovisto de vegetación	0.02	0	0
Pastizal inducido	0.6	6	3
Vegetación caducifolia	0.7	5	5

9.5.7 Parámetros hidráulicos del terreno

9.5.7.1 Mapa de capacidad de almacenamiento hídrico del suelo

El almacenamiento hídrico del suelo (H_u), es la suma del almacenamiento superficial (charcos + pendiente) y el contenido de agua en el suelo, para este último se utilizó el mapa de profundidad de raíces y el obstáculo de raíces (ROO) como se muestra en la Ecuación [33]. El mapa de capacidad de almacenamiento hídrico del suelo H_u se observa en la Figura 73.

$$H_u = Alm_{sup} + At * \min(\text{prof. raíces}; ROO) \quad [33]$$

Donde:

Alm = Almacenamiento superficial (mm)

At = Contenido de agua disponible en el suelo (mm/m)

PR = Profundidad de las raíces sin obstáculos (m)

ROO = Profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces (m)

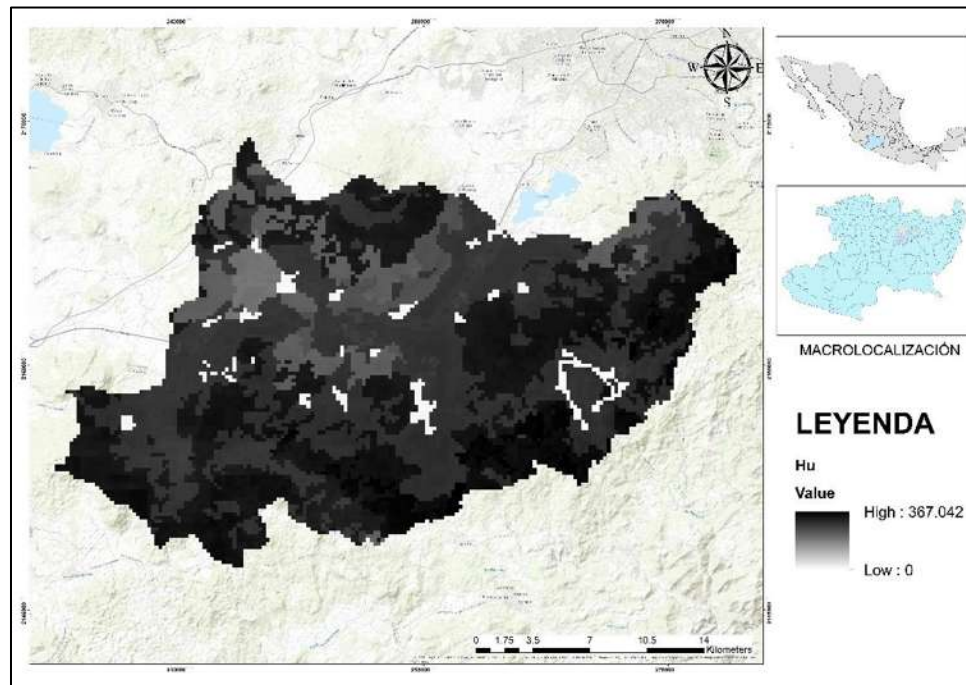


Figura 73. Mapa de Hu, Santio Undameo.

9.5.7.2 Capacidad de infiltración (K_s)

De la base de datos HiHydroSoil de FutureWater (FutureWater, 2024), se descargaron mapas K_s , para diferentes estratos del suelo. También conocida como conductividad hidráulica saturada es una medida de la capacidad de infiltración superficial del suelo, que indica la velocidad a la cual el agua puede moverse a través de los poros del suelo cuando este está completamente saturado. Para obtener un valor representativo de K_s , se realizó un promedio ponderado de los valores correspondientes a los distintos estratos, ya que el modelo solo admite un solo valor.

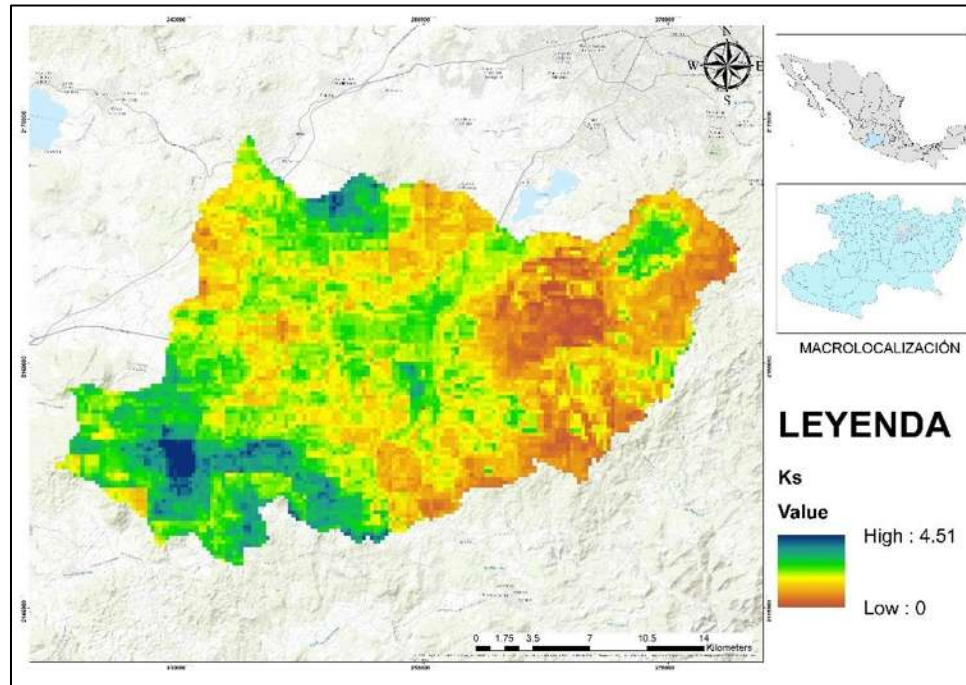


Figura 74. Mapa de Ks, Santiago Undameo.

9.5.7.3 Capacidad de percolación (Kp)

Se descargó la información de permeabilidad en formato shapefile (shp) de la base de datos GLHYMPS (Global Hydrogeology MaPS). Esta base de datos proporciona una visión global sobre la permeabilidad y porosidad de los materiales terrestres, tanto consolidados como no consolidados. Se utilizó la información de GLHYMPS (Gleeson et al. 2014) para obtener la conductividad hidráulica en el área de estudio. Para calcular la conductividad hidráulica a partir de los datos de permeabilidad, se aplicó la Ecuación [34]

$$K = \frac{(k \cdot \rho \cdot g)}{\mu} \quad [34]$$

Donde:

- K (m/s) es la conductividad hidráulica, que depende de la viscosidad y densidad del fluido.
- ρ (kg/m³) es la densidad del fluido, que normalmente es el agua con un valor de 999.97 kg/m³.
- g (m/s²) es la aceleración debida a la gravedad, que es 9.8 m/s².

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

- μ (kg/m·s o Pa·s) es la viscosidad del fluido, que normalmente es el agua con un valor de $1e-3$.

La Figura 75 muestra la distribución de los valores de Kp en mm/h, en la cual se pueden apreciar dos zonas específicas correspondientes a la geología de la zona.

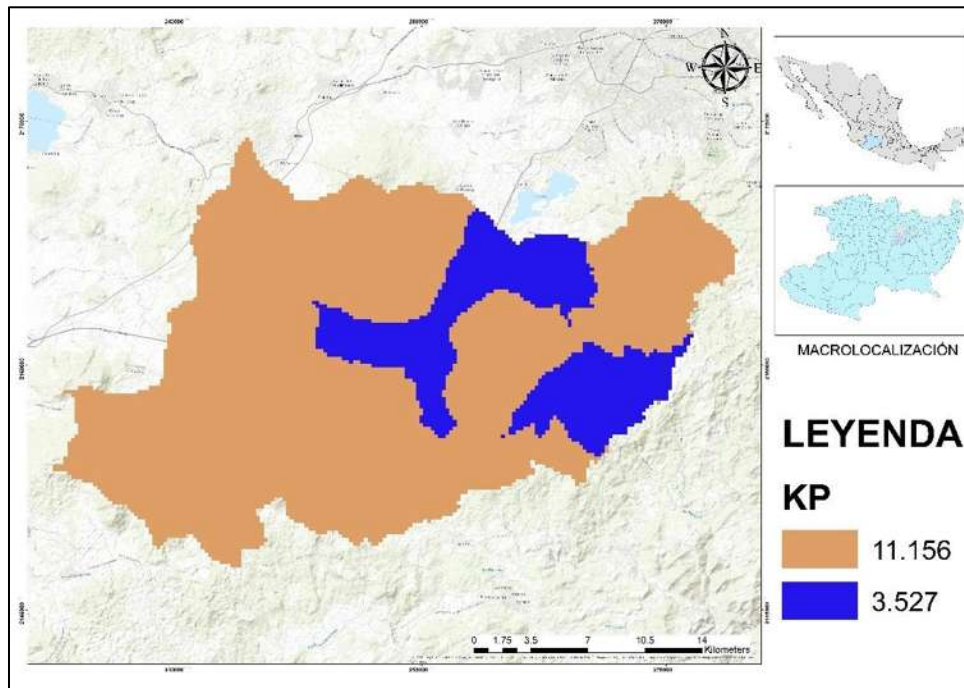


Figura 75. Mapa Kp, Santiago Undameo.

Una vez que contábamos con todos los parámetros necesarios para generar el modelo en TETIS, todos estos mapas fueron exportados en formato ASCII, generando el archivo topolco, el cual contiene toda la información generada.

Debido a que para realizar la modelación de los eventos de precipitación y obtener los gastos máximos, es necesario contar con información a escala horaria tanto de precipitación como de gastos aforados, en la zona de estudio no se fue posible poder realizar la calibración del modelo, es por esto que se decidió utilizar otro modelo de evento con el que si se pudieran realizar las simulaciones, en este caso se escogió el modelo de HEC-HMS, puesto que aunque se pierde la variabilidad del modelo mediante celdas, se sigue conservando esta variabilidad mediante subcuencas lo que hace referencia a pasar de un modelo distribuido a uno semdistribuido (Figura 76).

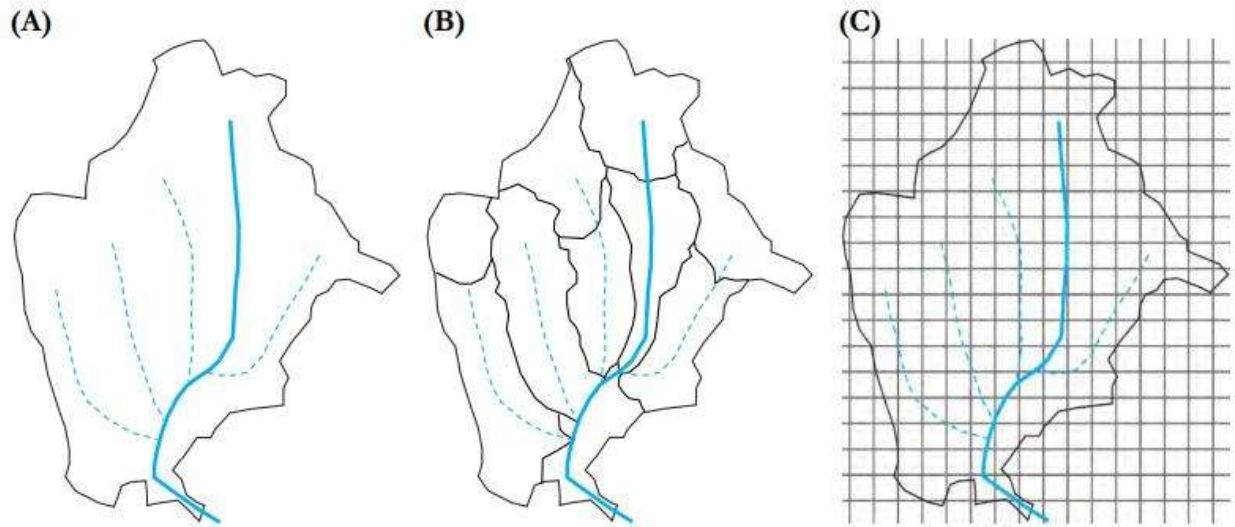


Figura 76. Modelos de tipo agregado (A), Semidistribuido (B) y Distribuido (C), (Pascual & Díaz, 2016).

