

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio
Climático

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO

TESIS

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DE SUELO EN EL
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO SABINAL,
CHIAPAS, MÉXICO

PARA OBTENER EL GRADO DE
Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

PRESENTA

Daniel Alejandro Gallegos Pérez

DIRECTOR

Dr. Marcelino García Benítez

CO-DIRECTOR

Msc. Walter López Báez

ASESORES

Dr. Osías Ruiz Álvarez

Dra. Gabriela Narciso De Lima

Septiembre, 2024





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS AUTÓNOMA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 24 de octubre de 2024
Oficio No. SA/DIP/0739/2024
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Daniel Alejandro Gallegos Pérez

CVU: 341863

Candidato al Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

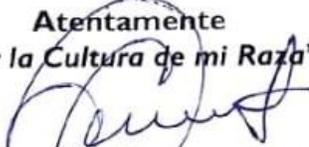
Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

UNICACH

Presente

Con fundamento en la opinión favorable emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Impacto del cambio climático y uso de suelo en el escurrimiento superficial de la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México** cuyo Director de tesis es el Dr. Marcelino García Benítez (CVU: 285884) quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo autoriza la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

Atentamente
"Por la Cultura de mi Raza"

Dra. Carolina Orantes García
Directora



C.c.p. Dra. Sandra Urania Moreno Andrade, Directora del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento.
Mtra. Ana Lucía López Pimentel, Coordinadora del Posgrado, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento
Archivo/minutario.

RJAG/COG/hyb/igp/gtr

2024 Año de Felipe Carrillo Puerto
BENEMÉRITO DEL PROLETARIADO,
REVOLUCIONARIO Y DEFENSOR DEL MAYAB.



Secretaría Académica
Dirección de Investigación y Posgrado
Libramiento Norte Poniente No. 1150
Colonia Lajas Maciel C.P. 29039
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Tel: (961) 6170440 EXT. 4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

DEDICATORIA

A mi Dios Jehová, por siempre darme más de lo que merezco en la vida.

A Gabriela, mi esposa y amiga. Por soportarme durante estos dos años.

A mis hijas Daniela Michelle y Alondra Monserrat, por existir y ser el motor que me impulsa a seguir adelante.

A mi papá Ramiro por compartir conmigo tu sabiduría.

A mi mamita Loida Cristina y mi hermosa bebe Gabriela Jasmín... ¡las extraño mucho!



Sistema Nacional de Posgrados (SNP)

Expreso mi agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por depositar su confianza en mí brindándome una beca económica que me permitió la oportunidad de incorporarme a la cuarta generación de la Maestría en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Soy optimista de que los hallazgos en este trabajo tendrán un impacto positivo en la sociedad y contribuirán al avance de la educación en nuestra nación.

No. De Becario: 341863

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Marcelino García Benítez

Valoro profundamente su orientación y el apoyo brindado a lo largo de nuestra convivencia en el posgrado. Quiero expresar mi agradecimiento por la confianza inquebrantable que ha depositado en mí para llevar a cabo este trabajo con éxito.

Al Msc. Walter López Báez

Agradezco sinceramente la confianza depositada, así como la paciencia y las valiosas observaciones que ha realizado.

Al Dr. Osías Ruiz Álvarez

precio profundamente su amistad y las contribuciones significativas que ha realizado, dado que su apoyo fue esencial para el exitoso final de esta tesis.

Ala Dra. Gabriela Narciso De Lima

Aprecio sus recomendaciones, pero estoy especialmente agradecido por el aliento y la asistencia que me ha proporcionado.

Finalmente, agradezco a mis maestros y compañeros de maestría, en especial a Leopoldo,

Anel y Ana, con los cuales compartí momentos agradables.

CONTENIDO

	Pág.
CONTENIDO	i
LÍSTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE ABREVIACIONES	vi
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	4
1.1. Escurrimiento superficial.....	4
1.1.1. Hidrograma unitario.....	4
1.2. Método del NC.....	5
1.3. La cuenca hidrográfica.....	8
1.4. CM de la cuenca.....	10
1.4.1. CM asociadas con la forma de la cuenca.....	10
1.4.2. CM asociadas con el aspecto del relieve de la cuenca.....	11
1.4.3. CM asociadas con el aspecto de la red de drenaje de la cuenca.....	11
1.5. CCS.....	13
1.5.1. AC de MOLUSCE.....	14
1.6. CC y variabilidad climática.....	17
1.6.1. Los gases de efecto invernadero.....	18
1.6.2. Causas del cambio en los patrones de la P.....	22
1.6.3. Modelos climáticos.....	24
1.6.4. Modelos de Circulación General y regional.....	24
1.6.5. Escenarios de CC.....	25
1.7. Modelación hidrológica.....	26

1.7.1. Modelos hidrológicos más utilizados	26
1.7.2. El modelo HEC-HMS	27
1.8. Estudios sobre CM de cuencas	30
1.9. Estudios sobre impacto del CC y CCS en cuencas	32
1.10. Estudios sobre la problemática de inundaciones en la CRS	33
CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA	35
2.1. Área de estudio.	35
2.1.1. Aspectos geográficos.	35
2.1.2. Antecedentes de la problemática de la cuenca	44
2.2. Metodología	50
2.2.1. Etapa I: delimitación del parteaguas y la red de drenaje de la CRS	50
2.2.2 Etapa II: obtención de escenarios de P ante CC.....	55
2.2.3. Etapa III: generación de escenarios de CCS	56
2.2.4. Etapa IV: construcción del modelo hidrológico de la CRS en el HEC-HMS.....	61
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
3.1. Parteaguas y red de drenaje de la cuenca.....	68
3.2. Escenarios de P ante CC	70
3.3. Escenarios de CCS y valores de NC	72
3.4. Escenarios de escurrimientos bajo CC y CCS	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
ANEXOS.....	79
Anexo 1. Historia del cambio de temperatura global y causas del calentamiento reciente.	79
Anexo 2. Crecimiento de la mancha urbana en la CRS.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	81

LÍSTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relaciones entre P y Pe (Gallegos (2012)).	6
Figura 2. Cuenca exorreica y su red de drenaje (Campos-Aranda, 1998)	9
Figura 3. Tipos de cuenca de acuerdo con su punto de descarga (Aparicio-Mijares, 2010).	9
Figura 4. Número de orden de corriente de Horton y de Strahler (Munro, 2010).	12
Figura 5. Cuencas hipotéticas con sus hidrogramas de avenida (Campos-Aranda, 1998).	13
Figura 6. Escalas temporales y espaciales de algunos fenómenos atmosféricos	18
Figura 7. Sistema de Modelado Hidrológico HEC-HMS (HEC, 2023).	28
Figura 8. Ubicación espacial de la CRS.	35
Figura 9. Distribución espacial de los tipos de roca predominante en la CRS (Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2005).	37
Figura 10. Distribución espacial de los tipos de suelo en la CRS (INEGI, 2007).	38
Figura 11. Distribución espacial de las elevaciones del terreno de la CRS.	39
Figura 12. Distribución espacial de las pendientes del terreno de la CRS.	41
Figura 13. Red de drenaje de la CRS (Fuente: SIATL-INEGI, 2023).	42
Figura 14. Distribución espacial del clima en la CRS (Fuente: García, 1998).	43
Figura 15. Distribución espacial actual del USV en la CRS (Fuente: INEGI, 2021b)..	44
Figura 16. Colonias afectadas por inundaciones en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez (García Benítez et al., 2022).	49
Figura 17. Etapas de la metodología de trabajo.	50
Figura 18. Red hidrográfica de la subcuenca Tuxtla Gutiérrez (Fuente: SIATL-INEGI, 2023).	51
Figura 19. Descarga de información topográfica (Fuente: INEGI, 2023c).	52
Figura 20. Descarga de MDEs LiDAR de la plataforma del INEGI (Fuente: INEGI, 2023a).	52
Figura 21. Descarga de información climatológica futura desde WorldClim.	56
Figura 22. Descarga de datos vectoriales de USV del INEGI (Geoportal de la CONABIO).	57
Figura 23. Mapas de USV para la CRS en 2007, 2014 y 2021.	57
Figura 24. Mapas limitantes de cambio.	58
Figura 25. Evaluación de la correlación de las variables limitantes de cambio	58
Figura 26. Evaluación de los cambios de área (ha) en los mapas 2007 y 2014.	59
Figura 27. Modelamiento de Transición Potencial	60

Figura 28. Resultado de la validación del modelo de CUS	60
Figura 29. Construcción del modelo de la CRS en el HEC-HMS	61
Figura 30. Descarga de la P histórica diaria (SMN-CONAGUA).	64
Figura 31. Trazo de polígonos de Thiessen en la CRS	65
Figura 32. Especificaciones de control para el 2021	65
Figura 33. Estaciones hidrométricas ubicadas en la CRS.	66
Figura 34. Descarga de información hidrométrica de la CRS.	67
Figura 35. Simulación de la CRS para el 2021.	67
Figura 36. Curva hipsométrica de la CRS	69
Figura 37. Sistema de drenaje de la CHRS y división por subcuencas.	70
Figura 38. Comparación de la P base 2021 y el escenario de P 2050 en la CRS (Fick & Hijmans, 2017).	71
Figura 39. Escenario de P en el mes de septiembre y octubre del 2050	72
Figura 40. Resultados de la Escenario de USV para 2050 en la CRS.	73
Figura 41. CCS en la CRS para el 2021 y el Escenario de 2050	73
Figura 42. Distribución espacial de los valores de los NC en el 2021 y el escenario 2050.	74
Figura 43. Comparación de resultados de los escenarios 2021 y 2050	76
Figura 44. Grupos hidrológicos de suelo en la CRS.	76
Figura 45. Comparación de la mancha urbana en la CRS en 1992 y 2009.	79
Figura 46. Urbanización de Tuxtla Gutiérrez en 1986, 2001, 2014 y 2020 (Silva et al., 2015; INEGI, 2020).	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipo de suelo de acuerdo a su grupo hidrológico (Aparicio-Mijares , 2010)	6
Tabla 2. Selección del NC (Aparicio-Mijares , 2010).	7
Tabla 3. NC por condición de humedad antecedente (Aparicio-Mijares, 2010).	8
Tabla 4. Clasificación de las cuencas de acuerdo con su tamaño (Campos-Aranda, 1998).	10
Tabla 5. Grado de acuerdo del índice Kappa (Landis & Koch, 1977)	16
Tabla 6. Modelos de simulación hidrológica más utilizados.	27
Tabla 7. Características más importantes del Modelo HEC-HMS (HEC, 2023).	28
Tabla 8. Estudios sobre CM realizados durante los últimos cinco años.	30
Tabla 9. Estudios sobre el impacto del CC y CCS en cuencas urbanas	32
Tabla 10. Tipos de roca predominante (Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2005).	36
Tabla 11. Clasificación de las pendientes del terreno y sus características principales (FAO, 2009).	40
Tabla 12. Variaciones en precipitación para clima cálido subhúmedo (Aw).	42
Tabla 13. Poblacional en la CRS de 1900 a 2020 (INESA-COLPOS, 2010; Gordillo-Ruiz y Castillo-Santiago, 2017; INEGI, 2021).	44
Tabla 14. Población en el municipio de Tuxtla Gutiérrez en 1940-2020 (HATG, 2007; INEGI, 2010 y 2021).	45
Tabla 15. Eventos de inundaciones registradas en los últimos cien años en CRS	46
Tabla 16. Métodos de cálculo de los PM de la CRS.	54
Tabla 17. Clasificación hidrológica de los suelos (CNA, 1987).	62
Tabla 18. Valores de Nc utilizados como referencia	63
Tabla 19. Estaciones climatológicas con mayor influencia en la zona de estudio.	63
Tabla 20. Estaciones hidrométricas consultadas en el BANDAS	66
Tabla 21. Parámetros morfométricos más relevantes de la CRS	68

LISTA DE ABREVIACIONES

CC	Cambio Climático
CCS	Cambio de Cobertura de Suelo
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
CRS	Cuenca del Río Sabinal
SCS	Servicio de Conservación de Suelos
P	Precipitación
°C	Grados Celsius
ha	hectáreas
NC	Número de escurrimientos o Número de Curva
CM	Características Morfométricas
IA	Inteligencia Artificial
MOLUSCE	Modules for Land Use Change Evaluation
RNA	Red Neuronal Artificial
AC	Autómata Celular
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
O ₃	Ozono
MCG	Modelos de Circulación General
RCM	Modelos Climáticos Regionales
SSP	Trayectorias socioeconómicas compartidas
CMIP	Modelos de clima acoplados
USV	Uso de suelo y vegetación
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto del CC y la dinámica del CCS sobre el escurrimiento superficial de la CRS. La simulación se realizó a través del HEC-HMS bajo un enfoque semidistribuido. El modelo fue alimentado con parámetros morfométricos de la cuenca, la cobertura vegetal, el tipo de suelo y variables de los algoritmos implementados; se consideró el método del NC-SCS, el hidrograma unitario del SCS y el método de Muskingum. No se agregó valores de caudal base, ni se efectuó la calibración y validación de los parámetros, principalmente, por la ausencia de información hidrométrica y la discrepancia temporal con los valores de P disponibles.

Para la simulación del escurrimiento en el año 2050, se consideró un escenario de P bajo CC y una proyección CCS. Se observó que la P esperada es inferior en casi un 5% a la normal climatológica considerada, y se prevé un aumento de por lo menos 2.43 ha en las superficies urbanas y desprovistas de vegetación. Los hidrogramas obtenidos prevén que para el 2050 se presentará una disminución de por lo menos el 5% en el volumen de escurrimiento superficial y un ligero incremento del 6% en el gasto pico de diciembre; lo que advierte de un posible aumento en la sensibilidad de la cuenca frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos futuros.

Estos hallazgos subrayan la urgencia de establecer estrategias efectivas para la gestión y mitigación de aguas pluviales en los proyectos de restauración de ríos. Por lo que se sugiere monitorear y modelar en tiempo real el caudal de los principales cuerpos de la cuenca, la notable magnitud del incremento en los riesgos de inundación anticipados enfatiza la relevancia de promover un desarrollo sostenible y un manejo adecuado de las aguas pluviales.

Palabras clave: Modelación hidrológica, escenarios, P y CCS.

INTRODUCCIÓN

Un elemento esencial en la gestión de los recursos hídricos, es la capacidad de conocer, medir y prever alteraciones en el escurrimiento superficial de una cuenca. Sin embargo, en todo el mundo, esta tarea se ha vuelto compleja debido a los efectos del CC y las modificaciones en el CCS. Estos factores tienen un impacto significativo en los diversos componentes del ciclo hidrológico (Kundu et al., 2017); y como resultado, la sociedad enfrenta sequías e inundaciones más frecuentes y severas, temperaturas cada vez más extremas y alteraciones en los patrones de la P (IPCC, 2023).

Efectos globales del CC y los CUS

El aumento de temperatura del sistema climático global ([Anexo 1](#)), ha provocado en las últimas décadas cambios sin precedentes que no se habían presenciado en miles de años. Entre 2011 y 2020, la temperatura superficial experimentó un aumento de 1.09 [0.95 a 1.20] °C en comparación con el período 1850-1900. En particular, hubo un incremento más significativo en la temperatura de la tierra [1.59 (1.34 a 1.83)] °C], en relación con el océano [0.88 (0.68 a 1.01) °C]) (INECC, 2022). Además, se estima que, si la tendencia en los valores de la temperatura continúa al ritmo actual, esta variable podría acrecentar 1.5 °C entre 2030 y 2052; lo que podría provocar una mayor intensidad en las precipitaciones extremas, cambios significativos en los patrones regionales de temperatura, aparición de sequías más intensas, inundaciones, olas de calor y heladas (Ohba, 2021; Robles et al., 2022).

Por su parte, los CCS provocado principalmente por el proceso urbanización, ha modificado el comportamiento del escurrimiento superficial de las cuencas. En áreas urbanas, los escurrimientos se vuelven significativamente más sensibles a cambios en la tasa de P, por lo que las inundaciones son cada vez más frecuentes y devastadoras (Ogden et al., 2011; Kourtis y Tsihrintzis, 2021). La concentración de la población en las ciudades grandes, ha generado que las cuencas urbanas sean cada vez más impermeables; lo cual es el resultado de recubrir el suelo con hormigón y asfalto, lo que disminuye la infiltración y reduce la recarga de agua subterránea (May et al., 1997; Kourtis & Tsihrintzis, 2021; Pedrozo Acuña, 2021). Los elevados volúmenes de escurrimiento generados por intensas precipitaciones, la disminución de la infiltración de agua en el suelo y la existencia de sistemas de drenaje ineficaces, provocan que las zonas urbanas sean más vulnerables a inundaciones repentinas.

Problemática de la CRS

La CRS representa un caso específico de los desafíos que enfrentan las cuencas en entornos urbanos. La dinámica poblacional ha sido uno de los factores que más ha contribuido a los CCS, y con ello a la disminución de la vegetación nativa en la región y al incremento de la superficie urbana ([Anexo 2](#)). Por ejemplo, de 1980 a 2000, la vegetación forestal primaria arbórea de la cuenca se redujo más de la mitad; cambiando de 8,551.21 ha a 3,786.27. El espacio ocupado por asentamientos humanos se duplicó, aumentando de 3,762.74 a 8,146.47 ha (INESA-COLPOS, 2010). Entre de 1992 y 2009, el área con bosques (Forestal primaria arbórea) disminuyó 8.7%; lo equivalente a 663 ha. En el mismo periodo, los asentamientos humanos, junto a los suelos desnudos, sumaron una extensión de 4,373 ha; pasando de 6,934 a 11,307 ha (Gordillo-Ruiz y Castillo-Santiago, 2017). Otro problema generado por el avance de la urbanización es la contaminación, en este sentido, se considera que en Tuxtla Gutiérrez se desechan 530 toneladas de basura diariamente (Revista Especificar, 2022). El aumento de la urbanización y su intrusión en áreas de escurrimiento natural y llanuras aluviales mediante la construcción de viviendas a márgenes del Río Sabinal y sus afluentes, el embovedados de algunas corrientes, el relleno con escombros, basura y concreto (Silva et al., 2015); modifica el comportamiento natural de la cuenca y sus cauces.

El incremento de la urbanización ha dejado repercusiones en el clima local. Desde 1980, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se ha observado un incremento del 18% en el número de días con temperatura mayor a 40 °C; y un crecimiento del 14 % en el número de noches con temperatura superior a los 28 °C (Castro-Mendoza et al., 2022). Además, se han encontrado indicios de presencia de isla de calor urbano en toda la ciudad, en varios momentos del día; con intensidades que potencialmente podrían superar los 5 °C (Zavaleta-Palacios et al., 2020).

Por su parte, las fuertes lluvias y la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos han detonado inundaciones importantes en algunas partes urbanas de la cuenca. En la literatura y en medios oficiales de consulta, se pueden encontrar algunos de estos sucesos y afectaciones. Ante tal problemática, se han implementado diversos estudios y trabajos con el propósito de atender y presentar posibles soluciones (Gobierno del Estado de Chiapas, 2004; Secretaría de Protección Civil Municipal, 2016a; Secretaría de Protección Civil Municipal, 2016b; SEMAVI, 2009; INESA-COLPOS, 2010; Instituto Estatal del Agua, 2013).

Aunque se han realizado intentos para resolver el problema de inundaciones en la región; aún hace falta información más detallada sobre las características de la cuenca, su variabilidad climática y sobre los posibles impactos futuros del CC y CCS en el escurrimiento de la cuenca. Un trabajo con estos atributos, complementaría bastante bien la información existente en aras de mejorar las capacidades de previsión tanto a corto como a largo plazo; y facilitaría elementos que permitirán diseñar mejores medidas efectivas de control de inundaciones y la construcción de un sistema de alerta temprana ante comportamientos extremo del tiempo.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto del CC y los CCS en el escurrimiento superficial de la CRS. Este estudio abordará una de las preocupaciones persistentes durante numerosas décadas en el campo de la hidrología, como lo destaca Blöschl et al. (2019) y abonará a la necesidad apremiante de realizar investigaciones que aborden de forma integral los impactos conjuntos del CC y los CCS mediante modelos hidrológicos a escalas locales (Wagner et al., 2023; Alamdari et al., 2022; Kundu et al., 2017). Ese trabajo tiene como propósito comprobar las siguientes hipótesis: Los CCS influirían de manera más significativa en el escurrimiento superficial de la CRS, que los efectos del CC en la P. También se pretende dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Qué diferencias habrá en los CCS presente y futuro en la CRS?
- ¿Ejercerá el CC alguna influencia en los patrones de P de la CRS?
- ¿La combinación del CC y CCS impactará significativamente en el escurrimiento superficial de la CRS?

Los resultados obtenidos de este trabajo, permitirán dar respuesta a las cuestiones planteadas y servirán de referencia para otros estudios similares. Además, sentará las bases para mejorar o diseñar un plan de desarrollo urbano sostenible para la zona urbana de la cuenca de estudio.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

1.1. Escurrimiento superficial

El movimiento del agua, comúnmente denominado escurrimiento, puede describirse como el flujo de un canal o producción de agua de una cuenca. Abarca la porción de P que viaja a través de la superficie terrestre o dentro de ella. Incluye el agua que aparece en las corrientes superficiales, ya sean continuas, esporádicas o temporales; y finalmente regresa al mar u otros cuerpos de agua a menor altura (Campos-Aranda, 1998). Por su parte, un escurrimiento incontrolado es un problema ambiental importante que contribuye a la erosión del suelo, al aumento del flujo de agua y a la presencia de sedimentos y contaminantes. Sin embargo, la medición del flujo de un canal directamente en estaciones de aforo, es un método eficaz pero costoso, que requiere infraestructura y mano de obra. Para minimizar gastos y ahorrar tiempo, un enfoque práctico para predecir el escurrimiento superficial incluye el uso de modelos de simulación. Estos modelos proporcionan estimaciones precisas y permiten planificar medidas de control. En los siguientes apartados se presentan algunos de los métodos indirectos para la determinación del escurrimiento en una cuenca.

Hidrograma. El hidrograma es una presentación gráfica del nivel o caudal del agua en función del tiempo. El hidrograma es la suma del flujo directo y el flujo base. El flujo directo es el flujo proveniente de la tormenta que se analiza, es decir, el flujo directo de la tormenta. El caudal base es el aporte de caudal subterráneo que proviene de tormentas pasadas y forma parte de la infiltración, pero luego sube a la superficie a través del lecho del río. El tráfico base cambia con el tiempo y normalmente cambia semanalmente, pero para fines de disponibilidad de información se supone que cambia al menos mensualmente (Aparicio-Mijares, 2010).

1.1.1. Hidrograma unitario

El método del hidrograma unitario fue creado por Sherman (1931) y se fundamenta en las siguientes suposiciones: un tiempo base constante, la linealidad o proporcionalidad, y la superposición de causas y efectos (Aparicio-Mijares, 2010); se utiliza para ilustrar el flujo del escurrimiento que se acumula aguas abajo de la red de drenaje hasta alcanzar la salida de la cuenca. Este se define como la respuesta a una unidad de P efectiva que se distribuye de manera uniforme sobre la cuenca, aplicada a una tasa constante durante una duración específica.

1.2. Método del NC

El método de NC fue desarrollado por el SCS (1972), actualmente el NRCS, desarrollado a partir de datos de lluvia de 24 horas. El NC permite estimar la altura de lluvia efectiva en cuencas no aforadas a partir de la lluvia total y las características de la cuenca (Aparicio-Mijares, 2010). El NC, exhibe una relación no lineal con los niveles de humedad del suelo, observándose valores más bajos cerca del punto de marchitez permanente y aumentando a aproximadamente 100 a medida que el suelo se acerca a la saturación. El NC, es adecuado para pequeñas cuencas agrícolas y cuencas urbanas donde no se cuentan con mediciones simultáneas de P y caudales. Al calcular la máxima retención potencial de agua y P del suelo, este método proporciona una estimación razonablemente precisa del escurrimiento (Sánchez et al., 2003).

El método SCS-CN estima el escurrimiento medio (Q) a partir de la cantidad de P y la retención máxima potencial (S), para ello utiliza valores de curvas numéricas (Francisco-Nicolás et al., 2010). Para la obtención de Q y S se utilizan las expresiones siguientes (Ecuación 1):

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (1)$$

donde:

Q = escurrimiento medio por evento (mm)

P = P efectiva por evento (mm)

S = retención máxima potencial (mm)

La condición para el uso de esta expresión, es que $Q > 0$ cuando $P \geq 0.2 S$, de lo contrario $Q = 0$.

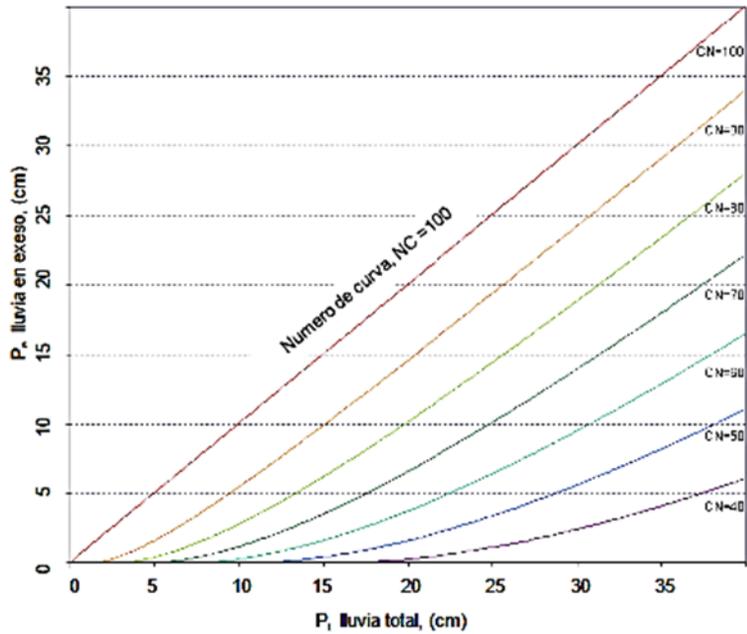
Para el cálculo de la retención máxima potencial se aplica la Ecuación 2:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

donde: CN = curva numérica (adimensional).

La altura total de la lluvia P , se relaciona con la altura de lluvia efectiva P_e , mediante las curvas que se muestran en la **Figura 1**.

Figura 1. Relaciones entre P y Pe (Gallegos (2012)).



El valor del NC se obtiene a partir de la cubierta vegetal, uso del suelo, pendiente del terreno, grupo hidrológico de suelo (A, B, C y D) (**Tabla 1**). En la Tabla 2, se muestran algunos valores de NC propuestos para diferentes condiciones.

Tabla 1. Tipo de suelo de acuerdo a su grupo hidrológico (Aparicio-Mijares , 2010).

Tipo de suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; Suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables.

Tabla 2. Selección del NC (Aparicio-Mijares , 2010).

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno (%)	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo cultivos en surco	Surcos rectos	-	77	86	91	94
	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
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
Cereales	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
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
Pastizales	-----	>1	68	79	86	89
	-----	<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79
Pradera permanente	-----	<1	30	58	71	78
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

Finalmente, con el objetivo de considerar las condiciones de humedad antecedente de la tormenta en cuestión, se realiza una corrección a los valores del NC tomando en cuenta los 5 días anteriores al evento (**Tabla 3**):

- a) Si $115 < 2.5$ cm, hacer corrección A.
- b) Si $2.5 < 115 < 5$ cm, no hacer corrección.
- c) Si $115 > 5$ cm, hacer la corrección B.

Tabla 3. NC por condición de humedad antecedente (Aparicio-Mijares, 2010).

N	N con corrección A	N con corrección A
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

1.3. La cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica se define como la superficie drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, los cuales descargan el escurrimiento superficial producido a un punto común de salida (Campos-Aranda, 1998). Esta superficie se encuentra rodeada por una línea imaginaria llamada parteaguas o filo de montaña; formada por los puntos más altos de topografía que delimita la cuenca y la separa de otras cuencas vecinas (Aparicio-Mijares, 2010). Si la cuenca tiene como punto de desembocadura otra corriente superficial ubicada fuera de sus límites, se denominada cuenca exorreica (**Figura 2 y 3**). Si todas las corrientes del sistema de drenaje desembocan dentro del parteaguas; por ejemplo, en un lago o laguna, se denomina cuenca endorreica (Aparicio-Mijares, 2010).

De acuerdo con la manera en que las características de la cuenca influyen en la relación lluvia – escurrimiento, se clasifican en dos clases: las que condicionan el volumen del escurrimiento (como el área, perímetro, tipo de suelo) y las que condicionan la velocidad de respuesta de la cuenca, como el orden de corriente, pendiente de la cuenca y los cauces (Aparicio-Mijares, 2010).

Figura 2. Cuenca exorreica y su red de drenaje (Campos-Aranda, 1998)

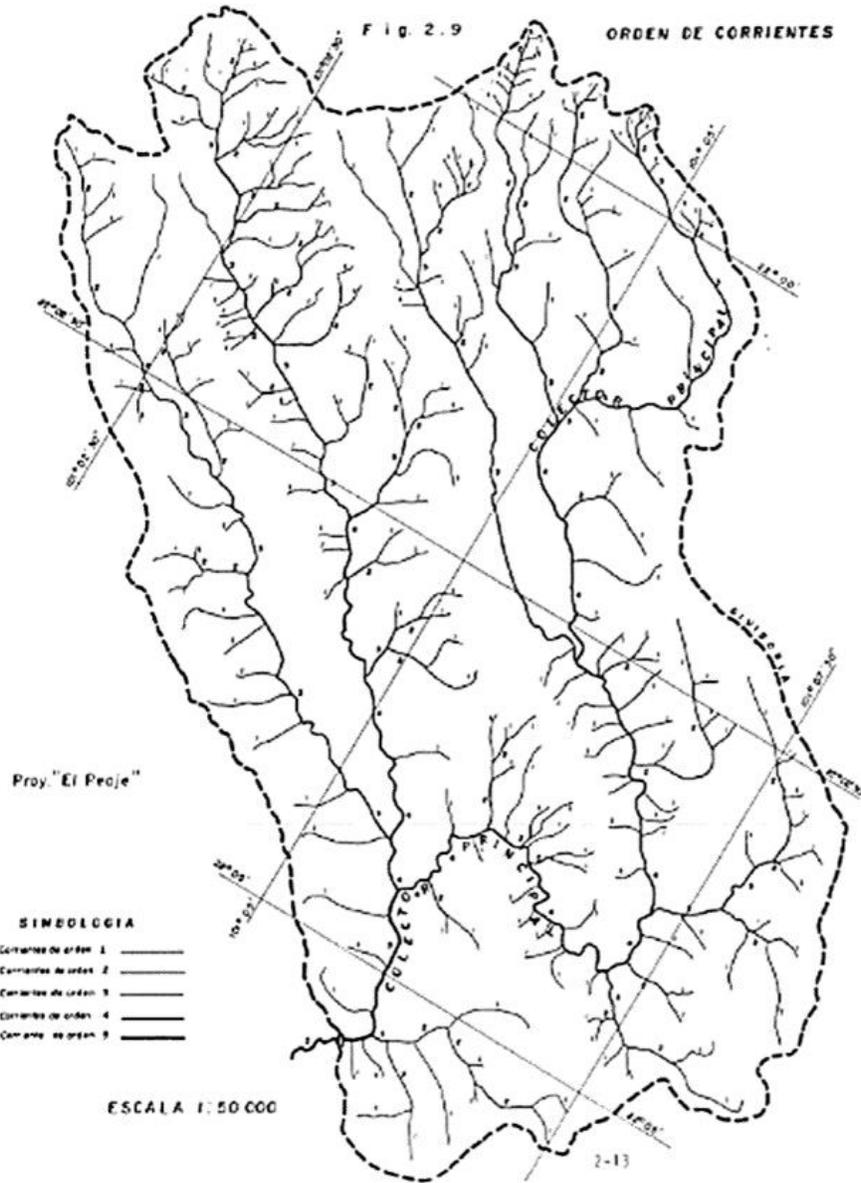
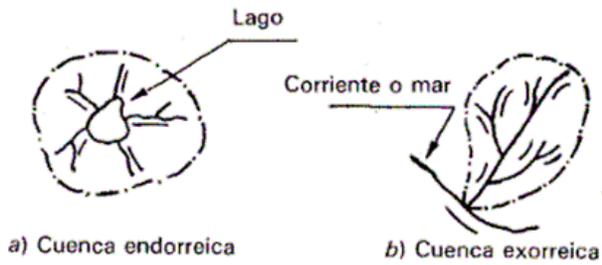


Figura 3. Tipos de cuenca de acuerdo con su punto de descarga (Aparicio-Mijares, 2010).



