



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

TESIS

Que para obtener el grado de
DOCTORA EN CIENCIAS DEL AGUA

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CONSIDERANDO CAMBIO DE USO/COBERTURA DEL SUELO, VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS MEXICANAS

Presenta:

M. en C.A. Saula Verónica Minga León

Tutores:

Dr. Miguel Angel Gómez Albores

Tutor académico

Dr. Khalidou Mamadou Bâ

Tutor adjunto

Dr. Carlos Alberto Mastachi Loza

Tutor adjunto

Toluca, Estado de México, 2022

Resumen

Los impactos naturales y antropogénicos sobre los recursos hídricos se han intensificado durante el último siglo. Este estudio cuantificó los impactos por la variabilidad climática, el cambio climático y el cambio del uso/cobertura del suelo (UCS) sobre los procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac, localizadas en el centro-sur y sur de México respectivamente. Es importante mencionar que se descartó la cuenca del río Escondido, localizada al norte de México, debido a que no cuenta con suficiente información meteorológica. La Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT) se utilizó para simular los procesos hidrológicos de las cuencas. En el proceso de calibración y validación se utilizó el criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) para su evaluación. En la calibración se obtuvieron valores de NSE globales de 0.97 y 0.99 para las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac, respectivamente. En la validación, los NSE fueron de 0.95 y 0.98 para las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac, respectivamente.

El impacto de la variabilidad climática actual sobre los procesos hidrológicos se evaluó entre los periodos 1982-2000 y 2001-2012; mientras que, el impacto por el cambio climático futuro se evaluó entre los periodos 1982-2012 y 2042-2072. Para evaluar el impacto actual y futuro del cambio de UCS se utilizó mapas históricos de 1996, 2008 y se generó un mapa proyectado para el año 2050. En la cuenca del río La Sierra el impacto actual en el rendimiento hídrico (*WY*, por sus siglas en inglés) fue una disminución de 126 mm, del cual la variabilidad climática fue la responsable de la reducción de 104%; mientras que, por el cambio de UCS el *WY* aumentó 4%. En el impacto futuro, el *WY* disminuyó 207 mm, el cambio climático aportó con la reducción del 120% y los cambios de UCS aportan con un incremento de 20%. Por el contrario, en la cuenca del río Amacuzac el impacto actual del *WY* fue un incremento de 41 mm, del cual la variabilidad climática contribuyó con un incremento de 106% y el cambio de UCS con una disminución del 6%. Y en los impactos futuros el *WY* disminuyó 31 mm, el cambio climático aportó con una reducción de 120% y los cambios de UCS provocaron un aumento de 20%.

Los resultados indican que la variabilidad y cambio climático son los responsables del mayor impacto en los procesos hidrológicos en las cuencas de estudio. A pesar de que, los impactos por UCS son menores en comparación con los climáticos, en el análisis a nivel de

subcuencas los impactos fueron mayores en determinadas subcuencas con intensos cambios paisajísticos. Se concluyó que los impactos en los procesos hidrológicos por la variabilidad climática en las cuencas de estudio se atribuyen principalmente a los cambios de la precipitación; mientras que, debido al cambio climático se atribuyen al incremento de las temperaturas. Los impactos detectados por el UCS en la cuenca del río La Sierra son resultado de la pérdida de cobertura de bosque e incrementos de los usos de suelo como agricultura y pastizal. Mientras que, en la cuenca del río Amacuzac los impactos por UCS se atribuyen, por un lado, a los incrementos de bosque y agricultura de riego y, por otro lado, a la reducción de la agricultura temporal. Los resultados de este estudio son potencialmente útiles en la toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos y del suelo. Así como, en la formulación de estrategias de adaptación para mitigar los impactos negativos o positivos en las cuencas.

Índice de contenido

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	26
1.1. Antecedentes	27
1.1.1. Recursos hídricos en México	27
1.1.2. Variabilidad y cambio climático en México	28
1.1.3. Uso y cobertura del suelo en México	30
1.1.4. Enfoques y métodos para cuantificar el impacto por uso y cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático.....	31
1.1.5. Estudios preliminares	36
1.2. Justificación	39
1.3. Hipótesis.....	41
1.4. Objetivos	41
1.4.1. Objetivo general	41
1.4.2. Objetivos específicos	41
1.5. Marco conceptual.....	42
1.5.1. Clima, variabilidad y cambio climático	42
1.5.2. Pruebas para detectar puntos de cambios en series hidro-climáticas	43
1.5.3. Pruebas para detectar tendencias.....	45
1.5.4. Modelo hidrológico SWAT.....	48
1.5.5. Criterios de evaluación del modelo.....	64
1.5.6. Clasificación de uso y cobertura del suelo en México	66
1.5.7. Modelos climáticos	69
CAPÍTULO 2 MÉTODOS.....	72
2.1. Área de estudio.....	72
2.1.1. Cuenca del río Escondido.....	73
2.1.2. Cuenca del río Amacuzac.....	77
2.1.3. Cuenca del río La Sierra.....	81
2.1.4. Proceso de investigación.....	85
2.2. Series hidrométricas	86
2.2.1. Estructura y disponibilidad de datos hidrométricos	86
2.2.2. Diagnóstico de la calidad de datos hidrométricos.....	87

2.2.3.	Exploración de las series hidrométricas	88
2.2.4.	Identificación de puntos de cambio en las series hidrométricas	88
2.3.	Series climáticas.....	89
2.3.1.	Series climáticas observadas	89
2.3.2.	Series climáticas Daymet	90
2.3.3.	Proyecciones futuras	91
2.4.	Series de uso y cobertura del suelo de INEGI	92
2.4.1.	Homogenización de información	93
2.4.2.	Análisis de cambio	93
2.4.3.	Proyección del uso y cobertura del suelo.....	94
2.5.	Modelo hidrológico SWAT	95
2.5.1.	Datos de entrada.....	96
2.5.2.	Preparación de datos	97
2.5.3.	Configuración del modelo.....	99
2.5.4.	Proceso de calibración y validación.....	100
2.6.	Evaluación de impactos por la variabilidad climática, el cambio climático y el cambio de uso/cobertura del suelo	104
CAPÍTULO 3 RESULTADOS		107
3.1.	Series hidrométricas.....	107
3.1.1.	Disponibilidad de datos hidrométricos.....	107
3.1.2.	Diagnóstico de la calidad de los datos hidrométricos	108
3.1.3.	Análisis exploratorio de las series hidrométricas.....	111
3.1.4.	Identificación de puntos de cambio en las series hidrométricas	118
3.2.	Series climáticas.....	121
3.2.1.	Disponibilidad de datos climáticos	121
3.2.2.	Diagnóstico de calidad de series climáticas	126
3.2.3.	Validación de los datos climáticos Daymet	132
3.2.4.	Análisis exploratorio de los datos climáticos Daymet	134
3.2.5.	Proyecciones climáticas	140
3.3.	Series de uso y cobertura del suelo de INEGI	144
3.3.1.	Homogenización de información	145

3.3.2.	Análisis de cambio del uso y cobertura del suelo de la cuenca del río La Sierra ..	148
3.3.3.	Análisis de cambio del uso y cobertura del suelo de la cuenca del río Amacuzac	151
3.3.4.	Proyecciones del uso y cobertura del suelo.....	154
3.4.	Modelación hidrológica	157
3.4.1.	Cuenca del río La Sierra.....	157
3.4.2.	Cuenca del río Amacuzac.....	164
3.5.	Impactos actuales en los procesos hidrológicos.....	171
3.5.1.	Cuenca del río La Sierra.....	171
3.5.2.	Cuenca del río Amacuzac.....	180
3.6.	Impactos futuros en los procesos hidrológicos	188
3.6.1.	Cuenca del río La Sierra.....	188
3.6.2.	Cuenca del río Amacuzac.....	197
3.7.	Atribuciones de los impactos por los cambios del uso y cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en los procesos hidrológicos	206
3.7.1.	Cuenca del río La Sierra.....	206
3.7.2.	Cuenca del río Amacuzac.....	207
3.8.	Análisis individuales de los impactos actuales y futuros por la variabilidad y el cambio climático	208
3.9.	Análisis de impactos actuales y futuros por los cambios de uso y cobertura del suelo 211	
	CAPÍTULO 4 DISCUSIONES.....	214
	CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	226
	CAPÍTULO 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	232

Índice de anexos

Anexo 1.	Clasificación climática Koppen-García	247
Anexo 2.	Rutina en RStudio para leer archivos .mdb de BANDAS	250
Anexo 3.	Rutina en RStudio para el diagnóstico de calidad de datos.....	251
Anexo 4.	Rutina en RStudio para ejecutar pruebas de homogeneidad	253
Anexo 5.	Clasificación de las coberturas vegetales en códigos SWAT	254
Anexo 6.	Propiedades físicas del suelo de la cuenca de los ríos La Sierra y Amacuzac	255

Anexo 7. Parámetros estadísticos del generador meteorológico (WGN)	258
Anexo 8. Rutina en RStudio - estructura de datos Daymet en .txt para el modelo SWAT	259
Anexo 9. Lluvias asociadas a ciclones tropicales	261
Anexo 10. Valores atípicos de la serie temporal de caudal	265
Anexo 11. Disponibilidad de datos de las variables climáticas	267
Anexo 12. Magnitud de las variables climáticas, periodo 1950-2010.....	271
Anexo 13. Estaciones climáticas eliminadas	292
Anexo 14. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS en los procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac.....	293

Índice de Figuras

Figura 1-1. Representación gráfica del ciclo hidrológico.....	51
Figura 1-2. Procesos en-corriente modelados por SWAT (Neitsch et al. 2011).....	63
Figura 1-3. Resumen general del sistema conceptual de clasificación del uso y cobertura del suelo propuesto en las diferentes series de INEGI.....	67
Figura 2-1. Ubicación geográfica y altitud de las cuencas hidrográficas: A) cuenca del río Escondido, B) cuenca del río Amacuzac, y C) cuenca del río Sierra	72
Figura 2-2. Distribución de la población en la cuenca del río Escondido	73
Figura 2-3. Características climáticas de la cuenca del río Escondido: A) clasificación climática de Köppen de acuerdo con la condición térmica, B) promedio mensual de las temperaturas media (Tmed), máxima (Tmax) y mínima (Tmin), periodo 1994-2008 (Estación 5025-Piedras Negras), y C) promedio mensual de la precipitación, periodo 1994-2008 (Estación 5025-Piedras Negras).....	74
Figura 2-4. Curva hipsométrica de la cuenca del río Escondido	75
Figura 2-5. Perfil del cauce principal de la cuenca del río Escondido.....	76
Figura 2-6. Distribución de la población en la cuenca del río alto Amacuzac	77
Figura 2-7. Características climáticas de la cuenca del río Amacuzac: A) clasificación climática de Köppen de acuerdo con la condición térmica, B) promedio mensual de las temperaturas media (Tmed), máxima (Tmax) y mínima (Tmin), periodo 1980-2012 (Daymet), y C) promedio mensual de la precipitación, periodo 1980-2012 (Daymet).	78
Figura 2-8. Curva hipsométrica de la cuenca del río Amacuzac	80

Figura 2-9. Perfil del cauce principal de la cuenca del río Amacuzac.....	80
Figura 2-10. Distribución de la población en la cuenca del río Sierra.....	82
Figura 2-11. Características climáticas de la cuenca del río La Sierra: A) clasificación climática de Köppen de acuerdo con la condición térmica, B) promedio mensual de las temperaturas media (Tmed), máxima (Tmax) y mínima (Tmin), periodo 1980-2012 (Daymet), y C) promedio mensual de la precipitación, periodo 1980-2012 (Daymet).....	83
Figura 2-12. Curva hipsométrica de la cuenca río Sierra.....	84
Figura 2-13. Perfil del río principal de la cuenca del río Sierra.....	84
Figura 2-14. Diagrama de flujo del método de investigación.....	86
Figura 2-15. Ubicación de estaciones hidro-climáticas.....	87
Figura 2-16. Método utilizado en el proceso de <i>downscale</i>	92
Figura 2-17. Procesos para la proyección del uso y cobertura del suelo al año 2050.....	94
Figura 2-18. Proceso de modelación con SWAT a nivel de HRUs.....	96
Figura 2-19. Ejemplo de creación de HRUs por subcuencas en el modelo SWAT.....	100
Figura 2-20. Proceso general de calibración.....	103
Figura 2-21. Periodos para la evaluación de los impactos causados por (A) variabilidad climática, el cambio climático (B) y el cambio del uso/cobertura del suelo actual (A) y futuro (B) sobre los procesos hidrológicos.....	105
Figura 3-1. Disponibilidad de datos hidrométricos.....	107
Figura 3-2. Magnitud de las subseries mensuales de caudal.....	109
Figura 3-3. Subseries mensuales de las estaciones: Villa de Fuente (24290) periodo 1942-2010, Amacuzac (18232) periodo 1955-2014, y Pueblo Nuevo (30016) periodo 1947-2014. La línea roja es la mediana de cada subserie.....	112
Figura 3-4. Análisis de tendencias de las subseries mensuales de la estación Villa de Fuente (24290).....	114
Figura 3-5. Análisis de tendencias de las subseries mensuales de la estación Amacuzac (18232).....	115
Figura 3-6. Análisis de tendencias de las subseries mensuales de la estación Pueblo Nuevo (30016).....	116
Figura 3-7. Análisis de tendencias estacional.....	117
Figura 3-8. Análisis de tendencias anuales.....	118

Figura 3-9. Distribución espacial de los datos climáticos Daymet en la cuenca La Sierra, periodo 1980-2020. A) Precipitación, B) Temperatura máxima y, C) Temperatura mínima	135
Figura 3-10. Subseries mensuales de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de la cuenca La Sierra, periodo 1980-2020. La línea roja es la mediana de cada subserie	135
Figura 3-11. Análisis de tendencias anuales de los datos climáticos Daymet en la cuenca La Sierra, periodo 1980-2020.	136
Figura 3-12. Distribución espacial de los datos climáticos Daymet en la cuenca del río Amacuzac, periodo 1980-2020. A) Precipitación, B) Temperatura máxima y, C) Temperatura mínima.....	137
Figura 3-13. Subseries mensuales de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de la cuenca del río Amacuzac, periodo 1980-2020. La línea roja es la mediana de cada subserie.....	138
Figura 3-14. Análisis de tendencias anuales de los datos climáticos Daymet en la cuenca Amacuzac, periodo 1980-2020.....	139
Figura 3-15. Ejemplo del resultado del proceso de <i>downscale</i> en la cuenca del río Sierra. A) Precipitación anual histórica del modelo GFDL-ESM4, resolución gruesa. B) Precipitación anual futura del modelo GFDL-ESM4, resolución gruesa. C) Precipitación anual histórica Daymet, resolución fina. C) Precipitación anual futura con <i>downscale</i>	140
Figura 3-16. Comparación de las variables climáticas históricas Daymet con las variables climáticas proyectadas del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río La Sierra	141
Figura 3-17. Comparación mensual de la precipitación histórica Daymet y la precipitación futura del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río La Sierra	141
Figura 3-18. Comparación mensual de la temperatura máxima Daymet y la temperatura máxima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río La Sierra	142

Figura 3-19. Comparación mensual de la temperatura mínima Daymet y la temperatura mínima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río La Sierra	142
Figura 3-20. Comparación de las variables climáticas históricas Daymet con las variables climáticas proyectadas del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río Amacuzac	143
Figura 3-21. Comparación mensual de la precipitación histórica Daymet y la precipitación futura del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río Amacuzac	143
Figura 3-22. Comparación mensual de la temperatura máxima Daymet y la temperatura máxima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río Amacuzac.....	144
Figura 3-23. Comparación mensual de la temperatura mínima Daymet y la temperatura mínima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de <i>downscale</i> , en la cuenca del río Amacuzac.....	144
Figura 3-24. Mapas de uso y cobertura del suelo (UCS) de la cuenca del río La Sierra. Fuente: elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía	147
Figura 3-25. Mapas de uso y cobertura del suelo (UCS) de la cuenca del río Amacuzac..	148
Figura 3-26. Áreas en porcentaje de las clases de uso/cobertura del suelo de los diferentes periodos, cuenca La Sierra.....	149
Figura 3-27. Porcentajes de los cambios del uso y cobertura del suelo con respecto al área inicial de la cobertura/uso (A) y con respecto al área de la cuenca del río Sierra (B).....	150
Figura 3-28. Contribuciones netas de cambio en las coberturas de la cuenca del río La Sierra: A) agricultura, B) selva perennifolia, C) pastizal, D) bosque de pino y, E) bosque mesófilo de montaña.....	151
Figura 3-29. Áreas en porcentaje de las clases de uso/cobertura del suelo de los diferentes periodos, cuenca del río Amacuzac	152
Figura 3-30. Porcentajes de los cambios del uso y cobertura del suelo con respecto al área inicial de la cobertura/uso (A) y con respecto al área de la cuenca del río Amacuzac (B).	153

Figura 3-31. Contribuciones netas de cambio en las coberturas de la cuenca del río Amacuzac: A) agricultura temporal, B) agricultura de riego, C) selva caducifolia, D) urbano y, E) bosque de encino.....	154
Figura 3-32. Comparación espacial de los cambios entre el mapa de referencia del año 1996, mapa de cambio del año 2015 y mapa proyectado del año 20250 en la cuenca del río La Sierra.....	155
Figura 3-33 Comparación espacial de los cambios entre el mapa de referencia del año 1996, mapa de cambio del año 2015 y mapa proyectado del año 20250 en la cuenca del río Amacuzac.....	156
Figura 3-34. Comparación de los caudales observados y simulados con ajuste de parámetros iniciales (1985-1993), cuenca del río La Sierra.	160
Figura 3-35. Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de calibración (1982-1993), cuenca del río La Sierra, Estación Pueblo Nuevo. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados. D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados	161
Figura 3-36. Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de validación (1994-2000), cuenca del río La Sierra, Estación Pueblo Nuevo. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados. D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados.	162
Figura 3-37. Balance hídrico de la cuenca del río La Sierra, periodo 1982-2000.	163
Figura 3-38. Resumen hidrológico de las diferentes configuraciones de los modelos para la cuenca del río Amacuzac	166
Figura 3-39. Comparación de los caudales observados y simulados con ajuste de parámetros iniciales (1985-1993), cuenca del río Amacuzac	167
Figura 3-40. Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de calibración (1982-1993), cuenca del río Amacuzac, Estación Amacuzac. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios	

observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados.	
D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados.....	168
Figura 3-41 Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de validación (1994-2000), cuenca del río Amacuzac, Estación Amacuzac. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados. D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados.....	169
Figura 3-42. Balance hídrico de la cuenca del río Amacuzac, periodo 1982-2000.....	170
Figura 3-43. Cambios promedios mensuales por variabilidad climática en los procesos hidrológicos en la cuenca del río La Sierra.....	172
Figura 3-44. Cambios promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra.....	173
Figura 3-45. Cambios promedios a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra	174
Figura 3-46. Cambios promedios por variabilidad climática del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por la variabilidad climática en la cuenca del río La Sierra	175
Figura 3-47. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$); (B) disminuyó ($\leq 2\%$) y (C) el cambio fue mínimo ($> -2\%$ a $< 2\%$) del rendimiento hídrico en la cuenca del río La Sierra	177
Figura 3-48. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó $\geq 2\%$; (B) disminuyó $\leq 2\%$	177
Figura 3-49. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó $\geq 2\%$ y (B) disminuyó $\leq -2\%$ del flujo base en la cuenca del río La Sierra	178
Figura 3-50. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó $\geq 2\%$ y (B) disminuyó $\leq -2\%$ del flujo base en la cuenca del río La Sierra	178
Figura 3-51. Cambios promedios por el cambio de UCS del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río La Sierra .	179
Figura 3-52. Cambios promedios mensuales por variabilidad climática en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac	181

Figura 3-53. Cambios promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac.....	182
Figura 3-54. Cambios a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac.....	183
Figura 3-55. Cambios promedios por variabilidad climática del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac.	184
Figura 3-56. Cambios promedios por el cambio de UCS del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Amacuzac	185
Figura 3-57. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$); (B) disminuyó ($\leq 2\%$) y (C) el cambio fue mínimo ($> -2\%$ a $< 2\%$) del rendimiento hídrico en la cuenca del río Amacuzac	186
Figura 3-58. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$) y (B) disminuyó ($\leq 2\%$) de la escorrentía superficial en la cuenca del río Amacuzac	187
Figura 3-59. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$) y (B) disminuyó ($\leq 2\%$) el flujo base en la cuenca del río Amacuzac	187
Figura 3-60. Cambios actuales promedios mensuales por variabilidad climática en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac.....	190
Figura 3-61. Cambios futuros promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra	190
Figura 3-62. Cambios futuros a nivel de subcuencas por la influencia del cambio climático en el rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) en la cuenca del río La Sierra.....	192
Figura 3-63. Cambios futuros a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra	193
Figura 3-64. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ el rendimiento hídrico en la cuenca del río La Sierra.....	194

Figura 3-65. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ la escorrentía superficial en la cuenca del río La Sierra.....	195
Figura 3-66. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ (A) y disminuyó $< 2\%$ (B) el flujo base en la cuenca del río La Sierra	195
Figura 3-67. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde disminuyó $\leq -2\%$ la evapotranspiración real en la cuenca del río La Sierra	196
Figura 3-68. Cambios del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río La Sierra	197
Figura 3-69. Cambios futuros promedios mensuales por cambio climático en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac	199
Figura 3-70. Cambios futuros promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac	199
Figura 3-71. Cambios futuros a nivel de subcuencas por la influencia del cambio climático en el rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) en la cuenca del río Amacuzac.....	201
Figura 3-72. Cambios futuros a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac	202
Figura 3-73. Cambios futuros del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Amacuzac.	203
Figura 3-74. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde disminuyó $\leq -2\%$ el rendimiento hídrico en la cuenca del río Amacuzac.	204
Figura 3-75. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde disminuyó $\leq -2\%$ la escorrentía superficial en la cuenca del río Amacuzac.	204
Figura 3-76. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ (A) y disminuyó $\leq -2\%$ (B) el flujo base en la cuenca del río Amacuzac.	205
Figura 3-77. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 1\%$ la evapotranspiración real en la cuenca del río Amacuzac.....	205
Figura 6-1. Tipo y textura del suelo de la cuenca del río La Sierra.....	255
Figura 6-2. Tipo y textura del suelo de la cuenca del río Amacuzac.....	255

Figura 6-3. promedios mensuales por el cambio de UCS históricos en los procesos hidrológicos en la cuenca del río La Sierra.....	293
Figura 6-4. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS históricos en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac	293
Figura 6-5. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS proyectado en los procesos hidrológicos en la cuenca del río La Sierra.....	294
Figura 6-6. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS proyectado en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac.....	294

Índice de Tablas

Tabla 1-1. Resumen de estudios que evaluaron los posibles impactos de uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático sobre los procesos hidrológicos usando el modelo SWAT	34
Tabla 1-2. Procesos considerados en la fase terrestre del ciclo hidrológico del modelo SWAT	50
Tabla 1-3. Estructura de la fase de enrutamiento del ciclo hidrológico.....	63
Tabla 1-4. Criterios de evaluación del rendimiento para pasos de tiempo mensual, tomado de Moriasi et al. (2007).....	65
Tabla 1-5. Criterios de evaluación del rendimiento para pasos de tiempo diario, mensual y anual recomendadas para los modelos a escala de cuenca hidrográfica, tomado de Moriasi et al. (2015).....	65
Tabla 1-6. Descripción de las series de uso y cobertura del suelo de INEGI	66
Tabla 1-7. Clasificación de la información ecológica, florística y fisonómica de INEGI....	67
Tabla 1-8. Resumen de las narrativas del SSP	70
Tabla 2-1. Características fisiográficas de la cuenca del río Escondido.....	75
Tabla 2-2. Tipos de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Escondido	76
Tabla 2-3. Características fisiográficas de la cuenca del río Amacuzac	79
Tabla 2-4. Tipos de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Amacuzac	81
Tabla 2-5. Características fisiográficas de la cuenca del río Sierra	84
Tabla 2-6. Tipos de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Sierra.....	85
Tabla 2-7. Información hidrométrica.....	87

Tabla 2-8. Detalles de la base de datos Daymet	90
Tabla 2-9. Información del modelo GFDL-ESM4	92
Tabla 2-10. Descripción de las series de uso y cobertura del suelo de INEGI	93
Tabla 2-11. Transiciones entre los mapas de uso y cobertura del suelo de 1996 a 2015	95
Tabla 2-12. Evaluación de las variables explicativas	95
Tabla 2-13. Base de datos necesarios en la modelación con SWAT	96
Tabla 2-14. Clasificación de coberturas INEGI a códigos SWAT, cuenca del río La Sierra	97
Tabla 2-15. Clasificación de coberturas INEGI a códigos SWAT, cuenca del río Amacuzac	98
Tabla 2-16. Parámetros que intervienen en los procesos hidrológicos	101
Tabla 2-17 Parámetros iniciales predefinidos	102
Tabla 3-1. Resumen de disponibilidad de datos hidrométricos	108
Tabla 3-2. Valores atípicos y resumen estadístico de la distribución de datos	108
Tabla 3-3. Identificación de datos faltantes y datos atípicos de la estación Villa de Fuente (24290), periodo 1932-2010	110
Tabla 3-4. Identificación de datos faltantes y datos atípicos de la estación Amacuzac (18232), periodo 1955-2014	110
Tabla 3-5. Identificación de datos faltantes y datos atípicos de la estación Pueblo Nuevo (30016), periodo 1947-2014	111
Tabla 3-6. Pruebas de homogeneidad de las subseries mensuales de la estación Villa de Fuente (24290), periodo 1980-2010.	119
Tabla 3-7. Pruebas de homogeneidad de las subseries mensuales de la estación Amacuzac (18232), periodo 1980-2014.	119
Tabla 3-8. Pruebas de homogeneidad de las subseries mensuales de la estación 30016, periodo 1980-2014.....	120
Tabla 3-9. Pruebas de homogeneidad en las subseries estacionales de caudal (temporada seca y lluviosa).....	120
Tabla 3-10. Pruebas de homogeneidad en series anuales de caudal	121
Tabla 3-11. Número de estaciones meteorológicas por cuenca hidrográfica	121

Tabla 3-12. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Escondido, variable precipitación.....	122
Tabla 3-13. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Escondido, variables temperatura máxima y mínima.....	122
Tabla 3-14. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Amacuzac, variable precipitación.....	123
Tabla 3-15. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Amacuzac, variable temperatura máxima.....	124
Tabla 3-16. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Amacuzac, variable temperatura mínima	124
Tabla 3-17. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río La Sierra, variable precipitación.....	125
Tabla 3-18. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río La Sierra, variables temperatura máxima y mínima.....	126
Tabla 3-19. Diagnóstico de calidad de datos de precipitación, cuenca del río Escondido .	127
Tabla 3-20. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura máxima, cuenca del río Escondido.....	127
Tabla 3-21. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura mínima, cuenca del río Escondido.....	128
Tabla 3-22. Diagnóstico de calidad de datos de precipitación, cuenca del río Amacuzac .	129
Tabla 3-23. Diagnóstico de calidad de datos de temperatura máxima, cuenca del río Amacuzac.....	129
Tabla 3-24. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura mínima, cuenca del alto Amacuzac.....	130
Tabla 3-25. Diagnóstico de calidad de datos de precipitación, cuenca del río La Sierra ...	131
Tabla 3-26. Diagnóstico de calidad de datos de temperatura máxima, cuenca del río La Sierra	131
Tabla 3-27. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura mínima, cuenca del río La Sierra	132
Tabla 3-28. Resultados de validación de los datos Daymet, cuenca del río alto Escondido, periodo 1980-2010.....	132

Tabla 3-29. Resultados de validación de los datos Daymet, cuenca del río Amacuzac, periodo 1980-2010.....	133
Tabla 3-30. Resultados de validación de los datos Daymet, cuenca del río Sierra, periodo 1980-2010.....	134
Tabla 3-31. Promedios anuales de los datos históricos Daymet y datos futuros del modelo GFDL-ESM4	141
Tabla 3-32. Reclasificación de las clases de uso y cobertura de la cuenca del río La Sierra	145
Tabla 3-33. Reclasificación de las clases de uso y cobertura de la cuenca Amacuzac.....	146
Tabla 3-34. Áreas de los usos/coberturas del suelo de los diferentes periodos, cuenca río La Sierra.....	149
Tabla 3-35. Áreas de los usos/coberturas del suelo de los diferentes periodos, cuenca del río Amacuzac.....	152
Tabla 3-36. Comparación de áreas de los mapas de UCS 1996, 2015 y 2050 en la cuenca del río La Sierra	155
Tabla 3-37. Comparación de áreas de los mapas de UCS 1996, 2015 y 2050 en la cuenca del río Amacuzac	156
Tabla 3-38. Resumen hidrológico de las diferentes configuraciones de los modelos para la cuenca del río La Sierra	159
Tabla 3-39. Resumen de evaluación de los diferentes modelos configurados para la cuenca del río La Sierra con base a los criterios estadísticos NSE y PBIAS, a diferentes escalas temporales.....	160
Tabla 3-40. Parámetros ajustados en el proceso de la calibración en la cuenca del río La Sierra.....	161
Tabla 3-41. Evaluación mensual por año de los periodos de calibración y validación según los criterios de evaluación recomendados por Moriasi et al. (2015) en la cuenca del río La Sierra.....	162
Tabla 3-42. Resumen de evaluación de los diferentes modelos configurados para la cuenca del río Amacuzac con base a los criterios estadísticos NSE y PBIAS, a diferentes escalas temporales.....	167

Tabla 3-43. Parámetros del modelo ajustados en el proceso de la calibración en la cuenca del río Amacuzac	168
Tabla 3-44. Evaluación mensual por año de los periodos de calibración y validación según los criterios de evaluación recomendados por Moriasi et al. (2015) en la cuenca del río Amacuzac.....	170
Tabla 3-45. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por variabilidad climática en la cuenca del río La Sierra.....	171
Tabla 3-46. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2000) y el periodo de cambio (2001-2012), en la cuenca del río La Sierra.....	171
Tabla 3-47. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por UCS en la cuenca del río La Sierra - mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2008	176
Tabla 3-48. Impactos por los cambios del UCS actuales en la cuenca del río La Sierra, cambios evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y el mapa de cambio de UCS 2008	180
Tabla 3-49. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac.....	180
Tabla 3-50. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2000) y el periodo de cambio (2001-2012), en la cuenca del río Amacuzac	181
Tabla 3-51 Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por UCS en la cuenca del río Amacuzac. Los cambios son evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2008.	185
Tabla 3-52. Impactos por los cambios del UCS actuales en la cuenca del río Amacuzac, cambios evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2008	188
Tabla 3-53. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por cambio climático en la cuenca del río La Sierra.....	189

Tabla 3-54. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2012) y el periodo de cambio (2042-2072) en la cuenca del río La Sierra.....	189
Tabla 3-55. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por UCS proyectado, en la cuenca La Sierra	193
Tabla 3-56. Impactos futuros por los cambios futuros del UCS en la cuenca del río La Sierra. Los cambios son evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2050	196
Tabla 3-57 Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac	198
Tabla 3-58. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2012) y el periodo de cambio (2042-2072), en la cuenca del río Amacuzac.	198
Tabla 3-59. Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por UCS en la cuenca Amacuzac	202
Tabla 3-60. Impactos futuros por los cambios futuros del UCS en la cuenca del río La Amacuzac, cambios evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2050	206
Tabla 3-61. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y la variabilidad climática en la cuenca del río La Sierra	206
Tabla 3-62. Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y el cambio climático en la cuenca del río La Sierra	207
Tabla 3-63. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac	207
Tabla 3-64. Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y el cambio climático en la cuenca del río Amacuzac ...	208
Tabla 6-1. Clasificación climática Koppen-García, cuenca del río Escondido	247
Tabla 6-2. Clasificación climática Koppen-García, cuenca del río Amacuzac	248
Tabla 6-3. Clasificación climática Koppen-García, cuenca del río Sierra.....	249
Tabla 6-4. Propiedades físicas del suelo a una profundidad 0 – 300 mm, en la cuenca del río La Sierra.....	256

Tabla 6-5. Principales propiedades físicas del suelo a una profundidad 300 – 2000 mm, en la cuenca del río La Sierra	256
Tabla 6-6. Propiedades físicas del suelo a una profundidad 0 – 300 mm, en la cuenca del río Amacuzac.....	257
Tabla 6-7. Principales propiedades físicas del suelo a una profundidad 300 – 2000 mm, en la cuenca del río Amacuzac	257
Tabla 6-8. Lluvias asociadas a ciclones tropicales durante el periodo 1950-2020.....	261

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
INIFAP	Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CLICOM	<i>Climate Computing project</i>
NRCS	<i>The Natural Resources Conservation Service (NRCS)</i> (El Servicio de Conservación de Recursos Naturales, anteriormente Servicio de Conservación del Suelo, SCS).
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i> (Quinta fase del Programa de Comparación de Modelos Acoplados)
CMIP6	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 6</i> (Sexta fase del Programa de Comparación de Modelos Acoplados)
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
MCG	Modelo climático de circulación general
MCGAO	Modelos de Circulación General Atmósfera- Océano
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (Trayectorias de Concentración Representativas)
PET	<i>Potential evapotranspiration</i> (Evapotranspiración potencial)
ET	<i>Actual evapotranspiration</i> (Evapotranspiración real)
SWAT	Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas
OMM	Organización Meteorológica Mundial
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
NC	<i>Number curve</i> (Número de curva)
AR5	<i>Fifth Assessment Report – IPCC</i> (Quinto informe de evaluación del IPCC)
AR6	<i>Sixth Assessment Report – IPCC</i> (Sexto informe de evaluación del IPCC)
GFDL	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i> (Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos)
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UCS	Uso y cobertura del suelo
HRUs	<i>Hydrologic response units</i> (Unidades de respuesta hidrológica)
MGT	<i>Management Variables</i> (Variables de gestión)
CN	<i>Curve Number</i> (Número de curva)
PBIAS	<i>Percent bias</i> (Sesgo porcentual)
Prc	Precipitación
Tmed	Temperatura media
Tmax	Temperatura máxima
Tmin	Temperatura mínima
RHA	Regiones hidrológico-administrativas
LUCC	<i>Land-use/cover change</i> (Uso y cobertura de la tierra)
NSE	<i>Nash-Sutcliffe efficiency</i> (Eficiencia de Nash-Sutcliffe)
MCR	Modelos Climáticos Regionales
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i> (Experimentos de la Vía Socioeconómica Compartida)
RIC	Rango intercuartílico
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> (Modelo Digital de Elevación)
WY	<i>Water yield</i> (rendimiento hídrico)
SURQ	<i>Surface runoff</i> (Escorrentía superficial)
LATQ	<i>Lateral flow</i> (Flujo lateral)
GWQ	<i>Groundwater</i> (Agua subterránea)

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El agua dulce es indispensable para todas las formas de vida, y necesaria en la mayoría de las actividades humanas; requiere de una adecuada planificación y gestión para lograr su utilización sostenible y garantizar sus beneficios a largo plazo (Bates et al., 2008; Buytaert et al., 2006). Los impactos humanos en la hidrología se han acelerado desde el siglo XX (Bosmans et al., 2017). Estos impactos incluyen los efectos del cambio de uso del suelo y el cambio climático, dos de las intervenciones humanas más importantes.

Los cambios de uso del suelo, como: (a) la deforestación, da lugar a máximas crecidas y a una mayor erosión del suelo; (b) el drenaje de los humedales, altera el régimen de escorrentía; (c) la construcción de carreteras y la urbanización, causan erosión y una fuerte escorrentía; y (d) las prácticas agrarias, alteran el grado de infiltración y la recarga del agua subterránea (OMM, 2009). Winkler et al. (2021) estimaron que el cambio de uso del suelo ha afectado a el 32% de la superficie terrestre mundial en sólo seis décadas (1960-2019). Varios estudios han evaluado el impacto del cambio de la cubierta terrestre en la hidrología global, los resultados demuestran una disminución de la evapotranspiración, aumento de la descarga (Bosmans et al., 2017; Garret et al., 2018) y una reducción del flujo base (Garret et al., 2018). Estos impactos presentan una gran variabilidad espacial en la magnitud y el tipo de cambio (positivo o negativo) dependiendo del cambio específico de la cobertura y la zona climática (Bosmans et al., 2017).

Por otro lado, el cambio climático afecta al recurso hídrico mediante diversos mecanismos, al estar relacionada con todos los componentes del sistema climático: atmósfera, hidrósfera, criósfera, superficie terrestre y biosfera (OMM, 2009). Estudios globales anticipan que, el cambio climático tendrá un fuerte impacto sobre los recursos hídricos (IPCC, 2014). Se proyecta que los cambios climáticos (precipitación y temperatura) tendrán un mayor impacto que el cambio del uso/cobertura del suelo sobre la escorrentía superficial, el flujo lateral, la descarga de agua subterránea y en el rendimiento de agua (Fan and Shibata, 2015).

En este contexto, este proyecto propone identificar los impactos del cambio de uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en la hidrología de tres cuencas mexicanas con diferentes condiciones hidro-climáticas mediante un enfoque de modelación hidrológica. Los resultados de este estudio son necesarios en las decisiones de gestión de los recursos hídricos y del suelo. Así como, en la formulación de estrategias de adaptación para reducir los impactos negativos y aprovechar los impactos positivos en las cuencas.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Recursos hídricos en México

Se estima que en el mundo existen alrededor de 1 400 millones de km³ de agua, de los cuales 35 millones (2.5%) es agua dulce (FAO, 2002). Del agua dulce, la mayoría se encuentra congelada en glaciares (69%) y en forma de agua subterránea (30%); sólo el 0.4% se encuentra en la superficie o en la atmósfera (UNESCO y WWAP, 2006).

En México, se ha definido 757 cuencas hidrológicas, estas cuencas se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, que a su vez para efectos de administración se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA), sus límites respetan los municipales, para facilitar la integración de la información socioeconómica. Comparte ocho cuencas con los países vecinos: tres con Estados Unidos (Bravo, Colorado y Tijuana), cuatro con Guatemala (Grijalva-Usumacinta, Suchiate, Coatán y Candelaria) y una con Belice y Guatemala (Río Hondo). En lo que se refiere a las aguas subterráneas, se reportan 653 acuíferos, de los cuales 105 acuíferos se encuentran sobreexplotados, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión marina (CONAGUA, 2018).

México cuenta con ~ 451 500 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2018). La distribución espacial de estos recursos no es homogénea, la mayor disponibilidad del agua se concentra en la región sur, mientras que, el agua es escasa en las regiones centro y norte del país (López et al., 2017). La disponibilidad de agua natural media per cápita para México es de ~3600 m³/hab./año (CONAGUA, 2018), lo que constituye una cifra muy inferior a la media mundial de 6000 m³/hab./año (FAO-AQUASTAT, 2016). Los valores del agua renovable per cápita en algunas RHA es preocupantemente, como por ejemplo, la Península de Baja California (~1 060

m³/hab./año), Río Bravo (~1 020 m³/hab./año), Lerma-Santiago-Pacífico (~1 420 m³/hab./año) y Aguas del Valle de México (~145 m³/hab./año) (CONAGUA, 2018). Según la UNESCO-WWAP (2016), un área se encuentra bajo estrés hídrico regular cuando los recursos hídricos renovables caen por debajo de 1 700 m³/hab./año. Las poblaciones sufren de escasez de agua crónica cuando el suministro de agua cae por debajo de 1 000 m³/hab./año, y de escasez absoluta cuando este cae por debajo de 500 m³/hab./año.

En 2017 un volumen de ~ 270 900 hm³ estaba concesionado, el ~61 % proviene de cuerpos de agua superficiales como lagos, ríos y arroyos, y el ~39 % restante proviene de acuíferos. El mayor volumen concesionado para usos consuntivos lo representa el sector agrícola (76%) que incluye agricultura, acuacultura, pecuario, entre otros (CONAGUA, 2018).

Muchas áreas con gran actividad económica e importantes centros urbanos se localizan en zonas con baja disponibilidad hídrica (CEPAL and GIZ, 2016). Así, por ejemplo, en la zona centro-norte del país se concentra 27 % de la población, y dispone solo del 32% del agua renovable; en cambio, en la zona sur donde está el 68% del agua, se asienta el 23% de la población. Sumando a esto, existe una alta contaminación de sus fuentes hídricas por un proceso intenso de urbanización (Dagnino et al., 2012; UNDESA, 2012).

1.1.2. Variabilidad y cambio climático en México

México se caracteriza por climas secos debido al sistema de Alta Presión Subtropical (~15°N a 30°N) y a las barreras topográficas de vapor de agua de dos montañas, la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental. El norte de México es aún más seco debido principalmente al acceso limitado de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Escalante-Sandoval and Nuñez-García, 2017). La precipitación anual de México es ~740 mm (periodo 1981-2010). El 68% de esta precipitación ocurre entre los meses de junio y septiembre, acentuando los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso (CONAGUA, 2018). La zona noroeste y centro del país cubren dos terceras partes del territorio, son consideradas áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales menores a los 500 milímetros (CONAGUA, 2015). El noroeste de México generalmente recibe casi el 60% de su precipitación anual total durante el período de cuatro meses de junio a

septiembre (Blunden et al., 2018). El sureste es húmedo con precipitaciones promedio que superan los 2000 milímetros por año (CONAGUA, 2015).

Los resultados de un estudio realizado en la ciudad de México muestran tendencias crecientes estadísticamente significativas en la temperatura media de invierno (promedio 0.1°C/década) y la precipitación de verano (promedio 17.8 mm/década). Dentro de los próximos 30 años, se proyecta que la temperatura continuará aumentando entre 1 °C a 3 °C con una señal poco clara en el cambio de precipitación, pero posiblemente un aumento en la precipitación del monzón a fines de la temporada (Behzadi et al., 2020).

De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2015), en un análisis de más de 100 años, las temperaturas superficiales terrestres y marinas se han incrementado en todo el territorio. En ciertas zonas del norte del país los cambios han sido mayores, oscilando entre 1.2 °C y 1.5 °C por arriba de sus promedios históricos.

El trabajo “Actualización de escenarios de cambio climático para México” realizado por INECC e IMTA (2014), también revela un posible incremento en la temperatura. La meseta central del país es la que podría presentar mayores incrementos de 1.5°C (RCP4.5) hasta 7°C (RCP8.5). Mientras que para las regiones costeras y Península de Yucatán se proyectan posibles incrementos de 1°C (RCP4.5) hasta 5°C (RCP8.5). En el caso de la precipitación, los cambios son pequeños, se proyecta una disminución de precipitación para toda la República Mexicana (en los tres RCPs), siendo en la Península de Baja California y de Yucatán donde se presentarían los mayores decrementos, de 20 % (RCP4.5) a 50 % (RCP8.5).

Sumando al cambio climático, se une el incremento en la frecuencia y/o intensidad de eventos extremos, como los ciclones tropicales y los huracanes. El incremento del nivel del mar en muchas áreas costeras en México, destacando las elevaciones observadas en Ciudad Madero, Tamaulipas (hasta 9.16 mm/año) y Guaymas, en Sonora (4.23 mm/año) (INECC, 2015; Ríos Patrón et al., 2019). Regiones áridas, las cuales enfrentan escasez crónica de agua, especialmente porque muchas de estas regiones han experimentado un rápido crecimiento de la población en las últimas décadas (Stucker and Lopez-Gunn, 2014). Los principales episodios de sequía que causaron grandes pérdidas económicas se encuentran:

1948-1954, 1960-1964, 1970-1978, 1993-1998 (CENAPRED, 2014 citado por Escalante-Sandoval y Nuñez-García, 2017), 2000-2003, 2006, 2007-2008, 2009, y 2010-2012 (INECC, 2015). Todo esto trae consecuencias económicas, sociales y ambientales muy importantes al país, por lo que, México necesita desarrollar adaptaciones efectivas al cambio climático.

1.1.3. Uso y cobertura del suelo en México

En México, las coberturas vegetales predominantes son: los matorrales xerófilos (26%), los bosques templados (de coníferas y encinos, 17%) y las selvas (húmedas y subhúmedas, 16%). El resto de la superficie nacional está cubierta por bosques mesófilos de montaña, pastizales, chaparrales, mezquiales, palmares, vegetación halófila y gipsófila y de galería (Semarnat, 2006). El cambio en el uso de suelo y cobertura vegetal es un problema mundial, y en México no es la excepción, aquí, el cambio ha sido impulsado principalmente por el crecimiento de la población y por algunas de sus consecuencias, como la demanda de alimentos (actividades agropecuarias) y la ampliación de la infraestructura. Adicionalmente, la tala clandestina y los incendios forestales vuelven más susceptibles a las coberturas forestales de sufrir cambio de uso de suelo. Entre las consecuencias destacadas por el cambio del uso y cobertura del suelo están las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos (por ejemplo, agua y carbono), la pérdida de la biodiversidad y los servicios ambientales asociados y el cambio climático global (FAO, 2010; Semarnat, 2006).

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2018) reporta que durante el periodo 1993-2011 la tasa de cambio de cobertura forestal se estima con una pérdida neta de 324 132 ha/año, lo que representa un porcentaje de -0.23%; el subperiodo con mayor disminución en la vegetación es 2002-2007, en un lapso de cinco años, con una tasa de 388 958.4 ha/año que equivale a -0.28%, a partir de este periodo la pérdida es menor con una tasa estimada de -0.14%.

1.1.4. Enfoques y métodos para cuantificar el impacto por uso y cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático

El cambio climático y el uso del suelo influyen en los procesos hidrológicos de formas complejas, positivas o negativas. Esto hace que cuantificar los impactos combinados del cambio climático y del uso/cobertura del suelo sobre el rendimiento del agua sea un desafío (Zhang et al., 2018). Los impactos pueden observarse a través de los cambios de la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía, y en el corto plazo, el cambio en el almacenamiento del agua.

Se han realizado estudios en diversas cuencas hidrográficas alrededor del mundo, con diferentes enfoques: (1) evaluación de los impactos del cambio del uso/cobertura del suelo en los procesos hidrológicos (ejemplo, Bosmans et al., 2017; Deng et al., 2015; Garret et al., 2018; Mahmoud y Alazba, 2015; Wijesekara et al., 2012; Zhan et al., 2011; Zhao et al., 2009), (2) evaluación de los impactos por variabilidad climática (ejemplo, Meng et al., 2016; Tang et al., 2013) y (3) cambio climático (ejemplo, Breuer et al., 2013; Buytaert et al., 2010, 2009; Buytaert y Bievre, 2012; Nepal et al., 2014; Skoulikaris y Ganoulis, 2012), (4) enfoques combinados, es decir, analizaron y compararon los impactos de la variabilidad climática y cambios en el uso del suelo (ejemplo, Mwangi et al., 2016; Zhang et al., 2012, 2011), y cambio climático y cambios en el uso del suelo (ejemplo Fan y Shibata, 2015; Hyandye et al., 2018; Lang et al., 2017; López-Moreno et al., 2011; Ma et al., 2009).

Los métodos comunes utilizados en la estimación de los efectos de los cambio del uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en los procesos hidrológicos son el método de cuencas pareadas (Crespo et al., 2014; Ochoa-Tocachi et al., 2016), análisis de tendencia temporal (Zhang et al., 2011; Zhao et al., 2010), análisis de sensibilidad o elasticidad climática (Meng et al., 2016; Yan et al., 2019; Yang and Yang, 2011), uso de modelos hidrológicos (Bhatta et al., 2019; Deng et al., 2015; Mccoll and Aggett, 2007; Mehan et al., 2016; Meng et al., 2016; Nepal et al., 2014; Shen et al., 2018; Skoulikaris and Ganoulis, 2012; Wijesekara et al., 2012) y métodos combinados (Hu et al., 2020; Tang et al., 2013; Yan et al., 2019; Zhang et al., 2012). Los resultados en general proporcionan

estimaciones consistentes de los efectos de la vegetación y el clima en el flujo de las corrientes.

El método de cuencas por pares representa mejor la situación real y los resultados son ampliamente aplicables (Zhang et al., 2011). Las limitaciones de los estudios de cuencas pareadas es la falta de replicación experimental en diferentes condiciones naturales (DeFries and Eshleman, 2004), generalmente involucran cuencas pequeñas (<1 km²) y son costosos de llevar a cabo (Zhang et al., 2011; Zhao et al., 2010). El método de análisis de tendencia temporal es menos preciso que el método de cuencas por pares, ya que no hay una cuenca de control para separar los efectos del cambio de vegetación de los efectos climáticos en el flujo (Zhao et al., 2010). Sin embargo, este método se puede aplicar a grandes cuencas individuales que han sufrido cambios en la cubierta vegetal sin necesidad de cuencas de control. En cuanto a los métodos de sensibilidad, el enfoque general en estos métodos es primero estimar un efecto, como el de la vegetación, y luego atribuir el efecto restante a otros factores, como la variabilidad climática (Zhao et al., 2010). La elasticidad climática de la escorrentía, se considera un indicador importante que cuantifica la sensibilidad de la escorrentía al cambio climático (Yang and Yang, 2011). Otro método alternativo en las cuencas individuales es el uso de modelos hidrológicos, este método es potencialmente útil para estimar el efecto de los cambios en diferentes escalas de tiempo (Zhang et al., 2011).

Los modelos hidrológicos tienen mecanismos físicos integrales, por lo que pueden proporcionar un marco completo para analizar las relaciones entre el clima, el uso de la tierra y los recursos hídricos (Yan et al., 2019). El uso de modelos hidrológicos ha sido el método principal para estimar los impactos del uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en los procesos hidrológico. Algunos de los modelos usados son *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), *Variable Infiltration Capacity* (VIC), *Geospatial Stream Flow Model* (*GeoSFM*) y el modelo dinámico de balance hídrico de Zhang et al. (2008).

Existen muchos criterios para seleccionar un modelo hidrológico apropiado. La escala espacial del modelo, la flexibilidad de probar diferentes condiciones climáticas, la facilidad de modificación con diferentes conjuntos de datos, el objetivo del estudio, los procesos

hidrológicos representados en la estructura del modelo y la facilidad de calibración (Mishra et al., 2018). Los modelos hidrológicos a menudo se usan para simular futuros ciclos hidrológicos. Los datos de temperatura y lluvia proyectados por los modelos de circulación general (MCG) se usan para simular en estos modelos.

En el presente estudio seleccionó el modelo SWAT por lo que en la Tabla 1-1 se presenta un resumen de varios estudios con sus respectivos objetivos, criterios estadísticos de evaluación de la calibración y validación, y los métodos propuestos para evaluar los impactos.

Tabla 1-1. Resumen de estudios que evaluaron los posibles impactos de uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático sobre los procesos hidrológicos usando el modelo SWAT

Estudio	Objetivo	Calibración	Validación	Indicadores de evaluación de calibración y validación	Evaluación de impactos
Assessing the impacts of land use and land cover change on water resources in the Upper Bhima river basin, India (Samal and Gedam, 2021)	Analizar los cambios pasados en el uso de la tierra durante tres períodos de tiempo y evaluar sus impactos en los recursos hídricos en la cuenca del Alto Bhima	1985-1989 (5 años) UCS 1992	1991-1994 (4 años) UCS 1992	El modelo SWAT fue calibrado y validado dentro del marco de optimización Sequential Uncertainty Fitting – 2 (SUFI-2), utilizando la herramienta SWAT-CUP. Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (R2), y el porcentaje de sesgo (PBIAS), factor P y factor R	El modelo calibrado se ejecutó tres veces cambiando el mapa de uso de la tierra (1992, 2000 y 2009) y manteniendo constante el resto de las variables de entrada durante el periodo 1985-2011 (27 años). El impacto espacial de los cambios de LULC se investigó mediante el análisis de correlación entre el cambio proporcional de LULC y el cambio en los componentes hidrológicos obtenidos de la diferencia en la simulación utilizando el mapa LULC de 1992 y 2009.
Quantifying the impacts of decadal landuse change on the water balance components using soil and water assessment tool in Ghaggar river basin (Chauhan et al., 2020)	Evaluar los impactos de los cambios en la cubierta terrestre de uso de la tierra en los diversos componentes hidrológicos de la cuenca del río Ghaggar.	1999-2009 (10 años)	2010-2015 (6 años)	Método Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) disponible en SWAT CUP v5.2.1. NSE, R2, PBIAS, RSR, p-factor, r-factor	El modelo calibrado se ejecutó cuatro veces cambiando el mapa de uso de la tierra (1985, 1995, 2005 y 2015) y manteniendo constante el resto de las variables de entrada durante el periodo 1969-2015 (47 años) La correlación y la regresión parcial de mínimos cuadrados se utilizaron para examinar los impactos del cambio en el uso de la tierra en los componentes hidrológicos (medios anuales y mensuales de escorrentía superficial, rendimiento hídrico, flujo lateral, flujo de agua subterránea y evapotranspiración).
Spatial and seasonal variations of hydrological responses to climate and land-use changes in a highly urbanized basin of Southeastern China (Bian et al., 2021)	Cuantificar las contribuciones de los cambios climáticos y de uso de la tierra a la escorrentía en las escalas de tiempo anuales y estacionales en la cuenca del río Qinhuai (QRB).	1986-2001 (16 años) UCS 1996	2002-2015 (14 años) UCS 2009	Se utilizó SWAT-CUP para calibrar y validar el modelo SWAT. Los indicadores fueron NSE, R2, PBIAS. En el análisis de sensibilidad se usó el estadístico-t y el valor-p.	El modelo calibrado se ejecutó cuatro veces considerando los siguientes escenarios: Qs1: clima de 1986-2001 con UCS 1994 Qs2: clima de 2002-2015 con UCS 1994 Qs3: clima de 1986-2001 con UCS 2009 Qs4: clima de 2002-2015 con UCS 2009 Impacto del clima: $\frac{(Qs2-Qs1) + (Qs4-Qs3)}{2}$ Impacto del UCS: $\frac{(Qs3-Qs1) + (Qs4-Qs2)}{2}$ Impacto total: impacto del clima + impacto del UCS Las respuestas hidrológicas espaciales a cada patrón de transformación del uso de la tierra fueron evaluadas por regresión parcial de mínimos cuadrados.