9.6 Modelo HEC-HMS

Para la elaboración de este modelo fue necesario dividirlo en 4 bloques: Basin Models, Meteorologic Models, Time-Series Data y Control Specifications.

9.6.1 Basin Models

En este apartado, se incorporaron al modelo las capas correspondientes a las subcuencas, identificando para cada una de ellas su punto de salida (Figura 77). Esto permite establecer las conexiones hidrológicas y garantizar que los flujos de agua sean correctamente representados en el modelo.

Además, se añadieron los parámetros geomorfológicos necesarios para cada subcuenca, como el área y el tiempo de concentración. Para modelar las pérdidas de agua por infiltración, se seleccionó el método SCS por lo que se requiere asignar un número de curva.

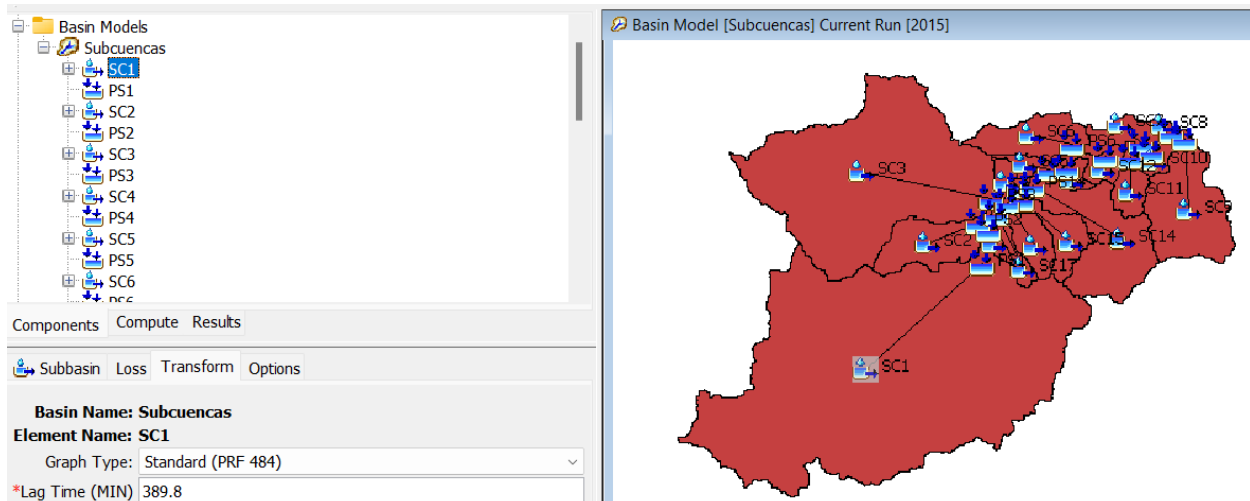


Figura 77. Representación de la cuenca en el Modelo HEC-HMS.

9.6.2 Time-Series Data

Para poder ingresar las tormentas que serían modeladas, fue necesario realizar un análisis de las precipitaciones que ocurrieron durante el evento de inundación, para esto del ráster generado para la tormenta durante ese día se extrajeron los valores de cada una de las celdas que se encontraban dentro de las subcuencas obteniendo así los diferentes estadísticos mostrados en la Tabla 41.

Tabla 41. Análisis de la precipitación diaria registrada en el 2018 para cada subcuenca.

Cuenca	P(mm)					
	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	17.62	43.78	26.15	28.13	4.21	317006.90
2	30.26	41.14	10.88	33.28	2.35	26987.19
3	3.72	40.88	37.16	24.77	8.39	129769.45
4	38.50	42.30	3.80	40.37	0.75	6822.76
5	38.41	46.00	7.59	43.15	1.96	7767.77
6	35.16	45.81	10.64	40.45	2.34	27913.35
7	23.60	42.07	18.47	32.54	4.65	11259.96
8	22.58	26.17	3.59	24.29	1.03	971.59
9	16.73	24.48	7.76	20.73	1.28	28685.36
10	22.75	31.00	8.26	25.97	1.70	4752.75
11	13.90	32.03	18.13	24.22	4.93	7798.27
12	30.41	42.18	11.77	36.05	2.95	7028.88
13	37.10	45.59	8.49	42.95	1.49	7559.58
14	13.52	43.66	30.15	28.65	8.79	42666.88



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

15	29.63	42.94	13.32	38.43	2.97	17369.97
16	38.38	47.69	9.32	43.05	2.24	17564.42
17	38.85	47.67	8.82	43.34	2.54	8365.04
18	38.59	46.76	8.17	43.49	1.82	4566.14

Para poder representar la inundación durante el día del evento es necesario transformar la información diaria a escala horaria, en el caso del evento de 2018 se cuenta con dos estaciones en escala horaria las cuales se encuentra ubicadas en las instalaciones de la UNAM y en el Meteorológico de la CONAGUA. En la tabla se puede observar el comportamiento que tuvo la tormenta ocurrida el 2018

Tabla 42. Tormenta a escala horaria durante el evento del 2018.

Fecha	Hora	P (mm)	
		Unam (P mm)	Conagua tec
21/10/2018	16:00	1	
21/10/2018	17:00	1.6	
21/10/2018	18:00	4.5	
21/10/2018	19:00	4.5	
21/10/2018	20:00	0.1	2.3
21/10/2018	21:00	0	3.5
21/10/2018	22:00	0	3
21/10/2018	23:00	0.1	0
22/10/2018	00:00	0.3	0
22/10/2018	01:00	12.4	0
22/10/2018	02:00	3.8	1
22/10/2018	03:00	8.9	1.9
22/10/2018	04:00	18	20.1
22/10/2018	05:00	4	9.9
22/10/2018	06:00	0.1	10
22/10/2018	07:00	0.2	3.1

De manera gráfica podemos observar que la tormenta ocurrió 4 horas antes en la estación de la UNAM y presentándose su pico en ambas estaciones a las 4:00 am del 22 de octubre (Figura 78).

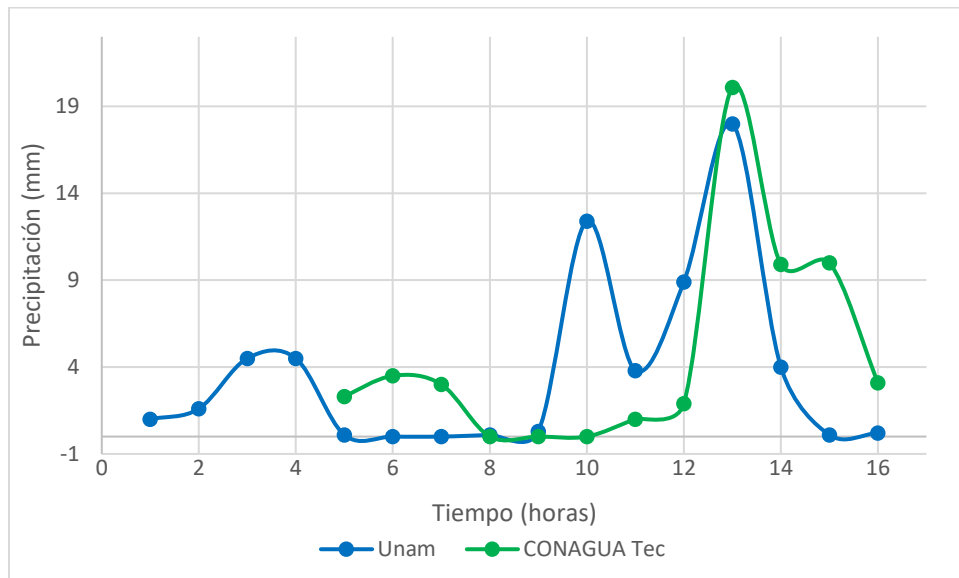


Figura 78. Pluviograma a escala horaria de la precipitación ocurrida en el evento de 2018.

Una vez obtenida la información del evento a escala horaria, se llevó a cabo el siguiente procedimiento convertir la precipitación diaria promedio obtenida para cada subcuenca a una escala horaria:

1. **Cálculo de la lluvia total por evento:** A partir de los datos de las estaciones horarias, se calculó la precipitación total registrada durante cada evento de lluvia.
2. **Determinación de porcentajes horarios:** Se evaluó la distribución de la precipitación dentro del evento, determinando el porcentaje que correspondió a cada hora con respecto al total del evento.
3. **Conversión de datos diarios a horarios:** Los porcentajes obtenidos de las estaciones horarias se aplicaron a los datos de las otras estaciones, que registraban precipitación a escala diaria. De este modo, se distribuyó la lluvia diaria de estas estaciones en valores horarios siguiendo la misma proporción observada en las estaciones horarias de referencia.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La Tabla 43 muestra la distribución de la precipitación para cada una de las subcuencas con respecto del porcentaje de las estaciones horarias, para el caso de las subcuencas 1,2,3,4,15,16,17,18 se utilizó la distribución de la UNAM y en el caso de las restantes la de CONAGUA tomando el criterio de estar más cercanas a la estación con información horaria.

Tabla 43. distribución horaria de las precipitaciones en las subcuencas durante el evento del 2018.

Subcuencas		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Precipitación %	
Fecha	Hora	P (mm)																		Unam	Conagua
21/10/2018	16:00	0.47	0.56	0.42	0.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.65	0.72	0.73	0.73	1.68	0.00
21/10/2018	17:00	0.76	0.89	0.67	1.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.03	1.16	1.17	1.17	2.69	0.00
21/10/2018	18:00	2.13	2.52	1.87	3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.91	3.26	3.28	3.29	7.56	0.00
21/10/2018	19:00	2.13	2.52	1.87	3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.91	3.26	3.28	3.29	7.56	0.00
21/10/2018	20:00	0.05	0.06	0.04	0.07	1.81	1.7	1.37	1.02	0.87	1.09	1.02	1.51	1.8	1.2	0.06	0.07	0.07	0.07	0.17	4.20
21/10/2018	21:00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.76	2.58	2.08	1.55	1.32	1.66	1.55	2.3	2.74	1.83	0	0	0	0	0.00	6.39
21/10/2018	22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.36	2.21	1.78	1.33	1.13	1.42	1.33	1.97	2.35	1.57	0	0	0	0	0.00	5.47
21/10/2018	23:00	0.05	0.06	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.07	0.07	0.07	0.17	0.00
22/10/2018	00:00	0.14	0.17	0.12	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.19	0.22	0.22	0.22	0.50	0.00
22/10/2018	01:00	5.86	6.93	5.16	8.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.01	8.97	9.03	9.06	20.84	0.00
22/10/2018	02:00	1.80	2.13	1.58	2.58	0.79	0.74	0.59	0.44	0.38	0.47	0.44	0.66	0.78	0.52	2.45	2.75	2.77	2.78	6.39	1.82
22/10/2018	03:00	4.21	4.98	3.71	6.04	1.5	1.4	1.13	0.84	0.72	0.9	0.84	1.25	1.49	0.99	5.75	6.44	6.48	6.5	14.96	3.47
22/10/2018	04:00	8.51	10.07	7.49	12.21	15.8	14.8	11.9	8.91	7.6	9.53	8.88	13.2	15.8	10.5	11.6	13	13.1	13.2	30.25	36.68
22/10/2018	05:00	1.89	2.24	1.67	2.71	7.8	7.31	5.88	4.39	3.74	4.69	4.38	6.51	7.76	5.18	2.58	2.89	2.91	2.92	6.72	18.07
22/10/2018	06:00	0.05	0.06	0.04	0.07	7.87	7.38	5.94	4.43	3.78	4.74	4.42	6.58	7.84	5.23	0.06	0.07	0.07	0.07	0.17	18.25
22/10/2018	07:00	0.09	0.11	0.08	0.14	2.44	2.29	1.84	1.37	1.17	1.47	1.37	2.04	2.43	1.62	0.13	0.14	0.15	0.15	0.34	5.66

Dichos valores de precipitación se utilizaron para generar los hietogramas de entrada de las cuencas en el apartado de Time-Series Data.