1.4. CM de la cuenca

De acuerdo con Withanage et al. (2015), la morfometría es la medición y análisis matemático de la configuración de la superficie terrestre, de la forma y dimensión de sus accidentes geográficos. Entre los parámetros se encuentran los siguientes:

1.4.1. CM asociadas con la forma de la cuenca.

- **Área de la cuenca de drenaje (A).** Definida como la superficie (km²) encerrada por el parteaguas (Horton, 1945). Este parámetro ejerce una influencia fuerte en la capacidad de almacenamiento de la cuenca. De acuerdo con su tamaño la cuenca se puede clasificar de diferentes maneras (**Tabla 4**).

Tabla 4. Clasificación de las cuencas de acuerdo con su tamaño (Campos-Aranda, 1998).

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia - pequeña
500 a 2500	Intermedia - grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

- **Perímetro de la cuenca (P).** Longitud (km) del parteaguas de la cuenca (Horton, 1945).
- **Longitud de la cuenca (L_b).** Longitud (km) máxima medida en línea recta paralelo al cauce principal entre la salida de la cuenca hasta el parteaguas.
- **Ancho máximo de la cuenca (A_s).** Distancia (km) horizontal de la dimensión más larga de la cuenca y perpendicular a la línea de la corriente principal (Cruz Romero et al., 2015).
- **Relación de elongación (Re).** Cociente adimensional que relaciona el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la longitud de la misma. Su expresión matemática se muestra en la Ecuación 3 (Schumm, 1956):

$$Re = 1.1284 A^{0.5} / L_b \quad (3)$$

- **Coefficiente de compacidad o índice de compacidad de Gravelius (Cc).** Valor adimensional que refiere a la forma de la cuenca. Valores cercanos a la unidad señalan una forma circular y valores superiores, denotan distorsión; alargamiento o asimetría (Gravelius, 1914). Valores

entre 1.0-1.25 es indicativo de una cuenca casi redonda a oval-oblonga; entre 1.26-1.50 es una cuenca con forma oval-redonda a oval-oblonga y clase de 1.51 a > 2 , de oval-oblonga a rectangular-oblonga (Campos-Aranda, 1998). La forma de la cuenca tiene una influencia en la forma del hidrograma de escurrimiento. Esta característica puede llegar a ser una buena señal de la presencia de inundaciones en una cuenca (López-Pérez et al., 2015).

$$C_c = 0.2821 * (P / A^{0.5}) \quad (4)$$

1.4.2. CM asociadas con el aspecto del relieve de la cuenca

Con respecto las características asociadas con el aspecto del relieve se destacan:

- **Pendiente de la cuenca (*Sb*)**. Es un indicador que relaciona la altura de la cuenca por cada unidad recorrida sobre la horizontal. Su valor es adimensional; sin embargo, se expresa comúnmente en unidades de porcentaje.
- **Elevación mínima (*h*)**. Índica la altura mínima de la cuenca expresada en metros sobre nivel del mar (m s. n. m.).
- **Elevación máxima (*H*)**. Índica la altura máxima de la cuenca expresada en metros sobre nivel del mar (m s. n. m.).
- **Relación de relieve (*Rh*)**. Razón adimensional entre el desnivel de la cuenca (*R*) y su longitud máxima (*Lb*) (Schumm, 1956).

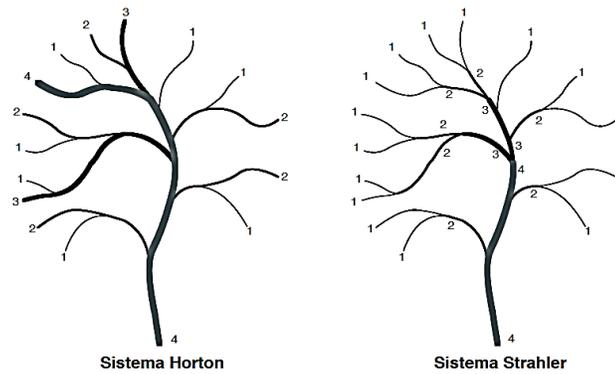
$$R_h = R / L_b \quad (5)$$

1.4.3. CM asociadas con el aspecto de la red de drenaje de la cuenca

Por su parte, entre los parámetros más considerables asociados con el aspecto de la red de drenaje se encuentran:

- **Orden de corrientes (*U*)**. Grado de bifurcación o ramificación dentro de una cuenca (Horton, 1945). Es un indicativo del número de corrientes dentro de la cuenca; a mayor número orden mayor velocidad de descarga presentará la cuenca. Horton y Strahler clasificaron jerárquicamente el orden de un tributario de una cuenca de drenaje (**Figura 4**).

Figura 4. Número de orden de corriente de Horton y de Strahler (Munro, 2010).



- **Longitud del cauce principal (L_s).** Distancia (km) aguas arriba de la salida del cauce hasta su origen, siguiendo la corriente de mayor orden hasta dividirse en dos del mismo orden. Se obtiene eligiendo el canal con mayor área de captación; repitiendo, hasta llegar a una corriente de orden uno (Campos-Aranda, 1998).
- **Número de corrientes (Nu).** Indica la cantidad de segmentos de corriente de una cuenca (Strahler, 1964).

$$Nu = Nu_1 + Nu_2 + Nu_3 + \dots + Nu_n \quad (6)$$

- **Frecuencia de corrientes (F_s).** Relación entre el número de cauces con el área de la cuenca (Horton, 1945).

$$F_s = Nu / A \quad (7)$$

- **Longitud total de corrientes (Lu).** Longitud total de los cauces presentes en la red de drenaje (Horton, 1945).

$$Lu = Lu_1 + Lu_2 + Lu_3 + \dots + Lu_n \quad (8)$$

- **Pendiente promedio del canal principal (Sst).** Relaciona la altura sobre la vertical de la corriente por cada unidad recorrida sobre la horizontal (Taylor y Schwarz, 1952). De acuerdo con Aparicio-Mijares (1992), esta característica es un indicador relevante del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta.

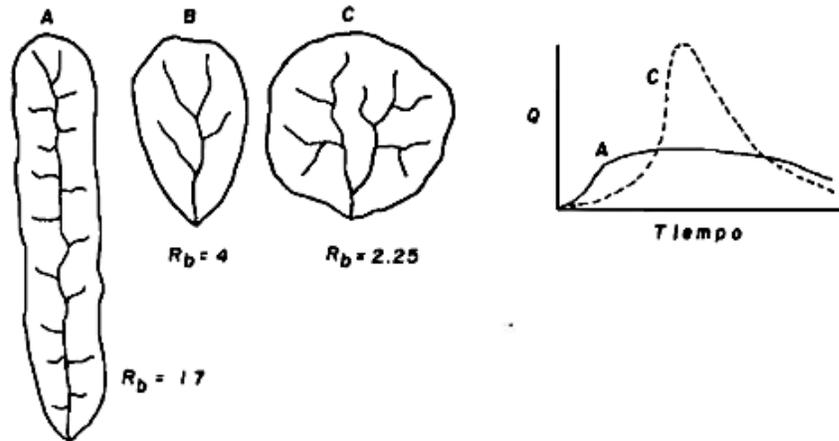
$$Sst = [\text{Número de tramos de igual longitud} / \sum(1/\sqrt{S_i})]^2 \quad (9)$$

- **Relación de bifurcación (Rb).** Cociente entre el número de cauces de cualquier orden y el número de corrientes del siguiente orden superior ($Nu + 1$) (Horton, 1945). Valores altos de

Rb son un indicativo de la presencia de un alto grado de corrientes caudalosas (Strahler, 1964).

$$R_b = N_u / N_u + 1 \quad (10)$$

Figura 5. Cuencas hipotéticas con sus hidrogramas de avenida (Campos-Aranda, 1998).



- **Densidad de drenaje (Dd).** Tiempo de escorrentía disminuye con el aumento de la densidad de drenaje (Horton, 1945).

$$Dd = L_u / A \quad (11)$$

1.5. CCS

El CCS se refiere a una modificación en características específicas de la superficie, incluido el tipo de vegetación (Patel et al., 2019). Entre las actividades recurrentes que la motivan, se encuentran: actividades agropecuarias, acuícolas, desarrollo inmobiliario, infraestructura, vías de comunicación, establecimiento de instalaciones comerciales, industriales, entre otras (Guevara-Romero y Montalvo, 2014). En la actualidad se han desarrollado diversas metodologías para la medición del CCS; como los sistemas de teledetección y la digitalización, las cuales están en función del desarrollo de nuevas tecnologías y software como: ArcGis, Quantum GIS (QGIS), Idrisi, Python, entre otros. Sin embargo, en los últimos años con el avance de la tecnología algunos investigadores (Palacios-Orejuela, 2020; Villalobos-Chacón, 2019; Principi, 2022) han recurrido al uso de la IA para el análisis proyectivo en los CCS; y entre los métodos más utilizados se encuentra el AC de MOLUSCE.

1.5.1. AC de MOLUSCE

MOLUSCE es un conjunto de módulos para la evaluación y simulación de escenarios relacionados con el uso del suelo, desarrollo urbano, entre otras (Villalobos-Chacón, 2019). Este complemento realizado por la empresa Asia Air Survey, se encuentra disponible de manera gratuita para el software QGis desde la versión 2 a la 2.18 y trabaja con AC; el cual incluye el método RNA que forma parte de los sistemas de IA. El procesamiento en el software se compone de seis etapas, que incluyen (Palacios-Orejuela, 2020): la interfaz para la introducción de datos, la evaluación de la correlación, el cálculo de la matriz de transición, el modelo de entrenamiento del potencial de transición, la simulación mediante autómatas celulares y, finalmente, la validación. El proceso matemático de simulación consiste en los siguientes pasos (Principi, 2022):

Estandarización de las variables explicativas. Se optimiza el proceso de entrenamiento del modelo a fin de obtener predicciones más precisas en la simulación. Para ello, el modelo emplea el puntaje Z. Donde z es la variable normalizada, x la variable considerada, \bar{x} media y σ es la desviación estándar.

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (12)$$

Análisis de CCS. De acuerdo con Principi (2022), el proceso consiste en medir la superficie y la ubicación de los procesos de cambio con el fin de reconocer la variación de las tendencias de la cobertura; las cuales, son la base para realizar proyecciones futuras, las cuales abarcan el mismo intervalo de tiempo del considerado. El examen se efectúa en dos periodos, identificados como tiempo inicial o tiempo 1 (T1) y tiempo final o tiempo 2 (T2). Se elabora una matriz de transición que determina la superficie ocupada por cada tipo de uso del suelo en T1 y T2, obteniendo valores de superficie y porcentajes de cambio.

Entrenamiento de la RNA. Se emplea el perceptrón multicapa, un algoritmo de retropropagación convencional que cuenta con la capacidad de evaluar de manera autónoma la precisión alcanzada y validar el modelo por sí mismo, ya que conserva la mejor red neuronal en su memoria. A lo largo de este proceso de aprendizaje autónomo, se lleva a cabo la corrección de los pesos de la red (Ecuación 13).

$$w(n + 1) = r * dw(n) + m * dw(n - 1) \quad (13)$$

Aquí, w se refiere a un vector de pesos de las neuronas, y el vector de cambios de pesos se expresa como un vector. El número de iteración está representado por n , r es la tasa de aprendizaje y m se asocia con el momento. Se aplica un aprendizaje estocástico en línea, lo que implica que se escoge una muestra aleatoria del conjunto de entrenamiento y los pesos de la red se actualizan continuamente durante el entrenamiento. Para una muestra, el error de ajuste (E) se refiere al error cuadrático medio de las salidas parciales producidas por la red (Ecuación 14), t_1 alude al valor esperado de una neurona de salida para una muestra concreta, O_i al valor efectivo que genera la neurona y d al total de neuronas de salida presentes.

$$E = \frac{t_1 - O_i}{d} \quad (14)$$

Como resultado del entrenamiento, el software presenta un gráfico que ilustra los errores cuadrados medios, el error de validación más bajo; que toma en cuenta el mejor resultado logrado por la red, y la precisión global delta, que indica la variación entre el error de validación mínimo y el error de validación en el momento actual.

Simulación con AC. El proceso de modelado continua con AC una vez que el RNA perceptrón multicapa completa el análisis de las variables explicativas. El AC proporciona información sobre las categorías actuales de cobertura de la tierra, las variables explicativas normalizadas y el modelo resultado de la RNA. Para ello, utiliza los datos de entrada correspondientes al mapa del T_2 .

A partir de la matriz de transición, el modelo predictivo fundamentado en AC examina las probabilidades de cambio. Asimismo, lleva a cabo un conteo de las celdas que requieren modificación para cada categoría de transición (Principi, 2022). El modelo identifica las transiciones más probables para cada clase mediante el conteo de celdas con mayor certeza y ajusta la categoría de las celdas según sea necesario. Las celdas con el mayor potencial de transición se transforman en áreas urbanas al concluir cada iteración del modelo, lo que representa un año de desarrollo. Como resultado, se obtiene un mapa final que ilustra el futuro urbano proyectado.

Validación del modelo. Se ejecuta mediante estadísticas Kappa. Un índice que permite la comparación de los resultados (Ecuación 15) y facilita la evaluación de la exactitud de la simulación (**Tabla 5**).

$$-1 \leq k \leq 1 \quad (15)$$

Tabla 5. Grado de acuerdo del índice Kappa (Landis & Koch, 1977)

Valor Kappa	Grado de acuerdo
< 0.00	Pobre
0 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderado
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1	Excelente

En el proceso de validación computacional del modelo, se emplean tres estadísticas de Kappa (Gantumur et al., 2022): el índice Kappa general, el Kappa correspondiente al histograma y el Kappa de localización. El índice Kappa general mide la relación entre el mapa resultante de la simulación y el mapa de validación (Ecuación 16). El índice Kappa de localización determina el grado de similitud en la distribución espacial de las categorías en los mapas comparativos (Ecuación 17).

$$k = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \quad (16)$$

$$k_{loc} = \frac{P(A) - P(E)}{P_{max} - P(E)} \quad (17)$$

El cálculo del índice Kappa histograma se efectúa directamente desde los histogramas de los mapas, y tiene como objetivo medir la similitud cuantitativa entre los dos mapas que se analizan. Se define de la siguiente manera (Ecuación 18).

$$k_{hist} = \frac{P_{max} - P(E)}{1 - P(E)} \quad (18)$$

donde: $P(A) = n \sum_{i=1}^c p_{ii}$; $P(E) = n \sum_{i=1}^c p_{iT} p_{Ti}$; $P_{max} = n \sum_{i=1}^c \min(p_{iT} p_{Ti})$

En este contexto, p_i representa los valores de la diagonal principal, p_{iT} indica el total de observaciones en la fila i , p_{Ti} se refiere al total de observaciones en la columna i , n denota el total de píxeles en el área de estudio y c es la cantidad de filas en la matriz de cruce tabular.

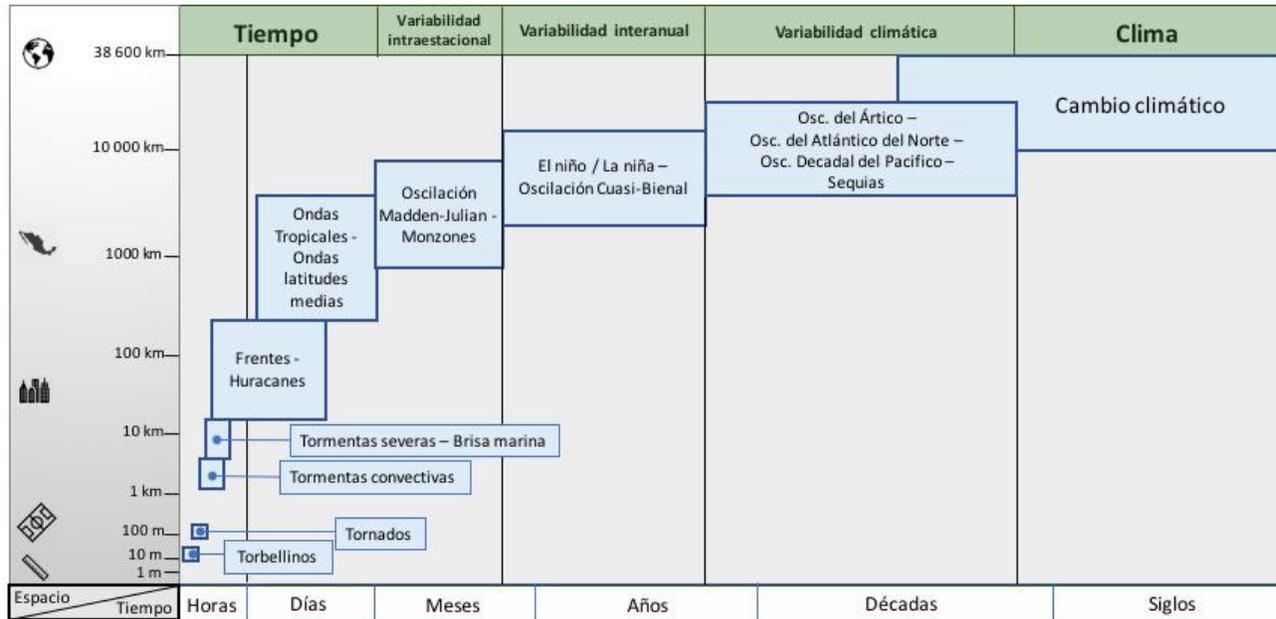
1.6. CC y variabilidad climática

La definición de CC, según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), describe las alteraciones en la composición de la atmósfera global debido a la actividad humana, que contribuye a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo similares (IPCC, 2018). El cambio en el estado del clima está relacionado específicamente con la utilización de recursos no renovables como los combustibles fósiles (IPCC, 2023). Estas variaciones pueden manifestarse en el valor medio y/o la variabilidad de sus propiedades, y tienden a persistir durante períodos de tiempo prolongados, que normalmente duran décadas o más (IPCC, 2018). Los climatólogos e hidrólogos coinciden en que el CC es la presencia de alteraciones en las condiciones promedio de la atmósfera, la hidrosfera y el sistema terrestre que persisten durante al menos treinta años; donde el impacto del CC en la composición de la atmósfera terrestre es independiente de las variaciones naturales del clima observadas durante períodos de tiempo similares (IPCC, 2014).

Por su parte, la variabilidad climática, abarca cambios en las condiciones climáticas generales causados principalmente por elementos naturales. De acuerdo con el INECC (2022), la variabilidad climática refiere a las fluctuaciones en las condiciones promedio y los atributos estadísticos del clima, incluidos los sucesos extremos y la desviación estándar, en un ámbito espacial y temporal más amplio en comparación con los eventos meteorológicos. En pocas palabras, las variaciones climáticas naturales son variaciones en las condiciones típicas de la atmósfera, causadas principalmente por elementos naturales (Torres-Puente, 2019). Algunos ejemplos de variabilidad climática incluyen la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Ártica (AO) y la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO), entre otras. Si bien la variabilidad climática y el CC comparten algunas similitudes, difieren en varios aspectos clave. En primer lugar, la variabilidad climática ocurre durante un período corto, generalmente unos pocos años (Schwarzwald y Lenssen, 2022), a una escala mayor que las variaciones de un año a otro, pero menor que los patrones climáticos a largo plazo (Torres-Puente, 2019); mientras que el CC ocurre durante un período más prolongado, generalmente décadas, siglos (30, 50, 100 años) o hasta milenios (INECC, 2022). En segundo lugar, el alcance y la escala del impacto difieren significativamente entre los dos fenómenos (**Figura 6**). La variabilidad climática puede afectar regiones o países específicos, mientras que el CC tiene un impacto global (SEMARNAT, 2016).

Finalmente, las actividades humanas son la causa principal del CC, mientras que la variabilidad climática se suscita tanto por los ciclos naturales como por las actividades humanas.

Figura 6. Escalas temporales y espaciales de algunos fenómenos atmosféricos (Torres-Puente, 2019).



1.6.1. Los gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero son responsable del calentamiento de la superficie terrestre cuando estos absorben la radiación solar; mientras que la reemisión de radiación infrarroja ayuda a enfriar la atmósfera. Entre los gases de efecto invernadero más relevantes se encuentra (INECC, 2022): el CO₂, CH₄, N₂O, vapor de agua y O₃.

El CO₂ es el contribuyente más importante al calentamiento global y representa alrededor del 80% del efecto invernadero. Su concentración en la atmósfera ha llegado a alcanzar hasta 415.95 ppm en promedio anualmente (Ruiz-García et al., 2022). El forzamiento radiativo antropogénico del calentamiento global se atribuye principalmente al CO₂, que representa aproximadamente entre el 55 y el 60% de este fenómeno (Shen et al., 2018). Desde la revolución industrial (1850-1900), la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado 40 %, lo que ha provocado un incremento de 1.1 °C en la temperatura global del planeta (2011-2020) (IPCC, 2023). El mecanismo por el cual el CO₂ provoca el calentamiento es relativamente sencillo. Las moléculas de CO₂ en la atmósfera absorben la radiación de onda larga emitida por la superficie

de la Tierra. Esta absorción hace que las moléculas de CO₂ vibren, lo que a su vez hace que emitan radiación de onda larga en todas direcciones, incluso hacia la superficie de la Tierra. Este proceso, conocido como efecto invernadero, atrapa el calor en la atmósfera terrestre y hace que el planeta se caliente (Hertzberg et al., 2017). Además de este mecanismo directo, también existen mecanismos de retroalimentación que amplifican el efecto de calentamiento del CO₂. Por ejemplo, a medida que aumentan las temperaturas, el permafrost del Ártico comienza a derretirse, liberando grandes cantidades de CH₄. Las emisiones anuales de gases de efecto invernadero procedentes del permafrost suelen oscilar entre 2,3 y 7,8 Gt CO₂-eq, con un valor modal estimado de alrededor de 6 Gt CO₂-eq por año (Yue y Gao, 2018). A medida que el hielo y la nieve se derriten, el albedo o reflectividad de la Tierra disminuye, lo que hace que se absorba más luz solar y provoque un mayor calentamiento.

El CH₄ es el segundo gas de efecto invernadero más importante. En la atmósfera presenta una concentración promedio anual de 1906.11 ppb (Ruiz-García et al., 2022). El CH₄ cuenta con un potencial de calentamiento 28 veces mayor que el del CO₂, producido a partir de procesos naturales como la descomposición de humedales (Yue y Gao, 2018); y actividades humanas como la ganadería. Entre finales de 1800 y principios de 2000, la liberación anual de CH₄ en regiones de altas latitudes mantuvo un rango de 30-40 Tg (0,75-1 Pg CO₂ -eq). Sin embargo, de acuerdo con algunas proyecciones esta cifra aumentará a 71-74 Tg (1,77-1,85 Pg CO₂ -eq) para el año 2080 (Koven et al., 2011). El mecanismo por el cual el CH₄ provoca calentamiento es a través de su capacidad para absorber y reemitir radiación infrarroja. Cuando la luz del sol ingresa a la atmósfera terrestre, calienta la superficie, que luego emite radiación infrarroja. Los gases de efecto invernadero, incluido el CH₄, absorben esta radiación impidiendo que escape al espacio. En cambio, la energía se reemite en todas direcciones, incluso hacia la superficie de la Tierra, lo que provoca que se caliente aún más. Este proceso se conoce como forzamiento radiactivo y es responsable del efecto de calentamiento del CH₄.

El N₂O es un potente gas de efecto invernadero, responsable del agotamiento de la capa de ozono estratosférico (Syakila y Kroeze, 2011; Lu et al., 2022). A pesar de su concentración relativamente baja en la atmósfera, esta se venido incrementado (Lu et al., 2022); pasando de 328 ppb en 2014 a 335.48 ppb en 2019 (Ruiz-García et al., 2022). La principal razón del aumento anual de la concentración atmosférica del N₂O, el cual asciende a 0,3%, parece atribuirse a las actividades humanas; implementación de cambios en el uso de la tierra y prácticas de gestión

agrícola (Ming et al., 2016; Lu et al., 2022). El N_2O contribuye significativamente al forzamiento radiactivo global total, representando $0,187 \text{ W/m}^2$ o el 6,36% del total. En términos de potencial de calentamiento global durante un período de 100 años, el N_2O tiene un GWP100 que es 300 veces mayor que el del CO_2 (Shen et al., 2018; Ming et al., 2016; Pauleta et al., 2013). El N_2O es responsable de aproximadamente el 6% del efecto de calentamiento de todos los gases de efecto invernadero y su concentración en la atmósfera ha aumentado un 23% desde la era preindustrial; provocando importantes alteraciones en el clima de la Tierra a escala global (Lu et al., 2022). El N_2O tiene una estructura molecular única que le permite absorber radiación de onda larga, lo que provoca un efecto de calentamiento en la superficie y la atmósfera de la Tierra. La absorción de la radiación infrarroja por el N_2O se debe a su estructura asimétrica y a la presencia de un enlace nitrógeno-oxígeno. Este enlace puede vibrar y girar en respuesta a la absorción de radiación, lo que conduce a la emisión de calor. La cantidad de calentamiento depende de la concentración de N_2O en la atmósfera. El N_2O reacciona con el ozono en la estratosfera, reduciendo su concentración. Esta reducción en la concentración de ozono conduce a mayores niveles de radiación ultravioleta que llegan a la superficie de la Tierra, lo que puede causar calentamiento y otros impactos ambientales.

El O_3 es un componente vital de la atmósfera terrestre, ya que protege la vida en la Tierra de la dañina radiación ultravioleta. Sin embargo, en la troposfera superior (UT), este gas en particular desempeña un papel crucial como importante gas de efecto invernadero (Huntrieser et al., 2016). El O_3 se forma mediante una serie de reacciones químicas que involucran óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, en presencia de luz solar. Si bien el O_3 está presente en la atmósfera en pequeñas cantidades, se forma y destruye constantemente. Una de las formas en que se forma el O_3 es a través de tormentas eléctricas. Las tormentas eléctricas generan rayos, que son una poderosa descarga eléctrica que ocurre entre regiones de cargas opuestas dentro de una nube o entre una nube y el suelo. Los rayos descomponen las moléculas de oxígeno (O_2) en átomos de oxígeno individuales (O) mediante un proceso llamado disociación. Luego, los átomos de O_2 se combinan con otras moléculas de O_2 para formar O_3 . Este proceso ocurre principalmente en la estratosfera, donde la concentración de moléculas de O_2 es mayor (Syakila y Kroeze, 2011). La intensidad y frecuencia de los rayos son los principales factores que afectan la formación de O_3 a través de tormentas eléctricas. Cuantos más rayos caen, más O_3 se forma. La concentración de moléculas de O_2 en la atmósfera también influye, ya que acumulaciones

más altas aumentan la probabilidad de disociación y posterior formación de O₃. La altitud y la temperatura de la atmósfera también afectan la formación de O₃, ya que las temperaturas más frías y las altitudes más altas inhiben su formación. Por su parte, el O₃ provoca el calentamiento debido a su capacidad para absorber y reemitir radiación infrarroja, atrapando el calor en la atmósfera. El efecto de calentamiento del O₃ es más fuerte en la atmósfera superior, donde contribuye al gradiente de temperatura entre la troposfera y la estratosfera. Este gradiente de temperatura es importante para la circulación atmosférica y los patrones climáticos. El agotamiento del O₃ en la estratosfera conduce al enfriamiento de la atmósfera superior y al calentamiento de la atmósfera inferior. Esto se debe a que el ozono absorbe la radiación ultravioleta, que calienta la estratosfera. Cuando se agota el O₃, llega más radiación ultravioleta a la atmósfera inferior, lo que provoca el calentamiento. El agotamiento del O₃ también afecta los patrones de circulación atmosférica, lo que provoca cambios en los patrones climáticos y las precipitaciones. Los aerosoles, como el dióxido de azufre, pueden reflejar la luz solar y provocar el enfriamiento de la tierra. Por ejemplo, las erupciones volcánicas liberan grandes cantidades de dióxido de azufre a la atmósfera, lo que produce un efecto de enfriamiento.

El vapor de agua es el más potente de los gases de efecto invernadero. Se estima que el vapor de agua representa alrededor del 60% del efecto de calentamiento de todos los gases de efecto invernadero. Cuando el vapor de agua absorbe calor, se vuelve más energético e irradia parte de esa energía de regreso a la superficie de la Tierra, contribuyendo al calentamiento atmosférico; puede atrapar el calor y reflejar la luz solar, lo que genera efectos de enfriamiento o calentamiento (Dlugokencky et al., 2016). El ciclo del agua es el proceso mediante el cual el agua se evapora de la superficie de la Tierra, sube a la atmósfera y vuelve a caer a la superficie en forma de P. A medida que el agua se evapora, forma vapor de agua, que sube y se enfría para formar nubes. Cuando el vapor de agua se condensa en gotas de líquido, libera calor latente, lo que contribuye al calentamiento atmosférico. Este proceso es particularmente importante en las regiones tropicales, donde las cálidas aguas del océano proporcionan una fuente constante de humedad para la atmósfera. Las consecuencias del calentamiento inducido por el vapor de agua incluyen fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes y graves, como inundaciones, sequías y huracanes, así como el aumento del nivel del mar debido al derretimiento de los casquetes polares y los glaciares.

1.6.2. Causas del cambio en los patrones de la P

A continuación, se presentan algunas de las causas de los cambios en los patrones de P en al rededor del mundo:

Aumento de la temperatura. El calentamiento de las temperaturas puede acelerar el ciclo hidrológico al aumentar la tasa de evaporación, lo que genera más precipitaciones y escorrentías (Trenberth, 2011; Sánchez-Lavega et al., 2004). La expresión propuesta por Clausius-Clapeyron (C-C) proporciona una explicación de los eventos de P extrema al proporcionar un marco teórico para comprender la relación entre temperatura y P (O’Gorman y Muller, 2010). La ecuación de C-C se puede derivar de la segunda ley de la termodinámica, su forma aproximada relaciona el cambio de fase entre vapor de agua y agua líquida, en meteorología se expresa de la siguiente manera (Sánchez-Lavega et al., 2004):

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{LP_v}{R_v T^2} \quad (19)$$

donde dP_v/dT es el cambio en la presión de vapor con la temperatura, LP_v es la entalpía de vaporización, R_v es la constante del gas para el vapor de agua y T es la temperatura absoluta.

Bolton proporciona una expresión que se considera precisa al 0.3 % para $-35\text{ °C} < T < 35\text{ °C}$ (AMS, 2024). Donde T es la temperatura en °C y la presión de vapor se expresa en kPa.

$$e_s(T) = 0.6112 \exp\left(\frac{17.67T}{T+243.5}\right) \quad (20)$$

La ecuación de C-C se ha utilizado para estudiar diversos fenómenos atmosféricos, como la formación de nubes, la convección atmosférica y la P debido a que describe matemáticamente la relación entre temperatura, presión y vaporización (Moustakis et al., 2020; Sánchez-Lavega et al., 2004; Wang et al., 2023). Explica cómo la presión de vapor de saturación de un líquido o sólido cambia con la temperatura (Sánchez-Lavega et al., 2004); a medida que aumenta la temperatura, la presión de vapor aumenta exponencialmente, esto amplifica el efecto de calentamiento, lo que puede conducir a eventos climáticos más severos, como precipitaciones intensas y olas de calor (IPCC, 2023).