Estudio	Objetivo	Calibración	Validación	Indicadores de evaluación de calibración y validación	Evaluación de impactos
Impacts of land-use conversions on the water cycle in a typical watershed in the southern Chinese Loess Plateau (Hu et al., 2021)	Simular los impactos del cambio del uso y cobertura de la tierra (UCS) en los componentes hidrológicos clave, utilizando la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT).	1971–1980 (10 años)	1981–1990 (10 años)	The Sequential Uncertainty Fitting version 2 (SUFI-2) algorithm NSE, R2, PBIAS	Ejecutaron el modelo calibrado para el periodo 1951-2016 cambiando el mapa de uso de la tierra (1980, 1995, 2010) y manteniendo constante el resto de las variables de entrada. Evaluaron los siguientes componentes hidrológicos: ET, humedad del suelo, y rendimiento hídrico.
Evaluating Water Balance Variables under Land Use and Climate Projections in the Upper Choctawhatchee River Watershed, in Southeast US (Makhtoumi et al., 2020)	Investigar los impactos del cambio climático y de uso de la tierra sobre los procesos hidrológicos en la cuenca alta del río Choctawhatchee utilizando SWAT. El área total de drenaje es de 3940 km ² , se definieron 54 subcuencas y 1821 HRUs	2001-2010 Calentamiento: 1998-2000 Base de datos multitemporal (2001 a 2016) de UCS llamada NLCD 2016	2011-2013	Análisis de sensibilidad (SA) manualmente y luego utilizando procedimientos de calibración e incertidumbre SWAT (SWAT-CUP) para filtrar parámetros insensibles para reducir la carga de trabajo computacional de la calibración Los indicadores fueron NSE, R2, PBIAS, RSR, factor p, factor r.	La simulación se llevó a cabo bajo dos vías de forzamiento radiativo de RCP4.5 y RCP6.0). Los periodos fueron 2040-2069 y 2070-2099. Se usaron escenarios de UCS proyectados del modelo ICLUSv.2. Son escenarios consistentes con el IPCC. Modelos usados: CCSM4, GISS-E2-R, GFDL-CM3 Los escenarios de uso de la tierra (escenarios de cambio de uso de la tierra para el pronóstico decisivo de los Estados Unidos de 2000 a 2100) utilizados en este estudio son los resultados del modelo ICLUSv.2 del Escenario de Uso de la Tierra del Clima Integrado. ICLUS combina el modelo de crecimiento demográfico con un modelo de asignación espacial (Spatially-Explicit Regional Growth Model (SERGoM) y produce escenarios de uso de la tierra consistentes con el IPCC.

1.1.5. Estudios preliminares

Algunos estudios determinan mayor impacto de los cambios de uso/cobertura del suelo. Por ejemplo, el estudio Mwangi et al. (2016) encontró que el cambio en el uso del suelo era el principal impulsor del cambio en la descarga que representaba el 97.5% del cambio en la cuenca del río Mara, Kenya. La variabilidad climática solo causó un aumento neto del 2.5% restante del cambio; que fue causado por los impactos en la descarga del aumento de las precipitaciones y aumento de la evapotranspiración potencial. El estudio de Zhang et al. (2012) encontró que el principal factor impulsor de la disminución de la escorrentía en la cuenca del río Fenhe, China son los cambios de uso/cobertura del suelo. Sus resultados indican que la reducción total de la escorrentía observada estimada por el método de elasticidad climática fue de 55% y el método de modelado hidrológico fue 59%. Mientras que la variación climática, como los cambios en la precipitación y la evapotranspiración, condujo a la disminución de la escorrentía en 41% y 42% por los métodos de elasticidad climática y modelo hidrológico, respectivamente.

Una revisión de estudios al este de África sobre los impactos del cambio de la cobertura del suelo en la escorrentía superficial utilizando análisis de tendencias y modelos hidrológicos muestran que la pérdida de la cubierta forestal conduce a aumentos en la escorrentía superficial (4-90%). Los resultados de los estudios de caso con escenarios de aumento de la cobertura forestal muestran que la escorrentía superficial disminuyó con la ganancia de la cubierta forestal. Sin embargo, la magnitud del aumento y disminución de la escorrentía superficial varió entre las cuencas hidrográficas (Guzha et al., 2018).

Por otro lado, Shrestha y Htut (2016) observaron que el impacto del cambio climático en el flujo de la corriente es mayor que el cambio en el uso/cobertura del suelo en el futuro cercano en la cuenca del río Bago, Myanmar. Los impactos combinados del uso/cobertura del suelo y el cambio climático pueden aumentar el flujo anual de la corriente hasta un 68% en el futuro cercano.

El estudio de Graham et al. (2007) investiga cómo el uso de diferentes simulaciones de modelos climáticos regionales (MCR) afecta los impactos del cambio climático en la hidrología en el norte de Europa utilizando un modelo hidrológico. Se utilizaron escenarios

de cambio climático de un conjunto de siete MCR, dos modelos de circulación general (MCG), dos escenarios de emisiones globales y dos MCR de resolución variable. Se probaron dos enfoques diferentes para transferir el cambio climático de los MCR a los modelos hidrológicos. Los resultados indican un aumento general en el flujo del río y flujos pico en la primavera.

Breuer et al. (2013) utilizaron una técnica de reducción de escala estadística simple para ocho MCG y dos escenarios de emisión de AR4 (A1B, A2) para pronosticar condiciones climáticas locales para la cuenca del río San Francisco, Ecuador. Estas simulaciones se utilizaron para investigar los efectos del cambio climático sobre los flujos hidrológicos locales. Los resultados indican que la precipitación aumenta, y estos aumentos conducirán a descargas aún más dinámicas. Sin embargo, parte del aumento de la entrada de agua se compensa elevando la evapotranspiración debido a las temperaturas más altas.

En México, Acosta y Martínez (2014) propusieron una metodología general para identificar y mapear la tendencia a largo plazo de los volúmenes de escorrentía superficial en la cuenca Lerma- Chapala utilizando 23 MCG. Los resultados mostraron una disminución en la escorrentía superficial de hasta el 29% (A1B-2100) en la parte norte de la cuenca, zona propensa a sequías, lo que la convierte en un área vulnerable. Concluyen que, en la cuenca de estudio sería difícil compensar la falta de escorrentía superficial, ya que los recursos de aguas subterráneas están agotados, por lo que, es necesario adoptar medidas adaptativas.

Deng et al. (2020) utilizaron el modelo de Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT) para evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en una zona semiárida del centro de México. De acuerdo con las proyecciones de siete MCG del Programa de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5, acrónimo en inglés de *Coupled Models Inter-comparison Project Phase 5*) el área de estudio puede llegar a experimentar más precipitación y mayor temperatura en todos los escenarios evaluados para el período medio (2030-2059), así como finales de este siglo (2070-2099), en comparación con la línea base (1970-1999). Se predice que la evapotranspiración potencial (PET) y la evapotranspiración real (ET), y la escorrentía anual aumentarán continuamente.

Estudios han realizado modelaciones hidrológicas en cuencas mexicanas con resultados satisfactorios, por ejemplo en la Cuenca del río Amacuzac (Bâ et al., 2001; Vilchis-Mata et al., 2015), en la cuenca del Río Escondido (Eleuch et al., 2010) y en la cuenca del Río La Sierra (Bâ and Serrat-Capdevila, 2012). Estos estudios se caracterizan por el uso y evaluación de bases de datos climáticos satelitales como alternativa a la poca disponibilidad de datos puntuales.

1.2. Justificación

Los impactos de los cambios del uso de la tierra, variabilidad y cambio climático en los procesos hidrológicos son motivo de gran preocupación y un gran desafío para los investigadores y los responsables políticos (Ma et al., 2009). Hasta ahora, en México pocos estudios han evaluado estos impactos en los procesos hidrológicos, así como, no se han realizado evaluaciones comparativas de los impactos en diferentes condiciones hidroclimáticas.

Las cuencas hidrográficas mexicanas se encuentran bajo una intensa presión hídrica por la alta demanda, la contaminación y la deforestación. Las cuencas en estudio no están exentas de esta problemática, por ejemplo, la cuenca del río Escondido en el estado de Coahuila y la cuenca del río La Sierra en el estado de Chiapas y Tabasco presentan comúnmente problemas de inundaciones cada año; mientras que, la cuenca del río Amacuzac ubicada en el Estado de México se encuentra bajo una intensa presión hídrica como resultado de una baja oferta natural de agua y una intensa actividad productiva. Estas cuencas son mayormente vulnerables a los cambios climáticos que se prevé que modificarán los patrones de precipitación y temperatura actuales, lo cual repercutirá en el balance hídrico de las cuencas, por lo tanto, en su disponibilidad. La información generada sobre cómo y en qué medida los cambios del uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático afectarán la disponibilidad de agua es indispensable para los administradores de los recursos hídricos. La identificación de los principales factores podría servir en el desarrollo de estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos en un entorno cambiante con el fin de no comprometer la provisión de los servicios hídricos actuales y futuros.

Actualmente, se han desarrollado varios enfoques para cuantificar y separar los impactos de los cambios del uso cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático, sin embargo, en cuencas mexicanas estos enfoques no han sido evaluados. Los modelos hidrológicos se han convertido en una herramienta indispensable para la evaluación del impacto de los factores antropogénicos en el sistema hidrológico (Dwarakish and Ganasri, 2015). La integración de los modelos de cambio de uso de la tierra y los modelos de cambio climático (Modelos de Circulación General, MCG) con los modelos hidrológicos puede mejorar la eficiencia de la predicción de la respuesta hidrológica (Mccoll and Aggett, 2007).

En este contexto, el presente estudio pretende presentar un método para cuantificar los impactos de los cambios del uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en el proceso hidrológico en cuencas mexicanas. Esto mediante la aplicación de métodos estadísticos, modelación hidrológica, así como el uso de modelos climáticos y los SIG, este último con el fin de estructurar y analizar las variables de entrada como la precipitación, la temperatura, el uso/cobertura de suelo, entre otras.

La investigación también aportará con la generación de información secundaria para las cuencas hidrográficas, como: análisis e identificación de posibles tendencias en las variables climáticas y predicción de futuros cambios de la cobertura terrestre, información importante en la planificación del territorio. Por otro lado, la modelización está asociada a un alto esfuerzo de aplicación y requerimiento de datos que no siempre están disponibles. Por este motivo, surge la necesidad de explorar herramientas acordes con la disponibilidad de datos y que se adapten a las características de las cuencas y objetivo del modelo. Finalmente, los resultados de la investigación serán resumidos en artículos para su publicación en revistas indexadas.

1.3. Hipótesis

La variabilidad y cambio climático, así como el cambio en el uso y cobertura de suelo generan un impacto diferenciado en los procesos hidrológicos, los cuales se pueden cuantificar a través del uso de un modelo hidrológico semidistribuido (SWAT) en cuencas mexicanas con diferentes condiciones hidro-climáticas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar los impactos de los cambios del uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en los procesos hidrológicos a escala de cuenca hidrográfica con diferentes condiciones hidro-climáticas, utilizando modelos climáticos e hidrológicos.

1.4.2. Objetivos específicos

Para el cumplimiento del objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar, estructurar y analizar la calidad de la información hidro-meteorológica e información física del suelo necesaria en la modelación hidrológica.
- Analizar las variaciones y tendencias hidro-climáticas recientes y futuras en las cuencas hidrográficas para mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos.
- Analizar los cambios de uso/cobertura del suelo en las cuencas hidrográficas de estudio.
- Predecir futuros cambios de los usos y coberturas del suelo en las cuencas hidrográficas utilizando el método de la cadena de Markov.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico utilizando datos observados con el fin de obtener simulaciones hidrológicas bajo condiciones de cambios del uso/cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático.
- Analizar la magnitud de los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático sobre los procesos hidrológicos.

1.5. Marco conceptual

1.5.1. Clima, variabilidad y cambio climático

Clima

El clima se define como el clima promedio o como la descripción estadística en términos de la media y la variabilidad de las cantidades relevantes durante un período de tiempo que va desde meses hasta millones de años. Las variables relevantes para definir el clima suelen ser la temperatura, la precipitación y el viento, el período de referencia para promediar estas variables es de 30 años de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (IPCC, 2013).

Variabilidad climática

Variaciones del estado medio y otras características estadísticas del clima, como la desviación típica y la ocurrencia de fenómenos extremos, en todas las escalas espaciales y temporales, más amplias que las de los fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad puede originarse por procesos internos naturales del sistema climático o por las variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (IPCC, 2013).

Los procesos atmosféricos que generan variabilidad interna operan en escalas de tiempo que van desde prácticamente instantáneas, como la condensación de vapor de agua en las nubes, hasta años, como los procesos que suceden en la troposfera-estratosfera o el intercambio interhemisférico. El componente océano y las grandes capas de hielo tienden a operar en escalas de tiempo más largas. Además, la variabilidad interna se produce por interacciones acopladas entre componentes, como es el caso de la Oscilación del Sur de El Niño. Por otro lado, las influencias externas, como los cambios en la radiación solar y el vulcanismo, ocurren naturalmente y contribuyen a la variabilidad natural total del sistema climático. Otros cambios externos, como el cambio en la composición de la atmósfera que comenzó con la revolución industrial, son el resultado de la actividad humana (Hegerl et al., 2007).

Cambio climático

Variación del estado del clima que puede identificarse por los cambios en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente décadas o períodos más largos. El cambio climático puede originarse por procesos internos naturales o debido a forzamientos externos tales como los cambios en la radiación solar, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define a el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC también diferencia, el cambio climático de la variabilidad climática, al primero le atribuye a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y al segundo le atribuye a causas naturales (IPCC, 2013).

1.5.2. Pruebas para detectar puntos de cambios en series hidro-climáticas

El cambio en una serie puede ocurrir de varias maneras, por ejemplo, gradualmente (una tendencia), abruptamente (un cambio de paso), o en una forma más compleja. Esto, puede afectar la media, la mediana, la varianza, la autocorrelación o casi cualquier otro aspecto de los datos (Kundzewicz and Robson, 2004).

Prueba Pettitt

La prueba de Pettitt (Pettitt, 1979) es un enfoque no paramétrico para determinar la aparición de un punto de cambio. Se ha utilizado comúnmente para detectar cambios en las series hidrológicas y climáticas (por ejemplo, Shahid et al., 2018; Verstraeten et al., 2006; Xu et al., 2019). Existen funciones para el cálculo de la prueba Pettitt, por ejemplo la función *pettitt.test* (x) del paquete ‘*trend*’ (Pohlert, 2020) en el lenguaje de programación R. Esta función está implementada según lo dado por Verstraeten et al. (2006) [1-1], donde los rangos r_1, \dots, r_n de el X_1, \dots, X_n se utilizan para la estadística:

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1) \quad k = 1, \dots, n \quad [1-1]$$

La estadística de prueba es el máximo del valor absoluto del vector [1-2]:

$$\hat{U}_k = \max |U_k| \quad [1-2]$$

El probable punto de cambio $K = k$ es localizado donde \hat{U} tiene su máximo valor. La probabilidad aproximada para una prueba bilateral se calcula [1-3]:

$$p = 2 \exp^{-6K^2/(T^3+T^2)} \quad [1-3]$$

Prueba SNHT

La prueba de homogeneidad normal estándar o SNHT (Alexandersson, 1986) es apropiada para cambios abruptos al principio y al final de la serie temporal (Verstraeten et al., 2006). SNHT calcula la estadística T que compara la media de los primeros k años del registro con la media de los últimos n-k años.

$$T(k) = k\bar{z}_1^2 + (n - k)\bar{z}_2^2 \quad (1 \leq k < n) \quad [1-4]$$

Donde

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma} \quad \bar{z}_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma} \quad [1-5]$$

El valor crítico es

$$T = \max T_k \quad [1-6]$$

Los valores de T se pueden representar a lo largo del tiempo. Si el valor máximo de T (k) es mayor que un valor crítico, la hipótesis nula (es decir, no existe ruptura) será rechazada (Verstraeten et al., 2006).

La función *snh.test* disponible en el paquete ‘trend’ en R, estima el *valor-p* con una simulación de Monte Carlo utilizando m repeticiones. Los valores críticos basados en m = 1000000 simulaciones de Monte Carlo están tabulados para T por Khaliq y Ouarda (2007, citado por Pohlert (2020)).

Prueba Buishand

La función *bu.test* disponible en el paquete ‘*trend*’ (Pohlert, 2020) en R, calcula la prueba de la Buishand (Buishand, 1982). Sea X una variable aleatoria normal, entonces propone el siguiente modelo con un solo cambio (punto de cambio) [1-7]:

$$x_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i & i = 1, \dots, m \\ \mu + \Delta + \epsilon_i & i = m + 1, \dots, n \end{cases} \quad [1-7]$$

con $\epsilon \approx N(0, \sigma)$. La hipótesis nula $\Delta = 0$ se contrasta con la alternativa $\Delta \neq 0$. En la prueba de Buishand U , las sumas parciales ajustadas reescaladas se calculan como [1-8]:

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad (1 \leq i \leq n) \quad [1-8]$$

La desviación estándar de la muestra es [1-9]:

$$D_x = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [1-9]$$

La estadística de prueba se calcula como [1-10]:

$$U = [n(n+1)]^{-1} \sum_{k=1}^{n-1} (S_k/D_x)^2 \quad [1-10]$$

El *valor p* se estima con una simulación de Monte Carlo utilizando m repeticiones. Los valores críticos basados en $m = 19999$ simulaciones de Monte Carlo se tabulan para U por Buishand (1982, 1984, citado por Pohlert (2020)).

1.5.3. Pruebas para detectar tendencias

Mann Kendall

La prueba no paramétrica de tendencia de Mann-Kendall es particularmente útil en el análisis de datos hidro-climáticos, ya que permiten valores faltantes y no es necesario que los datos se ajusten a ninguna distribución. Para el cálculo, primero, se enumera los datos en el orden en que fueron recopilados a lo largo del tiempo: $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$, donde χ_j es el dato

en el tiempo i . Posterior, se determina el signo de todas las $n(n-1)/2$ posibles diferencias: $\chi_j - \chi_k$, donde $j > k$. Estas diferencias son $\chi_2 - \chi_1, \chi_3 - \chi_1, \chi_3 - \chi_2, \chi_4 - \chi_1, \dots, \chi_4 - \chi_3, \chi_n - \chi_1, \dots, \chi_n - \chi_{n-2}, \chi_n - \chi_{n-1}$. El período de tiempo puede ser un día, semana, mes, etc (Gilbert, 1987).

Sea, $\text{sgn}(\chi_j - \chi_k)$ una función indicadora que toma los valores -1, 0, 1 de acuerdo con el signo de $\chi_j - \chi_k$ [1-11]:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(\chi_j - \chi_k) &= 1 && \text{si } \chi_j - \chi_k > 0 \\ &= 0 && \text{si } \chi_j - \chi_k = 0 \\ &= -1 && \text{si } \chi_j - \chi_k < 0 \end{aligned} \quad [1-11]$$

Entonces, la estadística de la prueba de Mann-Kendall se calcula según [1-12]:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(\chi_j - \chi_k) \quad [1-12]$$

Se calcula la varianza de S mediante la siguiente ecuación [1-13]:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad [1-13]$$

donde q es el número de grupos vinculados en el conjunto de datos y t_p es el número de puntos de datos en el grupo p th.

S y $\text{VAR}(S)$ se utilizan para calcular el estadístico de prueba Z de la siguiente manera [1-14]:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{S-1}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}} && \text{si } S > 0 \\ Z &= 0 && \text{si } S = 0 \\ Z &= \frac{S+1}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}} && \text{si } S < 0 \end{aligned} \quad [1-14]$$

Un valor positivo (negativo) de Z indica una tendencia ascendente (descendente). La hipótesis nula de no tendencia se rechaza si el valor absoluto de Z es mayor que el valor

teórico de Z ($1 - \alpha/2$) a un nivel de significancia α (Gilbert, 1987). El valor teórico de Z se encuentra en la tabla “Distribución normal acumulada (valores de p correspondientes a Z para la curva normal)”. A continuación se presenta algunos valores seleccionados de esta tabla para diferentes niveles de significancia (α):

α :	0.20	0.10	0.05	0.01
$Z_{(1-\alpha/2)}$:	1.2816	1.6449	1.960	2.5758

Es importante mencionar que este método no requiere que los datos cumplan con una cierta distribución estadística (Li et al., 2011). Es ampliamente utilizado para detectar tendencias en series hidro-climáticas (por ejemplo, Guo et al., 2014; Mwangi et al., 2016; Sun et al., 2014). Sin embargo, se ha demostrado que algunas variables hidro-climáticas pueden presentar autocorrelación significativa y los resultados de la versión original del método de Mann Kendall se ven afectados por autocorrelaciones seriales (Mwangi et al., 2016). Si la prueba se aplica a datos autocorrelacionados, los resultados de detección de tendencias pueden no ser confiables, debido a que la prueba puede rechazar la hipótesis nula (H_0 , no tendencia) con más frecuencia (von Storch, 1995; Yue et al., 2002). Las autocorrelaciones se pueden detectar con correlogramas, el paquete ‘stats’, función ‘acf’ en R (RStudio Team, 2019), se encuentra disponible para este análisis.

Pendiente de Theil-Sen

Si hay una tendencia lineal, la pendiente verdadera (cambio por unidad de tiempo) puede estimarse calculando la estimación de mínimos cuadrados, mediante métodos de regresión lineal. Sin embargo, si hay errores graves o valores atípicos en los datos puede desviarse mucho de la pendiente real. El método de Theil-Sen no se ve muy afectado por errores en datos o valores atípicos, y se puede calcular cuando faltan datos. Este es un método no paramétrico simple desarrollado por Sen (1968), su procedimiento es una extensión de la prueba de Theil (1950). Está estrechamente relacionado con la prueba de Mann-Kendall (Gilbert, 1987).

La estimación de la pendiente de Theil-Sen (\hat{b}_1) se calcula [1-15]:

$$\hat{b}_1 = \text{mediana} \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i} \quad [1-15]$$

$$i < j, \quad i = 1, 2, \dots, (n - 1), \quad j = 2, 3, \dots, n$$

donde $x_{i'}$ y x_i son los datos en los momentos i' e i , respectivamente.

Un conjunto de datos de $n(x, i)$ pares dará como resultado $n \cdot (n - 1)/2$ comparaciones por pares, N' . Si hay múltiples observaciones en uno o más períodos de tiempo, entonces $N' < n \cdot (n - 1)/2$, donde n es ahora el número total de observaciones, no períodos de tiempo.

1.5.4. Modelo hidrológico SWAT

En esta sección se presenta un breve resumen de la descripción general de la herramienta para la evaluación del suelo y el agua (SWAT, por sus siglas en inglés) desarrollada por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Existe extensa información documentada acerca del modelo, por ejemplo, la parte teórica revisar en Neitsch et al. (2011), entradas y salidas del modelo en Arnold et al. (2012a), descarga de las diferentes herramienta e interfaces del modelo en <https://swat.tamu.edu/software/>. La nueva generación de SWAT denominada SWAT+ en <https://swatplus.gitbook.io/docs/installation>.

SWAT es un modelo a escala de cuenca hidrográfica, semi-distribuido, continuo, con un paso de tiempo diario, basado en procesos (Arnold et al., 2012b). El modelo permite simular la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea, así como predecir el impacto ambiental del uso de la tierra, las prácticas de gestión de la tierra y el cambio climático (Arnold et al., 2012b; Tech, 2021).

Neitsch et al. (2011) señala algunas características del modelo: (1) SWAT es usado en la modelación de los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, el movimiento de los sedimentos, el crecimiento de los cultivos y el ciclo de los nutrientes, para esto requiere de datos sobre el clima, propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo de la tierra. (2) El modelo, utiliza insumos fácilmente disponibles, a pesar de que SWAT es utilizado para estudiar procesos más especializados, como el transporte de bacterias, las instituciones gubernamentales suelen disponer de los datos mínimos necesarios para realizar una simulación. (3) Es computacionalmente eficiente, se

puede realizar la simulación de cuencas muy grandes o una variedad de estrategias de gestión sin una inversión excesiva de recursos. 4) SWAT es un modelo de tiempo continuo por lo que permite estudiar los impactos a largo plazo; sin embargo, el modelo no está diseñado para simular la transferencia detallada de inundaciones de un solo evento.

En la configuración del modelo, SWAT divide una cuenca hidrográfica en múltiples subcuencas, estas a su vez se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRUs). Las HRUs comparten características homogéneas de uso de la tierra, suelo, topografía y gestión. Las HRUs son un porcentaje del área de la subcuenca y pueden no ser contiguas o identificadas espacialmente dentro de una simulación SWAT. Una cuenca hidrográfica también puede subdividirse únicamente en subcuencas que se caracterizan por el uso dominante de la tierra, el tipo de suelo y la gestión.

El modelo SWAT maneja los procesos en dos fases. La primera, la fase terrestre del ciclo hidrológico, controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y carga de plaguicidas en el canal principal de cada subcuenca. La segunda, la fase de transferencia del ciclo hidrológico, se encarga del movimiento del agua, sedimentos, nutrientes y carga de plaguicidas a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hasta la salida (Arnold et al., 2012b; Neitsch et al., 2011a).

1.5.4.1. Fase terrestre del ciclo hidrológico

La Tabla 1-2 presenta los diferentes procesos considerados en la modelación de la fase terrestre. En general, los procesos son: clima, hidrología, cobertura de tierra/crecimiento de planta, erosión, nutrientes, pesticidas y manejo. Para información detallada de estos diversos procesos revisar la documentación teórica de Neitsch et al. (2011). En los procesos climáticos, las variables velocidad del viento y humedad relativa son necesarias dependiendo del método a utilizar para calcular la evapotranspiración potencial.

Tabla 1-2. Procesos considerados en la fase terrestre del ciclo hidrológico del modelo SWAT

Proceso		Variables	
Clima	Generador de clima	Precipitación	
		Patrones de lluvia sub-diaria	
		Temperatura del aire y radiación solar	
Clima	Nieve	Velocidad del viento	
		Humedad relativa	
		Cobertura de nieve	
Clima	Temperatura del suelo	Derretimiento de nieve	
		Bandas de elevación	
		Almacenamiento de dosel	
Hidrología	Evapotranspiración	Infiltración	
		Redistribución	
		Evapotranspiración potencial: -Hargreaves -Priestley-Taylor -Penman-Monteith	
Hidrología	Flujo subterráneo lateral		
		Escorrentía superficial	Volumen de escorrentía superficial Tasa máxima de escorrentía
		Estanques	
Hidrología	Uso consuntivo		
		Canales tributarios	Pérdidas de transmisión
		Flujo de retorno	
Cobertura de tierra/crecimiento de planta	Crecimiento potencial		
		Transpiración actual y potencial	
		Absorción de nutrientes	
Cobertura de tierra/crecimiento de planta	Límite/restricción de crecimiento		
Erosión		Ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE)	
Nutrientes	Nitrógeno		
		Fósforo	
Pesticidas		Movimiento de pesticidas en la red de corrientes	
Manejo	Rotaciones		
		Uso del agua	

1.5.4.1.1. Balance hídrico

Los procesos hidrológicos son estimados mediante el balance hídrico, el cual se calcula para cada HRU. SWAT utiliza la ecuación [1-16], esta comprende seis variables.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad [1-16]$$

donde:

SW_t contenido final de agua del suelo (mm H₂O),
 SW_0 contenido inicial de agua del suelo en el día i (mm H₂O),

t	tiempo (días)
R_{day}	cantidad de precipitación en el día i (mm H ₂ O)
Q_{surf}	cantidad de escorrentía superficial en el día i (mm H ₂ O)
E_a	cantidad de evapotranspiración en el día i (mm H ₂ O)
w_{seep}	cantidad de flujo de percolación y derivación que sale del fondo del perfil del suelo en el día i (mm H ₂ O)
Q_{gw}	cantidad de flujo de retorno en el día i (mm H ₂ O).

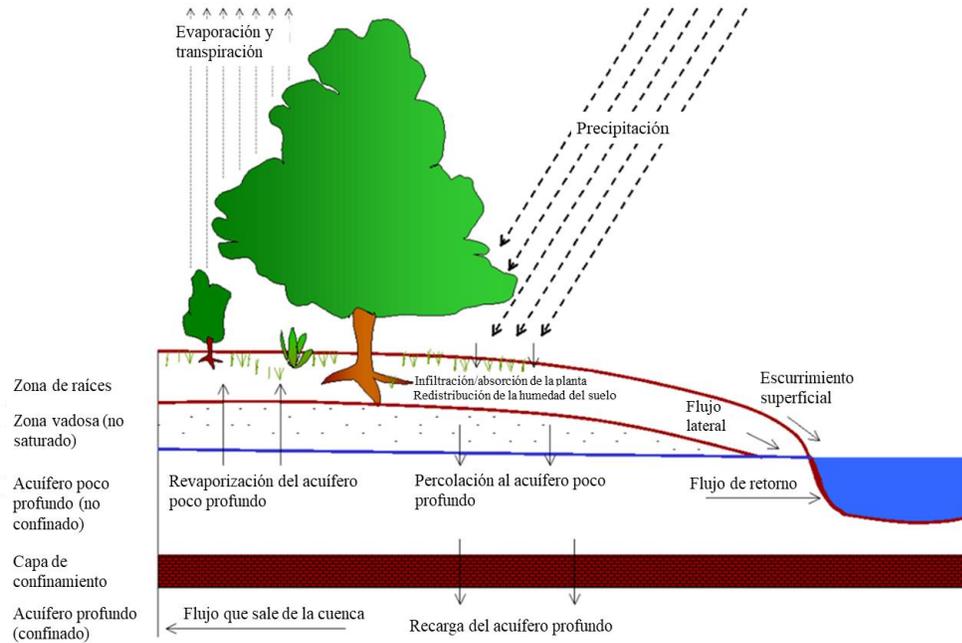


Figura 1-1. Representación gráfica del ciclo hidrológico
Traducido de Neitsch et al., (2011b)

1.5.4.1.2. Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial es el flujo que se produce a lo largo de una superficie inclinada utilizando cantidades de lluvia diarias o subdiarias. SWAT simula los volúmenes de escorrentía superficial y las tasas de escorrentía máxima para cada HRU. El modelo proporciona dos métodos para estimar los volúmenes de escorrentía superficial: (1) el número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972 citado por Neitsch et al., 2011) y (2) el método de infiltración de Green & Ampt (1911, citado por Neitsch et al., 2011). El método de Green & Ampt requiere datos de precipitaciones subdiarias y calcula la infiltración en función del potencial mátrico del frente de humectación y de la conductividad hidráulica efectiva. En cuanto a la estimación de la tasa de escorrentía máxima SWAT utiliza una modificación del método racional.

Método número de curva SCS

Número de curva SCS es un modelo empírico que estima las cantidades de escorrentía bajo diferentes usos de la tierra y tipos de suelo (Neitsch et al., 2011). La ecuación del número de la curva SCS es [1-17]:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad [1-17]$$

donde:

Q_{surf}	escorrentía acumulada o el exceso de precipitación (mm H ₂ O)
R_{day}	profundidad de la precipitación para el día (mm H ₂ O)
I_a	abstracciones iniciales que incluyen el almacenamiento superficial, la intercepción y la infiltración antes de la escorrentía (mm H ₂ O)
S	parámetro de retención (mm H ₂ O)

La escorrentía sólo se producirá cuando $R_{day} > I_a$. La abstracción inicial, I_a , se aproxima a $0.2S$. Sustituyendo la ecuación [1-17] se convierte en [1-18]:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad [1-18]$$

El parámetro de retención (S) varía espacialmente por los cambios en los suelos, el uso de la tierra, la gestión y la pendiente, y temporalmente debido a los cambios en el contenido de agua del suelo. El parámetro de retención se define como [1-19]:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad [1-19]$$

CN Número de curva del día (adimensional)

CN es una función de la permeabilidad del suelo, el uso de la tierra y las condiciones hídricas previas del suelo. Los números de curva típicos para la condición de humedad II se pueden encontrar tabulados en División de Ingeniería de SCS, 1986 citado Neitsch et al. (2011) para varias coberturas de suelo y tipos de suelo. Estos valores son apropiados para una pendiente del 5%.

Grupos hidrológicos del Suelo

Un grupo hidrológico es definido como un grupo de suelos que tienen las mismas características físicas y de escorrentía (NRCS, 2012). El suelo puede clasificarse en cuatro grupos: A, B, C y D, o en tres clases dobles, A/D, B/D y C/D (Neitsch et al., 2011).

A: Los suelos tienen una alta tasa de infiltración incluso cuando están completamente mojados. Están formados principalmente por arenas o gravas profundas, bien drenadas o excesivamente drenadas. Tienen una alta tasa de transmisión de agua.

B: Los suelos tienen una tasa de infiltración moderada cuando están completamente mojados. Son suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados que tienen texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Tienen una tasa de transmisión de agua moderada.

C: Los suelos tienen una tasa de infiltración lenta cuando están completamente mojados. Principalmente tienen una capa que impide el movimiento descendente del agua o tienen una textura de moderadamente fina a fina. Tienen una tasa de transmisión de agua lenta.

D: Los suelos tienen una tasa de infiltración muy lenta cuando están completamente mojados. Consisten principalmente en suelos arcillosos que tienen un alto potencial de hinchamiento con un nivel freático permanente, y una capa de arcilla cerca o la superficie, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

A/D, B/D y C/D: Se dan dos grupos hidrológicos para ciertos suelos húmedos que pueden ser adecuadamente drenados. La primera letra se aplica a la condición drenada, la segunda a la no drenada. Sólo los suelos clasificados como D en su estado natural se asignan a las clases duales.

Condición de humedad antecedente del suelo

Son tres condiciones de humedad antecedente: I-seco (punto de marchitamiento), II-humedad media y III-húmedo (capacidad de campo). El CN de la condición de humedad I

es el valor más bajo que puede asumir el número de curva diario en condiciones secas. Los números de curva para las condiciones de humedad I y III se calculan con las ecuaciones:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp [2.533 - 0.0636 (100 - CN_2)])} \quad 1-20$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.00673 (100 - CN_2)] \quad 1-21$$

donde:

CN_1	número de curva de la condición de humedad I
CN_2	número de curva de la condición de humedad II
CN_3	número de curva de la condición de humedad III

Parámetro de retención

SWAT dispone con dos métodos para calcular el parámetro de retención. El primer método consiste en permitir que el parámetro de retención varíe con el contenido de agua del perfil del suelo [1-22]. El segundo método permite que el parámetro de retención varíe con la evapotranspiración acumulada de las plantas [1-23]. El segundo método se incorporó debido a que el método de la humedad del suelo predecía demasiada escorrentía en los suelos poco profundos. Al calcular el CN diario en función de la evapotranspiración de las plantas, el valor depende menos del almacenamiento del suelo y más del clima precedente.

$$S = S_{max} \left(1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW)]} \right) \quad [1-22]$$

donde:

S	parámetro de retención (mm H ₂ O)
S_{max}	valor máximo que el parámetro de retención puede alcanzar en un día determinado (mm)
SW	contenido de agua del suelo de todo el perfil, excluyendo la cantidad de agua retenida en el perfil en el punto de marchitamiento (mm H ₂ O)
w_1, w_2	coeficientes de forma

$$S = S_{prev} + E_o \cdot \exp\left(\frac{-cnccoef \cdot S_{prev}}{S_{max}}\right) - R_{day} + Q_{surf} \quad [1-23]$$

donde:

S	parámetro de retención (mm H ₂ O)
S_{prev}	parámetro de retención del día anterior (mm)
E_o	evapotranspiración potencial del día (mm d ⁻¹)
$cnccoef$	coeficiente de ponderación utilizado para calcular el coeficiente de retención para los cálculos del número de la curva diaria dependiente de la evapotranspiración de las plantas
S_{max}	valor máximo que el parámetro de retención puede alcanzar en un día determinado (mm)
R_{day}	profundidad de la precipitación para el día (mm H ₂ O)
Q_{surf}	escorrentía acumulada o el exceso de precipitación (mm H ₂ O)

Ajustes de la pendiente

Los números de curva de la condición de humedad II proporcionados en las bases de datos SWAT son apropiados para pendientes del 5%. Williams (1995, citado por Neitsch et al. (2011)) desarrolló una ecuación para ajustar el número de la curva a una pendiente diferente [1-24]:

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} [1 - 2 \cdot \exp(-13.86 \cdot slp)] + CN_2 \quad [1-24]$$

donde:

CN_{2s}	el número de la curva de la condición de humedad II ajustada por la pendiente
CN_2	número de curva de la condición de humedad II para la pendiente por defecto del 5%
CN_3	número de curva de la condición de humedad III para la pendiente por defecto del 5%
slp	pendiente de la fracción media de la subcuenca

Método racional modificado

El índice de escorrentía máxima es el caudal máximo de escorrentía que se produce con un evento pluvial determinado. La tasa de escorrentía máxima es un indicador del poder erosivo de una tormenta y se utiliza para predecir la pérdida de sedimentos. SWAT calcula el índice de escorrentía máxima con un método racional modificado. El método racional se utiliza ampliamente en el diseño de zanjas, canales y sistemas de control de aguas pluviales.

El método racional se basa en la suposición de que si una lluvia de intensidad i comienza en el momento $t = 0$ y continúa indefinidamente, la tasa de escorrentía aumentará hasta el momento de concentración, $t = t_{con}$, cuando toda el área de la subcuenca esté contribuyendo al flujo en la salida. La fórmula racional es [1-25]:

$$q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot Area}{3.6} \quad [1-25]$$

donde:

q_{peak}	tasa de escorrentía máxima ($m^3 s^{-1}$)
C	coeficiente de escorrentía
i	intensidad de la lluvia (mm/h)
$Area$	área de la subcuenca (km^2)
3.6	factor de conversión de unidades

▪ Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es la cantidad de tiempo que transcurre desde el comienzo de un evento de lluvia hasta que toda el área de la subcuenca contribuye al flujo en la salida. En otras palabras, el tiempo de concentración es el tiempo que tarda una gota de agua en fluir desde el punto más remoto de la subcuenca hasta la salida. El tiempo de concentración se calcula sumando el tiempo de flujo terrestre (el tiempo que tarda el flujo desde el punto más remoto de la subcuenca en llegar al canal) y el tiempo de flujo del canal (el tiempo que tarda el flujo en los canales aguas arriba en llegar a la salida) [1-26]:

$$t_{con} = t_{ov} + t_{ch} \quad [1-26]$$

donde:

t_{con}	tiempo de concentración para una subcuenca (hr)
t_{ov}	tiempo de concentración para el flujo de tierra (hr)
t_{ch}	tiempo de concentración para el flujo de canal (hr)

El tiempo de concentración del flujo terrestre, t_{ov} , puede calcularse mediante la ecuación [1-27]:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}} \quad [1-27]$$

donde:

L_{slp}	longitud de la pendiente de la subcuenca (m)
n	coeficiente de rugosidad de Manning para la subcuenca
slp	pendiente media en la subcuenca ($m\ m^{-1}$)

Los valores n para el flujo terrestre se encuentran tabulados en la guía teórica del modelo SWAT (Neitsch et al., 2011a) los cuales fueron tomados de Engman (1983).

El tiempo de concentración del flujo del canal, t_{ch} , puede calcularse mediante la ecuación [1-28]:

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad [1-28]$$

donde:

t_{ch}	tiempo de concentración del flujo del canal (hr)
L	Longitud del canal desde el punto más distante hasta la salida de la subcuenca (km)
n	coeficiente de rugosidad de Manning para el canal
$Area$	área de la subcuenca (km^2)
slp_{ch}	pendiente del canal ($m\ m^{-1}$)

Los valores n para el flujo del canal se encuentran tabulados en la guía teórica del modelo SWAT (Neitsch et al., 2011a) tomados de Chow (1959), en la guía sólo presentan una pequeña parte de los que enumera en el libro.

▪ Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es la relación entre la tasa de entrada, $i \cdot Area$, y la tasa de descarga máxima, q_{peak} . El coeficiente variará de una tormenta a otra y se calcula con la ecuación [1-29]:

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad [1-29]$$

donde:

Q_{surf}	escorrentía superficial ($mm\ H_2O$)
R_{day}	es la lluvia del día ($mm\ H_2O$)

▪ **Intensidad de las precipitaciones**

La intensidad de las precipitaciones es el promedio de estas durante el tiempo de concentración. A partir de esta definición, se puede calcular con la ecuación [1-30].

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad [1-30]$$

donde:

i	intensidad de la lluvia (mm/h)
R_{tc}	cantidad de lluvia caída durante el tiempo de concentración ($mm H_2O$)
t_{conc}	tiempo de concentración para la subcuenca (h)

Un análisis de los datos de lluvia recogidos por Hershfield (1961, citado por Neitsch et al., 2011) para diferentes duraciones y frecuencias mostró que la cantidad de lluvia caída durante el tiempo de concentración era proporcional a la cantidad de lluvia caída durante el período de 24 horas [1-31].

$$R_{tc} = \alpha_{tc} \cdot R_{day} \quad [1-31]$$

donde:

α_{tc}	fracción de lluvia diaria que se produce durante el tiempo de concentración
R_{day}	cantidad de lluvia caída durante el día ($mm H_2O$)

En el caso de las tormentas de corta duración, toda o la mayor parte de la lluvia caerá durante el tiempo de concentración, haciendo que α_{tc} se acerque a su límite superior de 1. El valor mínimo de α_{tc} se daría en tormentas de intensidad uniforme ($i_{24} = i$). Este valor mínimo puede definirse sustituyendo los productos del tiempo y la intensidad de la lluvia en la ecuación [1-31]:

$$\alpha_{tc,min} = \frac{R_{tc}}{R_{day}} = \frac{i \cdot t_{conc}}{i_{24}} = \frac{t_{con}}{24} \quad [1-32]$$

Por lo tanto, α_{tc} cae en el rango $\frac{t_{con}}{24} \leq \alpha_{tc} \leq 1$.

SWAT estima la fracción de lluvia caída en el tiempo de concentración en función de la fracción de lluvia diaria caída en la media hora de mayor intensidad de lluvia.

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp[2 \cdot t_{con} \cdot \ln(1 - \alpha_{0,5})] \quad [1-33]$$

donde:

$\alpha_{0.5}$	fracción de lluvia diaria que cae en la media hora de lluvia de mayor intensidad
t_{con}	tiempo de concentración para la subcuenca (h)

▪ Fórmula racional modificada

La fórmula racional modificada utilizada para estimar el caudal máximo se obtiene sustituyendo las ecuaciones [1-25], [1-29], [1-30] y [1-31] en la ecuación [1-34].

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot t_{cont}} \quad [1-34]$$

donde:

q_{peak}	tasa de escorrentía máxima ($m^3 s^{-1}$)
α_{tc}	escorrentía superficial ($mm H_2O$)
Q_{surf}	escorrentía superficial ($mm H_2O$)
$Area$	área de la subcuenca (km^2)
t_{cont}	tiempo de concentración para la subcuenca (h)
3.6	factor de conversión de unidades

Todas las ecuaciones para la estimación de la tasa de escorrentía máxima utilizan el área de la subcuenca en lugar del área de la HRU. Sin embargo, en el modelo, estos cálculos se realizan a nivel de HRU. Se realizan dos modificaciones para adaptar las ecuaciones a las HRUs. Primero, el área de la subcuenca se sustituye por el área de la HRU. Segundo, el término de longitud del canal, L , utilizado en el cálculo del tiempo de concentración del flujo del canal se multiplica por la fracción del área de la subcuenca con la HRU de interés.

Retraso de la escorrentía superficial

En las grandes subcuencas con un tiempo de concentración superior a 1 día, sólo una parte de la escorrentía superficial llegará al canal principal el día en que se genera. SWAT incorpora una función de almacenamiento de la escorrentía superficial para retrasar una parte de la liberación de la escorrentía superficial al canal principal.

Una vez calculada la escorrentía superficial con el número de curva, se calcula la cantidad de escorrentía superficial liberada al canal principal [1-35]:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad [1-35]$$

donde:

Q_{surf}	cantidad de escorrentía superficial descargada al canal principal en un día determinado (mm H ₂ O).
Q'_{surf}	cantidad de escorrentía superficial generada en la subcuenca en un día determinado (mm H ₂ O).
$Q_{stor,i-1}$	escorrentía superficial almacenada o retrasada desde el día anterior (mm H ₂ O)
$SURLAG$	coeficiente de retraso de la escorrentía superficial
t_{conc}	tiempo de concentración para la subcuenca (horas)

La expresión $\left(1 - \exp \left[\frac{-SURLAG}{t_{conc}} \right] \right)$ representa la fracción del agua total disponible que podrá entrar en el tramo en un día cualquiera.

Para un tiempo de concentración dado, a medida que el valor de SURLAG disminuye se retiene más agua en el almacenamiento. El retraso en la liberación de la escorrentía superficial suavizará el hidrograma del caudal simulado en el tramo.

Pérdidas de transmisión

Las pérdidas por transmisión reducen el volumen de escorrentía a medida que la onda de crecida se desplaza río abajo. SWAT usa un procedimiento descrito en el Manual de Hidrología del SCS (Lane, 1983 citado por Neitsch et al., 2011) para estimar las pérdidas por transmisión de los cauces efímeros. Este método estima las pérdidas por transmisión en ausencia de datos observados de flujo de entrada y salida y asume que no hay contribuciones de flujo de entrada lateral o de flujo fuera de la orilla a la escorrentía.

La ecuación de predicción del volumen de escorrentía después de las pérdidas por transmisión es [1-36]:

$$vol_{Q_{surf,f}} = \begin{cases} 0 & vol_{Q_{surf,i}} \leq vol_{thr} \\ a_x + b_x \cdot vol_{Q_{surf,i}} & vol_{Q_{surf,i}} > vol_{thr} \end{cases} \quad [1-36]$$

donde:

$vol_{Qsurf,f}$	volumen de escorrentía después de las pérdidas por transmisión (m^3)
a_x	intercepto de la regresión para un canal de longitud L y anchura W (m^3)
b_x	pendiente de la regresión para un canal de longitud L y anchura W
$vol_{Qsurf,i}$	volumen de escorrentía antes de las pérdidas por transmisión (m^3)
vol_{thr}	volumen umbral para un canal de longitud L y anchura W (m^3)

El volumen umbral se define en las ecuaciones [1-39][1-37].

$$vol_{thr} = \frac{a_x}{b_x} \quad [1-37]$$

La ecuación correspondiente al índice de escorrentía máxima es [1-38]:

$$q_{peak,f} = \frac{1}{(3600 \cdot dur_{flw})} \cdot [a_x - (1 - b_x) \cdot vol_{Qsurf,i}] + b_x \cdot q_{peak,i} \quad [1-38]$$

donde:

$q_{peak,f}$	tasa de pico después de las pérdidas de transmisión (m^3/s)
dur_{flw}	duración del flujo (hr)
a_x	intercepto de la regresión para un canal de longitud L y anchura W (m^3)
b_x	pendiente de la regresión para un canal de longitud L y anchura W
$vol_{Qsurf,i}$	volumen de escorrentía antes de las pérdidas por transmisión (m^3)
$q_{peak,i}$	tasa de pico antes de tener en cuenta las pérdidas de transmisión (m^3/s)

La duración del flujo se calcula con la ecuación [1-39].

$$dur_{flw} = \frac{Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot q_{peak}} \quad [1-39]$$

donde:

dur_{flw}	duración del flujo (hr)
Q_{surf}	cantidad de escorrentía superficial descargada al canal principal en un día determinado (mm H ₂ O)
q_{peak}	tasa de escorrentía máxima (m^3s^{-1})
$Area$	área de la subcuenca (km^2)
3.6	factor de conversión de unidades

Para calcular los parámetros de regresión para canales de diferentes longitudes y anchuras, se necesitan los parámetros de un canal unitario. Un canal unitario se define como un canal de longitud L = 1 km y de anchura W = 1 m. Los parámetros del canal unitario se calculan con las ecuaciones:

$$k_r = -22 \cdot \ln \left[1 - 2.6466 \cdot \frac{K_{ch} \cdot dur_{flw}}{vol_{Qsurf,i}} \right] \quad [1-40]$$

$$a_r = -0.2258 \cdot K_{ch} \cdot dur_{flw} \quad [1-41]$$

$$b_r = \exp[-0.4905 \cdot K_r] \quad [1-42]$$

donde:

k_r	factor de decaimiento ($m^{-1} km^{-1}$)
a_r	intercepto unitario de regresión del canal (m^3)
b_r	pendiente unitaria de regresión del canal
K_{ch}	conductividad hidráulica efectiva del aluvión del canal (mm/h)
dur_{flw}	duración del flujo (hr)
$vol_{Qsurf,i}$	volumen inicial de escorrentía (m^3)

Los parámetros de regresión son [1-43] y [1-44]:

$$b_x = \exp[-k_r \cdot L \cdot W] \quad [1-43]$$

$$a_x = \frac{a_r}{1 - b_r} \cdot (1 - b_x) \quad [1-44]$$

donde:

a_x	es el intercepto de regresión para un canal de longitud L y anchura W (m^3)
b_x	pendiente de regresión para un canal de longitud L y anchura W
k_r	factor de decaimiento ($m^{-1} km^{-1}$),
L	longitud del canal desde el punto más distante hasta la salida de la subcuenca (km^3)
W	anchura media del flujo, por ejemplo, ancho del canal (m)
a_r	intercepto de regresión del canal unitario (m^3)
b_r	pendiente de regresión del canal unitario.

Las pérdidas por transmisión de la escorrentía superficial se filtran al acuífero poco profundo.

1.5.4.2. Fase de transferencia del ciclo hidrológico

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la HYMO (William y Hann, 1972, citado por Neitsch et al. 2011). Adicionalmente, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce. La Figura 1-2 ilustra los diferentes procesos en-corriente modelados por SWAT.

El enrutamiento del ciclo hidrológico es dividido en el enrutamiento en el canal principal y en el enrutamiento en los depósitos/reservas (Tabla 1-3).

Tabla 1-3. Estructura de la fase de enrutamiento del ciclo hidrológico

Enrutamiento en el canal principal o alcance	Enrutamiento del flujo Enrutamiento del sedimento Enrutamiento de nutrientes Enrutamiento del pesticida al canal
Enrutamiento en los depósitos/reservas	Salida del depósito Enrutamiento del sedimento Nutrientes en depósitos/reservas Pesticidas en el depósito

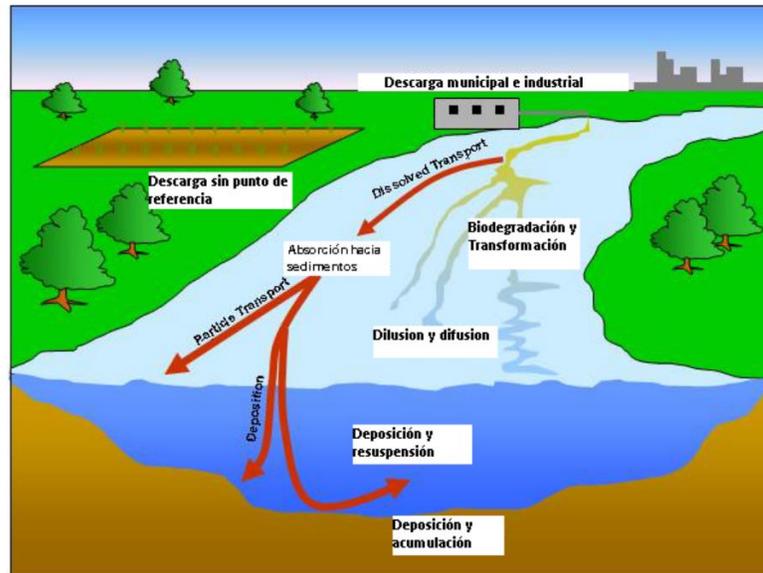


Figura 1-2. Procesos en-corriente modelados por SWAT (Neitsch et al. 2011)

Enrutamiento del flujo

A medida que el agua fluye río abajo, una parte puede perderse debido a la evaporación y a la transmisión a través del lecho del canal. Otra pérdida potencial es la extracción de agua del canal para uso agrícola o humano. El flujo puede ser complementado por la caída de la lluvia directamente en el canal y/o la adición de agua de las descargas de fuentes puntuales.

El flujo del canal abierto se define como el flujo del canal con una superficie libre, como flujo en un río o en una tubería parcialmente llena. SWAT utiliza la ecuación de Manning para definir la tasa y la velocidad del flujo. El agua se dirige a través de la red de canales utilizando el método de enrutamiento de almacenamiento variable o el método de

enrutamiento del río Muskingum. Para obtener las ecuaciones de los dos métodos revisar la documentación teórica de Neitsch et al. (2011).

1.5.5. Criterios de evaluación del modelo

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE): NSE (Nash y Sutcliffe, 1970) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual "ruido" en comparación con la varianza de los datos medidos "información". El NSE indica hasta qué punto el gráfico de los datos observados frente a los simulados se ajusta a la línea 1:1. El NSE se calcula como se muestra en la ecuación [1-45].

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \right] \quad [1-45]$$

donde,

Q_i^{obs}	i-ésimo valor observado
Q_i^{sim}	i-ésimo valor simulado
\bar{Q}^{obs}	media de los datos observados
n	número total de observaciones

NSE oscila entre $-\infty$ y 1. $NSE = 1$, corresponde a una coincidencia perfecta de los datos modelados con los observados. NSE entre 0 y 1, se consideran generalmente como niveles aceptables de rendimiento, mientras que, $NSE < 0$, indica que el valor medio observado es mejor predictor que el valor simulado. (Moriassi et al., 2007)

Coefficiente de determinación (R^2): describe el grado de colinealidad entre los datos simulados y los medidos, identifica la proporción de la varianza de los datos medidos explicada por el modelo. R^2 oscila entre 0 y 1, con valores altos que indican una menor varianza de error, y normalmente los valores superiores a 0.5 se consideran aceptables. R^2 se han utilizado ampliamente para la evaluación de modelos, sin embargo, estos estadísticos son demasiado sensibles a los valores extremos elevados (valores atípicos) e insensibles a las diferencias aditivas y proporcionales entre las predicciones del modelo y los datos medidos (Moriassi et al., 2007).

Sesgo porcentual (PBIAS): PBIAS es la desviación de los datos que se evalúan, expresada como porcentaje. El PBIAS mide la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que sus homólogos observados.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right] \quad [1-46]$$

Donde:

Q_i^{obs} i-ésimo valor observado
 Q_i^{sim} i-ésimo valor simulado
 n número total de observaciones

El valor óptimo de PBIAS es 0, y los valores bajos indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del modelo (Gupta et al., 1999 citado por Moriasi et al., 2007).

Moriasi et al. (2007) y Moriasi et al. (2015) recomendaron calificaciones cualitativas (bueno, bueno, satisfactorio o insatisfactorio) para evaluar el rendimiento de un modelo con los correspondientes umbrales cuantitativos de los métodos estadísticos de interés (NSE, PBIAS, o R^2).