9.6.3 Meteorologic Models

Dentro de este apartado se selecciona el modelo meteorológico que se va utilizar para as subcuencas, en este caso se seleccionó en formato de hietogramas, por lo que se asigna cada uno de los hietogramas generados anteriormente a cada una de las subcuencas

9.6.4 Control Specifications

El apartado de Control Specifications en HEC-HMS definió la duración, el intervalo de tiempo el cual fue de 1 hora y las fechas de inicio y fin de la simulación.



9.6.5 Resultados de la simulación

Ya que se contada con todos los apartados necesarios para la modelación se hizo el cálculo de los gastos máximos, en la Tabla 44 se puede observar cuanto fue el gasto pico que aportó cada una de las subcuencas para la inundación del 2018.

Tabla 44. Resultados de la simulación para el evento de 2018.

Subcuenca	Área (Km ²)	Gasto Pico (m ³ /s)
1	663.6	12.8
2	47.6	6.6
3	308.6	5.2
4	10.1	15.6
5	10.7	14.4
6	40.2	30.9
7	20.5	11.7
8	2.5	1
9	81.6	3.1
10	10.6	2.1
11	18.6	1.7
12	11.7	6.7
13	10.2	10.4
14	86.8	13.8
15	26.7	22.2
16	24.3	24.7
17	11.3	13.7
18	6.1	8.4

Estos gastos son los que se utilizarán para la generación de las inundaciones en el Modelo hidráulico.

De la misma manera se determinaron las precipitaciones y gastos para el evento de 2015 ya que son con los que se cuenta información a escala horaria.



9.6.6 Cambio climático

Una vez obtenidos los gatos para los eventos históricos se procedió a determinar los gastos para las proyecciones de cambio climático.

Para el caso del RX5 que es un valor acumulado en 5 días, fue necesario primeramente desagregar este valor en los 5 días correspondientes, por lo que haciendo uso de las lluvias presentadas con anterioridad en el apartado de inundaciones históricas con lo que se determinó el porcentaje de lluvia que corresponde a cada uno de los días anteriores a la inundación los cuales se muestran en la Tabla 45.

Tabla 45. Porcentaje de lluvia asociado a los días que conforman el RX5.

%	Día
11.08	1
13.16	2
19.39	3
33.94	4
22.42	5

Ya definidos los porcentajes para cada uno de los días se determinó otro porcentaje de ocurrencia de acuerdo al número de eventos horarios presentados durante todos los meses los cuales se muestran en la Tabla 46.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Tabla 46. Número de eventos de precipitación asociados a cada mes.

Periodo: 18-08-2015 al 12-03-2023														
Mes	Duración (h)													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	19	24
Enero	1	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Febrero	1	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Marzo	6	4	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Abril	8	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mayo	21	11	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	49	36	16	9	7	1	2	2	1	2	1	0	0	1
Julio	74	36	26	12	5	5	2	1	1	0	1	0	0	0
Agosto	103	49	16	12	10	3	3	1	1	0	0	0	0	0
Septiembre	68	30	11	13	6	3	5	2	0	1	0	0	1	0
Octubre	31	16	7	4	1	4	1	1	0	0	1	2	0	0
Noviembre	15	3	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0
Diciembre	5	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
%junio	38.58	28.35	12.60	7.09	5.51	0.79	1.57	1.57	0.79	1.57	0.79	0.00	0.00	0.79

Los perfiles de distribución temporal de tormentas desarrollados por el antiguo Soil Conservation Service (hoy NRCS) son herramientas hidrológicas que permiten representar cómo se reparte la precipitación en el tiempo, usualmente a escala horaria, durante un evento de tormenta de diseño. Estos perfiles se clasifican en cuatro tipos principales (I, IA, II y III), los cuales reflejan diferentes patrones de intensidad según el clima predominante. El Tipo I y IA se asocian a regiones áridas o semiáridas, con lluvias suaves o muy distribuidas, mientras que el Tipo II representa climas templados con picos de intensidad al centro del evento. Por otro lado, el Tipo III corresponde a regiones tropicales o costeras, donde la mayor parte de la precipitación ocurre en las primeras horas del evento (NRCS, 2004). En el caso del estado de Michoacán, México, el clima tropical subhúmedo y la influencia de sistemas convectivos locales, de ciclones tropicales del Pacífico, generan eventos de lluvia intensa en cortos periodos. Por ello, el perfil de una tormenta Tipo III es el más representativo para la región, ya que reproduce la alta intensidad inicial de las lluvias. Definido esto se determinaron los gastos para el periodo histórico los cuales se presentan en la Figura 79.

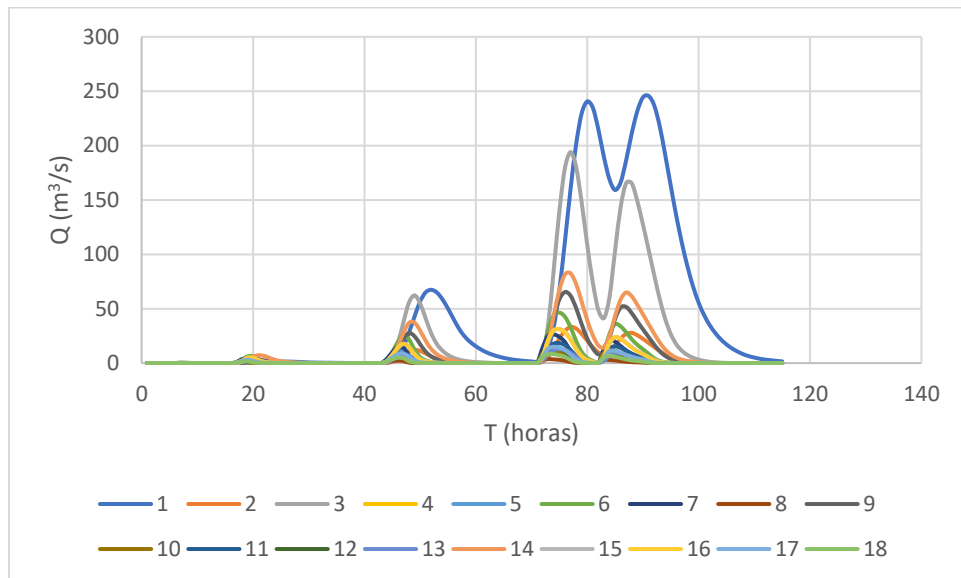


Figura 79. Gastos para el pedido futuro asociados al índice RX5 para el mes de Junio en el periodo cercano.

De la misma forma fueron determinados las precipitaciones y gastos para el índice RX1.

9.7 Modelo HEC-RAS

En este estudio se utilizó el modelo hidráulico propuesto por García-Ledesma et al. (2025), que simula una superficie de 34.74 km² mediante una malla de 751,641 celdas y 871,976 nodos. La resolución espacial varía según la cercanía a cauces y estructuras: desde 10 m en zonas alejadas, hasta 2 m en canales y 1 m en elementos críticos como puentes, compuertas y alcantarillas, lo que permite un balance entre precisión y eficiencia computacional.

El modelo incorpora 17 condiciones de frontera, de las cuales 16 son entradas de caudal definidas por hidrogramas de afluentes, y una es la salida ubicada aguas abajo del Río Grande. Esta configuración permite una representación realista del flujo dentro del área urbana modelada. La Figura 80 muestra la localización de estas condiciones.

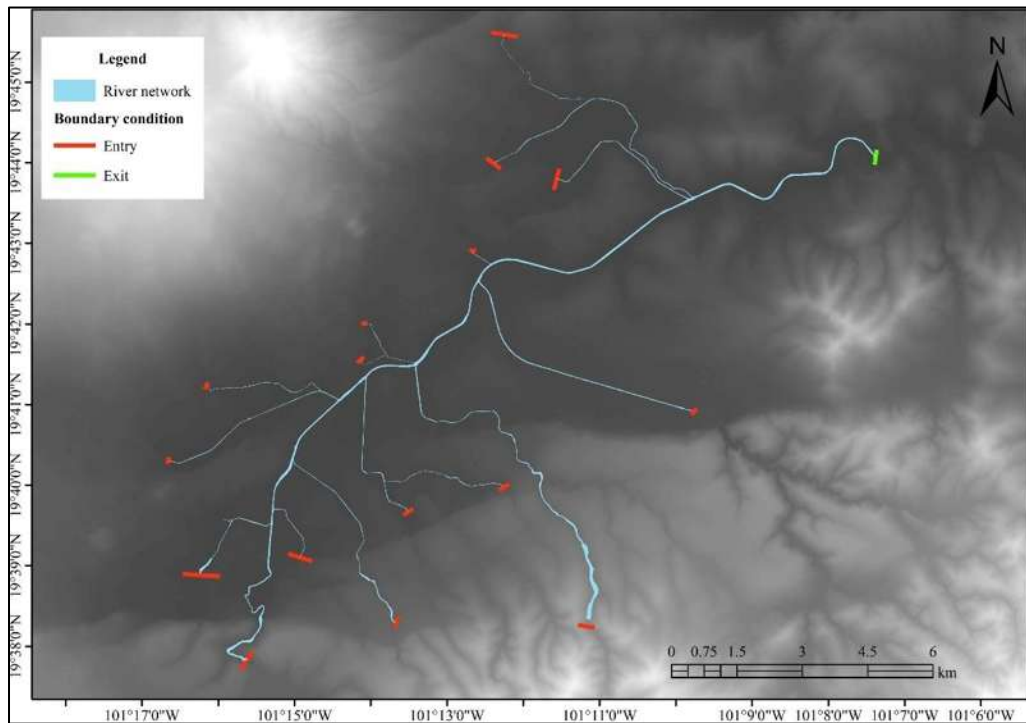


Figura 80. Modelo hidráulico incorporando las condiciones de frontera (García-Ledesma et al., 2025)

9.8 Inundaciones

Una vez obtenidos los gastos mediante HEC-HMS para todas las simulaciones correspondientes, estos fueron modelados median el uso de HEC-RAS.

En la Figura 81 se muestra la modelación de las zonas inundadas durante el evento de lluvias intensas ocurrido en 2018. Las áreas en color azul representan los sitios con acumulación de agua superficial como resultado del escurrimiento urbano y del desbordamiento de cuerpos de agua. Se observa una clara coincidencia entre las zonas modeladas y las colonias que históricamente reportaron afectaciones durante dicho evento, tales como Prados Verdes, Adolfo López Mateos, Siervo de la Nación, Manantiales, Agustín Rivera y las canchas de Policía y Tránsito. Estas colonias comparten una característica en común: su cercanía a los principales ríos y drenes de la ciudad. Esta condición topográfica las hace altamente propensas a inundaciones, ya que el desbordamiento de estos cauces, potenciado por la intensidad de la tormenta fue una de las principales causas de las inundaciones registradas.