Contradictoriamente a lo especulado, aunque se considera que la evaporación incrementará en el futuro debido al calentamiento global, es inquietante que algunos informes muestran que en diversas partes del mundo hay una tendencia a la baja en la evaporación terrestre (Magallanes-Quintanar et al., 2017); esta manifestación se le conoce como, “la paradoja de la evaporación”. La paradoja de la evaporación es un fenómeno importante de analizar y que

ocurre cuando el aumento de las temperaturas conduce a la disminución de la tasa de evaporación registrada (Magallanes-Quintanar et al., 2017). La paradoja puede exacerbar la escasez de agua en regiones que ya sufren estrés hídrico, conducir a una reducción de la productividad agrícola e incluso desplazar a las personas debido a la escasez de agua y los conflictos relacionados.

El rol de las partículas químicas. Las partículas químicas desempeñan un papel importante en la formación de las precipitaciones y, por ende, tienen un efecto indirecto tanto en el ciclo hidrológico como en el clima. Estas partículas pueden afectar la formación de nubes y la P al actuar como CCN, que son esenciales para la formación de nubes (Yu et al., 2020). Se ha demostrado que las regiones con altos niveles de contaminación por partículas químicas tienen patrones de P alterados. Por ejemplo, en China, los altos niveles de contaminación del aire se han relacionado con una disminución de las precipitaciones en algunas regiones y un aumento de las precipitaciones en otras (Qian et al., 2009). Las partículas químicas pueden afectar los patrones de P al alterar la cantidad y el tamaño de CCN. Cuando hay más CCN en la atmósfera, las gotas de las nubes son más pequeñas y es menos probable que se produzcan precipitaciones. Por el contrario, cuando hay menos CCN, las gotas de las nubes son más grandes y es más probable que se produzcan precipitaciones.

El rol de las micropartículas físicas. Las micropartículas físicas son pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera, como polvo, polen y cristales de sal. Estas partículas pueden actuar como núcleos de condensación, proporcionando una superficie para que el vapor de agua se condense y forme gotas. Si embargo, cantidades excesivas de micropartículas físicas pueden provocar la formación de niebla y neblina, lo que puede tener efectos negativos en la calidad del aire y la visibilidad.

El smog es un tipo de contaminación del aire que resulta de la interacción entre la luz solar, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles. El smog puede tener impactos significativos en el proceso de condensación, ya que puede alterar la composición química de la atmósfera y afectar las propiedades de las micropartículas físicas. Por ejemplo, el smog puede aumentar la acidez del agua de lluvia, lo que puede afectar dañar cultivos, bosques y ecosistemas acuáticos.

El polvo del desierto es un tipo de micropartícula física que se genera por la erosión eólica en regiones áridas y semiáridas. El polvo del desierto impacta los procesos climáticos

(Middleton, 2017), al igual que el smog, puede afectar el proceso de condensación al actuar como núcleos de condensación y alterar las propiedades de las nubes.

1.6.3. Modelos climáticos

Los modelos climáticos son consideradas herramientas computacional basadas en algoritmos matemáticos, con las cuales se pretende representar los procesos del sistema climático (INECC, 2022). Estos modelos fraccionan la tierra en celdas, computando operaciones en cada una de las rejillas, examinando variables como la temperatura, la presión del aire, la humedad y la velocidad del viento (McSweeney, 2018); sin embargo, no tiene la capacidad de describir todos los procesos del sistema climático debido a su dificultad.

La resolución de un modelo climático se determina por las dimensiones de las celdas de la cuadrícula, tanto en dirección horizontal como vertical (INECC, 2022). Por ejemplo, un modelo que utiliza celdas de 100 km de longitud y latitud se clasifica como un modelo climático global de resolución relativamente "gruesa". En contraste, los modelos de alta resolución están compuestos por celdas más pequeñas, pero en mayor cantidad. En el caso de una región específica, a mayor resolución del modelo, se puede obtener información climática más detallada. Sin embargo, es importante considerar que el tiempo de ejecución computacional se ve afectado, así como el aumento de la incertidumbre en los resultados, ya que los procesos del sistema climático a escalas regionales o locales no están completamente representados en las ecuaciones de los modelos (INECC, 2022).

1.6.4. Modelos de Circulación General y regional

En la actualidad, existen varios tipos de modelos climáticos que combinan diversos procesos con diferentes niveles de complejidad. Para obtener más detalles sobre este tema, se recomienda consultar el (INECC, 2022). Entre todos estos modelos, destacan especialmente los MCG y los RCM.

Los MCG permiten simular el clima tanto del pasado como el actual en diversas resoluciones espaciales. Además, tienen la capacidad de aplicar mayores concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) para proyectar posibles escenarios climáticos futuros (INECC, 2022). La información se origina a partir de algoritmos que rigen los procesos en cada componente del sistema climático global (como los intercambios de energía y de masa). La información arrojada por los MCG es para un cierto instante en el futuro y su resolución oscila

entre 100 y 200 km de cuadrícula, la cual es adecuada para el soporte en la toma de decisiones a escala internacional, pero no para tomar decisiones a nivel de un determinado país y menos para una ciudad. La resolución espacial de los MCG no es suficiente para tomar decisiones y entender los impactos a nivel regional, nacional y local, en especial en zonas donde el clima está altamente afectado por la topografía y los usos del suelo. Los resultados de los MCG se pueden encontrar de forma gratuita en diversos portales de descarga de datos climáticos (Meteosim, 2020). Los MCG están divididos en tres grandes grupos (Charron,2014):

1.) Modelos de Circulación General de Atmósfera (Atmospheric General Circulation Models, AGCMs), exclusivo para el análisis de la atmósfera y su interacción con la superficie terrestre continental.

2.) Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (Atmosphere-Ocean General Circulation Models, AOGCMs), acoplan las interacciones atmósfera y superficie terrestre con modelos físicos de océano.

3.) Modelos del Sistema Terrestre (Earth System Models, ESMs), incluyen ciclos e interacciones, así como cambios de vegetación y uso de suelo, que afectan la forma en que el clima responde a las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por los humanos.

Los MCR, abarcan una Región climática limitada. Pueden llegar a tener resoluciones inferiores a los 50 km. Estos modelos son alimentados con información sobre las condiciones de contorno y de inicialización con datos de modelos globales. Los MCR generalmente se generan cuando en un proyecto en específico, la orografía del país es compleja y los fenómenos de P e hidrología son importantes para los retos del proyecto (Meteosim, 2020).

1.6.5. Escenarios de CC

El escenario climático es la descripción plausible de un futuro verosímil, basado en un conjunto consistente y coherente de supuestos sobre las fuerzas determinantes y sobre sus interacciones más importantes. De acuerdo a O'Neill et al. (2020), los escenarios climáticos se emplean para investigar de qué manera podría desarrollarse el futuro bajo diversas condiciones alternativas, así como para determinar cómo se pueden alcanzar resultados favorables y prevenir aquellos que son desfavorables. A lo largo de la historia, se han empleado proyecciones de cambios globales futuros para evaluar los posibles efectos del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y sus repercusiones en el incremento de la temperatura. Es relevante

mencionar el uso de escenarios de Modelos de Cambio Global (MCG) climáticos, que están vinculados a distintos niveles de forzamiento radiativo, conocidos como Rutas de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés) (O'Neill et al., 2020). Los RCP son herramientas que permiten ilustrar la incertidumbre relacionada con los impactos climáticos esperados en el futuro.

1.7. Modelación hidrológica

El modelado, es un artificio matemático que sirve como herramienta para ordenar, examinar e ilustrar los elementos fundamentales de un sistema genuino que relaciona algo desconocido (la salida) con algo conocido (la entrada) (HEC, 2023). La definición de modelo abarca un sistema físico o teórico que sirve como representación de un objeto, escenario o fenómeno en el mundo real. Su importancia radica en su capacidad para interpretar, alterar y pronosticar el comportamiento del fenómeno antes mencionado (Gómez, 2011). A pesar de la aparente complejidad, la practicidad de los modelos radica en su versatilidad, lo que permite su aplicación para una multitud de propósitos que incluyen predicción, diagnóstico y evaluación (Arrieta Vera & Díaz Moreno, 2015).

En el ámbito de la modelación hidrológica, el término se refiere al método mediante el cual se representan matemáticamente los intrincados procesos del sistema hidrológico de una cuenca, lo que permite una simulación simplificada del proceso de lluvia y escorrentía (Jorquera et al., 2014; Montecelos Zamora, 2018). La modelación hidrológica es utilizada para una diversidad de estudios, como, por ejemplo (HEC, 2023)

- 1) Planificación y diseño de nuevas instalaciones de conducción hidráulica y control de agua.
- 2) Operar y/o evaluar las instalaciones existentes de conducción hidráulica y control de agua.
- 3) Preparación y respuesta ante inundaciones y/o sequías.
- 4) Regulación de las actividades de las llanuras aluviales.
- 5) Desarrollar planes que utilicen el agua para mejorar la función ambiental.

1.7.1. Modelos hidrológicos más utilizados

En la **Tabla 6** se presentan la descripción de algunos modelos hidrológicos más comúnmente utilizados en el mundo. Aunque en la literatura se encuentran documentados diversos modelos hidrológicos, es importante señalar que, de todos estos, el HEC-HMS se destaca por tener un entorno amigable y de fácil uso, además ha sido uno de los modelos más

utilizados en diversos países para la evaluación del impacto del CC en los escurrimientos superficiales de cuencas hidrográficas.

Tabla 6. Modelos de simulación hidrológica más utilizados.

Modelo hidrológico	Propósito específico	Autor(es)
ANSWERS	Simula el flujo superficial y del subsuelo, la producción y transporte de sedimentos.	Jorquera et al., (2014)
Hydro-BID	Simulación hidrológica y gestión de recursos hídricos en Latinoamérica y el Caribe (LAC), bajo escenarios de CC.	Nalesso (2014)
HEC-HMS	Simula procesos hidrológicos completos en sistemas de cuencas hidrográficas.	HEC (2022)
SWAT	Evalúa el escurrimiento, el impacto del uso y manejo de la tierra sobre la producción, la calidad del agua, el movimiento de sedimentos y nutrientes en cuencas hidrológica.	Zamora (2018)
TOPMODEL (Topography based Hydrological Model)	Calcula la lluvia caída en la zona saturada, flujo superficial o subsuperficial junto con la P excedente de la zona no saturada luego de la infiltración.	Jorquera et al., (2014)
WEAP	Planificación de recursos hídricos.	Escobar et al. (2013).
TREX	Modela el escurrimiento, erosión, transporte de sedimentos y contaminantes.	Jorquera et al., (2014)
The Variable Infiltration Capacity model (VIC):	Análisis de tendencias de flujos y estados hidrológicos, modelado climático acoplado y la evaluación del impacto del CC.	Hamman et al., (2018)

1.7.2. El modelo HEC-HMS

El HEC-HMS fue creado en los años 60's por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y cuenta con una gama amplia de funciones para realizar simulaciones hidrológicas. Este software es de acceso libre y se puede descargar desde su página oficial de internet (<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>). HEC-HMS, es un sistema de modelado hidrológico, está diseñado específicamente para replicar los intrincados procesos de hidrología dentro de los sistemas de cuencas dendríticas (**Figura 7**). Este software abarca una amplia gama de técnicas de análisis hidrológico convencionales, como infiltración de eventos, hidrogramas unitarios y enrutamiento hidrológico. Para mejorar aún más su funcionalidad, HEC-HMS proporciona herramientas de análisis complementarias para optimizar modelos, predecir el flujo, reducir el área de

profundidad, evaluar la incertidumbre del modelo, evaluar la erosión y el transporte de sedimentos y analizar la calidad del agua (HEC, 2023). En la **Tabla 7** se esbozan algunas de las características más importantes del modelo hidrológico HEC-HMS extraído del Manual de referencia técnica del HEC-HMS (HEC, 2023).

Figura 7. Sistema de Modelado Hidrológico HEC-HMS (HEC, 2023).

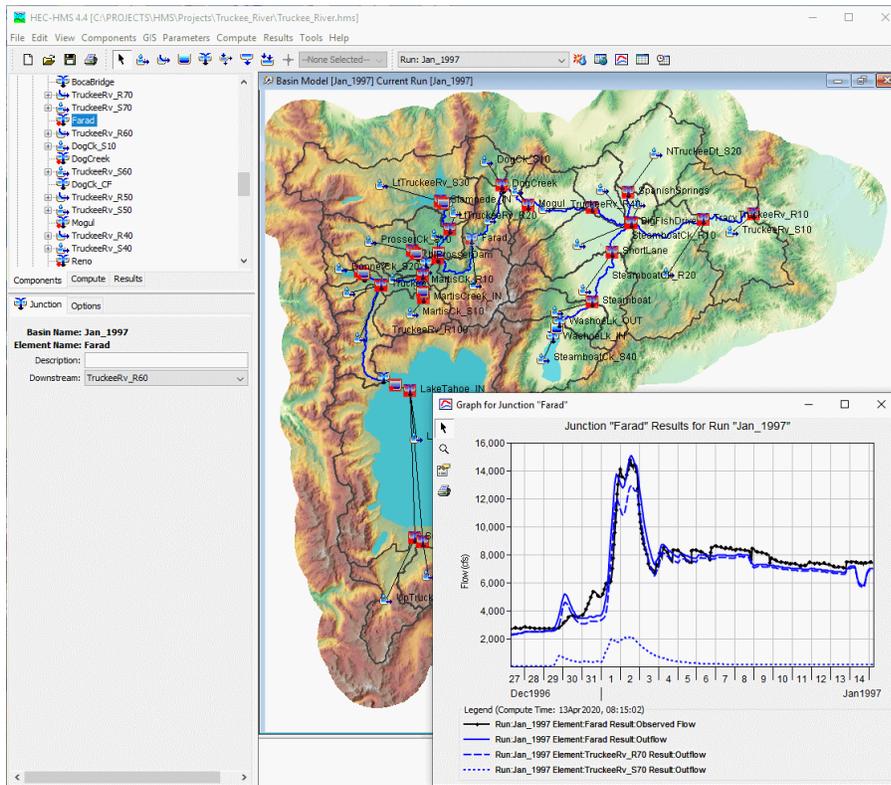


Tabla 7. Características más importantes del Modelo HEC-HMS (HEC, 2023).

Característica del HEC-HMS	Descripción
Modelo de cuenca	Representación física de una cuenca hidrográfica, mediante el uso de una red dendrítica que conecta todos los componentes de la cuenca. Estos componentes constan de subcuencas, tramos, uniones, embalses, desvíos, fuentes, sumideros y bombas, todos los cuales son esenciales para simular con precisión un área de inundación tierra adentro y el proceso de escorrentía.
Especificaciones de control (Simulación hidrológica)	Las especificaciones de control, un modelo de cuenca y un modelo meteorológico se combinan para formar una simulación. Esta ejecución de simulación se rige por parámetros de tiempo, incluida una fecha y hora de inicio y finalización designadas, así como un rango de tiempo específico. El resultado de la simulación se puede visualizar a través de un mapa de cuencas, una tabla y un gráfico de series de tiempo que representan los distintos elementos.

Continuación de la **Tabla 7**.

Característica del HEC-HMS	Descripción
Optimización del modelo.	La herramienta permite la estimación automática de la mayoría de los parámetros utilizados en los métodos de cálculo. Ofrece siete funciones objetivas distintas que evalúan la precisión de los resultados calculados en comparación con el flujo observado. Además, proporciona dos métodos de búsqueda para minimizar la función objetivo y la opción de imponer restricciones para limitar el espacio de parámetros durante el proceso de búsqueda.
Pronóstico de caudales	La utilización de un modelo de cuenca, un modelo meteorológico y parámetros de control, los cuales crean una simulación que pronostica condiciones futuras.
Reducción de área de profundidad.	Con este método se calcula el caudal en una gran cuenca de manera sencillo. Simplemente se eligen las ubicaciones deseadas para las estimaciones de flujo; y el área de tormenta se ajusta automáticamente para calcular con precisión el área de tormenta correspondiente para cada punto seleccionado.
Evaluación de la incertidumbre del modelo.	Al utilizar funciones de distribución de probabilidad (PDF), este método permite la representación de parámetros asociados con variables de salida; incluido el flujo máximo, el volumen y la elevación de un embalse. Posteriormente, se pueden realizar simulaciones de Monte Carlo para capturar y describir eficazmente las incertidumbres en estas variables.
Erosión y transporte de sedimentos.	Para las áreas rurales, se utiliza el enfoque MUSLE para calcular la erosión superficial en elementos de subcuencas, mientras que en ambientes urbanos se emplea el enfoque de acumulación/lavado.
Conexión SIG	Entre sus características se incluyen herramientas para la integración de SIG, que permiten al usuario generar un modelo de cuenca utilizando un modelo de elevación digital. Se pueden eliminar los sumideros, se puede calcular la dirección del flujo y la acumulación, se pueden identificar los arroyos en función del área de drenaje, se pueden definir los puntos de interrupción; y en última instancia, se puede delinear una cuenca.

1.8. Estudios sobre CM de cuencas

La caracterización morfométrica (CM) de una cuenca es una técnica realizada en investigaciones hidrológicas con fines de solución de problemas ambientales. La cantidad de escurrimiento está influenciada por diversas condiciones climáticas y las características únicas de cada cuenca (Alamdari et al., 2022). Entre algunas de las aplicaciones de la CM de cuencas se encuentran: control de inundaciones, identificación de áreas con escurrimiento y erosión altos y como ayuda en el desarrollo de estrategias para la reducción de los impactos negativos de estos procesos (Singh et al., 2021;). En la **Tabla 8** se presentan los estudios utilizados como referencia en la CM de la CRS. Estos estudios demuestran que la CM es una herramienta poderosa para evaluar el comportamiento natural del escurrimiento y es un insumo en la MH.

Tabla 8. Estudios sobre CM realizados durante los últimos cinco años.

País	Zona de estudio	Resultados destacados	Autor (es)
Colombia	Cuenca alta del río Sauce Grande	Los SIG permitieron conseguir parámetros morfométricos con un grado de precisión alto, demostrando que la herramienta permite cálculos razonables y precisos.	Solano y Martínez (2021).
	Cuenca del río Sinú	Encontraron en la cuenca heterogeneidad geológica y delimitaron zonas potenciales de captación de agua.	López-Ramos et al. (2022).
Ecuador	Cuenca Cañita de la parroquia Charapotó	Establecen que el análisis morfológico de una cuenca es importante para conocer su comportamiento hidrológico.	Caicedo Toro et al. (2021).
Etiopía	Cuenca Gilgel Abay	Identificaron susceptibilidad a inundaciones y erosión del suelo en la parte superior de la cuenca.	Bogale (2021).
Filipinas	Cuencas Loboc y Wahig-nabangade la provincia de Bohol	Detectaron que ambas cuencas eran altamente susceptibles a los procesos de erosión.	Torre Franca y Otadoy (2022).
Indonesia	Se analizaron 17 cuencas hidrográficas pertenecientes a la cuenca del río Serayu-Bogowonto.	Encontraron correlación fuerte entre el caudal máximo, la forma de la cuenca y la erosión del suelo.	Agus Suharyanto et al. (2020).

Continuación de la **Tabla 8.**

País	Zona de estudio	Resultados destacados	Autor (es)
México	Cuenca El Salto, Durango	Las características del relieve indican que la cuenca es moderadamente accidentada, con un riesgo mínimo de erosión.	Méndez-Gutiérrez et al. (2021).
	Cuenca Tepic-Xalisco, Nayarit	El riesgo de inundaciones en la cuenca es bajo.	López-Huerta et al. (2022)
	Subcuenca del río Mezcalapa, Chiapas.	Con base en los parámetros morfométricos existe una inclinación mínima a acumular cantidades significativas de agua de escorrentía.	Álvarez-Soberano y Medrano-Pérez (2020).
India	Cuenca del río Murredu ubicada en el estado de Telangana.	Priorizaron 14 subcuencas con base en su morfometría, el uso de suelo y su cobertura vegetal para la gestión de sus recursos naturales.	Shekar y Mathew (2022).
	Cuenca de Bamni Banjar de Madhya Pradesh	Definieron con éxito las áreas susceptibles a la erosión.	Kumar y Sarkar (2022).

1.9. Estudios sobre impacto del CC y CCS en cuencas.

En la bibliografía disponible, son relativamente pocos los estudios encontrados sobre los efectos combinados del CCS y el uso suelo en los escurrimientos superficiales de cuencas urbanas a escala local (Wagner et al., 2023). Lo anterior, a pesar de su utilidad para la gestión eficaz de los recursos hídricos, anticipar y prevenir desastres por inundaciones mediante el desarrollo de estrategias mejoradas de mitigación y adaptación (Liu et al., 2023; Alamdari et al., 2022). En la **Tabla 9** se presentan los principales trabajos consultados sobre esta temática, los cuales fueron utilizados como referencia en la elaboración del presente estudio.

Tabla 9. Estudios sobre el impacto del CC y CCS en cuencas urbanas.

País	Zona de estudio	Modelos utilizados	Objetivo general	Autor (es)
Irán	Cuenca del Mar Caspio en la parte noreste del país.	Modelar los impactos del CC y el uso de la tierra en la seguridad hídrica en una cuenca boscosa semiárida utilizando InVEST	Estudiar la influencia de la variabilidad climática y los CCS de la tierra en los recursos hídricos	Daneshi et al. (2021)
Estados Unidos	Dos pequeñas subcuencas de la cuenca alta Rocky Branch Creek, Columbia, Carolina del Sur.	Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM) de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA).	Evaluar cómo el uso futuro de la tierra y el CC afectarán la dinámica de flujo de la parte alta de la cuenca Rocky Branch en 2035 y 2060, determinando su influencia relativa.	Hung et al. (2020)
	Cuenca Broad Run, en el norte de Virginia.	Modelos Climáticos Regionales (GCM-RCM), SWMM y Chesapeake Bay Land Modelo de Cambio (CBLCM)	Evaluar el impacto de los cambios previstos en el clima y el CUS sobre el escurrimiento y las cargas contaminantes de la cuenca de estudio.	Alamdari et al. (2022)
Colombia	Subcuenca del Río Frío localizada en la parte alta de la cuenca del Río Bogotá	Modelo hidrológico SWAT, Modelo de autómatas celulares MOLUSCE y modelo MIROC-ESM para el escenario RCP 4.5.	Evaluar el impacto del CC y de los CCS en los caudales de la cuenca del río Frío	(Espinosa-Ballén, 2019)

Continuación de la **Tabla 9**

País	Zona de estudio	Modelos utilizados	Objetivo general	Autor (es)
India	Cuenca de los ríos Mula y Mutha, situada en los Ghats occidentales, aguas arriba de la ciudad de Pune, estado de Maharashtra.	LaWaCoMo (ejecución acoplada), SWAT y CLUE-s.	Examinar las conexiones y dinámicas entre la disponibilidad de agua, los CUS y los impactos del CC.	Wagner et al. (2023).
India	Cuenca en Madhya Pradesh, que forma parte de la cuenca del río Narmada,	Los modelos LS-SVM, SDSM, Cadena de Markov y el Modelo SWAT.	Evaluar las alteraciones en el futuro equilibrio hídrico, mediante un examen de los efectos separados y combinados de las modificaciones del clima y del uso de la tierra.	Kundu et al. (2017).
China	Cuenca del río Jinghe (JRB)	Modelo GFDL-ESM2M y CA-Markov combinados con el modelo SWAT	Evaluar cuantitativamente los impactos combinados de los cambios en el uso/cobertura de la tierra (LUCC) y el CC en los escurrimientos de la JRB.	Liu et al. (2023).
Cuba y México	Cuenca del Río Cauto y Cuenca de Guadalupe.	SWAT, Modelo de Circulación Regional (MCR) RegCM4.3	Modelar el efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas bajo un escenario de CC.	(Montecelos-Zamora, 2018)

1.10. Estudios sobre la problemática de inundaciones en la CRS

Se realizó una revisión exhaustiva en la literatura disponible sobre estudios referentes que aborden de forma conjunta el CC y el CUS en la CRS. Sin embargo, no se encontró evidencia de trabajos desarrollados con estas características para la zona de estudio o en el estado de Chiapas.

Sin embargo, organismos e instituciones gubernamentales han realizado diversos trabajos con la finalidad de dar solución a los problemas de inundación que aqueja a la CRS. Entre algunos de estos, se destacan los siguientes: “Estudio de Aprovechamiento Hidráulico Integral y de Control de Inundaciones de la Cuenca Río Sabinal, México” (Gobierno del Estado de Chiapas, 2004), realizado por la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) en 2004, por solicitud del Gobierno del Estado de Chiapas a través de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento; sus objetivos fueron generar alternativas de solución para evitar o reducir el riesgo

de inundaciones en las zonas urbanas de la cuenca; derivado de las inundaciones ocurridas el 25 de junio de 1996 y el 6 de octubre de 2003. El Atlas de Riesgos del municipio de Tuxtla Gutiérrez (Secretaría de Protección Civil Municipal, 2016a), aprobado por la Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) en 2013. El “Atlas de Riesgos Tuxtla Gutiérrez (Actualización 2015)” (Secretaría de Protección Civil Municipal, 2016b), no aceptable por el SEDATU (Marroquín, 2023; Leyte, 2023). El “Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Subcuenca Río Sabinal” (SEMAVI, 2009), realizado por la Secretaria de Medio Ambiente y Vivienda por instrucciones del Gobierno del Estado de Chiapas; generado como herramienta de planificación para regular y orientar el uso del suelo y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en los municipios que habitan en las inmediaciones de la cuenca de estudio; contiene la descripción de las condiciones de los subsistemas natural, económico y social del área de estudio y las acciones a implementar para la conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos de la cuenca. El Plan de gestión y manejo integral de la cuenca del Río Sabinal (INESA-COLPOS, 2010) y el Plan Maestro de manejo integral y aprovechamiento sustentable del Río “El Sabinal”, Chiapas (Instituto Estatal del Agua, 2013); ambos estudios enfatizan aspectos de conservación, restauración y protección de los recursos naturales y apuntan a la inserción de medidas de conservación de los recursos naturales en los sistemas productivos existentes de la cuenca de estudio.

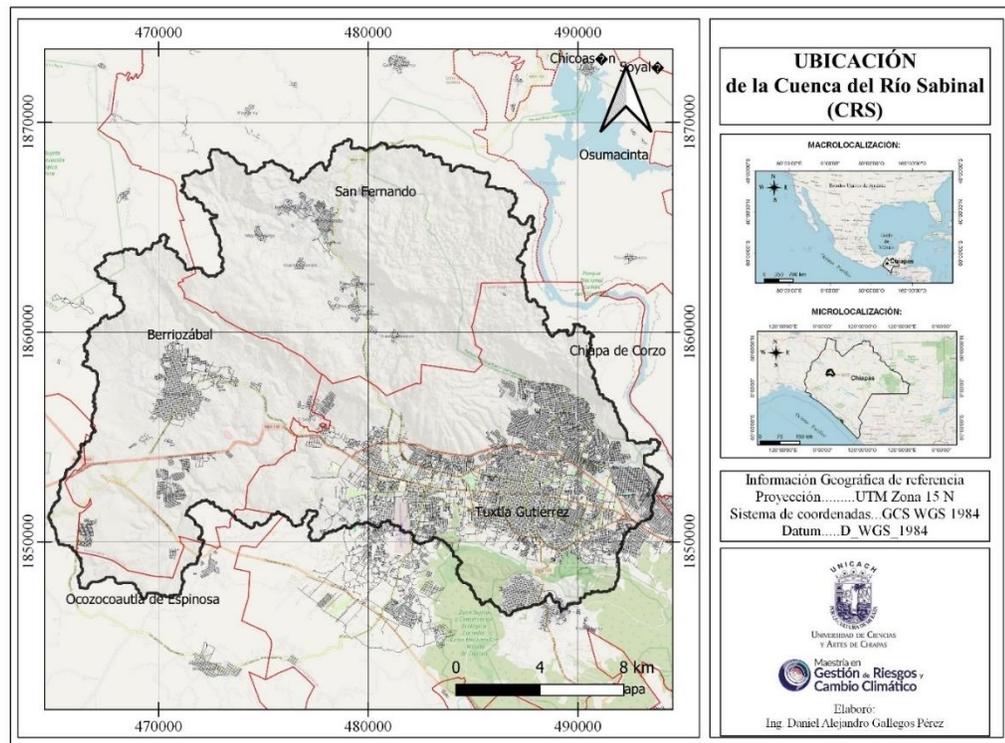
CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio.

2.1.1. Aspectos geográficos.

La CRS se encuentra ubicado en el sureste de México, en el estado de Chiapas; entre la latitud $16^{\circ}44'38.36''N$, longitud $93^{\circ}19'57.19''O$ y la latitud $16^{\circ}46'25.44''N$, longitud $93^{\circ}3'21.02''O$, en la Región Hidrológica número 30: Grijalva Usumacinta. En el territorio de la cuenca se encuentran parte de los municipios de Tuxtla Gutiérrez (38.9%) (16,548.42 ha), San Fernando (32%) (13,627.88 ha), Berriozábal (26.5%) (11,281.69 ha) y Ocozocoautla de Espinosa (2.5%) (1,073.45 ha) (**Figura 8**).

Figura 8. Ubicación espacial de la CRS.



a) Geología

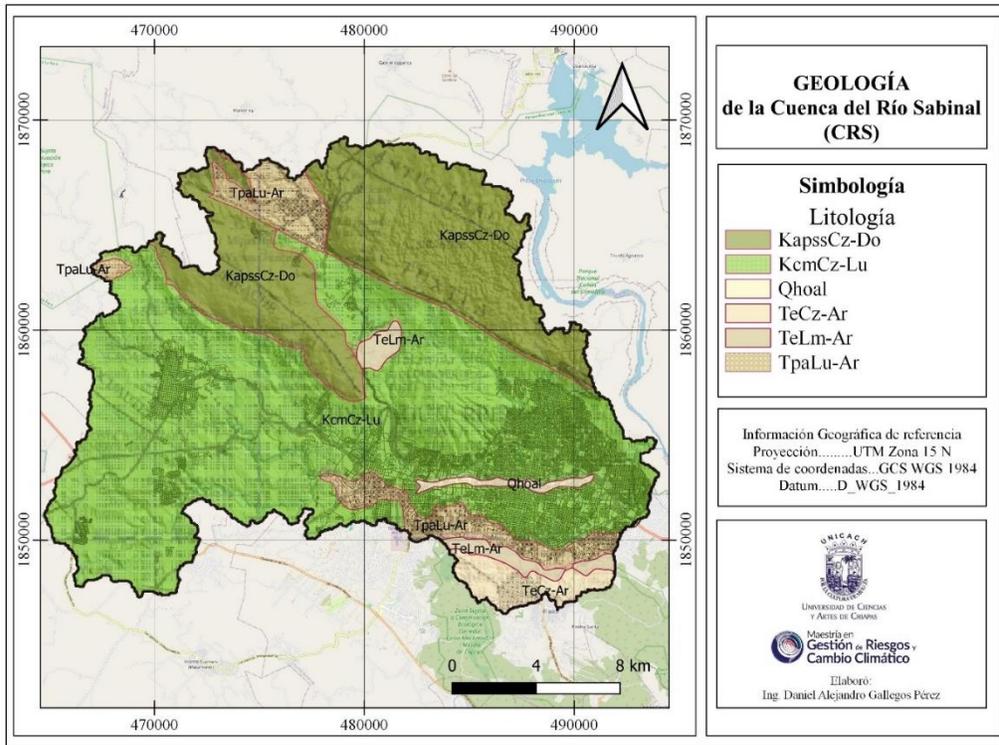
En el área de estudio se encuentra la falla Tuxtla y tres anticlinales: el Sumidero, Turipache y Suchiapa (Secretaría de Protección Civil Municipal, 2016a). Además, la cuenca está conformada por rocas de la era Mesozoico y Cenozoico de origen sedimentaria; resultado de procesos geológicos como la meteorización, la erosión de las rocas existentes y su deposición (clástica, bioquímica y química) en ambientes continentales y marinos (INEGI, 2021c). El tipo

de roca que más destaca es la Caliza-Lutita (Kcet Cz-Lu), con el 61.5% de la cuenca; aflora en la parte baja y media incluidas las zonas urbanas. Consiste en piedra caliza gris erosionada a gris oscuro, mesogénica, con textura de lutita a arenisca, arcilla con bandas de nódulos y pedernal, lutita carbonosa intercalada y cuerpos de marga de bentonita (Servicio Geológico Mexicano, 2008). Esta asociación es del periodo Cretácico Superior del Campaniano Mastrichtiano de la formación Ocozocoautla – Angostura; distribuida espacialmente al norte, noroeste, oeste y sureste del sinclinal Copoya. En segundo lugar, se encuentra la Caliza-Dolomía (Ka Cz-Do), distribuida sobre el lado norte de la cuenca con una proporción del 26.37% de la superficie. Este tipo de roca son formadas por carbonatos de origen químico (Secretaría de Protección Civil Municipal, 2016a), compuesto por piedra caliza de color gris claro con lecho mediano o macizo (Servicio Geológico Mexicano, 2008); distribuidas principalmente al norte de la cuenca. Por último, se encuentran sobre la parte media-baja del Río Sabinal el depósito Aluvial (al); considerado un tipo de suelo (INEGI, 1999), acumulado a partir de material suelto de roca preexistente que es transportado por flujos de agua superficiales (INEGI, 2021c). Engloba los depósitos que ocurren en las llanuras de inundación y los valles de los Ríos (INEGI, 2005). La superficie que ocupan los tipos de roca predominante y su distribución espacial se pueden consultar en la **Tabla 10** y **Figura 9**.