Tabla 1-4. Criterios de evaluación del rendimiento para pasos de tiempo mensual, tomado de Moriasi et al. (2007)

Eficiencia	NSE	PBIAS	RSR
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 1$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.75$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.00 < RSR \leq 0.5$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.50$

Tabla 1-5. Criterios de evaluación del rendimiento para pasos de tiempo diario, mensual y anual recomendadas para los modelos a escala de cuenca hidrográfica, tomado de Moriasi et al. (2015)

Eficiencia	R^2	NSE	PBIAS
Muy bueno	$R^2 > 0.85$	$NSE > 0.80$	$PBIAS < \pm 5$
Bueno	$0.75 < R^2 > 0.85$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$
Satisfactorio	$0.60 < R^2 > 0.75$	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Insatisfactorio	$R^2 \leq 0.60$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 15$

1.5.6. Clasificación de uso y cobertura del suelo en México

México cuenta con cartografía de uso y cobertura del suelo en varias escalas (50 000, 1:250 000 y 1:1 000 000) y en diferentes periodos de tiempo. Esta información, con excepción de la escala 1:50 000, abarca todo el territorio nacional. Hasta la fecha se han generado siete series de uso y cobertura del suelo. La Tabla 1-6 presenta breves detalles de cada serie. En su mayoría, esta información se obtuvo a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes de satélite LandSat. El periodo de elaboración corresponde al tiempo del desarrollo de la serie, incluyendo el periodo de validación de campo.

Tabla 1-6. Descripción de las series de uso y cobertura del suelo de INEGI

Series	Periodo de elaboración	Año de publicación	Imágenes
Serie I	1979-1991	1997	-
Serie II	1993-1999	2001	LandSat TM (30 m)
Serie III	2002-2005	2005	Landsat ETM (30 m)
Serie IV	2006-2010	2009	SPOT (10 m),
Serie V	2011-2013	2013	LandSat TM5 (30 m)
Serie VI	2014-2016	2016	LandSat TM8 (30 m)
Serie VII	2018-2021	2021	Imágenes Geomedianas derivadas de la constelación LandSat

La clasificación propuesta por INEGI definió tres grupos de información de uso y cobertura de suelo, con base a sus afinidades y similitud de usos. 1) Información ecológica, florística y fisonómica, son las agrupaciones de las comunidades vegetales, definidas con base a sus afinidades ecológicas y florísticas. 2) Agroecosistemas, sistemas manejados por el hombre, constituyen propiamente una cubierta de usos del suelo. Estas áreas son dedicadas a las actividades agropecuarias, así como zonas con plantaciones con fines de explotación forestal. 3) Información complementaria, elementos que no forman parte de la cobertura vegetal ni de las áreas manejadas, pero que inciden sobre ellas. En la Figura 1-3 se resume el sistema de clasificación propuesto por INEGI.

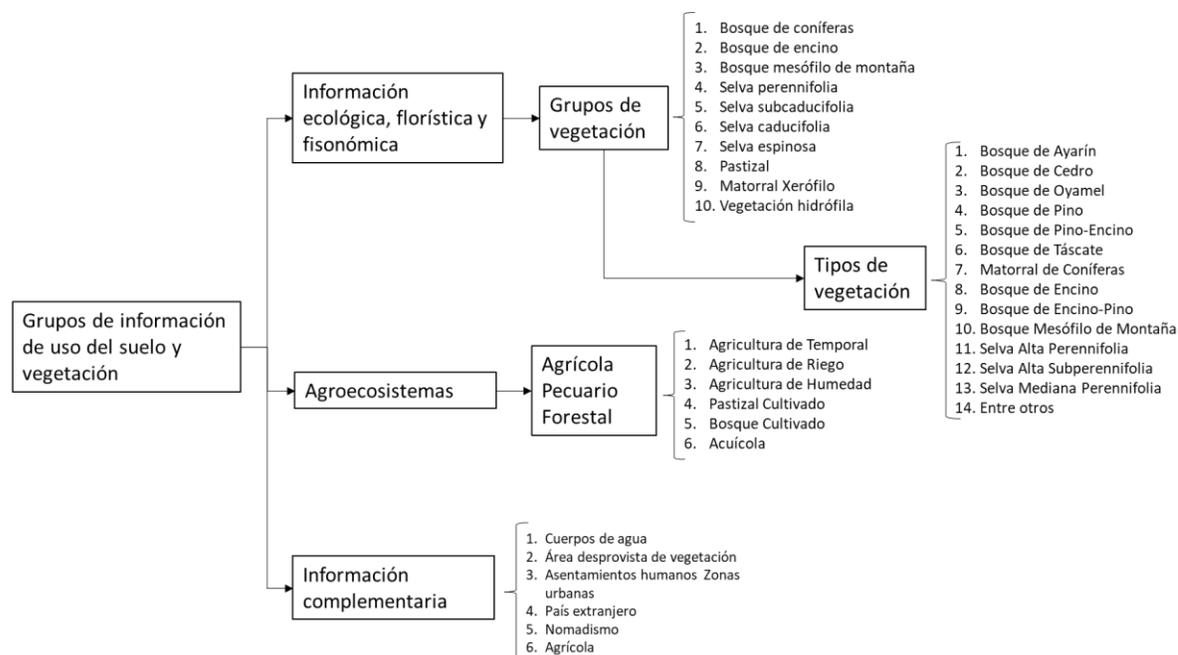


Figura 1-3. Resumen general del sistema conceptual de clasificación del uso y cobertura del suelo propuesto en las diferentes series de INEGI.

INEGI clasificó la información ecológica, florística y fisonómica, con base a los trabajos de Jerzy Rzedowski (1978, 2005, citado por INEGI), Faustino Miranda y E. Hernández (1963 citado por INEGI). La clasificación está organizada en grandes grupos de vegetación, que a su vez comprenden de manera específica diferentes tipos de vegetación con afinidad ecológica y fisonómica. En la Tabla 1-7 se presenta un resumen de esta clasificación. La información es una recopilación de las guías para la interpretación de cartografía del uso del suelo y vegetación de las series III, IV, V, VI.

Tabla 1-7. Clasificación de la información ecológica, florística y fisonómica de INEGI

Agrupaciones vegetales	Tipos de vegetación
Bosque de Coníferas: comunidades arbóreas, subarbóreas u ocasionalmente arbustivas de origen septentrional (Holártico), principalmente de las regiones templadas y semifrías con diferentes grados de humedad; por lo común con mínima variación de especies de coníferas y frecuentemente con pocos bejuco o sin ellos. Su desarrollo es consecuencia del clima y del suelo de una región, en la que sensiblemente no han influido otros factores para su establecimiento.	Bosque de ayarín Bosque de cedro Bosque de oyamel Bosque de pino Bosque de pino-encino Bosque de táscate Matorral de coníferas
Bosque de encino: comunidades vegetales constituidas por el género Quercus (encinos, robles). En México, salvo condiciones muy áridas, se encuentran prácticamente desde el nivel del mar, hasta los 2 800 msnm. Se encuentra muy relacionado con los bosques de pino, formando una serie de bosques mixtos con especies de ambos géneros.	Bosque de encino Bosque de encino-pino
Bosque mesófilo de montaña: este ecosistema vegetal se caracteriza por la presencia de vegetación arbórea densa, con epífitas y helechos que se localiza principalmente en montañas, barrancas y sitios que	Bosque mesófilo de montaña

Agrupaciones vegetales	Tipos de vegetación
presentan condiciones favorables de humedad y neblinas frecuentes. En México se localiza entre los 600 y 3 200 msnm	
Selva perennifolia: agrupa formaciones vegetales tropicales que se caracterizan porque más del 75% de sus elementos conservan las hojas durante la época más seca del año.	Selva alta perennifolia Selva alta subperennifolia Selva mediana perennifolia Selva mediana subperennifolia Selva baja perennifolia Selva baja subperennifolia
Selva subcaducifolia: formaciones vegetales, en donde el 50 y el 75% de sus componentes pierden las hojas en la época más seca del año.	Selva mediana subcaducifolia Selva baja subcaducifolia
Selva caducifolia: estas formaciones vegetales de origen tropical y árido se caracterizan porque más del 75% de las especies que las integran pierden sus hojas en la época seca del año.	Selva mediana caducifolia Selva baja caducifolia Matorral subtropical
Selva Espinosa: comunidades arbóreas o subarbóreas de origen tropical que crecen en lugares con precipitación estacional y en donde sus componentes vegetales pierden las hojas más del 75% durante la época seca del año y las especies que la forman tienen espinas en sus tallos y/o ramas. También se consideran aquellas comunidades espinosas en donde el factor suelo es más determinante que el clima.	Selva baja espinosa caducifolia Selva baja espinosa subcaducifolia Mezquital tropical
Pastizal: Comunidades herbáceas en las que predominan las especies de gramíneas o graminoides, estas comunidades están determinadas por condiciones naturales de clima y suelo.	Pastizal natural Pastizal Halófilo Pastizal Gipsófilo Pradera de Alta Montaña Sabana
Matorral Xerófilo: Comunidades arbustivas, ocasionalmente subarbóreas, que en general presentan ramificaciones desde la base del tallo y cerca de la superficie del suelo y con altura variable, pero casi siempre inferior a 4 m. Se distribuyen principalmente en las zonas áridas y semiáridas del país.	Vegetación de Desiertos Arenosos Vegetación Halófila Vegetación Gipsófila Matorral Desértico Micrófilo Matorral Desértico Rosetófilo Matorral Crasicaule Matorral Sarcocrasicaule Matorral Sarcocrasicaule de Neblina Matorral Rosetófilo Costero Matorral Espinoso Tamaulipeco Matorral Submontano Mezquital Xerófilo Chaparral
Vegetación hidrófila: Comunidades arbóreas, arbustivas o herbáceas que habitan en terrenos pantanosos o inundables de aguas salobres o dulces poco profundas, son comunidades muy diversas florísticamente hablando. Estas comunidades son parte de los llamados “Humedales”.	Selva de Galería Vegetación de Galería Manglar Popal Tular Vegetación de Petén Vegetación halófila hidrófila
Vegetación inducida: se considera en esta agrupación las comunidades vegetales que son favorecidas al interrumpirse el proceso natural de sucesión vegetal debido principalmente a las actividades humanas o bien a circunstancias especiales que favorecen su aparición.	Palmar inducido Bosque inducido Sabanoide Pastizal inducido
Otros tipos de vegetación: comunidades vegetales diferentes en su caracterización ecológica a las formaciones citadas anteriormente.	Bosque de Mezquite Vegetación de Dunas Costeras Palmar Natural

Fuente: Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie III, IV, V, VI

1.5.7. Modelos climáticos

Un modelo climático es una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de la atmósfera, la tierra y los océanos, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación. Un modelo climático se utiliza para predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales, así como para obtener información sobre tendencias climáticas pasadas, actuales y futuras durante largos períodos (IPCC, 2013). Los modelos que utiliza el IPCC son denominados modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO).

Los MCGAO se actualizan de manera constante, actualmente proporcionan la más completa representación del sistema climático. Diferentes centros de modelado en todo el mundo coordinan sus actualizaciones en torno a la fecha de elaboración de los reportes de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Estos esfuerzos coordinados de modelado se denomina Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP, acrónimo en inglés de *Coupled Models Inter-comparison Project*), este proyecto involucra a centros meteorológicos nacionales o institutos de investigación de todo el mundo. El CMIP ejecuta sus modelos climáticos con un conjunto acordado de parámetros de entrada (forzamientos), esto permite que los resultados sean comparables entre los diferentes modelos climáticos. El sexto informe de evaluación del IPCC (AR6) presentó los resultados de los modelos climáticos del CMIP6.

El tamaño de la cuadrícula es la resolución espacial del modelo, cuanto más pequeña es la cuadrícula más alta es la resolución (IPCC, 1997). Sin embargo, la resolución espacial de un MCGAO es muy gruesa, lo que lo hace incompatible con los modelos hidrológicos locales. Para obtener una escala fina de resolución se pueden aplicar diversos métodos de reducción de escala.

Experimentos de la Vía Socioeconómica Compartida (SSP)

Uno de los principales conjuntos de simulaciones ejecutadas por los modelos son los escenarios climáticos futuros, donde los modelos reciben un conjunto común de concentraciones futuras de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros forzamientos climáticos para proyectar el posible futuro. En las nuevas simulaciones de modelos

climáticos realizadas en el proyecto CMIP6 se utilizó un nuevo conjunto de escenarios denominados: Experimentos de la Vía Socioeconómica Compartida (SSP, acrónimo en inglés de *Shared Socioeconomic Pathways*).

Las narrativas del SSP comprenden una descripción textual de cómo podría desarrollarse el futuro en términos de tendencias sociales, son un complemento importante a las proyecciones del modelo cuantitativo. Las narrativas del SSP incluyen un contexto basadas en las principales tendencias socioeconómicas, demográficas, tecnológicas, de estilo de vida, políticas, institucionales y de otro tipo para que una amplia comunidad de usuarios comprenda mejor la base y el significado de las proyecciones cuantitativas de SSP (Riahi et al., 2017). En la Tabla 1-8 se presenta un resumen de las narrativas de los SSP.

Tabla 1-8. Resumen de las narrativas del SSP

Escenario	Descripción
SSP1	<p>Sostenibilidad – Tomando el camino verde Desafíos bajos para la mitigación y la adaptación El mundo cambia gradualmente, hacia un camino más sostenible, respetando los límites ambientales percibidos. La gestión de los bienes comunes mejora lentamente, las inversiones en educación y salud aceleran la transición demográfica, y el énfasis en el crecimiento económico se desplaza hacia un énfasis más amplio en el bienestar humano. Impulsada por un compromiso cada vez mayor para alcanzar los objetivos de desarrollo, la desigualdad se reduce. El consumo está orientado hacia un bajo crecimiento material y una menor intensidad de recursos y energía.</p>
SSP2	<p>Medio del camino Desafíos medios para la mitigación y la adaptación Las tendencias sociales, económicas y tecnológicas no cambian marcadamente de los patrones históricos, el desarrollo y el crecimiento de los ingresos avanzan de manera desigual. Las instituciones mundiales y nacionales trabajan para lograr los objetivos de desarrollo sostenible, pero avanzan lentamente en su logro. Los sistemas ambientales experimentan degradación, aunque hay algunas mejoras. El crecimiento de la población mundial es moderado y se estabiliza en la segunda mitad del siglo. La desigualdad de ingresos persiste o mejora lentamente y persisten los desafíos para reducir la vulnerabilidad a los cambios sociales y ambientales.</p>
SSP3	<p>Rivalidad regional: un camino rocoso Altos desafíos para la mitigación y la adaptación Un nacionalismo resurgente, preocupaciones sobre la competitividad y la seguridad, y los conflictos regionales empujan a los países a centrarse cada vez más en cuestiones nacionales o regionales. Las políticas se orientan cada vez más hacia cuestiones de seguridad nacional y regional, se centran en alcanzar los objetivos de energía y seguridad alimentaria dentro de sus propias regiones a expensas de un desarrollo de base más amplia. Disminuyen las inversiones en educación y desarrollo tecnológico. El desarrollo económico es lento, el consumo es intensivo en materiales y las desigualdades persisten o empeoran. El crecimiento de la población es bajo en los países industrializados y alto en los países en desarrollo. Una baja prioridad internacional para abordar las preocupaciones ambientales conduce a una fuerte degradación ambiental en algunas regiones.</p>
SSP4	<p>Desigualdad: un camino dividido Desafíos bajos para la mitigación, altos desafíos para la adaptación Las inversiones altamente desiguales en capital humano, combinadas con crecientes</p>

Escenario	Descripción
	<p>disparidades en las oportunidades económicas y el poder político, conducen a un aumento de las desigualdades y la estratificación tanto entre los países como dentro de ellos. Se amplía la brecha entre una sociedad conectada internacionalmente que contribuye a los sectores intensivos en conocimiento y capital de la economía global, y una colección fragmentada de sociedades de bajos ingresos y mal educadas que trabajan en una economía intensiva en mano de obra y baja tecnología. La cohesión social se degrada y los conflictos y disturbios se vuelven cada vez más comunes. El desarrollo tecnológico es alto en la economía y los sectores de alta tecnología. El sector energético conectado globalmente se diversifica, con inversiones tanto en combustibles intensivos en carbono como el carbón y el petróleo no convencional, pero también en fuentes de energía bajas en carbono. Las políticas ambientales se centran en cuestiones locales en torno a las zonas de ingresos medios y altos.</p>
SSP5	<p>Desarrollo con combustibles fósiles – Tomando la autopista Altos desafíos para la mitigación, bajos desafíos para la adaptación Este escenario se encamina a mercados competitivos, la innovación y las sociedades participativas para producir un rápido progreso tecnológico y el desarrollo del capital humano como el camino hacia el desarrollo sostenible. Hay fuertes inversiones en salud, educación e instituciones para mejorar el capital humano y social. El impulso para el desarrollo económico y social se combina con la explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles y la adopción de estilos de vida intensivos en recursos y energía en todo el mundo. Todos estos factores conducen a un rápido crecimiento de la economía mundial, la población mundial alcanza su punto máximo y disminuye en el siglo 21. Los problemas ambientales locales, como la contaminación del aire, se gestionan con éxito; hay capacidad de gestionar eficazmente los sistemas sociales y ecológicos, incluso mediante la geoingeniería.</p>

Fuente: Riahi et al. (2017)

CAPÍTULO 2

MÉTODOS

Esta sección contiene la caracterización general de las cuencas de estudio, la descripción del método propuesto y la información utilizada para el logro de los objetivos planteados.

2.1. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en tres cuencas mexicanas: río Escondido, río Amacuzac, río Sierra (Figura 2-1). La cuenca del río Escondido se encuentra localizada al norte de México en el estado de Coahuila de Zaragoza, entre los 28°12' y 28°45' norte, y los 100°31' y 101°33' oeste. La altitud varía entre ~200 y ~1 060 msnm. La cuenca del río Amacuzac se ubica en el centro-sur de México, localizada en los estados de México, Guerrero y Morelos entre los 18°30' y 19°08' norte, y los 99°20' y 100°00' oeste. La altitud varía entre ~900 y ~4600 msnm. La cuenca del río La Sierra se ubica en el sur de México, localizada en los estados de Chiapas y Tabasco, entre los 16°45' y 17°52' norte, y los 92°12' y 93°05' oeste. La altitud varía entre 0 y ~2 900 msnm.

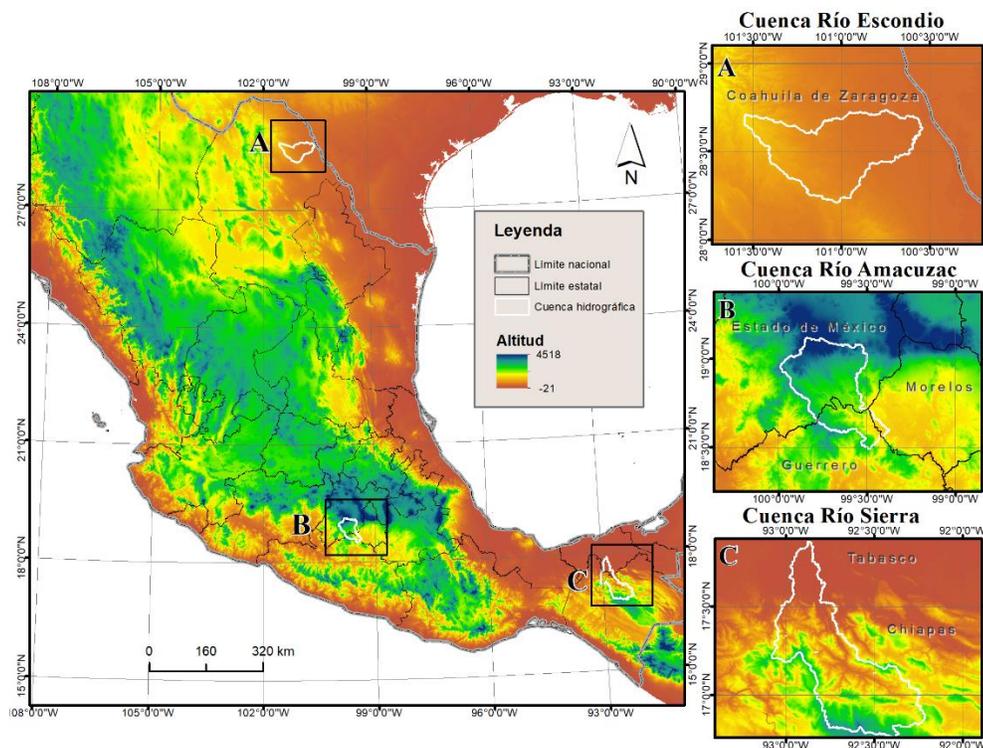


Figura 2-1. Ubicación geográfica y altitud de las cuencas hidrográficas: A) cuenca del río Escondido, B) cuenca del río Amacuzac, y C) cuenca del río Sierra

A continuación se detallan las diferentes características sociales, climáticas, fisiográficas, hidrológicas y uso/cobertura vegetal de cada cuenca. Los datos de población de cada cuenca hidrográfica se obtuvieron del censo 2010 (INEGI, 2010), información disponible hasta la fecha del análisis de datos. La información climática se obtuvo mediante la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004) (período de 1910-2010). Los parámetros fisiográficos de las cuencas se calcularon con la herramienta desarrollada por Franco-Plata (2008) disponible en el software TerrSet (Eastman, 2016). El resto de información fue recopilada de diversas fuentes de información.

2.1.1. Cuenca del río Escondido

Población: De acuerdo con el censo 2010 (INEGI, 2010), la cuenca del río Escondido presenta una población total de 27 049 habitantes. Esta población se encuentra distribuida en 194 localidades. El 97% de las localidades presentan un número menor a 600 habitantes. Las localidades con mayor población son Zaragoza con 10 461 habitantes, Morelos con 6 839 habitantes y Colonia Venustiano Carranza con 4 921 habitantes (Figura 2-2). La densidad poblacional es de 9 habitantes/km². El incremento poblacional en la cuenca es de aproximadamente el 39% con respecto al censo del año de 1990.

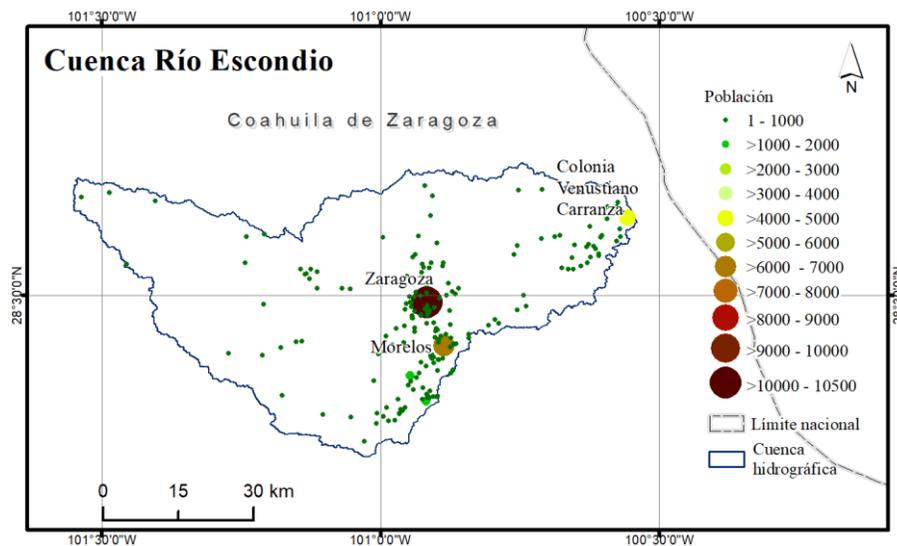


Figura 2-2. Distribución de la población en la cuenca del río Escondido

Características climáticas: La cuenca del río Escondido presenta dos tipos de clima secos de acuerdo con la condición térmica, seco árido y seco semiárido (Figura 2-3A). El clima

seco árido se localiza en la parte alta y media de la cuenca; mientras que, la parte baja de la cuenca presenta un clima seco semiárido. En el Anexo 1 (Tabla 6-1), se presenta a detalle la clasificación climática. Las magnitudes de las precipitaciones y temperaturas descritas a continuación son con base a la Estación 5025 - Piedras Negras, estación localizada en la parte baja de la cuenca. Las temperaturas medias anuales varían entre 22°C a 25°C. La variabilidad anual de las temperaturas mensuales varía entre 13°C a 32°C (Figura 2-3B), la oscilación térmica es extrema (14°C). El mes más caluroso es en agosto, mientras que, el mes más frío es en diciembre. La precipitación media anual es de 482 mm. La variabilidad anual de la precipitación mensual es entre de 10 mm a 75 mm (Figura 2-3C), los meses con mayor precipitación son abril a octubre y los meses con menor presencia de lluvias son entre noviembre a marzo.

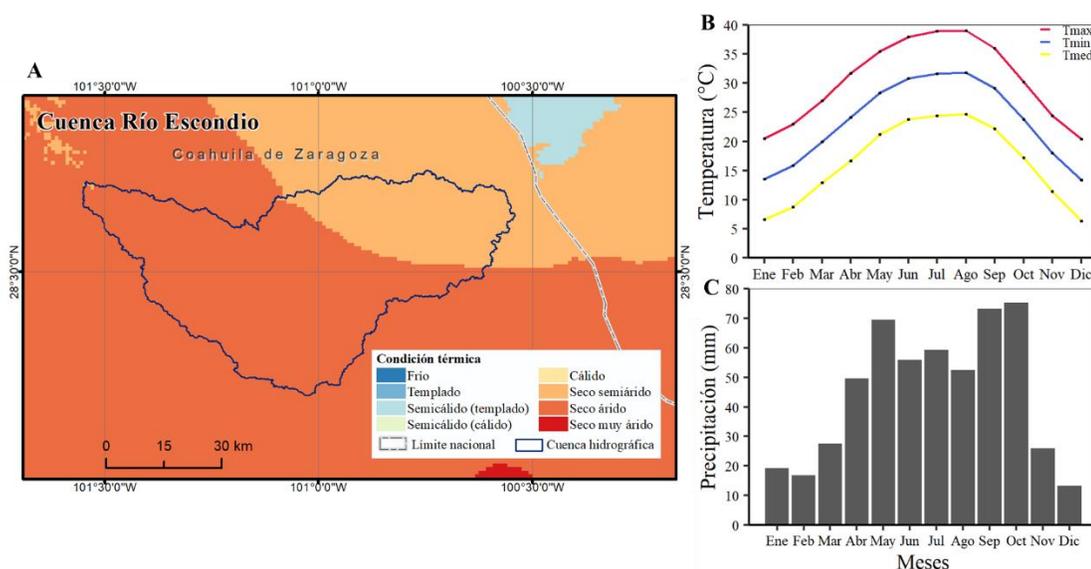


Figura 2-3. Características climáticas de la cuenca del río Escondido: A) clasificación climática de Köppen de acuerdo con la condición térmica, B) promedio mensual de las temperaturas media (Tmed), máxima (Tmax) y mínima (Tmin), periodo 1994-2008 (Estación 5025-Piedras Negras), y C) promedio mensual de la precipitación, periodo 1994-2008 (Estación 5025-Piedras Negras)

Características fisiográficas: La Tabla 2-5 presenta los parámetros fisiográficos de la cuenca. Se destacan algunas características, es una cuenca con una altitud y pendiente relativamente baja, sus valores medios son 460 msnm y 3.1%, respectivamente. Heras 1972 citado por Díaz-Delgado et al. (2005) propone una clasificación del relieve con base a la pendiente, dentro de esta clasificación el terreno es suave. De acuerdo con la clasificación de Stahler, la relación y curva hipsométrica indican que la cuenca se aproxima a una cuenca

en equilibrio, geológicamente madura (Llamas, 1993) (Figura 2-4). El coeficiente de compacidad y relación de circularidad indican la forma de la cuenca, en este caso, la cuenca es alargada. El coeficiente de sinuosidad hidráulico indica que es un cauce con meandros, es decir, el cauce fluye formando ondulaciones (Campos Aranda, 1998). La pendiente media del cauce es de ~1.3 %, este parámetro se relaciona con las características hidráulicas del escurrimiento, como la velocidad de propagación de las ondas de avenidas. La pendiente es clasificada como llana de acuerdo con Heras 1976 citado por Campos Aranda, (1998). Con respecto al tiempo de concentración, la cuenca del río Escondido presenta un tiempo de respuesta de ~27 horas, tiempo requerido para que la gota más alejada de la cuenca llegue al exutorio.

Tabla 2-1. Características fisiográficas de la cuenca del río Escondido

Parámetro	Valor	Unidad
Área	~3 048	km ²
Perímetro	436	km
Elevación media de la cuenca	460	msnm
Pendiente media	1.80	grados
	3.14	%
Coefficiente de compacidad	2.23	-
Relación de circularidad	0.2	-
Relación hipsométrica	2.08	-
Longitud del eje del río principal	164.05	km
Longitud directa del río principal	94.67	km
Coefficiente de sinuosidad hidráulico	1.73	-
Elevación máxima del río principal	958	msnm
Elevación mínima del río principal	223	msnm
Pendiente promedio del río principal	1.25	%
Tiempo de concentración de Kirpich	26.9	horas

Fuente: Estimados con el módulo desarrollado por Franco-Plata (2008) disponible en el software TerrSet (Eastman, 2016).

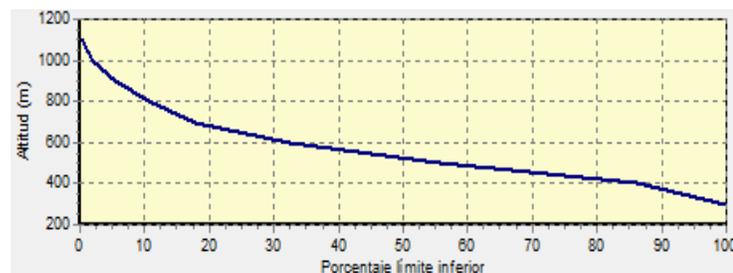


Figura 2-4. Curva hipsométrica de la cuenca del río Escondido

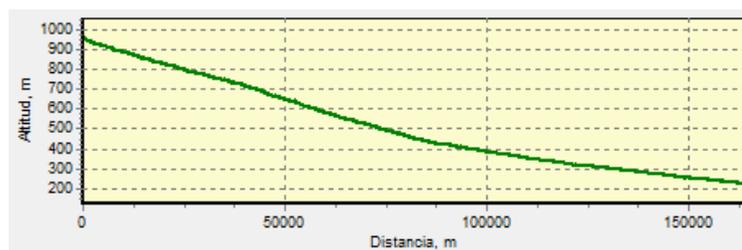


Figura 2-5. Perfil del cauce principal de la cuenca del río Escondido

Características hidrológicas: La cuenca del río Escondido forma parte de la Región Hidrológica Bravo-Conchos (RH 24), se localiza en la parte centro-este de la cuenca del río Bravo-Piedras Negras. El río se origina en una cadena montañosa llamada El Burro, al noroeste de la ciudad de Piedras Negras (Eleuch et al., 2010). La red hídrica está conformada por dos grandes ríos, San Antonio (principal) y Escondido, que se conectan en la parte baja de la cuenca y pasan a formar el río Escondido, para finalmente desembocar en el río Bravo.

Uso y cobertura del suelo: De acuerdo con la información de uso de suelo y vegetación - serie VI presentada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017), las coberturas predominantes en la cuenca son matorral espinoso tamaulipeco (55%), matorral submontano (13%) y agricultura de riego (11%) (Tabla 2-2). La cobertura matorral espinoso tamaulipeco, son plantas arbustivas o subarbóreas, en su mayoría especies espinosas y caducifolias gran parte del año o áfilas (sin hojas). Esta cobertura es característica de climas cálidos a muy cálidos con lluvias en verano y lluvias escasas a lo largo del año. En general esta cobertura se desarrolla en suelos del tipo aluvial, sin embargo, en el estado de Coahuila se desarrollan en roca sedimentaria de tipo caliza y en asociaciones de caliza – lutita.

Tabla 2-2. Tipos de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Escondido

Cobertura	Área	
	km ²	%
Matorral espinoso tamaulipeco	1 735	55.37
Matorral submontano	399	12.74
Agricultura de riego	339	10.81
Pastizal cultivado	205	6.54

Cobertura	Área	
	km ²	%
Matorral desértico rosetófilo	114	3.62
Bosque de encino	97	3.10
Pastizal natural	64	2.03
Sin vegetación aparente	43	1.36
Pastizal inducido	38	1.21
Urbano	36	1.14
Agricultura de temporal	23	0.73
Bosque de táscate	22	0.69
Matorral desértico micrófilo	16	0.51
Chaparral	3	0.10
Bosque de galería	1	0.02
Cuerpo de agua	1	0.02

2.1.2. Cuenca del río Amacuzac

Población: De acuerdo con el censo 2010 (INEGI), la cuenca alta del río Amacuzac presenta una población de 254 783 habitantes. Esta población está distribuida en 479 localidades, el 74% de las localidades pertenecen al Estado de México. Las localidades con mayor población son Ixtapan de la Sal con 17 640 habitantes, Tenancingo de Degollado con 14 174 habitantes y Villa Guerrero con 9 509 habitantes (Figura 2-6). En general, el 80% de las localidades presentan un número menor a 1 000 habitantes. La densidad poblacional de la cuenca es de 161 habitantes/km². El incremento poblacional en la cuenca es de aproximadamente el 42% con respecto al censo del año de 1990.

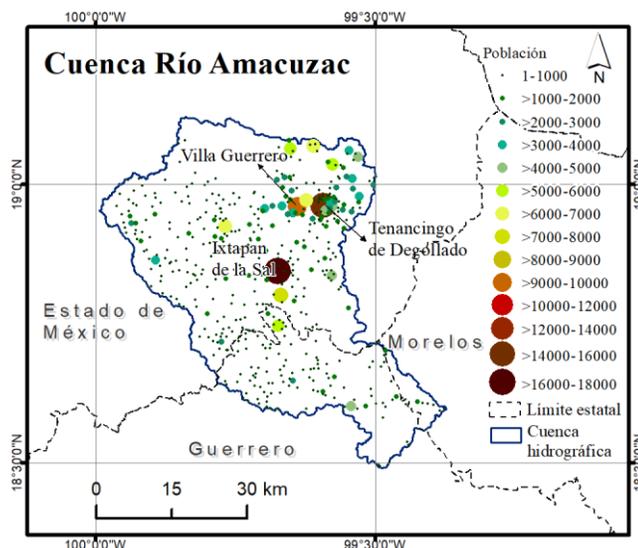


Figura 2-6. Distribución de la población en la cuenca del río alto Amacuzac

Características climáticas: considerando la condición térmica, presenta cuatro tipos de clima: cálido, semicálido, templado y frío (Figura 2-7A). El clima predominante en la cuenca es el templado (~60%), localizado en la parte alta de la cuenca. En el Anexo 1 (Tabla 6-2), se presenta a detalle la clasificación climática. Las magnitudes de las precipitaciones y temperaturas descritas a continuación son promedios espaciales y temporales de los datos Daymet (Thornton et al., 2020). La temperatura media de la cuenca es de 17°C. La variabilidad anual de las temperaturas mensuales varía entre 14.5°C a 19.5°C (Figura 2-7B), su oscilación térmica es baja (5°C). Los meses más fríos son diciembre-enero y los meses más calurosos, abril-mayo. La precipitación media anual es de 1162 mm. La variabilidad anual de la precipitación mensual es entre de 4 mm a 240 mm (Figura 2-7C), el periodo lluvioso es entre mayo a octubre; mientras que, el periodo seco entre noviembre a marzo.

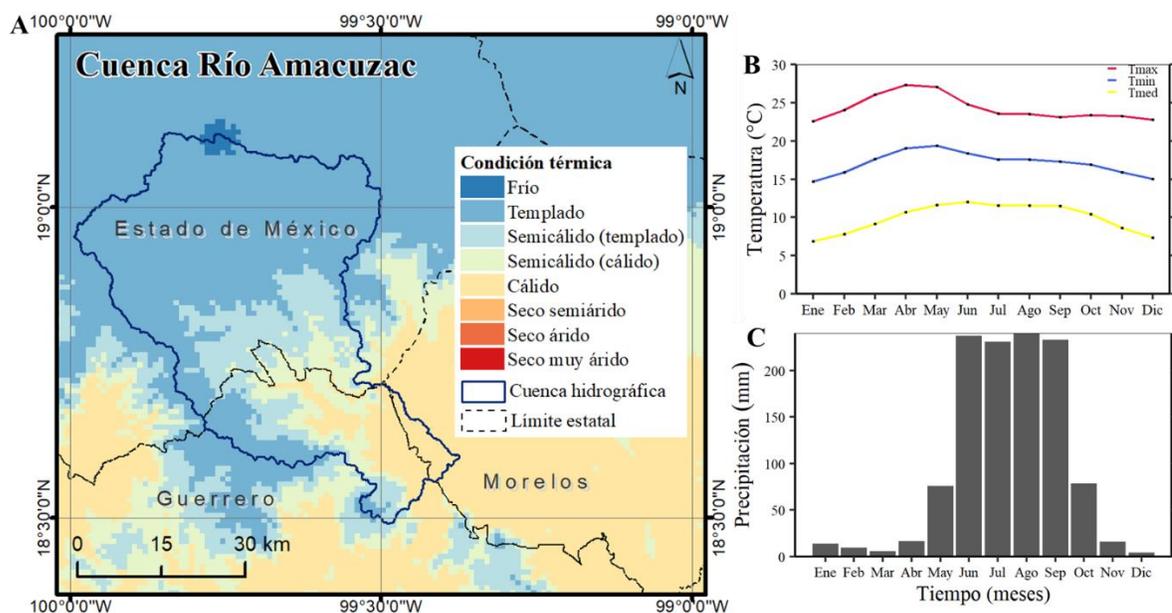


Figura 2-7. Características climáticas de la cuenca del río Amacuzac: A) clasificación climática de Köppen de acuerdo con la condición térmica, B) promedio mensual de las temperaturas media (Tmed), máxima (Tmax) y mínima (Tmin), periodo 1980-2012 (Daymet), y C) promedio mensual de la precipitación, periodo 1980-2012 (Daymet).

Características fisiográficas: La Tabla 2-3 presenta los parámetros fisiográficos de la cuenca. En general, la cuenca tiene una elevación media de 2 121 msnm y presenta una pendiente media de 22%. Heras 1972 citado por Díaz-Delgado et al. (2005) propone una clasificación del relieve con base a la pendiente, dentro de esta clasificación el terreno es

fuertemente accidentado. El coeficiente de compacidad y relación de circularidad indica la forma de la cuenca, en este caso, la cuenca es alargada. La forma de la cuenca afecta directamente el tiempo de respuesta de esta y por consiguiente, el tipo del hidrograma (Llamas, 1993). De acuerdo con la clasificación de Stahler, la relación y curva hipsométrica indican que la cuenca se aproxima a una cuenca en equilibrio, geológicamente madura (Llamas, 1993).

La curva hipsométrica representa gráficamente las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes (Figura 2-8). El coeficiente de sinuosidad hidráulico indica que es un cauce con meandros, es decir, el cauce fluye formando ondulaciones (Campos Aranda, 1998). La pendiente media del cauce principal es de 6%, este parámetro se relaciona con las características hidráulicas del escurrimiento, como la velocidad de propagación de las ondas de avenidas. La pendiente es clasificada como accidentado medio de acuerdo con Heras 1976 citado por Campos Aranda, (1998). La cuenca presenta un tiempo de concentración ~11 horas, tiempo requerido para que la gota más alejada de la cuenca llegue al exutorio. El tiempo de concentración está relacionado directamente con la pendiente de la cuenca y longitud del cauce.

Tabla 2-3. Características fisiográficas de la cuenca del río Amacuzac

Parámetro	Valor	Unidad
Área	~2 239	km ²
Perímetro	361	km
Elevación media de la cuenca	2 121	msnm
Pendiente media	12.3	grados
	22.4	%
Coeficiente de compacidad	2.15	-
Relación de circularidad	0.22	-
Relación hipsométrica	2.03	-
Longitud del eje del río principal	103	km
Longitud directa del río principal	70	km
Coeficiente de sinuosidad hidráulico	1.5	-
Elevación máxima del río principal	2 836	msnm
Elevación mínima del río principal	904	msnm
Pendiente promedio del río principal	5.97	%
Tiempo de concentración de Kirpich	10.84	horas

Fuente: Estimados con el módulo desarrollado por Franco-Plata (2008) disponible en el software TerrSet (Eastman, 2016).

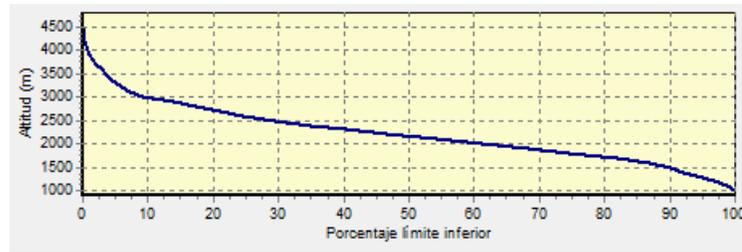


Figura 2-8. Curva hipsométrica de la cuenca del río Amacuzac

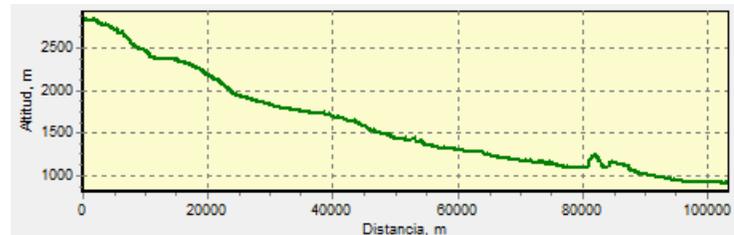


Figura 2-9. Perfil del cauce principal de la cuenca del río Amacuzac

Características hidrológicas: La cuenca del río Amacuzac forma parte de la Región Hidrológica Balsas (RH 18), se localiza en la parte noreste de la cuenca río Grande de Amacuzac. El río Amacuzac es afluente derecho del río Balsas, nace en las faldas del volcán Nevado de Toluca, entre sus principales afluentes están: el río San José, río San Jerónimo, río Tenancingo y río Chontalcoatlán. El río de Amacuzac desemboca en el río Cuautla, en este tramo también se recibe las aportaciones de los ríos Chalma-Tembembe, Apatlaco y Yautepec, posteriormente desembocan en el río Balsas.

Uso y cobertura del suelo: De acuerdo con la información de uso de suelo y vegetación - serie VI presentada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017), aproximadamente el 55% del uso del suelo en la cuenca está ocupado por agricultura de temporal (26%), agricultura de riego (14%), y selva baja caducifolia matorral (12%). El resto del área (40%) está cubierta por coberturas arbóreas, por ejemplo: encino, pino, pino-encino, táscate, entre otros (Tabla 2-4). La cobertura predominante, agricultura, es la principal actividad económica de las localidades ubicadas en la cuenca. En general, los cultivos que se destacan son maíz, aguacate, hortalizas y flores.

Tabla 2-4. Tipos de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Amacuzac

Cobertura	Área	
	km ²	%
Agricultura de temporal	589	26.25
Agricultura de riego	329	14.67
Selva baja caducifolia	280	12.48
Bosque de encino	215	9.60
Bosque de pino	196	8.74
Bosque de pino-encino	179	7.97
Pastizal inducido	125	5.59
Bosque de táscate	117	5.20
Bosque de encino-pino	73	3.26
Bosque mesófilo de montaña	57	2.54
Bosque de oyamel	54	2.40
Urbano	20	0.87
Pradera de alta montaña	6	0.26
Sin vegetación aparente	3	0.15
Cuerpo de agua	0	0.01

2.1.3. Cuenca del río La Sierra

Población: De acuerdo con el censo 2010 (INEGI), la cuenca del río Sierra presenta una población de 346 748 habitantes. Esta población se encuentra distribuida en 1 663 localidades, la mayoría de las localidades pertenecen al estado de Chiapas (89%). Las localidades con mayor población son Teapa con 26 548 habitantes, Simojovel de Allende con 10 762 habitantes y Tacotalpa con 8 071 habitantes (Figura 2-10). En general, el 93% de las localidades presentan un número menor a 1 000 habitantes. La densidad poblacional es de 115 habitantes/km². El incremento poblacional en la cuenca es de aproximadamente el 54% con respecto al censo del año de 1990.

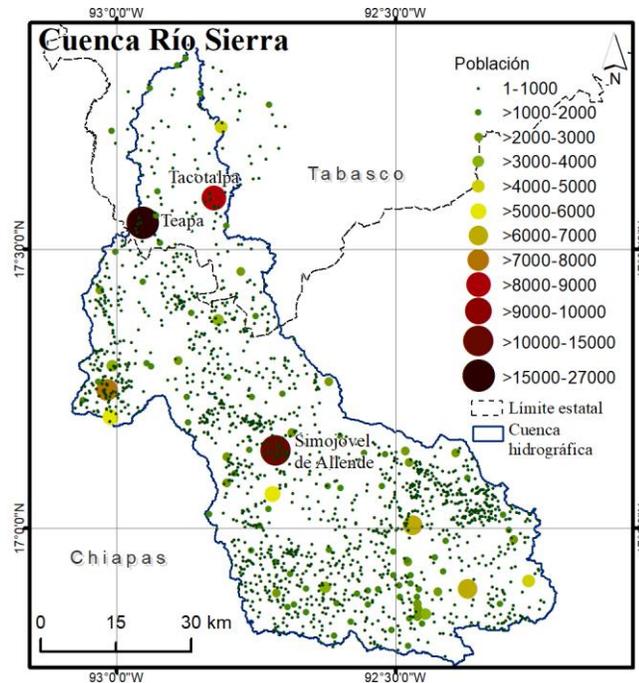


Figura 2-10. Distribución de la población en la cuenca del río Sierra

Características climáticas: De acuerdo con la condición térmica, la cuenca del río Sierra presenta tres tipos de clima: cálido, semicálido y templado (Figura 2-11A). La zona alta de la cuenca posee un clima templado, la zona media y baja de la cuenca poseen en su mayoría un clima cálido. La diferencia entre el clima cálido de la zona media y baja de la cuenca radica que la primera presenta una oscilación anual baja; mientras que, la parte baja su oscilación anual es extrema. Las magnitudes de las precipitaciones y temperaturas descritas a continuación son promedios espaciales y temporales de los datos Daymet. La temperatura media de la cuenca es de 20.9°C. La variabilidad anual de las temperaturas mensuales varía entre 18°C a 23°C (Figura 2-11B), su oscilación térmica anual es de 5°C. Los meses más fríos son diciembre-enero y los meses más calurosos, mayo a junio. La precipitación media anual es de 2463 mm. En la cuenca, todo el año presenta lluvias, sin embargo, en los meses de junio a octubre se presentan mayores lluvias, y en los meses con menor presencia de lluvias es entre noviembre a mayo. La variabilidad anual de la precipitación mensual es entre de 68 mm a 419 mm (Figura 2-11C). En el Anexo 1 (Tabla 6-3), se presenta la clasificación climática de acuerdo con su régimen de lluvias.

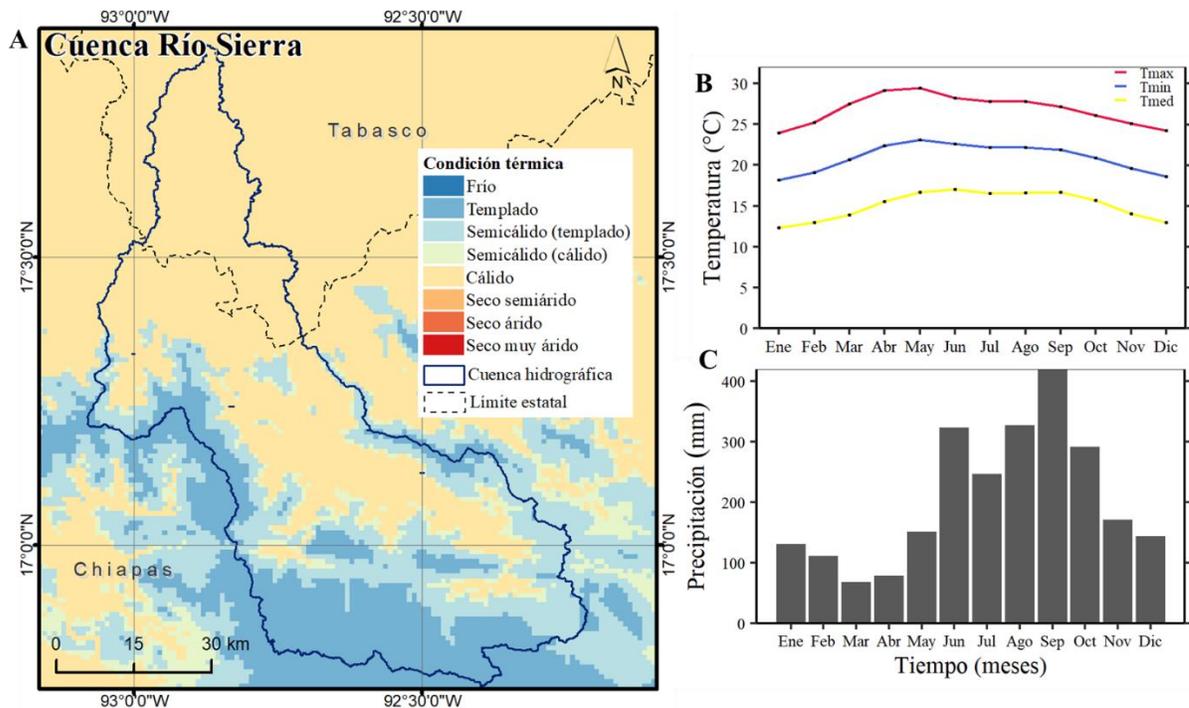


Figura 2-11. Características climáticas de la cuenca del río La Sierra: A) clasificación climática de Köppen de acuerdo con la condición térmica, B) promedio mensual de las temperaturas media (Tmed), máxima (Tmax) y mínima (Tmin), periodo 1980-2012 (Daymet), y C) promedio mensual de la precipitación, periodo 1980-2012 (Daymet).

Características fisiográficas: La Tabla 2-5 presenta los parámetros fisiográficos de la cuenca. A continuación se destacan algunas características. La cuenca tiene una elevación media de 937 msnm y presenta una pendiente media de 25%. Heras 1972 citado por Díaz-Delgado et al. (2005) propone una clasificación del relieve con base a la pendiente, dentro de esta clasificación el terreno es fuertemente accidentado. De acuerdo con la clasificación de Stahler, la relación y curva hipsométrica indican que la cuenca se aproxima a una cuenca en equilibrio, geológicamente madura (Llamas, 1993) (Figura 2-12). El coeficiente de sinuosidad hidráulico indica que es un cauce con meandros, es decir, el cauce fluye formando ondulaciones (Campos Aranda, 1998). La pendiente media del cauce principal es de 1.4 %, este parámetro se relaciona con las características hidráulicas del escurrimiento, como la velocidad de propagación de las ondas de avenidas. La pendiente se clasifica como llana de acuerdo con Heras 1996 citado por Campos Aranda (1998). La cuenca presenta un tiempo de concentración ~27 horas, tiempo requerido para que la gota más alejada de la cuenca llegue al exutorio. El tiempo de concentración está relacionado directamente con la pendiente de la cuenca.

Tabla 2-5. Características fisiográficas de la cuenca del río Sierra

Parámetro	Valor	Unidad
Área	~4340	km ²
Perímetro	663	km
Elevación media de la cuenca	937	msnm
Pendiente media	13.4	grados
	24.8	%
Coefficiente de compacidad	2.74	-
Relación de circularidad	0.13	-
Relación hipsométrica	1.63	-
Longitud del eje del río principal	238	km
Longitud directa del río principal	123	km
Coefficiente de sinuosidad hidráulico	1.93	-
Elevación máxima del río principal	2155	msnm
Elevación mínima del río principal	0	msnm
Pendiente promedio del río principal	1.4	%
Tiempo de concentración de Kirpich	27.3	horas

Fuente: Estimados con el módulo desarrollado por Franco-Plata (2008) disponible en el software TerrSet (Eastman, 2016).

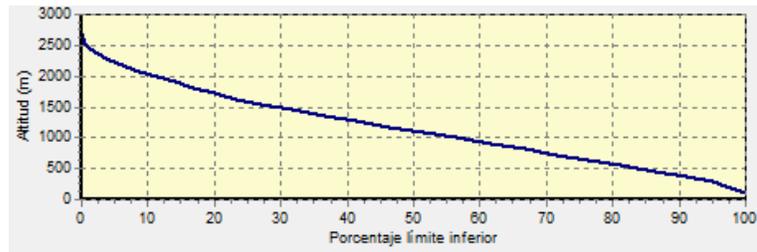


Figura 2-12. Curva hipsométrica de la cuenca río Sierra

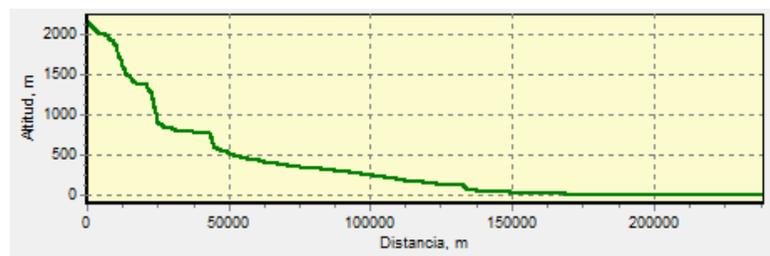


Figura 2-13. Perfil del río principal de la cuenca del río Sierra

Características hidrológicas: La cuenca del río Sierra forma parte de la Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH 30), se localiza en la parte sur (alta) de la cuenca del río Grijalva-Villa Hermosa. Entre los principales ríos que conforma la red hídrica, están: río Grande, río Cucul, río Colorado, río San Pedro, río Catarina, río Almandro, río Tacotalpa,

río La Sierra, río Puyacatengo y río Teapa. Posterior a la confluencia de los ríos, el río Sierra desemboca en el Río Grijalva.

Uso y cobertura del suelo: en la cuenca del río Sierra el suelo está ocupado principalmente por pastizal cultivado (32%), agricultura de temporal (30%), y bosque mesófilo de montaña (18%) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017). El resto del área (20%) está ocupado por coberturas como selva alta perennifolia, bosque mixto (encino-pino), bosque de pino, tular, entre otros (Tabla 2-6).

Tabla 2-6. Tipos de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Sierra

Cobertura	Área	
	km ²	%
Pastizal cultivado	1514	32.30
Agricultura de temporal	1429	30.48
Bosque mesófilo de montaña	827	17.64
Selva alta perennifolia	487	10.40
Bosque de pino-encino	159	3.40
Bosque de pino	114	2.43
Tular	52	1.11
Bosque de encino-pino	37	0.80
Urbano	34	0.72
Pastizal inducido	16	0.34
Selva baja perennifolia	14	0.31
Agricultura de riego	1	0.02
Cuerpo de agua	1	0.02
Sin vegetación aparente	1	0.02

2.1.4. Proceso de investigación

En la Figura 2-14 se presenta el proceso general que se siguió en esta investigación para cada cuenca de estudio. Los principales puntos fueron (1) control de calidad de datos y análisis de tendencias de las series hidrométricas, (2) control de calidad de datos y análisis de tendencias de las series climáticas, (3) análisis de cambio del uso y cobertura del suelo, (4) recopilación de información de suelos, (5) análisis de datos futuros, (6) modelación hidrológica y (7) evaluación de impactos. En la cuenca del río Escondido únicamente se realizó el proceso 1 y 2, la información climática analizada no pasó el control de calidad de datos.