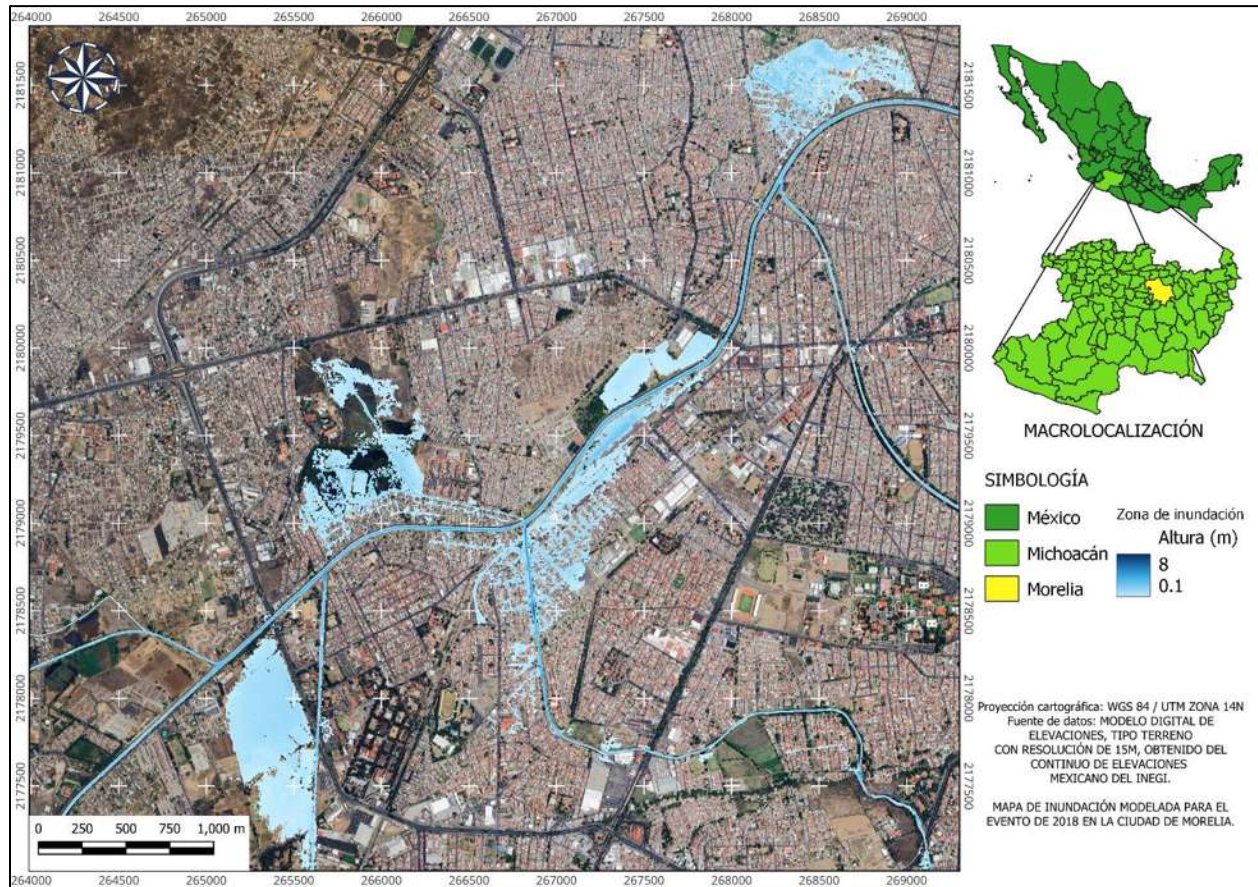


Figura 81. Modelación de las inundaciones ocurridas en 2018.

Con el objetivo de verificar la precisión de la modelación realizada para el evento de 2018, se llevó a cabo una comparación con una ortofoto proporcionada por el Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN, 2025), correspondiente al mismo periodo del evento. Al contrastar ambas imágenes, se observó una alta coincidencia espacial entre las zonas identificadas como inundadas en la simulación y las áreas efectivamente afectadas visibles en la ortofoto (Figura 82). Esta correspondencia valida la capacidad del modelo para representar adecuadamente los patrones de inundación en condiciones reales, lo que otorga confianza en la fiabilidad de los resultados obtenidos y respalda su uso para las proyecciones con cambio climático.



Figura 82. Ortofoto de inundación 2018 (IMPLAN, 2025).

Siguiendo con las modelaciones históricas, la Figura 83 corresponde a la modelación de inundaciones derivadas del evento de lluvias extremas ocurrido en 2015. Al comparar esta simulación con la del año 2018, se observa que muchas de las áreas inundadas se repiten, lo que confirma la persistente susceptibilidad de ciertas zonas de la ciudad ante eventos hidrometeorológicos extremos. Sin embargo, en este caso, la extensión de las zonas afectadas es considerablemente mayor, lo cual se puede atribuir a la mayor magnitud de la tormenta registrada en 2015, que duplicó en intensidad a la de 2018. Este aumento en la escorrentía generada provocó el desbordamiento de cauces y una mayor cobertura de inundación, afectando con mayor severidad.

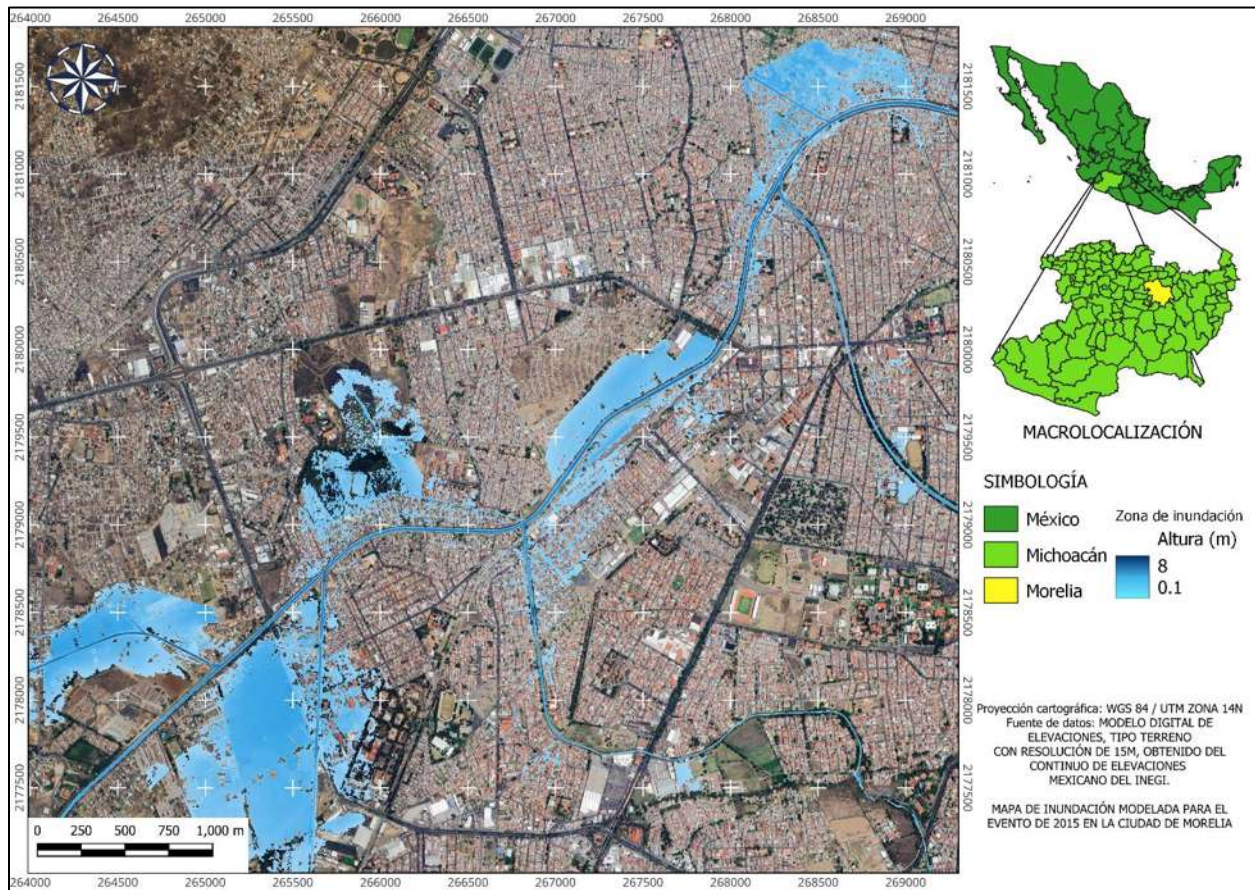


Figura 83. Modelación de las inundaciones ocurridas en 2015.

Para el caso de la inundación ocurrida en 2015, asociada a un evento de precipitación acumulada durante varios días, no se dispone de información directa del evento como en el caso de 2018. Sin embargo, se recurrió a información del IMPLAN, específicamente un mapa de zonas propensas a inundación correspondiente a un periodo de retorno de 2 años el cual se muestra en la Figura 84. Al comparar los resultados de la modelación con dicho mapa de referencia, se observó una gran coincidencia entre las áreas simuladas como inundadas y las zonas identificadas como susceptibles en el mapa. Con esta coincidencia, a pesar de la falta de datos directos del evento para poder comparar y con la referencia de la comparación del evento de 2018, la modelación ofrece una representación razonable de las condiciones de inundación para ese periodo.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

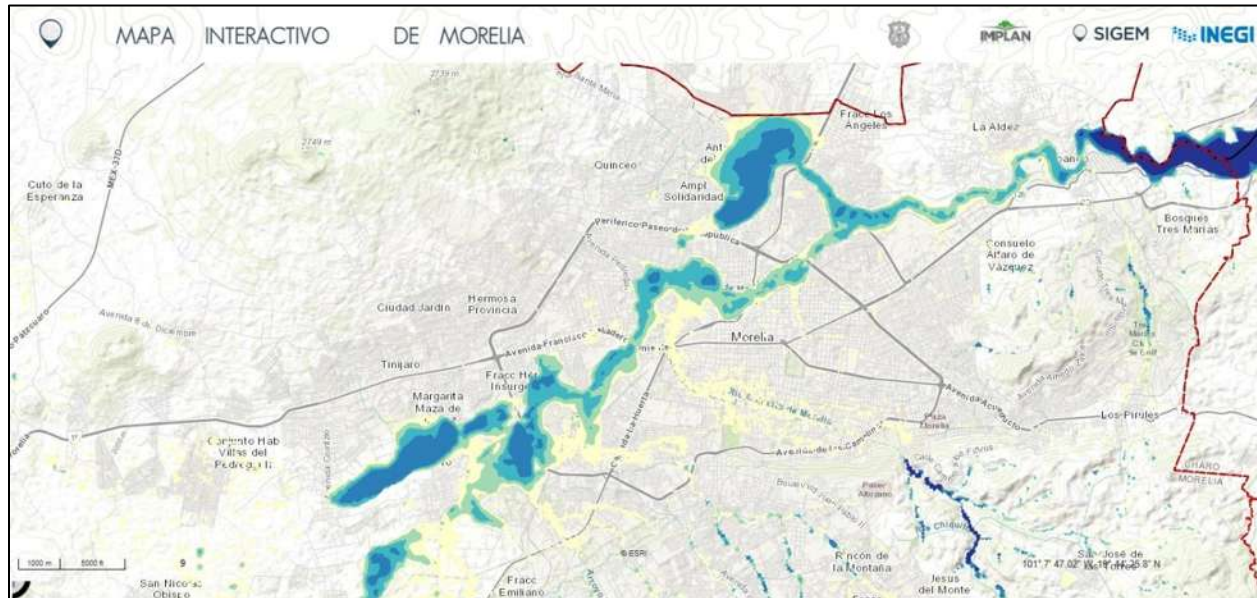


Figura 84. Zonas de inundación para un T de 2 años (IMPLAN, 2025).