Tabla 10. Tipos de roca predominante (Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2005).

Clave	Litología	Superficie (ha)	Superficie (%)
Qhoal	Aluvial	276.15	0.65%
TeCz-Ar	Caliza-Arenisca	1132.75	2.66%
KapssCz-Do	Caliza-Dolomía	11215.09	26.37%
KcmCz-Lu	Caliza-Lutita	26174.71	61.54%
TeLm-Ar	Limolita-Arenisca	776.01	1.82%
TpaLu-Ar	Lutita-Arenisca	2956.74	6.95%
	Total	42,531.45	100%

Figura 9. Distribución espacial de los tipos de roca predominante en la CRS (Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2005).

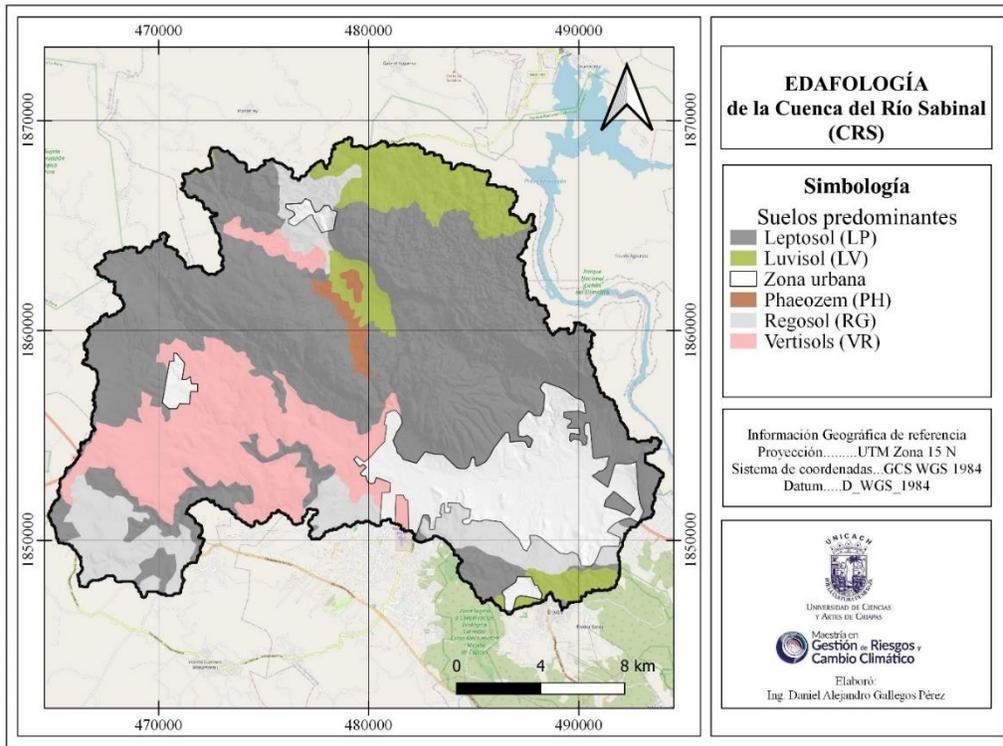


b) Edafología

En la cuenca se encuentran presentes cinco grupos de suelo (**Figura 10**). El 50.5 % de la cuenca (21481.914 ha) contiene Leptosoles (LP) con suelos muy poco profundos (inferior a 10 cm). El 16.4% (6975.378 ha) del territorio lo ocupan los Vertisoles (VR) característico de suelos con proporciones altas de arcillas expansibles (INEGI, 2007). En condiciones secas esta clase de suelos forma grietas anchas y profundas que se originan de la superficie hacia abajo (IUSS Working Group WRB, 2015). El VR es propio de las riberas de ríos y llanuras de inundación. La superficie ocupada por suelos de tipo Regosol (RG) es de 10% (4260.406 ha). Los Regosoles son suelos poco desarrollados que se parecen mucho al material de origen (INEGI, 2017^a). Los Luvisoles (LV) tiene una superficie de 8.4% (3577.6 ha); el Luvisol es un suelo con mayor acumulación de arcilla en el subsuelo, presentando un estrato árgico con arcillas altamente reactivas y alta saturación de bases a cierta profundidad (INEGI, 2017^a). Finalmente, los Phaeozem (PH) ocupan el 1.1% (451.365) del área de la cuenca; esta clase de suelo es de color oscuro rico en materia orgánica, alta saturación alcalina, poroso y fértil; por lo que es una tierra

excelente para cultivos (INEGI, 2017a). El resto de la superficie de la cuenca es área urbana, por lo que no se conoce con exactitud el grupo de suelo al que pertenece.

Figura 10. Distribución espacial de los tipos de suelo en la CRS (INEGI, 2007).

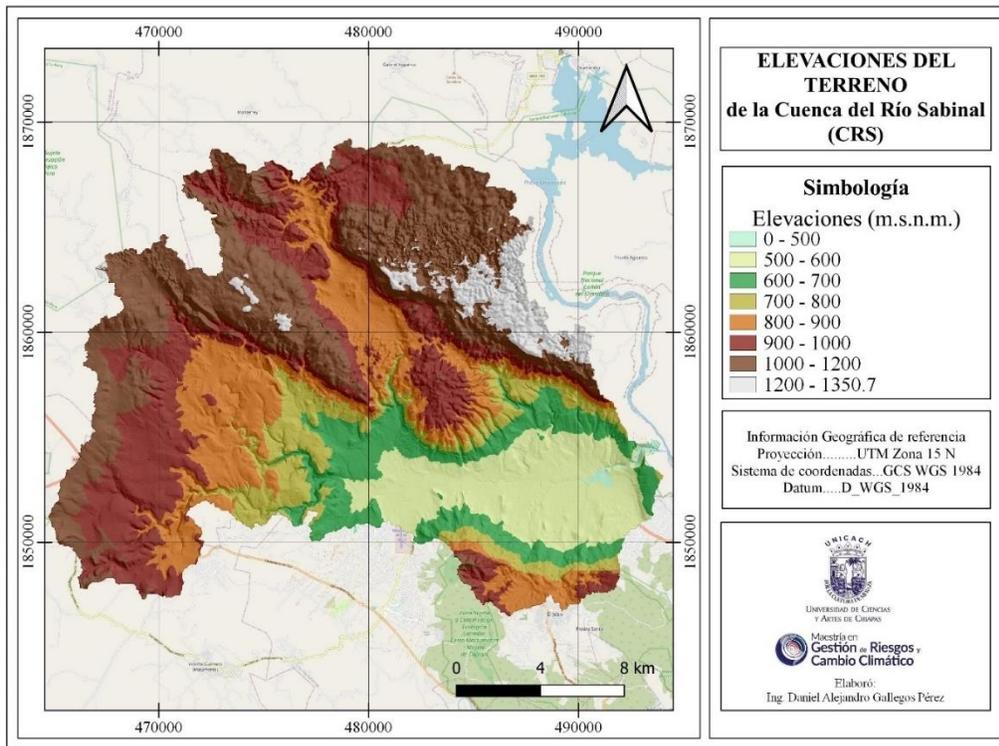


c) Topografía y relieve

Las elevaciones de la cuenca van desde los 382.91 a 1,350.7 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Las más pronunciadas están en la parte norte de la cuenca, en territorio del Parque Nacional Cañón del Sumidero; y las más bajas a la salida, en la intersección del Río Sabinal y el Río Grijalva (**Figura 11**). De acuerdo con las cartas topográficas 1:50 000 de Tuxtla Gutiérrez (clave E15C69) y Chicoasén (E15C59) del INEGI (2023d), en el área de estudio existen diversos tipos de formaciones que destacan por su altura; algunos ejemplos notables son el Cerro Mactumatzá, la Loma del Tará y el Cerro Tapangozoc (Secretaría de Protección Civil Municipal, 2016a). Además, hay otras formas de menor tamaño como el Cerro "Charro Negro", Cerro "La Calabaza", Cerro "Hueco", Barranca "La Cotorra", "Paso del Burro", Cañada "El Chupadero", Cerro "Redondo", Loma "La Vara", Cerro "Shumzum", Cerro "Tapangozoc", Loma "Verde", Loma "Tambor", Loma "Tapai" y Mesa "Nido de Águilas" (SEMAVI, 2009).

Las pendientes de la CRS se pueden encasillar en ocho categorías (**Tabla 11**). Los valores más altos en la cuenca (> 30%) se encuentran en la parte centro y noreste (**Figura 12**). En la parte baja sur de la cuenca, en los municipios de San Fernando y Tuxtla Gutiérrez, se localizan formaciones de sierra alta con pendientes planas (< 2%) de llanura aluvial y mesetas erosionadas. En el caso de Berriozábal, cuenta con una orografía de lomerío típico y llanura aluvial (SEMAVI, 2009).

Figura 11. Distribución espacial de las elevaciones del terreno de la CRS.

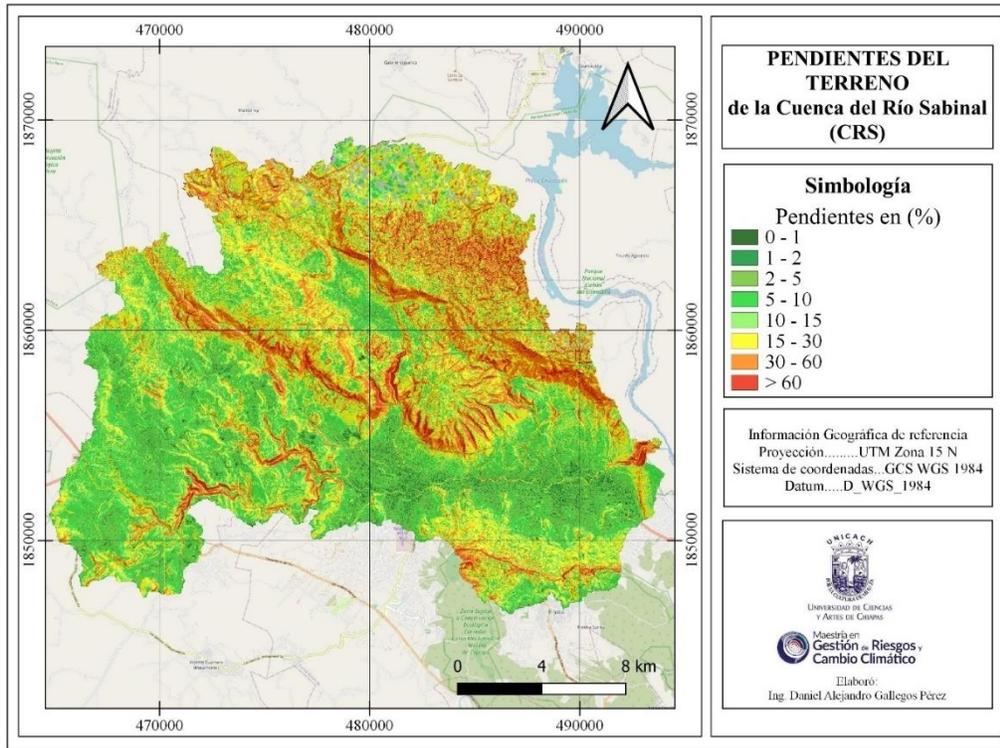


De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en pendientes de terreno menores a 10% se encuentran geoformas como: Planices (LP), mesetas (LL) depresiones (LD) y piso de valle (LV) (FAO, 1996). Las zonas escarpadas de gradiente medio (SE), colinas de gradiente medio (SH), las planicies disectadas (SP) y valles de gradiente medio (SV) son propios de pendientes entre 10 y 30%. Las pendientes entre 15 y 30% son típicos de montañas de gradiente medio (SM). En pendientes mayores a 30% se encuentran zonas escarpadas de gradiente alto (TE), colinas de gradiente alto (TH), valles de gradiente alto y montañas de gradiente alto (TM).

Tabla 11. Clasificación de las pendientes del terreno y sus características principales (FAO, 2009).

Clase de pendiente		Simbología	Descripción	Condición del terreno y procesos esperados
Grados	Porcentaje (%)			
0 - 0.57	0 - 1		Plano	Denudación no apreciable. Tráfico y laboreo sin dificultad bajo condiciones secas. Alta capacidad de almacenamiento superficial.
0.57 - 1.15	1 - 2		Muy ligeramente inclinado	
1.15 - 2.86	2 - 5		Ligeramente inclinado	Movimientos en masa de flujo lento de diferentes clases, erosión hídrica (laminar e inicios de surcos). Laboreo aun con maquina pesada es posible. En pendientes entre 3 - 7% existe peligro de erosión moderado y alta capacidad de almacenamiento superficial.
2.86 - 5.71	5 - 10		Inclinado	
5.71 - 8.53	10 - 15		Fuertemente inclinado	Condiciones similares al anterior, pero menos facilidad de laboreo. Peligro de erosión severo. Capacidad moderada de almacenamiento superficial.
8.53 - 16.7	15 - 30		Moderadamente escarpado	Movimiento en masa (reptación), erosión laminar y en surcos, deslizamientos ocasionales. No es posible el laboreo mecanizado sin terraceo. Peligro muy severo de erosión y deslizamientos. Valores altos de escurrimiento. Capacidad de almacenamiento superficial baja.
16.7 - 30.96	30 - 60		Escarpado	Procesos denudacionales intensos de diferente clase. Posibilidades limitadas de laboreo. Peligro severo de erosión. Valores altos de escurrimiento.
> 30.96	> 60		Muy escarpado	Derrumbes de rocas, procesos denudacionales intensos. Valores muy altos de escurrimiento.

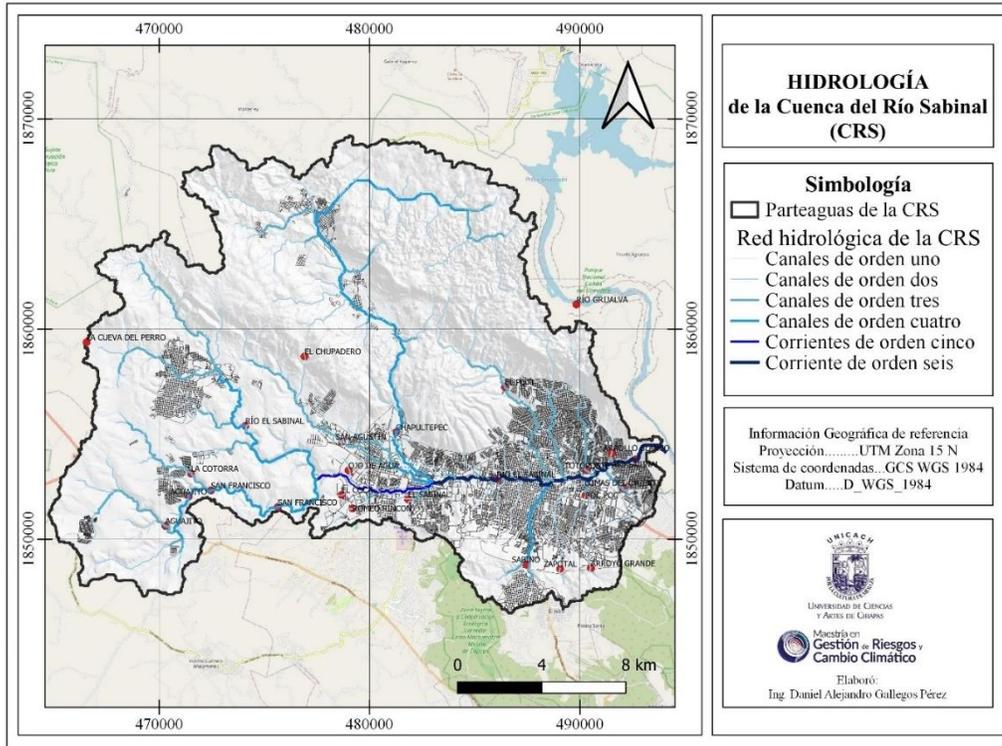
Figura 12. Distribución espacial de las pendientes del terreno de la CRS.



d) Hidrología

La CRS tiene como colector principal al Río Sabinal, el cual corresponde a un canal regular con sinuosidad media de longitud aproximada a los 45.68 km², con desembocadura en el Río Grijalva, un volumen de disponibilidad media anual de aguas superficiales de 2.642 Mm³ y un escurrimiento medio anual de 66.72 Mm³. Entre los afluentes más importantes se encuentran: 1) San Agustín, 2) La Chacona, 3) Chapultepec, 4) Ojo de Agua, 5) Pomarroza, 6) Pistimbak, 7) Potinaspak, 8) Totoposte, 9) Bambú, 10) Blanco, 11) Lomas del Oriente, 12) Cerro Huevo, 13) Santa Ana, 14) Poc-Poc, 15) San Roque, 16) El Zope, 17) San Pascualito, 18) El Cocal, 19) Romeo Rincón, 20) San Francisco, 21) Sabinal, y 22) La Laguna (García Benítez et al., 2022). En la **Figura 13** se representa la distribución espacial de la red de drenaje de la CRS, incluyendo corrientes efímeras y pequeños canales naturales con formación de agua en temporada de tormentas.

Figura 13. Red de drenaje de la CRS (Fuente: SIATL-INEGI, 2023).



e) Clima

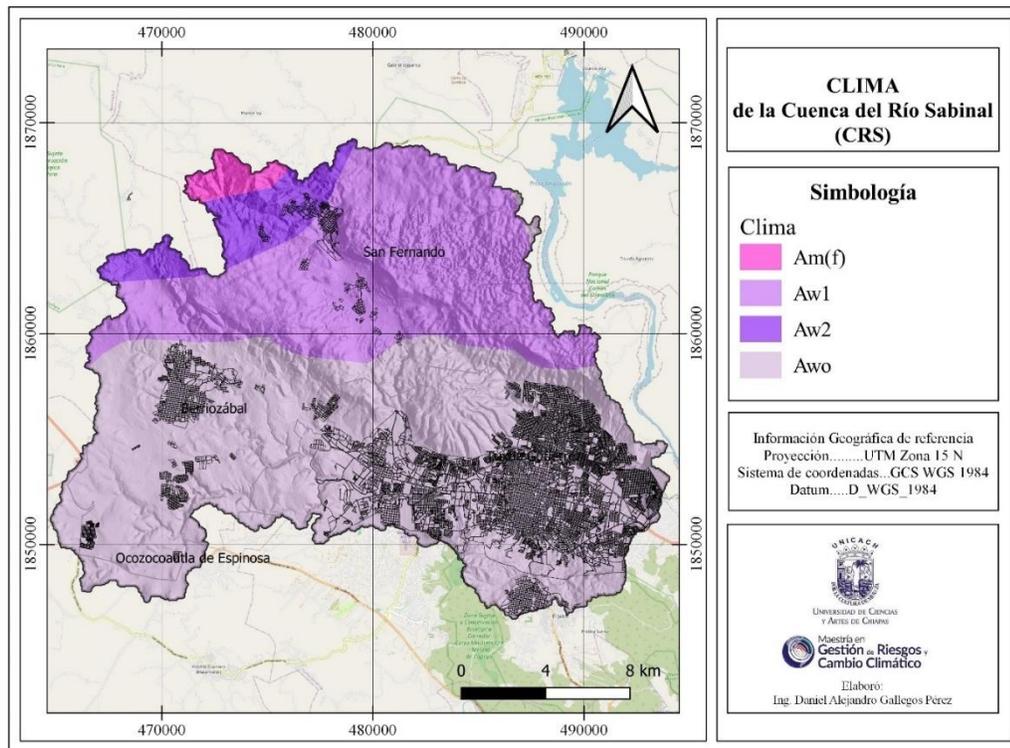
El 98.5% de la cuenca (41,904.46 ha) presenta clima cálido subhúmedo (Aw) con temperaturas medias anuales mayores a 22 °C y mínima de 18 °C (**Tabla 12**). El resto de la superficie posee clima cálido húmedo Am(f) característico de precipitaciones menores a 60 mm en el mes más seco; y lluvias de verano con porcentaje de lluvia invernal mayores al 10.2% del total anual. La precipitación media anual de la cuenca varía entre 800 y 1200 mm (**Figura 14**).

Tabla 12. Variaciones en precipitación para clima cálido subhúmedo (Aw).

Clima	Superficie de la CRS		Descripción
	Porcentaje (%)	Hectáreas (ha)	
Awo	62.8%	26,696.64	Precipitaciones que oscilan entre 0 y 60 mm en los meses más secos; lluvias de verano con índice P/T (índice de Lang) menor de 43.2 y lluvia invernal con porcentajes del 5 al 10.2% del total anual.
Aw1	30.6%	12,993.64	Precipitación del mes más seco menor a 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3; y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

Aw2	5.2%	2,214.18	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; llluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
-----	------	----------	---

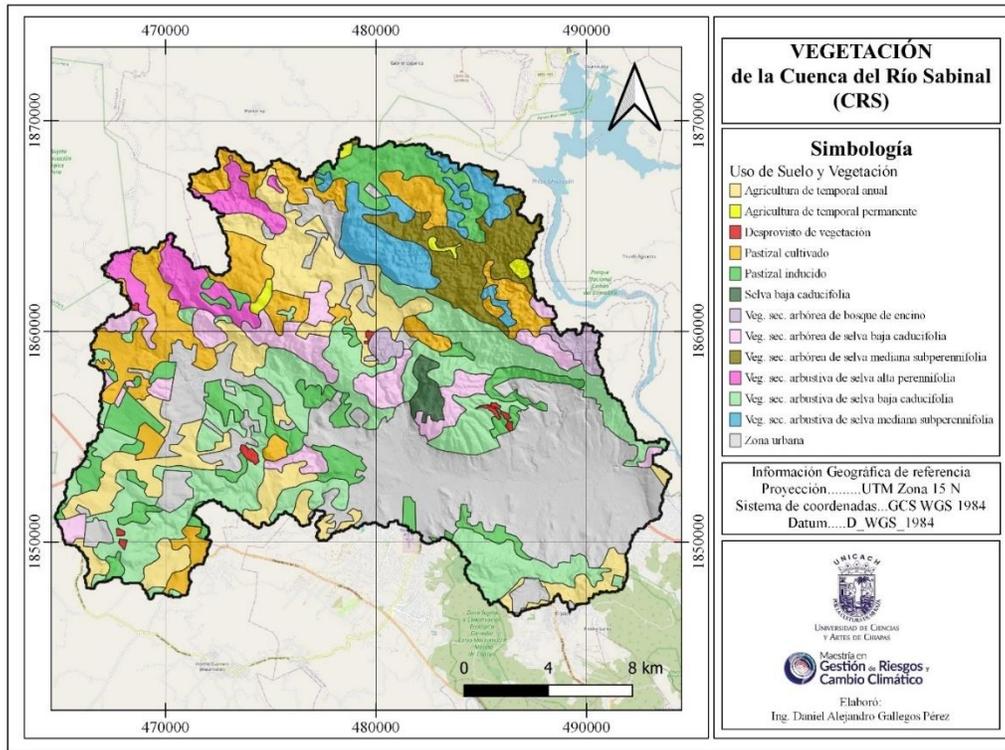
Figura 14. Distribución espacial del clima en la CRS (Fuente: García, 1998).



f) Vegetación y uso de suelo

De acuerdo con datos del INEGI (2021b), el uso de suelo predominante en la CRS es zona urbana con un 25.7% (10,950.88 ha), le siguen pastizales (cultivado e inducido) con 20.8% (8,857.78) y agricultura de temporal (anual y permanente) con 13% (5,549.90 ha). Referente a la cobertura, la más densa es la vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia con 19.2% (8,168.67 ha) de la superficie y la vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia con el 6.5% (2,768.23 ha). También se encuentran otras coberturas y usos de suelo en proporciones más pequeñas como vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia, vegetación secundaria arbórea de bosque de encino y selva baja caducifolia. La **Figura 15** muestra la distribución espacial del USV actual de la CRS.

Figura 15. Distribución espacial actual del USV en la CRS (Fuente: INEGI, 2021b)..



2.1.2. Antecedentes de la problemática de la cuenca

Mancha urbana. En las últimas décadas, el número de residentes en la CRS ha ascendido de forma considerable (**Tabla 13**), aglomerándose en los principales centros urbanos: “Tuxtla Gutiérrez y Berriozábal”. Durante 1970-2000, el número de habitantes se duplicó, pasando de 81,082 a 469,356 pobladores (INESA-COLPOS, 2010); de los cuales, el 90.6%, residía en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Para el 2020, la población de la cuenca incrementó en 45%, llegando a 680,359 ocupantes (INEGI, 2021); de los cuales, el 99% radicaba en zonas urbanas; y solo el 87% de los ciudadanos se encontraba en la capital del estado.

Tabla 13. Poblacional en la CRS de 1900 a 2020 (INESA-COLPOS, 2010; Gordillo-Ruiz y Castillo-Santiago, 2017; INEGI, 2021).

AÑO	Población	Periodo	Tc
1900	11,479		
1910	13,339	1900-1910	1.51
1921	17,822	1910-1921	2.67
1930	20,373	1921-1930	1.50
1940	23,206	1930-1940	1.31
1950	37,635	1940-1950	4.95

1960	52,715	1950-1960	3.43
1970	81,082	1960-1970	4.40
1980	150,355	1970-1980	6.37
1990	323,063	1980-1990	7.95
1995	417,159	1990-1995	5.25
2000	469,356	1995-2000	2.39
2005	544,774	2000-2005	3.03
2010	599,726	2005-2010	1.94
2020	680,359	2010-2020	1.27

Para el caso de Tuxtla Gutiérrez, en el periodo 1970-2020, el número de residentes acrecentó ocho veces más; de 70,999 a 604,147. Esto representó para el municipio un alza en la Tasa de Crecimiento poblacional promedio (Tc) del 4% anual (**Tabla 14**). Es decir, entre 1970 y 2020, la población tuvo un crecimiento anual de 4 personas por cada 100 habitantes; su mayoría mujeres, entre 0 y 29 años de edad. Como consecuencia, en el período 1986-2014 la mancha urbana se duplicó; ésta aumentó de 2,948.76 a 7,427.63 ha (Silva et al., 2015).

Tabla 14. Población en el municipio de Tuxtla Gutiérrez en 1940-2020 (HATG, 2007; INEGI, 2010 y 2021).

AÑO	Población	Periodo	TC
1940	15883		
1950	28260	1940-1950	5.93
1960	41224	1950-1960	3.85
1970	66851	1960-1970	4.95
1980	166476	1970-1980	9.55
1990	295608	1980-1990	5.91
2000	434,143	1990-2000	3.92
2010	553,374	2007-2010	2.46
2020	604,147	2015-2020	0.88

Inundaciones. A través de la historia, la cuenca se ha caracterizado por presentar frecuentes inundaciones particularmente en la capital del estado; suscitadas en época de verano (García Benítez et al., 2022). En la **Tabla 15** se presentan algunas de las inundaciones

registradas en los últimos cien años y en la **Figura 16** se señalan las colonias que históricamente resultan afectadas.

Tabla 15. Eventos de inundaciones registradas en los últimos cien años en CRS

Año	Evento	Zonas afectadas	Referencia
20-21/10/1921	Lluvias torrenciales provocaron el desbordamiento del Río Sabinal.	Márgenes del Río Sabinal. Destrucción de viviendas, 13 familias perjudicadas.	Penagos Del Carpio, 2013; Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a)
11-12/10/1932	Aguas vertiginosas se precipitaron sobre el Río Sabinal y sus afluentes.	Terán y la zona poniente norte de Tuxtla. Se inundó una gran cantidad de viviendas a los márgenes del Río Sabinal.	
10/07/1951	Aguaceros grandes provocaron el desbordamiento del Río Sabinal.	Zona norte de Tuxtla Gutiérrez. Se inundaron los Barrios Juy-Juy, Colón y la Pimienta. El nivel del agua ascendió hasta metro y medio en diferentes lugares.	Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a)
26-27/05/1974	Lluvias fuertes generaron inundación.	Tramo de la 5ª Norte y viviendas asentadas en inmediaciones del arroyo San Roque. A raíz de esta inundación se embovedó el arroyo desde la 2a hasta la 9a sur.	Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a)
11/09/1984	Aguacero torrencial e inundaciones en el afluente San Agustín.	Fueron afectadas las colonias: fraccionamiento Los Laureles y Unidad Habitacional Fovissste. El agua alcanzó 60 centímetros de altura.	Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a); Penagos Del Carpio (2013).
12/06/1985	Lluvias fuertes	Se inundaron 1500 viviendas en la ribera del Río Sabinal.	Instituto Estatal del Agua (2013).
06/1988	Lluvias fuertes provocaron el desbordamiento de los afluentes San Agustín y arroyo San Roque.	Resultaron afectadas 77 casas y 320 damnificados en las colonias Plan de Ayala y Juan Crispín. También resultó afectada una zona del barrio de San Francisco, donde se dañaron 14 casas, una de ellas se destruyó completamente.	Gobierno del Estado de Chiapas, (2004); Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a); Penagos Del Carpio (2013).
24-26/06/1996	Lluvias torrenciales (se registraron lluvias de 187.8 mm) provocan el desbordamiento del Arroyo Santa Ana y el Río Sabinal (un tramo de 6 kilómetros y medio). En algunas zonas de Tuxtla Gutiérrez, el agua alcanzó una altura de hasta 2.5 m.	Resultaron afectadas 11 Colonias de Tuxtla Gutiérrez, 300 comercios y 1,500 casas. Se registró un muerto, un herido, varios desaparecidos, más de 30 vehículos afectados y cientos de damnificados. Se estima que, por lo menos, 800 viviendas a lo largo del Sabinal se derrumbaron o dañaron parcialmente. En San José Terán se desplomaron 20 casas de adobe.	Gobierno del Estado de Chiapas, (2004); Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a); Penagos Del Carpio (2013).