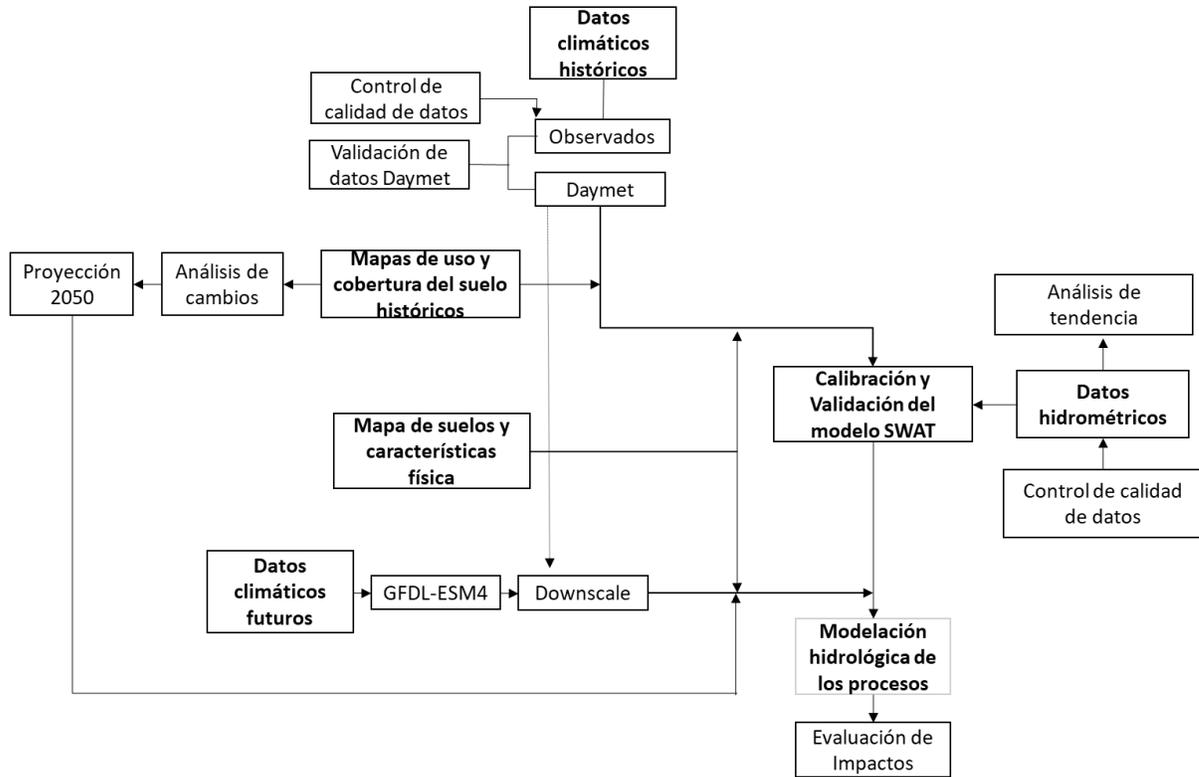


Figura 2-14. Diagrama de flujo del método de investigación

2.2. Series hidrométricas

2.2.1. Estructura y disponibilidad de datos hidrométricos

Los datos hidrométricos se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (<https://app.conagua.gob.mx/bandas/>). La estación Villa de Fuente (24290), la estación Amacuzac (18232) y estación Pueblo Nuevo (30016) fueron seleccionadas para las cuencas de los ríos Escondido, Amacuzac y La Sierra, respectivamente (Tabla 2-7 y Figura 2-15).

Para la estructura de los datos se usó una rutina desarrollada en el lenguaje de programación R (RStudio Team, 2019) (Anexo 2). Esta rutina permite extraer los datos diarios de los archivos en formato .mdb; mientras que, los datos faltantes y datos codificados como -999 son reemplazados por NA. Para detectar la disponibilidad de información por año, se siguió el siguiente proceso: (1) si hay dato en el día x se ubica un valor de 1, si no hay dato en el día x (NA) se ubica un valor de 0, (2) se sumó los valores por año y (3) se graficó.

Tabla 2-7. Información hidrométrica

Estación	Nombre	Cuenca	Longitud	Latitud
24290	Estación Villa de Fuente	Escondido	-100.558	28.667
18232	Estación Amacuzac	Amacuzac	-99.374	18.597
30016	Estación Pueblo Nuevo	La Sierra	-92.868	17.834

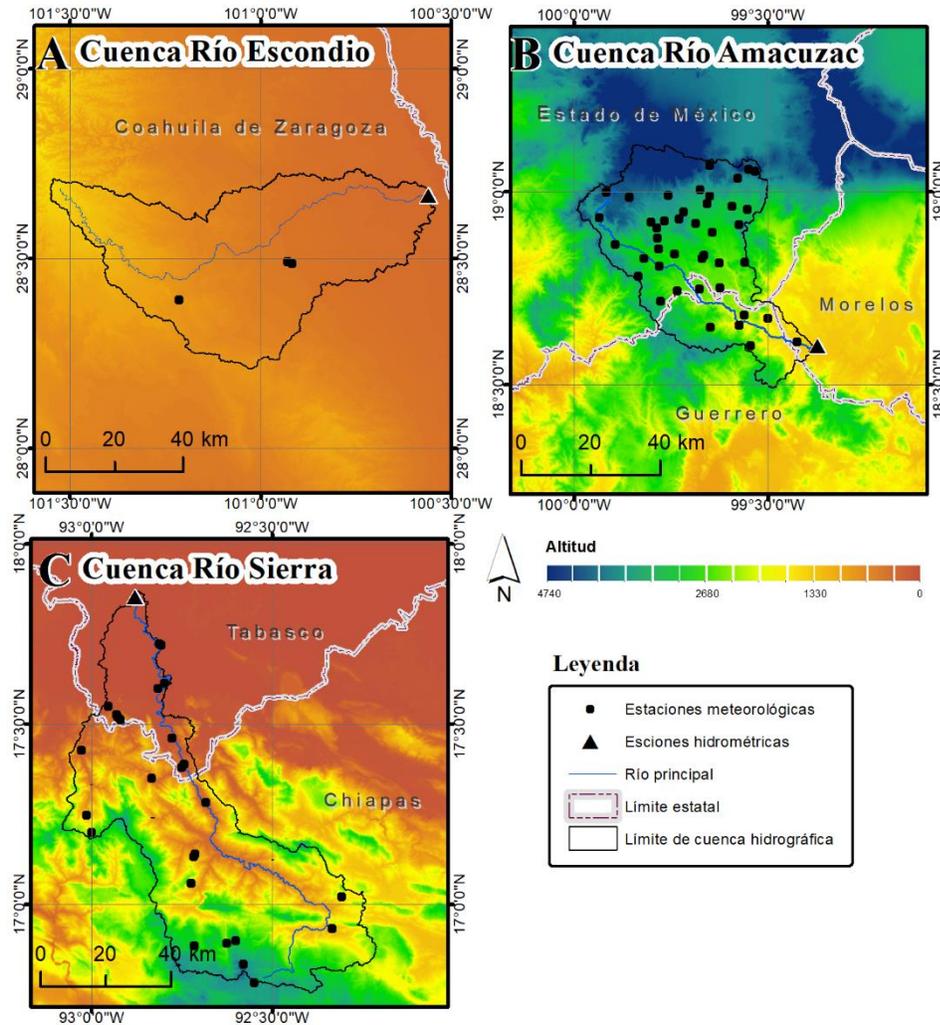


Figura 2-15. Ubicación de estaciones hidro-climáticas

2.2.2. Diagnóstico de la calidad de datos hidrométricos

El diagnóstico de calidad de datos hidrométricos constó de tres partes, 1) detección de valores faltantes, 2) identificación de valores atípicos y 3) resumen estadístico de la distribución de datos. Para esto se desarrolló una rutina en RStudio Team (2019) (Anexo 3) principalmente utilizando funciones de la librería ‘*dlookr*’ (Ryu, 2020). Esta librería tiene como objeto el diagnóstico, la exploración y la transformación de datos.

Los datos atípicos fueron identificados como los valores superiores al percentil $75 + 1.5$ veces el rango intercuartílico (RIC). Para la representación gráfica se usó el diagrama de caja, los datos atípicos se graficaron con un símbolo circular negro. Para la decisión de aceptar, rechazar o corregir los datos atípicos se basó en la revisión de información histórica como boletines hidrológicos, estudios climáticos realizados en la zona y verificación con estaciones vecinas.

2.2.3. Exploración de las series hidrométricas

El análisis exploratorio de las series hidrométricas consistió en la identificación de patrones estacionales y tendencias en las series hidrométricas mensuales. Para la identificación de patrones estacionales se realizaron gráficas de las subseries mensuales durante el periodo de disponibilidad de datos. Y para detectar posibles tendencias se utilizaron los métodos no paramétricos Mann-Kendall y la pendiente de Theil Sen. El primero detecta si hay tendencias positivas o negativas en las series, y el segundo determina la magnitud de la tendencia. Previo al uso de estos métodos se verificó que no existiera autocorrelación significativa en las series mensuales. El análisis de tendencias se realizó por subseries mensuales, estacionales y anuales con el fin de detectar tendencias correctas, evitando la estacionalidad de datos.

En los dos métodos, la aceptación de la hipótesis nula (H_0) es igual a la no existencia de una tendencia; mientras que, el rechazo H_0 es la aceptación de la alternativa (H_a), lo que significa la presencia de una tendencia.

2.2.4. Identificación de puntos de cambio en las series hidrométricas

Las pruebas de homogeneidad de datos usadas fueron, el test de Pettitt (Pettitt, 1979), Homogeneidad Normal Estándar (Alexandersson, 1986) y Buishand (Buishand, 1982). Son pruebas no paramétricas usadas comúnmente para la identificación de cambios en las series hidrológicas y climáticas (ver sección 1.5.2). Se creó una rutina en RStudio Team (2019) (Anexo 4), utilizando el paquete '*trend*' (Pohlert, 2020). Las salidas de esta rutina son: número de datos totales, punto de cambio, fecha de cambio, promedio del periodo antes del punto de cambio, promedio del periodo después del punto de cambio y p-valor. En todas las pruebas, cuando el p-valor es menor que el nivel de significación 0.05, la hipótesis nula

(H0: no hay punto de cambio) es rechazada, y se acepta la hipótesis alternativa (Ha: existe un punto de cambio en la serie de tiempo).

2.3. Series climáticas

2.3.1. Series climáticas observadas

Los datos climáticos, precipitación, temperatura máxima y mínima se obtuvieron de la base de datos CLICOM (<http://clicom-mex.cicese.mx/>). Para la estructura, análisis de la disponibilidad y diagnóstico de calidad de datos se utilizó la metodología empleada para los datos hidrométricos (ver secciones 2.2.1 y 2.2.2).

En el diagnóstico de la calidad de datos climáticos al ser un número considerable de estaciones por cuenca hidrográfica, se estableció algunos criterios. Se sospecha de la calidad de datos cuando:

- el conteo de ceros o negativos es un valor alto con respecto al número total de datos;
- el porcentaje de valores atípicos es un valor alto con respecto al número total de datos;
- la diferencia del promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos (Δ) es un valor grande

No se consideraron datos sospechosos en el caso de que el porcentaje de valores atípicos sea alto, pero la diferencia del promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos sea mínima (Δ). Esto se considera como parte de la variabilidad de los datos climáticos. Los valores negativos detectados en la variable temperatura máxima fueron comparados con los datos de temperatura mínima, si la diferencia de estos dos es negativa o igual a cero fueron eliminados, considerando que la oscilación térmica durante el día no puede ser de cero o que la temperatura mínima sea mayor a la temperatura máxima.

Al igual que en el control de calidad de datos de las series hidrométricas, para la decisión de aceptar, rechazar o corregir los datos sospechosos se basó en la revisión de información histórica como reportes meteorológicos, registro de ciclones tropicales, estudios climáticos realizados en la zona y verificación con estaciones vecinas.

Para documentar estos resultados se seleccionaron los diez valores más altos del conteo de ceros, de los porcentajes de valores atípicos y de las variaciones (Δ) del promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos.

2.3.2. Series climáticas Daymet

Los datos Daymet son superficies continuas con una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal diaria. Las características del producto Daymet se presentan en la Tabla 2-8. El algoritmo principal para estimar las variables temperatura máxima y mínima, y precipitación en cada cuadrícula de Daymet se basa en una combinación de interpolación y extrapolación, utilizando entradas de múltiples estaciones meteorológicas y pesos que reflejan las relaciones espaciales y temporales entre una celda de cuadrícula (medida desde su centro) y las estaciones meteorológicas circundantes. El número aproximado de estaciones meteorológicas utilizadas en cada celda de cuadrícula se define como un parámetro para cada variable (Thornton et al., 2021).

Tabla 2-8. Detalles de la base de datos Daymet

	Resolución espacial/ temporal	Cobertura espacial/ temporal	Tipo de producto	Variables disponibles	Proyección	Formato descargable
Daymet - versión 4 (Thornton et al., 2020)	1 km Diaria	América del Norte 1980-actual	Interpolado Regresión ponderada geográficamente (Thornton et al. 1997)	Temperatura mínima Temperatura máxima Precipitación Radiación de onda corta Presión de vapor de agua Equivalente de agua de nieve Duración del día	Cónica conforme de Lambert para América del Norte	netCDF Geotif

Validación y exploración de los datos climáticos Daymet

Para validar la calidad de los datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima de Daymet se utilizaron los datos observados de estaciones meteorológicas. Para esto, primero, se eliminaron las estaciones que no cuentan con información durante el periodo 1980-2010, así como estaciones con más del 40 % de datos faltantes. En estaciones con un registro histórico menor a 5 años, el límite de datos faltantes propuesto fue 10%. En las variables de temperatura, se eliminaron los datos cuya diferencia entre la temperatura máxima y mínima es negativa o igual a cero. Segundo, se descargaron los datos diarios Daymet por pixel de acuerdo con la ubicación geográfica de las estaciones, utilizando el

paquete “*Daymetr*” en RStudio (RStudio Team, 2019). Tercero, se midió la bondad de ajuste entre los datos observados y Daymet, se usaron tres criterios: el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) y el sesgo porcentual (PBIAS).

La longitud temporal de los datos observados en un año se ajustó a 365 días, debido que, Daymet se basa en un año calendario estándar, es decir, todos los años tienen de 1 a 365 días. En los años bisiestos, Daymet incluye el día bisiesto 29 de febrero, y elimina el día 31 de diciembre (Thornton et al., 2020). Con respecto al periodo de validación, esto dependió de la disponibilidad de datos de cada estación.

El análisis exploratorio consistió en la identificación de patrones estacionales y tendencias en las series climáticas mensuales. Para detectar posibles tendencias se utilizaron los métodos no paramétricos Mann-Kendall y la pendiente de Theil Sen.

2.3.3. Proyecciones futuras

Las proyecciones del modelo GFDL-ESM4 (Tabla 2-9) se utilizó para evaluar los posibles impactos del cambio climático sobre los procesos hidrológicos. Este modelo fue seleccionado por contar con todas las variables a una escala temporal diaria requeridas en la modelación hidrológica. Además, que este modelo proporcionó proyecciones climáticas globales en el marco del CMIP6. Los datos del CMIP6 sustentan el 6° Informe de Evaluación del IPCC. El modelo GFDL ya se ha utilizado en México en sus versiones anteriores, por ejemplo el reporte de INECC de López Díaz et al. (2022) indica que se procesó anomalías mensuales para México del modelo GFDL-CM3 utilizado en el reporte del CMIP5.

El escenario SSP5-8.5 fue seleccionado para la evaluación, este representa el uso extremo de combustibles fósiles. Se utilizó el método delta para reducir la escala (Navarro-Racines et al., 2020). Se seleccionó un periodo histórico de 1980-2012 y un periodo futuro de 2040-2072 a nivel diario. Para aplicar el método delta, se siguió el siguiente proceso (Figura 2-16): se calculó un promedio interanual de los datos históricos GFDL-ESM4 [2040-2072], posterior se calculó las anomalías como la diferencia absoluta entre los datos históricos GFDL-ESM4 y futuros GFDL-ESM4. Las anomalías se interpolaron a 1km^2 con el método

bilineal utilizando los centroides de la cuadrícula como puntos de interpolación, y finalmente, las anomalías interpoladas se suman a los datos históricos de resolución fina Daymet.

Tabla 2-9. Información del modelo GFDL-ESM4

Modelo	Instituto	Resolución	Referencia
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	1.25 × 1.00	Krasting et al. (2018)

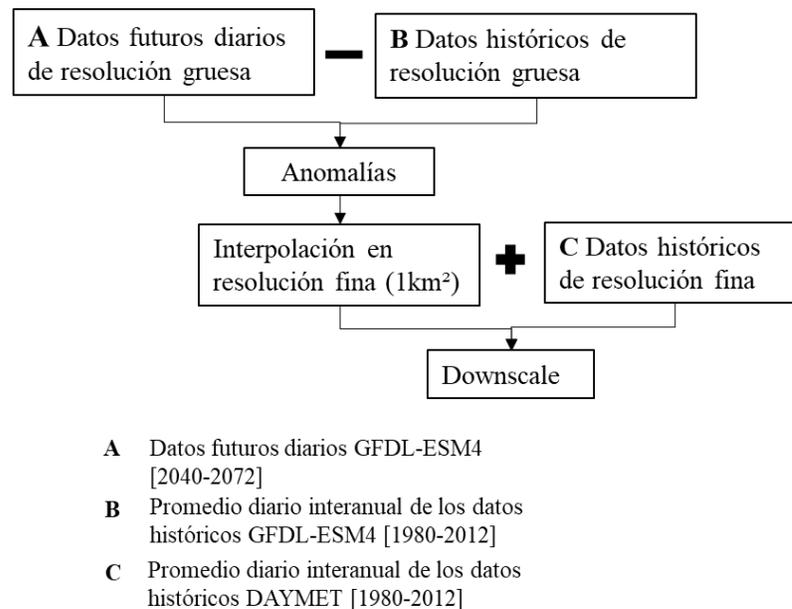


Figura 2-16. Método utilizado en el proceso de *downscale*

2.4. Series de uso y cobertura del suelo de INEGI

Las series de uso y cobertura del suelo (UCS) escala 1:250000 generadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía fueron usadas para el análisis de cambios de las coberturas. Se utilizó softwares de Sistemas de Información Geográfica, como QGIS y Terrset, para su estructura, proyecciones, homogenización de las coberturas y ajuste al área de las cuencas. Se analizó las siete series de UCS con el fin de realizar un análisis y selección de las coberturas que serán usadas para la evaluación de los posibles impactos sobre los procesos hidrológicos. La Tabla 2-10 presenta el periodo representativo de cada

serie, en la sección 1.5.6 se señala el método, imágenes satelitales usadas y el sistema de clasificación.

Tabla 2-10. Descripción de las series de uso y cobertura del suelo de INEGI

Series	Periodo representativo	Año referencia
Serie I	1979-1991	1985
Serie II	1993-1999	1996
Serie III	2002-2005	2003
Serie IV	2006-2010	2008
Serie V	2011-2013	2012
Serie VI	2014-2016	2015
Serie VII	2017-2021	2019

2.4.1. Homogenización de información

La homogenización de nombres y reclasificación de la información se la realizó con base al sistema de clasificación propuesto por INEGI. Este sistema de clasificación es jerárquico, por lo que permitió realizar agrupaciones con base a sus afinidades y similitud de usos (Figura 1-3). Se revisaron las definiciones de cada clase de cobertura propuesta por INEGI, las cuales se resumen en la Tabla 1-7.

2.4.2. Análisis de cambio

Los porcentajes de cambio se los determinaron con base a dos criterios, con respecto al área total de la cuenca [2-1] y con respecto al área inicial del uso y la cobertura del suelo [2-2].

$$\% \text{ cambio} = \frac{A_{2 \text{ ucs}} - A_{1 \text{ ucs}}}{A_c} \times 100 \quad [2-1]$$

$$\% \text{ cambio} = \frac{A_{2 \text{ ucs}} - A_{1 \text{ ucs}}}{A_{1 \text{ ucs}}} \times 100 \quad [2-2]$$

donde,

$A_{1 \text{ ucs}}$	Área inicial de la clase de uso y cobertura del suelo
$A_{2 \text{ ucs}}$	Área final de la clase de uso y cobertura del suelo
A_c	Área de cuenca

2.4.3. Proyección del uso y cobertura del suelo

El proceso general que se siguió para la proyección del UCS al año 2050 se presenta en la Figura 2-17. Se seleccionó el mapa de referencia de 1996 y el mapa de cambio de 2015. Se modelaron los potenciales de transición utilizando la red neuronal de perceptrón multicapa MLP (por sus siglas en inglés *Multi-Layer Perceptron*) (Eastman et al., 2005), las entradas necesarias fueron las transiciones entre los mapas de referencia y de cambio y las variables explicativas. Las transiciones utilizadas en las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac se presentan en la Tabla 2-11. Estas fueron seleccionadas con base a los principales cambios de UCS identificados entre los mapas de 1996 y 2015. Las variables explicativas utilizadas se presentan en la Tabla 2-11, estas variables fueron evaluadas con el coeficiente de *Cramer's V*, se seleccionaron las variables con un coeficiente superior a 0.1. Para la proyección se utilizó la cadena de Markov. Para validar el modelo se proyectó el UCS para el año 2019 y se evaluó con el mapa de 2019 de la serie VII de INEGI, el estadístico utilizado fue el índice Kappa.

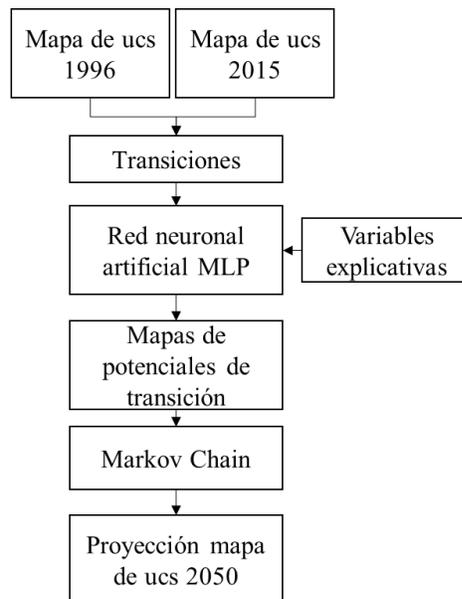


Figura 2-17. Procesos para la proyección del uso y cobertura del suelo al año 2050

Tabla 2-11. Transiciones entre los mapas de uso y cobertura del suelo de 1996 a 2015

Cuenca del río La Sierra		Cuenca del río Amacuzac	
Transición de	a	Transición de	a
Bosque mesófilo de montaña	Agricultura	Agricultura de temporal	Urbano
Bosque mesófilo de montaña	Pastizal	Agricultura de temporal	Agricultura de riego
Bosque de pino	Agricultura	Agricultura de temporal	Bosque de encino
Pastizal	Agricultura	Agricultura de riego	Selva caducifolia
Pastizal	Urbano		
Selva perennifolia	Pastizal		

Las variables explicativas evaluadas con el coeficiente de Cramer's V fueron seleccionadas con base a los cambios de UCS detectados en cada cuenca. Por ejemplo, en la cuenca del río La Sierra, los cambios principales entre el mapa de referencia (1996) y el mapa de cambio (2015) fueron el incremento de la agricultura y pastizal, y la disminución de las coberturas de bosque, por lo tanto, algunas de las variables explicativas consideradas fueron la distancia a pastizales, distancia a agricultura, los cambios de UCS a agricultura y los cambios de UCS a pastizal. Los cambios de UCS considerados fueron mayores a 5 km², esto con la finalidad de proyectar a futuro los principales patrones de los cambios actuales.

Tabla 2-12. Evaluación de las variables explicativas

Cuenca del río La Sierra		Cuenca del río Amacuzac	
Variable explicativa	Cramer's V	Variable explicativa	Cramer's V
Altitud	0.26	Altitud	0.37
Distancia a urbanizaciones	0.27	Todos los cambios de UCS	0.5
Distancias a pastizales	0.20	Todos los cambios de UCS a agricultura riego	0.42
Distancias a agricultura	0.14	Todos los cambios de UCS a agricultura temporal	0.55
Todos los cambios de UCS	0.49	Temperatura	0.37
Todos los cambios de UCS a agricultura	0.46	Distancias a cuerpos de agua	0.17
Todos los cambios de UCS a pastizal	0.40	Distancias a urbanizaciones	0.15

2.5. Modelo hidrológico SWAT

Esta sección describe los datos de entrada y su preparación, configuración del modelo, criterios de evaluación, calibración y validación. La Figura 2-18 presenta el esquema general del proceso de modelación en SWAT.

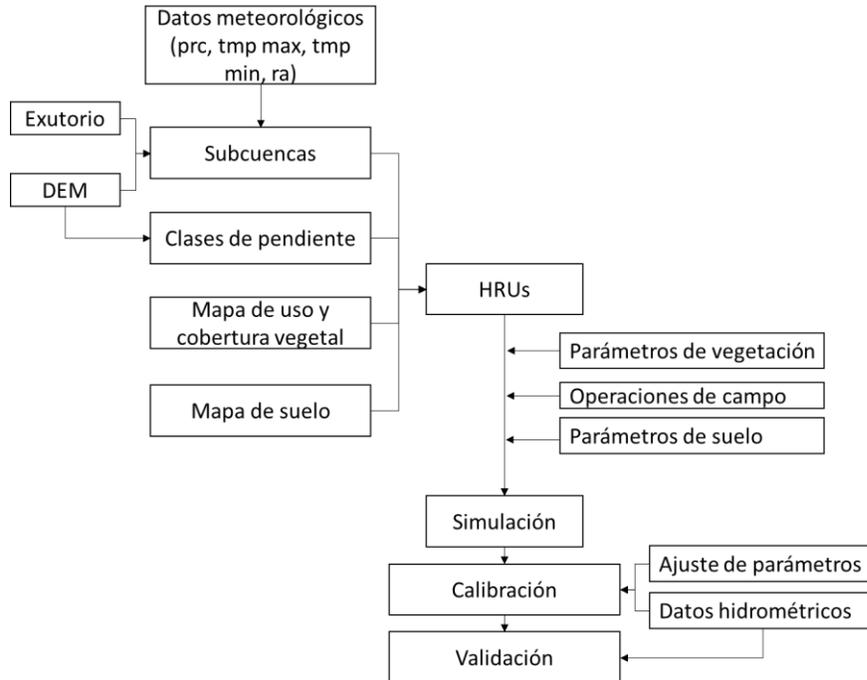


Figura 2-18. Proceso de modelación con SWAT a nivel de HRUs

2.5.1. Datos de entrada

Los datos de entrada necesarios para configurar el modelo con SWAT son: un modelo digital de elevación (DEM), un mapa de uso y cobertura vegetal vinculada con una base de datos de parámetros de vegetación, un mapa de suelos vinculada con una base de datos de parámetros físicos del suelo, y datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, y radiación solar). La Tabla 2-13 presenta una breve descripción de las fuentes de datos de entrada necesarios para la configuración del modelo SWAT.

Tabla 2-13. Base de datos necesarios en la modelación con SWAT

Entrada	Resolución	Fuente
DEM	90 x 90 m	La Misión Topográfica de Radar de Transbordadores (SRTM) https://srtm.csi.cgiar.org/
Exutorio	-	Generado a partir de la ubicación de la estación hidrométrica.
Red hídrica:		
– Cuenca del río Amacuzac (clave RH18Ff)	1:50 000	INEGI https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/#Descargas
– Cuenca del río La Sierra (clave RH30E)		
– Cuenca del río Escondido (clave RH24Fa)		
Mapas de uso y cobertura vegetal	1:250 000	Serie I (INEGI, 1997) Serie II (INEGI, 2001)

Entrada	Resolución	Fuente
		Serie III (INEGI, 2005) Serie IV (INEGI, 2009) Serie V (INEGI, 2013) Serie VI (INEGI, 2016) Descargados del portal de CONABIO http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
Mapa de suelos	1:250 000	INIFAP - CONABIO (2001) http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/eda251mgw.html
Información física del suelo	250 x 250 m	SoilGrids — información global sobre el suelo en cuadrícula (Poggio et al., 2021). SoilGrids250m 2.0
Datos meteorológicos: – Precipitación diaria (mm) – Temperatura máxima diaria (°C) – Temperatura mínima diaria (°C) – Radiación solar total diaria (MJ/m ²)	1 x 1 km	Datos Daymet, desarrollado por la Universidad de Montana/Peter Thornton https://daymet.ornl.gov/

2.5.2. Preparación de datos

El modelo SWAT requiere un formato y estructura de los datos de entrada. Para este proceso, fue necesario el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de programación. El formato de los datos espaciales fue Geotiff (.tiff) para la información raster y shapefile (.shp) para la información vectorial. A continuación se describe el procesamiento de los datos antes de ser utilizados en el modelo SWAT.

Mapa de uso y cobertura vegetal: El modelo SWAT presenta una extensa base de datos de parámetros de vegetación de todo el mundo. Para la vinculación con esta base de datos, las diferentes clases de UCS se agruparon y clasificaron de acuerdo con los códigos de coberturas de las bases de datos de SWAT (Tabla 2-14 y Tabla 2-15).

Tabla 2-14. Clasificación de coberturas INEGI a códigos SWAT, cuenca del río La Sierra

Nº	Código SWAT	Cobertura reclasificada INEGI
1	BSVG	Área desprovista de vegetación
2	URBN	Urbano
3	FRST	Bosque mesófilo de montaña
4	PINE	Bosque de pino
5	OAK	Bosque de encino
6	WATR	Agua
7	PAST	Pastizal
8	AGRL	Agricultura
9	FOEB	Selva perennifolia
10	WEHB	Tular

Tabla 2-15. Clasificación de coberturas INEGI a códigos SWAT, cuenca del río Amacuzac

N°	Código SWAT	Cobertura reclasificada INEGI
1	URBN	Urbano
2	FOEN	Bosque de oyamel
3	FRSE	Bosque de táscate
4	FRST	Bosque mesófilo de montaña
5	PINE	Bosque de pino
6	OAK	Bosque de encino
7	BSVG	Sin vegetación aparente
8	WATR	Cuerpo de agua
9	PAST	Pastizal
10	CRIR	Agricultura de riego
11	CRDY	Agricultura de temporal
12	FRSD	Selva caducifolia

Mapa de suelos y parámetros físicos: El suelo desempeña un papel importante en la modelización de diversos procesos hidrológicos. SWAT requiere un mapa de tipos de suelos vinculada a una base de datos con parámetros físicos como: textura, porcentaje de arcilla, limo y arena, contenido de agua disponible para la planta, conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, profundidad del suelo, etc. Datos que son difícil de obtener a escala local y en una sola base de datos. Primero, se estructuraron las unidades de suelo; segundo, se extrajeron los porcentajes promedios de las unidades de suelo de arcilla, limo y arena de los mapas de SoilGrids (Poggio et al., 2021). Y tercero, se utilizó el modelo SPAW (Saxton and Willey, 2005) para calcular el contenido de agua disponible, la conductividad hidráulica saturada, y la densidad aparente para dos profundidades de suelo. En el Anexo 6 se presentan los datos utilizados para el presente estudio.

Datos meteorológicos: SWAT requiere de un resumen estadístico de parámetros (Anexo 7) denominado generador meteorológico y datos climáticos diarios. SWAT usa el generador meteorológico para simular datos climáticos diarios representativos para una subcuenca. El generador es usado en dos casos: cuando el usuario especifica que se utilizará el clima simulado o cuando hay datos faltantes. Por otro lado, los datos climáticos necesarios dependen del método de estimación de evapotranspiración seleccionado, en este caso se utilizó la ecuación de Hargreaves. Entonces, los datos requeridos son: precipitación, temperatura máxima y mínima del aire y radiación solar. La base de datos climáticos

utilizados en este estudio es de Daymet, información que fue previamente validada (ver sección 2.3.2).

SWAT asigna los datos de la estación más cercanas al centroide de la subcuenca, proporcionando un valor constante a toda la subcuenca. Este proceso, es clave en el desarrollo de un modelo SWAT, ya que un error podría introducir una notable incertidumbre en la entrada del modelo, especialmente en grandes subcuencas donde el clima podría ser espacialmente heterogéneo con relieves muy abruptos (Rivas-Tabares et al., 2019). Considerando esto, para la asignación de los datos meteorológicos se extrajo el promedio de las variables por subcuenca, y para representar la variabilidad del clima se definió un número considerable de subcuencas por cuenca de estudio. Este proceso se llevó a cabo en RStudio Team (2019).

2.5.3. Configuración del modelo

El modelo SWAT se configuró a partir del uso de tres herramientas. (1) *QSWAT*, una interfaz en QGIS para la delimitación de la cuenca, subcuencas y creación de las HRUs. (2) *SWAT Editor*, una interfaz para modificar entradas y ejecutar el modelo. (3) *SWATplusR*, un paquete en R que permite ejecutar simulaciones paralelas, realizar cambios en los parámetros del modelo, modificar períodos de simulación y los pasos de tiempo, y extraer las variables simuladas.

La configuración de modelo requiere que el usuario defina el número de subcuencas y HRUs. Así como, la selección de métodos para la estimación de los procesos hidrológicos. Esto dependió de la disponibilidad y resolución espacial de las variables de entrada, así como del objetivo de la modelación. En este estudio se parametrizó varios modelos, los cuales fueron evaluados en función de criterios estadísticos (NSE, PBIAS) con el fin de seleccionar el mejor modelo, lo cual facilitó el proceso de calibración.

A continuación se presenta el proceso y los datos requeridos para la delimitación de cuencas, subcuencas y HRUs.

- *Delimitación de cuencas y subcuencas hidrográficas*

Las entradas usadas para la delimitación de la cuenca hidrográfica fueron el DEM y la salida de la cuenca (exutorio). Se usó una red hídrica existente como guía para la definición de los canales y el río principal en *QSWAT*. En la creación de la red hídrica, se estableció umbrales para limitar el número de celdas (o área) que formarán parte de un canal o del flujo principal, estos umbrales influyen directamente en el número de subcuencas.

- *Creación de las unidades de respuesta hidrológica*

Las áreas que contienen el mismo uso/cobertura del suelo, tipo de suelo y que se encuentran en el mismo rango de pendiente se agrupan en cada subcuenca para formar unidades de respuesta hidrológica (HRUs). La Figura 2-19 presenta un ejemplo del proceso de combinación de información para la definición de los HRUs en el modelo SWAT.

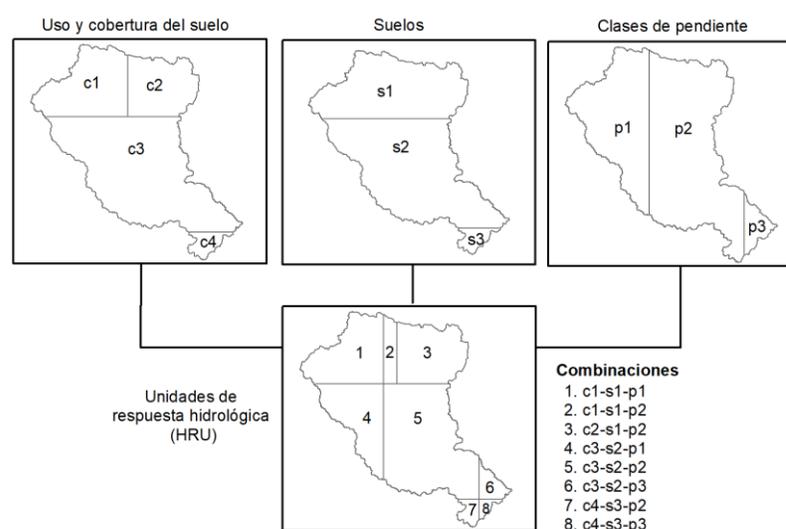


Figura 2-19. Ejemplo de creación de HRUs por subcuencas en el modelo SWAT

2.5.4. Proceso de calibración y validación

SWAT aún no cuenta con una herramienta libre para el proceso de calibración y validación, sin embargo, existen herramientas alternas en desarrollo como SWAT+ Toolbox (James, 2020) y *SWATplusR* (Schürz, 2019). La primera es una herramienta que permite realizar análisis de sensibilidad y calibración; y, la segunda, usada en esta investigación, es un paquete de funciones que facilita la manipulación de parámetros, ejecución del modelo y el

procesamiento eficiente de las salidas desde el lenguaje de programación RStudio Team (2019).

- *Identificación de parámetros*

El primer paso en el proceso de calibración es la determinación de los parámetros más sensibles en la cuenca. Se identificaron 18 parámetros (Tabla 2-16) con base a la revisión teórica del modelo (Neitsch et al., 2011a), y estudios previos de simulación de caudal (ejemplo, Abbaspour et al., 2015; Park et al., 2014; Schurz et al., 2019).

Tabla 2-16. Parámetros que intervienen en los procesos hidrológicos

Componente hidrológico	Parámetro	Nombre	Proceso en el que interviene
Escorrentía superficial	<i>SURLAG</i>	Coefficiente de retraso de escorrentía superficial	Cálculo del retraso de la escorrentía superficial
	<i>CNCOEF</i>	Coefficiente del número de la curva dependiente de la ET de la planta.	Estimación del coeficiente de retención para los cálculos del número de la curva diaria dependiente de la evapotranspiración de las plantas
	<i>CN2</i>	Número de curva de la condición II	Estimación de número de curva SCS ajustado.
Evapotranspiración	<i>CANMX</i>	Almacenamiento máximo del dosel (mm H ₂ O)	Almacenamiento en el dosel
	<i>ESCO</i>	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Evaporación del suelo
	<i>EPCO</i>	Factor de compensación de la absorción de agua de la planta	Absorción de agua por las plantas
Agua del suelo	<i>SOL_AWC</i>	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo (mm H ₂ O / mm suelo).	Percolación
	<i>SOL_K</i>	Conductividad hidráulica saturada (mm / h).	Percolación Flujo lateral
	<i>LAT_TTIME</i>	Tiempo de viaje de flujo lateral (días)	Flujo lateral
	<i>SOL_BD</i>	Densidad aparente húmeda (Mg / m ³ o g / cm ³).	Percolación
	<i>SOL_Z</i>		
Agua subterránea	<i>GW_REVAP</i>	Coefficiente de "revaporización"	Estimación de la cantidad real de agua que entra en la zona del suelo en respuesta a las deficiencias de agua.
	<i>REVAPMN</i>	Profundidad del nivel freático para que se produzca la revap	
	<i>ALPHA_BF</i>	Constante de recesión del caudal base	Respuesta del flujo de agua subterránea a los cambios en la recarga
	<i>RCHG_DP</i>	Fracción de percolación del acuífero profundo	Reparto de la recarga entre el acuífero superficial y el acuífero profundo

Componente hidrológico	Parámetro	Nombre	Proceso en el que interviene
	<i>GWQMN</i>	Profundidad límite del agua en el acuífero poco profundo necesaria para que se produzca el flujo de retorno (mm)	Estimación de la cantidad del acuífero poco profundo y flujo base
	<i>GW_DELAY</i>	Tiempo de retraso de la recarga del acuífero (días)	Cantidad de agua que entra en los acuíferos
Enrutamiento del agua	<i>EVRCH</i>	Factor de ajuste de la evaporación	Pérdidas por evaporación
	<i>CH_K2</i>	Conductividad hidráulica efectiva del canal (mm/h)	Pérdidas de transmisión

- *Ajuste de los parámetros iniciales*

El modelo recomienda establecer algunos parámetros iniciales de acuerdo con las características físicas de las cuencas. Los parámetros ajustados fueron *CN2*, *ALPHA* y *CH_K2* (Tabla 2-17). Los valores de *CN2* fueron ajustados de acuerdo con la pendiente de cada cuenca, utilizando la ecuación [1-24]. El parámetro *CH_K2* de acuerdo con Neitsch et al. (2011) para ríos perennes con contribución continua de agua subterránea, la conductividad efectiva será cero; ya que, el modelo supone que las pérdidas por transmisión desde el canal principal entran en el almacenamiento de las orillas o en el acuífero profundo. La constante de recesión del caudal base (*ALPHA*) fue estimado con el programa *Baseflow* (Arnold et al., 1995). La Tabla 2-17 presenta los valores establecidos para los parámetros *ALPHA* y *CH_K*. La explicación de calibración se detalla en la siguiente sección.

Tabla 2-17 Parámetros iniciales predefinidos

Parámetro	Valor inicial		Rango límite		Unidades
	Sierra	Amacuzac	Min	Max	
<i>ALPHA</i>	0.06	0.03	0	1	-
<i>CH_K2</i>	0.01	0.01	0	500	mm/hr

- *Periodos de calibración y validación*

El periodo de calibración se estableció de 1980 a 1993 (con dos años de calentamiento) y el periodo de validación de 1994-2000. La información del uso y cobertura de suelo que se usó corresponde a la serie II (1993-1999).

- *Calibración*

De acuerdo con Arnold et al. (2012c) para la calibración manual se utiliza un enfoque iterativo que implica varios pasos: (1) realizar la simulación, (2) comparar los valores medidos y simulados, (3) evaluar si se han obtenido resultados razonables, (4) sino, ajustar los parámetros introducidos basándose en el juicio del experto y en otras orientaciones dentro de los rangos de valores razonables de los parámetros, y (5) repetir el proceso hasta que se determine que se han obtenido los mejores resultados (Figura 2-20). En forma general se aplicó este proceso, sin embargo, la calibración propuesta en esta investigación consta de dos fases descritas a continuación.

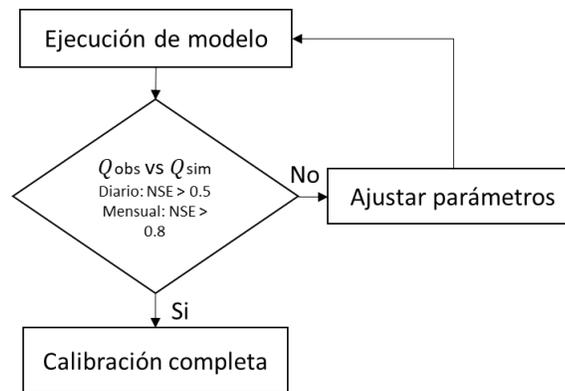


Figura 2-20. Proceso general de calibración

La primera fase consistió en una calibración preliminar, se centró en el ajuste de la escorrentía superficial. Se evaluó parámetros que influyen directamente en la escorrentía superficial y evapotranspiración real como *CN2*, *SURLAG*, *EPCO* y *ESCO* (Tabla 2-16). La segunda fase consistió en ajustar parámetros que influyen directamente en el flujo base, como *GWQMN*, *REVAPMN*, *RCHRG_DP*, entre otros. La calibración propuesta evita en lo posible calibrar parámetros que representen propiedades físicas que son medibles en campo. La calibración fue a escala de tiempo diaria y mensual con el fin de ajustar los caudales máximos y las curvas de recesión simulados frente a los observados.

- *Validación*

La validación del modelo es el proceso de demostrar que un modelo específico es capaz de hacer simulaciones suficientemente precisas, aunque lo "suficientemente preciso" puede

variar según los objetivos del proyecto (Refsgaard, 1997 citado por Arnold et al. (2012c). La validación consistió en ejecutar el modelo en un periodo diferente al de la calibración utilizando los valores de los parámetros que se determinaron en la calibración y comparar las simulaciones con los datos observados. En la evaluación del modelo SWAT se utilizaron métodos gráficos y tres criterios estadísticos, R^2 , NSE y PBIAS.

2.6. Evaluación de impactos por la variabilidad climática, el cambio climático y el cambio de uso/cobertura del suelo

Para identificar los impactos causados por la variabilidad climática, el cambio climático y el cambio del UCS sobre los procesos hidrológicos se utilizó el método de fijación-cambio. La variabilidad climática se evaluó entre el periodo de referencia 1982 a 2000 y el periodo de cambio 2001-2012 (Figura 2-21A); mientras que el cambio climático, se evaluó entre el periodo de referencia 1982-2012 y el periodo de cambio 2042-2072 (Figura 2-21B). No se evaluó un periodo más actual (2013-2020) debido a que un análisis de tendencias de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de Daymet determinó reducciones e incrementos drásticos a partir del año 2013. A pesar de que los resultados de las validaciones de los datos climáticos Daymet fueron buenos, la disponibilidad de datos observados permitió realizar validaciones únicamente durante el periodo 1980-2010 (ver sección 3.2.4).

La evaluación del impacto actual de los cambios de uso de la tierra en los procesos hidrológicos se evaluó entre el UCS 1996 y el UCS 2008 (Figura 2-21A). Por otro lado, la evaluación del impacto futuro se evaluó entre el UCS de 1996 y el UCS de 2050 (Figura 2-21B).

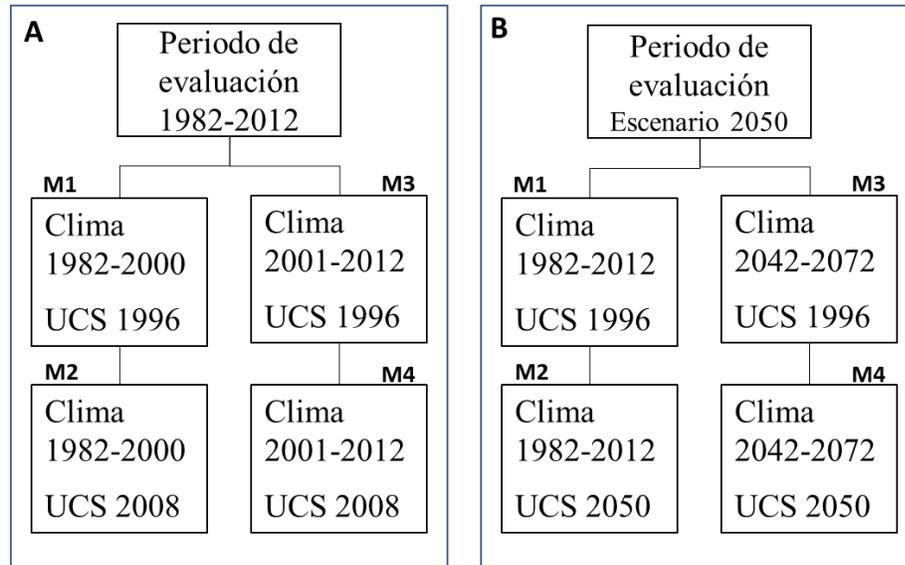


Figura 2-21. Periodos para la evaluación de los impactos causados por (A) variabilidad climática, el cambio climático (B) y el cambio del uso/cobertura del suelo actual (A) y futuro (B) sobre los procesos hidrológicos

Para evaluar el impacto por la variabilidad y el cambio climático se fijaron los mapas de UCS y se variaron las variables climáticas, las ecuaciones [2-3] a [2-5] se utilizaron para identificar la magnitud de los impactos:

$$IC1 = M3 - M1 \quad [2-3]$$

$$IC2 = M4 - M2 \quad [2-4]$$

$$ICT = \frac{IC1 + IC2}{2} \quad [2-5]$$

Para evaluar el impacto por los cambios de UCS, se fijaron las variables climáticas y se variaron los mapas de UCS [2-6] a [2-8].

$$IU1 = M2 - M1 \quad [2-6]$$

$$IU2 = M4 - M3 \quad [2-7]$$

$$IUT = \frac{IU1 + IU2}{2} \quad [2-8]$$

donde,

- IC1* impacto por variabilidad climática 1
- IC2* impacto por variabilidad climática 2
- ICT* impacto total por la variabilidad climática o cambio climático
- IU1* impacto por cambio de UCS 1
- IU2* impacto por cambio de UCS 2

IUT impacto total por el cambio de UCS

El impacto total (*IT*) es la suma de los impactos por la variabilidad climática y el cambio de UCS [2-9].

$$IT = ICT + IUT \quad [2-9]$$

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados de la presente investigación, los mismo que están organizados de la siguiente manera: (1) diagnóstico de la calidad de datos y un análisis exploratorio de las series hidrométricas, (2) control de calidad, validación y un análisis exploratorio de los datos climáticas actuales y proyecciones futuras, (3) análisis de cambio del uso y cobertura del suelo, (4) modelación hidrológica y (5) evaluación de impactos. En la cuenca del río Escondido únicamente se presentan los resultados del análisis de las series hidrométricas y climáticas, esto debido a que la validación de los datos Daymet no fueron satisfactorios.

3.1. Series hidrométricas

En esta sección se describe la disponibilidad y diagnóstico de la calidad de datos, así como un análisis exploratorio de las series hidrométricas.

3.1.1. Disponibilidad de datos hidrométricos

La Figura 3-1 y Tabla 3-1 presentan la disponibilidad de datos diarios de cada estación hidrométrica. Con respecto a la Figura 3-1, la escala es una rampa continua de colores que va de 1 día (color amarillo) a 366 días (color azul), las celdas en color blanco representan ausencia de datos. La estación Villa de Fuente (24290) posee un amplio registro de información que va de 1932 hasta el 2010 con solo cuatro valores faltantes. La estación Amacuzac (18232) posee datos desde 1955 hasta el 2014 con alrededor de 2% de valores faltantes distribuidos en los años 1996, 1999, 2009 y 2010. Por último, la estación Pueblo Nuevo (30016) tiene un registro desde 1947 hasta 2014 con el 4% de valores faltantes, estos valores se encuentran distribuidos en los años 1947, 1987, 1988, 2004, 2005 y 2009.



Figura 3-1. Disponibilidad de datos hidrométricos

Tabla 3-1. Resumen de disponibilidad de datos hidrométricos

Estación	Nombre	Cuenca	Periodo			Valores faltantes	
			Inicio	Fin	Años	nº	%
24290	Villa de Fuente	Río Escondido	1932	2010	79	4	0.01
18232	Amacuzac	Río Amacuzac	1955	2014	60	449	2.05
30016	Pueblo Nuevo	Río La Sierra	1947	2014	68	1031	4.15

3.1.2. Diagnóstico de la calidad de los datos hidrométricos

El control de calidad de los datos a nivel diario permite detectar valores atípicos que posteriormente pueden alterar el promedio mensual o anual de la serie de datos. En general, las observaciones marcadas como atípicos no son datos erróneos sino son producto de eventos climáticos como ciclones, huracanes, depresiones tropicales, los mismos que forman parte de la variabilidad climática. Estos eventos han causado inundaciones en las cuencas de estudio, puntualmente en la cuenca del río Escondido y cuenca del río La Sierra.

3.1.2.1. Análisis por periodo

La serie de caudal que corresponde a la estación Villa de Fuente (24290) es la que presenta la mayor cantidad de datos atípicos (13%); mientras que, la serie de la estación Pueblo Nuevo (30016) presenta la menor cantidad de datos atípicos (5%) (Tabla 3-2). El análisis estadístico de la distribución de datos indica una alta variabilidad de los datos, en este análisis se detectó un valor máximo de 10 027 m³/s en la estación Amacuzac (18232), valor considerado sospechoso de acuerdo con sus registros históricos, este valor se refleja en la Figura 3-2 (análisis por meses, febrero).

Tabla 3-2. Valores atípicos y resumen estadístico de la distribución de datos

Estación	Periodo		Valores atípicos		\bar{X} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} sin datos atípicos (m ³ /s)	Distribución de datos						Ceros	Neg.
	Inicio	Fin	nº	%			Mínimo	Q1	Media	Mediana	Q3	Máximo		
24290	1932	2010	3 710	13	1.77	0.67	0	0.16	1.77	0.51	1.44	883	162	0
18232	1955	2014	1 563	7	23.82	15.96	0.17	3.52	23.82	9	31.70	10 027	0	0
30016	1947	2014	1 286	5	205.06	174.31	0.89	68.1	205.06	135	281	1 500	0	0

\bar{X} : Promedio aritmético Neg.: valores negativos

3.1.2.2. Análisis por subseries mensuales

La estación Villa de Fuente (24290) tuvo la mayor presencia de datos atípicos en los meses de agosto y septiembre (16%) (Figura 3-2 y Tabla 3-3), coincidiendo con la temporada de ciclones tropicales en el océano Atlántico (Anexo 9). La variación de la diferencia del promedio del caudal con y sin datos atípicos (ΔQ en Tabla 3-3) es pequeña, entre 0.2 a 1.8 m^3/s . Esta variación puede llegar a ser significativa considerando que es una zona árida, sin embargo, los datos atípicos que elevaron el promedio del caudal son producto de lluvias atípicas en los años 1948, 1953 y 1964, esto se constató con estaciones meteorológicas cercanas a la estación hidrométrica. En el mes de abril se detectó un valor extremo de 883 (m^3/s) (Figura 3-2), este dato corresponde a lluvias intensas producto de una tormenta sobre el suroeste de los Estados Unidos, que afectó al norte de México en el año 2004.