En la Figura 85 se observan los resultados de inundaciones considerando el escenario futuro de cambio climático mediante el índice RX5 en el mes de junio, Al comparar esta proyección con los eventos ocurridos en 2015 y 2018, se observa una distribución espacial de zonas inundadas similar a la registrada en los eventos históricos, con afectaciones recurrentes en las mismas colonias. No obstante, la magnitud del área modelada como inundada es comparable a la del evento de 2018, lo que podría decir que, bajo las condiciones proyectadas, un evento futuro asociado al índice RX5 podría generar impactos considerables, aunque no necesariamente más severos que los ya experimentados

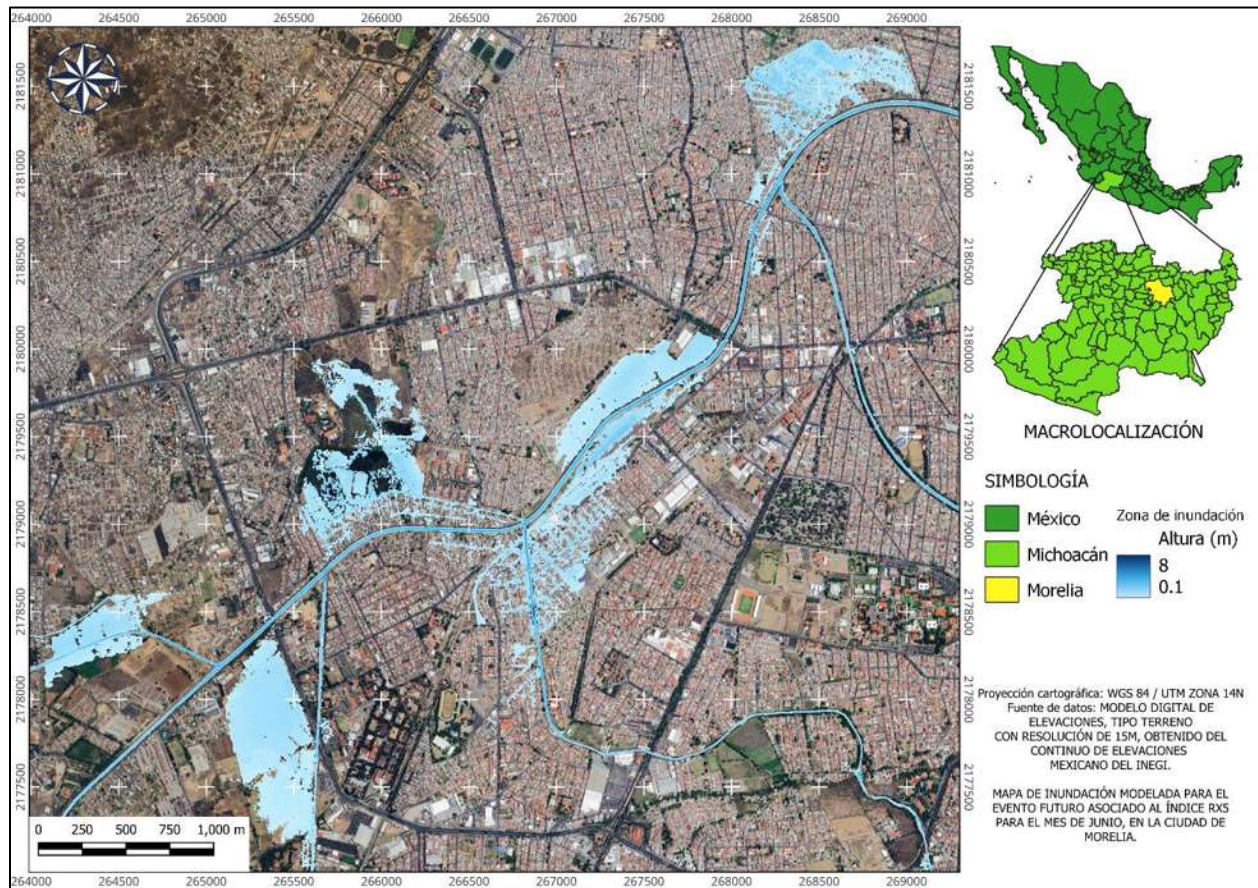


Figura 85. Modelación de las inundaciones a partir del índice RX5 para el mes de junio.

En el caso de la modelación del RX1, presentada en la Figura 86, se observan zonas propensas a inundación que en términos generales coinciden con las de la modelación basada en el índice RX5. Ambas simulaciones muestran una distribución espacial muy similar en cuanto a las áreas urbanas bajas colindantes con los cauces principales y drenes. Sin embargo, al comparar ambos escenarios, la diferencia más evidente radica en los tirantes de agua, siendo más reducidos en el RX1 respecto al RX5, lo cual es coherente con la menor duración del evento de lluvia.

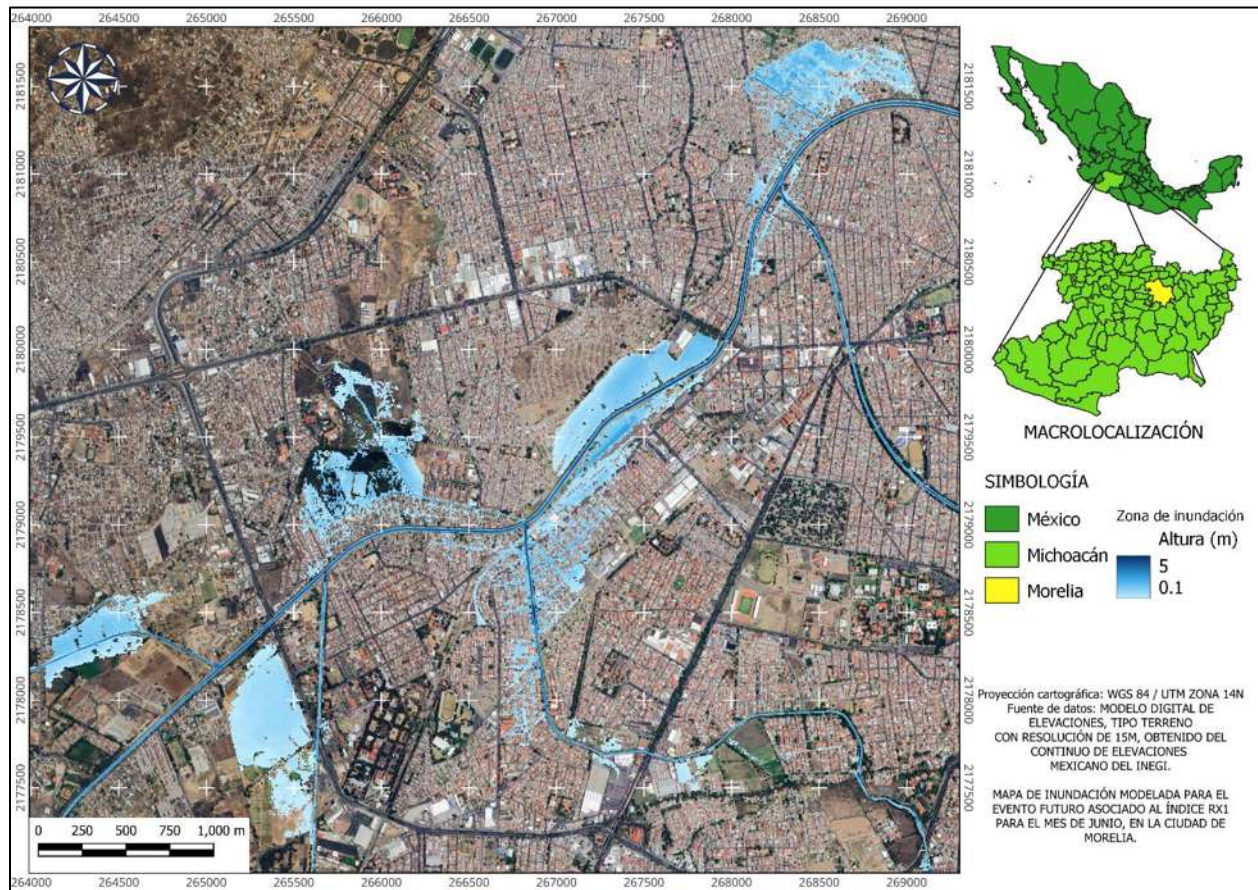


Figura 86. Modelación de las inundaciones a partir del índice RX1 para el mes de junio.

En cuanto a la comparación con el evento histórico de 2018, la modelación del RX1 muestra una extensión de área inundada comparable, aunque con algunas diferencias en la localización específica de las zonas afectadas como lo son: Hacienda Tinijaro y las canchas de Policía y Tránsito (zona suroeste del mapa), lo que podría explicarse por la variabilidad en la distribución espacial de la precipitación real frente a la simulada. En la Figura 87 se observa la cantidad de precipitación modelada para cada una de las cuencas. Esta comparación nos muestra que, a pesar de presentar coberturas similares, los distintos tipos de eventos extremos pueden generar diferentes profundidades de inundación, así como una distribución variable entre las zonas propensas a inundación.

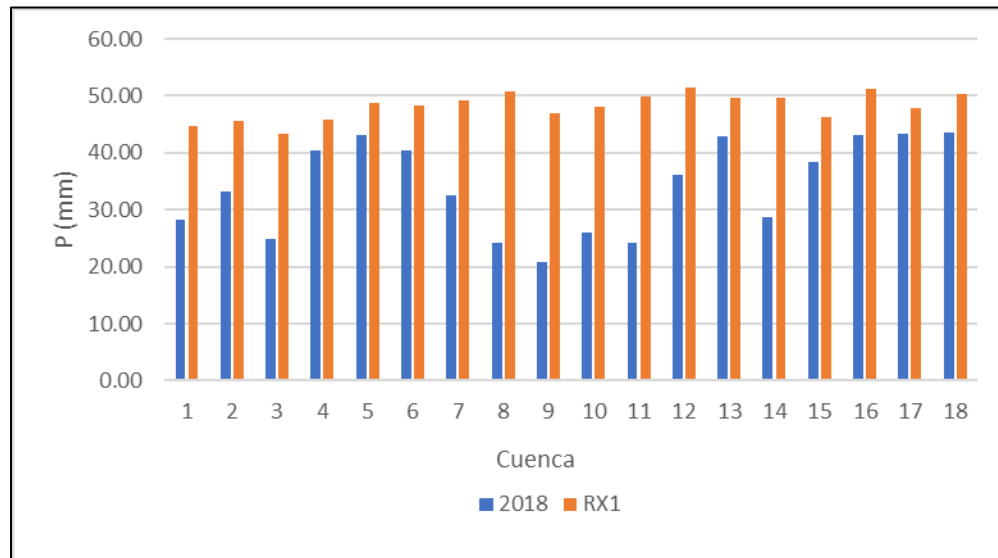


Figura 87. Comparación entre la cantidad de precipitación en las cuencas.

10 Conclusiones

En el análisis de los índices de concentración de precipitación en la ciudad de Morelia, se ha observado que la mayoría de las estaciones presentan una concentración de precipitación en el último cuartil superior del 60%. Este hallazgo indica que aproximadamente el 25% de los eventos de lluvia concentran casi el 60% de la precipitación total en la zona. Estos resultados sugieren que la cuenca exhibe una marcada tendencia hacia la torrencialidad, observándose este patrón en la mayoría de las subcuencas evaluadas.