Continuación de la **Tabla 15.**

Año	Evento	Zonas afectadas	Referencia
10/08/1996	Lluvias intensas de entre 75 y 80 mm, las cuales generaron el desbordamiento del Arrollo Potinaspak.	Se inundaron 60 colonias de Tuxtla Gutiérrez, afectando a 80 personas y viviendas de la 8ª Norte (de la 6ª hasta la 7ª Norte), de la 1ª a la 4ª.	Gobierno del Estado de Chiapas, (2004); Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a)
30/09/1998	Lluvias fuertes provocaron el desbordamiento del Río Sabinal y de los arroyos Potinaspak y Totoposte.	Se reportó el arrastre de dos vehículos y la muerte de una mujer. Se registraron niveles del agua de hasta 1.20 m.	
31/05/2001	Lluvias intensas.	Se derrumbó la barda del Penal de Cerro Hueco y se dañaron 150 viviendas de 20 colonias. Los asentamientos más afectados fueron: Los Pájaros, Bienestar Social, Terán y Potinaspak.	
5-6/10/2003	Lluvias intensas (de hasta 131 mm) provocadas por la Tormenta Tropical Larry. Se desbordaron alrededor de seis kilómetros del Río Sabinal y se registraron incrementos en su caudal de hasta dos metros y medio. También se desbordaron otros causes, entre ellos el arroyo San Agustín.	Resultaron afectadas 28 colonias, entre las que destacan: Rincón de los Lagos, Villas de Catazajá, Jardines de Tuxtla y viviendas ubicadas en la 3ª Oriente y 7ª Norte a la altura del puente; y el tramo de la Calzada Ignacio Zaragoza a la Privada Magnolias. Se evacuaron pobladores de las colonias Fovissste, los Laureles, Jardines de Tuxtla y San Francisco Sabinal. Resultaron perjudicadas 2,181 viviendas cercanas al cauce del Río Sabinal, se dañaron 9,720 viviendas y 2,400 inmuebles. Se estima que el número total de afectados fue de 25,000 y 3,000 damnificados.	Gobierno del Estado de Chiapas (2004); Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a); Penagos Del Carpio (2013); Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016b).
19/08/2010	Aguaceros intensos.	Resultaron afectadas 30 colonias de Tuxtla Gutiérrez y se reportaron cuatro personas fallecidas. Se registraron daños en la zona comercial de Plaza Boulevard y del libramiento norte; se destruyó el puente aledaño a la colonia Las Américas. Las zonas urbanas más afectadas fueron la calle 5ª Norte y la Colonia Francisco I. Madero. También se inundaron varias escuelas, entre ellas el Cobach 13, ubicado al oriente de la ciudad y la Escuela Primaria "Ángel Albino Corzo", ubicada sobre la Calle Central entre 5ª y 6ª Norte. Además, se dañó el Sistema de Agua Potable de la ciudad.	Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a).
15/08/2011	Lluvias fuertes provocadas por la onda tropical número 14.	Resultaron afectadas 23 viviendas y 13 vehículos.	Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a).

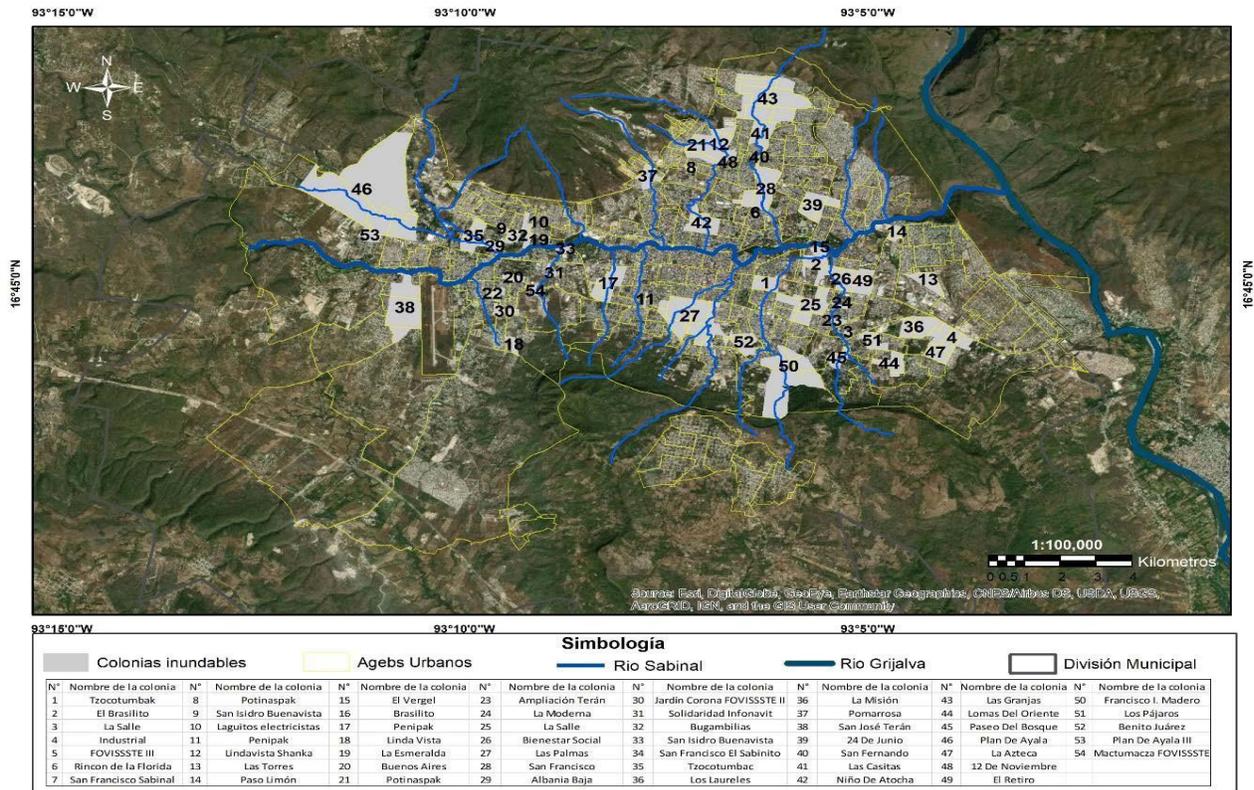
Continuación de la **Tabla 15.**

Año	Evento	Zonas afectadas	Referencia
28/08/2011	Lluvias torrenciales provocaron el desbordamiento del Río Sabinal y del arroyo Potinaspak.	Se inundaron cerca de doscientas casas ubicadas en Tuxtla Gutiérrez. Se tuvieron que desalojar a 20 personas por la intensidad del evento. El lado norte de la ciudad fue el más afectado, entre las zonas más dañadas se encontraron la 6ª Oriente, Fraccionamiento Francisco I. Madero. El agua alcanzó hasta metro y medio de altura en la zona comercial de la 5ª Norte, Colonia Laureles y el Barrio "Niño de Atocha".	Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a).
05/09/2011	Precipitaciones intensas	Resultaron afectadas directamente 276 familias y de manera indirecta 13 mil personas.	Secretaría de Protección Civil Municipal, (2016a).
02/09/2016	Lluvias intensas (114 mm en 90 minutos) generan inundaciones.	Libramiento norte en el lado oriente de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Se registraron daños en 100 vehículos y tres personas fallecidas. Se inundaron 26 colonias de diversas zonas de Tuxtla Gutiérrez. En la colonia San Francisco, se colapsaron seis viviendas. En el saldo de los daños se registraron 300 familias afectadas.	Azteca Noticias (2016).
23/06/2017	Lluvias intensas (se registraron 84 mm de lluvia).	Zona norte oriente de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Fueron siete colonias las más afectadas: Agripino Gutiérrez, El Vergel, Infonavit Grijalva primera y segunda sección, Bienestar Social, Fovissste y El Bosque. Se reportó la caída de 20 árboles, cortes de energía eléctrica en dos puntos de la ciudad y 30 vehículos afectados.	Excélsior TV (2017).
30/08/2020	Lluvias intensas.	Zona oriente norte de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Se reportó la caída de una vivienda ubicada al margen del arroyo Totoposte.	NMás (2020).
19-20/06/2022	Lluvias fuertes por remanentes de la depresión tropical Celia por su paso en el Océano Pacífico. La lluvia alcanzó los 63 litros por metro cuadrado en menos de 30 minutos.	Colonia Patria Nueva, Paso Limón, 13 de febrero y algunas otras colonias ubicadas en el lado oriente de la ciudad capital. Se presentaron encharcamientos en calles y avenidas de la capital; y alrededor de 70 viviendas resultaron afectadas, debido a que el agua ascendió a un metro de altura. En la zona norte oriente, una corriente arrastró un vehículo, contenedores de basura y una motocicleta. Además, se presentó desbordamiento en un canal pluvial en la colonia La Ilusión.	Maza (2022); Herrera, (2022).

Continuación de la **Tabla 15**.

Año	Evento	Zonas afectadas	Referencia
24/06/2023	Tormenta fuerte (se reportan lluvias de más de 100 mm en 45 minutos), que generó hasta 30 centímetros en los niveles de agua de algunas localidades.	Ocho colonias de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Los reportes señalan el desbordamiento de algunos arroyos y la afectación de una o dos viviendas por colonia. Las colonias más afectadas fueron la Bienestar Social y la Potinaspak. También se presentó el arrastre de sedimentos y de un transporte público que intentó cruzar una calle. Se notificó que dos personas cayeron en una alcantarilla abierta al intentar ayudar a una camioneta que se encontraba varada; una fue rescatada y la otra de nombre Ariel (un biólogo de 48 años) fue arrastrada por un dren pluvial, después de 40 horas de búsqueda fue hallado muerto en aguas del Río Grijalva.	Azteca Noticias (2023); Imagen Noticias (2023).

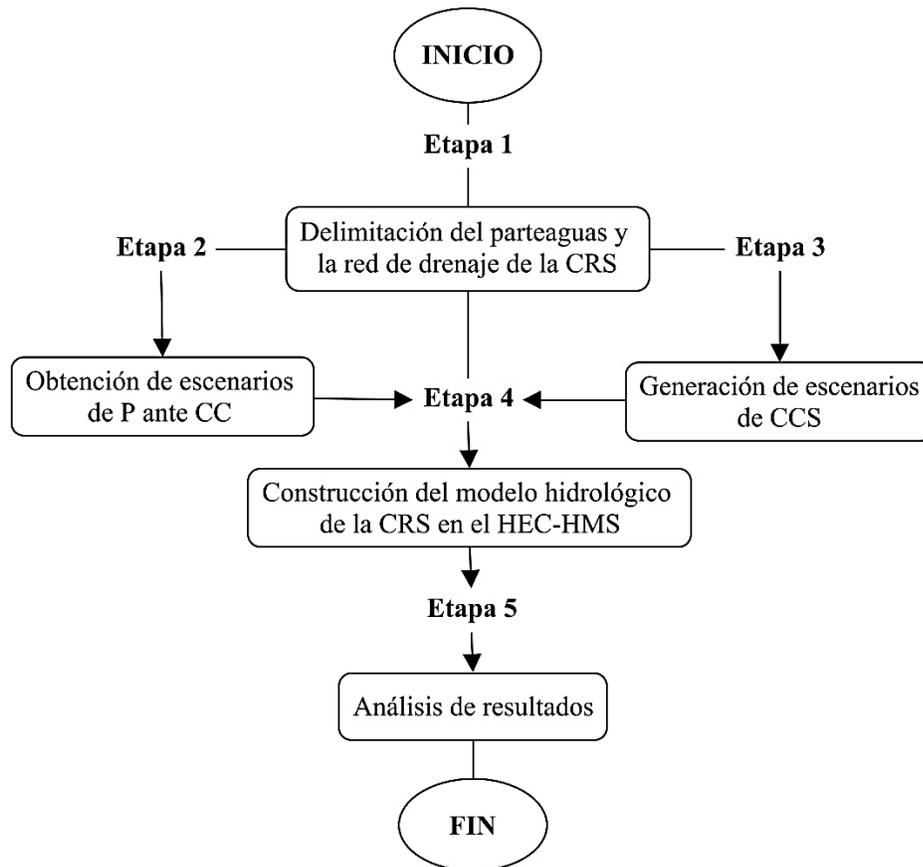
Figura 16. Colonias afectadas por inundaciones en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez (García Benítez et al., 2022).



2.2. Metodología

En el esquema de la **Figura 17** se resume la estrategia adoptada en la elaboración del presente trabajo. La primera etapa consistió en la delimitación del parteaguas de la CRS y la obtención de sus PM más relevantes. En la segunda, se estimaron los valores de lluvia para el año 2050 considerando escenarios de CC. En la tercera etapa, se determinó el CCS de la CRS y se evaluaron los NC para los escenarios 2021 y 2050. En la cuarta etapa se construyó el modelo hidrológico para la CRS en HEC-HM y se simuló el proceso lluvia escurrimiento para el escenario 2021 y 2050 considerando escenarios de CCS y CC. En los siguientes apartados se detallan cada una de las etapas realizadas.

Figura 17. Etapas de la metodología de trabajo.



2.2.1. Etapa I: delimitación del parteaguas y la red de drenaje de la CRS

Se delimitó el parteaguas de la CRS a partir de las capas vectoriales a escala 1: 50 000 de la subcuenca Tuxtla Gutiérrez del SIATL-INEGI (2023). Esta información fue obtenida de la

página https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#. Para la delimitación, se generó un MDT de la zona de estudio a escala 1: 10 000 bajo la plataforma de un SIG.

Figura 18. Red hidrográfica de la subcuenca Tuxtla Gutiérrez (Fuente: SIATL-INEGI, 2023).



a) Generación del MDT de la zona de estudio. Se generó un MDT desde ArcGIS 10.8 y la herramienta Spatial Analyst. Se utilizaron los puntos extraídos de las curvas de nivel de cuatro cartas topográficas en formato digital a escala 1:20,000 con claves: E15C59a, E15C59b, E15c59c y E15C59f; descargados del portal <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/> (**Figura 19**). Además, se utilizaron 16 MDT LiDAR (Light Detection and Ranging) a escala 1:10,000 con claves: e15c59d1, e15c59d2, e15c59d3, e15c59d4, e15c59e1, e15c59e2, e15c59e3, e15c59e4, e15c59f3, e15c59f4, e15c69a1, e15c69a2, e15c69b1, e15c69b2, e15c69c1 y e15c69 extraídos del sitio: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=193&ag=20> (**Figura 20**).

Figura 19. Descarga de información topográfica (Fuente: INEGI, 2023c).

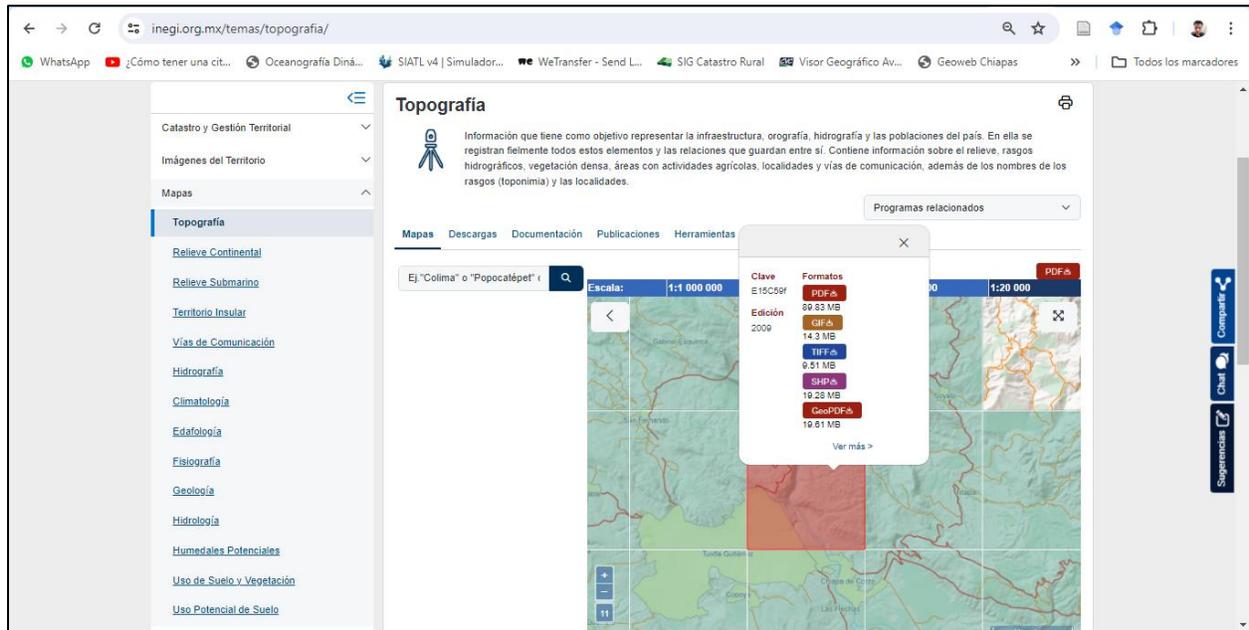


Figura 20. Descarga de MDEs LiDAR de la plataforma del INEGI (Fuente: INEGI, 2023a).

Ver	Clave	Título	Escala	Edición	Tipo de archivo
<input type="checkbox"/>	E14B89f1	Modelo digital de el evación de tipo sup erficie con resolució n de 1.5 metros gen erado a partir de dat os de altimetría del r elieve E14B89f1	1:1 000 000	2024	BIL 44.1 MB TIFF 50.91 MB
<input type="checkbox"/>	E14B89f2	Modelo digital de el evación de tipo sup erficie con resolució n de 1.5 metros gen erado a partir de dat os de altimetría del r elieve E14B89f2	1:1 000 000	2024	BIL 42.95 MB TIFF 50.14 MB
<input type="checkbox"/>	E14B89f3	Modelo digital de el evación de tipo sup erficie con resolució n de 1.5 metros gen erado a partir de dat os de altimetría del r elieve E14B89f3	1:1 000 000	2024	BIL 43.46 MB TIFF 51.21 MB
<input type="checkbox"/>	E14B89f4	Modelo digital de el evación de tipo sup erficie con resolució n de 1.5 metros gen erado a partir de dat os de altimetría del r elieve E14B89f4	1:1 000 000	2024	BIL 41.63 MB TIFF 48.73 MB

Se interpolaron los puntos del terreno mediante el método geo-estadístico Kriging ordinario debido a su buena eficiencia cuando la estructura espacial de la altitud es fuerte. Kriging proporciona una estimación de la ubicación no observada de la variable Z basada en un promedio ponderado de puntos de observación vecinos dentro de un área determinada. El

concepto se deriva de la teoría de variables regionalizadas y puede describirse de forma general considerando una función aleatoria intrínseca representada por $z(s_i)$, donde s_i plasma todas las ubicaciones de la muestra, $i = 1, 2, \dots, n$. La estimación promedio ponderada dada por el predictor kriging ordinario en el punto no muestreado $z(s_0)$ se define en la Ecuación 21 (Setianto y Triandini, 2015):

$$z(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad (21)$$

donde, λ_i son los pesos asignados a cada una de las muestras observadas. Estos pesos suman la unidad para que el predictor proporcione una estimación insesgada (Ecuación 22):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (22)$$

Los pesos se calculan a partir de la ecuación matricial (Ecuación 23):

$$C = A^{-1} \times b \quad (23)$$

donde:

C = Pesos resultantes

A = Una matriz de semivarianzas entre los puntos de datos.

b = Un vector de semivarianzas estimadas entre los puntos de datos y los puntos en los que se va a predecir la variable z.

b) Delimitación del parteaguas y su red de drenaje. Mediante el programa SAGA GIS, obtenido de sitio web: <https://sourceforge.net/projects/saga-gis/>; se realizó un preprocesamiento al MDT generado. El desarrollo consistió en el relleno de sumideros mediante el método propuesto por Wang y Liu (2006), que identifica y rellena las depresiones superficiales, determina la dirección de los flujos y delimita las cuencas y su red de drenaje. Posteriormente, se realizó un análisis hidrológico del terreno, para ello se determinó la acumulación de flujo de agua con el algoritmo de enrutamiento cinemático (Lea, 1992). Finalmente, se delimitó el área de interés con el método Determinístico 8 y se delimitó la red de canales del terreno y las cuencas de drenaje con el método de Strahler.

c) PM de la CRS. Los parámetros referentes a la morfometría de la cuenca se obtuvieron de tres maneras: 1) derivado del procesamiento en SAGA GIS, 2) mediante herramientas de medición y 3) la aplicación de algoritmos en una hoja de Excel. En la **Tabla 16** se describen los parámetros calculados y los algoritmos empleados para su determinación.

Tabla 16. Métodos de cálculo de los PM de la CRS.

Parámetro	Descripción	Referencia	Método de cálculo	Unidades
Área de la cuenca de drenaje (A)	Superficie en proyección horizontal encerrada por el parteaguas de la cuenca.	Horton (1945)	Procesamiento en SAGA	km ²
Perímetro de la cuenca (P)	Longitud del parteaguas de la cuenca.			km
Orden de corrientes (u)	Clasificación jerárquica de la corriente. Refleja el grado de bifurcación o ramificación dentro de una cuenca.			Adimensional
Longitud de la cuenca (Lb)	Longitud máxima de la cuenca medida en línea recta, paralelo al cauce principal, entre la salida hasta el parteaguas.	Schumm (1956)	Proceso en QGIS	km

Continuación de la **Tabla 16**

Ancho máximo de la cuenca (As)	Distancia horizontal de la dimensión más larga de la cuenca perpendicular a la línea de la corriente principal	Cruz Romero et al. (2015)		km
Pendiente de la cuenca (Sb)	Afecta directamente la intensidad de las inundaciones y controla el tiempo el flujo sobre el terreno.	Campos-Aranda (1998)		Porcentaje (%)
Elevación mínima (h)	Altitud mínima de la cuenca	Horton (1932)		m s. n. m.
Elevación máxima (H)	Altitud máxima de la cuenca	Horton (1932)		m s. n. m.
Factor de forma (Ff)	Indicador del relieve topográfico de la cuenca, las estructuras geológicas y la erosividad del material del lecho del canal.	Horton (1932)	$Ff = A/Lb^2$	Adimensional
Relación de elongación (Re)	Cociente que relaciona el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la longitud de la misma.	Schumm (1956)	$Re = 1.1284 A^{0.5} / Lb$	Adimensional
Coefficiente de compacidad de Gravelius (Cc)	Indicador de la forma de la cuenca. Valores cercanos a la unidad señalan una forma circular y valores superiores, denotan distorsión; alargamiento o asimetría.	Gravelius (1914)	$Cc = 0.2821 * (P / A^{0.5})$	Adimensional

Desnivel (R)	Diferencia entre la elevación máxima de la cuenca y su elevación mínima.	Horton (1932)	$R = H - h$	km
Relación de relieve (Rh)	Es la razón entre el desnivel de la cuenca (R) y su longitud máxima (Lb)	Schumm (1956)	$Rh = R / Lb$	Adimensional
Número de corrientes (Nu)	Indica la cantidad de segmentos de corriente de una cuenca.	Strahler (1964)	$Nu = Nu1 + Nu2 + Nu3 + \dots + Nun$	Adimensional
Frecuencia de corrientes (Fs)	Relación entre el número de cauces con el área de la cuenca	Horton (1945)	$Fs = Nu / A$	cauces/km ²
Longitud total de corrientes (Lu)	Longitud total de los cauces presentes en la red de drenaje	Horton (1945)	$Lu = Lu1 + Lu2 + Lu3 + \dots + Lun$	km
Pendiente promedio del canal principal (Sst)	Altura sobre la vertical por cada unidad recorrida sobre la horizontal.	(Taylor y Schwarz, 1952)	$Sst = [\text{Número de tramos de igual longitud} / \sum(1/\sqrt{Si})]^2$	Porcentaje (%)
Relación de bifurcación (Rb)	Cociente entre el número de cauces de cualquier orden y el número de corrientes del siguiente orden superior (Nu + 1).	Horton (1945)	$Rb = Nu / Nu + 1$	Adimensional
Densidad de drenaje (Dd)	Indicador de peligro. El tiempo de escorrentía disminuye con el aumento de la densidad de drenaje.	Horton (1945)	$Dd = Lu / A$	km/km ²

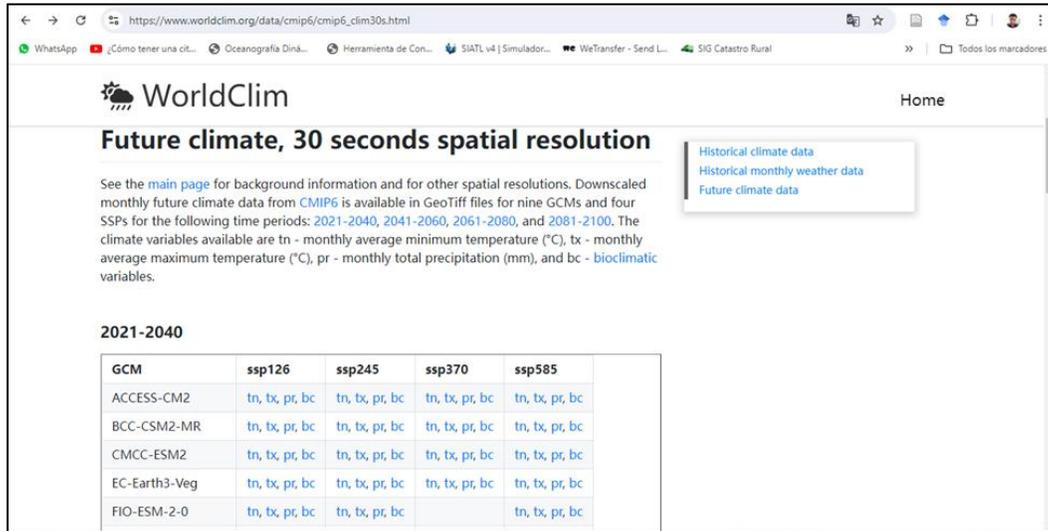
2.2.2 Etapa II: obtención de escenarios de P ante CC

Se descargaron dos bases de datos con valores de altura de P de alta resolución espacial desde el sitio <https://worldclim.org/> de la página de WorldClim (**Figura 21**) en archivos comprimidos. El primer conjunto incluye 12 imágenes ráster con información histórica mensual perteneciente al lapso comprendido entre 1970 y 2000. El segundo archivo contiene una imagen con proyecciones futuras mensuales de P en el periodo 2041-2060 reducidas a una resolución espacial de 30 segundos (1 km²) de acuerdo a la sexta fase del CMIP para el escenario de referencia elevado SSP5-8.5 en un contexto de intenso desarrollo de combustibles fósiles a lo largo del siglo XXI procedente del modelo MRI-ESM2-0 (Meinshausen et al., 2020; Riahi et al., 2017).

El MRI-ESM2.0 (Meteorological Research Institute Earth System Model version 2) es un modelo climático desarrollado por el Instituto de Investigación Meteorológica (MRI) de la Agencia Meteorológica de Japón que ofrece una representación precisa del clima promedio y de la variabilidad interanual; lo que sugiere un rendimiento superior en comparación con su predecesor (Yukimoto et al., 2019).

Las imágenes globales de lluvia fueron descargadas en formato GeoTiff (.tif) y recortadas desde QGis con el polígono vectorial del área de estudio. Este proceso se realizó tanto para las precipitaciones históricas (base) como para los escenarios futuros.

Figura 21. Descarga de información climatológica futura desde WorldClim.



Fuente: Captura de pantalla de la página de WorldClim.

2.2.3. Etapa III: generación de escenarios de CCS

Se adquirieron tres capas vectoriales de USV para el 2007, 2014 y 2018 correspondientes al conjunto de datos vectoriales de las series cuatro, seis y siete del INEGI (2009; 2016; 2021b) a escala 1:250 000 en el sitio <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> de la CONABIO (**Figura 22**). Cada capa fue convertida a formato ráster a una resolución de 30 m (**Figura 23**). Adicionalmente, se elaboró una capa ráster para el 2021 producto del análisis de imágenes capturadas por el satélite Sentinel-2A, obtenidas del portal Copernicus Open Access Center (<https://scihub.copernicus.eu/>). Se eligieron escenas con una cobertura mínima de nubosidad y con una resolución espacial de 10 m, adquirida el 13 de abril de 2021 y el 3 de mayo de 2021. La delimitación de coberturas para el 2021 se realizó con el método de clasificación supervisada en el software ERDAS Imagine a partir de polígonos extraídos de la serie siete del INEGI.

Figura 22. Descarga de datos vectoriales de USV del INEGI (Geoportal de la CONABIO).

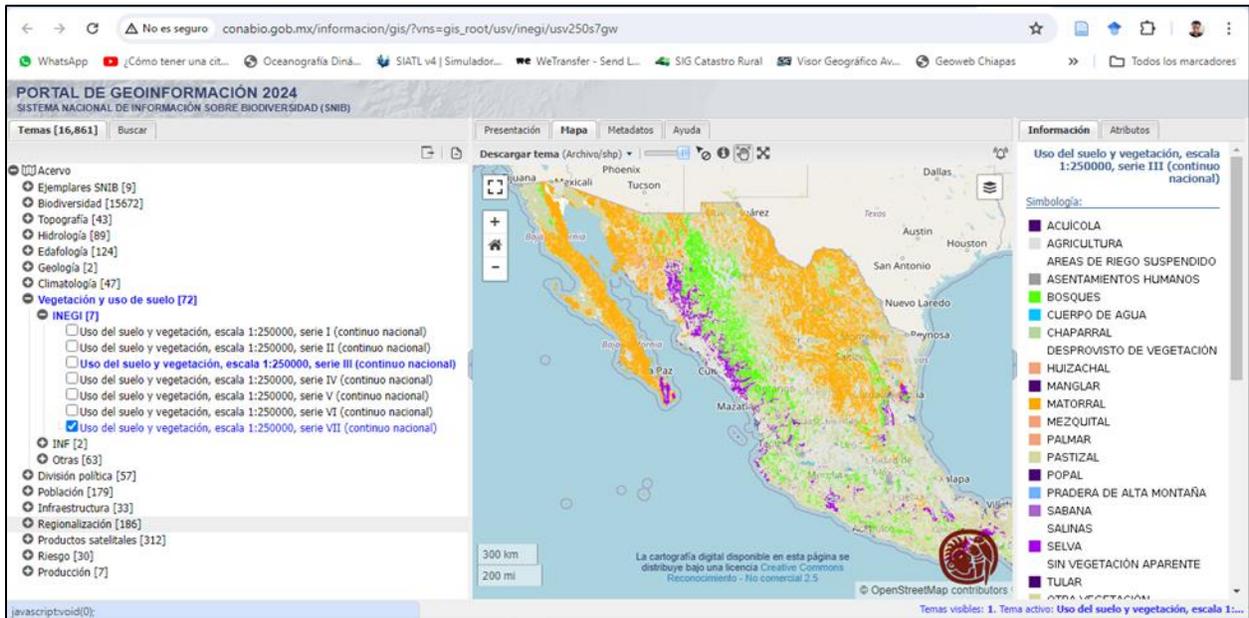
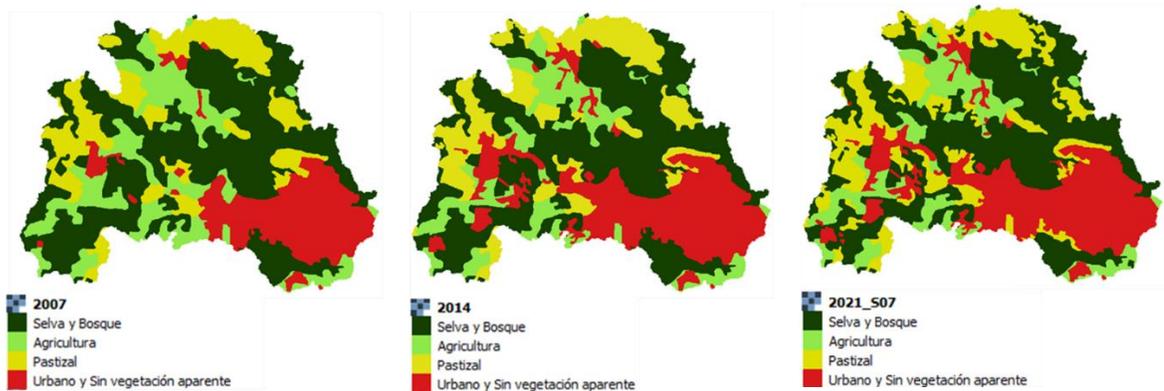


Figura 23. Mapas de USV para la CRS en 2007, 2014 y 2021.