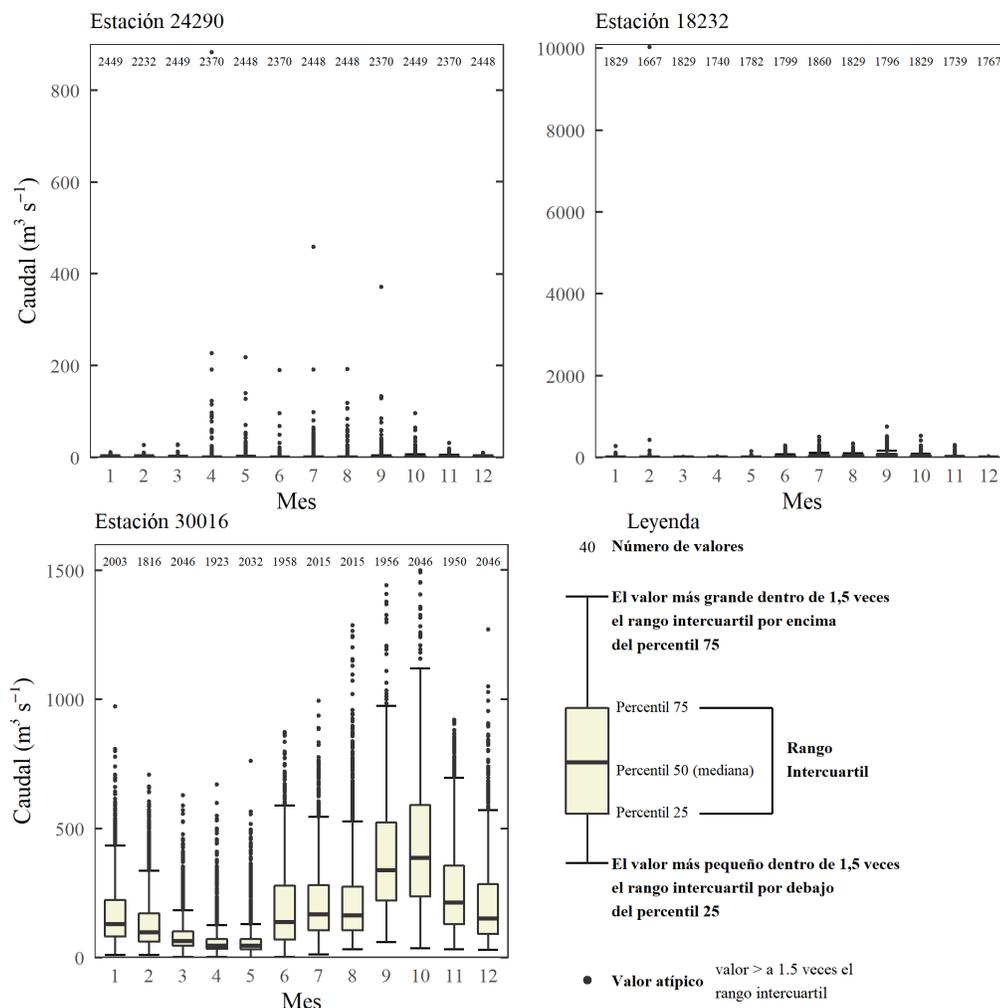


Figura 3-2. Magnitud de las subseries mensuales de caudal

En la estación Amacuzac (18232), los porcentajes de los datos atípicos por mes varían entre ~2% (diciembre) a ~8% (octubre) (Tabla 3-4 y Figura 3-2). La ΔQ más alta es el mes de septiembre (8.33 m³/s), esta diferencia se debe a intensas y constantes lluvias principalmente en los años 2013, 1961, 1967, 2009 y 2014 (ordenados por intensidad). Por ejemplo, en el año 2013 hubo el desbordamiento del río Amacuzac por lluvias intensas asociadas con el Huracán Manuel. Se eliminaron dos valores diarios extremos considerados como errores en el mes de febrero del año 1995 que no pudieron ser validados.

Tabla 3-3. Identificación de datos faltantes y datos atípicos de la estación Villa de Fuente (24290), periodo 1932-2010

Mes	Datos faltantes		Datos atípicos		\bar{X} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔQ
	No	%	No	%				
1	0	0.00	205	8.37	6.45	1.52	1.07	0.45
2	0	0.00	162	7.26	5.53	1.34	1.01	0.33
3	0	0.00	151	6.17	4.60	1.05	0.82	0.23
4	0	0.00	195	8.23	17.82	2.05	0.64	1.41
5	1	0.04	264	10.78	10.31	1.72	0.68	1.04
6	0	0.00	306	12.91	7.37	1.32	0.42	0.90
7	1	0.04	331	13.52	11.16	1.79	0.32	1.47
8	1	0.04	399	16.29	9.63	1.83	0.31	1.52
9	0	0.00	380	16.03	12.22	2.56	0.72	1.84
10	0	0.00	262	10.70	13.04	2.46	1.19	1.27
11	0	0.00	279	11.77	9.35	1.95	0.96	0.99
12	1	0.04	269	10.98	7.46	1.69	0.97	0.71

ΔQ : variación del caudal promedio con y sin datos atípicos

Tabla 3-4. Identificación de datos faltantes y datos atípicos de la estación Amacuzac (18232), periodo 1955-2014

Mes	Datos faltantes		Datos atípicos		\bar{X} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔQ
	n°	%	n°	%				
1	31	1.67	57	3.06	31.62	5.87	5.04	0.83
2	28	1.65	85	5.01	141.72	10.70	3.66	7.04
3	31	1.67	107	5.75	7.94	2.79	2.47	0.32
4	60	3.33	89	4.94	8.10	2.46	2.15	0.30
5	78	4.19	113	6.08	25.24	5.08	3.72	1.36
6	1	0.06	104	5.78	116.91	26.90	21.38	5.52
7	0	0.00	107	5.75	170.95	46.22	38.61	7.61
8	31	1.67	95	5.11	147.28	47.03	41.54	5.49
9	4	0.22	84	4.67	240.38	70.60	62.27	8.33
10	31	1.67	142	7.63	133.54	41.50	33.75	7.75
11	61	3.39	111	6.17	55.47	15.77	13.07	2.71

Mes	Datos faltantes		Datos atípicos		\bar{X} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔQ
	n ^o	%	n ^o	%				
12	93	5.00	29	1.56	21.83	7.75	7.52	0.23

ΔQ : variación del caudal promedio con y sin datos atípicos

Tabla 3-5. Identificación de datos faltantes y datos atípicos de la estación Pueblo Nuevo (30016), periodo 1947-2014

Mes	Datos faltantes		Datos atípicos		\bar{X} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{X} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔQ
	n ^o	%	n ^o	%				
1	105	4.98	101	4.79	530.75	171.00	151.89	19.10
2	105	5.47	131	6.82	442.31	137.31	113.60	23.71
3	62	2.94	159	7.54	289.89	87.25	70.17	17.07
4	117	5.74	185	9.07	233.67	67.38	49.68	17.70
5	76	3.61	232	11.01	243.54	70.46	48.15	22.31
6	82	4.02	43	2.11	700.26	191.72	180.30	11.42
7	93	4.41	99	4.70	650.22	215.35	192.88	22.47
8	93	4.41	148	7.02	714.64	224.63	185.79	38.84
9	84	4.12	19	0.93	1186.79	385.31	377.44	7.86
10	62	2.94	19	0.90	1309.68	424.35	416.05	8.30
11	90	4.41	76	3.73	777.51	268.43	247.78	20.65
12	62	2.94	91	4.32	696.21	210.78	188.18	22.60

ΔQ : variación del caudal promedio con y sin datos atípicos

En la estación Pueblo Nuevo (30016) los meses secos, abril y mayo, presentan mayor cantidad de datos atípicos entre 9% y 11% (Tabla 3-5 y Figura 3-2); mientras que, los meses lluviosos de septiembre y octubre la menor cantidad de datos atípicos, ~1%. La ΔQ más alta es el mes de agosto (~39 m³/s), esta diferencia se debe principalmente a lluvias intensas en los años 2010 y 2011 ocasionadas por la influencia de la tormenta tropical Matthew y por la tormenta tropical Harvey, respectivamente.

3.1.3. Análisis exploratorio de las series hidrométricas

El análisis exploratorio de los datos se presenta a nivel mensual. A continuación se describe los patrones estacionales y tendencias durante el periodo disponible de los datos de cada estación hidrométrica.

3.1.3.1. Patrones estacionales

Las subseries mensuales en la estación Villa de Fuente (24290) no presentan un patrón claro de estacionalidad (Figura 3-3), los meses de mayo a noviembre presentan una mayor variabilidad del caudal. Los meses con las medias ligeramente mayores en las subseries mensuales del caudal son octubre y noviembre. Por otro lado, las subseries mensuales en las estaciones Amacuzac (18232) y Pueblo Nuevo (30016) sí presentan un patrón marcado de estacionalidad, el periodo con mayor nivel de caudal es desde junio a noviembre (periodo lluvioso); mientras que, en diciembre a mayo el nivel de caudal es bajo (periodo seco).

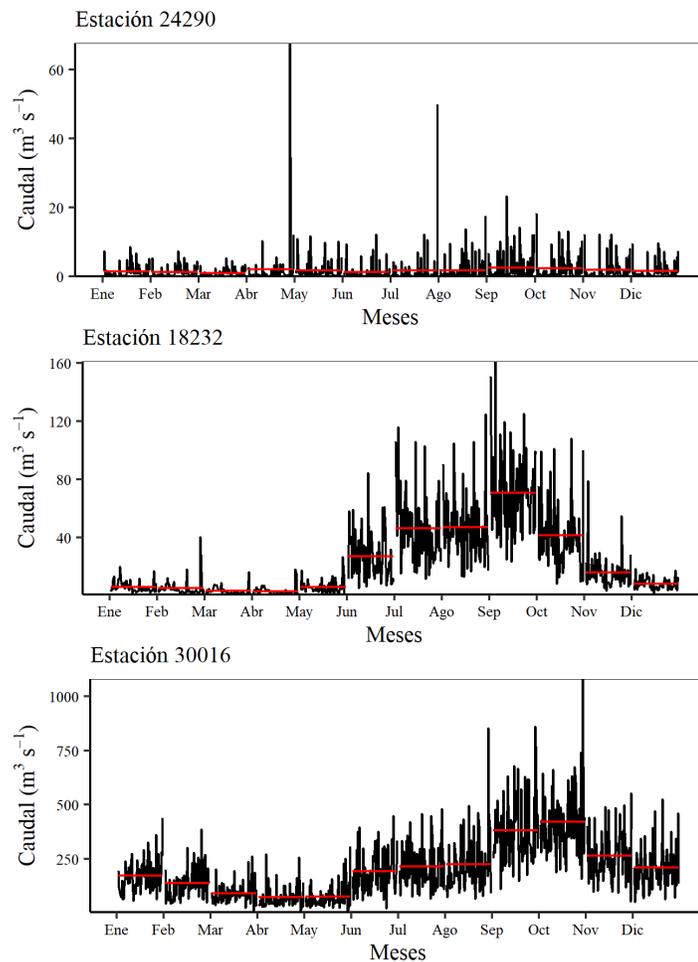


Figura 3-3. Subseries mensuales de las estaciones: Villa de Fuente (24290) periodo 1942-2010, Amacuzac (18232) periodo 1955-2014, y Pueblo Nuevo (30016) periodo 1947-2014. La línea roja es la mediana de cada subserie.

3.1.3.2. Análisis de tendencias

El análisis de tendencias de las series hidrométricas se presenta por subseries mensuales (Figura 3-4 a 3-6), estacionales (Figura 3-7) y anuales (Figura 3-8). En el análisis de subseries mensuales de la estación Villa de Fuente (24290) (Figura 3-4) se observa tendencias positivas a excepción del mes de mayo, sin embargo, únicamente cinco meses presenta incremento significativo del caudal (febrero, marzo y octubre a diciembre). En el análisis estacional, a pesar de que, no se logró establecer un patrón marcado de estacionalidad durante un año (Figura 3-3) se analizaron los datos también por temporadas, obteniendo tendencias positivas, pero no significativas tanto para la temporada seca y lluviosa. En el análisis anual, la tendencia se mantiene positiva pero no significativa.

En la estación Amacuzac (18232), el análisis de subseries mensuales (Figura 3-5) identificó tendencias negativas en todos los meses, pero únicamente en los meses de enero a abril, junio y julio las tendencias son significativas (meses de temporada seca). En el análisis estacional (Figura 3-7) se mantiene esta tendencia significativa de reducción del caudal no sólo en temporada seca sino también en la temporada lluviosa. En el análisis anual (Figura 3-8), la tendencia también es negativa y significativa.

En la estación Pueblo Nuevo (30016) se puede identificar tendencias positivas en todas las subseries mensuales (Figura 3-6), pero únicamente en tres meses (enero, febrero y abril, meses de temporada seca) las tendencias son significativas. El análisis por temporadas (Figura 3-7) confirma esto, al presentarse tendencias significativas únicamente durante la temporada seca. En el análisis anual (Figura 3-8) esta tendencia significativa se mantiene para todo el periodo.

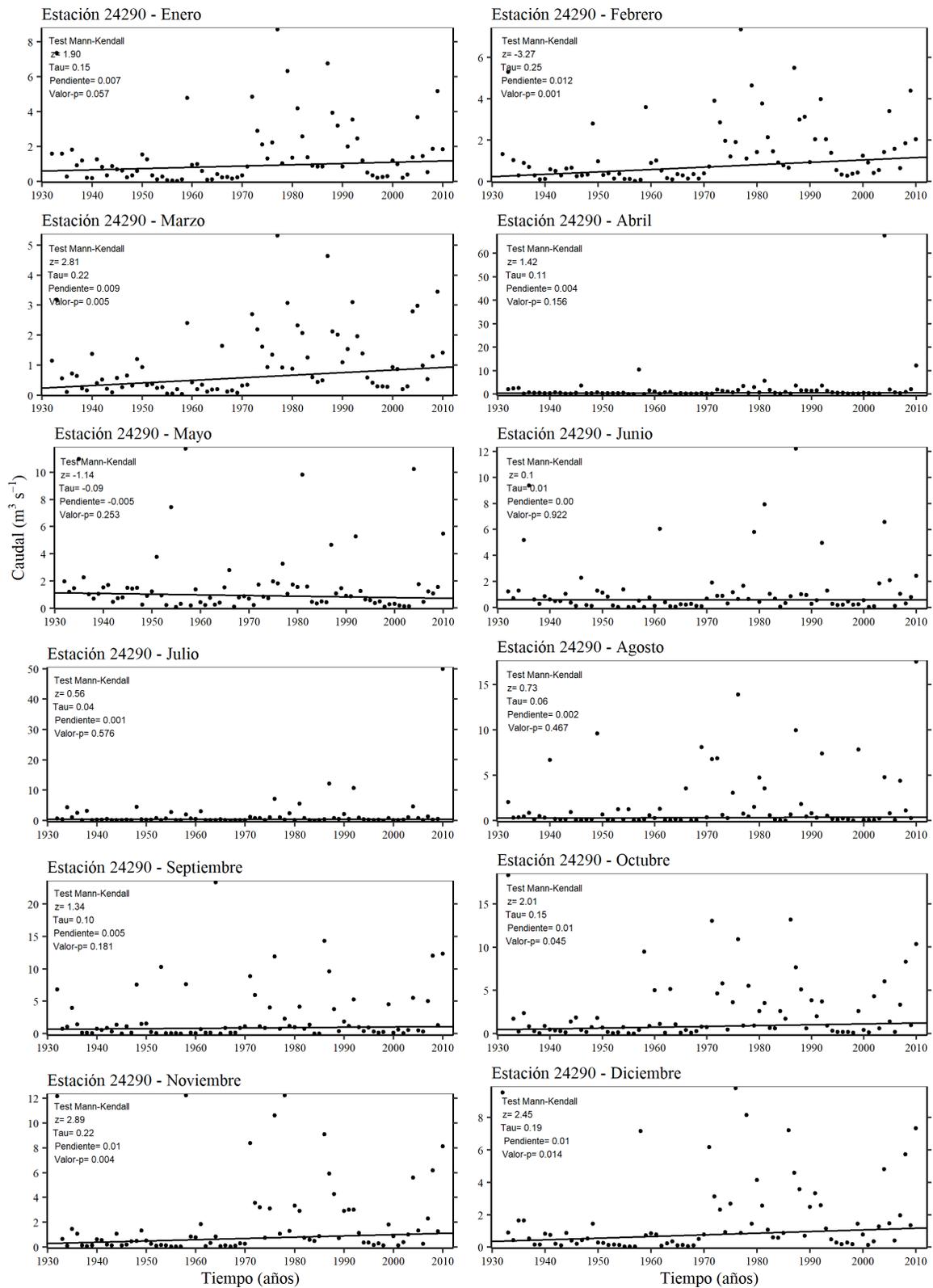


Figura 3-4. Análisis de tendencias de las subseries mensuales de la estación Villa de Fuente (24290)

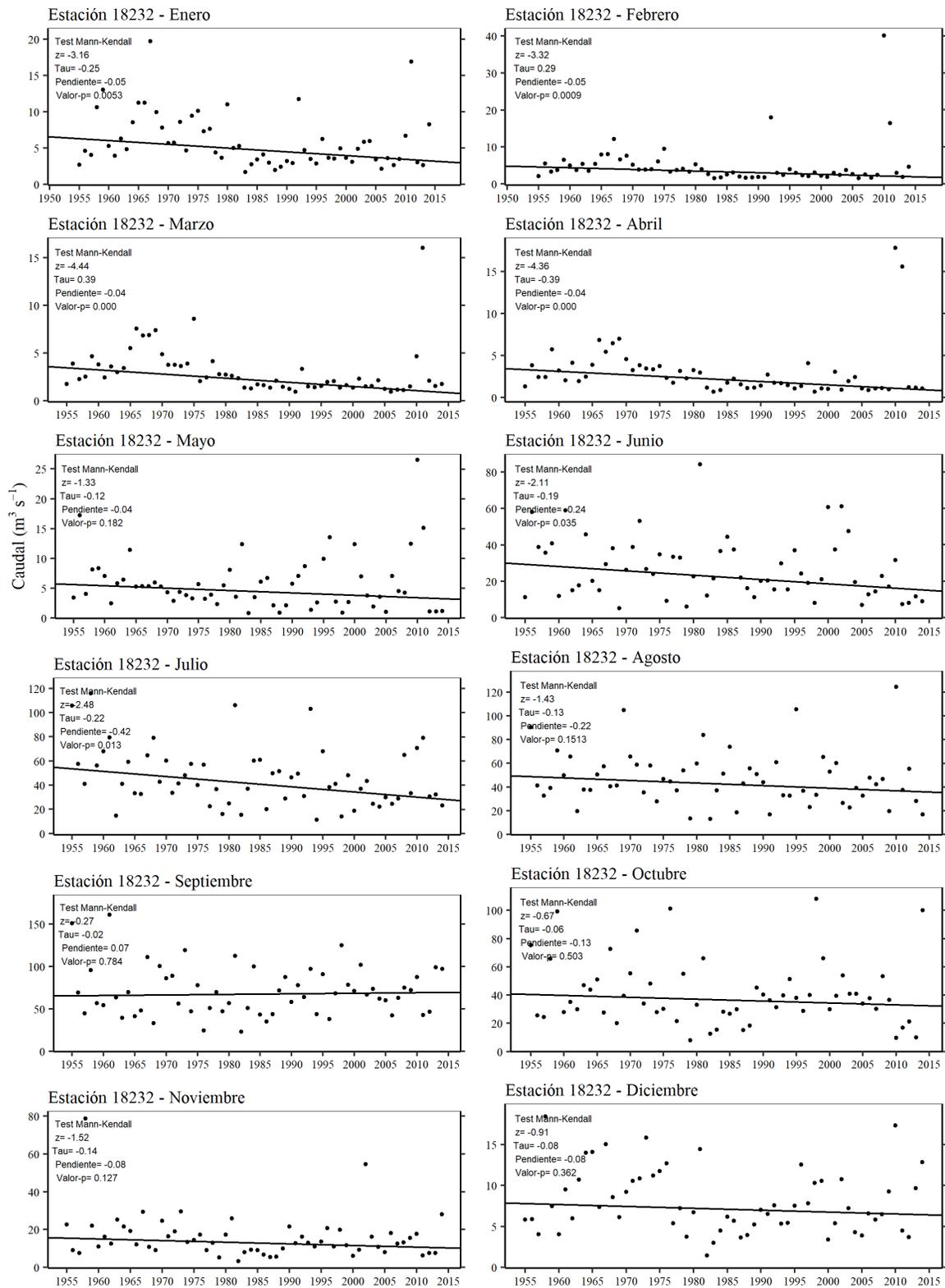


Figura 3-5. Análisis de tendencias de las subseries mensuales de la estación Amacuzac (18232)

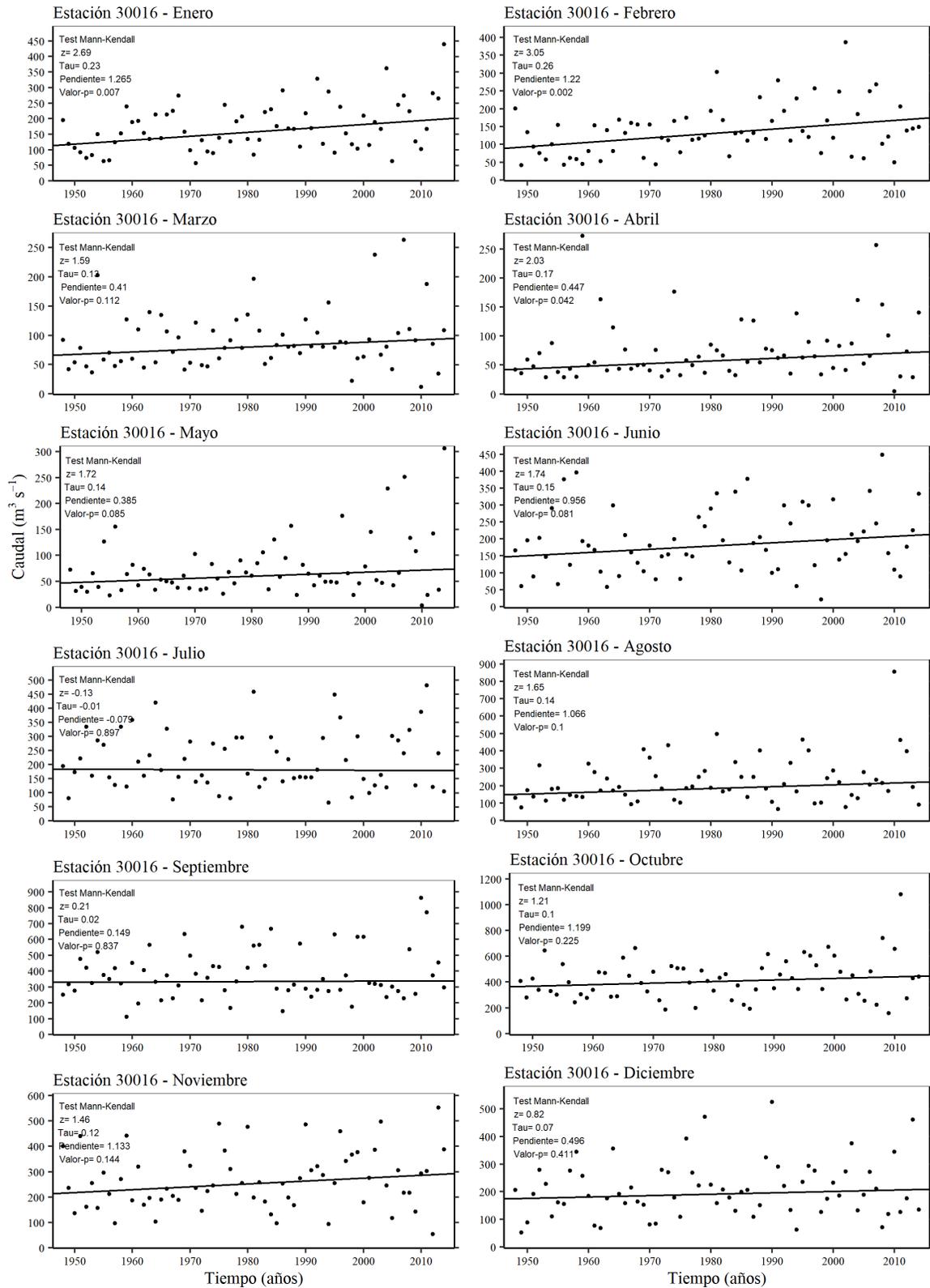


Figura 3-6. Análisis de tendencias de las subseries mensuales de la estación Pueblo Nuevo (30016)

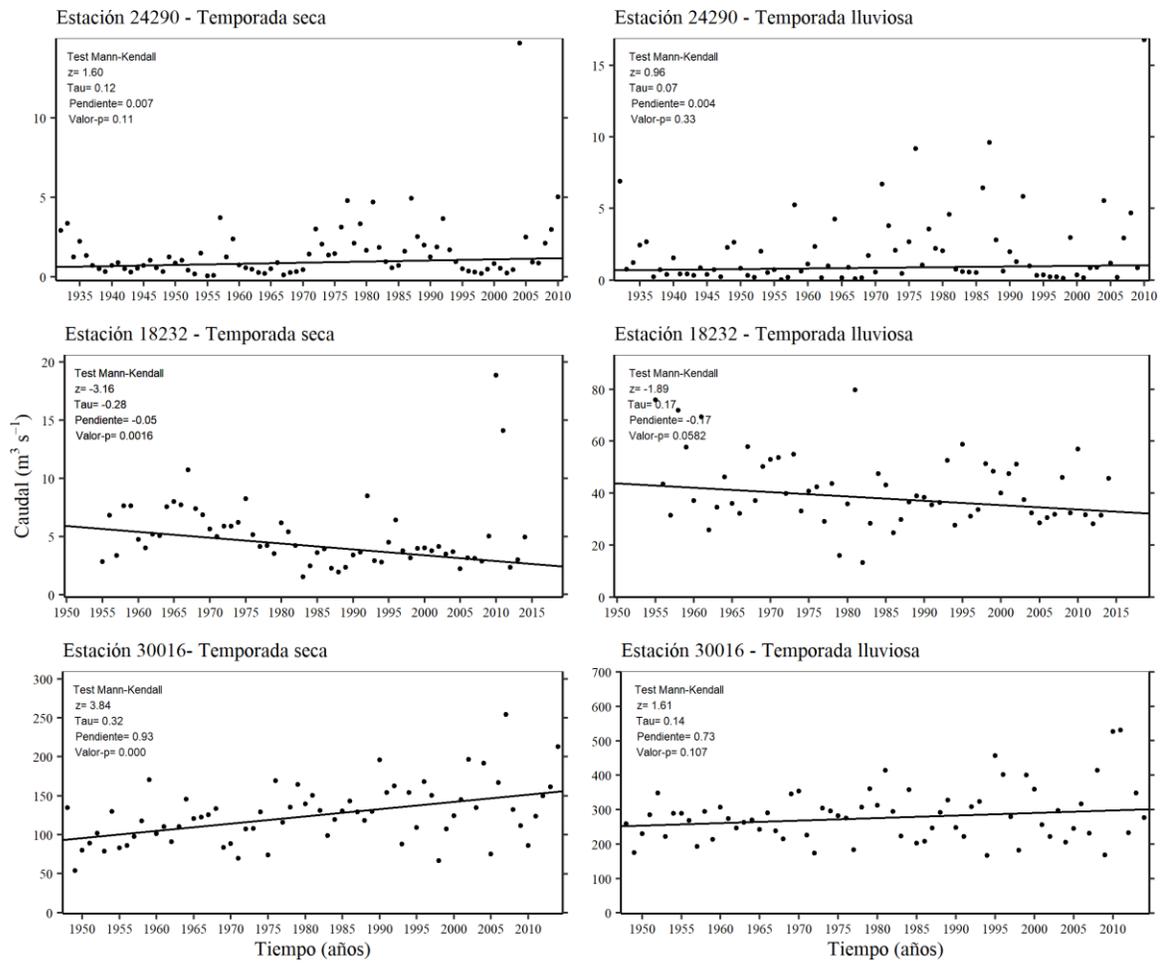


Figura 3-7. Análisis de tendencias estacional

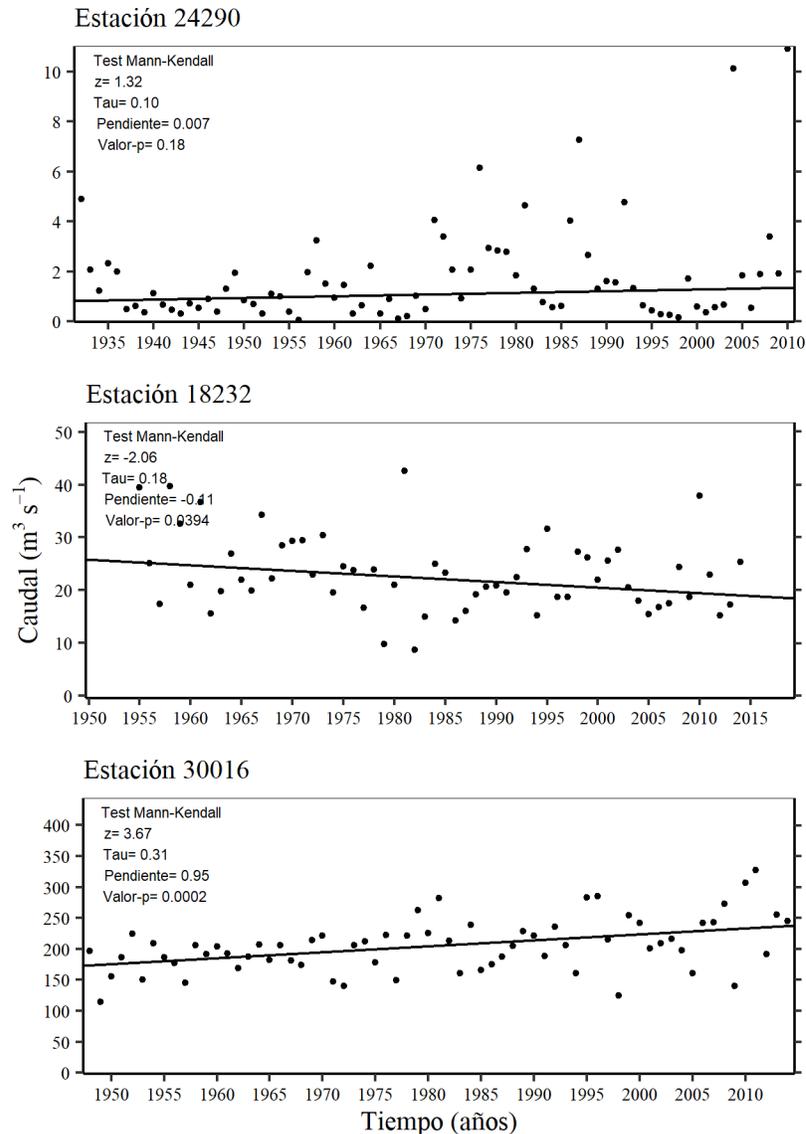


Figura 3-8. Análisis de tendencias anuales

3.1.4. Identificación de puntos de cambio en las series hidrométricas

En esta sección se presentan los resultados estadísticos de las pruebas Pettitt, SNHT y Buishand aplicadas a las subseries mensuales, estacionales y series anuales. El periodo de análisis es a partir del año 1980.

Detallando los resultados obtenidos para la estación Villa de Fuente (24290) (Tabla 3-6), se observa que la prueba Pettitt detectó diferentes puntos de quiebre en las subseries dependiendo el mes, sin embargo, ningún cambio es significativo (nivel de confianza del

95%). En la prueba SNHT, únicamente en los meses de julio y agosto se detectan puntos de quiebre significativos casi al final del periodo (año 2009). La prueba de Buishand, no detectó ningún punto de cambio.

Tabla 3-6. Pruebas de homogeneidad de las subseries mensuales de la estación Villa de Fuente (24290), periodo 1980-2010.

Mes	Número de datos	Pettitt Fecha de cambio	Valor-p	SNHT Fecha de cambio	Valor-p	Buishand Fecha de cambio	Valor-p
1	31	1993	0.120	1993	0.348	1993	0.073
2	31	1993	0.090	1993	0.400	1993	0.061
3	31	1994	0.242	1993	0.744	1993	0.114
4	31	2003	0.505	2003	0.334	2003	0.660
5	31	2003	0.331	1981	0.286	2003	0.313
6	31	1993	0.539	1987	0.730	1987	0.809
7	31	2002	0.769	2009	0.000	2009	0.716
8	31	2003	0.769	2009	0.000	2009	0.759
9	31	2006	0.610	2007	0.119	2006	0.212
10	31	1992	0.307	2009	0.223	1988	0.186
11	31	1993	0.357	2009	0.165	2003	0.155
12	31	1992	0.357	2009	0.108	2003	0.096

Para la estación Amacuzac (18232) (Tabla 3-7), la prueba Pettitt y Buishand no detectaron ningún punto de quiebre significativo en la serie. En la prueba SNHT, se detectaron dos puntos de quiebre significativos, uno corresponde al mes de enero en el año 1980 y el otro en el mes de octubre en el año 2013.

Tabla 3-7. Pruebas de homogeneidad de las subseries mensuales de la estación Amacuzac (18232), periodo 1980-2014.

Mes	Número de datos	Pettitt Fecha de cambio	Valor-p	SNHT Fecha de cambio	Valor-p	Buishand Fecha de cambio	Valor-p
1	34	1991	0.738	1980	0.036	1982	0.589
2	34	1991	0.774	2009	0.136	2009	0.763
3	34	1982	0.756	2009	0.339	2009	0.242
4	33	1997	0.209	1981	0.075	2004	0.821
5	32	2009	0.988	2009	0.575	2009	0.998
6	35	2003	0.056	2003	0.171	2003	0.349
7	35	1997	0.911	1981	0.827	1993	0.587
8	34	2001	0.868	1981	0.773	2001	0.991
9	35	1987	0.837	2012	0.635	1987	0.836
10	34	1988	0.212	2013	0.049	1988	0.544
11	33	1989	0.347	2013	0.754	2001	0.627
12	32	1989	0.445	2012	0.158	1994	0.380

En la estación Pueblo Nuevo (30016) (Tabla 3-8), al igual que las anteriores subseries analizadas, la prueba Pettitt y Buishand no detectaron ningún punto de quiebre significativo. En la prueba SNHT, se detecta dos puntos de quiebre significativos, uno corresponde al mes de enero en el año 2013 y el otro en el mes de mayo en el año 2013.

Tabla 3-8. Pruebas de homogeneidad de las subseries mensuales de la estación 30016, periodo 1980-2014

Mes	Número de datos	Pettitt Fecha de cambio	Valor-p	SNHT Fecha de cambio	Valor-p	Buishand Fecha de cambio	Valor-p
1	32	2011	0.817	2013	0.051	2011	0.854
2	32	2006	1.215	1981	0.760	2002	0.916
3	34	1982	0.907	1981	0.265	1982	0.939
4	32	2009	1.215	2013	0.392	2009	0.943
5	33	1999	1.503	2013	0.002	2003	0.925
6	33	1988	1.290	1981	0.867	1986	0.882
7	33	2004	1.203	2004	0.868	2004	0.728
8	33	2004	1.247	2009	0.263	2009	0.521
9	33	1984	0.709	2009	0.425	2009	0.161
10	34	1987	0.254	1987	0.332	1987	0.436
11	33	1989	0.281	2012	0.307	1989	0.443
12	33	1988	0.945	1988	0.807	1988	0.856

En el análisis estacional (Tabla 3-9) y anual (Tabla 3-10) únicamente la prueba SNHT detectó cambios en la serie Villa de Fuente (24290). En el análisis estacional, el punto de cambio fue en la temporada lluviosa en el año 2009. Y en el análisis anual, en el año 2009 con un nivel de confianza del 95%. Las pruebas Pettitt y Buishand no detectaron puntos de cambio significativos.

Tabla 3-9. Pruebas de homogeneidad en las subseries estacionales de caudal (temporada seca y lluviosa)

Estación	Temporada	Prueba	Número de datos	Valor-p	Año de cambio	\bar{x}_1	\bar{x}_2
24290	Seca	Pettitt	31	0.263	1993	2.15	2.01
		SNHT		0.215	2003	1.46	4.17
		Buishand		0.398	2003	1.46	4.17
	Lluvia	Pettitt	31	0.505	1993	2.75	2.27
		SNHT		0.000	2009	2.01	16.78
		Buishand		0.487	2006	1.92	6.31
18232	Seca	Pettitt	31	0.727	1982	5.27	3.45
		SNHT		0.230	1981	5.80	3.48
		Buishand		0.620	1982	5.27	3.45
	Lluvia	Pettitt	33	0.449	2003	40.75	33.88
		SNHT		0.227	1981	57.81	37.43
		Buishand		0.734	2002	40.90	34.21
30016	Seca	Pettitt	29	1.000	2000	132.68	150.9
		SNHT		0.241	2013	136.31	213.12
		Buishand		0.86	2000	132.68	150.90
	Lluvia	Pettitt	32	0.624	2005	288.24	377.93
		SNHT		0.220	2006	289.32	388.21
		Buishand		0.375	2005	288.24	377.93

Tabla 3-10. Pruebas de homogeneidad en series anuales de caudal

Estación	Prueba	Número de datos	Fecha de cambio	Valor-p	\bar{x}_1	\bar{x}_2
29240	Pettitt	31	2003	0.412	1.67	4.38
	SHNT		2009	0.012	1.99	10.91
	Buishand		2003	0.299	1.67	4.38
18232	Pettitt	31	2002	0.769	22.14	18.93
	SHNT		1981	0.149	31.81	20.36
	Buishand		2002	0.861	22.14	18.93
30016	Pettitt	29	1994	0.185	207.81	241.77
	SHNT		2003	0.195	215.03	262.73
	Buishand		2003	0.246	215.03	262.73

3.2. Series climáticas

3.2.1. Disponibilidad de datos climáticos

En la Tabla 3-11 se presenta el número de estaciones con disponibilidad de datos de las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de cada cuenca hidrográfica. La cuenca del río Escondido, únicamente presenta tres estaciones dentro de sus límites, sin embargo, se decidió considerar las estaciones cercanas a la cuenca, con el fin de realizar un control de calidad de datos y posterior sirvan para validar la calidad de información de Daymet. En el Anexo 11 se presenta la disponibilidad espacialmente.

Tabla 3-11. Número de estaciones meteorológicas por cuenca hidrográfica

Cuenca	Número de estaciones		
	Prc	Tmax	Tmin
Río Escondido	8	8	8
Río Amacuzac	43	41	41
Río La Sierra	26	23	23

prc: precipitación, tmax: temperatura máxima, tmin: temperatura mínima

La disponibilidad de datos de las variables climáticas depende de cada estación. En la Tabla 3-12 a Tabla 3-18 se presenta detalladamente la disponibilidad de datos y porcentaje de datos faltantes de las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. En el Anexo 11 se presenta la disponibilidad de datos temporalmente durante el periodo de registro de cada estación climática.

Estaciones meteorológicas de la cuenca Escondido

La disponibilidad de datos de precipitación varía entre 9 a 111 años, con un porcentaje de datos faltantes de 31% y 34%, respectivamente (Tabla 3-12). La estación con menor

cantidad de datos faltantes es la estación 5043 con 18 años de registro histórico, localizada al sureste de la cuenca. La estación 5025 es la más cercana a la estación hidrométrica Villa de Fuente (24290) cuenta con un registro histórico de precipitación desde 1951 hasta 2010, los datos faltantes son alrededor de 37%. El año con menor información es 2009 con apenas un registro de 61 datos de 365 (Anexo 11).

Tabla 3-12. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Escondido, variable precipitación

Estación	Periodo		Valores faltantes		
	Inicio	Fin	Años	n°	%
5002	1907	2017	111	14001	34.53
5025	1951	2010	60	8064	36.80
5042	1932	1976	45	4229	25.73
5043	1954	1971	18	463	7.04
5057	1961	1969	9	1043	31.73
5063	1973	2005	33	3505	29.08
5074	1977	2017	41	4270	28.51
5075	1972	1986	15	1518	27.71

Con respecto a las variables temperatura máxima y mínima, la disponibilidad de datos varían entre 9 a 119 años con datos faltantes de ~32% y 56%, respectivamente. La estación con el menor porcentaje de datos faltantes en ambas variables es la 5043 con 18 años de registro histórico, localizada al sureste de la cuenca. La estación 5025 tiene un registro histórico desde 1892 hasta 2017, sin embargo, los datos faltantes son de aproximadamente el 56%, el registro de información más bajo para ambas variables es el año 2009 con 61 datos de 365.

Tabla 3-13. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Escondido, variables temperatura máxima y mínima

Estación	Temperatura máxima					Temperatura mínima				
	Periodo		Valores faltantes			Periodo		Valores faltantes		
	Inicio	Fin	Años	No	%	Inicio	Fin	Años	No	%
5002	1907	2017	111	14245	35.14	1907	2017	111	14038	34.62
5025	1892	2010	119	24359	56.04	1892	2010	119	24295	55.90
5042	1932	1976	45	6775	41.22	1926	1976	51	8936	47.97
5043	1954	1971	18	657	9.99	1954	1971	18	608	9.25
5057	1961	1969	9	1072	32.61	1961	1969	9	1072	32.61
5063	1975	2005	31	3116	27.52	1975	2005	31	3085	27.25
5074	1977	2017	41	4229	28.24	1977	2017	41	4195	28.01
5075	1972	1986	15	1498	27.34	1972	1986	15	1496	27.30

Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Amacuzac

Los registros históricos de precipitación de las estaciones varían entre 6 a 92 años (Tabla 3-14). La estación con menor cantidad de datos faltantes (4.5%) es la estación 15248 con 39 años de registro histórico, localizada en la parte media baja de la cuenca. La estación 17044 es la más cercana a la estación hidrométrica Amacuzac (18234) (exutorio de la cuenca) tiene un registro histórico desde 1973 hasta 2017 con el ~8% de datos faltantes.

Tabla 3-14. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Amacuzac, variable precipitación

Estación	Periodo		Años	Valores faltantes		Estación	Periodo		Años	Valores faltantes	
	Inicio	Fin		No	%		Inicio	Fin		No	%
12128	1995	2018	24	916	10.45	15270	1980	2018	39	2164	15.19
12171	1976	2018	43	2041	13.00	15272	1980	2018	39	744	5.22
12207	1981	2017	37	6707	49.63	15281	1981	1986	6	1002	45.73
12209	1979	2017	39	6986	49.04	15283	1981	2017	37	5775	42.73
12215	1981	2017	37	1316	9.74	15284	1980	1997	18	555	8.44
12243	1984	2018	35	2417	18.91	15286	1979	1987	9	892	27.14
15016	1961	2017	57	2662	12.79	15292	1979	1987	9	523	15.91
15034	1963	1988	26	768	8.09	15294	1978	1993	16	1502	25.70
15038	1956	2017	62	1819	8.03	15297	1980	2017	38	4856	34.99
15120	1962	2004	43	3107	19.78	15299	1979	2017	39	1397	9.81
15121	1961	1976	16	308	5.27	15301	1979	2018	40	1133	7.75
15134	1961	2017	57	1146	5.50	15305	1979	2017	39	1088	7.64
15136	1961	2002	42	4357	28.40	15307	1983	1989	7	286	11.18
15166	1962	1992	31	688	6.08	15313	1979	1989	11	300	7.47
15180	1978	1991	14	928	18.15	15340	1982	1992	11	338	8.41
15184	1972	2015	44	1501	9.34	15362	1982	1987	6	740	33.77
15198	1974	1984	11	458	11.40	15365	1982	1995	14	496	9.70
15248	1978	2016	39	644	4.52	15366	1982	2017	36	5201	39.55
15253	1978	2000	23	2751	32.75	15371	1985	2017	33	2769	22.97
15254	1978	2016	39	1391	9.76	17007	1925	2016	92	9001	26.79
15255	1978	2016	39	2516	17.66	17044	1973	2017	45	1279	7.78
15259	1978	2017	40	2049	14.02						

Similar que la precipitación la disponibilidad de las variables temperatura máxima y mínima varían entre 6 a 92 años (Tabla 3-15 y Tabla 3-16). La estación con el menor porcentaje de datos faltantes en ambas variables es la 15248 con 39 años de registro histórico, localizada en la parte media baja de la cuenca. La estación 17044 (cercana al exutorio de la cuenca) tiene un registro histórico desde 1973 hasta 2017 con el ~8% de datos faltantes, aquí los años 1973 hasta 1975 registran la menor cantidad de datos, mientras que, los años 2014 y 2016, no registra información.

Tabla 3-15. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Amacuzac, variable temperatura máxima

Estación	Periodo			Valores faltantes		Estación	Periodo			Valores faltantes	
	Inicio	Fin	Años	No	%		Inicio	Fin	Años	No	%
12128	1995	2018	24	619	7.06	15259	1978	2017	40	1957	13.39
12171	1976	2018	43	2731	17.39	15270	1980	2018	39	2169	15.23
12207	1981	2017	37	6543	48.42	15272	1980	2018	39	746	5.24
12209	1979	2017	39	7006	49.18	15281	1981	1986	6	1002	45.73
12215	1981	2017	37	1355	10.03	15283	1981	2017	37	5853	43.31
12243	1984	2018	35	4134	32.34	15284	1981	1997	17	366	5.89
15016	1961	2017	57	2667	12.81	15286	1981	1987	7	847	33.14
15034	1963	1988	26	776	8.17	15292	1981	1987	7	251	9.82
15038	1956	2017	62	1854	8.19	15294	1981	1993	13	1839	38.73
15120	1965	2004	40	3055	20.91	15297	1981	2017	37	5808	42.98
15121	1961	1976	16	278	4.76	15299	1981	2017	37	1176	8.70
15134	1961	2011	51	1808	9.71	15301	1979	2018	40	2526	17.29
15136	1976	2002	27	4560	46.24	15305	1981	2017	37	1250	9.25
15166	1962	1991	30	699	6.38	15307	1983	1989	7	286	11.18
15180	1978	1991	14	931	18.21	15313	1979	1989	11	305	7.59
15184	1972	2015	44	4721	29.38	15362	1982	1987	6	740	33.77
15198	1974	1984	11	458	11.40	15366	1995	2017	23	1632	19.43
15248	1978	2016	39	663	4.65	15371	1985	2017	33	3347	27.77
15253	1981	2000	20	1843	25.23	17007	1925	2016	92	8455	25.16
15254	1998	2016	19	3004	43.29	17044	1973	2017	45	1279	7.78
15255	1978	2016	39	2999	21.05						

Tabla 3-16. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río Amacuzac, variable temperatura mínima

Estación	Periodo			Valores faltantes		Estación	Periodo			Valores faltantes	
	Inicio	Fin	Años	No	%		Inicio	Fin	Años	No	%
12128	1995	2018	24	521	5.94	15259	1978	2017	40	1912	13.09
12171	1976	2018	43	2731	17.39	15270	1980	2018	39	2140	15.02
12207	1981	2017	37	6515	48.21	15272	1980	2018	39	733	5.15
12209	1979	2017	39	6992	49.08	15281	1981	1986	6	1002	45.73
12215	1981	2017	37	1355	10.03	15283	1981	2017	37	5780	42.77
12243	1984	2018	35	3457	27.04	15284	1981	1997	17	365	5.88
15016	1961	2017	57	2650	12.73	15286	1981	1987	7	846	33.10
15034	1963	1988	26	776	8.17	15292	1981	1987	7	249	9.74
15038	1956	2017	62	1843	8.14	15294	1981	1993	13	1831	38.56
15120	1965	2004	40	3039	20.80	15297	1981	2017	37	5771	42.70
15121	1961	1976	16	279	4.77	15299	1981	2017	37	1156	8.55
15134	1961	2017	57	1544	7.42	15301	1979	2018	40	2513	17.20
15136	1976	2002	27	4543	46.07	15305	1981	2017	37	1228	9.09
15166	1962	1992	31	2702	23.86	15307	1983	1989	7	287	11.22
15180	1978	1991	14	929	18.17	15313	1979	1989	11	296	7.37
15184	1972	2015	44	4831	30.06	15362	1982	1987	6	741	33.82
15198	1974	1984	11	458	11.40	15366	1995	2017	23	1570	18.69
15248	1978	2016	39	649	4.56	15371	1985	2017	33	3241	26.89
15253	1981	2000	20	1812	24.80	17007	1925	2016	92	8408	25.02
15254	1998	2016	19	2955	42.58	17044	1973	2017	45	1279	7.78
15255	1978	2016	39	2972	20.86						

Estaciones meteorológicas de la cuenca del río La Sierra

Los registros históricos de precipitación varían entre 4 a 69 años (Tabla 3-17). La estación 7194 tiene menor cantidad de datos faltantes (~1%) con 10 años de registro histórico, localizada en la parte oeste media de la cuenca. La estación 27092 es la más cercana a la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (30016) (exutorio de la cuenca), tiene un registro histórico desde 1983 hasta 2017, los datos faltantes son alrededor del 15%. Los años 1984 a 1986, y en el año 1999 registran 31 datos de 365.

Tabla 3-17. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río La Sierra, variable precipitación

Estación	Periodo		Años	Valores faltantes	
	Inicio	Fin		No	%
7005	1964	1995	32	1019	8.72
7033	1939	1992	54	2595	13.16
7149	1966	2009	44	2194	13.65
7160	1965	2018	54	1307	6.63
7167	1965	2017	53	4960	25.62
7186	1944	2016	73	19127	71.73
7194	1972	1981	10	31	0.85
7198	1926	1970	45	4377	26.63
7207	1972	2015	44	1438	8.95
7217	1973	2017	45	5151	31.34
7246	2012	2016	5	673	36.84
7324	1978	1986	9	243	7.39
7325	1979	1982	4	346	23.68
7373	1987	2015	29	3060	28.89
7389	1984	2015	32	812	6.95
27011	1950	2018	69	1884	7.48
27019	1970	2018	49	1185	6.62
27024	1970	2018	49	4622	25.83
27042	1962	2018	57	1351	6.49
27043	1961	1967	7	276	10.80
27044	1960	2018	59	1854	8.60
27049	1970	2017	48	6939	39.58
27061	1972	2018	47	2695	15.70
27068	1974	2017	44	4532	28.20
27070	1974	2018	45	648	3.94
27094	1985	1999	15	241	4.40

Los registros históricos de la temperatura máxima y mínima varían entre 4 a 71 años (Tabla 3-18). La estación con el menor porcentaje de datos faltantes (~1%) en ambas variables es la 7194 con 10 años de registro histórico, localizada en la parte oeste media de la cuenca. La estación 27092 tiene un registro histórico desde 1983 hasta 2017 con datos faltantes de alrededor del 12%.

Tabla 3-18. Disponibilidad de datos de las estaciones de la cuenca del río La Sierra, variables temperatura máxima y mínima

Estación	Temperatura máxima					Temperatura mínima				
	Periodo		Años	Valores faltantes		Periodo		Años	Valores faltantes	
	Inicio	Fin		No	%	Inicio	Fin		No	%
7005	1964	1995	32	894	7.65	1964	1995	32	889	7.61
7033	1939	1992	54	2705	13.71	1939	1992	54	2596	13.16
7149	1969	2009	41	1684	11.25	1969	2009	41	1627	10.86
7160	1965	2018	54	1229	6.23	1965	2018	54	1252	6.35
7167	1965	2010	46	5865	34.91	1965	2010	46	5853	34.84
7186	1946	2016	71	21229	81.86	1946	2016	71	21275	82.04
7194	1972	1981	10	31	0.85	1972	1981	10	31	0.85
7198	1926	1970	45	4574	27.83	1926	1970	45	4559	27.74
7207	1972	2015	44	1586	9.87	1972	2015	44	1572	9.78
7217	1973	2014	42	5246	34.20	1973	2014	42	5230	34.09
7324	1978	1986	9	256	7.79	1978	1986	9	243	7.39
7325	1979	1982	4	346	23.68	1979	1982	4	346	23.68
7373	1987	2015	29	2997	28.29	1987	2015	29	2990	28.23
7389	1984	2015	32	2324	19.88	1984	2015	32	2324	19.88
27011	1950	2017	68	6458	26.00	1950	2016	67	6822	27.88
27024	1974	2018	45	6180	37.60	1974	2018	45	6177	37.58
27042	1962	2018	57	1604	7.70	1962	2018	57	1609	7.73
27044	1960	2018	59	1765	8.19	1960	2018	59	1776	8.24
27049	1973	2017	45	5079	30.90	1973	2017	45	5079	30.90
27061	1997	2018	22	2650	32.98	1997	2018	22	2650	32.98
27068	1974	2017	44	4559	28.37	1974	2017	44	4559	28.37
27070	1974	2018	45	620	3.77	1974	2018	45	643	3.91
27094	1985	1999	15	299	5.46	1985	1999	15	298	5.44

3.2.2. Diagnóstico de calidad de series climáticas

La Tabla 3-19 a la Tabla 3-21 presentan las estaciones climatológicas únicamente con los diez valores más altos de los criterios: número de ceros, porcentaje de valores atípicos y la variación del promedio (Δ) de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos.

Estaciones meteorológicas de la cuenca Escondido

El diagnóstico de las estaciones climatológicas localizadas en la cuenca del río Escondido, indican que para la variable precipitación la mayoría de las estaciones presentan un elevado número de ceros, lo que no es raro por ser una cuenca con un clima seco árido y seco semiárido y con pocas lluvias durante el año. La estación 5002 fue la estación con mayor presencia de ceros principalmente en los meses de diciembre y enero. El mayor porcentaje de datos atípicos y variación de este fue en las estaciones 5043 y 5057, en el mes de septiembre, mes que se encuentra influenciado por la temporada de tormentas tropicales (Anexo 9). Estas estaciones se encuentran localizadas en la parte alta y media de la cuenca.

Tabla 3-19. Diagnóstico de calidad de datos de precipitación, cuenca del río Escondido

Número de ceros y negativos				Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos					
E	Mes	Ceros	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔP (m ³ /s)
						No	%						
5002	1	2206	0	5043	9	89	16.48	5057	9	17.71	3.54	0	3.54
5002	12	2144	0	5057	9	36	13.33	5043	9	19.48	3.22	0	3.22
5002	3	2078	0	5042	9	175	12.96	5075	5	23.98	2.95	0	2.95
5002	10	2071	0	5043	5	70	12.54	5042	9	16.83	2.74	0	2.74
5002	8	2058	0	5043	8	70	12.54	5063	5	20.15	2.63	0	2.63
5002	11	2029	0	5043	2	62	12.20	5074	9	18.46	2.57	0	2.57
5002	7	1994	0	5043	10	66	11.83	5002	9	20.19	2.55	0	2.55
5002	5	1976	0	5074	5	149	11.72	5074	5	15.37	2.52	0	2.52
5002	6	1955	0	5042	5	161	11.54	5063	9	20.26	2.50	0	2.5
5002	9	1912	0	5025	5	208	11.18	5043	8	16.89	2.38	0	2.38

Neg. Negativos
E Estación
 ΔP Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable precipitación

En la variable temperatura máxima es inusual valores cero y negativos, sin embargo, algunas estaciones como 5025, 5042, 5002 presentaron estos valores, principalmente en los meses de enero, febrero y marzo. En cuanto al porcentaje de valores atípicos fue bajo en todas las estaciones, el mayor valor se da en la estación 5074 con $\sim 4\%$ en el mes de septiembre. A pesar de no presentar un porcentaje alto de valores atípicos, estos logran alterar el promedio de la temperatura máxima, con valores de diferencia menores a $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 3-20. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura máxima, cuenca del río Escondido

Número de ceros y negativos						Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos					
E	Mes	Ceros	E	Mes	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔT
								No	%						
5025	2	4	5025	1	9	5074	9	49	3.98	5057	7	19.63	31.80	32.64	0.84
5075	1	4	5025	2	4	5042	8	50	3.58	5074	9	24.98	35.69	36.31	0.62
5002	1	3	5042	1	3	5043	8	19	3.41	5043	11	6.97	22.55	23.06	0.51
5025	1	3	5025	12	2	5042	7	43	3.08	5074	11	9.90	25.04	25.49	0.45
5025	3	3	5002	1	1	5057	7	8	2.87	5042	9	19.35	31.86	32.29	0.43
5063	1	3	5042	12	1	5043	11	15	2.78	5042	5	21.63	31.44	31.87	0.42
5025	11	2	5057	1	1	5063	8	26	2.71	5002	11	9.38	25.04	25.44	0.39
5025	12	2	5074	1	1	5042	5	36	2.58	5043	10	14.04	28.57	28.93	0.37
5042	11	2	5074	2	1	5043	10	13	2.33	5025	6	15.62	34.17	34.53	0.36
5074	1	2	5074	12	1	5063	2	20	2.28	5057	12	34.00	17.49	17.18	0.31

Neg. Negativos
E Estación
 ΔT Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable temperatura

En la variable temperatura mínima las estaciones 5002, 5074, 5063 presentaron valores cero, principalmente en los meses de diciembre y enero. En cuanto al porcentaje de valores

atípicos fue un poco mayor a los presentados en temperatura máxima, el valor más alto es en el mes de septiembre con ~ 9% en la estación 5063, con un valor de diferencia de ~ 1°C entre el promedio con datos atípico y sin datos atípicos.