Dentro del análisis de la morfología de las cuencas indica que la torrencialidad observada no está directamente relacionada con las características geomorfológicas de las mismas. Las cuencas alargadas, que presentan tiempos de retraso más largos, no favorecen la generación de eventos torrenciales. A pesar de que se observó una mayor variabilidad en el área, relacionada con la densidad de drenaje, las pendientes y el coeficiente de compacidad se ubicaron principalmente en las categorías de menor torrencialidad. Por lo tanto, es más probable que la torrencialidad en estas cuencas esté vinculada a factores climáticos, especialmente a las precipitaciones como se pudo observar en el CI, que a las características geomorfológicas de las cuencas mismas.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

El análisis de los índices extremos de precipitación revela patrones significativos que proporcionan una visión sobre las tendencias climáticas. Observamos un claro aumento en la duración de los días consecutivos secos (CDD), el cual tuvo un 93.75% de las estaciones mostrando una tendencia positiva. Esto se evidencia aún más con el CWD, donde el 62.5% de las estaciones indican una disminución en días consecutivos de lluvia. De manera coherente, la precipitación total anual (PRCPTOT) refleja una tendencia negativa del 75%, sugiriendo una disminución en la precipitación anual. Esto se refuerza con los índices R10 y R20, indicando una tendencia negativa 75% y 68% del total de estaciones respectivamente, los cuales corresponden a eventos de lluvia moderada. Además, se puede notar un aumento de los eventos del índice R25 por lo que se puede decir que este es el punto de inflexión donde las tendencias comienza a aumentar hacia lo positivo, estas tendencias se mantienen sobre las estaciones hasta el R95p.

A medida que analizamos los eventos extremos se observa que el índice R99p presenta un aumento del 56.25% en tendencias positivas, mostrando un incremento en eventos con mayor intensidad de la misma manera que lo hace el Rx1day ya que ambos están relacionados con los valores más extremos de precipitación.

Aunque en la tendencia en el Rx5day son del 50% en ambas se puede observar las zonas donde este está tendiendo a aumentar que son las partes altas de la cuenca lo cual puede generar una saturación del suelo y en periodos largos generar inundaciones como se pudo observar en las inundaciones presentadas.

Finalmente, los resultados del SDII nos dan otra vista a los resultados obtenidos ya que al tener una tendencia positiva la mayoría de estaciones sugiere que, aunque la frecuencia de días lluviosos puede disminuir, las precipitaciones son más intensas cuando ocurren.

Luego de realizar un análisis de eventos de inundaciones en las fechas recolectadas a lo largo del periodo histórico se seleccionaron los eventos de: 2003, 2005 y 2015, se observó una clara relación entre las precipitaciones intensas y la ocurrencia de estos eventos. En cada caso, las lluvias comenzaron a manifestarse aproximadamente cinco días antes del evento de inundación.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Estos eventos también mostraron conexiones con las tendencias previamente calculadas. Por ejemplo, en el evento de 2003, las lluvias que lo desencadenaron alcanzaron alrededor de 30 mm, promediando un Rx5day de 43 mm. En 2005, las lluvias máximas diarias rondaron los 40 mm, con un promedio de Rx5day de 51 mm. Ambos eventos se encuentran en un periodo de retorno entre 5 y 10 años. El evento de 2015, siendo el más significativo con un periodo de retorno entre 25 y 50 años, experimentó precipitaciones de 70 a 130 mm, promediando un Rx5day de 142 mm. Esto resalta claramente el impacto de las tendencias ascendentes sobre estos eventos de inundación.

En cuanto al fenómeno del ENOS, se observó que no tuvo un efecto probable sobre los eventos, ya que se encontraba en su fase neutral en la mayoría de las ocasiones. Sin embargo, en el evento de 2015, coincidió con la fase del Niño, lo que sugiere una posible influencia en este desastre específico, lo que coincide con los distintos autores que han estudiado este evento afirmando que solo se sabe con certeza lo que genera en verano. El análisis de las descargas de la presa en relación con las inundaciones ha revelado que, solo en el evento de 2003, se registró una descarga aproximadamente cinco veces mayor que el promedio para ese mes. Este evento se destacó porque, la precipitación acumulada fue relativamente baja lo que sugiere que la magnitud de la descarga de la presa fue un factor determinante en la inundación de 2003. Posteriormente, parece haberse implementado una mejor gestión de las descargas de la presa, lo que ha contribuido a controlar y minimizar el impacto de las inundaciones en la región. Este cambio en la gestión probablemente ha sido crucial para evitar eventos similares en años posteriores.

Las proyecciones relacionadas con el cambio climático coinciden con el análisis de tendencias del índice RX1day, el cual muestra un aumento significativo. Este índice, que mide la cantidad máxima de precipitación en un solo día, ha demostrado incrementos por encima del 100% en comparación con el período histórico. Estos resultados se alinean con las observaciones recientes, ya que en los últimos años hemos presenciado lluvias de gran magnitud de precipitación en la ciudad. Esto evidencia que el cambio climático está teniendo un impacto tangible en la intensidad de las precipitaciones, lo cual subraya



la necesidad de implementar estrategias de adaptación y mitigación para enfrentar estos desafíos climáticos.

Dentro de la comparación entre los modelos del CMIP5 y el CMIP6 se observaron importantes diferencias en las proyecciones climáticas para la zona de estudio, especialmente en términos de la intensidad y la incertidumbre asociada a los eventos de precipitación extrema. Mientras que el CMIP5, con su escenario RCP4.5, presenta una mayor variabilidad en las proyecciones y una incertidumbre más amplia, el CMIP6, que utiliza el escenario SSP2-4.5, muestra un incremento más claro en la precipitación máxima y una menor dispersión en sus resultados. Esto sugiere que, a pesar de las similitudes en los patrones estacionales de precipitación, el CMIP6 proporciona proyecciones más consistentes y refinadas, posiblemente debido a la inclusión de factores socioeconómicos, lo que mejora la precisión de las predicciones sobre el cambio climático. En general, las proyecciones de CMIP6 apuntan a una intensificación de los eventos extremos de precipitación, reflejando una tendencia más alarmante en cuanto a la magnitud y la incertidumbre, lo que enfatiza en la importancia de avanzar en políticas climáticas más ambiciosas.

Aunque inicialmente se tenía previsto utilizar el modelo TETIS, la falta de información de precipitación horaria requirió un cambio hacia el modelo HEC-HMS. Este ajuste implicó una pérdida de variabilidad espacial a escala de celda, pero se logró conservar dicha variabilidad a nivel de subcuenca, dado que se trabaja con un modelo semidistribuido. Además, la distribución espacial y temporal de las precipitaciones se mantuvo de manera adecuada, cumpliendo un objetivo similar al que se habría logrado con TETIS.

En este contexto, las modelaciones hidráulicas realizadas tanto históricas como proyectadas ofrecen un marco robusto para comprender el comportamiento y evolución de estas. Las simulaciones de los eventos de 2015 y 2018 mostraron una alta coincidencia con áreas efectivamente inundadas, validando la capacidad del modelo HEC-HMS así como el de HEC-RAS para representar de buena manera las condiciones reales. A pesar de no contar con evidencia directa del evento de 2015, el modelo logró replicar con alta precisión las zonas propensas a inundarse, corroboradas mediante mapas del IMPLAN, lo cual se pudo constatar con la ortofoto de 2018. Esta validación



confiere confianza a los resultados obtenidos bajo escenarios futuros de cambio climático.

Las proyecciones realizadas utilizando los índices RX5 y RX1 muestran patrones espaciales de inundación similares a los históricos, especialmente en zonas bajas cercanas a cauces y drenes. Sin embargo, a pesar de que estas proyecciones no resultaron más severas que los eventos históricos, evidencian que en el futuro las inundaciones persistirán incluso cuando la tendencia de la precipitación anual en la región esté a la baja. Además, si bien el RX5 genera mayores niveles de escorrentía y, por ende, inundaciones más extensas, la comparación entre RX1 y la simulación del evento de 2018 demuestra que la cantidad total de lluvia no es el único factor determinante: la distribución espacial y temporal de las precipitaciones juega un papel clave. En la simulación de RX1, con una mayor cantidad de lluvia, los tirantes fueron menores que en 2018; sin embargo, hubo zonas que se inundaron en uno u otro escenario de forma distinta, lo que pone en evidencia cómo esta variabilidad espacial y de intensidad de los eventos extremos puede modificar considerablemente los niveles de inundación en la ciudad.



11 Referencias

- Adelson, E. H. (1981). Spatiotemporal Optimization of Time-Varying Visual Displays. Tesis doctoral, Instituto de Tecnología de Massachusetts.
- Aparicio Mijares, F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Editorial Limusa.
- Araque, M., Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., Liliana, O. (2019). Cuencas Hidrográficas. 1era. Edición: Universidad Politécnica Salesiana, ISBN: 978-9978-10-380-7.
- ARBELÁEZ, A.C., VÉLEZ, M.V. Y SMITH, R. Diseño hidrológico con información escasa un caso de estudio: río San Carlos. Avances en Rec. Hidráulicos. N°4. p 1–20. 1997
- Arreigue, E., Pastor, N., Chávez, C., & Alarcón, J. (2012, June 6). Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia, México. *Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y al Ambiente*.
- Ávila, K., & Vide Javier. (2013). Análisis estadístico de los eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental. *Cuadernos Geográficos*, 52(1), 69–83.
- BATRES, M. (2018, October 30). Gaceta del senado. *Senado de La República*.
- Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis Potosí: Editorial Universidad Potosina.
- Campos, M. N., Cárdenas, O. L., Gaxiola, A., & González, G. E. G. (2020). Meteorological interaction between drought/oceanic indicators and rainfed maize yield in an arid agricultural zone in northwest Mexico. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(3), 131. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5115-4>
- Carreó, C. (2017). *Historia de las inundaciones en Valladolid-Morelia* (1st ed., Vol. 1). Universidad Michoacana de San Nicolas de Hldalgo.
- Caso, M., González-Abraham, C., & Ezcurra, E. (2007). Divergent ecological effects of oceanographic anomalies on terrestrial ecosystems of the Mexican Pacific coast. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(25), 10530–10535. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701862104>
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L. F., & Valenzuela, E. (2020). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1396–1420. <https://doi.org/10.1002/joc.6276>
- CENAPRED. (2012). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2010. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres Secretaría de Gobernación.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2019). Desastres en México: impacto social y económico. México: CENAPRED. Recuperado de <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/318-INFOGRAFADESASTRESENMXICO-IMPACTOSOCIALYECONMICO.PDF>



- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., y Braun, M. (2013). Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resources Research*, 49(7), 4187–4205. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20331>
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1989). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Christensen, J. H., Boberg, F., Christensen, O. B., y Lucas-Picher, P. (2008). On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35(20), L20709. <https://doi.org/10.1029/2008GL035694>
- CONAGUA. (2023). Sistema de Información Hidrológica (SIH). <https://sih.conagua.gob.mx/>
- CONAGUA. (2017). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Datos Básicos Para Proyectos de* (pp. 57–58). www.conagua.gob.mx
- Copernicus. (2024). Copernicus Climate Data Store. Agencia Espacial Europea (ESA). <https://atlas.climate.copernicus.eu/atlas>
- Crochemore, L., Ramos, M.-H., y Pappenberger, F. (2016). Bias correcting precipitation forecasts to improve the skill of seasonal streamflow forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–32. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-78>
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the art model. *Water (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/W12092326>
- Delgado Parra, A. (2016). *MODELIZACIÓN 1D, 1D/2D Y 2D DE LA INUNDABILIDAD EN EL MEANDRO DE SANT BOI DE LLOBREGAT MEDIANTE LA NUEVA APLICACIÓN HEC-RAS 5.0*. UPC BARCELONATECH.
- Del Águila S. y Mejía A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y ciencias del agua*, 538-562, 12(2). Doi: 10.24850/j-tyca-2021-02-12.
- Environment America. Research & Policy Center. (2012). *When It Rains, It Pours*. (E. America, Ed.). Global Warming and the Increase in Extreme Precipitation from 1948 to 2011.
- EXCELSIOR. (2015, March 16). *Lluvias inundan 25 colonias de Morelia; Ejército aplica Plan DN-III*.
- FAO (1998). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). ISSN 0254-5293.
- Flores, A. (2022). *EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y FORMULACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN EL MUNICIPIO DE MORELIA MICHOCÁN*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