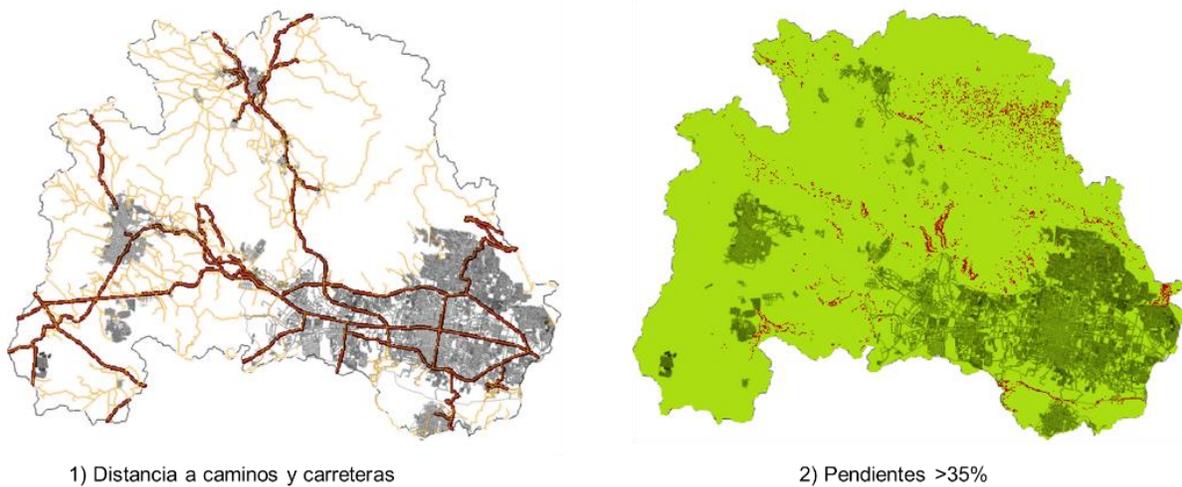


Escenario de USV al 2050. Se proyectó para la CRS un escenario de USV correspondiente al 2050 con la información obtenida del INEGI. Para ello, se aplicó el método de AC de MOLUSCE desde la plataforma de Qgis 2.18. Para la elección del escenario se tomó de referencia el centro del rango promedio del período temporal 2041-2060 de las condiciones climáticas simuladas del escenarios de CC (Arguez y Vose, 2011). Para la elaboración del trabajo se utilizó la capa ráster de 2007 como tiempo cero (T_0), la capa 2014 como T_1 y para la validación del modelo la capa 2021 como T_2 ; la cual será utilizada como escenario de referencia en la etapa de simulación hidrológica. Se utilizó la metodología propuesta por Pontius et al.

(2006) la cual consiste en la aplicación de cuatro módulos de MOLUSCE: 1.) Evaluación de la correlación de variables utilizadas como limitantes de cambio, 2.) Análisis de cambio de áreas y matriz de transición, 3.) Modelamiento de Transición Potencial y 4.) Validación del modelo.

Evaluación de la correlación. Se revisó la correlación entre las variables consideradas como limitantes de cambio: 1) Los caminos y carreteras y 2) Pendientes del terreno mayores a 35% (**Figura 24**); asumiendo que las áreas con pendientes menores a 35% tienen mayores posibilidades de uso urbano. Para el proceso, se eligió el método de Correlación de Pearson debido a que proporciona información sobre la homogeneidad de las capas combinadas; si las capas son muy semejantes dan como resultado uno, lo que implica que el resultado depende exclusivamente de una variable (Villalobos-Chacón, 2019).

Figura 24. Mapas limitantes de cambio.



De acuerdo a la **Figura 25**, los valores obtenidos de la correlación se alejan de la unidad ($r = 0.011$); indicativo que existe una correspondencia positiva moderadamente fuerte, dado que las capas utilizadas presentan una homogeneidad limitada entre sí. Estos valores dejan entrever que ambas variables tuvieron una influencia directa en los escenarios de predicción generados por el modelo.

Figura 25. Evaluación de la correlación de las variables limitantes de cambio

	Caminos y Carreteras	Pendientes >35%
Caminos y Carreteras	--	0.0119470459932
Pendientes >35%		--

Cambio de área. Se determinó la superficie (% , km² y ha) con alteraciones en su cobertura o uso, así como aquella que no ha presentado modificaciones (**Figura 26**). Durante el periodo de tiempo analizado (2007-2014), las zonas urbanas junto con las áreas sin vegetación registraron un aumento del 6.62%. La agricultura y las superficies con vegetación secundaria de selva y bosque tuvieron un decremento del 2.33 y 4.48%, respectivamente. Mediante este análisis MOLUSCE se pueden identificar las tendencias en los cambios de cobertura, pieza clave en las proyecciones de escenarios futuros (Villalobos Chacón, 2019).

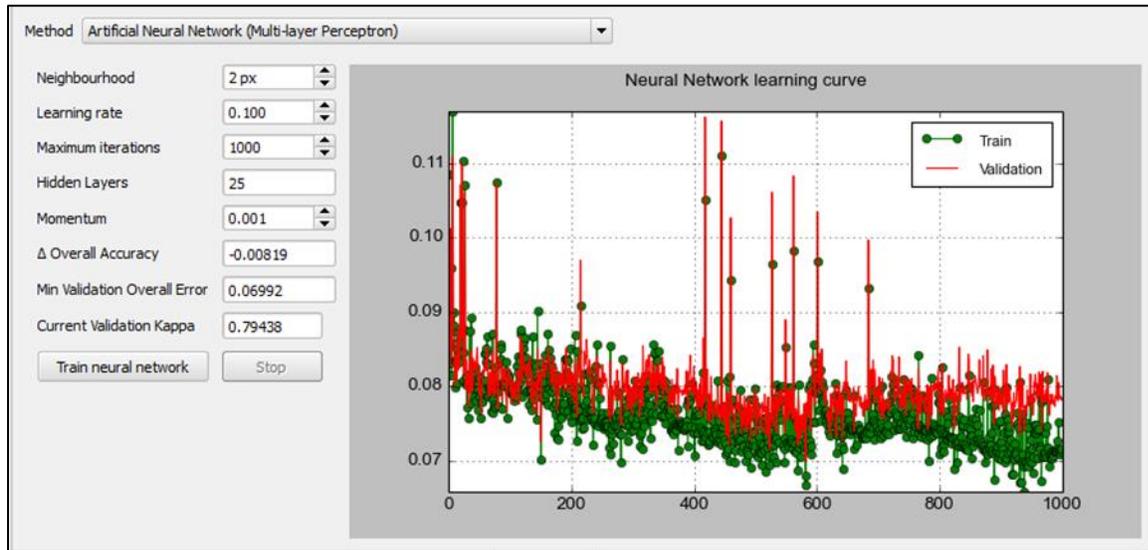
Figura 26. Evaluación de los cambios de área (ha) en los mapas 2007 y 2014.

Class statistics							
ha							
	Class color	2007	2014	Δ	2007 %	2014 %	Δ %
Selva y Bosque		18882.63 ha	17887.68 ha	-994.95 ha	44.4032219833	42.0635592503	-2.33966273301
Agricultura		7746.66 ha	5841.09 ha	-1905.57 ha	18.2165653624	13.7355450959	-4.4810202665
Pastizal		7906.77 ha	7988.31 ha	81.54 ha	18.5930701116	18.7848145201	0.191744408513
Urbano y Sin vegetación aparente		7989.30 ha	10808.28 ha	2818.98 ha	18.7871425427	25.4160811337	6.628938591

Transition matrix				
	Selva y Bosque	Agricultura	Pastizal	Urbano y Sin vegetación aparente
Selva y Bosque	0.942566	0.001921	0.024880	0.030633
Agricultura	0.004659	0.747392	0.001894	0.246056
Pastizal	0.005099	0.000842	0.948653	0.045405
Urbano y Sin vegetación aparente	0.001645	0.001048	0.000383	0.996925

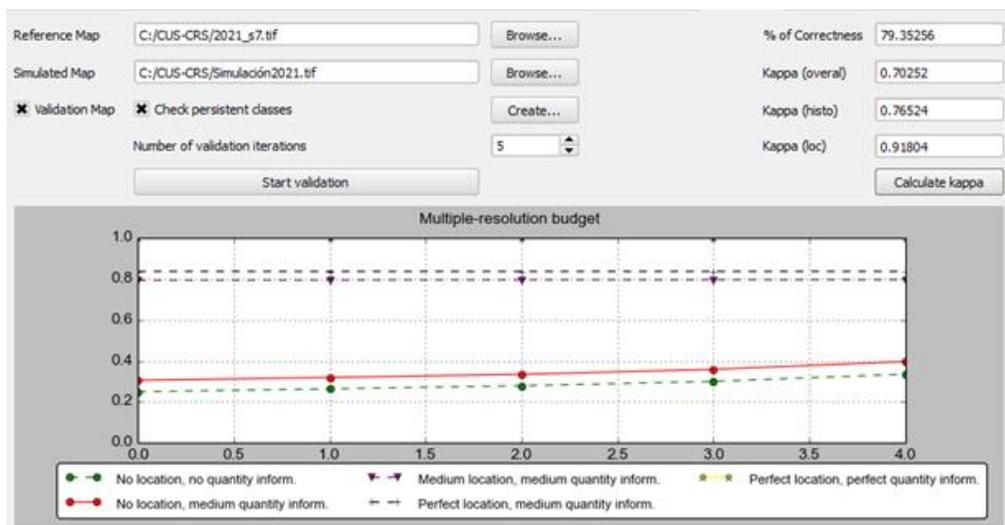
Modelamiento de Transición Potencial. Se seleccionó el método de Red Neural Artificial para la generación del escenario del CUS, dado que utiliza un algoritmo de aprendizaje que posee la capacidad autónoma (Inteligencia Artificial) para evaluar de manera independiente la precisión obtenida en los conjuntos de datos de entrenamiento, realizar su propia validación del modelo y conserva la mejor red neuronal en su memoria (Villalobos-Chacón, 2019). Se ejecutaron diferentes pruebas con el objetivo de estimar el entrenamiento más efectivo de la red para la aplicación del autómata celular. Este proceso implicó ajustes en aspectos como el tipo de vecindario, las tasas de aprendizaje, las capas ocultas y la cantidad de neuronas. La tasa de error del modelo fue del 6% (0.06842), esto debido a que, durante las interacciones de entrenamiento, la tasa de aprendizaje mostró cierta inestabilidad; lo cual es perceptible en los picos presentados en la curva de aprendizaje de las redes neuronales (Neural Network learning curve) de la **Figura 27**. No obstante, el modelo concluyó su proceso una vez que se logró la máxima precisión.

Figura 27. Modelamiento de Transición Potencial



Validación. Se llevó a cabo la validación computacional del modelo de CCS. Para ello, se utilizaron tanto el mapa de referencia T_2 y el mapa simulado mediante AC para el 2021. Finalmente, se consultaron las estadísticas de "kappa" (kappa estándar, kappa de histograma y kappa de localización) los cuales presentan valores entre 0.70 y 0.91 (**Figura 28**); indicativo de una buena concordancia en la exactitud de la evaluación (Juurlink & Detsky, 2005) y de que el modelo cuenta con una base estadística confiable en el diseño del modelo predictivo (Palacios Orejuela, 2020).

Figura 28. Resultado de la validación del modelo de CUS

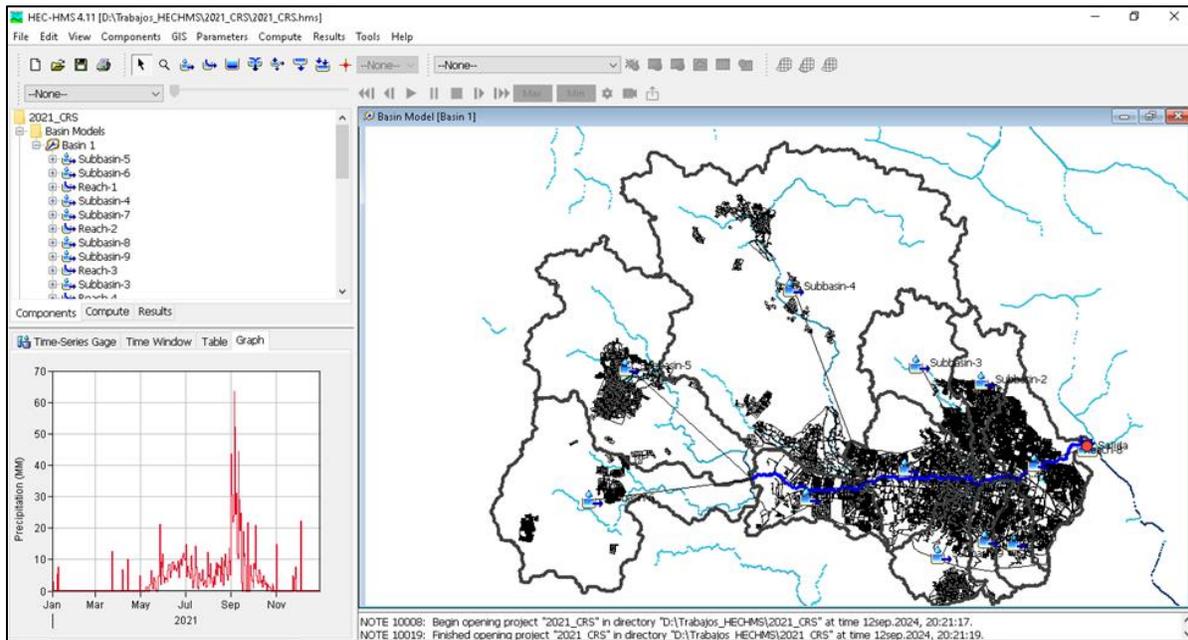


2.2.4. Etapa IV: construcción del modelo hidrológico de la CRS en el HEC-HMS

Se generó un modelo semidistribuido de la CRS en el programa HEC-HMS. Para ello, se plasmó computacionalmente los elementos fundamentales que la conforman: El modelo de cuenca, modelo meteorológico y las especificaciones de control. Finalmente, se simularon los escenarios de CC y CCS en el modelo construido.

1.) Modelo de cuenca. Se representó a la CRS y sus escurrimientos superficiales en el HEC-HMS (**Figura 29**), para ello se utilizó el parteaguas y su red hídrica en formato vectorial, así como los parámetros morfométricos más relevantes de las subcuencas que conforman el área de estudio, obtenidos en la [Etapa I](#).

Figura 29. Construcción del modelo de la CRS en el HEC-HMS



Se ingresaron los parámetros correspondientes a los métodos de cálculo utilizados para el procesamiento, entre los más importantes se encuentran los siguientes: para la transformación de la lluvia efectiva en escorrentía directa se utilizó el Hidrograma unitario del SCS, se usó la ecuación de Kirpich para calcular el T_c , para determinar la pendiente media de los cauces se eligió en método de Taylor-Swarts, el tiempo de retraso (T_p) se abordó de manera conceptual, considerándolo como un T_c ponderado; ya que de acuerdo con el USDA, la relación entre el tiempo de retraso y el tiempo de concentración se expresa como $T_p = 0.6T_c$. Para determinar la

propagación del hidrograma a través de los cauces se empleó en método de Muskingum. Para el cálculo de perdidas en la cuenca por infiltración se optó por el método del NC-SCS.

Para la estimación de los NC se aplicó la metodología del SCS (1972) mediante un algebra de mapas en QGIS 3.8 con información de capas en formato vectorial de la pendiente del terreno, el uso de suelo y el tipo de suelo. La pendiente del terreno fue obtenida a partir del análisis del MDE de la cuenca y reagrupada en dos clases: pendientes $<1\%$ y $>1\%$. El uso de suelo se determinó en la **Etapa III** en base a las cartas de uso de suelo y vegetación del INEGI. Los tipos de suelos fueron obtenidos de la carta edafológica del INEGI edición 2007 a escala 1:250 000, desde la página <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/> (**Figura 30**). La edafología fue clasificada hidrológicamente con base en su textura y a la lluvia antecedente (**Tabla 17 y 18**); para ello, se consideraron condiciones normales de humedad con valores de entre 2.5 y 5.0 cm (Aparicio-Mijares, 2010). Finalmente, los valores de NC se ponderaron y los pesos se distribuyeron en función de la superficie y agregados de manera manual en el HEC-HMS. No se agregó caudal base al modelo debido a la falta de información hidrométrica actual disponible.

Figura 30. Obtención de la capa Edafológica (Fuente: INEGI).

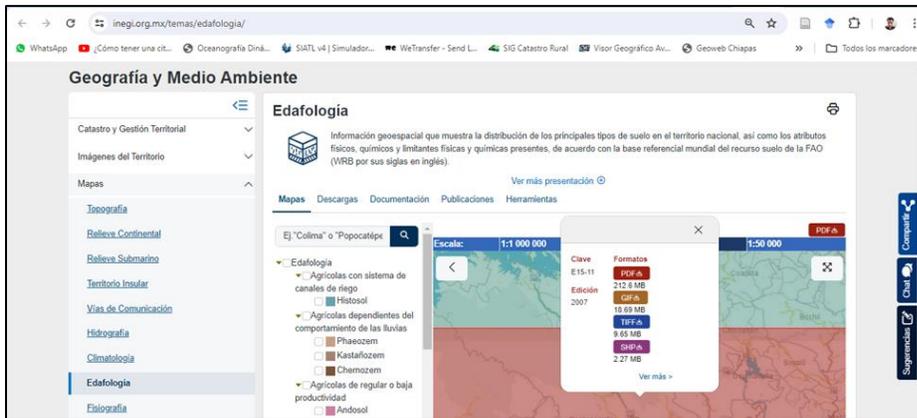


Tabla 17. Clasificación hidrológica de los suelos (CNA, 1987).

Tipo de suelo	Textura
A	Suelos de gravas y de arenas de tamaño medio, limpias y mezclas ambas. Estos generan el menor escurrimiento.
B	Suelos de arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de arena y limo. Generan escurrimiento inferior al medio.
C	Suelos de arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezcla de arena, limo y arcilla. Generan escurrimiento superior al medio.
D	Suelos arcillosos de alta plasticidad, con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie. Generan el mayor escurrimiento

Tabla 18. Valores de Nc utilizados como referencia

Descripción	Grupo de suelo				Clasificación
	A	B	C	D	
Selva baja caducifolia	39	63	74	80	Selva y Bosque
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	45	66	77	83	
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	45	66	77	83	
Selva mediana subperennifolia	45	66	77	83	
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	45	66	77	83	
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	45	66	77	83	
Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia	45	66	77	83	
Agricultura de temporal anual	71	88	87	91	Agricultura
Agricultura de temporal permanente	71	88	87	91	
Pastizal inducido	68	79	86	89	Pastizal
Pastizal cultivado	49	69	79	82	
Zona Urbana (Estacionamientos, calles y carreteras)	98	98	98	98	Urbano y Sin vegetación aparente

2.) Modelo meteorológico. Se ingresaron manualmente valores de P diaria en el modelo meteorológico del HEC-HMS para los escenarios 2021 y 2050. La simulación abarcó un periodo de 365 días; los valores ingresados en el proyecto generado para el 2021 corresponden a las lluvias medias mensuales del periodo 1970-2000 y para el escenario 2050 los valores de P mensual del SSP5-8.5 para el horizonte 2041-2060. Las precipitaciones acumuladas en el mes en ambos escenarios se distribuyeron en función de la probabilidad de ocurrencia observada en los registros de las estaciones con mayor influencia en la zona de estudios (**Tabla 19**). Los datos de P diaria histórica fueron obtenidos de la página <https://smn.conagua.gob.mx/es/> (**Figura 30**) reportado por los Organismos de Cuenca de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Tabla 19. Estaciones climatológicas con mayor influencia en la zona de estudio.

Número	Estación	Nombre	Altitud (msnm)	Periodo con información
1	7372	Berriozábal	890	09/1988 - 09/2019
2	7049	Maya Sol	998	09/2016 - 10/2019
3	7165	Tuxtla Gutiérrez (OBS)	570	01/1942 -07/2010
4	7176	Tuxtla Gutiérrez (CFE)	532	07/1970 - 12/2017
5	7202	Tuxtla Gutiérrez (DGE)	543	01/1951 -12/2019
6	7238	EL Sabinal	498	06/1987 - 09/2018
7	7319	San Fernando	950	08/1978 - 08/2018
8	7035	Chicoasén (CFE)	1240	07/1961 - 12/2017
9	7134	Puente colgante	418	01/1951 - 01/2018

Figura 30. Descarga de la P histórica diaria (SMN-CONAGUA).

Estación	Municipio	Código	Operatividad	Frecuencia	Periodo	Periodo	Periodo	Periodo
Hacienda San Cristobal	Tonalá	07073	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	
Hoccones	Tonalá	07074	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
La Tigresa	Tonalá	07098	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	
Tonalá (DGE)	Tonalá	07168	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Tonalá (SDN)	Tonalá	07201	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Tres Picos	Tonalá	07228	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Finca Agua Azul (CFE)	Tumbalá	07210	Suspendida	Diaria	Mensual			
Tumbalá (CFE)	Tumbalá	07169	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Medio Monte	Tuxtla Chico	07116	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Rosario Izapa (IMPA)	Tuxtla Chico	07079	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	
Talismán I	Tuxtla Chico	07166	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Talismán II	Tuxtla Chico	07227	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
El Sahinal	Tuxtla Gutiérrez	07235	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1971-2000	1981-2010
Tuxtla Gutiérrez (CFE)	Tuxtla Gutiérrez	07176	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Tuxtla Gutiérrez (DGE)	Tuxtla Gutiérrez	07202	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010 1991-2020
Tuxtla Gutiérrez (OBS)	Tuxtla Gutiérrez	07165	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Finca Germania	Tuzantán	07394	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1971-2000	1981-2010
Finca San Cristobal	Tuzantán	07394	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1971-2000	1981-2010
La Nueva (CFE)	Tuzantán	07095	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	
La Mesilla	Trimol	07094	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010 1991-2020
Trimol (CFE)	Trimol	07171	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	
San Jerónimo	Unión Juárez	07146	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Santo Domingo	Unión Juárez	07157	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010 1991-2020
Unión Juárez	Unión Juárez	07172	Operando	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000 1981-2010
Arco de Piedra	Venustiano Carranza	07010	Suspendida	Diaria	Mensual	Ext-hist	1961-1990	

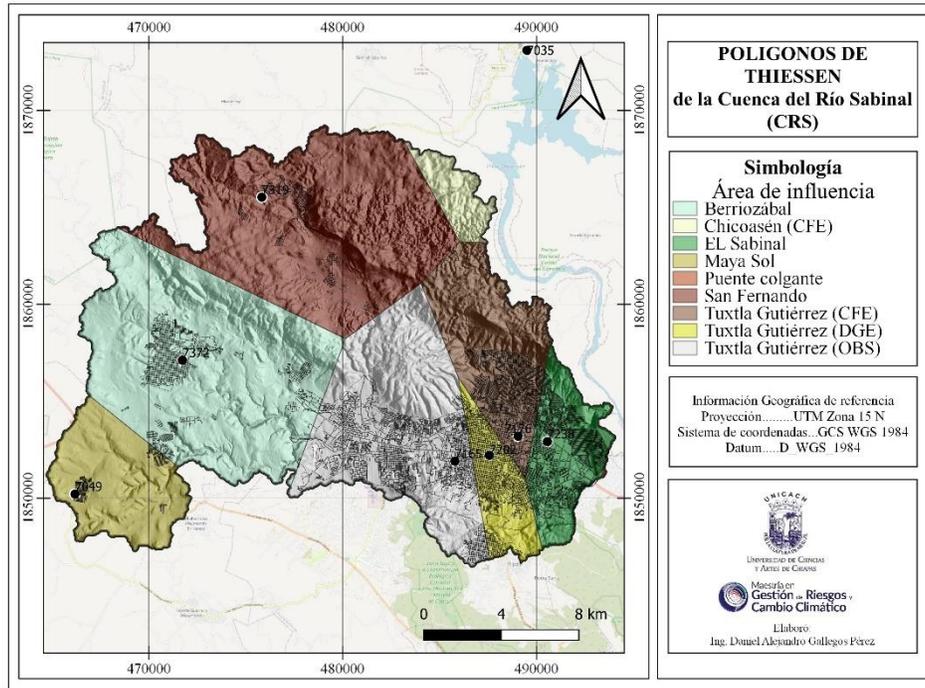
Para determinar la P media en la cuenca se eligió el método de polígonos de Thiessen. Se calculó el porcentaje del área de influencia de cada estación con el software QGIS (**Figura 31**). Para la estimación se consideró los valores registrados en cada estación meteorológica y se ponderó en función del área de influencia de acuerdo a la siguiente ecuación (Chow et al., 1994):

$$P = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^j A_j P_j \quad (8)$$

En este contexto, A_j representa el área de influencia de las estaciones, P_j denota la altura de P observada en cada estación, y A se define como la suma total de las áreas de influencia, es

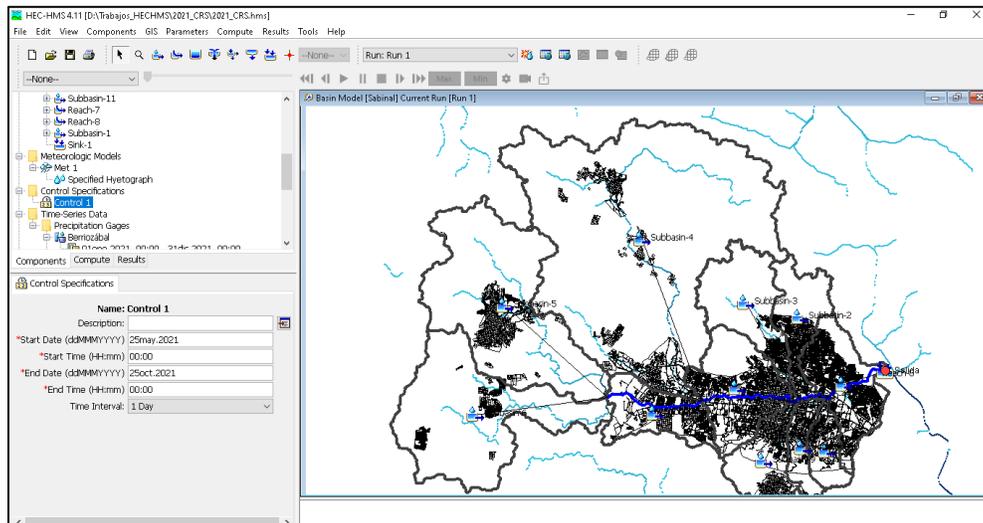
decir, $A = \sum_{j=1}^j A_j$, que corresponde al área total de la cuenca.

Figura 31. Trazo de polígonos de Thiessen en la CRS



3.) Especificaciones de control. Se especificó tanto el inicio como el final en la simulación de cada escenario y los tiempos de los eventos meteorológicos. Se consideró del 25 de mayo al 25 de octubre (**Figura 32**) tanto para el 2021 con información del periodo base 1970-2000 y para el horizonte 2050 (con datos del 2041-2060) debido a que históricamente es cuando se presentan las lluvias más intensas en la zona de estudio ([Anexo 8](#)).

Figura 32. Especificaciones de control para el 2021



4.) Calibración y validación del modelo. Se analizó la información hidrométrica de las estaciones: San Agustín, Canal Chacona, Vertedor Chacona y Puente Parque Madero, que de acuerdo a la base del BANDAS de la CONAGUA se encuentran ubicadas dentro de la cuenca de estudio (**Figura 33**). La información de cada una de las estaciones fue descargada desde la página <ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/> (**Figura 34**) y analizada en Excel. Sin embargo, no fue posible realizar la calibración y validación del modelo debido a la poca información hidrométrica encontrada, la falta de concordancia temporal con los valores de P disponibles, lo obsoleto de los valores debido a los cambios actuales de la geometría en los escurrimientos y a la carencia de información topográfica y de uso de suelo en el periodo 1948 a 1966 con datos (**Tabla 20**).

Figura 33. Estaciones hidrométricas ubicadas en la CRS.



Fuente: Recorte del “Plano general de la Región Hidrológica núm. 30 (Grijalva Usumacinta)”

Tabla 20. Estaciones hidrométricas consultadas en el BANDAS

Clave	Nombre	Corriente	Periodo de información	Cuenca
30024	San Agustín	Manantial San Agustín	1948-1951	Rio Sabinal
30022	Canal Chacona	Manantial Chacona	1950-1951	Rio Sabinal
30021	Vertedor Chacona	Manantial Chacona	1948-1951	Rio Sabinal
30038	Puente Parque Madero	Río Sabinal	1951-1966	Rio Grijalva

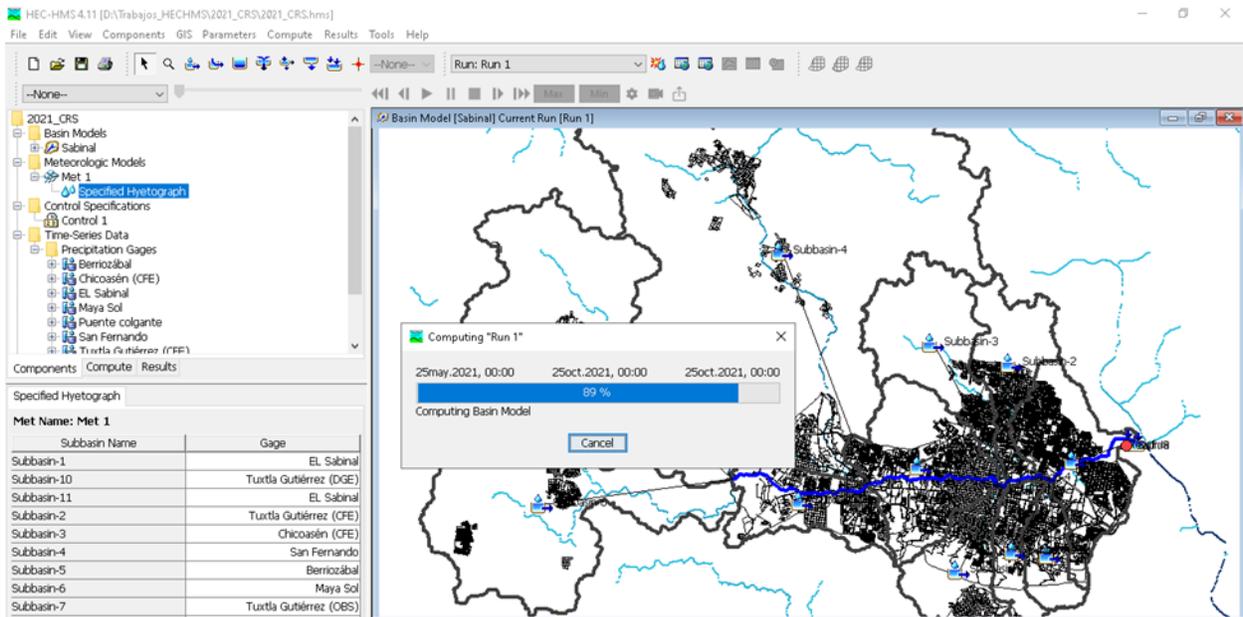
Figura 34. Descarga de información hidrométrica de la CRS.



Fuente: Captura de pantalla de la página del BANDAS de la CONAGUA.

5.) Simulación de escenarios de CC y CCS. Una vez construido el modelo hidrológico de la CRS se generaron dos simulaciones: la primera, para el año 2021 con los valores obtenidos de NC y P correspondientes a ese escenario (**Figura 35**) y la segunda con valores de NC y P correspondiente al escenario 2050.

Figura 35. Simulación de la CRS para el 2021.



CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parteaguas y red de drenaje de la cuenca

La delimitación del parteaguas revela que la CRS tiene un área de drenaje (A) con una superficie aproximada de 425,31 km², lo que la cataloga como cuenca intermedia-pequeña (Campos-Aranda, 1998); un perímetro (P) de 182,60 km, una longitud (Lb) de 27.83 km y una anchura máxima (As) de 18.20 km. La escala utilizada permitió definir con mayor precisión el parteaguas de la cuenca y todo su sistema de drenaje, incluido corrientes efímeras no observadas a simple vista en imágenes de satélite. Esto tiene importantes ventajas, especialmente en la precisión de la gestión y la planificación. Sin embargo, también presenta desafíos en términos de costos, tiempo y manejo de datos.

En la **Tabla 21** se observa que la cuenca presenta valores de 0.84, 0.55, 967.82 y 10.61; para Re, Ff, R y Sb, respectivamente lo cual implica una forma alargada y ovalada, relieves y pendientes pronunciados moderadamente montañoso y gran rapidez de evacuación de sus aguas (Campos-Aranda, 1998; Pareta & Pareta, 2012).