Tabla 3-21. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura mínima, cuenca del río Escondido

Número de ceros y negativos			Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos					ΔT			
E	Mes	Ceros	E	Mes	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes		\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)
								No	%						
5002	1	148	5025	1	177	5063	9	86	9.25	5063	9	11.47	18.70	19.73	1.03
5002	12	126	5025	12	125	5042	9	100	6.54	5057	5	4.50	17.48	18.46	0.98
5074	1	66	5002	1	100	5057	5	12	4.30	5042	8	11.67	22.16	22.62	0.47
5002	2	59	5025	2	78	5043	1	21	3.76	5063	7	12.29	21.04	21.48	0.45
5042	1	56	5042	1	73	5063	7	35	3.64	5063	8	13.10	21.15	21.56	0.41
5063	12	51	5063	1	73	5063	6	32	3.44	5063	6	12.06	20.50	20.89	0.39
5063	1	48	5074	12	67	5063	8	31	3.23	5042	9	17.54	20.33	20.70	0.37
5042	12	40	5002	12	66	5043	6	16	2.96	5043	1	12.60	4.47	4.11	0.36
5063	2	40	5074	1	53	5063	3	25	2.60	5074	12	-7.50	6.52	6.81	0.29
5075	1	35	5063	12	50	5075	7	12	2.58	5042	1	21.39	5.73	5.45	0.28

Neg. Negativos

E Estación

ΔT Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable temperatura

Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Amacuzac

El diagnóstico de las estaciones climatológicas para la variable precipitación localizadas en la cuenca del río Amacuzac (Tabla 3-22) indican que la estaciones 17007 y 15038 presentan un elevado número de ceros en los meses de temporada seca (noviembre a mayo), estaciones localizadas en la parte baja y alta de la cuenca, respectivamente. El mayor porcentaje de datos atípicos es en el mes de octubre, siendo la estación 15034 ligeramente más alta que el resto de las estaciones (~23%), sin embargo, las variaciones no fueron grandes, lo que indica que los valores atípicos no afectan en gran medida el promedio medio de la precipitación. La estación con mayor variación fue la estación 12128 con ~5 mm.

Tabla 3-22. Diagnóstico de calidad de datos de precipitación, cuenca del río Amacuzac

Número de ceros y negativos				Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos					
E	Mes	Ceros	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔP
						No	%						
17007	12	2001	0	15034	10	192	23.82	12128	10	22.55	5.49	0.00	5.49
17007	1	1980	0	15248	10	287	23.74	15166	8	37.41	6.97	1.89	5.08
17007	3	1938	0	12128	10	166	22.31	12128	5	18.88	4.54	0.00	4.54
17007	4	1853	0	12128	5	164	22.04	12128	7	52.53	10.60	6.19	4.41
17007	11	1853	0	15313	10	75	21.99	15166	7	36.07	6.81	2.65	4.17
17007	2	1785	0	17044	5	300	21.51	12128	6	46.86	9.13	5.28	3.85
17007	5	1745	0	15166	10	203	21.12	15166	9	37.48	6.19	2.48	3.70
17007	10	1695	0	15340	5	72	21.11	12207	7	43.53	7.93	4.32	3.61
15038	1	1679	0	15365	10	90	20.74	12128	9	63.26	10.72	7.14	3.58
15038	12	1662	0	12171	10	268	20.11	17044	6	38.01	7.14	3.62	3.52

Neg. Negativos
E Estación
 ΔP Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable precipitación

En la variable temperatura máxima, únicamente la estación 15184 presenta valores ceros y no hay presencia de valores negativos. En cuanto al porcentaje de valores atípicos, el valor más alto fue en la estación 15284, sin embargo, la variación entre el promedio de la variable con datos atípicos y sin datos atípicos es baja (~ 0.3). La variación más alta fue en la estación 12128 con ~ 1 °C.

Tabla 3-23. Diagnóstico de calidad de datos de temperatura máxima, cuenca del río Amacuzac

Número de ceros y negativos				Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos					
E	Mes	Ceros	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔT
						No	%						
15184	1	30	0	15284	2	85	17.71	12128	11	37.70	27.54	26.26	1.28
15184	12	30	0	12128	11	74	10.28	12128	12	38.56	26.26	25.01	1.25
15184	2	27	0	15184	12	136	9.97	15362	1	13.70	24.49	25.51	1.02
15184	11	8	0	15272	12	120	9.93	12128	1	36.23	26.18	25.30	0.88
				15272	1	99	8.19	15307	5	18.04	29.13	29.97	0.83
				15184	1	109	7.99	15184	12	15.22	20.36	21.18	0.82
				15136	1	66	7.89	15184	1	14.00	20.36	21.14	0.79
				15292	3	17	7.83	15307	2	18.09	27.24	28.02	0.77
				15120	9	94	7.83	15184	2	6.32	21.18	21.87	0.69
				12128	12	57	7.66	15136	1	25.87	21.85	21.23	0.62

Neg. Negativos
E Estación
 ΔT Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable temperatura

En la variable temperatura mínima las estaciones con mayor cantidad de temperaturas de cero son 15297 y 15255, en los meses de noviembre a marzo. Mientras que la estación 15038 se la considera como estación sospechosa al presentar un elevado número de

temperaturas negativas. En cuanto al porcentaje de valores atípicos, el valor más alto fue en la estación 15299, sin embargo, la variación entre el promedio de la variable con datos atípicos y sin datos atípicos es baja (~ 0.28). La variación más alta fue en la estación 15259 con ~ 1 °C.

Tabla 3-24. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura mínima, cuenca del alto Amacuzac

Número de ceros y negativos			Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos								
E	Mes	Ceros	E	Mes	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔT
								No	%						
15297	1	95	15038	1	550	15299	1	121	10.55	15259	8	-5.05	6.65	7.74	1.09
15297	12	69	15038	12	451	12215	9	102	9.19	15259	7	-4.21	6.94	7.85	0.91
15297	2	67	15038	2	368	15166	6	79	8.49	15166	6	6.11	12.45	13.21	0.77
15255	1	50	15038	3	139	15307	7	17	7.83	15259	9	-4.54	7.21	7.96	0.75
15259	12	46	15038	11	124	15307	12	17	7.83	15283	12	0.55	6.19	6.89	0.70
15259	1	45	15259	8	92	15259	8	94	7.58	15284	2	17.00	7.79	7.09	0.70
15297	3	43	15297	1	74	15366	11	52	7.54	15166	7	5.52	11.83	12.46	0.63
15184	1	36	15301	1	72	15366	8	50	7.01	15259	6	-3.44	7.32	7.94	0.62
15184	12	35	15371	1	65	15166	7	67	6.97	15272	12	24.43	6.78	6.17	0.61
15259	11	33	15259	7	62	15166	4	63	6.77	15259	5	0.55	7.26	7.80	0.54

Neg. Negativos
E Estación
 ΔT Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable temperatura

Estaciones climatológicas de la cuenca La Sierra

El diagnóstico de las estaciones climatológicas para la variable precipitación localizadas en la cuenca del río La Sierra (Tabla 3-25) indican que la estaciones 7160 y 27011 presentan un elevado número de ceros en los meses de temporada seca (noviembre a mayo), estaciones localizadas en la parte media y baja de la cuenca respectivamente. El mayor porcentaje de datos atípicos es en el mes de octubre, siendo la estación 27043 ligeramente más alta que el resto de las estaciones ($\sim 24\%$), sin embargo, la variación en general de los promedios con datos atípicos y sin datos atípicos (ΔP) no es grande, lo que indica que los valores atípicos no influyen en gran medida el promedio medio de la precipitación en este caso específico. La estación con mayor variación fue la estación 7217 con ~ 13 mm.

Tabla 3-25. Diagnóstico de calidad de datos de precipitación, cuenca del río La Sierra

Número de ceros y negativos				Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos					
E	Mes	Ceros	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔP
						No	%						
7160	3	1287	0	27043	3	52	23.96	7217	11	79.84	15.49	2.89	12.60
27011	1	1359	0	7324	4	64	23.70	7217	1	67.40	13.17	1.92	11.25
27011	2	1281	0	7207	3	314	23.02	7217	10	101.71	19.94	8.83	11.12
27011	3	1655	0	27042	3	402	22.75	7217	12	69.57	12.93	2.04	10.89
27011	4	1569	0	7194	4	68	22.67	27043	10	85.78	15.54	5.13	10.41
27011	5	1559	0	7389	3	224	22.58	27068	11	75.28	13.15	2.89	10.25
27011	11	1226	0	7005	1	222	22.38	7186	12	56.41	10.69	1.25	9.44
27011	12	1357	0	27043	5	47	21.66	27068	12	53.97	10.94	1.56	9.38
27042	3	1221	0	7160	12	359	21.45	27068	10	82.18	16.06	6.72	9.35
27044	4	1274	0	27070	3	299	21.43	27042	11	61.18	11.44	2.38	9.06

Neg. Negativos
E Estación
 ΔP Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable precipitación

En la variable temperatura máxima las estaciones analizadas no presentan valores de cero y negativos. El mayor porcentaje de valores atípicos fue en la estación 7373 con el ~11%, en este caso la presencia de valores atípicos sí afectó la variación entre el promedio de la variable con datos atípicos y sin datos atípicos, ~2°C.

Tabla 3-26. Diagnóstico de calidad de datos de temperatura máxima, cuenca del río La Sierra

Número de ceros y negativos				Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos					
E	Mes	Ceros	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔT
						No	%						
-	-	-	-	7373	8	105	11.68	7373	8	32.43	21.82	19.78	2.04
-	-	-	-	7373	9	83	9.54	7373	9	32.44	21.72	19.89	1.83
-	-	-	-	7389	6	67	6.979	7324	3	19.97	30.33	31.19	0.86
-	-	-	-	7324	3	19	6.81	7186	9	20.62	27.51	28.24	0.73
-	-	-	-	7207	4	79	5.985	27011	4	22.54	32.66	33.32	0.66
-	-	-	-	27011	9	114	5.588	7373	3	40.36	22.94	22.33	0.61
-	-	-	-	7005	3	51	5.141	7207	4	15.05	23.71	24.29	0.58
-	-	-	-	27011	8	107	5.076	27011	8	24.49	32.35	32.92	0.57
-	-	-	-	7149	8	63	4.957	27011	3	18.65	30.02	30.56	0.54
-	-	-	-	27011	4	95	4.657	27011	10	20.23	29.84	30.37	0.54

Neg. Negativos
E Estación
 ΔT Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable temperatura

En la variable temperatura mínima las estaciones con mayor cantidad de temperaturas cero son 27011 y 7373, en los meses de octubre a diciembre. La estación 7207 presenta nueve valores negativos, siendo el valor más alto. En cuanto al porcentaje de valores atípicos, el valor más alto fue de ~9% en la estación 27011 en el mes de enero, sin embargo, la

variación entre el promedio de la variable con datos atípicos y sin datos atípicos es de 0.66°C. La variación más alta fue en la estación 7373 con 1 °C.

Tabla 3-27. Diagnóstico de calidad de datos de la temperatura mínima, cuenca del río La Sierra

Número de ceros y negativos					Porcentaje de valores atípicos				Promedio de la variable con valores atípicos y sin valores atípicos						
E	Mes	Ceros	E	Mes	Neg.	E	Mes	Datos atípicos		E	Mes	\bar{x} de datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} con datos atípicos (m ³ /s)	\bar{x} sin datos atípicos (m ³ /s)	ΔT
								No	%						
27011	10	31	7207	11	9	7217	6	119	9.44	7373	9	20.43	12.80	11.80	1.00
27011	12	31	7207	1	7	7325	7	11	8.87	7186	12	24.91	18.03	17.31	0.72
7373	11	16	7149	1	3	7033	4	124	7.65	7217	6	16.82	20.96	21.62	0.66
7033	3	11	7207	2	3	7373	9	66	7.59	27011	10	8.05	20.52	21.12	0.60
7033	2	10	7207	12	3	7389	8	75	7.56	7217	9	16.25	20.90	21.48	0.57
7207	12	7	7325	1	3	7217	9	89	7.06	27011	12	6.23	17.69	18.23	0.54
7325	1	7	7325	12	3	7198	9	94	6.96	7217	8	16.44	20.85	21.35	0.50
7033	1	6	7149	12	2	7217	8	85	6.53	7373	8	20.13	12.64	12.20	0.44
7207	2	6	7207	3	1	7033	6	100	6.17	7217	7	15.52	20.70	21.12	0.42
7325	12	6	-	-	-	7033	5	98	5.85	7198	6	13.02	18.99	19.39	0.40

Neg. Negativos

E Estación

ΔT Diferencia de los \bar{x} sin y con datos atípicos de la variable temperatura

3.2.3. Validación de los datos climáticos Daymet

En la Tabla 3-28 a Tabla 3-30 se presenta la validación de los datos Daymet con base a los datos observados. El orden de validación está ordenado de mayor a menor considerando el criterio NSE para una fácil visualización.

3.2.3.1. Datos climáticos Daymet de la cuenca del río Escondido

En la cuenca del río Escondido las variables temperatura máxima y mínima, tienen un buen ajuste de acuerdo con el coeficiente de determinación (entre 0.87 a 0.99) y NSE (entre 0.83 a 0.98). En precipitación su correlación es menor, varía entre 0.39 a 0.77; y el NSE, entre 0.38 a 0.75 (Tabla 3-28). En general, las variables analizadas presentaron sobreestimación.

Tabla 3-28. Resultados de validación de los datos Daymet, cuenca del río alto Escondido, periodo 1980-2010

Estación	Precipitación				Estación	Temperatura máxima				Estación	Temperatura mínima			
	R ²	NSE	PBIAS	MAE		R ²	NSE	PBIAS	MAE		R ²	NSE	PBIAS	MAE
5025	0.78	0.75	20.73	13.95	5025	0.99	0.98	1.59	0.88	5002	0.92	0.91	-4.72	1.39
5063	0.77	0.75	15.48	17.03	5074	0.97	0.91	5.33	1.75	5025	0.99	0.98	4.15	0.79
5002	0.66	0.64	6.90	17.14	5063	0.93	0.90	-4.56	1.68	5063	0.93	0.92	-3.8	1.16
5074	0.57	0.53	16.98	20.85	5002	0.90	0.88	3.49	1.85	5074	0.98	0.92	10.54	1.74
5075	0.39	0.38	6.08	28.77	5075	0.87	0.83	4.89	2.56	5075	0.92	0.89	-2.06	1.5

3.2.3.2. Datos climáticos Daymet de la cuenca del río Amacuzac

En la cuenca del río de Amacuzac, la variable precipitación tiene un mejor ajuste comparado con las variables temperatura (Tabla 3-29). Aproximadamente el 80% de las estaciones presenta un coeficiente de correlación superior al 0.8 y el ~75% de las estaciones un NSE superior al 0.8. En la temperatura máxima, el coeficiente de determinación es superior a 0.8 es de ~20% y en el NSE solo una estación presenta un valor igual a 0.8. La mayoría de las estaciones (~75%) presentan valores NSE entre 0.3 a 0.7. En la temperatura mínima, el coeficiente de correlación superior a 0.8 es de ~30% y en el NSE únicamente dos estaciones presentan un valor igual o mayor a 0.8. El 50% de las estaciones presentan valores NSE entre 0.3 a 0.7.

Tabla 3-29. Resultados de validación de los datos Daymet, cuenca del río Amacuzac, periodo 1980-2010

Estación	Precipitación				Estación	Temperatura máxima				Estación	Temperatura mínima			
	R ²	NSE	PBIAS	MAE		R ²	NSE	PBIAS	mae		R ²	NSE	PBIAS	MAE
12171	0.97	0.96	7.25	12.73	15166	0.87	0.8	2.19	0.75	17007	0.95	0.86	5.87	1.09
15292	0.96	0.96	-1.58	12.29	15248	0.79	0.77	0.13	1.2	15248	0.82	0.80	0.49	0.92
15307	0.95	0.95	-2.44	16.56	15034	0.92	0.76	-3.42	0.88	15180	0.86	0.79	4.85	0.79
17007	0.93	0.93	-1.46	15.61	15120	0.77	0.74	0.65	0.96	15120	0.8	0.76	2.79	1.12
17044	0.94	0.93	-2.27	14.89	15299	0.78	0.73	-1.83	0.86	17044	0.79	0.76	3.29	1.29
15299	0.93	0.92	6.16	18.81	15016	0.73	0.72	0.06	0.88	12171	0.88	0.71	-7.24	1.5
15180	0.93	0.91	-7.95	14.35	17044	0.73	0.71	-1.5	1.29	15034	0.84	0.7	-10.94	1.23
15305	0.93	0.91	11.80	19.19	15371	0.68	0.66	-1.03	0.76	15016	0.71	0.69	2.99	1.26
15136	0.92	0.90	-5.93	21.10	12171	0.85	0.63	4.33	1.43	15371	0.73	0.67	-5.38	1.37
15248	0.94	0.90	-10.93	17.02	12128	0.64	0.58	2.48	1.54	15272	0.68	0.63	-6.87	1.28
15286	0.91	0.90	7.20	25.68	15180	0.86	0.55	4.24	1.23	15038	0.78	0.62	-20.19	1.57
15313	0.90	0.90	-0.32	16.61	15305	0.71	0.52	3.88	1.21	15253	0.64	0.6	-6.15	1.45
15120	0.90	0.89	9.74	20.68	15284	0.53	0.5	0.35	0.96	15292	0.85	0.58	16.24	1.17
15340	0.88	0.88	1.59	23.17	15292	0.8	0.5	-4.44	0.94	15286	0.66	0.55	-1.83	1.02
15034	0.87	0.87	-0.52	15.06	15255	0.64	0.47	2.63	1.06	15305	0.71	0.52	-16.63	1.85
15184	0.87	0.87	0.79	23.68	15301	0.5	0.46	-1.05	1.2	15259	0.44	0.42	3.15	2.07
12215	0.91	0.86	-15.00	20.03	12243	0.69	0.45	-4.89	1.66	15366	0.51	0.42	2.13	1.2
12243	0.87	0.86	-2.84	20.51	15253	0.71	0.41	3.98	1.26	12243	0.37	0.36	-0.42	1.89
15284	0.89	0.86	-9.89	19.38	15270	0.66	0.4	4.01	1.24	15166	0.49	0.36	0.85	1.27
15297	0.86	0.86	-0.61	20.52	15286	0.62	0.4	-1.94	0.8	15299	0.81	0.34	13.96	1.34
15259	0.85	0.85	2.82	26.67	15272	0.65	0.37	5.7	2.06	15301	0.64	0.33	-22.57	1.95
15016	0.83	0.83	2.75	22.05	15134	0.74	0.36	6.27	1.93	15184	0.32	0.29	3.2	1.81
15253	0.85	0.83	-9.77	19.85	15366	0.53	0.32	-5.92	2.2	15284	0.43	0.29	4.94	1.3
15270	0.89	0.83	-10.57	20.01	12215	0.89	0.26	7.1	2.31	15255	0.34	0.2	-18.96	2.11
15365	0.83	0.82	0.29	21.95	15259	0.14	0.04	9.35	4.88	15294	0.63	0.11	32.04	2.54
15272	0.79	0.73	-3.77	22.14	17007	0.58	-0.09	7.02	2.58	15270	0.52	-0.02	23.09	2.92
15166	0.72	0.69	9.36	49.12	15038	0.51	-0.13	-6.39	1.44	12128	0.55	-0.29	18.69	3.24
12128	0.7	0.68	12.60	34.03	15184	0.41	-0.2	-8.59	2.18	12215	0.68	-0.31	11.73	1.98
15134	0.74	0.66	-22.42	24.72	15313	0.66	-1.35	10.09	2.4	15134	0.77	-0.34	18.34	2.21
15255	0.8	0.66	-20.50	24.55	15294	0.21	-1.46	10.72	2.29	15313	0.81	-0.53	31.65	3.16
15301	0.83	0.66	-14.37	25.01	15307	0.2	-6.38	19.86	5.78	15307	0.84	-0.64	-22.63	1.4
15038	0.68	0.65	-22.38	35.97										
15371	0.45	0.42	-5.05	34.93										
15294	0.59	0.26	-44.12	31.22										

3.2.3.3. Datos climáticos Daymet de la cuenca del río La Sierra

En la variable precipitación aproximadamente el 70% de las estaciones presenta un coeficiente de correlación y NSE superior al 0.8. En la temperatura máxima, el ~60% de estaciones presenta coeficientes de determinación iguales o superiores a 0.8; mientras que, el ~50% de las estaciones presentan un NSE superior a 0.8. En la temperatura mínima, el ~60% de estaciones presenta coeficientes de correlación iguales o superiores a 0.8; y el ~45% de las estaciones presentan un NSE superior a 0.8.

Tabla 3-30. Resultados de validación de los datos Daymet, cuenca del río Sierra, periodo 1980-2010

Estación	Precipitación				Estación	Temperatura máxima				Estación	Temperatura mínima			
	R ²	NSE	PBIAS	MAE		R ²	NSE	PBIAS	MAE		R ²	NSE	PBIAS	MAE
7324	0.93	0.93	-0.66	22.07	27042	0.95	0.94	0.71	0.53	7324	0.97	0.93	2.55	0.54
27061	0.94	0.93	3.61	37.76	27061	0.93	0.93	0.33	0.61	7217	0.91	0.90	-0.90	0.52
27068	0.9	0.90	3.8	44.69	7005	0.92	0.90	-1.12	0.58	7005	0.93	0.89	-1.22	0.59
27042	0.89	0.88	7.64	47.28	7324	0.97	0.90	2.10	0.66	27094	0.9	0.89	0.03	0.56
7389	0.88	0.87	2.78	29.06	27044	0.88	0.87	-0.39	0.92	27044	0.88	0.84	1.88	0.62
27044	0.91	0.87	-9.44	47.4	27094	0.91	0.87	1.72	0.8	27068	0.92	0.84	2.39	0.59
27070	0.89	0.87	7.55	45.96	27070	0.89	0.84	2.07	0.94	7389	0.86	0.83	-2.36	0.75
27019	0.86	0.86	-2.15	47.26	27024	0.93	0.83	2.66	1.02	27070	0.93	0.78	3.48	0.80
7149	0.86	0.85	-4.95	28.4	27068	0.84	0.82	-1.2	0.8	27042	0.93	0.69	4.37	0.97
7207	0.88	0.85	-0.16	32.86	7167	0.8	0.80	0.65	0.83	7149	0.72	0.68	4.32	1.11
7160	0.86	0.83	9.24	40.36	7160	0.77	0.74	-1.39	1.08	27061	0.92	0.67	4.98	1.09
27094	0.85	0.83	9.33	51.78	7217	0.69	0.68	1.34	1.42	7160	0.54	0.50	-3.3	1.49
7167	0.81	0.79	-6.33	51.6	27011	0.6	0.56	-1.94	1.27	27011	0.54	0.50	-1.97	0.91
27011	0.77	0.76	-6.89	57.81	7207	0.53	0.49	-1.89	1.78	7207	0.51	0.40	-3.59	1.31
7033	0.76	0.75	-9.49	44.5	7149	0.5	0.48	-1.01	1.37	27024	0.8	0.39	6.26	1.37
7373	0.75	0.74	5.38	55.18	7389	0.54	0.35	2.91	1.13	27049	0.45	0.04	-3.79	1.24
7217	0.78	0.71	15.29	93.63	7373	0.74	0.33	12.54	3.56	7373	0.71	-0.22	33.09	3.81
7005	0.83	0.55	-38.15	57.29	27049	0.63	0.07	7.11	2.66	7167	0.51	-0.92	13.75	2.76
27024	0.72	0.26	-42.16	101.28	7033	0.84	-1.15	12.99	2.99	7033	0.82	-2.19	33.24	3.9

3.2.4. Análisis exploratorio de los datos climáticos Daymet

Cuenca del río La Sierra

La exploración de la variabilidad climática y un análisis de tendencias permitieron una mejor comprensión de la evolución de los datos y su distribución espacial. En la Figura 3-9 se presenta la distribución espacial de las variables climáticas analizadas. La precipitación espacial anual varía entre 1300-3900 mm, siendo mayor en la parte baja de la cuenca. La temperatura máxima varía entre 18-33°C; mientras que, la variación de temperatura mínima es de 6 a 12°C. Las temperaturas más altas se distribuyen en la parte baja de la cuenca.

Las subseries mensuales (Figura 3-9) indican un patrón marcado de estacionalidad, el periodo lluvioso empieza en junio y termina en noviembre; mientras que, el periodo con menor precipitaciones es de diciembre a mayo (periodo seco). Las temperaturas son más altas durante los meses de abril a agosto

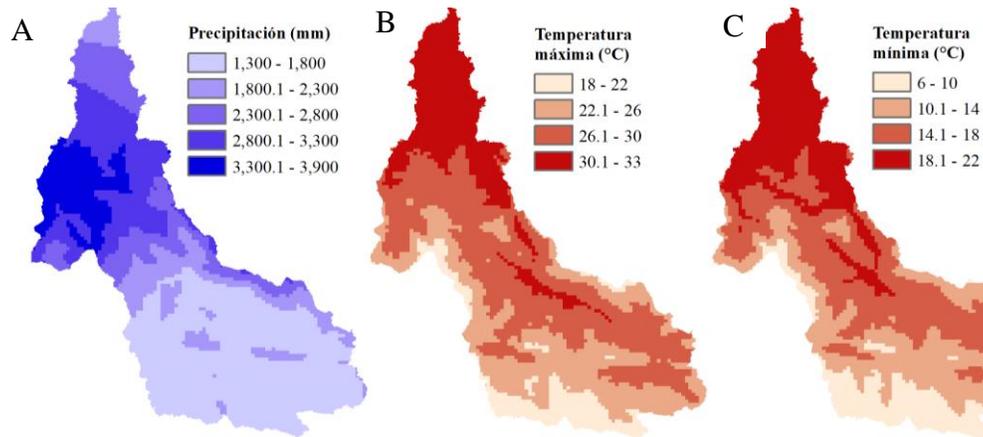


Figura 3-9. Distribución espacial de los datos climáticos Daymet en la cuenca La Sierra, periodo 1980-2020. A) Precipitación, B) Temperatura máxima y, C) Temperatura mínima

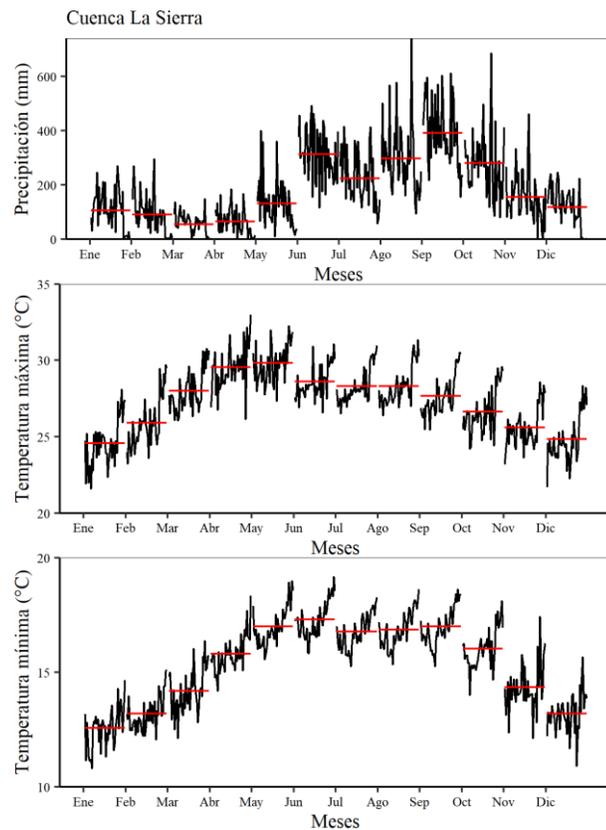


Figura 3-10. Subseries mensuales de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de la cuenca La Sierra, periodo 1980-2020. La línea roja es la mediana de cada subserie

En el análisis anual, todas las variables climáticas presentaron tendencias significativas. La precipitación tendió a disminuir, temperatura máxima y mínima a incrementar. Se puede observar puntos de cambios drásticos a partir del año 2012.

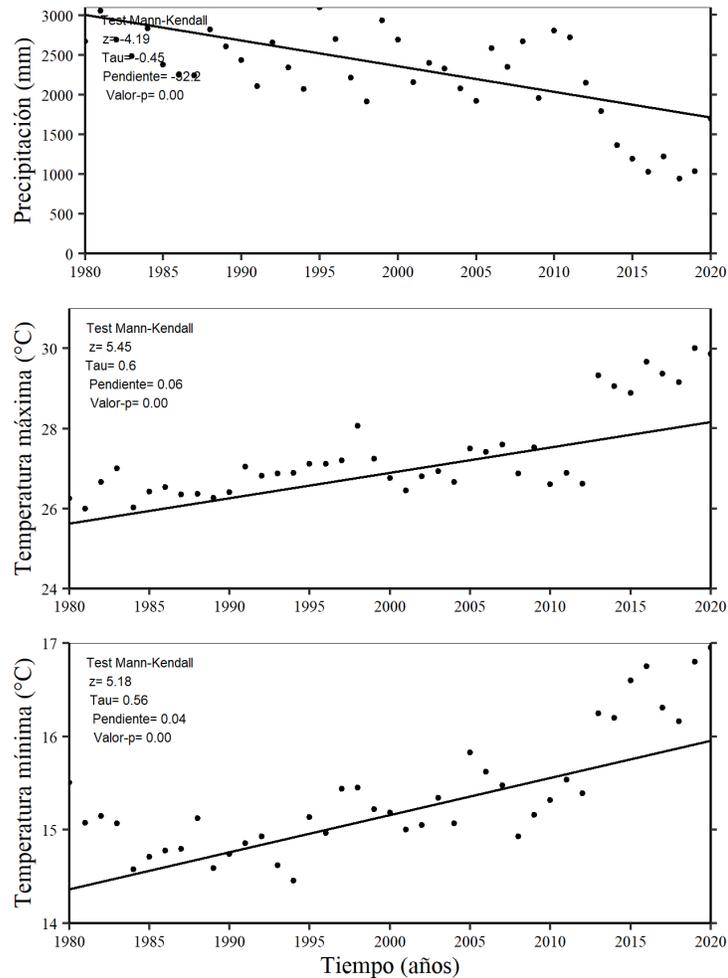


Figura 3-11. Análisis de tendencias anuales de los datos climáticos Daymet en la cuenca La Sierra, periodo 1980-2020.

Cuenca del río Amacuzac

En la Figura 3-12 se presenta la distribución espacial de las variables climáticas analizadas. La precipitación espacial anual varía entre 900-1500 mm, siendo mayor en la parte alta y menor en la parte media de la cuenca. La temperatura máxima varía entre 9-33°C; mientras que, la variación de temperatura mínima es de -1.5 a 16°C. Las temperaturas más altas se distribuyen en la parte baja media-baja de la cuenca.

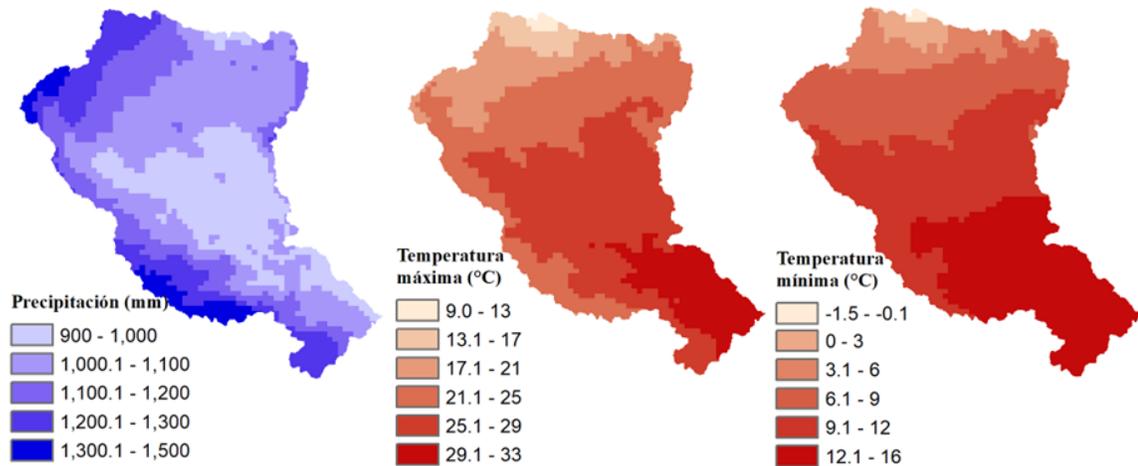


Figura 3-12. Distribución espacial de los datos climáticos Daymet en la cuenca del río Amacuzac, periodo 1980-2020. A) Precipitación, B) Temperatura máxima y, C) Temperatura mínima.

Las subseries mensuales (Figura 3-13) indican un patrón marcado de estacionalidad, el periodo lluvioso empieza en mayo y termina en octubre; mientras que, el periodo seco empieza en noviembre y termina en abril. La temperatura máxima es más alta durante los meses de marzo a mayo. La temperatura mínima sus valores máximos son de abril-octubre.

Las variables climáticas, precipitación y temperatura máxima, en el análisis anual presentaron tendencias significativas (Figura 3-14). La precipitación tendió a disminuir y, temperatura máxima a incrementar. Igual que en la cuenca La Sierra se detectó un punto de cambio a partir del año 2012.

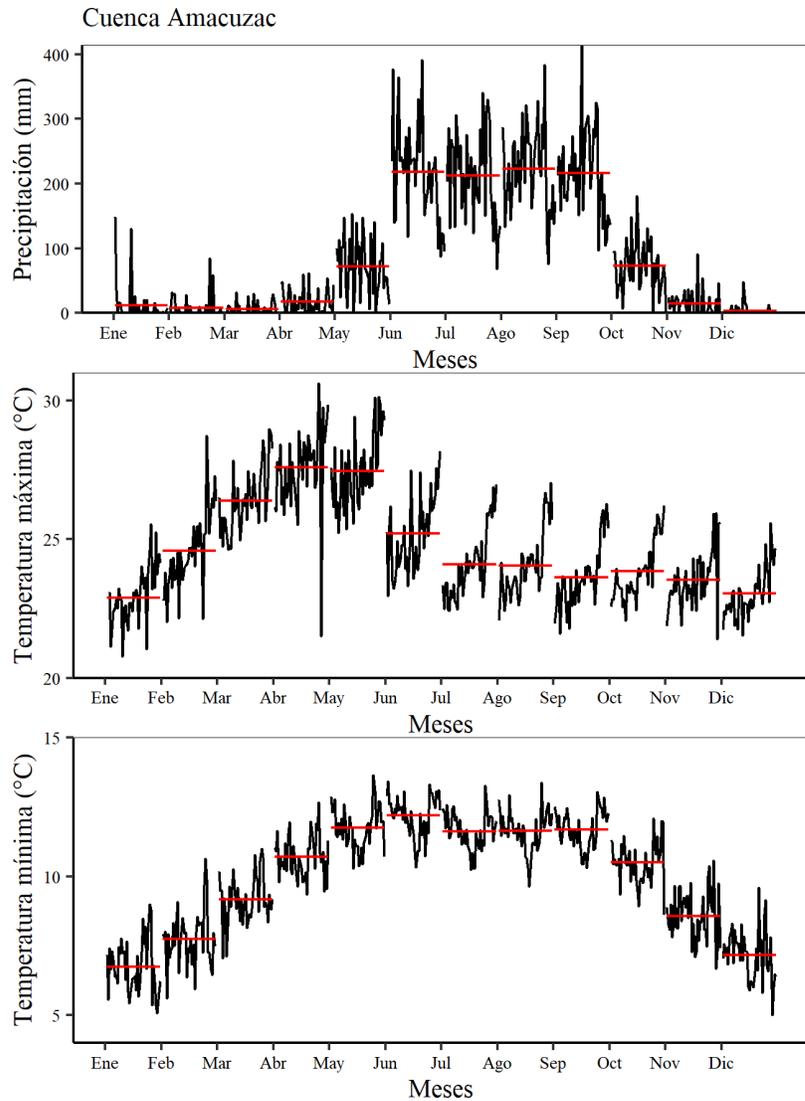


Figura 3-13. Subseries mensuales de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de la cuenca del río Amacuzac, periodo 1980-2020. La línea roja es la mediana de cada subserie.

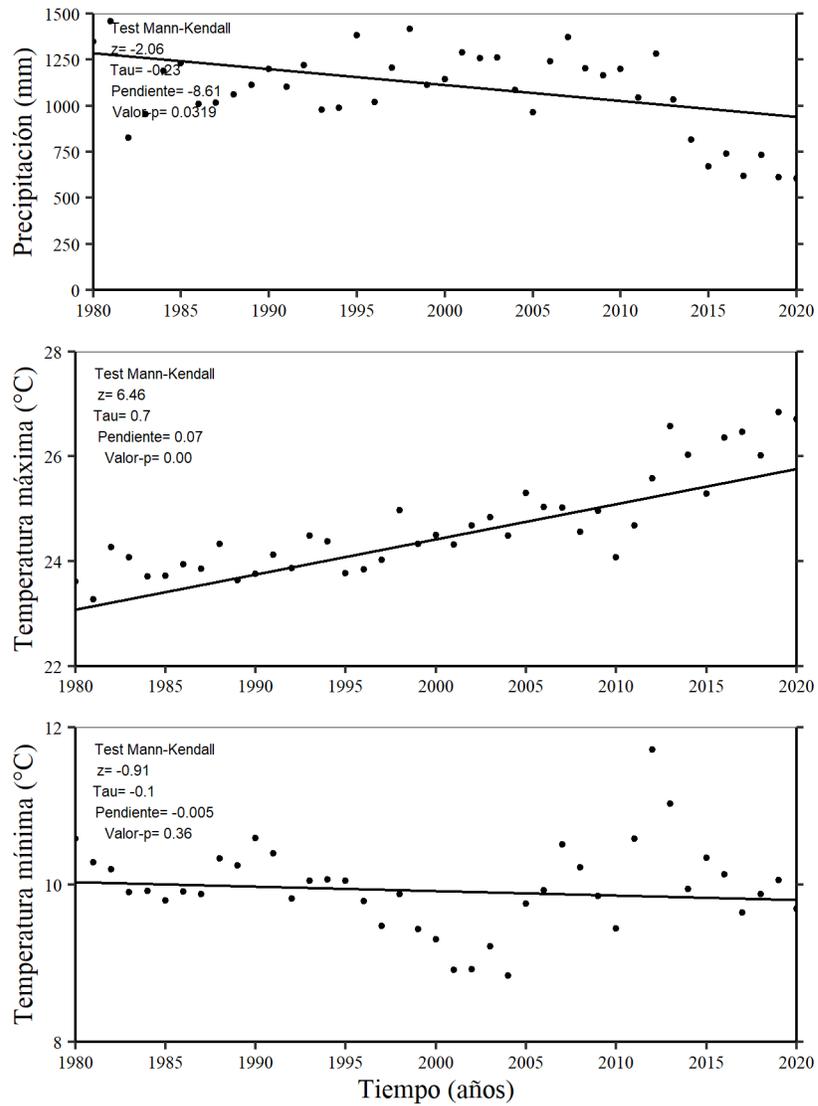


Figura 3-14. Análisis de tendencias anuales de los datos climáticos Daymet en la cuenca Amacuzac, periodo 1980-2020.

3.2.5. Proyecciones climáticas

En la Figura 3-15 se presenta un ejemplo del resultado del proceso de *downscale* que se realizó a las proyecciones climáticas con resolución gruesa del modelo GFDL-ESM4.

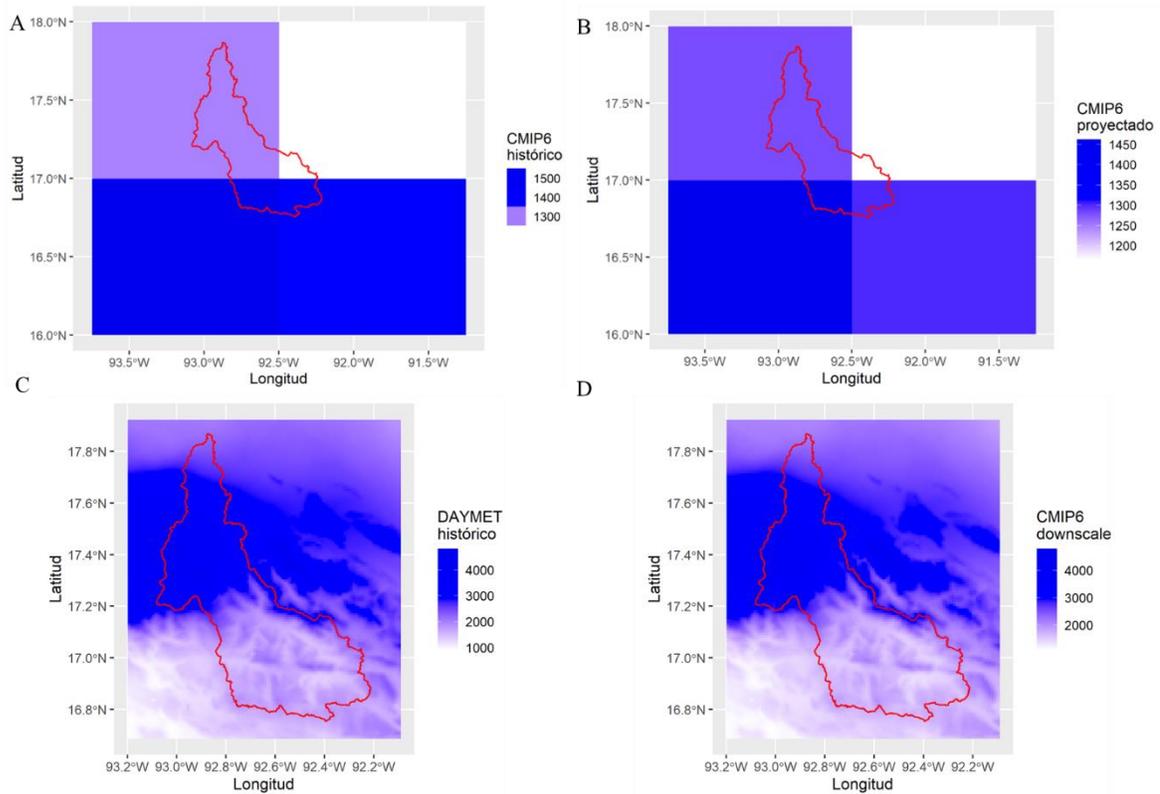


Figura 3-15. Ejemplo del resultado del proceso de *downscale* en la cuenca del río Sierra. A) Precipitación anual histórica del modelo GFDL-ESM4, resolución gruesa. B) Precipitación anual futura del modelo GFDL-ESM4, resolución gruesa. C) Precipitación anual histórica Daymet, resolución fina. D) Precipitación anual futura con *downscale*

Los promedios anuales de las precipitaciones futuras no tuvieron gran cambio en ambas cuencas con respecto a las precipitaciones históricas. En la cuenca del río La Sierra la precipitación media anual disminuyó 11 mm; mientras que, en la cuenca del río Amacuzac incrementó 34 mm. Por otro lado, la temperatura de las medias máxima y mínima tuvieron un gran incremento, en la cuenca La Sierra incrementaron en 2.3°C y 1.6°C, respectivamente. En la cuenca del río Amacuzac, la temperatura máxima y mínima incrementaron en 2.2°C y 1.8°C, respectivamente (Tabla 3-31).

Tabla 3-31. Promedios anuales de los datos históricos Daymet y datos futuros del modelo GFDL-ESM4

	Cuenca del río La Sierra		Cuenca del río Amacuzac	
	Periodo histórico	Periodo de proyección	Periodo histórico	Periodo de proyección
	[1980-2012]	[2040-2072]	[1980-2012]	[2040-2072]
Precipitación (mm)	2463	2452	1161	1195
Temperatura máxima (°C)	26.8	29.1	24.3	26.5
Temperatura mínima (°C)	15.1	16.7	9.9	11.7

En la cuenca del río La Sierra, las distribuciones de las precipitaciones mensuales son similares, la mediana histórica y proyectada es de 173 mm y de 166 mm, respectivamente (Figura 3-16). La precipitación proyectada presenta menor variabilidad con respecto a la precipitación histórica, el 50% de los datos se concentra entre el rango 114 mm a 270 mm. En la Figura 3-17 se presenta la comparación de las distribuciones de las precipitaciones por mes durante el año. Se observa que únicamente en el mes de octubre las precipitaciones proyectadas son mayores que las precipitaciones las históricas.

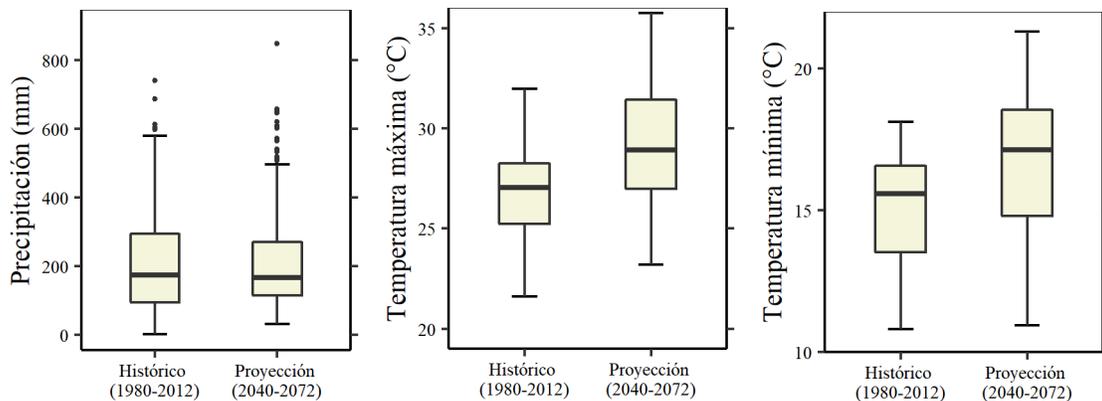


Figura 3-16. Comparación de las variables climáticas históricas Daymet con las variables climáticas proyectadas del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río La Sierra

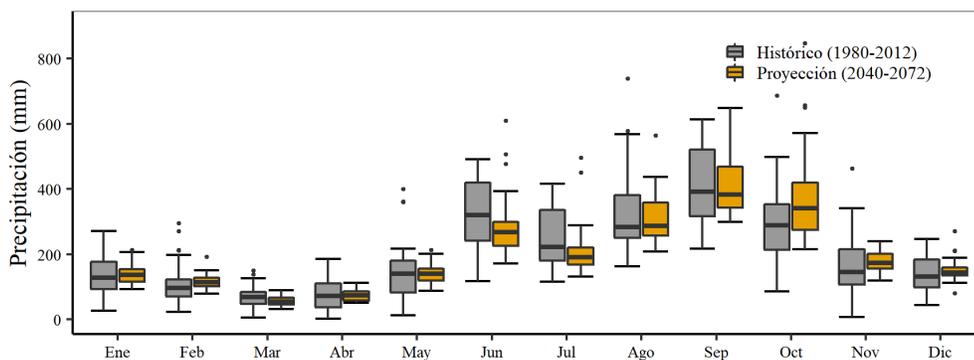


Figura 3-17. Comparación mensual de la precipitación histórica Daymet y la precipitación futura del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río La Sierra

La diferencia de la temperatura máxima de la mediana histórica (27°C) y la mediana proyectada (28.9°C) es de 1.9°C . El 50% de los datos proyectados se concentra entre los 27°C a 31.4°C (Figura 3-16). En Figura 3-18 se puede observar la comparación por mes, se observa el incremento de la temperatura máxima en todos los meses, siendo mayor el incremento en los meses de julio y agosto.

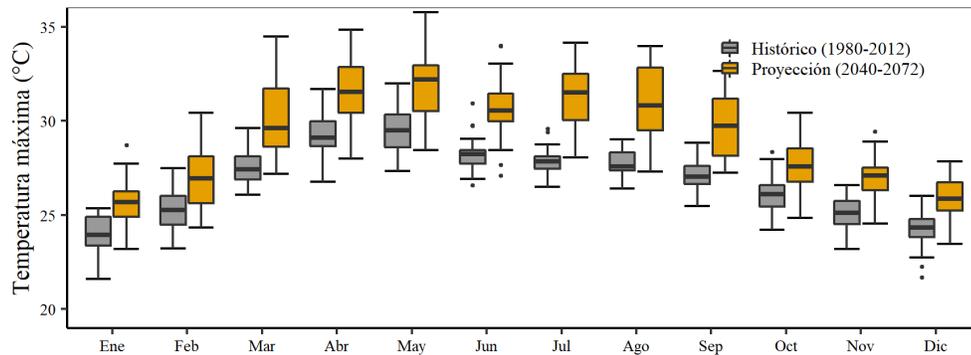


Figura 3-18. Comparación mensual de la temperatura máxima Daymet y la temperatura máxima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río La Sierra

Las medianas de la temperatura mínima entre histórico y proyectado es de 15.6°C y 17.1°C , respectivamente, la diferencia es de 1.5°C . La distribución de los datos de temperatura mínima proyectada tiene mayor variabilidad que la temperatura máxima proyectada, el 50% de los datos se concentran entre 14.8°C y 18.5°C (Figura 3-16). En la Figura 3-19 presenta la comparación por mes, en la cual se observa mayor variabilidad de la temperatura mínima proyectada.

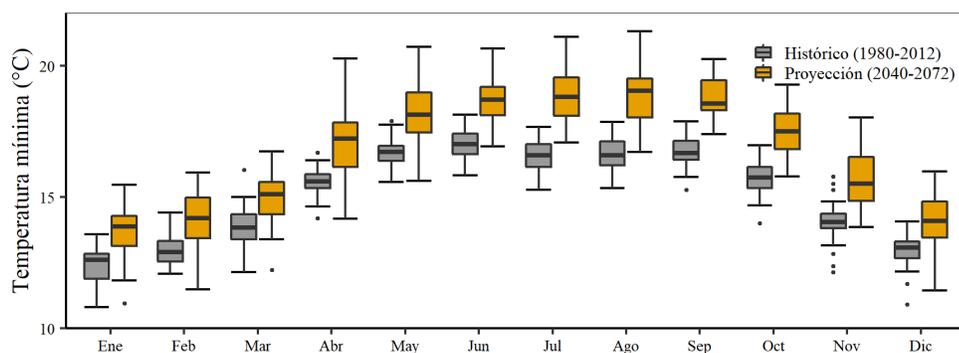


Figura 3-19. Comparación mensual de la temperatura mínima Daymet y la temperatura mínima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río La Sierra

En la cuenca del río Amacuzac, la mediana de precipitación proyectada (44 mm) es ligeramente mayor a la precipitación histórica (38 mm) (Figura 3-16). Los meses de junio a

octubre presentan mayor variabilidad de la precipitación proyectada con respecto a la histórica (Figura 3-21).

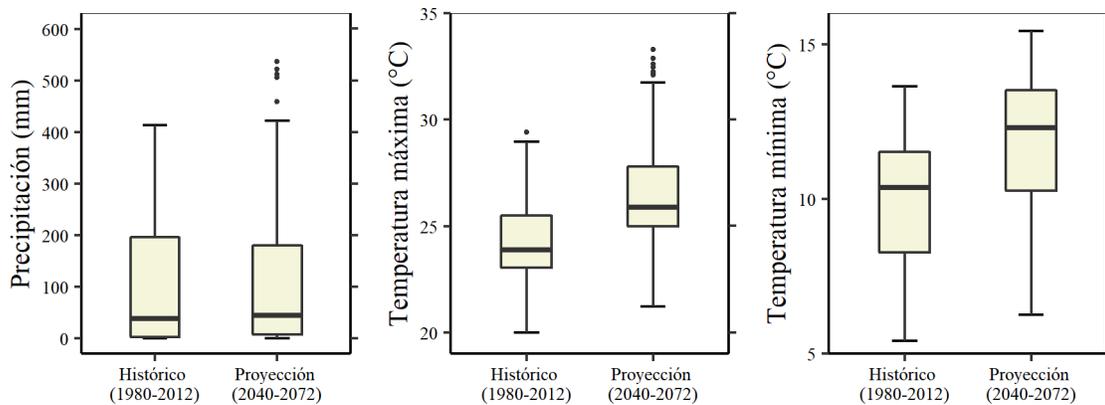


Figura 3-20. Comparación de las variables climáticas históricas Daymet con las variables climáticas proyectadas del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río Amacuzac

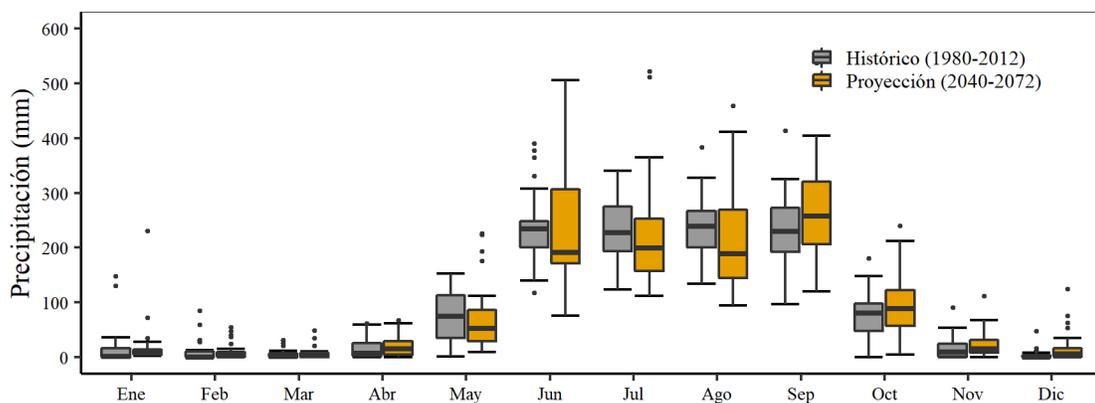


Figura 3-21. Comparación mensual de la precipitación histórica Daymet y la precipitación futura del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río Amacuzac

La diferencia de la temperatura máxima de la mediana histórica (23.9°C) y la mediana proyectada (25.9°C) es de 2°C. El 50% de los datos proyectados se concentra entre los 25°C a 27.8°C (Figura 3-20). En la Figura 3-22 se presenta la comparación por mes, se observa el incremento de la temperatura máxima proyectada en todos los meses, con mayor variabilidad en los meses de febrero a junio.