- Francés García, F., Vélez Upegui, J., Camilo Múnera, J., Medici, C., & Bussi, G. (2014). *DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS v.8*. <http://lluvia.dihma.upv.es/>
- FutureWater. (2024). HiHydroSoil. <https://www.futurewater.eu/projects/hihydrosoil/>
- García-Ledesma, I., Madrigal, J., Pardo-Loaiza, J., Hernández-Bedolla, J., Domínguez-Sánchez, C., & Sánchez-Quispe, S. T. (2025). Flood analysis comparison with probability density functions and a stochastic weather generator. *PeerJ*, 13, e19333. <https://doi.org/10.7717/peerj.19333>
- García-Romero, L. (2015). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Tuxpan, Michoacán*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garnica, R. J., y Alcántara, I. (2004). Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz. *Investigaciones Geográficas* (55), 23-45. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112004000300003&script=sci_abstract
- Gleeson, T., Moosdorf, N., Hartmann, J. and van Beek, L.P.H. (2014) A glimpse beneath earth's surface: GLobal HYdrogeology MaPS (GLHYMPS) of permeability and porosity. *Geophysical Research Letters*, 41: 2014GL059856 doi: 10.1002/2014gl059856
- Gómez, Á. J. (2016). *Herramientas de Modelación y Monitoreo para la Hidrología de Alta Montaña Colombiana-Cuenca de la Quebrada Calostros-PNN Chingaza*. Universidad Nacional de Colombia.
- Guevara-Polo, D. E., & Mijares-Fajardo, R. (2021, August). *El Niño Oscilación del Sur y sus efectos sobre la precipitación en México*.
- Hernández, J., Mendoza, M. E., & Vieyra, A. (2014). Las inundaciones en Morelia. In *Monitoreo De Riesgo Y Desastre Asociado a Fenómenos Hidrometeorológicos Extremos Y Cambio Climático* (Vol. 1, Issue October 2016). https://www.researchgate.net/publication/267028798_IDENTIFICACION_DE_TENDENCIAS_DE_CAMBIO_CLIMATICO_A_NIVEL_LOCAL_USANDO_MOCLIC_PREGUNTAS_Y_RESPUESTA
- Herrera, E., Magaña, V., & Morett, S. (2018). Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo. *Nova Scientia*, 10(21), 191–206. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1527>
- Horton, R. (1945). EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. 275–370.
- Hydrologic Engineering Center. (2009). HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS® User's Manual. www.hec.usace.army.mil
- IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. 2013. Bogotá, D. C. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022653/DocumentoMA_RCOC_ONCEPTUAL.pdf



- IMPLAN. (2025) *Sistema de Información Geográfica de Morelia*.
<https://sigmorelia.gob.mx/?v=bGF0OjE5LjcwNTI3LGxvbjotMTAxLjlxNDM2LHo6OSxsOmMxMDJ8YzEwM3xiMjQwNQ==>
- Instituto Nacional de Ecología 2004 Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. México. pp. 47.
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda*.
- Ines, A. V. M., y Hansen, J. W. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1–4), 44–53.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.009>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC. (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance, Climate Change Adaptation Special Report of the IPCC*. Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press
- Kirchmeier-Young, M. C., & Zhang, X. (2020). Human influence has intensified extreme precipitation in North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(24), 13308–13313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921628117>
- KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Eng.* 10 (6),362. 1940.
- Labraga, J. (1998). Escenario de cambio climático para la Argentina. *Revista Ciencia Hoy*, 8(44), 18–25.
- La Jornada. (2005, September 1). *Dejan las lluvias un muerto y cientos de casas afectadas*.
<https://www.jornada.com.mx/2005/09/01/index.php?section=estados&article=038n1est>
- LLAMAS, J. *Hidrología general: Principios y Aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. 635 p. 1993.
- Lenderink, G., Buishand, A., y van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145–1159.
<https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>
- Li, D., Feng, J., Xu, Z., Yin, B., Shi, H., y Qi, J. (2019). Statistical Bias Correction for Simulated Wind Speeds Over CORDEX-East Asia. *Earth and Space Science*, 6(2), 200–211. <https://doi.org/10.1029/2018EA000493>
- López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J., Gimena, F. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*, 15-30, (12). Doi: 10.4067/S0718-28132012000200002.



- Mahmood, R., Jia, S., Tripathi, N. K., y Shrestha, S. (2018). Precipitation extended linear scaling method for correcting GCM precipitation and its evaluation and implication in the transboundary Jhelum River basin. *Atmosphere*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/atmos9050160>
- Martínez-Austria, P. F., & Díaz-Jiménez, D. (2018). Tendencias de la precipitación y su relación con el Índice Oceánico El Niño. El caso de la Región Mixteca, México. *Ingeniería Del Agua*, 22(1), 1. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.7779>
- Martínez, J., Fernández, A., & Osnaya, P. (2004). *Cambio Climático una visión desde México* (1st ed., Vol. 1). Secretaría Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Martin-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, 24(8), 959–971. <https://doi.org/10.1002/joc.1030>
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2004). *History and description of “El Niño, Southern Oscillation” phenomenon* (Comité Oceanográfico Nacional (CONA), Ed.; 1st ed.). Comité Oceanográfico Nacional (CONA). http://www.cona.cl/pub/libro_elnino/libro_elnino.pdf
- Méndez González, J., Ramírez Leyva, A., Cornejo Oviedo, E., Zárate Lupercio, A. y Cavazos Pérez, T. (2010). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (pdo) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones geográficas*, (73), 57-70.
- 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>
- Meza Aliaga M, Rodríguez Valdivia A, Rodríguez Valdivia A, Tapia Tosetti A, (2014). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE MICROCUENCAS AFECTADAS POR FLUJOS DE DETRITOS BAJO PRECIPITACIÓN INTENSA EN LA QUEBRADA DE CAMIÑA, NORTE GRANDE DE CHILE. *Diálogo andino*, 15-24, (44). Doi:10.4067/S0719-26812014000200003.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., y Van Liew, M. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- 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., 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>
- National Water Service. (2023, January). National Water Service. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Navarro, M. (2019). *EVALUACIÓN CON CAMBIO CLIMÁTICO DE ESCENARIOS DE DEMANDA PARA LAS MASAS SUBTERRANEAS EN LOS ACUÍFEROS ASOCIADOS AL CAMPO GEOTÉRMICO CERRITOS COLORADOS*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ordoñez, J. (2011). Que es una cuenca hidrológica Cartilla técnica. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp_sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf.
- CORNARE. (2012). Zonificación de riesgo por movimientos en masa inundación y avenidas torrenciales. Municipio de San Rafael, Antioquia, Colombia.
- Oseguera, M. (2014). *LAS INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MORELIA (1868-1990)* [Thesis]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ouyang, F., Zhu, Y., Fu, G., Lü, H., Zhang, A., Yu, Z., y Chen, X. (2015). Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(7), 1781–1795. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-1018-9>
- Pascual Aguilar, J. A., & Díaz Martín, M. (2016). Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS (Serie Cuadernos de Geomática, No. 4). Centro para el Conocimiento del Paisaje, CIVILSCAPE, Instituto IMDEA Agua. ISBN: 978-84-617-7002-1.
- Parazoo, N. C., Barnes, E., Worden, J., Harper, A. B., Bowman, K. B., Frankenberg, C., Wolf, S., Litvak, M., & Keenan, T. F. (2015). Influence of ENSO and the NAO on terrestrial carbon uptake in the Texas-northern Mexico region. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(8), 1247–1265. <https://doi.org/10.1002/2015GB005125>
- Park, J., Byrne, R., & Böhnelt, H. (2017). The combined influence of Pacific decadal oscillation and Atlantic multidecadal oscillation on central Mexico since the early 1600s. *Earth and Planetary Science Letters*, 464, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.013>
- Peralta-Hernández, A. R., Balling, R. C., & Barba-Martínez, L. R. (2009). Comparative analysis of indices of extreme rainfall events: Variations and trends from southern México. In *Atmósfera* (Vol. 22, Issue 2).
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall. New Jersey
- Prieto-González, R., Avendaño García, A., Matías Ramírez, L. G., & Eslava Morales, H. (2021). *SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA, SERIE Fascículos* (1st ed.). CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES. www.gob.mx/cenapred



- Proceso. (2003, September 18). *Inundaciones en Morelia por tromba*.
<https://www.proceso.com.mx/nacional/2003/9/18/inundaciones-en-morelia-por-tromba-79122.html>
- Rivas-Gómez, E. M., Aparicio Moreno, C. E., Martínez Cruz, D. A., & Alarcón Herrera, M. T. (2022). Histórico de inundaciones, lluvias extremas y los atlas de riesgos. El caso de Victoria de Durango, México. *Región y Sociedad*, 34, e1540. <https://doi.org/10.22198/rys2022/34/1540>
- Rivas, Maribel, et al. "Determinacion de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del rio Mocoties, Merida, Venezuela." *La Revista Forestal Venezolana*, vol. 53, no. 1, Jan.-June 2009, pp. 33+. Gale OneFile: Informe Académico, link.gale.com/apps/doc/A303642834/IFME?u=anon~14edcfc1&sid=googleScholar&xid=5d24ae48. Accessed 01 Jan. 2025.
- Roblero-Hidalgo, R., Chávez-Morales, J., Ibáñez-Castillo, L. A., Palacios-Vélez, O. L., Quevedo-Nolasco, A., & González-Camachos, J. M. (2018). Daily precipitation concentration index in the Río Grande de Morelia basin. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(5), 170–194. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2018-05-07>
- Rojo, J. (s.f.). Morfometría en cuencas . Obtenido de
<http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf>
- Roldán, P. (2019). Modelo matemático. Economipedia.com. recuperado de
<https://economipedia.com/definiciones/modelo-matematico.html>
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, C., Cook, E. y Stahle, D. W. (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*, 22(1), 1-31. Recuperado de
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362009000100001
- Stahle, D. W., Burnette, D. J., Diaz, J. V., Heim, R. R., Fye, F. K., Paredes, J. C., Soto, R. A., & Cleaveland, M. K. (2012). Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics*, 39(6), 1431–1446. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1205-z>
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Griffin, D., Diaz, J. V., Cook, B. I., Williams, A. P., Watson, E., Sauchyn, D. J., Pederson, N., Woodhouse, C. A., Pederson, G. T., Meko, D., Coulthard, B., & Crawford, C. J. (2020). Dynamics, Variability, and Change in Seasonal Precipitation Reconstructions for North America. *Journal of Climate*, 33(8), 3173–3195. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0270.1>
- Televisa. (2018, August 22). *Activan Plan DN-III por lluvia e inundación en Morelia, Michoacán*. <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/clima-michoacan-hoy-22-octubre-2018-lluvias-causan-inundacion-morelia/>
- TÉMEZ, J.R. Extended and improved Rational Method. Proc. XXIV Congress, Madrid, España. Vol. A. pp 33-40. 1991.
- Terink, W., Hurkmans, R. T. W. L., Torfs, P. J. J. F., y Uijlenhoet, R. (2009). Bias correction of temperature and precipitation data for regional climate model