Tabla 21. Parámetros morfométricos más relevantes de la CRS

Parámetro	Resultado	Unidades
Área de la cuenca de drenaje (A)	425.31	km ²
Perímetro de la cuenca (P)	182.61	km
Orden de corrientes (u)	6.00	Adimensional
Longitud de la cuenca (Lb)	27.83	km
Ancho máximo de la cuenca (As)	18.20	km
Pendiente de la cuenca (Sb)	10.61	Porcentaje (%)
Elevación mínima (h)	382.88	m s. n. m.
Elevación máxima (H)	1350.7	m s. n. m.
Factor de forma (Ff)	0.55	Adimensional
Relación de elongación (Re)	0.84	Adimensional
Coefficiente de compacidad de Gravelius (Cc)	2.50	Adimensional
Desnivel (R)	967.82	km
Número de corrientes (Nu)	1,529	Adimensional
Longitud total de corrientes (Lu)	1,290.47	km
Pendiente promedio del canal principal (Sst)	1.25	Porcentaje (%)
Relación de bifurcación (Rb)	3.09	Adimensional
Densidad de drenaje (Dd)	0.74	km/km ²

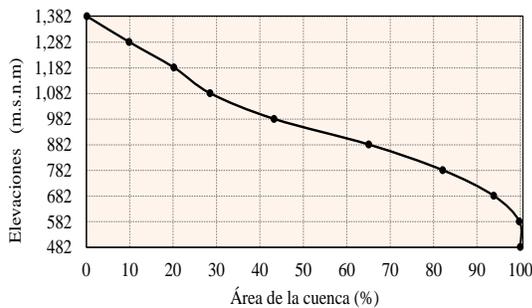
La forma alargada de la cuenca puede provocar un tiempo de concentración mayor, lo que significa que el agua de lluvia tarda más en desplazarse desde las partes más altas hasta la desembocadura, una forma más ovalada podría concentrar el flujo hacia el centro, aumentando el

riesgo de inundaciones en ciertas áreas, pero presenta otros desafíos en términos de manejo de sedimentos y recarga de acuíferos.

Las áreas con pendientes pronunciadas y montañosas tienden a tener un rápido escurrimiento superficial, lo que puede incrementar el riesgo de inundaciones repentinas en las zonas bajas, aumentan la erosión del suelo y la carga de sedimentos en los cursos de agua. Esto puede llevar a la colmatación de ríos y embalses, afectando la capacidad de almacenamiento y la calidad del agua. Además, pueden provocar deslizamientos de tierra y otros procesos de erosión que impactan negativamente en la estabilidad del terreno y la calidad del agua.

La forma de la curva hipsométrica de la CRS sugiere que la cuenca se encuentra en una etapa de equilibrio (**Figura 36**). Una curva hipsométrica en etapa de equilibrio indica una cuenca hidrográfica donde los procesos de erosión y sedimentación están balanceados, lo que tiene múltiples implicaciones positivas para la gestión de la cuenca.

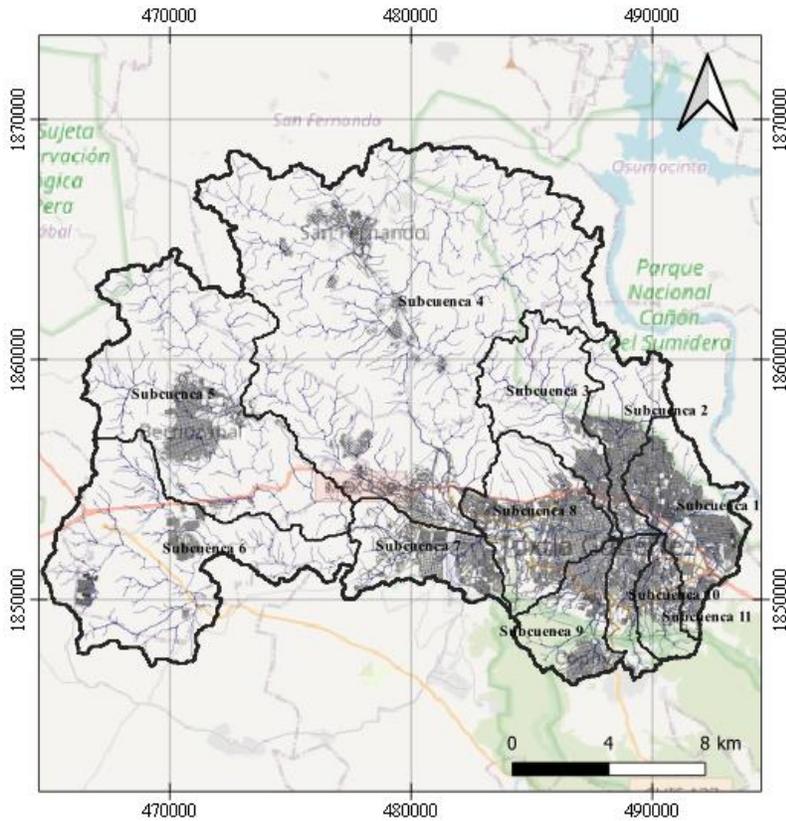
Figura 36. Curva hipsométrica de la CRS



El sistema de drenaje de la CRS (**Figura 37**), muestra patrones dendríticos y radiales con textura de drenaje moderada, está conformado por un río extenso de sexto orden (u) y una red de 1,529 canales, los cuales en su mayoría son corrientes efímeras. La longitud del cauce principal (Ls) es de 45.68 km y su pendiente promedio (Sst) 1.25%; señalando incrementos en la altura de 12.5 metros por cada kilómetro recorrido aguas arriba del cauce. La longitud total de corrientes (Lu) es de 1,290.47 km, con una relación de bifurcación (Rb) promedio de 3.09; típico de un sistema de drenaje natural dentro de una roca homogénea (Singh et al., 2021). La densidad de drenaje (Dd) es de 0.74 km/km² lo que quiere decir que, por cada kilómetro cuadrado de la cuenca, hay una longitud media de arroyos perennes de 0.74 km. Es importante señalar que en la determinación del Dd no se consideraron las corrientes intermitentes y efímeras ubicadas en las casi 9,265.802 ha de superficie urbana de la cuenca. Aunque computacionalmente todas las corrientes fueron delimitadas, hidrológicamente no se tuvo la certeza para considerarlas en

algunos cálculos debido a que la gran mayoría han sido modificadas o rellenas debido al proceso de urbanización. De acuerdo a May et al. (1997), Kourtis y Tsihrintzis (2021) y Pedrozo Acuña (2021) las alteraciones en el proceso natural de la cuenca repercuten en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Figura 37. Sistema de drenaje de la CHRS y división por subcuencas.



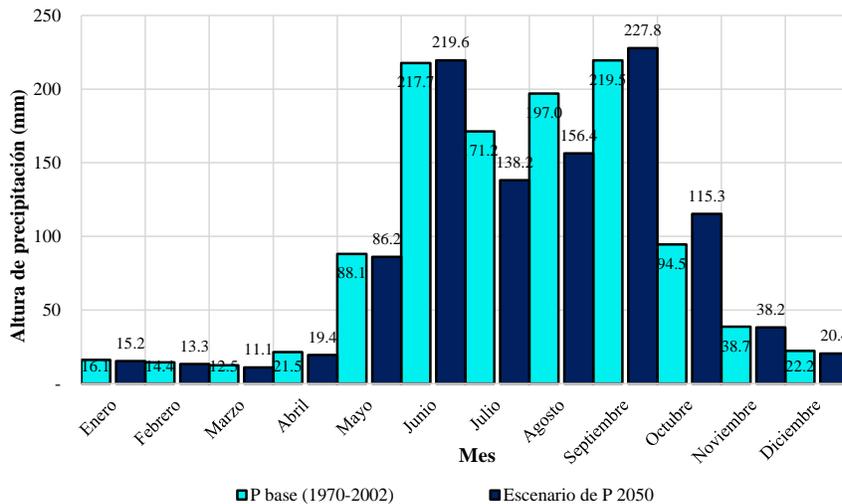
3.2. Escenarios de P ante CC

De acuerdo a los resultados obtenidos por el escenario SSP5-8.5 (Figura 38), se prevé que para el 2050 la P total disminuirá hasta un 5% con referente a la lluvia promedio anual considerada, lo equivalente a una reducción 0.15 mm/diarios. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Andrade-Velázquez et al., (2021) donde se prevé una elevada probabilidad de ocurrencia de eventos secos para el sureste del país (Grijalva-Usumacinta). Estas condiciones podrían afectar la disponibilidad de agua dulce, la biodiversidad y la salud de los ecosistemas de la cuenca, por lo que se recomienda desarrollar políticas que promuevan el uso eficiente del agua en todos los sectores, incluyendo incentivos para prácticas sostenibles en agricultura e industria,

fomentar campañas educativas sobre el uso responsable del agua y promover el uso de infraestructura verde, como reforestación y restauración bosque y selvas.

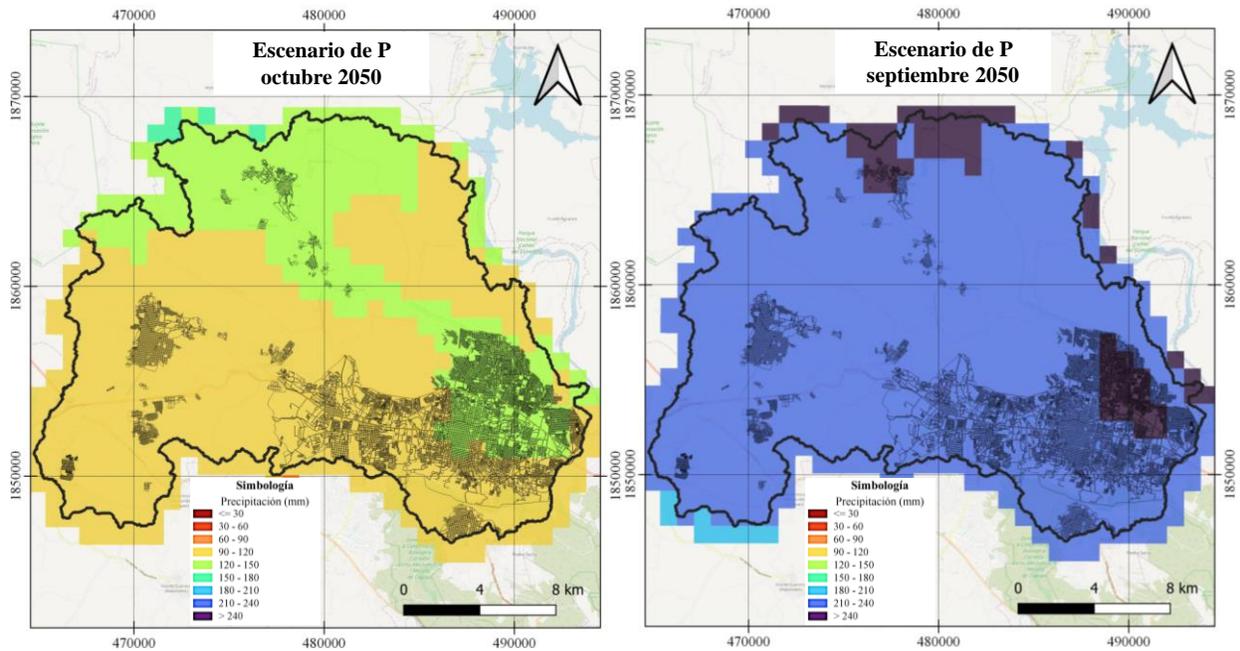
A nivel mensual las discrepancias entre los escenarios son marcadas; se considera que en julio y agosto la P podría caer en promedio entre 33 y 41 mm/mes. En contraste, en septiembre y octubre se vislumbran incrementos aproximados de lluvia entre 8 y 21 mm/mes, lo que está acorde con los resultados obtenidos por Ortiz-Gómez et al. (2020), donde se observó que aunque la frecuencia de los eventos de P está disminuyendo en la región, su intensidad está aumentando ligeramente.

Figura 38. Comparación de la P base 2021 y el escenario de P 2050 en la CRS (Fick & Hijmans, 2017).



Espacialmente, las lluvias más intensas se presentarán en el mes de septiembre (**Figura 39**) en la parte noreste de la cuenca; en localidades como: San Isidro, San Antonio, San Miguel, Francisco y Madero, El Porvenir y áreas urbanas de San Fernando, con un promedio anual cercano a 8 mm/d. También se espera que la P disminuya entre 0.4 y 1.2 mm/d en la parte sur poniente de la cuenca, afectando las colonias de San Isidro, Ciudad Maya, municipio de Ocozacoautla de Espinosa y la zona sur poniente de Tuxtla Gutiérrez.

Figura 39. Escenario de P en el mes de septiembre y octubre del 2050



3.3. Escenarios de CCS y valores de NC

De acuerdo con los resultados obtenidos, se espera que para el 2050, la vegetación de selva y bosques se conserven debido a los trabajos de conservación y reforestación que se han estado implementado en algunas partes de la cuenca en los últimos años (EditorExpreso, 2022; Gómez-López, 2022; Escena Chiapas, 2023; Zúñiga, 2024), que la superficie con agricultura de temporal y permanente disminuya en 2.52 ha; y que los pastizales y las áreas urbanas, junto con las zonas sin vegetación aparente, incrementen su superficie en 0.09 y 2.43 ha, respectivamente (**Figura 40**). Se prevé que la mancha urbana continúa expandiéndose sobre el lado norte oriente de Tuxtla Gutiérrez y en la parte norte del municipio de Berriozábal (**Figura 41**). Por lo que se recomienda trabajar en estrategias que permitan mejorar la planificación de la mancha urbana sin afectar los recursos naturales de la cuenca.

Figura 40. Resultados de la Escenario de USV para 2050 en la CRS.

Class statistics							
	Class color	2021	2050	Δ	2021 %	2050 %	Δ %
Selva y Bosque		17887.50 ha	17887.50 ha	0.00 ha	42.0631359735	42.0631359735	0.0
Agricultura		5688.18 ha	5685.66 ha	-2.52 ha	13.3759714203	13.3700455446	-0.00592587575978
Pastizal		7987.86 ha	7987.95 ha	0.09 ha	18.783756328	18.7839679664	0.000211638419991
Urbano y Sin vegetación aparente		10961.82 ha	10964.25 ha	2.43 ha	25.7771362782	25.7828505156	0.00571423733979

Transition matrix				
	Selva y Bosque	Agricultura	Pastizal	Urbano y Sin vegetación aparente
Selva y Bosque	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Agricultura	0.000000	0.998987	0.000016	0.000997
Pastizal	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
Urbano y Sin vegetación aparente	0.000000	0.000296	0.000000	0.999704

Por su parte, de acuerdo con los valores ponderados de NC a nivel de subcuenca (**Figura 42**), se pronostica que para el 2050 el escurrimiento superficial disminuirá ligeramente en casi toda la cuenca, únicamente en las subcuencas 7 y 9 se prevé un decrecimiento mayor de entre 10 y 14% debido a que se espera que cobertura vegetal en las zonas altas de estas subcuencas se mantengan y la P disminuya. Por tanto, se puede deducir que es muy importante continuar implementando procesos de gestión del uso del suelo en las áreas de vegetación y bosques.

Figura 41. CCS en la CRS para el 2021 y el Escenario de 2050

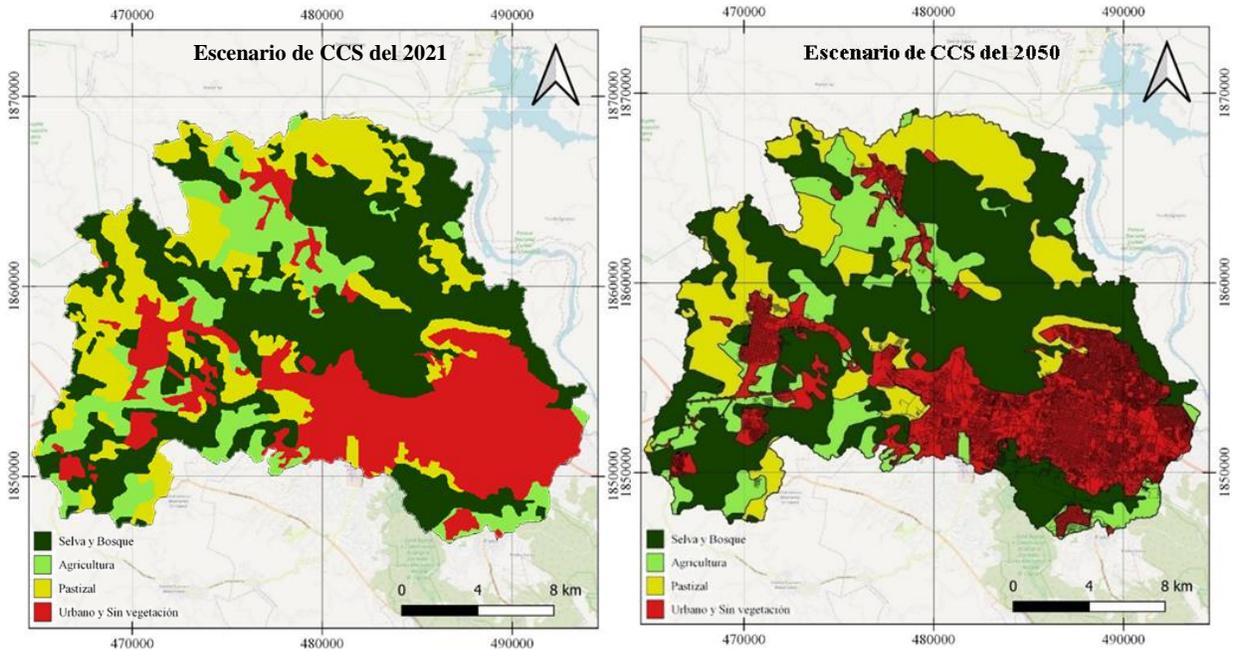
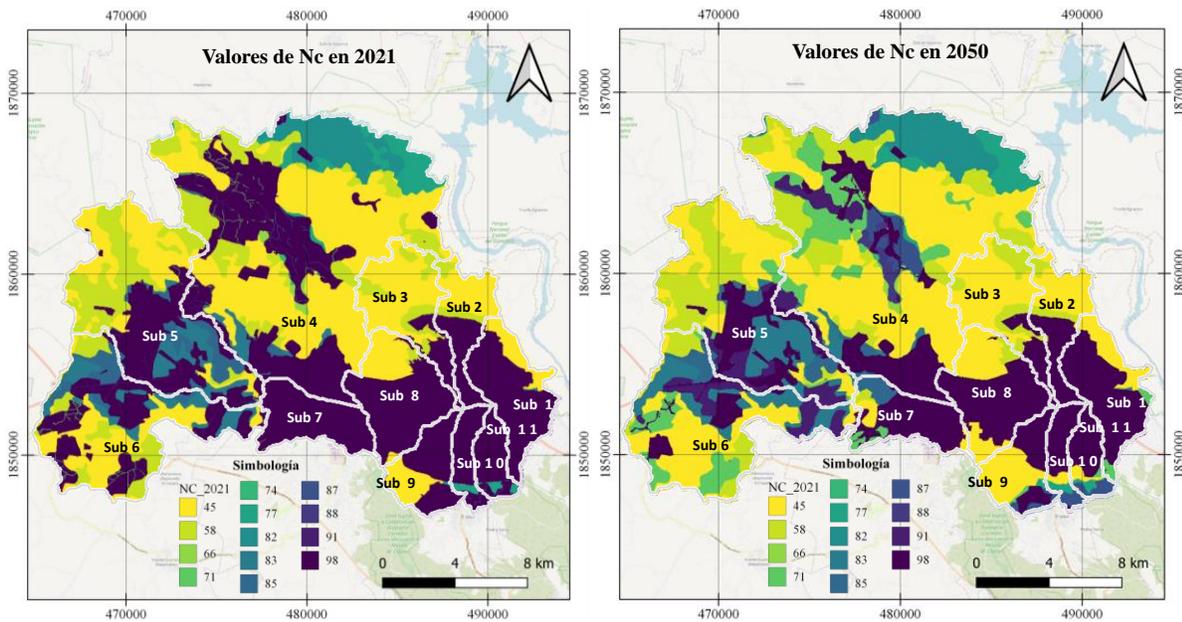


Figura 42. Distribución espacial de los valores de los NC en el 2021 y el escenario 2050.



3.4. Escenarios de escurrimientos bajo CC y CCS

De acuerdo a los hidrogramas obtenidos en las simulaciones realizadas, se prevé para el escenario 2050 una disminución del 5% en el volumen de escurrimiento superficial debido al decremento en los valores de P esperados en el futuro, a la preservación de la cobertura vegetal y forestal y porque hidrológicamente la impermeabilidad en la mayor parte de la cuenca es baja; en virtud de que el 60.5% (12760.166 ha) de la superficie está conformada por suelos de gravas y de arenas (**Figura 43**).

Sin embargo, en el mes de septiembre se contempla un ligero incremento del 6% en el gasto pico; indicativo de un posible aumento en la sensibilidad de la cuenca ante la presencia de fenómenos futuros. Hidrológicamente, la zona más expuesta por el incremento en los picos del escurrimiento se encuentra en la parte media baja de la cuenca, donde el 30% de la superficie (12,760.17 ha) está conformado por suelo arcilloso, concreto y asfalto, los cuales generan el mayor escurrimiento y donde casualmente se encuentra asentada más del 90% de la población. Estos resultados se asemejan con los valores encontrados por Hung et al. (2020), quienes con el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM) de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) observaron un aumento de hasta 8,6% en septiembre en la gasto máximo de dos cuencas altamente urbanizadas en Columbia, Carolina del Sur, EE. UU. Además, estudios realizados por Kundu et al. (2017) y Asiedu (2020) señalan la posibilidad de que en el futuro se

presenten aumentos en los picos de inundaciones y en la frecuencia de desbordamientos en algunas zonas urbanas. Al respecto, se estima que las localidades más susceptibles ante incremento de la P futura en la CRS, son aquellas cercanas a canales, cuerpos de agua y cercanas a la salida de las subcuencas (**Figura 44**): uno (colonia Paso Limón, 24 de junio, fraccionamiento La Ilusión, El Bosque, Infonavit Grijalva, Fraccionamiento), dos (Fraccionamiento El Vergel), subcuenca tres (Potinaspak y colonia Adonahí) ocho (colonia Jardines de Tuxtla, Rincón de los Lagos, La Gloria y fraccionamiento Parque Madero), nueve (colonia Popular, Granja Uncil y San Francisco), diez (colonia Magisterial y Santos) y once (colonia Cerro Hueco, colonial, Las Palmas, La Moderna, fraccionamiento Los Olivos y Bienestar Social).

Con el objetivo de mitigar las consecuencias de posibles inundaciones futuras, se recomienda conservar y restaurar las áreas verdes, tales como los bosques urbanos, promover la instalación de techos verdes, pavimentos permeables y bio-retenedores, así como preservar los cauces fluviales en su estado natural, evitando su modificación o impermeabilización. Además, es fundamental impulsar campañas educativas que sensibilicen a la población sobre la relevancia de la gestión del agua y las prácticas sostenibles. Se deben elaborar planes de ordenamiento territorial que tomen en cuenta las zonas propensas a inundaciones y limiten el desarrollo en áreas de alto riesgo. También es importante facilitar la formación de comités vecinales que identifiquen problemas específicos relacionados con el agua en sus comunidades, implementar la construcción de cisternas subterráneas y sistemas de recolección de agua de lluvia, ampliar y mejorar el mantenimiento de los sistemas de drenaje existentes, así como desarrollar un sistema de alerta temprana que permita anticipar eventos climáticos extremos, facilitando de este modo la evacuación oportuna y otras medidas preventivas.

Figura 43. Comparación de resultados de los escenarios 2021 y 2050

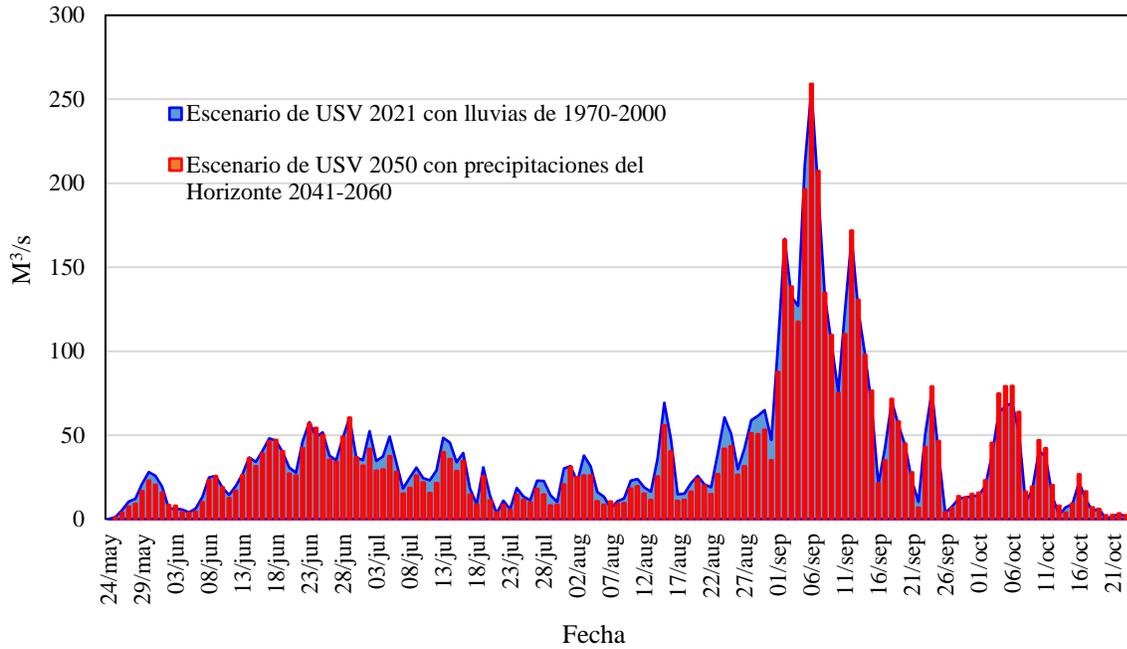
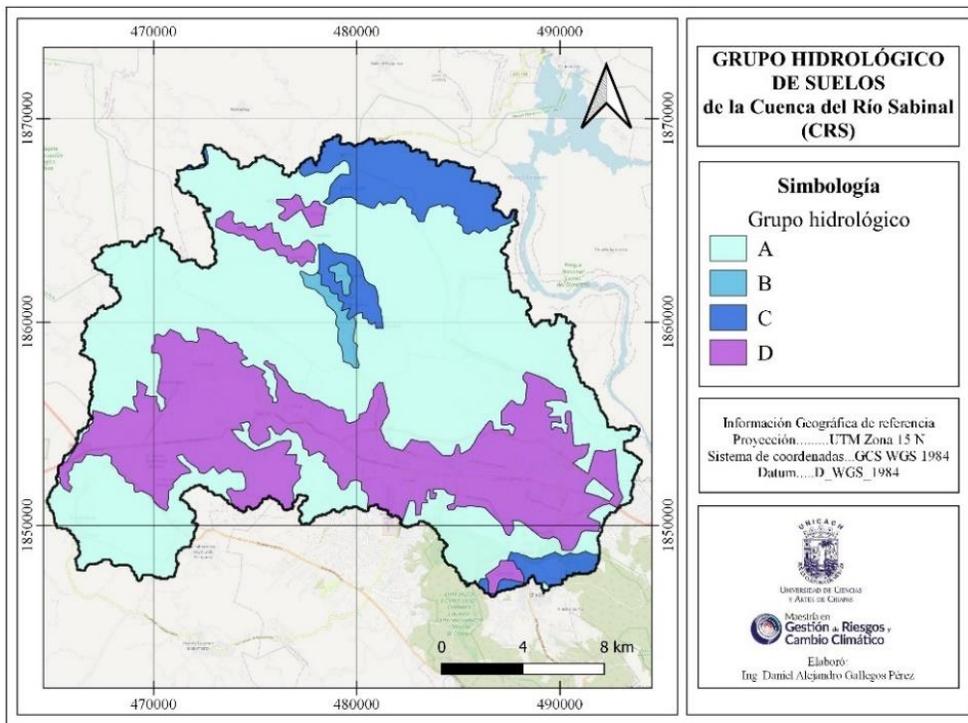


Figura 44. Grupos hidrológicos de suelo en la CRS.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que debido al CCS en la CRS los pastizales, las áreas urbanas y las zonas sin vegetación aparente incrementarán su superficie, la mancha urbana continuará expandiéndose en por lo menos 2.43 ha sobre el lado norte oriente de Tuxtla Gutiérrez y en la parte norte del municipio de Berriozábal. Se prevé que el CC disminuirá la P total de la cuenca en por lo menos un 5% ocasionando periodos de sequía meteorológica en algunas partes de la cuenca. Además, en los meses de septiembre y octubre se contemplan incrementos en la intensidad de la P con valores de entre 8 y 21 mm/mes. Por otro lado, se prevé que la combinación del CC y CCS impactará significativamente en el escurrimiento superficial de la cuenca, para el 2050 se espera una disminución de por lo menos 5% en el volumen de escurrimiento superficial y un aumento en el gasto pico en un 6%; la zona más expuesta ante el incremento de la sensibilidad de la cuenca ante eventos hidrometeorológicos se ubica en la parte media baja de la cuenca, en las subcuencas uno, dos, ocho, nueve, diez y once. Por lo anterior, se rechaza la hipótesis de que el CCS influiría de manera más significativa en el escurrimiento superficial de la CRS que los efectos del CC en la P. Los resultados en las simulaciones señalan que para el caso de la cuenca el CC tiene un impacto mayor en los incrementos porcentuales máximos de los picos de descarga y en el volumen total de escurrimiento en comparación con las variaciones en el CCS.

Estos hallazgos subrayan la urgencia de establecer estrategias efectivas para la gestión y mitigación de aguas pluviales en los proyectos de restauración de ríos. La notable magnitud del incremento en los riesgos de inundación anticipados enfatiza la relevancia de promover un desarrollo sostenible y un manejo adecuado de las aguas pluviales.

Es importante señalar, que, debido a la falta de calibración y validación del modelo hidrológico, las incertidumbres en las proyecciones de los escenarios de P y CCS y la falta de verificación en campo de las características morfométricas de la cuenca, se sugiere considerar con cautela los valores obtenidos en el presente trabajo. Es crucial que los usuarios de datos sean conscientes de estas limitaciones y utilicen la información de manera adecuada.

Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo la calibración y validación del modelo de la CRS utilizando datos de aforo recientes. Además, es fundamental establecer una modelación continua de la cuenca para lograr un ajuste más preciso de sus parámetros. Se propone que, con

la información obtenida en este estudio, se desarrolle e implemente una red de monitoreo hidrometeorológico que permita alertar a la población en tiempo real.

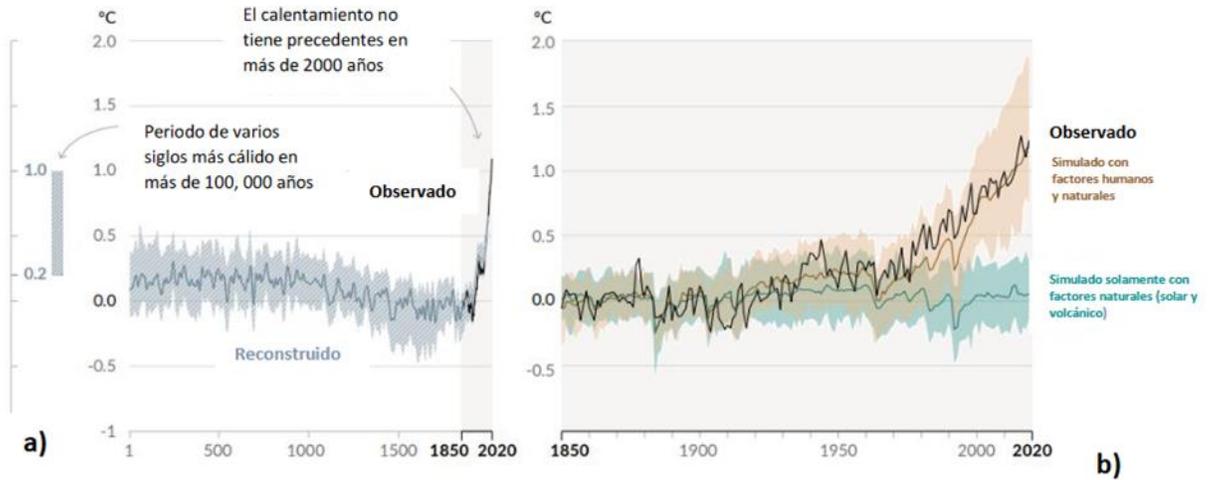
Es importante vincular en investigaciones futuras la simulación de varios modelos de circulación global y diferentes escenarios de cambio climático, para proporcionar un contraste entre las condiciones de la cuenca en un contexto de acciones destinadas a mitigar el cambio climático y en otro donde las actividades realizadas no favorezcan dicha mitigación.