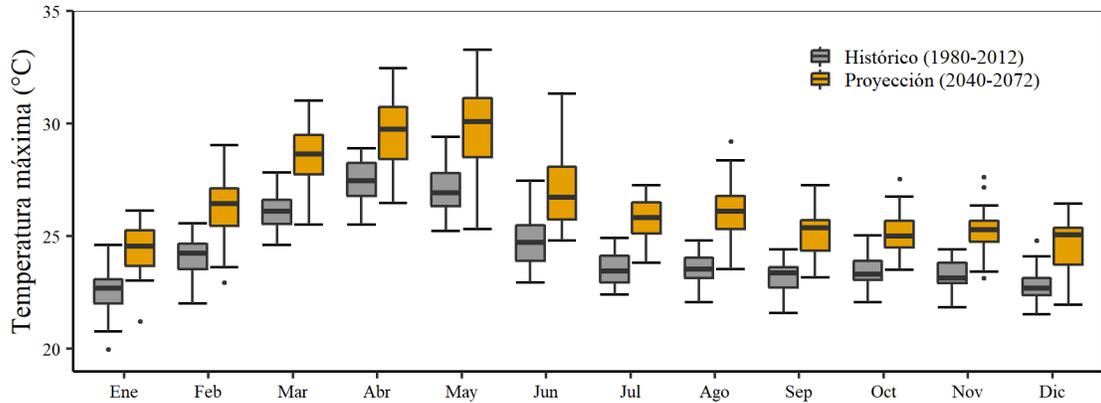


Figura 3-22. Comparación mensual de la temperatura máxima Daymet y la temperatura máxima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río Amacuzac

Las medianas de la temperatura mínima entre histórico y proyectado es de 10.4°C y 12.3°C , respectivamente, la diferencia es de 1.9°C (Figura 3-16). El mes con mayor temperatura es junio tanto en los datos históricos y proyectados (Figura 3-23), y los meses más fríos son diciembre y enero.

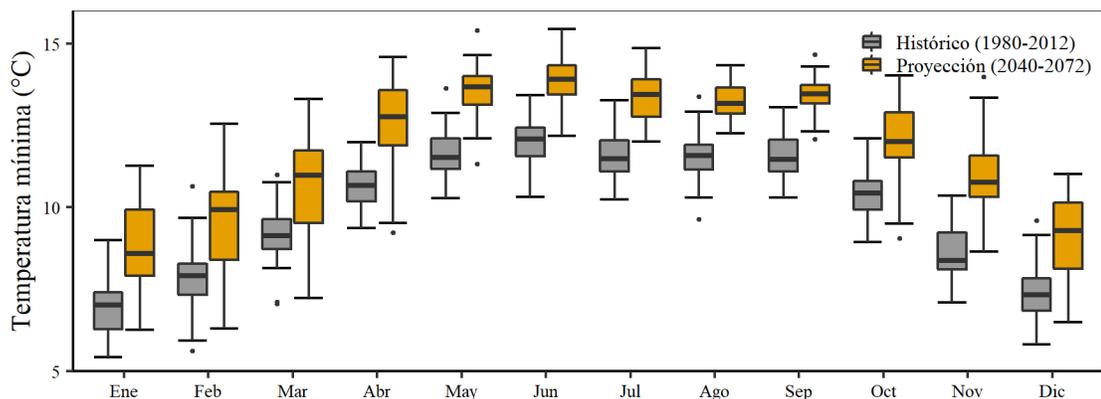


Figura 3-23. Comparación mensual de la temperatura mínima Daymet y la temperatura mínima del modelo GFDL-ESM4 con proceso de *downscale*, en la cuenca del río Amacuzac

3.3. Series de uso y cobertura del suelo de INEGI

En esta sección se destacan los principales cambios de uso y coberturas del suelo de las cuencas en estudio mediante un análisis de las series generadas por INEGI. Los mapas analizados corresponden a los periodos 1979-1991 (1985), 1993-1999 (1996), 2002-2005 (2003), 2006-2010 (2008), 2011-2013 (2012) y 2014-2016 (2015), y 2017-2021 (2019).

3.3.1. Homogenización de información

En la cuenca del río La Sierra se identificaron 21 clases de coberturas vegetales, las cuales fueron agrupadas en 10 clases (Tabla 3-32). En la cuenca del río Amacuzac se identificaron 28 clases de coberturas vegetales, y fueron agrupadas en 12 clases (Tabla 3-33). Esta reclasificación generalizó sus características permitiendo un mejor análisis de cambios. Los porcentajes de las áreas de coberturas en la tabla corresponden al UCS de la serie I, sirvieron como datos referencia. En las Figura 3-24 y Figura 3-25 se presentan los mapas con la con las clases agrupadas.

Tabla 3-32. Reclasificación de las clases de uso y cobertura de la cuenca del río La Sierra

N°	Coberturas	Coberturas INEGI	Grupo de vegetación	Grupos de información de Uso del Suelo y Vegetación
1	Área desprovista de vegetación	Área desprovista de vegetación	-	Información complementaria
2	Urbano	Urbano	-	Información complementaria
3	Bosque mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña (17%), vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña (26%), vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña (57%).	Bosque mesófilo de montaña	Información ecológica, florística y fisonómica
4	Bosque de pino	Bosque de pino (17%), bosque de pino-encino (14%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino (40%), vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino (11%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (19%).	Bosque de coníferas	Información ecológica, florística y fisonómica
5	Bosque de encino	Bosque de encino (20%), bosque de encino-pino (63%), vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino (17%).	Bosque de encino	Información ecológica, florística y fisonómica
6	Cuerpo de agua	Agua	-	Información complementaria
7	Pastizal	Pastizal cultivado (predominante, ~99%), pastizal inducido	Pastizal	Información ecológica, florística y fisonómica
8	Agricultura	Agricultura de temporal (predominante, ~99%), agricultura de riego	Área agrícola	Información agrícola, pecuaria y forestal
9	Selva perennifolia	Selva alta perennifolia (23%), selva baja perennifolia (3%), vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia (30%), vegetación secundaria arbórea de selva baja perennifolia (1%), vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia (44%).	Selva perennifolia	Información ecológica, florística y fisonómica
10	Tular	Tular	Vegetación hidrófila	Información ecológica, florística y fisonómica

Tabla 3-33. Reclasificación de las clases de uso y cobertura de la cuenca Amacuzac

N°	Coberturas	Coberturas INEGI	Grupo de vegetación	Grupos de información de Uso del Suelo y Vegetación
1	Urbano	Urbano	-	Información complementaria
2	Bosque de oyamel	Bosque de oyamel (91%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel (9%).	Bosque de coníferas	Información ecológica, florística y fisonómica
3	Bosque de táscate	Bosque de táscate (29%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate (71%).	Bosque de coníferas	Información ecológica, florística y fisonómica
4	Bosque mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña (96%), vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña (1%), vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña (3%).	Bosque mesófilo de montaña	Información ecológica, florística y fisonómica
5	Bosque de pino	Bosque de pino (44%), bosque de pino-encino (43%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino (4%), vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino (2%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (3%), vegetación secundaria arbórea de bosque de pino (4%).	Bosque de coníferas	Información ecológica, florística y fisonómica
6	Bosque de encino	Bosque de encino (47%), bosque de encino-pino (27%), vegetación secundaria arbórea de bosque de encino (5%), vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino (2%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (17%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino (2%).	Bosque de encino	Información ecológica, florística y fisonómica
7	Área desprovista de vegetación	Área desprovista de vegetación	-	Información complementaria
8	Cuerpo de agua	Agua	-	Información complementaria
9	Pastizal	Pastizal inducido (95%), paradera de alta montaña (5%).	Pastizal	Información ecológica, florística y fisonómica
10	Agricultura de riego	Agricultura de riego	Área agrícola	Información agrícola, pecuaria y forestal
11	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal	Área agrícola	Información agrícola, pecuaria y forestal
12	Selva caducifolia	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia (14%), vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia (86%).	Selva caducifolia	Información agrícola, pecuaria y forestal

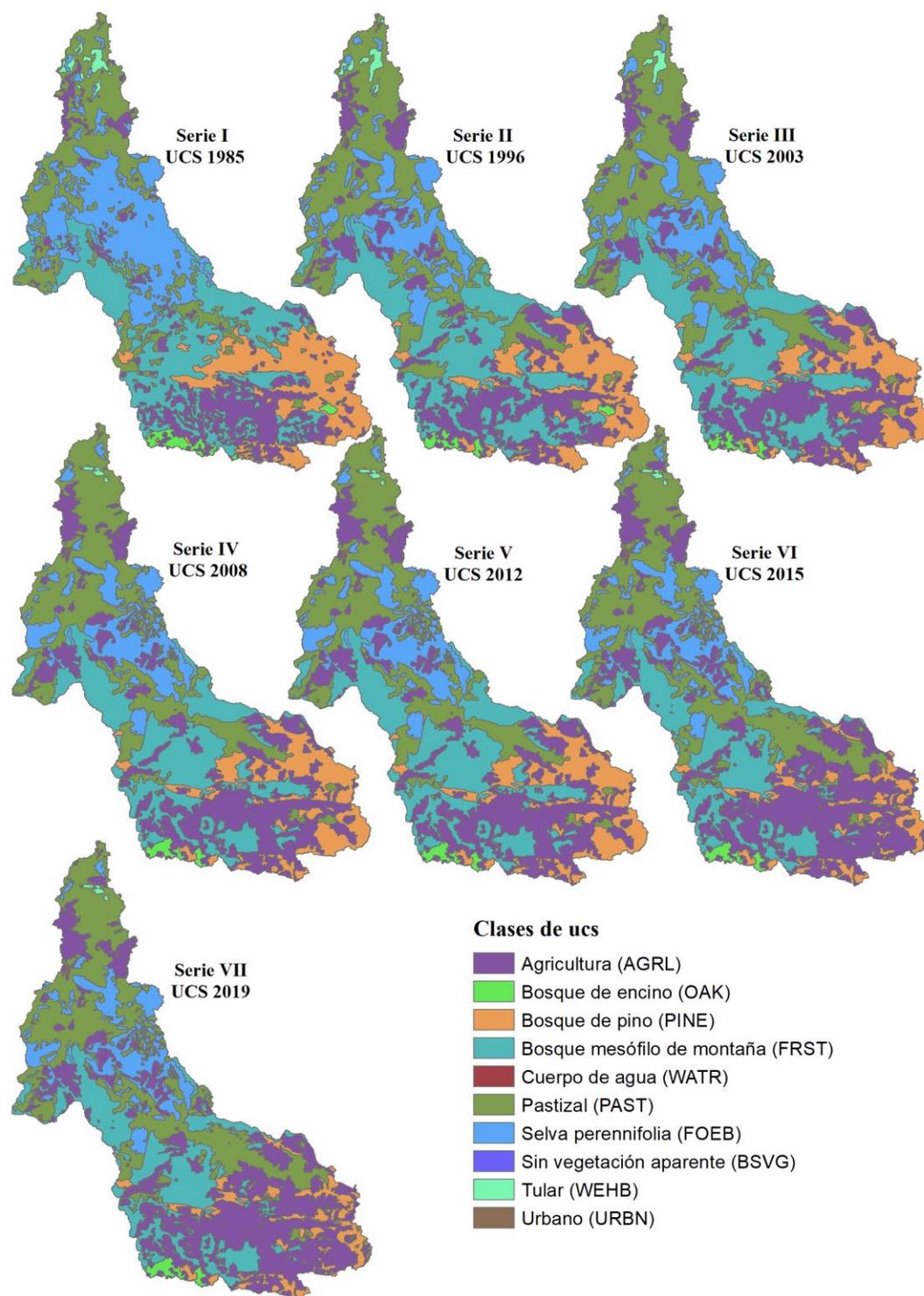


Figura 3-24. Mapas de uso y cobertura del suelo (UCS) de la cuenca del río La Sierra.
Fuente: elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía

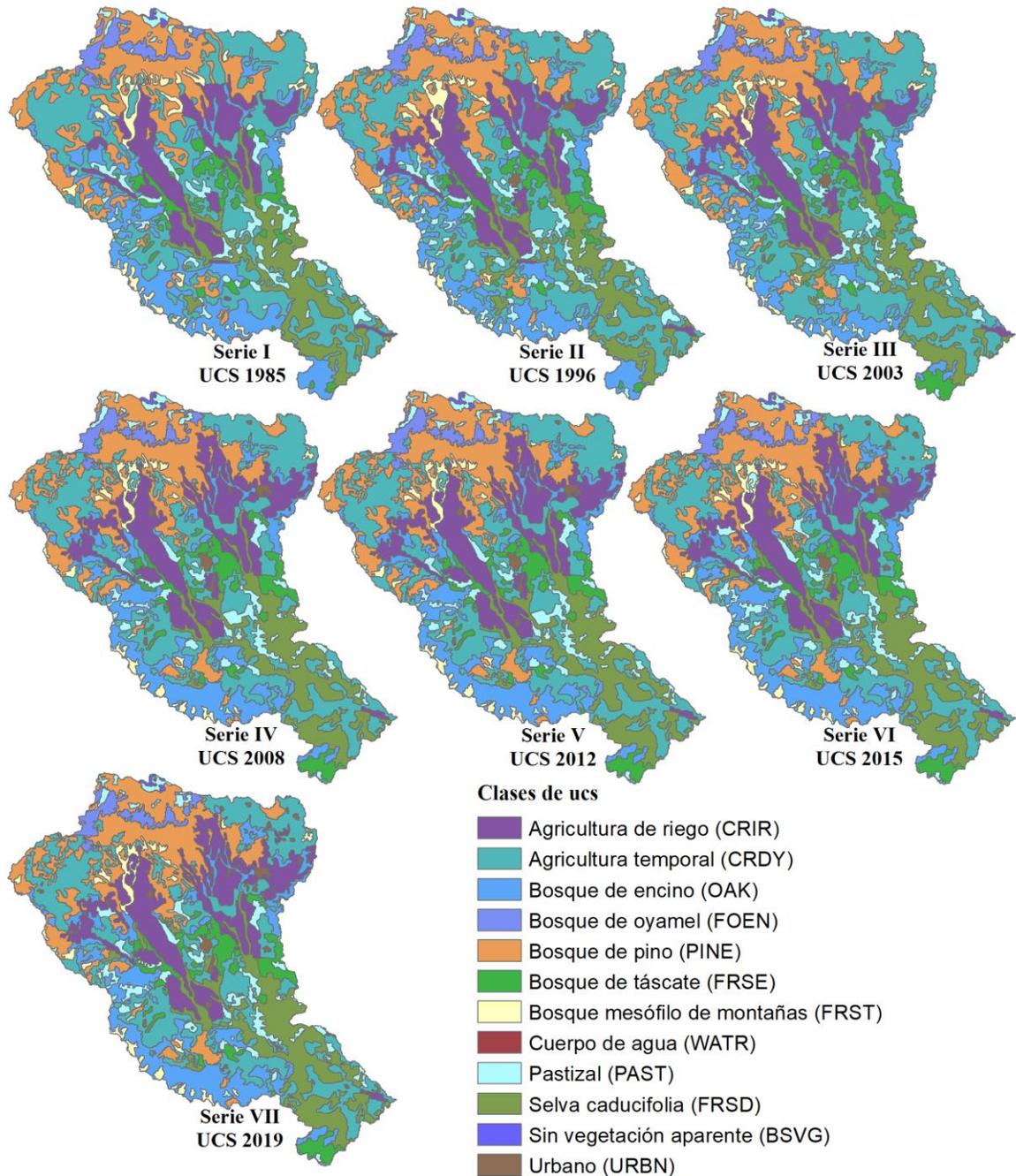


Figura 3-25. Mapas de uso y cobertura del suelo (UCS) de la cuenca del río Amacuzac
 Fuente: elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía

3.3.2. Análisis de cambio del uso y cobertura del suelo de la cuenca del río La Sierra

Se presentan las áreas de las clases de UCS en km² en la Tabla 3-34 y el porcentaje correspondiente en la Figura 3-26. En la cuenca del río La Sierra los UCS de mayor

predominancia en el año 1985 fueron bosque mesófilo de montaña (25%), pastizal (21%), selva perennifolia (21%), agricultura (16%) y pino (15%).

Tabla 3-34 Áreas de los usos/coberturas del suelo de los diferentes periodos, cuenca río La Sierra

Uso/cobertura	Uso y cobertura del suelo (km ²)						
	1985	1996	2003	2008	2012	2015	2019
Área desprovista de vegetación	0	0	0	0	0	0.6	0.6
Urbano	0	5	6	10	10	34	35
Bosque mesófilo de montaña	1095	1123	1055	1018	1016	827	801
Bosque de pino	633	518	485	492	492	273	274
Bosque de encino	57	42	34	38	38	38	39
Cuerpo de agua	1	1	1	1	1	1	0
Pastizal	915	1148	1217	1170	1156	1270	1287
Agricultura	708	960	1051	1107	1122	1415	1422
Selva perennifolia	905	525	485	511	511	488	486
Tular	40	34	21	9	9	9	9

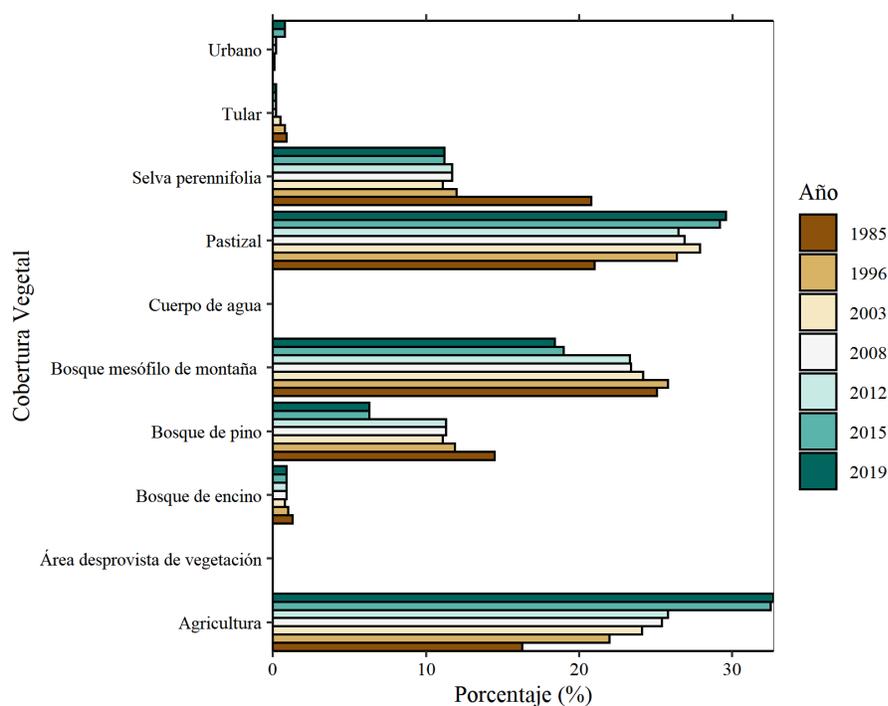


Figura 3-26. Áreas en porcentaje de las clases de uso/cobertura del suelo de los diferentes periodos, cuenca La Sierra

En la

Figura 3-27. se presenta la evolución de los cambios de los UCS con respecto al mapa de inicio (1985). A continuación se hace una breve descripción de los principales cambios entre los mapas de los años 1985 y 2019. La agricultura mostró un incremento del ~100%

con respecto a su área inicial (Figura 3-27A), esto representó un incremento del 16% con respecto al área de la cuenca (Figura 3-27B). La cobertura selva perennifolia tuvo una pérdida del $\sim -47\%$ con respecto a su área inicial y -10% con relación al área de la cuenca. Seguido de pastizal que incrementó un $\sim 41\%$ con respecto a su área inicial y $\sim 9\%$ con relación al área de la cuenca. La cobertura de pino disminuyó un $\sim -47\%$ con respecto a su área inicial, lo que representó un cambio del -8% con respecto al área de la cuenca. Por último, el bosque mesófila de montaña disminuyó un $\sim -26\%$ con respecto a su área inicial y un $\sim -7\%$ con relación al área de la cuenca.

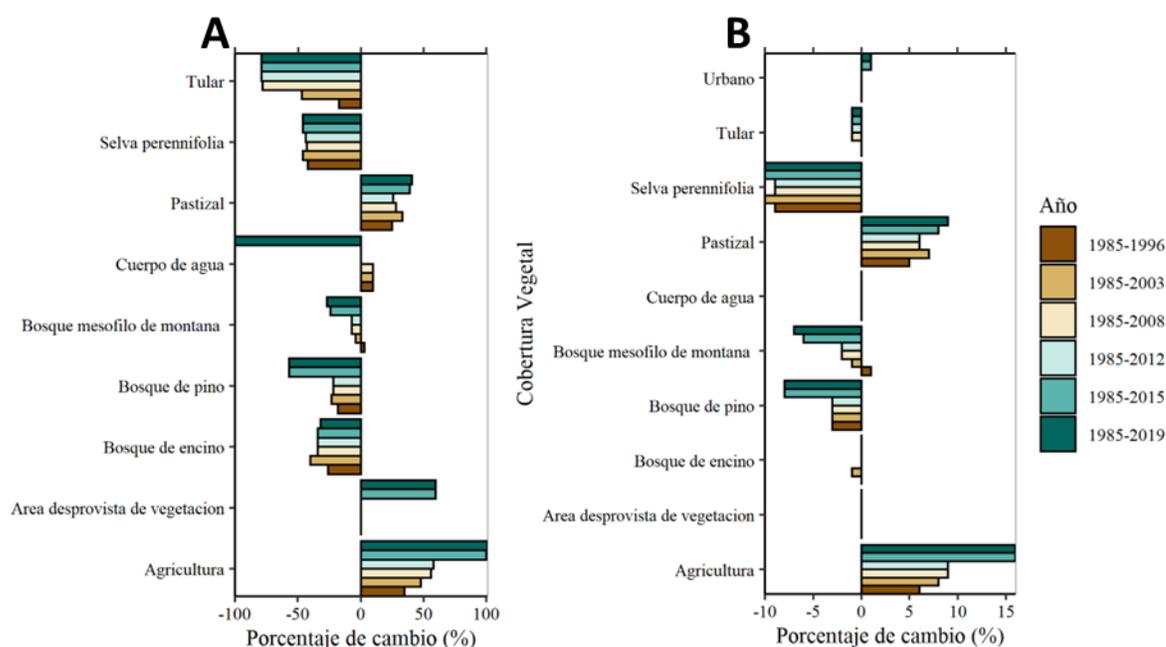


Figura 3-27. Porcentajes de los cambios del uso y cobertura del suelo con respecto al área inicial de la cobertura/uso (A) y con respecto al área de la cuenca del río Sierra (B)

El resto de coberturas presentaron cambios entre -1 a 1% con respecto al área de la cuenca. A pesar que estos cambios son pequeños con relación al área de la cuenca, no lo son con relación al área de su cobertura inicial. Por ejemplo, la cobertura tular, el porcentaje de cambio con relación al área de la cuenca fue de $\sim -1\%$; mientras que, la reducción en relación a su área inicial de la cobertura fue $\sim -79\%$. El uso urbano no fue identificado en el primer mapa de UCS analizado (1985) por lo que no se pudo obtener el porcentaje de cambio, razón por la que no se la graficó en la Figura 3-27A.

La agricultura (Figura 3-28A) y pastizal (Figura 3-28C) ganaron área principalmente al reemplazar las coberturas de bosque de pino, bosque mesófilo de montaña y selva perennifolia. Sin embargo el uso pastizal también perdió área por la agricultura. La cobertura selva perennifolia perdió área al ser reemplazada principalmente por pastizal seguido de la agricultura (Figura 3-28B). Las coberturas de bosque de pino (Figura 3-28D) y bosque mesófilo de montaña (Figura 3-28E) perdieron área al ser reemplazadas principalmente por agricultura seguido de pastizal.

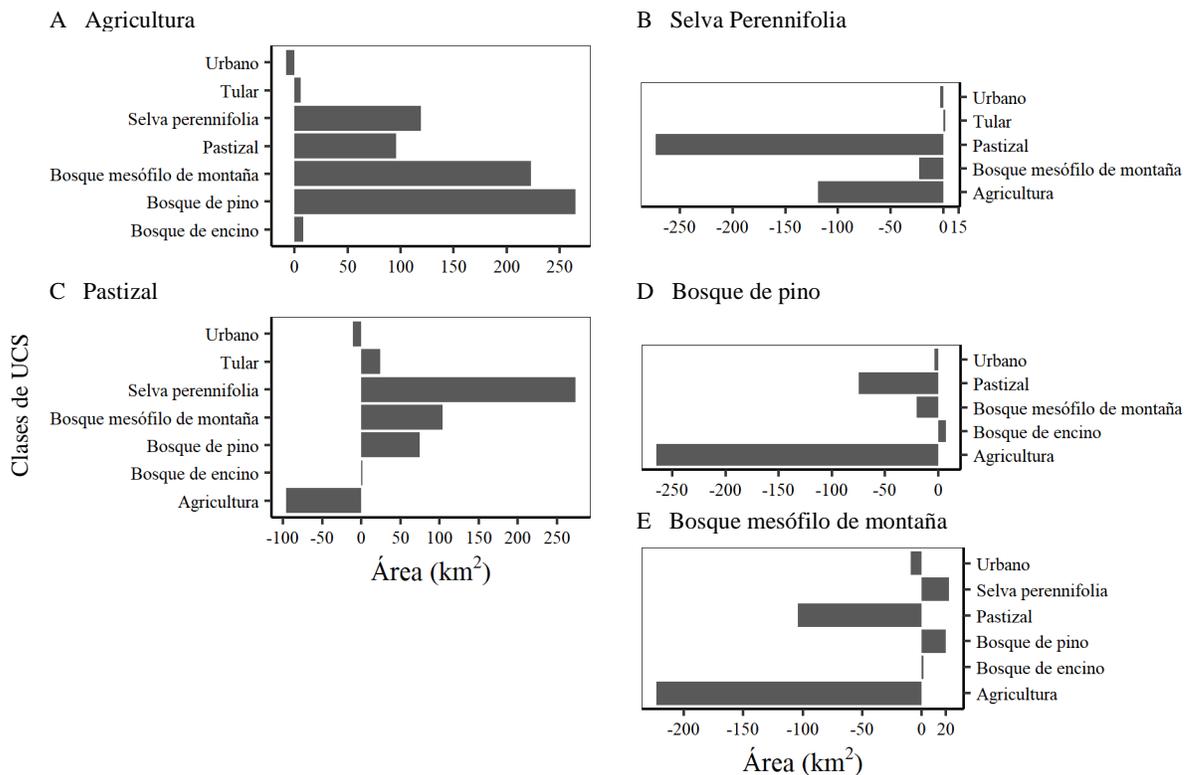


Figura 3-28. Contribuciones netas de cambio en las coberturas de la cuenca del río La Sierra: A) agricultura, B) selva perennifolia, C) pastizal, D) bosque de pino y, E) bosque mesófilo de montaña

3.3.3. Análisis de cambio del uso y cobertura del suelo de la cuenca del río Amacuzac

En la cuenca Amacuzac las coberturas de mayor predominancia en el año 1985 fueron agricultura de temporal (31%), bosque de pino (16%), bosque de encino (14%) agricultura de riego (12%) y selva caducifolia (11%) (Tabla 3-35, Figura 3-29).

Tabla 3-35. Áreas de los usos/coberturas del suelo de los diferentes periodos, cuenca del río Amacuzac

Cobertura/uso	Área (km ²)						
	1985	1996	2003	2008	2012	2015	2019
Urbano	0.1	10.7	10.7	14.7	14.6	19.5	26.4
Bosque de oyamel	60.5	53.0	52.7	52.4	52.5	54.0	53.4
Bosque de táscate	101.2	96.8	108.4	117.0	117.0	116.8	118.8
Bosque mesófilo de montañas	74.9	63.1	59.1	56.4	56.4	57.2	57.6
Bosque de pino	364.9	371.8	369.3	387.4	387.7	375.6	376.3
Bosque de encino	313.5	272.9	227.3	284.9	285.8	288.5	288.3
Sin vegetación aparente	3.1	3.4	3.3	3.3	3.3	3.6	3.8
Cuerpo de agua	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3
Pastizal	133.0	134.1	114.8	119.0	117.7	131.2	125.7
Agricultura de riego	258.8	296.6	300.8	331.1	330.9	329.2	332.0
Agricultura temporal	685.3	702.5	764.0	619.4	619.1	590.1	581.2
Selva caducifolia	250.6	241.0	235.6	260.4	260.8	280.0	282.4

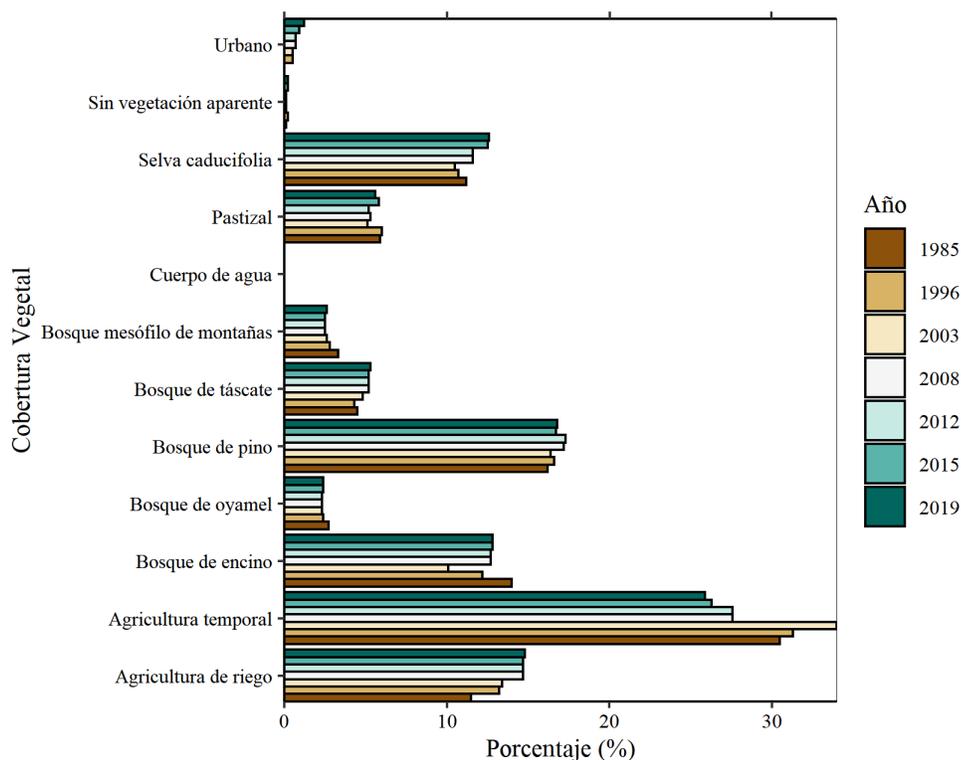


Figura 3-29. Áreas en porcentaje de las clases de uso/coertura del suelo de los diferentes periodos, cuenca del río Amacuzac

En la Figura 3-30 se presenta la evolución de los cambios de los UCS con respecto al mapa de inicio (1985). A continuación se hace una breve descripción de los principales cambios entre los mapas de los años 1985 y 2019. Las coberturas con mayor cambio en la cuenca Amacuzac fueron agricultura temporal y agricultura de riego. La agricultura temporal

muestra una reducción del área del \sim -15% con relación a su área inicial (Figura 3-30A), esto representó un cambio del -5% con respecto al área de la cuenca (Figura 3-30B). A la vez, la cuenca presenta un incremento de la agricultura de riego del \sim 28% con relación a su área inicial (Figura 3-30A) y \sim 3% con relación al área de la cuenca (Figura 3-30B). El uso urbano y cobertura selva caducifolia presentan un incremento con respecto al total del área de la cuenca de 1.2% y 1.4%, respectivamente. Otras coberturas como bosque de oyamel y bosque mesófilo presentan reducciones con relación a su área inicial de \sim -12% y \sim - 23% respectivamente; sin embargo, estos cambios son menores a -1% con relación al área de la cuenca.

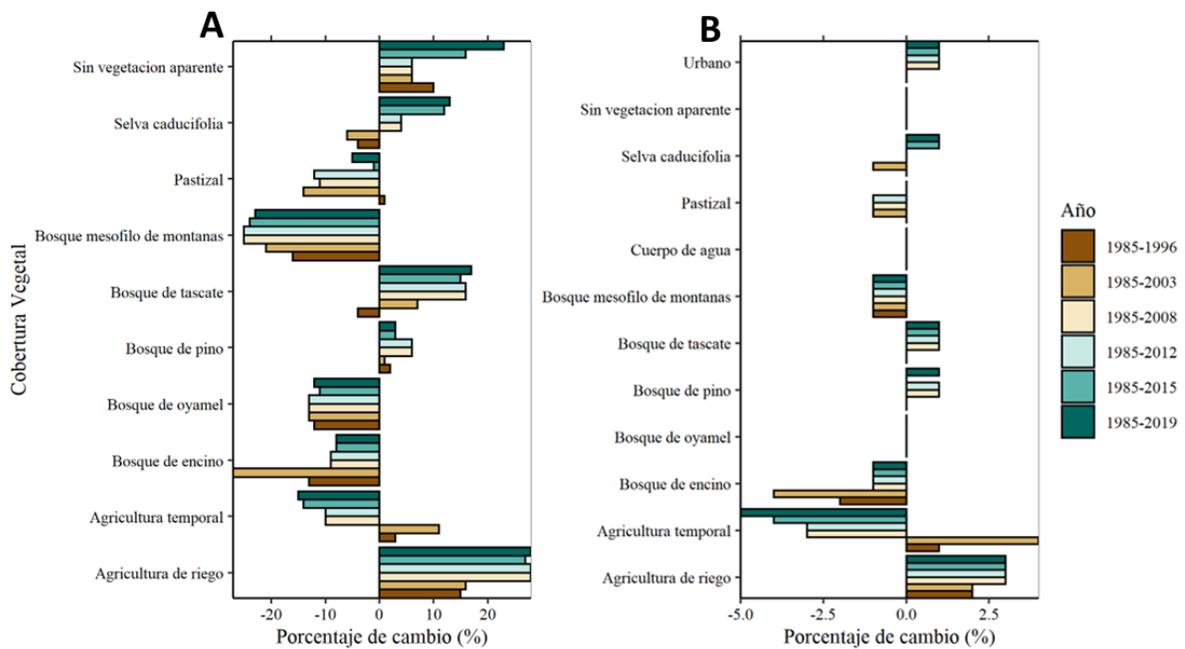


Figura 3-30. Porcentajes de los cambios del uso y cobertura del suelo con respecto al área inicial de la cobertura/uso (A) y con respecto al área de la cuenca del río Amacuzac (B)

El área que perdió la agricultura temporal fue destinada principalmente para agricultura de riego, selva caducifolia y urbano (Figura 3-31A). La agricultura de riego ganó área principalmente por reemplazar la agricultura de temporal y perdió área por el uso urbano (Figura 3-31B). La cobertura selva caducifolia ganó área al reemplazar el uso agricultura temporal seguido de pastizal (Figura 3-31C). El uso urbano ganó área al reemplazar área de agricultura temporal seguido de agricultura de riego (Figura 3-31D). Bosque de encino pierde área al ser reemplazada por bosque de tascate, seguido de agricultura de riego; también ganó área al reemplazar área de agricultura temporal (Figura 3-31E).

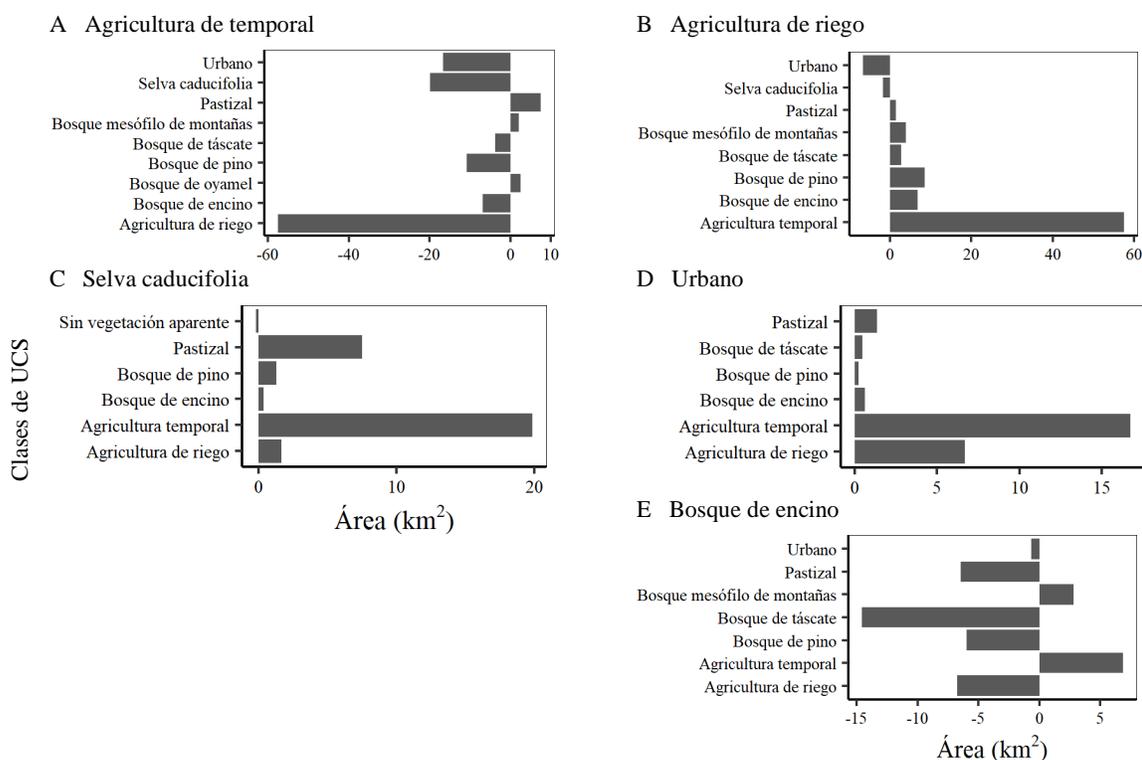


Figura 3-31. Contribuciones netas de cambio en las coberturas de la cuenca del río Amacuzac: A) agricultura temporal, B) agricultura de riego, C) selva caducifolia, D) urbano y, E) bosque de encino

3.3.4. Proyecciones del uso y cobertura del suelo

La tasa de acuerdo en la modelación de las potenciales transiciones fue de 85% en la cuenca del río la Sierra y de 72% en la cuenca del río Amacuzac. Los resultados de validación fueron satisfactorios, la precisión de los mapas proyectados para el año 2019 en términos del índice Kappa fue de 0.92 para la cuenca del río Amacuzac y de 0.97 para la cuenca del río Amacuzac.

En la cuenca del río La Sierra, los principales cambios detectados en los mapas de UCS entre 1996 a 2015 fueron disminución de las coberturas bosque mesófilo de montaña (-7%) y bosque de pino (-6%), e incremento del uso agricultura (10%). El mapa proyectado sigue esta tendencia, la cobertura bosque mesófilo de montaña está proyectada en una reducción de -16%, mientras que, la cobertura de bosque de pino se proyecta una reducción de -9%; y un incremento de la agricultura en 24%. Los cambios a nivel espacial se pueden observar en la Figura 3-32 y en la Tabla 3-36 se observa las áreas por clases de uso y cobertura.

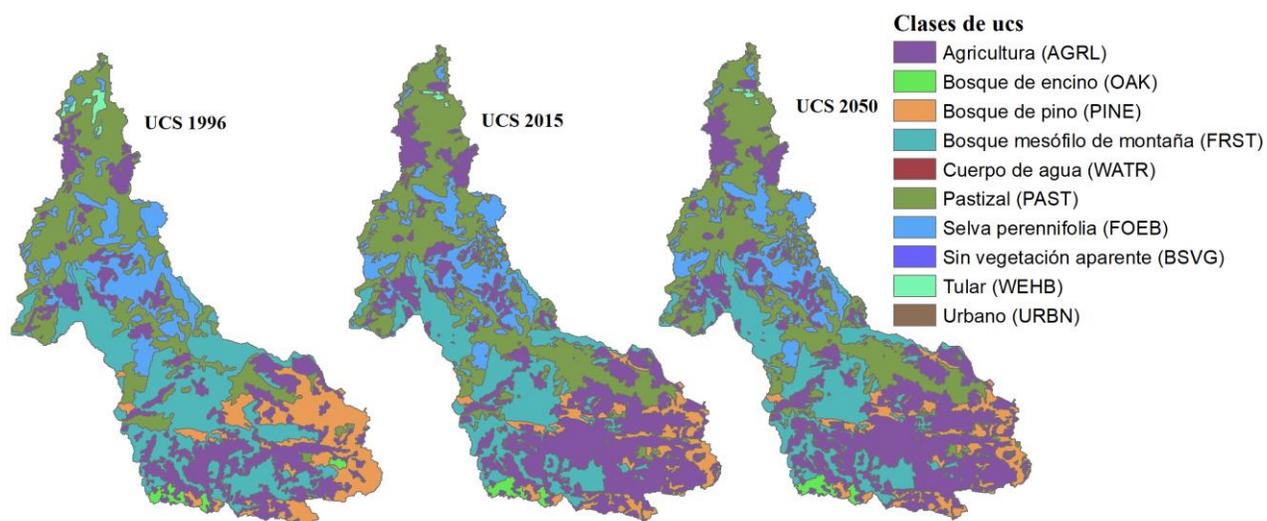


Figura 3-32. Comparación espacial de los cambios entre el mapa de referencia del año 1996, mapa de cambio del año 2015 y mapa proyectado del año 20250 en la cuenca del río La Sierra

Tabla 3-36. Comparación de áreas de los mapas de UCS 1996, 2015 y 2050 en la cuenca del río La Sierra

Clase	UCS1996		UCS2015		UCS2050	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Sin vegetación aparente	0	0.0	1	0.0	1	0.0
Urbano	5	0.1	34	0.8	59	1.4
Bosque mesófilo de montaña	1123	25.8	827	19.0	430	9.9
Bosque de pino	518	11.9	273	6.3	125	2.9
Bosque de encino	42	1.0	38	0.9	38	0.9
Cuerpo de agua	1	0.0	1	0.0	1	0.0
Pastizal	1148	26.4	1270	29.2	1370	31.5
Agricultura	960	22.0	1415	32.5	1997	45.9
Selva perennifolia	525	12.0	488	11.2	326	7.5
Tular	34	0.8	9	0.2	9	0.2

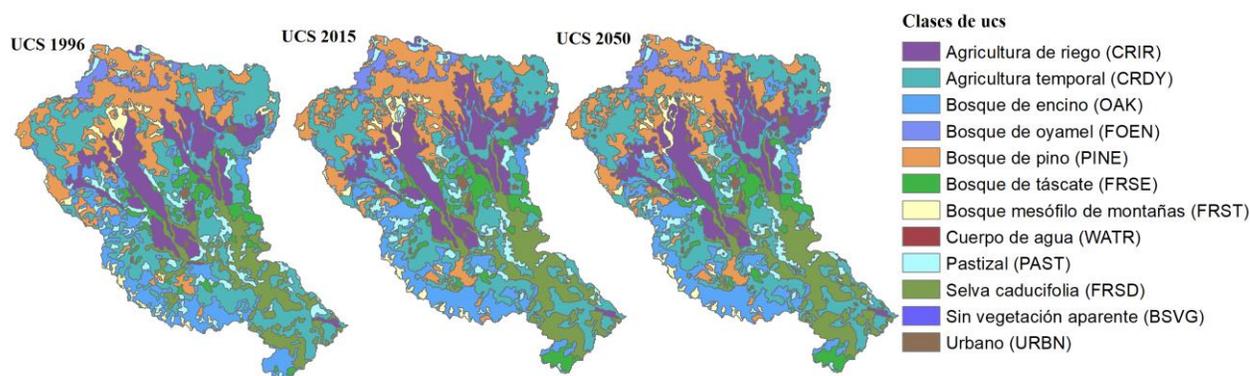


Figura 3-33 Comparación espacial de los cambios entre el mapa de referencia del año 1996, mapa de cambio del año 2015 y mapa proyectado del año 20250 en la cuenca del río Amacuzac

En la cuenca del río Amacuzac, los principales cambios detectados en los mapas de UCS entre 1996 a 2015 fueron incremento de la cobertura selva caducifolia (1.8%) y el uso agricultura de riego (1.5%), y disminución del uso agricultura temporal (-5%). El mapa proyectado refleja esta tendencia, la cobertura selva caducifolia está proyectada en un incremento de 2.5%, mientras que, el uso agricultura de riego se proyecta un incremento de 3.3%; y una disminución de la agricultura temporal de -10%. En la Figura 3-33 y en la Tabla 3-37 se presentan las áreas por clases de uso y cobertura.

Tabla 3-37. Comparación de áreas de los mapas de UCS 1996, 2015 y 2050 en la cuenca del río Amacuzac

Clase	UCS1996		UCS2015		UCS2050	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Urbano	11	0.5	20	0.9	28	1.2
Bosque de oyamel	53	2.4	54	2.4	54	2.4
Bosque de táscate	97	4.3	117	5.2	117	5.2
Bosque mesófilo de montañas	63	2.8	57	2.5	57	2.5
Bosque de pino	372	16.6	376	16.7	376	16.7
Bosque de encino	273	12.2	288	12.8	343	15.3
Sin vegetación aparente	3	0.2	4	0.2	4	0.2
Cuerpo de agua	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Pastizal	134	6.0	131	5.8	131	5.8
Agricultura de riego	297	13.2	329	14.7	370	16.5
Agricultura temporal	702	31.3	590	26.3	470	20.9
Selva caducifolia	241	10.7	280	12.5	297	13.2

3.4. Modelación hidrológica

Este apartado presenta los resultados del proceso de modelación hidrológica de los caudales en las cuencas de estudio. Los resultados son presentados por cuenca hidrográfica, primero se presentan las evaluaciones de los diferentes modelos, segundo las simulaciones con los parámetros iniciales; y tercero los resultados de las simulaciones calibradas y validadas.

3.4.1. Cuenca del río La Sierra

3.4.1.1. Evaluación de modelos

Durante la configuración del modelo se determinó que el método de estimación PET y método de cálculo de CN diario fueron los de mayor influencia en función de los criterios de evaluación NSE y PBIAS. Tuvieron menor influencia el número de subcuencas, clases de pendientes y umbrales de áreas de UCS, suelo y pendiente útiles en la delimitación del número de HRUs.

En la cuenca del río La Sierra fue seleccionado el modelo 12 para el proceso de calibración y validación. Este modelo se configuró con 43 subcuencas, con tres clases de pendientes 0-15%, 15-30%, 30-999% y con umbrales de 0%,1%,2% para UCS, suelo y pendiente, respectivamente. Estos umbrales delimitaron un total de 1152 HRUs. El número de subcuencas y HRUs se consideró adecuado para un análisis de cambios a nivel espacial. El umbral de 0% fijado para UCS permitió no ignorar pequeñas áreas de UCS, esto es importante para evaluar todos los cambios posibles de UCS sobre los procesos hidrológicos. A continuación se presenta un resumen de la evaluación de los diferentes modelos propuestos (Tabla 3-38 y Tabla 3-39):

Método de estimación de PET: los modelos 1 y 2 permitieron evaluar el mejor método de estimación de PET. La ecuación de Hargreaves presentó un mayor rendimiento (NSE diario 0.3) en comparación con la de Penman Monteith (NSE diario 0.24). La ecuación de Hargreaves estimó mayor evapotranspiración potencial, lo que se traduce en menor disponibilidad de agua (escorrentía superficial, flujo lateral y flujo de retorno).

Método de estimación diario de CN: se evaluó dos métodos, el ICN0, método que calcula el valor diario de CN como una función de la humedad del suelo, y el ICN1, método que

calcula el valor diario de CN como una función de la evapotranspiración de la planta. La evaluación de los dos métodos se observa entre los modelos 2 y 3. El método ICN1 permitió un mejor ajuste del modelo que el ICN0 (NSE diario, 0.47 vs 0.3). Estos dos métodos presentan amplias diferencias en cuanto a la distribución del agua en el suelo. El método ICN1 estimó menor la escorrentía superficial y mayor el flujo lateral, percolación y flujo de retorno que el método ICN0.

Número de subcuencas: se evaluaron tres delimitaciones, 53, 43 y 15 subcuencas. El número de subcuencas tuvo poca influencia sobre el caudal de acuerdo con los criterios de evaluación a nivel diario, el NSE varió entre 0.45 a 0.48. A nivel mensual, no tuvo influencia. Los valores promedios de la escorrentía superficial y flujo lateral son similares; mientras que, los valores de flujo de retorno y percolación fueron mayores cuando el número de subcuencas fue mayor. La evaluación de estos métodos se los realizó entre los modelos 3 y 5, y modelos 4 y 11.

Número de clases de pendiente: se evaluaron tres grupos de clases de pendiente $\begin{bmatrix} 0-10 \\ 10-99 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} 0-15 \\ 15-99 \end{bmatrix}$ y $\begin{bmatrix} 0-15 \\ 15-30 \\ 30-999 \end{bmatrix}$. Los criterios de evaluación diaria indican una baja influencia de la pendiente sobre el caudal, la variación del NSE fue de 0.1; mientras que, a nivel mensual, no se detectó influencia. Sin embargo, la pendiente afectó la distribución del agua en el suelo, por ejemplo, cuando el número de clases de pendiente es mayor el flujo lateral disminuye e incrementa la percolación y el flujo de retorno. La escorrentía superficial no se vio afectada. Esta evaluación se presenta en los modelos 5 y 6, y modelos 9 y 10.

Umbrales de ucs, suelo, pendiente (%): se evaluó cuatro umbrales 2-2-2, 2-2-5, 0-1-2, 0-0-2. De acuerdo con los criterios de evaluación el cambio de umbrales no representó ninguna influencia en el caudal total. Las diferencias de los valores promedios de los componentes del balance hídrico son mínimos (<2 mm). Se puede observar esta comparación entre los modelos 6 y 7, y modelos 10 y 11.

El número de HRU dependió del número de subcuencas, clases de pendientes y umbrales de áreas de UCS, suelo y pendiente. Por ejemplo, cuando el número de subcuencas y clases de pendientes es mayor, y menor los umbrales de áreas se obtendrán mayor número de HRUs.

Tabla 3-38. Resumen hidrológico de las diferentes configuraciones de los modelos para la cuenca del río La Sierra

Modelo	Método PET	Método ICN*	n° de cuencas	Clases de pendiente	Filtro UCS, suelo, pendiente	HRUs	PET	ET	PRC	SURQ	FL	FR	PERCO	REVAP	RGP	BFI	ET/PRC	CN	NSE diario	NSE mensual
Modelo 1	Penman Monteith	0	53	0-15 15-30 30-999	2,2,2	1164	1105	774	2508	748	264	663	721	22	36	0.55	0.31	76.15	0.24	0.82
Modelo 2	Hargreaves	0	53	0-15 15-30 30-999	2,2,2	1164	1574	985	2508	715	235	512	572	31	29	0.51	0.39	76.15	0.3	0.85
Modelo 3	Hargreaves	1	53	0-15 15-30 30-999	2,2,2	1164	1574	985	2508	559	261	635	702	31	35	0.62	0.39	76.15	0.47	0.86
Modelo 4	Hargreaves	1	53	0-15 15-999	0,1,2	886	1574	985	2508	558	280	619	684	31	34	0.62	0.39	76.17	0.48	0.86
Modelo 5	Hargreaves	1	15	0-15 15-30 30-999	2,2,2	504	1575	1001	2505	561	257	621	684	30	34	0.61	0.4	76.14	0.45	0.86
Modelo 6	Hargreaves	1	15	0-10 10-999	2,2,2	337	1575	1000	2505	559	283	600	662	30	33	0.61	0.4	76.15	0.46	0.86
Modelo 7	Hargreaves	1	15	0-10 10-999	0,0,2	442	1575	1000	2505	560	281	601	663	30	33	0.61	0.4	76.18	0.46	0.86
Modelo 8	Hargreaves	1	15	0-15 15-999	2,2,2	347	1575	1000	2505	559	277	605	667	30	33	0.61	0.4	76.15	0.46	0.86
Modelo 9	Hargreaves	1	43	0-15 15-30 30-999	2,2,5	974	1574	986	2508	560	262	634	700	32	35	0.62	0.39	76.15	0.47	0.86
Modelo 10	Hargreaves	1	43	0-15 15-999	2,2,5	659	1574	985	2508	558	282	617	682	31	34	0.62	0.39	76.16	0.48	0.86
Modelo 11	Hargreaves	1	43	0-15 15-999	0,1,2	798	1574	985	2508	559	280	618	683	31	34	0.62	0.39	76.17	0.47	0.86
Modelo 12	Hargreaves	1	43	0-15 15-30 30-999	0,1,2	1152	1574	986	2508	561	260	634	700	31	35	0.61	0.39	76.16	0.47	0.86

*Método ICN: 0 Calcula el valor diario de CN como una función de la humedad del suelo, 1 Calcula el valor diario de CN como una función de la evapotranspiración de la planta

PET Evapotranspiración potencial

SURQ Escorrentía superficial

PERCO Percolación al acuífero poco profundo

BFI

FB/FT

ET Evapotranspiración real

FL Flujo lateral

REVAP

Revaporización

BF

Flujo base (FL+FR)

PRC Precipitación

FR Flujo de retorno

RGP

Recarga del acuífero profundo

FT

Flujo total (ES+FL+FR)

En la Figura 1-1 se puede observar de manera gráfica la distribución de estos procesos hidrológicos.

Tabla 3-39. Resumen de evaluación de los diferentes modelos configurados para la cuenca del río La Sierra con base a los criterios estadísticos NSE y PBIAS, a diferentes escalas temporales.