- application to the Rhine basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(4), 5377–5413. <https://doi.org/10.5194/hessd-6-5377-2009>
- Teutschbein, C., y Seibert, J. (2010). Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment Scale: A Review of Recent Modeling Strategies. *Geography Compass*, 4(7), 834–860. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00357.x>
- Teutschbein, C., y Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Torbenson, M. C. A., Stahle, D. W., Howard, I. M., Burnette, D. J., Villanueva-Díaz, J., Cook, E. R., & Griffin, D. (2019). Multidecadal Modulation of the ENSO Teleconnection to Precipitation and Tree Growth Over Subtropical North America. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34(5), 886–900. <https://doi.org/10.1029/2018PA003510>
- UNESCO 2007. Informe sobre desarrollo humano 2007-2008, La lucha contra el cambio climático, Crisis climáticas: riesgo y vulnerabilidad en un mundo desigual. 71-108 pp. recuperado de: <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/Publicaciones/2010/7709.pdf>
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2004). National Engineering Handbook, Part 630: Hydrology (Chapter 4). <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1712930592/29495.pdf>
- U. S. Soil Conservation Service, "National Engineering Handbook" seco 4, Supplement A, Hydrology, 1957
- USGS. (2024). GMTED View. https://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/viewer.htm
- United States Environmental Protection Agency. (2016). Climate Change Indicators: Heavy Precipitation. Retrieved December 31, 2020, from Climate Change Indicators. Recuperado de <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heavy-precipitation>
- Valverde, M. C., & Marengo, J. A. (2014). Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. *Open Journal of Modern Hydrology*, 04(01), 10–26. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2014.41002>
- VÉLEZ UPEGUI, JORGE JULIÁN y BOTERO GUTIÉRREZ ADRIANA. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES. *Dina*. 2011;78(165):58-71. ISSN: 0012-7353. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622372006>
- Vera, E., Valderrama, M. (2020). Análisis de metodologías para la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales aplicadas a cuencas de alta montaña en Colombia. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente Bogotá, Colombia.



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

- Villón Bejar, M. (2005). HidroEsta, software para cálculos hidrológicos. In *Tecnología en marcha* (Vol. 18, pp. 67–75).
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835599>
- Witze, A. (2018). Why extreme rains are gaining strength as the climate warms.
Recuperado de <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07447-1>
- Xuebin Zhang Feng Yang, P., Canada Downsvew, E., Canada, O., & Luis Santos, J. (2004). *RClimDex (1.0) Manual del Usuario*.



ANEXOS

Tabla 47. Inundaciones históricas de la ciudad de Morelia para el periodo 1944-2023 adaptado de (Oseguera, 2014)

Año	Zona afectada	Causas	Daños	Respuesta gubernamental y civil	Fuente
1944	Colonia Melchor Ocampo (Oriente)	Deterioro del bordo del río Chiquito, por extracción inadecuada de limo			AHA, Aguas Nacionales, Caja 1946, Exp. 27317, foja 2.
1948	Riberas del río Grande	Falta de mantenimiento del cauce	Terrenos enlodados que no permitían cultivar		<i>La voz de Michoacán</i> , 3 de Julio de 1948
1950	Ventura Puente, Félix Iretax	Mantenimiento de las calles			<i>La Voz de Michoacán</i> , 4 de agosto de 1955
1955	-Ventura Puente,- Félix Ireta, -Juárez. - Vasco de Quiroga, - Morelos Sur, - Andrés del Río y -prolongación Virrey de Mendoza -Melchor Ocampo	Ineficiencia del drenaje	-Infraestructura (Drenajes) -Pérdida de Sembradíos	Ayuda de los bomberos	<i>La Voz de Michoacán</i> , 20 de agosto de 1955.
1958	Ventura Puente.	Ineficiencia del drenaje.	Más de 20 casas inundadas	Evacuación con ayuda de los bomberos.	"Se inundó nuevamente la colonia Ventura Puente", en <i>La Voz de</i>
Agosto	Las calles más afectadas: Prolongaciones de las calles de	Obstrucción de cañerías.	2 completamente destruidas	Se habilitó el albergue en la Escuela	<i>Michoacán</i> ,



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

	Leona Vicario, Morelos y García Obeso, Calle Río Lerma,		Medio centenar de damnificados	Técnica Industrial "Álvaro Obregón"	17 de agosto de 1958.
1958	-Obrera- las calles García Pueblita -Felix Ireta -Felicitas del Río -Juárez		-El agua que subió considerablemente y perjudicó a 500 familias	-Auxiliaron en la evacuación Inspección General de Policía y miembros del Ejército. -Gobierno del estado y el Municipio a través de Pro- Infancia repartieron víveres. -Brigadas de salud	<i>La voz de Michoacán, 4 de julio de 1958,</i>
	Santa María		Se desplomó un cerro		
	Poblado el Retajo		Pérdida de animales y viveros		
	Colonias Industrial, 5 de mayo, Francisco Villa, Las Flores, Vasco de Quiroga, Isaac Arriaga, Av. Lázaro Cárdenas	Ineficiencia del drenaje		Ayuda de evacuación (Policía y cuerpos de Bomberos)	<i>La Voz de Michoacán, 29 de mayo de 1966</i>
1974	Colonias Ventura Puente, Las Flores, 5 de mayo, Tenencia Santiaguito,		-En algunas partes el agua subió a medio metro. -Daños materiales. -Trastornos a la circulación vial		<i>La Voz de Michoacán,</i> 22 de agosto de 1974



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

1976	Colonias: Nueva Chapultepec, del Empleado, Ventura Puente, Felicitas del Río, Díaz Ordaz, Molino de Parras, Agustín Arriaga, Ampliación del Porvenir, Industrial, López Mateos, Granjas del maestro		El agua subió a 1.50 m, 8000 damnificados Viviendas dañadas, derrumbe de una casa	Evacuación Habilitación de albergues (Palacio Clavijero, CU) - Campañas de vacunación contra la tifoidea	<i>La Voz de Michoacán</i> , 9 de octubre de 1976
1984	Calles: Virrey de Mendoza, Lago de Zirahuen, Avenida Lázaro Cárdenas Colonia Ocolusen	Ineficiencia del drenaje	El agua subió casi un metro, Trastornos a la circulación vial, Daños a viviendas, Colapso de registros		<i>La Voz de Michoacán</i> , 23 de julio de 1984
1986 Junio,	Felicitas del Río, Juárez, Prados Verdes, Las Flores, Oviedo Mota, la avenida Camelinas y la avenida Periodismo	Lluvias se atribuían a una masa de aire marítima tropical que estaba azotando la costa del estado.	-Casa dañadas		<i>La voz de Michoacán</i> , 18 de junio 1986
1986 Julio	Arterias de la Ventura Puente, Lázaro Cárdenas, Libramiento Sur y Universidad		-Trastornos a la circulación vial		<i>La voz de Michoacán</i> , 8 julio de 1986
septiembre de 2003	colonias Tres Puentes, Carlos Salazar, Primo Tapia y Prados Verdes	Tromba	Daños a vivienda		Proceso 18 de septiembre de 2003
septiembre 2005	colonia Infonavit Quinceo	Tromba	700 familias damnificadas y un deceso		La Jornada 1 de septiembre de 2005



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Julio de 2013	21 colonias afectas, Galaxia Tarimbaro, Hacienda Tinijaro, ventura puente entre otras	Lluvias intensas	Daños a vivienda y un deceso		El economista 10 de julio de 2013
Marzo de 2015	Colonias Benito Juárez, Jaujilla, Campestre Manantiales, las Higueras, Ejidal Tres Puentes, el Boulevard García de León, Primo Tapia Oriente, Carlos Salazar, Jaime Nuno	Fuertes llluvias	Daños a viviendas		Quadratin 15 de marzo de 2015
Mayo de 2016	avenidas y calles que se encuentran inundadas: Nueva Chapultepec Lázaro. Cárdenas Acueducto Villa universidad Boulevard García de León Las Américas	Lluvia intensa	Transtornos a la circulacion vial y daños a viviendas		Laborissimo y 90 grados, 9 de mayo de 2016
Junio de 2017	Boulevard García de León, en las colonias Prados Verdes y Primo Tapia	Lluvias intensas	Inundaciones y encharcamientos en al menos 20 colonias, así como varios vehículos varados		El universal, 7 de junio de 2017



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

septiembre de 2018	Colonias como Ventura Puente, Carlos Salazar, Jacarandas, Los Manantiales e Industrial, resultaron las más afectadas.	Precipitaciones causadas por la tormenta tropical "Rosa"	Provocó la caída de dos espectaculares, inundación en varias colonias y desbordamiento de una represa.		26 de septiembre de 2018, Noticieros televisa.
octubre de 2018	Colonias como Ventura Puente, Carlos Salazar, Jacarandas, Los Manantiales e Industrial, resultaron las más afectadas.	Paso del huracán Willa	afectaciones en 24 colonias de Morelia, El agua en algunos sectores superó el metro de altura.	Secretaría de Seguridad Pública informó que desde las primeras horas se sumó a las labores de ayuda a las personas afectadas por las lluvias, además de las de limpieza, primeros auxilios, desazolve, entre otras, en distintos puntos.	22 de octubre de 2018, Noticieros televisa y Informador.mx
Julio de 2019	Prados verdes, Camelinas, García de león, Ventura puente y las Americas	Tromba	Transtornos a la circulación vial		La voz de Michoacán, 21 de julio de 2019
28 Julio de 2022	las colonias con inundaciones fueron Prados Verdes, Carlos Salazar, Mariano Escobedo y Jardines de Santiaguito	Tromba	La zona más impactada fue, así, el norponiente de la ciudad, con un flujo inverso en el río Grande, lo que motivó el cierre de compuertas en los drenes Barajas e Itzicuaros.		Quadratin 28 de julio de 2022
Julio de 2022	colonias Carlos Salazar, Tres Puentes, Primo Tapia, López Mateos	Tromba	400 familias afectadas y más de 100 vehículos varados		Jornada. 28 de julio de 2022



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Julio de 2022	Ventura puente y Boulevard Garcia de Leon	Lluvias intensas	Transtornos a la circulacion vial	Elementos de la Guardia Civil de la Secretaría de Seguridad Pública (SSP) auxiliaron al menos a una decena de personas que quedaron atrapadas dentro de sus autos	Infoabe 27 de julio de 2022
Agosto de 2022	Prados verdes, Camelinas, Garcia de leon, Ventura puente y las Americas	Lluvias intensas	Transtornos a la circulacion vial		El sol de Morelia 14 de agosto de 2022

Luis David Navarro Arellano

ANÁLISIS DE INUNDACIONES ASOCIADAS A EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE MORELIA, ...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:462584558

Fecha de entrega

27 may 2025, 9:15 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

27 may 2025, 10:26 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

ANÁLISIS DE INUNDACIONES ASOCIADAS A EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN EN LA CIUDA....pdf

Tamaño de archivo

12.5 MB

163 Páginas

37.596 Palabras

191.547 Caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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



A quien corresponda,

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

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

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos	
Título del trabajo	ANÁLISIS DE INUNDACIONES ASOCIADAS A EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN EN LA CIUDAD DE MORELIA, EN UN PERIODO HISTÓRICO Y CONSIDERANDO EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Luis David Navarro Arellano	1179801d@umich.mx
Director	María Lourdes González Arqueros	lourdes.gonzalez@umich.mx
Codirector	Liliana García Romero	liliana.romero@umich.mx
Coordinador del programa	Sonia Tatiana Sánchez Quispe	quispe@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	Mejor estructuración de mis ideas

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

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



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Durante la lectura de diferentes papers
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Luis David Navarro Arellano 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 23/05/2025