En el área de investigación, es fundamental llevar a cabo las siguientes acciones:

- Reforestación y plantación de coberturas vegetales para estabilizar el suelo y reducir la escorrentía superficial.
- Diseño de sistemas de drenaje eficientes para manejar el rápido escurrimiento y evitar inundaciones en áreas vulnerables. Identificación específica de áreas de alto riesgo de erosión e inundación para restringir el desarrollo y promover prácticas agrícolas sostenibles.
- Diseño y construcción de infraestructuras resistentes a desastres naturales, como puentes elevados y sistemas de alerta temprana para inundaciones. Implementación de proyectos de restauración de riberas para reducir la erosión y mejorar los hábitats acuáticos.
- Implementación de trampas de sedimentos y estructuras de retención para reducir la carga de sedimentos en los cuerpos de agua y programas de mantenimiento regular para infraestructuras hidráulicas y sistemas de drenaje para asegurar su eficiencia y durabilidad, entre otros.

ANEXOS

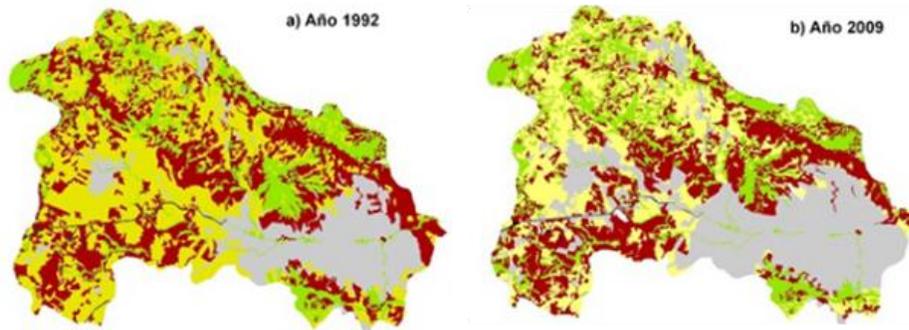
Anexo 1. Historia del cambio de temperatura global y causas del calentamiento reciente.



Descripción: a) Cambio en la temperatura de la superficie global (promedio decenal) reconstruido y observado. b) Cambio en la temperatura de la superficie global observada y simulada utilizando factores humanos y naturales y sólo naturales (ambos para 1850-2020). Fuente: IPCC (2021 tomado de INECC, 2022).

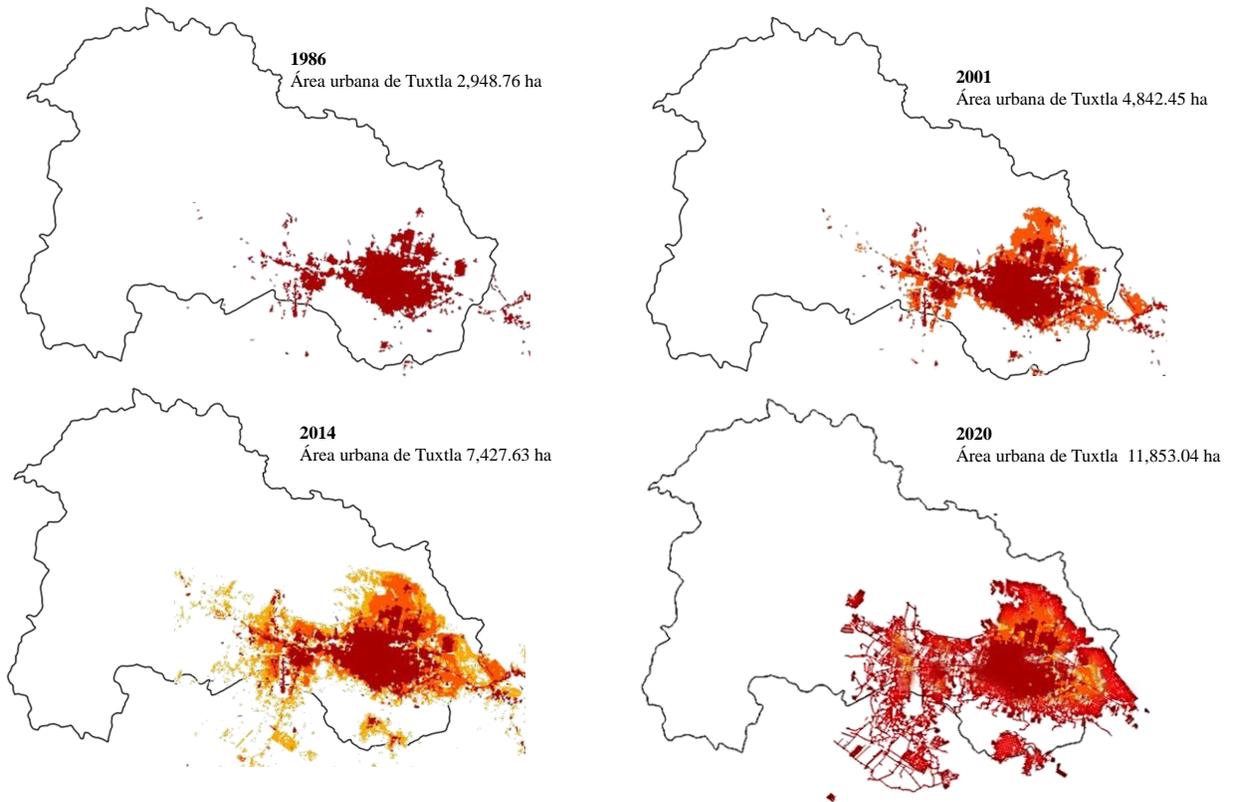
Anexo 2. Crecimiento de la mancha urbana en la CRS.

Figura 45. Comparación de la mancha urbana en la CRS en 1992 y 2009.



Fuente: Extraído de Gordillo-Ruiz y Castillo-Santiago (2017).

Figura 46. Urbanización de Tuxtla Gutiérrez en 1986, 2001, 2014 y 2020 (Silva et al., 2015; INEGI, 2020).



BIBLIOGRAFÍA

- Agus Suharyanto, Ery Suhartanto, & Surya Budi Lesmana. (2020). Watershed morphometric classification analysis using Geographic Information System. *GEOMATE Journal*, 19(74), 114–122.
- Alamdari, N., Claggett, P., Sample, D. J., Easton, Z. M., & Nayeb Yazdi, M. (2022). Evaluating the joint effects of climate and land use change on runoff and pollutant loading in a rapidly developing watershed. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129953.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129953>
- Álvarez-Soberano, A., & Medrano-Pérez, O. R. (2020). Caracterización geomorfológica de la subcuenca río Mezcalapa, región hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH-30) en sureste de México. *Investigación y Ciencia*, 28(80), 32–44.
- American Meteorological Society (AMS). (2024, abril 19). *Ecuación de Clausius-Clapeyron—Glosario de Meteorología*. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Clausius-clapeyron_equation
- Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O. R., Andrade-Velázquez, M., & Medrano-Pérez, O. R. (2021). Historical precipitation patterns in the South-Southeast region of Mexico and future projections. *Earth Sciences Research Journal*, 25(1), 69–84.
<https://doi.org/10.15446/esrj.v25n1.87255>
- Aparicio-Mijares, F. J. (2010). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. Limusa.
- Arguez, A., & Vose, R. S. (2011). The Definition of the Standard WMO Climate Normal: The Key to Deriving Alternative Climate Normals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6), 699–704.
- Arrieta Vera, J., & Díaz Moreno, L. (2015). Una perspectiva de la modelación desde la Socioepistemología. *Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa*, 18(1), 19–48. <https://doi.org/10.12802/relime.13.1811>
- Asiedu, J. B. (2020). Reviewing the argument on floods in urban areas: A look at the causes. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 15(1), 24–41.
<https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=888384>
- Azteca Noticias (Director). (2016, septiembre 5). *Video: 2 muertos por inundaciones en Tuxtla Gutiérrez / Azteca Chiapas* [Video recording].
<https://www.youtube.com/watch?v=VpBaeiDoh-o>

- Azteca Noticias (Director). (2023, junio 26). *Una buena acción terminó en tragedia: Un hombre fue tragado por una alcantarilla* [Video recording].
<https://www.youtube.com/watch?v=rA1skLh4oI8>
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., ... Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), Article 7772. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Bogale, A. (2021). Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 11(7), 122. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01447-9>
- Caicedo Toro, M. D., Cabrera Estupiñán, E., Zambrano Navarrete, X. A., Rodríguez Bravo, M. E., Intriago Zambrano, P. E., Caicedo Toro, M. D., Cabrera Estupiñán, E., Zambrano Navarrete, X. A., Rodríguez Bravo, M. E., & Intriago Zambrano, P. E. (2021). Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8(SPE2). <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2605>
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Castro-Mendoza, I., Valdez-Lazalde, J. R., Donovan, G., Trinidad, T. M., Escalante, F. O. P., & Morales, W. V. (2022). Does land-use affect the temperature distribution across the city of Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México? *Investigaciones Geográficas*, 107, Article 107. <https://doi.org/10.14350/rig.60394>
- Charron, I. (2014). *A guidebook on climate scenarios: Using climate information to guide adaptation research and decisions*.
- Choudhari, P. P., Nigam, G. K., Singh, S. K., & Thakur, S. (2018). Morphometric based prioritization of watershed for groundwater potential of Mula river basin, Maharashtra, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(4), 256–267. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452482>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Internacional, S.A.

- Comisión Nacional del Agua (CNA). (1987). *Instructivo de Hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*.
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23, núm. 64.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66784>
- Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., & Maghsood, F. F. (2021). Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology*, 593, 125621.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621>
- Dlugokencky, E., Houweling, S., Dirksen, R., Schröder, M., Hurst, D., & Forster, P. (2016). Observación del vapor de agua. *Boletín - Organización Meteorológica Mundial*, 65(2), 48–52.
- EditorExpreso. (2022, agosto 10). Continúa ayuntamiento de Tuxtla reforestando zonas afectadas del Cañón del Sumidero. *expresochiapas.com*.
<https://expresochiapas.com/noticias/2021/07/continua-ayuntamiento-de-tuxtla-reforestando-zonas-afectadas-del-canon-del-sumidero/>
- Espinosa-Ballén, J. A. (2019). *Impacto del cambio climático y de los cambios del uso del suelo en los caudales de la cuenca del río Frío*.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77181>
- Excélsior TV (Director). (2017, junio 24). *Tuxtla Gutiérrez sufre por intensas lluvias* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=KevVJB89kHY>
- FAO. (1996). Forest resources assessment 1990. *Survey of tropical forest cover and study of change processes*, 130, 152.
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (Cuarta). FAO ;
<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/a0541s>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315.
<https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Flores-López, H. E., & Martínez-Menes, M. R. (2010). *Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México*.
- Gallegos, P. D. A. (2012). *Modelamiento hidrológico de la Cuenca Salinas, Chiapas, para cuatro escenarios de uso de suelo* [Tesis de Maestría, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)]. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/656>
- Gantumur, B., Wu, F., Vandansambuu, B., Battsengel, Tsegmid, B., Bazarkhand, Dalaibaatar, E., Enkhjargal, Zhao, & Yan. (2022). Spatiotemporal dynamics of urban expansion and its simulation using CA-ANN model in Ulaanbaatar, Mongolia. *Geocarto International*, 37, 494–509. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1723714>
- García Benítez, M. G., Nucamendi Hernández, S. N., & Ávila Flores, O. Á. (2022). Condiciones de habitabilidad ante inundaciones: El caso de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Decumanus*, 8(8), Article 8. <https://doi.org/10.20983/decumanus.2022.1.4>
- García, E. (1998). *Carta de climas de la República Mexicana a escala 1:1000,000, versión digital*. [Dataset]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/climas/clima1mgw
- Gobierno del Estado de Chiapas. (2004). *Estudio de Aprovechamiento Hidráulico Integral y de Control de Inundaciones de la Cuenca Río Sabinal, México*. Universidad Autónoma de Chiapas.
- Gómez-López, J. A. (2022, agosto 10). Continúa en la capital Programa Municipal de Reforestación 2022. *MEGANOTICIAS*. <https://www.meganoticias.mx/index.php/tuxtla-gutierrez/noticia/continua-en-la-capital-programa-municipal-de-reforestacion-2022/350757>
- Gordillo-Ruiz, M. C., & Castillo-Santiago, M. A. (2017). Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10), 39–49. <https://doi.org/10.19136/era.a4n10.803>
- Gravelius, H. (1914). Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. *Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, Vol. I. Rivers, in German)*. Goschen, Berlin.
- H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutierrez (HATG). (2007). *Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. <https://tuxtla.gob.mx/pg/muni/>

archivos/transparencia-fiscal/1-marco-regulatorio/61-programa-de-desarrollo-urbano-de-tuxtla-2007. pdf

- Hamman, J. J., Nijssen, B., Bohn, T. J., Gergel, D. R., & Mao, Y. (2018). The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): Infrastructure improvements for new applications and reproducibility. *Geoscientific Model Development*, *11*(8), 3481–3496. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3481-2018>
- HEC (Hydrologic Engineering Center). (2023). *HEC-HMS User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest>
- HEC (Hydrologic Engineering Center). (2024). *HEC-HMS Technical Reference Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm>
- Herrera, K. (2022, junio 20). *Intensa lluvia causa encharcamientos e inundaciones en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. N+. <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/intensa-lluvia-causa-encharcamientos-inundaciones-tuxtla-gutierrez-chiapas/>
- Hertzberg, M., Siddons, A., & Schreuder, H. (2017). Role of greenhouse gases in climate change. *Energy & Environment*, *28*(4), 530–539. <https://doi.org/10.1177/0958305X17706177>
- Horton, R. E. (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, *13*(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, *56*(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Hung, C.-L. J., James, L. A., Carbone, G. J., & Williams, J. M. (2020). Impacts of combined land-use and climate change on streamflow in two nested catchments in the Southeastern United States. *Ecological Engineering*, *143*, 105665. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105665>
- Huntrieser, H., Lichtenstern, M., Scheibe, M., Aufmhoff, H., Schlager, H., Pucik, T., Minikin, A., Weinzierl, B., Heimerl, K., Fütterer, D., Rappenglück, B., Ackermann, L., Pickering, K. E., Cummings, K. A., Biggerstaff, M. I., Betten, D. P., Honomichl, S., & Barth, M. C. (2016). On the origin of pronounced O₃ gradients in the thunderstorm outflow region during DC3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *121*(11), 6600–6637. <https://doi.org/10.1002/2015JD024279>

- Imagen Noticias (Director). (2023, junio 27). *Hallan cuerpo de hombre que fue succionado por una alcantarilla | DPC con Nacho Lozano* [Video recording].
<https://www.youtube.com/watch?v=4vRsMG7HXFw>
- INESA-COLPOS. (2010). *Plan de gestión y manejo integral de la cuenca del Río Sabinal* (p. 120). Colegio de Postgraduados.
https://remexcu.org/documentos/conagua/bcc/pg/ctc/2011_PG_Sabinal.pdf
- Instituto Estatal del Agua. (2013). *Plan Maestro de manejo integral y aprovechamiento sustentable del Río “El Sabinal”, Chiapas*.
<https://www.sop.chiapas.gob.mx/DESCARGAS/PlanMaestroRioElSabinalChiapas.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). *Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones* (p. 65).
<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/?De=IGOBMX>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1999). *Diccionario de datos geológicos. (Vectorial). Esc. 1: 250 000. Sistema de Información Geográfica*.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825223144>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie IV (continuo nacional), escala: 1:250000*. [Dataset]. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks4gw.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union), escala: 1:250 000. Edición: 1*. [Dataset]. Aguascalientes, México.
http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s6gw
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Diccionario de datos edafológicos. Escala 1:250 000. Versión 4*.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825092023>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021a). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Subsistema de Información Demográfica y Social.
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021b). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000, Serie VII*. [Dataset]. Instituto Nacional

- de Estadística y Geografía.
http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s6gw
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021c). *Diccionario de datos del continuo nacional geológico. INEGI-SGM. Escala 1:250 000*.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842651>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023a). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1: 250 000 (Continuo Nacional)* [Dataset].
<https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023b, agosto 23). *Biblioteca digital de Mapas*. Mapas; Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
<https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=193&ag=20>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023c, agosto 23). *Topografía*. Geografía y Medio Ambiente; Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
<https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI). (2020). *Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020*. Mapas.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469>
- Instituto Nacional Estadística y Geografía INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía. Geológica*.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825231767>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla,*

- A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6)–Summary for Policymakers*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- IUSS Working Group WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos* [Informes sobre recursos mundiales de suelos 106.]. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en/>
- Jorquera, E., Weber, J., & Reyna, S. (2014). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*. <https://www.researchgate.net/publication/266885248>
- Kourtis, I. M., & Tsihrintzis, V. A. (2021). Adaptation of urban drainage networks to climate change: A review. *Science of The Total Environment*, 771, 145431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145431>
- Koven, C. D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G., & Tarnocai, C. (2011). Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(36), 14769–14774. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103910108>
- Kumar, P., & Sarkar, P. (2022). A comparison of the AHP and TOPSIS multi-criteria decision-making tools for prioritizing sub-watersheds using morphometric parameters' analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 3973–3983. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01334-x>
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Individual and combined impacts of future climate and land use changes on the water balance. *Ecological Engineering*, 105, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.061>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lea, N. L. (1992). An Aspect-Driven Kinematic Routing Algorithm. En *Overland Flow: Hydraulics And Erosion Mechanics* (1st Edition, pp. 393–407). <https://doi.org/10.1201/b12648>

- Leyte, L. (2023, septiembre 7). Mapa de riesgos de Tuxtla obsoleto, afirman especialistas. *MEGANOTICIAS*. <https://www.meganoticias.mx/tuxtla-gutierrez/noticia/mapa-de-riesgos-de-tuxtla-obsoleto-afirman-especialistas/456722>
- Liu, Y., Guan, Z., Huang, T., Wang, C., Guan, R., & Ma, X. (2023). Combined Effects of Land Use/Cover Change and Climate Change on Runoff in the Jinghe River Basin, China. *Atmosphere*, *14*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/atmos14081237>
- López Huerta, C. A. L., Marceleño-Flores, S. M. L., Nájera-González, O., & Bojórquez-Serrano, J. I. (2022). La Morfometría como apoyo al estudio ante inundaciones en una cuenca del occidente de México. *EDUCATECONCIENCIA*, *30*(34), Article 34. <https://doi.org/10.58299/edu.v30i34.485>
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua*, *6*(1), 121–137.
- López-Ramos, A., Medrano-Barboza, J. P., Martínez-Acosta, L., Acuña, G. J., Remolina López, J. F., & López-Lambrano, A. A. (2022). Assessment of Morphometric Parameters as the Basis for Hydrological Inferences in Water Resource Management: A Case Study from the Sinú River Basin in Colombia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *11*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijgi11090459>
- Lu, C., Yu, Z., Zhang, J., Cao, P., Tian, H., & Nevison, C. (2022). Century-long changes and drivers of soil nitrous oxide (N₂O) emissions across the contiguous United States. *Global Change Biology*, *28*(7), 2505–2524. <https://doi.org/10.1111/gcb.16061>
- Magallanes-Quintanar, R., López, H., Aurelio, M., & Galván-Tejada, C. E. (2017). Análisis de la evaporación y cambio climático en el centro de México. *Nova scientia*, *9*(18), 76–93. <https://doi.org/doi.org/10.21640/ns.v9i18.750>
- Marroquín, A. (2023, septiembre 7). *Atlas de riegos de Tuxtla es pésimo y obsoleto; lleva 10 años sin cambios*. MuralChiapas Agencia Multimedios - Bernardino Toscano. <https://muralchiapas.com/noticias/estatal/30084-atlas-de-riegos-de-tuxtla-es-pesimo-y-obsoleto-lleva-10-anos-sin-cambios>
- May, C., Horner, R., Karr, J., Mar, B., & Welch, E. (1997). Effects of Urbanization on Small Streams in the Puget Sound Lowland Ecoregion. *Watershed Protection Techniques*, *2*.

- Maza, D. (2022, junio 19). Fuerte lluvia genera inundaciones en colonias de Tuxtla Gutiérrez. *El Heraldo de Chiapas*. <https://www.elheraldodechiapas.com.mx/local/fuerte-lluvia-genera-inundaciones-en-colonias-de-tuxtla-gutierrez-8463900.html>
- McSweeney, R. (2018, enero 15). *Q&A: How do climate models work?* Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/>
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., ... Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, *13*(8), 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- Méndez-Gutiérrez, A. G., Corral-Rivas, S., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F., & Pompa-García, M. (2021). Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, *39*. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.641>
- Meteosim. (2020, abril 2). Modelos Globales y Regionales de Cambio Climático. *Meteosim*. <https://meteosim.com/modelos-globales-regionales-cambio-climatico/>
- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research*, *24*, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Ming, T., de_Richter, R., Shen, S., & Caillol, S. (2016). Fighting global warming by greenhouse gas removal: Destroying atmospheric nitrous oxide thanks to synergies between two breakthrough technologies. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(7), 6119–6138. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6103-9>
- Montecelos-Zamora, Y. (2018). *Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático* [Tesis de doctorado]. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2531>
- Moustakis, Y., Onof, C. J., & Paschalis, A. (2020). Atmospheric convection, dynamics and topography shape the scaling pattern of hourly rainfall extremes with temperature globally. *Commun Earth Environ*, *1*(11). <https://doi.org/doi.org/10.1038/s43247-020-0003-0>
- Munro, S. E. (2010). *El río y la forma. Introducción a la geomorfología fluvial*. RIL Editores.
- Nalesso, M. (2014). *Hydro-BID*. Banco Interamericano de desarrollo.

- NMás (Director). (2020, agosto 31). *Afectaciones por intensas lluvias en Chiapas—Las Noticias* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=hZJ3YQsPD1s>
- Ogden, F. L., Raj Pradhan, N., Downer, C. W., & Zahner, J. A. (2011). Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment. *Water Resources Research*, *47*(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010550>
- O’Gorman, P. A., & Muller, C. J. (2010). How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius–Clapeyron scaling in climate change simulations? *Environmental Research Letters*, *5*(2), 025207. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025207>
- O’Neill, B. C., Carter, T. R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kriegler, E., Preston, B. L., Riahi, K., Sillmann, J., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D., Carlisle, D., Conde, C., Fuglestvedt, J., Green, C., Hasegawa, T., Leininger, J., Monteith, S., & Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*, *10*(12), 1074–1084. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>
- Ortiz-Gómez, R., Muro-Hernández, L. J., & Flowers-Cano, R. S. (2020). Assessment of extreme precipitation through climate change indices in Zacatecas, Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, *141*(3), 1541–1557. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03293-2>
- Palacios-Orejuela, I. (2020). *Generación de un modelo de crecimiento tendencial urbano de la ciudad de Macas (Ecuador) al año 2030, mediante técnicas de modelación espacial multivariable.*
- Pareta, K., & Pareta, U. (2012). Quantitative Geomorphological Analysis of a Watershed of Ravi River Basin, H.P. India. *International Journal of Remote Sensing and GIS*, *1*, 47–62.
- Patel, S. K., Verma, P., & Shankar Singh, G. (2019). Agricultural growth and land use land cover change in peri-urban India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(9), 600. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7736-1>
- Pauleta, S. R., Dell’Acqua, S., & Moura, I. (2013). Nitrous oxide reductase. *Coordination Chemistry Reviews*, *257*(2), 332–349. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2012.05.026>
- Pedrozo Acuña, A. (2021). Contaminación difusa, el reto para la gestión del agua en ciudades. *Perspectivas IMTA*, no. 20. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2270>

- Penagos Del Carpio, C. U. (2013). *Notas para una historia ambiental del río Sabinal (1921-2005)*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
<https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1602>
- Pontius, R. G., Versluis, A. J., & Malizia, N. R. (2006). Visualizing certainty of extrapolations from models of land change. *Landscape Ecology*, *21*(7), 1151–1166.
<https://doi.org/10.1007/s10980-006-7285-1>
- Principi, N. (2022). Modelado de expansión urbana mediante autómatas celulares y redes neuronales artificiales°. *Revista Universitaria de Geografía*, *31*(1), 95–113.
- Qian, Y., Gong, D., Fan, J., Leung, L. R., Bennartz, R., Chen, D., & Wang, W. (2009). Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *114*(D7). <https://doi.org/10.1029/2008JD011575>
- Revista Especificar. (2022, junio 29). *Veolia y municipio de Tuxtla Gutiérrez reducen inundaciones en 80%*. <https://especificarmag.com.mx/veolia-y-municipio-de-tuxtla-gutierrez-reducen-inundaciones-en-80/>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, *42*, 153–168.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Robles, E. O. L., Silva, I. C., & Pulido, S. J. B. (2022). Efectos del cambio climático en la gestión sostenible del recurso suelo: *TECNOCENCIA Chihuahua*, *16*(3), Article 3.
<https://doi.org/10.54167/tch.v16i3.1097>
- Ruiz-García, P., Monterroso Rivas, A. I., Conde, C., Sanchez-Torres, G., Vargas-Castilleja, R., & Báez-Vásquez, J. (2022). *Guía de Escenarios de Cambio Climático CMIP6. Tres Estudios de Caso*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20064.15369>
- Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S., & Hueso, R. (2004). Clouds in planetary atmospheres: A useful application of the Clausius–Clapeyron equation. *American Journal of Physics*, *72*(6), 767–774. <https://doi.org/10.1119/1.1645279>

- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. New Jersey. *GSA Bulletin*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Schwarzwald, K., & Lenssen, N. (2022). The importance of internal climate variability in climate impact projections. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(42), e2208095119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2208095119>
- SCS (Soil Conservation Service). (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. The Service.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Adaptación al cambio climático, fundamentos desde el manejo de cuencas y del proceso de fortalecimiento de capacidades*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002470.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Vivienda (SEMAVI). (2009). *Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial de la Subcuenca del Río Sabinal, Chiapas*. Gobierno del Estado de Chiapas. https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/descargas/ord_territorial/Sabinal/Resumen.pdf
- Secretaría de Protección Civil Municipal. (2016a, noviembre 3). *Atlas de Riesgos del municipio de Tuxtla Gutiérrez (2010)*. Sistema Municipal de Protección Civil Tuxtla Gutiérrez. <http://proteccioncivil.tuxtla.gob.mx/Atlas-de-riesgos-tuxtla-gutierrez>
- Secretaría de Protección Civil Municipal. (2016b, noviembre 28). *Atlas de Riesgos (Actualización 2015)*. H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez. <http://www.tuxtla.gob.mx/Atlas-de-riesgos-actualizacion-2015>
- Servicio Geológico Mexicano. (2008). *Texto explicativo carta geológico-minera Ramos Arizpe, g14-c24 escala 1:50,000 estados de Coahuila y Nuevo León*. https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T052008RORJ0001_01.PDF
- Servicio Geológico Mexicano (antes Consejo de Recursos Minerales). (2005). *Carta Geológica-Minera Tuxtla Gutiérrez E15-11, Chis., Esc. 1:250,000* [Dataset]. <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

- Setianto, A., & Triandini, T. (2015). Comparison of Kriging and Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. *Journal of Applied Geology*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.22146/jag.7204>
- Shekar, P. R., & Mathew, A. (2022). Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds of Murredu River basin, Telangana State, India, using a geographical information system. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00094-4>
- Shen, F., Akil, J., Wang, G., Poupin, C., Cousin, R., Siffert, S., Fertein, E., Ba, T.-N., & Chen, W. (2018). Real-time monitoring of N₂O production in a catalytic reaction process using mid-infrared quantum cascade laser. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 221, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.09.022>
- Sherman, C. (1931). Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Mass. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 95(1), 951–960.
- SIATL-INEGI. (2023). *SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Silva, M., García, A., & Hernando, A. (2015). Crecimiento de la mancha urbana en la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas, México). *Quehacer Científico en Chiapas*, 10(2), 35–41.
- Singh, W. R., Barman, S., & Tirkey, G. (2021). Morphometric analysis and watershed prioritization in relation to soil erosion in Dudhnai Watershed. *Applied Water Science*, 11(9), 151. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01483-5>
- Solano, N. M., & Martínez, S. F. (2021). Análisis morfométrico y de relieve de la red de drenaje asociada a la subcuenca del río frío en la ciudad de Bucaramanga: Caso de estudio. *Revista Agunkuyâa*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.33132/27114260.1990>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. in: Chow, V., Ed., *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York, 4–39.
- Syakila, A., & Kroeze, C. (2011). The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1(1), 17–26. <https://doi.org/10.3763/ghgmm.2010.0007>

- Taylor, A. B., & Schwarz, H. E. (1952). Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 33(2), 235–246. <https://doi.org/10.1029/TR033i002p00235>
- Torre Franca, I., & Otadoy, R. E. (2022). GIS-based watershed characterization and morphometric analysis in Bohol Watersheds, Philippines. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2158554>
- Torres-Puente, V. M. (2019). Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: Desde torbellinos hasta cambio climático. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 20(1 enero-febrero). <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a3>
- Trenberth, K. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Changes in Climate Research*, 47(1), 123–138. <https://doi.org/doi:10.3354/cr00953>
- Villalobos-Chacón. (2019). *Análisis del potencial de escurrimiento en la microcuenca del Río Tiribí entre el 2005 y el 2029 para la conservación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica*. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/18162>
- Wagner, P. D., Kumar, S., & Fohrer, N. (2023). Integrated modeling of global change impacts on land and water resources. *Science of The Total Environment*, 892, 164673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164673>
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>
- Wang, X.-Y., Bao, X.-Y., Huang, Y., Li, Z.-W., Yong, J.-H., Wu, Y.-P., Feng, G.-L., & Sun, G.-Q. (2023). Physical Explanation for Paradoxical Climate Change in Semi-Arid Inland Eurasia Based on a Remodeled Precipitation Recycling Ratio and Clausius–Clapeyron Equation. *Atmosphere*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/atmos14020376>
- Withanage, N. S., Dayawansa, N. D. K., & De Silva, R. (2015). Morphometric analysis of the Gal Oya river basin using spatial data derived from GIS. *Tropical Agricultural Research*, 26(1), 175–180. <https://doi.org/10.4038/tar.v26i1.8082>
- Yu, F., Luo, G., Nair, A. A., Schwab, J. J., Sherman, J. P., & Zhang, Y. (2020). Wintertime new particle formation and its contribution to cloud condensation nuclei in the Northeastern

- United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(4), 2591–2601.
<https://doi.org/10.5194/acp-20-2591-2020>
- Yue, X.-L., & Gao, Q.-X. (2018). Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research*, 9(4), 243–252.
<https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yabu, S., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Obata, A., Adachi, Y., & Ishii, M. (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97(5), 931–965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>
- Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H., Narcizo de Lima, G., Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H., & Narcizo de Lima, G. (2020). Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(2).
<https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2485>
- Zúñiga, R. (2024, junio 28). ¡Bravo Tuxtla! Ciudadanos Transforman Real del Bosque con Reforestación. *Alertachiapas.com*. <https://alertachiapas.com/2024/06/28/bravo-tuxtla-ciudadanos-transforman-real-del-bosque-con-reforestacion/>