Modelo	NSE				PBIAS			
	Diario	Mensual	Diario interanual	Mensual interanual	Diario	Mensual	Diario interanual	Mensual interanual
Modelo 1	0.24	0.82	0.8	0.89	11.5	11.4	11.4	12
Modelo 2	0.3	0.85	0.87	0.96	-3.3	-3.4	-3.4	-3
Modelo 3	0.47	0.86	0.89	0.96	-3.5	-3.4	-3.5	-3
Modelo 4	0.48	0.86	0.89	0.96	-3.4	-3.4	-3.4	-3
Modelo 5	0.45	0.86	0.88	0.95	-4.6	-4.5	-4.5	-4
Modelo 6	0.46	0.86	0.88	0.95	-4.5	-4.5	-4.5	-4
Modelo 7	0.46	0.86	0.88	0.95	-4.5	-4.5	-4.5	-4
Modelo 8	0.46	0.86	0.88	0.95	-4.5	-4.5	-4.5	-4
Modelo 9	0.47	0.86	0.89	0.96	-3.5	-3.5	-3.5	-4
Modelo 10	0.48	0.86	0.89	0.96	-3.5	-3.4	-3.5	-3
Modelo 11	0.47	0.86	0.89	0.96	-3.5	-3.4	-3.5	-3
Modelo 12	0.47	0.86	0.89	0.96	-3.5	-3.5	-3.5	-4

3.4.1.2. Simulación con parámetros iniciales

La configuración preliminar de parámetros permitió tener un buen ajuste a nivel mensual de los datos observados versus los simulados (NSE 0.84). En general, el caudal se encuentra sobreestimado y subestimado en algunos meses caudalosos (Figura 3-34).

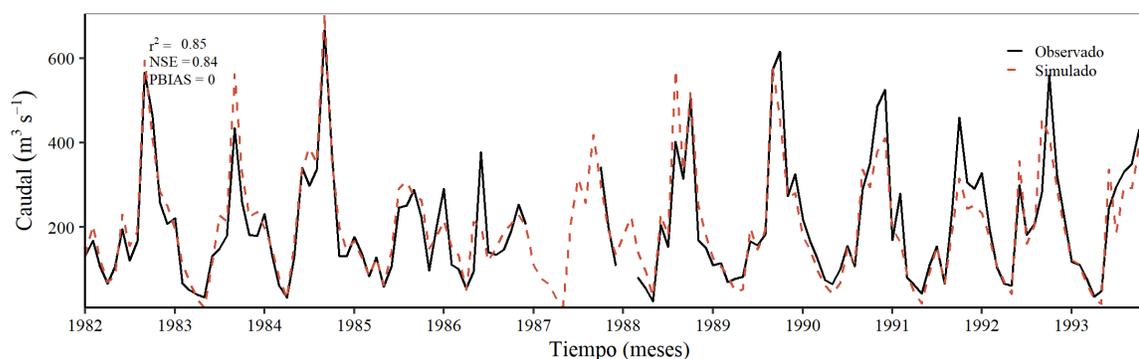


Figura 3-34. Comparación de los caudales observados y simulados con ajuste de parámetros iniciales (1985-1993), cuenca del río La Sierra.

3.4.1.3. Simulación con parámetros calibrados

La Tabla 3-40 presenta los parámetros calibrados ajustados en el proceso de la calibración en la cuenca del río La Sierra. Los caudales simulados y observados en el periodo de calibración mostraron un buen ajuste (Figura 3-35) a un paso de tiempo mensual mostró un NSE de 0.89 (muy bueno) y a nivel mensual interanual fue de 0.97 (muy bueno). En general, se puede observar una ligera sobreestimación en los meses caudalosos

correspondiente al periodo 1982-1988; mientras que, una subestimación en los meses del periodo 1989-1993.

Tabla 3-40. Parámetros ajustados en el proceso de la calibración en la cuenca del río La Sierra

Parámetro	Nivel	Valor inicial	Valor calibrado	Rango evaluado		Tipo de cambio	Unidades
				Min.	Max.		
SURLAG	hru	4	0.05	0.05	24		-
CN2_forest	mgt	-	-6*	-10	10		-
CN2_other	mgt	-	2*	-10	10		-
ESCO	hru	0.95	0.91	0	1		-
EPCO_forest	hru	1	0.34	0	1		-
EPCO_other	hru	1	0.01	0	1		-

*Disminución del -1.5% e incremento de 2% del valor inicial de CN2

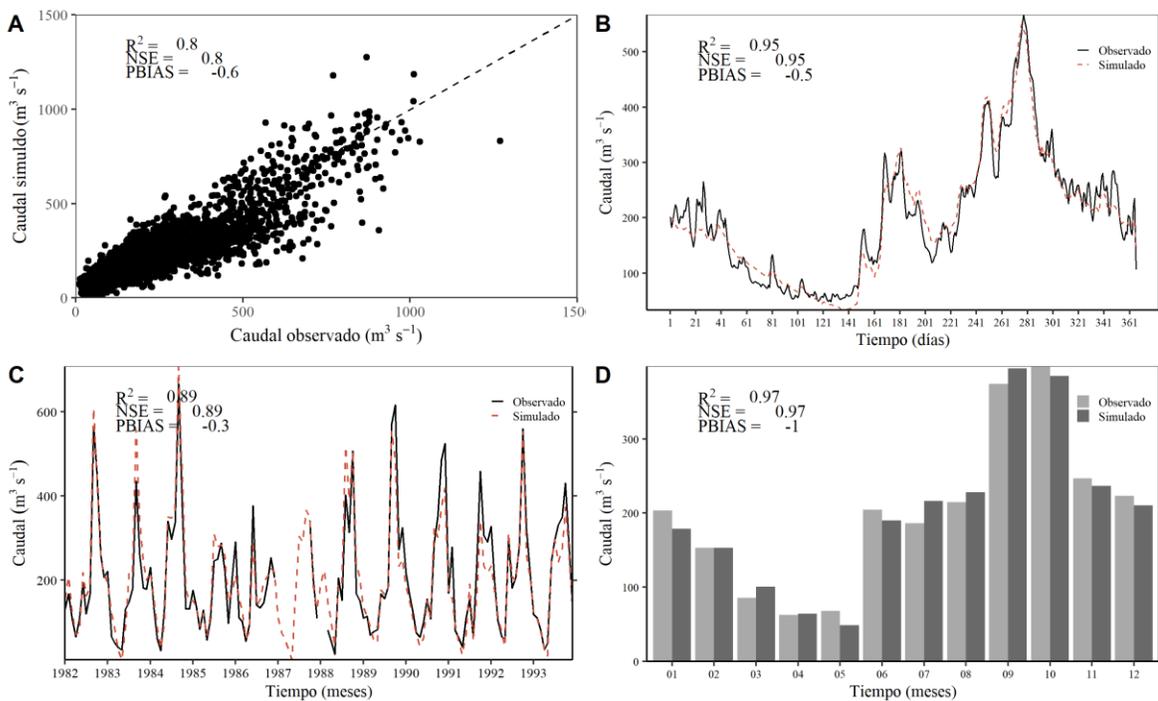


Figura 3-35. Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de calibración (1982-1993), cuenca del río La Sierra, Estación Pueblo Nuevo. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados. D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados

En la validación (Figura 3-36) los caudales simulados y observados a un paso de tiempo mensual mostró un NSE de 0.9 y a nivel mensual interanual el NSE es 0.95. El error porcentual (PBIAS) incrementó en comparación con la evaluación del periodo de calibración (8%).

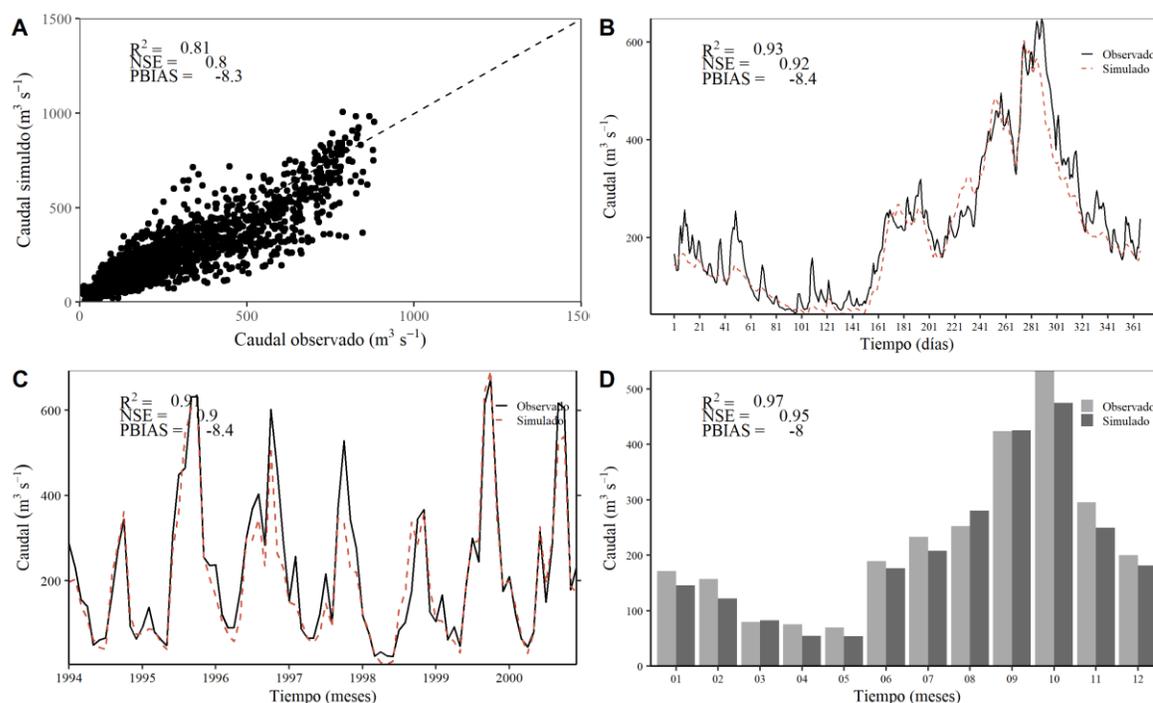


Figura 3-36. Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de validación (1994-2000), cuenca del río La Sierra, Estación Pueblo Nuevo. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios observados y simulados. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados. D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados.

La Tabla 3-41 presenta la evaluación a nivel anual de los periodos de calibración y validación. En general, la evaluación presenta un buen ajuste entre los caudales simulados y observados. El R^2 en la mayoría de los años fue superior a 0.9; mientras que la eficiencia de Nash-Sutcliffe varió entre 0.7 a 0.98. Algunos de estos años reflejan un mayor error porcentual.

Tabla 3-41. Evaluación mensual por año de los periodos de calibración y validación según los criterios de evaluación recomendados por Moriasi et al. (2015) en la cuenca del río La Sierra

	Año	R^2		NSE		PBIAS	
1	1982*	0.98	Muy bueno	0.97	Muy bueno	-6	Bueno
2	1983*	0.93	Muy bueno	0.72	Bueno	-17	No satisfactorio
3	1984*	0.98	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-9	Bueno
4	1985*	0.88	Muy bueno	0.83	Bueno	-7	Bueno
5	1986*	0.83	Muy bueno	0.79	Muy bueno	1	Muy bueno
6	1987*	0.86	Muy bueno	0.66	Muy bueno	2	Muy Bueno

Año	R ²	NSE	PBIAS
7 1988*	0.88	Muy bueno	0.81
8 1989*	0.96	Muy bueno	0.93
9 1990*	0.95	Muy bueno	0.89
10 1991*	0.89	Muy bueno	0.73
11 1992*	0.94	Muy bueno	0.93
12 1993+	0.95	Muy bueno	0.91
13 1994+	0.88	Muy bueno	0.87
14 1995+	0.97	Muy bueno	0.96
15 1996+	0.91	Muy bueno	0.73
16 1997+	0.88	Muy bueno	0.68
17 1998+	0.8	Bueno	0.73
18 1999+	0.98	Muy bueno	0.98
19 2000+	0.97	Muy bueno	0.95

*Años de calibración (1983-1993), +Validación (1994-2000)

La Figura 3-37 presenta los componentes del balance hídrico del periodo 1982-2000 en la cuenca del río La Sierra.

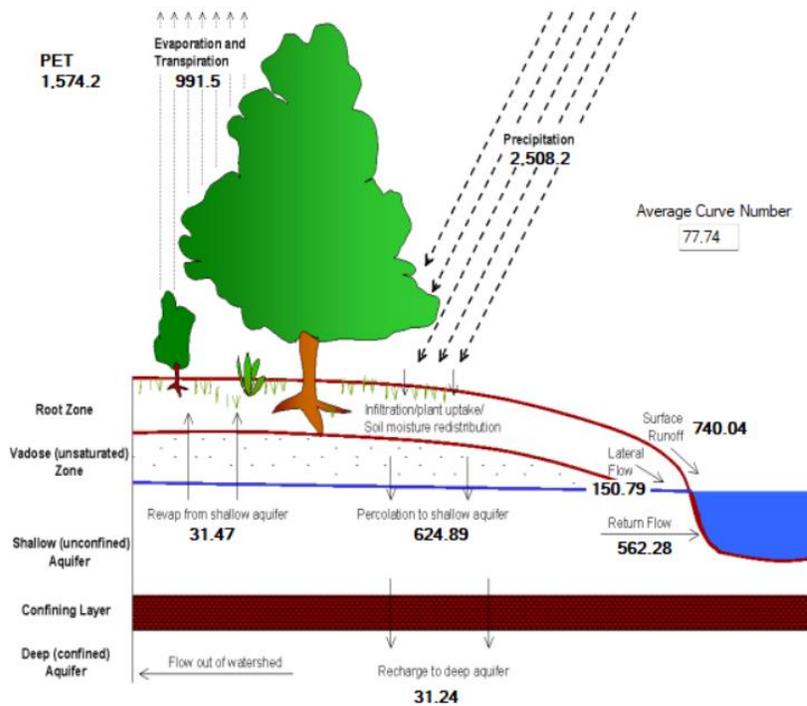


Figura 3-37. Balance hídrico de la cuenca del río La Sierra, periodo 1982-2000.

3.4.2. Cuenca del río Amacuzac

3.4.2.1. Evaluación de modelos

Similar a la evaluación de los modelos en la cuenca del río La Sierra, se determinó que el método de estimación PET y método de cálculo de CN diario fueron los de mayor influencia en función de los criterios de evaluación NSE y PBIAS. Tuvieron menor influencia el número de subcuencas, clases de pendientes y umbrales de áreas de UCS, suelo y pendiente para la delimitación del número de HRUs.

Fue seleccionado el modelo 14 para el proceso de calibración y validación. Este modelo se configuró con 43 subcuencas, con dos clases de pendientes (0-15%, 15-999%) y con umbrales de 0%,1%,2% para UCS, suelo y pendiente, respectivamente. Estos umbrales delimitaron un total de 798 HRUs. El número de subcuencas y HRUs se consideró adecuado para un análisis de cambios a nivel espacial. El umbral de 0% fijado para UCS permitirá no ignorar pequeñas áreas de UCS, esto es importante para evaluar todos los cambios posibles de UCS sobre los procesos hidrológicos.

A continuación se presenta un resumen de la evaluación de los diferentes modelos propuestos (Tabla 3-38):

Método de estimación de PET: el mejor ajuste fue con el método de Hargreaves. Este método estimó mayor evapotranspiración potencial que con el método de Penman Monteith, por lo tanto, menor disponibilidad de agua (escorrentía superficial, flujo lateral y flujo de retorno). Se puede observar esta comparación entre los modelos 1 y 3, y modelo 2 y 4.

Método de estimación diario de CN: el método ICN0 permitió un mejor ajuste del modelo que el ICN1. Estos dos métodos presentan amplias diferencias en cuanto a la distribución del agua en el suelo. Los modelos donde se usó ICN0 presentó menor escorrentía superficial y mayor percolación, por lo tanto, mayor flujo lateral y flujo de retorno. Mientras que, la estimación de CN diario con ICN1 presentó mayor escorrentía superficial y menor percolación. La evaluación de estos métodos se los realizó entre los modelos 3 y 6, modelos 4 y 5 y modelos 7 y 9.

Número de subcuencas: se evaluó varios modelos con tres diferentes delimitaciones, 13, 19 y 29 subcuencas. El número de subcuencas tuvo poca influencia sobre el caudal de acuerdo con los criterios de evaluación. Los componentes del ciclo hidrológico variaron poco. La evaluación de este parámetro se la realizó entre los modelos 3 y 6, modelos 4 y 5, y, modelos 7 y 8.

Número de clases de pendiente: según los criterios de evaluación no presentaron ninguna influencia en el caudal. Sin embargo, cuando el número de agrupaciones de pendiente es mayor disminuyó ligeramente el flujo lateral e incrementó ligeramente el flujo de retorno y percolación. Se puede observar esta comparación entre los modelos 5 y 7. Un análisis de diferencias de medias o varianzas podrían ayudar a verificar si estos cambios son significativos.

Umbral de UCS, suelo, pendiente (%): se evaluó tres umbrales 2,2,2 - 1,1,5 - 0,1,3. De acuerdo con los criterios de evaluación el cambio de umbrales no representó ninguna influencia en el caudal total. Posiblemente fueron umbrales pequeños en los tres casos. Se puede observar esta comparación entre los modelos 9, 11 y 13 y los modelos 10, 12, 14.

Figura 3-38. Resumen hidrológico de las diferentes configuraciones de los modelos para la cuenca del río Amacuzac

Modelo	Método PET	Método ICN*	n° de cuencas	Clases de pendiente	Filtro UCS, suelo, pendiente	HRUs	PET	ET	PRC	SURQ	FL	FR	PERCO	REVAP	RGP	BFI	ET/PRC	CN	NSE (diario)	NSE (mensual)
Modelo 1	Penman Monteith	0	13	0-15 15-30 30-999	2,2,2	837	1273	619	1121	144	71	248	288	25	14	0.69	0.55	77.98	-0.12	0.32
Modelo 2	Penman Monteith	1	13	0-15 15-30 30-999	2,2,2	837	1273	617	1121	184	67	218	254	25	13	0.61	0.55	77.98	-0.31	0.2
Modelo 3	Hargreaves	0	13	0-15 15-30 30-999	2,2,2	837	1523	738	1121	127	61	156	196	30	10	0.63	0.66	77.98	0.26	0.77
Modelo 4	Hargreaves	1	13	0-15 15-30 30-999	2,2,2	837	1523	728	1121	168	55	138	171	27	9	0.54	0.65	77.98	0.05	0.68
Modelo 5	Hargreaves	1	29	0-15 15-30 30-999	2,2,2	1198	1523	724	1123	178	56	134	165	26	9	0.52	0.64	77.96	0.03	0.67
Modelo 6	Hargreaves	0	29	0-15 15-30 30-999	2,2,2	1198	1523	735	1123	129	62	157	197	30	10	0.63	0.65	77.96	0.27	0.77
Modelo 7	Hargreaves	1	29	0-20 20-999	2,2,2	831	1523	724	1123	177	62	131	162	26	8	0.52	0.64	77.97	0.04	0.67
Modelo 8	Hargreaves	0	29	0-20 20-999	2,2,2	831	1523	724	1123	129	69	152	192	30	10	0.63	0.65	77.97	0.28	0.78
Modelo 9	Hargreaves	1	19	0-20 20-999	2,2,2	684	1523	724	1122	171	61	135	167	26	8	0.53	0.65	77.95	0.02	0.67
Modelo 10	Hargreaves	0	19	0-20 20-999	2,2,2	684	1523	734	1122	128	67	153	193	30	10	0.63	0.65	77.95	0.25	0.78
Modelo 11	Hargreaves	1	19	0-20 20-999	1,1,5	766	1523	724	1122	172	61	134	165	26	8	0.53	0.65	77.96	0.02	0.67
Modelo 12	Hargreaves	0	19	0-20 20-999	1,1,5	766	1523	735	1122	128	67	153	193	30	10	0.63	0.65	77.97	0.25	0.78
Modelo 13	Hargreaves	1	19	0-20 20-999	0,1,3	814	1523	724	1122	172	61	134	165	26	8	0.53	0.65	77.96	0.02	0.67
Modelo 14	Hargreaves	0	19	0-20 20-999	0,1,3	814	1523	735	1122	128	67	153	193	30	10	0.63	0.65	77.96	0.25	0.78

*Método ICN: 0 Calcula el valor diario de CN como una función de la humedad del suelo, 1 Calcula el valor diario de CN como una función de la evapotranspiración de la planta

PET Evapotranspiración potencial SURQ Escorrentía superficial PERCO Percolación al acuífero poco profundo BFI BF/FT

ET Evapotranspiración real FL Flujo lateral REVAP Revaporización BF Flujo base (FL+FR)

PRC Precipitación FR Flujo de retorno RGP Recarga del acuífero profundo FT Flujo total (ES+FL+FR)

Tabla 3-42 Resumen de evaluación de los diferentes modelos configurados para la cuenca del río Amacuzac con base a los criterios estadísticos NSE y PBIAS, a diferentes escalas temporales

Modelo	NSE				PBIAS			
	Diario	Mensual	Diario interanual	Mensual interanual	Diario	Mensual	Diario interanual	Mensual interanual
Modelo 1	-0.12	0.32	0.15	0.18	60	59.4	61.5	62
Modelo 2	-0.31	0.2	0.04	0.08	61.5	61.4	62.4	62
Modelo 3	0.26	0.77	0.77	0.83	17.7	17.5	18.8	19
Modelo 4	0.05	0.68	0.67	0.75	23.3	23.5	23.8	24
Modelo 5	0.03	0.67	0.66	0.73	25.2	25.4	25.6	26
Modelo 6	0.27	0.77	0.77	0.83	18.9	18.7	20	20
Modelo 7	0.04	0.67	0.66	0.73	25.5	25.6	25.8	26
Modelo 8	0.28	0.78	0.79	0.84	19.1	18.9	20.1	20
Modelo 9	0.02	0.67	0.66	0.74	25	25.2	25.4	25
Modelo 10	0.25	0.78	0.78	0.84	19.1	18.8	20.1	20
Modelo 11	0.02	0.67	0.66	0.74	24.9	25.1	25.4	25
Modelo 12	0.25	0.78	0.78	0.84	18.9	18.7	19.9	20
Modelo 13	0.02	0.67	0.66	0.74	25	25.1	25.4	25
Modelo 14	0.25	0.78	0.78	0.84	19	18.7	20	20

3.4.2.2. Simulación con parámetros iniciales

La Figura 3-39 presenta los resultados de la simulación con el ajuste de los parámetros iniciales. En general las simulaciones de caudal fueron sobreestimadas. En el paso de tiempo mensual la eficiencia de Nash-Sutcliffe fue de 0.81 y un PBIAS de 18 %.

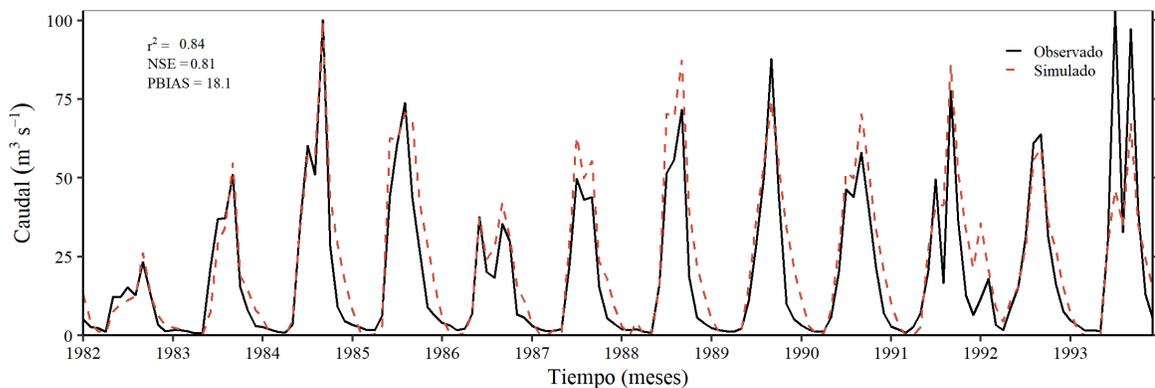


Figura 3-39. Comparación de los caudales observados y simulados con ajuste de parámetros iniciales (1985-1993), cuenca del río Amacuzac

3.4.2.3. Simulación con parámetros calibrados

Los parámetros que se ajustaron durante el proceso de calibración en la cuenca del río Amacuzac se presentan en la Tabla 3-43. La comparación entre los caudales simulados y observados (Figura 3-40) fue de un NSE de 0.9 (muy bueno) a un paso de tiempo mensual; mientras que a nivel mensual interanual fue de 0.99 (muy bueno). En el proceso de

validación a un paso de tiempo mensual se obtuvo un NSE de 0.91 (muy bueno) y de 0.98 (muy bueno) a nivel mensual interanual.

Tabla 3-43. Parámetros del modelo ajustados en el proceso de la calibración en la cuenca del río Amacuzac

Parámetro	Nivel	Valor inicial	Valor calibrado	Rango evaluado		Unidades
				Min.	Max.	
SURLAG	hru	4	0.08	0	1	-
ESCO	hru	0.95	0.86	0	1	-
CN2_forest	mgt	-	-1.5*	-10	10	-
CN2_other	mgt	-	3.5*			-
EPCO_forest	hru	1	0.7	0	1	-
RCHRG_DP	gw	0.05	0.07	0	1	-
GWQMN	gw	1000	1700	0	5000	mm

* Disminución de -1.5% e incremento del 3.5% del valor inicial de CN2

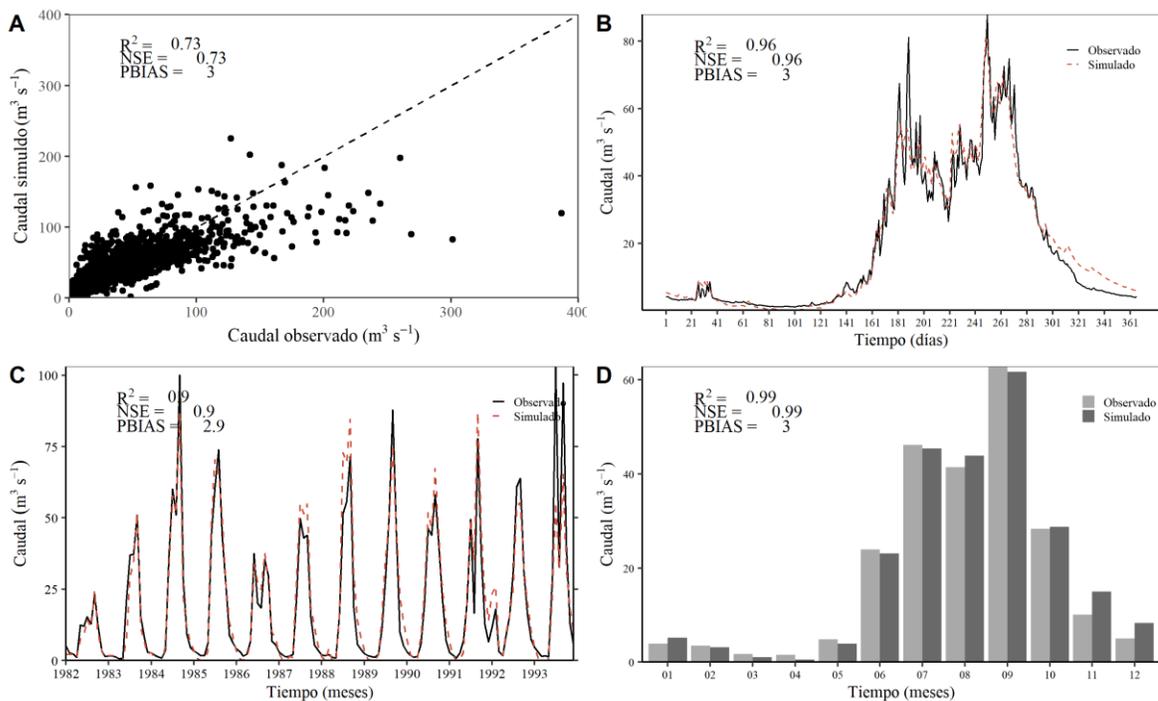


Figura 3-40. Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de calibración (1982-1993), cuenca del río Amacuzac, Estación Amacuzac. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados. D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados

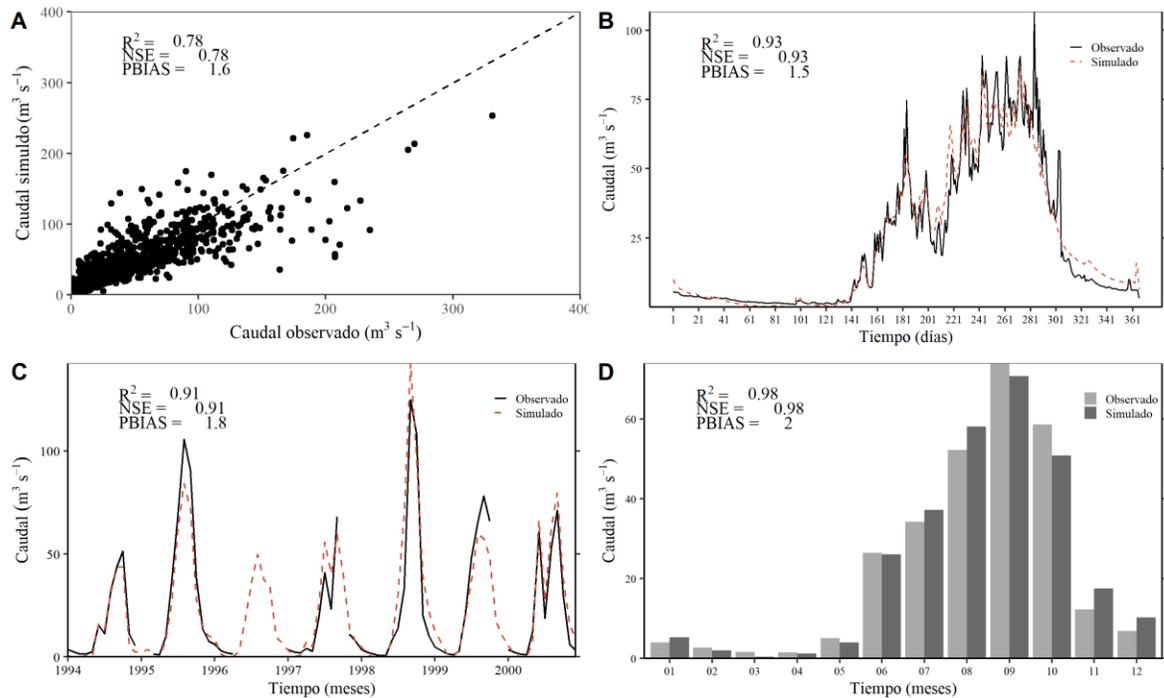


Figura 3-41 Comparación de los caudales observados y simulados del periodo de validación (1994-2000), cuenca del río Amacuzac, Estación Amacuzac. A) Diagrama de dispersión de los caudales diarios. B) Hidrograma interanual de los caudales diarios observados y simulados. C) Hidrograma mensual de los caudales observados y simulados. D) Histograma interanual de los caudales mensuales observados y simulados.

La Tabla 3-44 presenta la evaluación por años de los periodos de calibración y validación. Las simulaciones a nivel anual presentaron un buen ajuste en la mayoría de los años entre los caudales simulados y observados. De acuerdo con los criterios recomendado por Moriasi et al. (2015), el rendimiento del modelo fue muy bueno en la mayoría de los años basándose en los estadísticos R^2 y NSE. Sin embargo, el PBIAS en algunos años fue insatisfactorio, es decir el PBIAS en algunos años fueron mayores al 15%. En Moriasi et al. (2007) proponen que errores porcentuales hasta el 25% son satisfactorios.

Tabla 3-44. Evaluación mensual por año de los periodos de calibración y validación según los criterios de evaluación recomendados por Moriasi et al. (2015) en la cuenca del río Amacuzac

	Año	R ²		NSE		PBIAS	
1	1982	0.92	Muy bueno	0.88	Muy bueno	-16	Insatisfactorio
2	1983	0.94	Muy bueno	0.92	Muy bueno	-13	Satisfactorio
3	1984	0.99	Muy bueno	0.99	Muy bueno	3	Muy bueno
4	1985*	0.97	Muy bueno	0.94	Muy bueno	12	Satisfactorio
5	1986*	0.94	Muy bueno	0.93	Muy bueno	1	Muy bueno
6	1987*	0.99	Muy bueno	0.92	Muy bueno	18	Insatisfactorio
7	1988*	0.98	Muy bueno	0.83	Muy bueno	31	Insatisfactorio
8	1989*	0.96	Muy bueno	0.96	Muy bueno	5	Muy bueno
9	1990*	0.99	Muy bueno	0.96	Muy bueno	13	Bueno
10	1991*	0.95	Muy bueno	0.9	Muy bueno	19	Insatisfactorio
11	1992*	0.94	Muy bueno	0.92	Muy bueno	-2	Bueno
12	1993*	0.95	Muy bueno	0.77	Bueno	-30	Insatisfactorio
13	1994+	0.99	Muy bueno	0.99	Muy bueno	-6	Bueno
14	1995+	0.98	Muy bueno	0.97	Muy bueno	-8	Bueno
15	1996+	0.96	Muy bueno	0.95	Muy bueno	-9	Bueno
16	1997+	0.88	Muy bueno	0.86	Muy bueno	14	Satisfactorio
17	1998+	0.92	Muy bueno	0.85	Muy bueno	32	Insatisfactorio
18	1999+	0.96	Muy bueno	0.9	Muy bueno	-12	Satisfactorio
19	2000+	0.98	Muy bueno	0.95	Muy bueno	15	Satisfactorio

*Años de calibración (1982-1993), +Validación (1994-2000)

La Figura 3-42 presenta los componentes del balance hídrico del periodo 1982-2000 en la cuenca La Amacuzac.

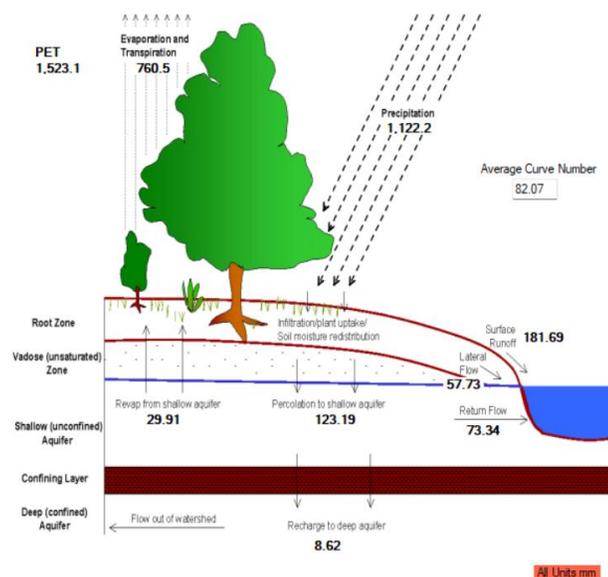


Figura 3-42. Balance hídrico de la cuenca del río Amacuzac, periodo 1982-2000

3.5. Impactos actuales en los procesos hidrológicos

En las cuencas de estudio se identificaron cambios en los procesos hidrológicos ocasionados por la variabilidad climática y por los cambios de los UCS. A continuación se describe un análisis de cambio a nivel global y a nivel espacial (subcuencas) en las variables rendimiento hídrico (*WY*), escorrentía superficial (*SURQ*), flujo base (*BF*) y evapotranspiración real (*ET*). Este análisis se lo presenta por cuenca hidrográfica.

3.5.1. Cuenca del río La Sierra

3.5.1.1. Impactos actuales de la variabilidad climática en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos promedios en los procesos hidrológicos por variabilidad climática son negativos, varían entre -131 mm (~ -9%) a -26 mm (~ -3%) (Tabla 3-45). La escorrentía superficial (*SURQ*) es el proceso con mayor impacto (~ -11%) con respecto a su valor inicial; mientras que, la evapotranspiración real (*et*) es la variable con menor impacto (~ -3%). Estos impactos ocasionados por la variabilidad climática están explicados por una reducción de la precipitación del ~ -6% y un incremento del 0.1% de la evapotranspiración potencial (Tabla 3-46).

Tabla 3-45. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por variabilidad climática en la cuenca del río La Sierra

Variable	M1	M2	M3	M4	IC1 (mm)	IC2 (mm)	IC1 (%)	IC2 (%)	\bar{IC} (mm)	\bar{IC} (%)
<i>WY</i>	1485	1491	1354	1359	-131.0	-131.2	-8.8	-8.8	-131.1	-8.8
<i>SURQ</i>	740	746	662	668	-78.3	-77.7	-10.6	-10.4	-78.0	-10.5
<i>BF</i>	713	713	664	663	-48.7	-49.5	-6.8	-6.9	-49.1	-6.9
<i>PERCO</i>	625	624	579	578	-45.6	-46.1	-7.3	-7.4	-45.9	-7.3
<i>ET</i>	991	986	966	960	-25.8	-25.7	-2.6	-2.6	-25.7	-2.6

M1: clima 1982-2000, UCS 1996
M2: clima 1982-2000, UCS 2008
M3: clima 2001-2012, UCS 1996
M4: clima 2001-2012, UCS 2008

IC1: impacto por variabilidad climática 1 (M3-M1)
IC2: impacto por variabilidad climática 2 (M4-M2)
 \bar{IC} : impacto promedio ((IC1 + IC2)/2)

Tabla 3-46. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2000) y el periodo de cambio (2001-2012), en la cuenca del río La Sierra

Variable	Periodo de referencia	Periodo de cambio	Δ	Δ (%)
	1982-2000	2001-2012		
<i>PET</i>	1574.2	1575.0	0.9	0.1
<i>TMAX</i>	26.8	27.0	0.2	0.8

Variable	Periodo de referencia	Periodo de cambio	Δ	Δ (%)
<i>TMIN</i>	14.9	15.3	0.4	2.7
<i>PRECIP</i>	2508.2	2350.5	-157.7	-6.3

En la Figura 3-43 se presenta los impactos a nivel de cuenca por mes. Los cambios del rendimiento hídrico durante el año en su mayoría son negativos, varían entre -20 a 5 %. La mayor disminución se da en los meses de mayo (~ -17%) a junio (~ -20%), y un incremento en noviembre (~ 8%). La escorrentía superficial disminuye mayormente en los meses de abril (-43%) a junio (-49%), y tiene incrementos en los meses de agosto (~ 16%) y noviembre (46%). El flujo base presenta reducción durante casi todo el año (-15% a -1%), a excepción del mes de junio que presenta un incremento del 3%. La evapotranspiración real presenta una mayor reducción en los meses de octubre (~ -5%) a diciembre (~ -9%), y un incremento de ~2% en el mes mayo.

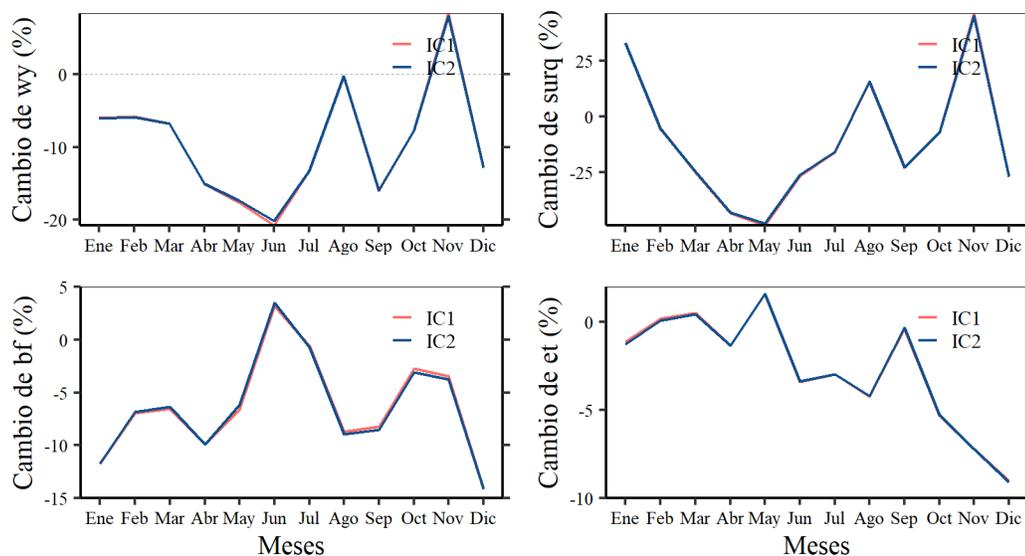


Figura 3-43. Cambios promedios mensuales por variabilidad climática en los procesos hidrológicos en la cuenca del río La Sierra

Los cambios mensuales en la precipitación varían entre -19% a 7% (Figura 3-44A). El mayor incremento de precipitación se presenta en el mes de enero con ~7%, mientras que, los meses de febrero, marzo, mayo y agosto el incremento es menor a ~2%. El resto de los meses presentó una reducción, siendo mayor en el mes de diciembre con -19%, seguido de los meses de junio (-12%) y abril (-11%). Los cambios de la evapotranspiración potencial varían entre ~ -2% a ~2% (Figura 3-44B). Los meses con mayor incremento son abril

(1.3%) y septiembre (1.7%); mientras que, los meses con mayor reducción son los meses de enero (-1.7%) y noviembre (-1.4%).

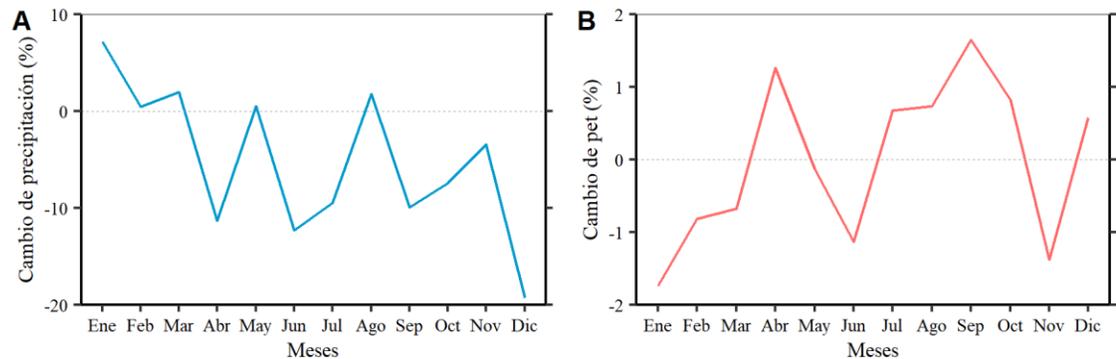


Figura 3-44. Cambios promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra

Análisis a nivel de subcuencas: En la Figura 3-46 se presentan los cambios espaciales a nivel de subcuencas en los procesos hidrológicos por la variación de la precipitación y evapotranspiración potencial.

- *Rendimiento hídrico:* la variación espacial de los cambios del WY es de -30% a 20% (Figura 3-46A). El 67% del área de la cuenca presenta una reducción del WY menor a -2%; mientras que, el 24% del área presenta un incremento $>2\%$. La reducción de WY se presenta en la parte alta (sureste) y media de la cuenca y el incremento en las subcuencas de la parte alta (sur-oeste) y baja de la cuenca.
- *Escorrentía superficial:* los cambios espaciales varían entre -40% a 30%, siguen una distribución espacial similar a los cambios de WY (Figura 3-46B). El 69% del área de la cuenca presenta una reducción menor a -2%, mientras que el 18% de la cuenca presenta un incremento mayor que 2%.
- *Flujo base:* la variación espacial de los cambios es de -25% a 35% (Figura 3-46C). El 57% del área de la cuenca presentan una reducción del flujo base menor a -2%; mientras que, el 34% del área presenta un incremento mayor a 2%. Los cambios negativos se presentan principalmente en la parte alta (sur-este) y baja de la cuenca. Y los cambios positivos en la parte alta de la cuenca (suroeste) de la cuenca.
- *Evapotranspiración real:* los cambios espaciales varían entre -10 a 5% (Figura 3-46C). La parte baja de la cuenca presenta una marcada reducción de la ET menor

a -2%, esta reducción se da en el 39% del área de la cuenca. Por otro lado, en la parte alta de la cuenca (10% del área) se presenta incrementos de la *ET* mayor a 2%. Por último, la parte media-alta de la cuenca (51% del área) presenta una variación del cambio entre > -2% a 2%.

Estos cambios están explicados por los cambios espaciales de la precipitación que varían entre -20% a 10% (Figura 3-45A); y por la variación espacial de la *PET* que varía entre -6% a 4% (Figura 3-45B). Las subcuencas localizadas en la parte alta (sureste) y baja de la cuenca presentan reducciones de la precipitación, estas subcuencas representan el 66% del área de la cuenca con una reducción menor a -2%; mientras que, las subcuencas localizadas en la parte alta (suroeste) de la cuenca presentan incrementos de la precipitación, estas subcuencas representan el 15% del área de la cuenca con un incremento mayor a 2%. Por otro lado, la *PET* presenta reducciones menores a -2% en las subcuencas ubicadas en la parte media-alta (suroeste) de la cuenca (22% del área) e incrementos mayores a 2% en la parte alta (sureste) de la cuenca (17% del área).

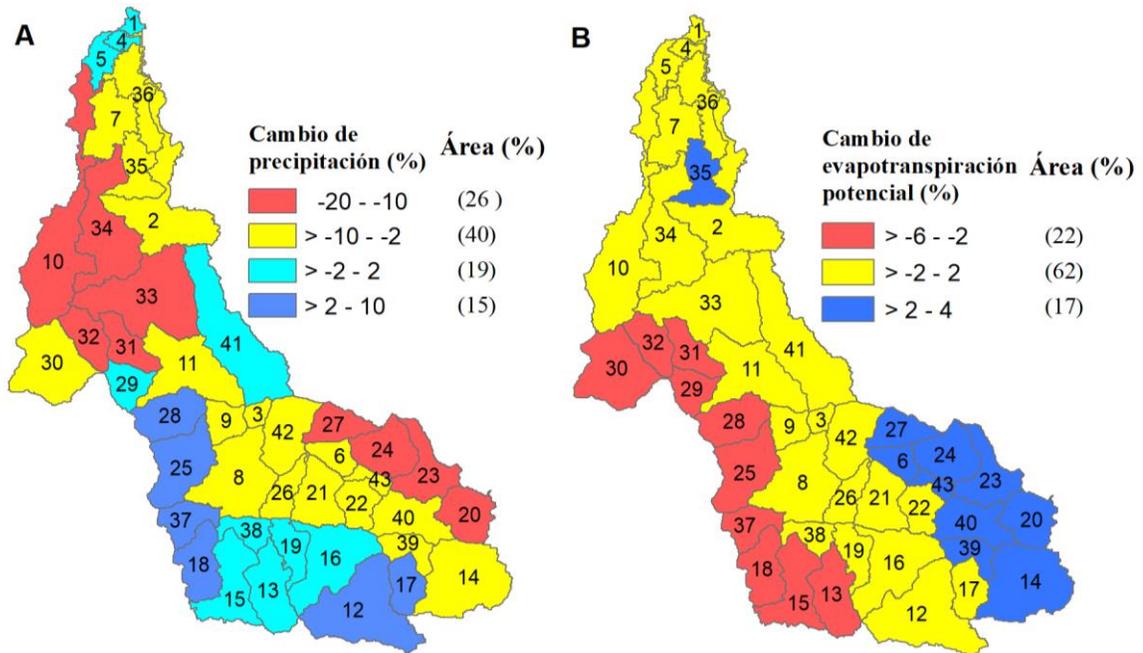


Figura 3-45. Cambios promedios a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra

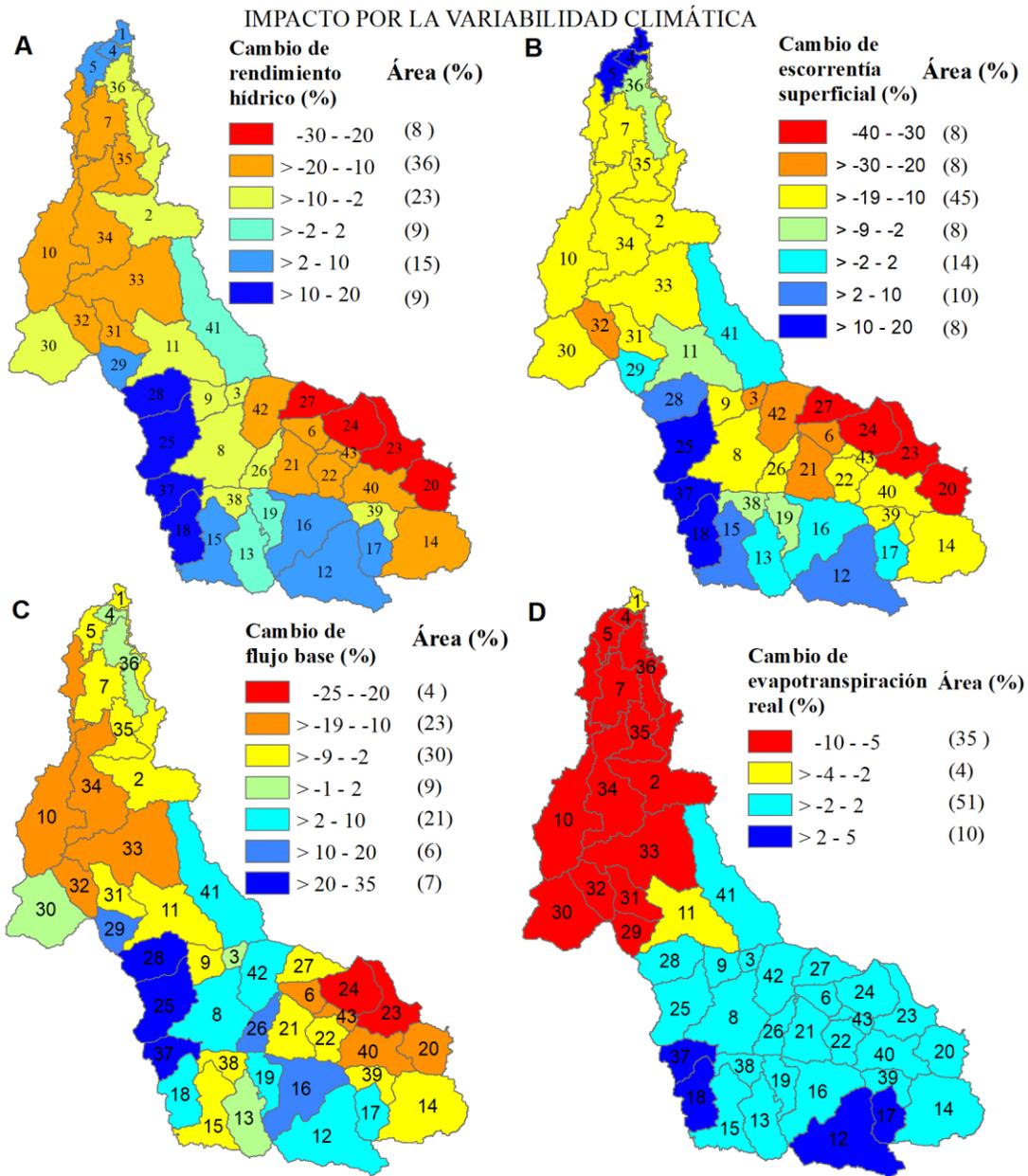


Figura 3-46. Cambios promedios por variabilidad climática del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por la variabilidad climática en la cuenca del río La Sierra

3.5.1.2. Impactos de los cambios del uso y cobertura del suelo en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos promedios en los procesos hidrológicos por los cambios del UCS varían entre ~ -5 mm (-0.6%) a ~ 6 mm (0.9%) (Tabla 3-47). La

escorrentía superficial (*SURQ*) es el proceso hidrológico con mayor impacto (~0.9%) con respecto a su valor inicial; mientras que, el flujo base (*BF*) es la variable con menor impacto (~0.1%). Estos impactos son pequeños en comparación con los impactos ocasionados por la variabilidad climática. Sin embargo, en el análisis a nivel de subcuencas se presentan valores de cambio mayores.

Tabla 3-47. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por UCS en la cuenca del río La Sierra - mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2008

Variable	M1	M2	M3	M4	IU1 (mm)	IU2 (mm)	IU1 (%)	IU2 (%)	\bar{IU} (mm)	\bar{IU} (%)
<i>WY</i>	1485	1491	1354	1359	5.5	5.3	0.4	0.4	5.4	0.4
<i>SURQ</i>	740	746	662	668	5.8	6.4	0.8	1.0	6.1	0.9
<i>BF</i>	713	713	664	663	-0.3	-1.1	0.0	-0.2	-0.7	-0.1
<i>PERCO</i>	625	624	579	578	-1.1	-1.5	-0.2	-0.3	-1.3	-0.2
<i>ET</i>	991	986	966	960	-5.4	-5.4	-0.5	-0.6	-5.4	-0.6
M1: clima 1982-2000, UCS 1996					IU1: impacto por UCS, evaluación 1 (M2-M1)					
M2: clima 1982-2000, UCS 2008					IU2: impacto por UCS, evaluación 2 (M4-M3)					
M3: clima 2001-2012, UCS 1996					\bar{IU} : impacto promedio del UCS ((IU1 + IU2) / 2)					
M4: clima 2001-2012, UCS 2008										

Análisis a nivel de subcuencas: los impactos espaciales se presentan en la Figura 3-51 y un resumen en la Tabla 3-48. A continuación se describen los impactos en los principales procesos hidrológicos.

- *Rendimiento hídrico:* En la variable rendimiento hídrico, el 19% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 6%, este incremento se da en las subcuencas localizadas en la parte alta de la cuenca (Figura 3-51A). En estas subcuencas se identificó reducción de las coberturas forestales, principalmente FRST, e incremento del uso de AGRL (Figura 3-47A). Por otro lado, solo el 1% del área de la cuenca presenta una reducción del rendimiento hídrico menor a -2%. En esta subcuenca hubo disminución de la cobertura PAST e incremento de la cobertura FOEB (Figura 3-47B). Mientras que, el 80% del área de la cuenca presenta una variación de cambio entre -2% a 2%. En estas áreas no se identifica un patrón claro de incremento o reducción de coberturas (Figura 3-47C).

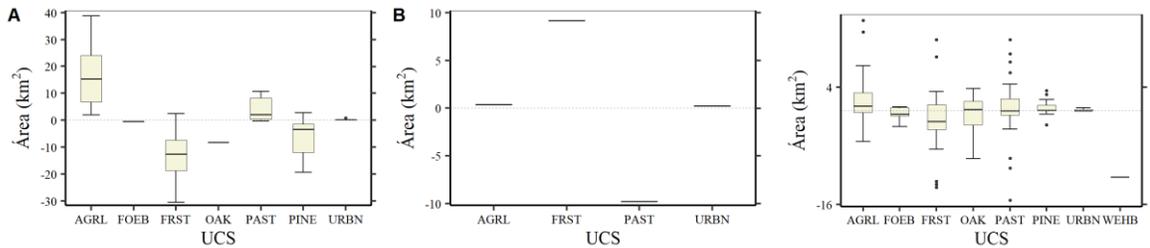


Figura 3-47. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$); (B) disminuyó ($\leq -2\%$) y (C) el cambio fue mínimo ($> -2\%$ a $< 2\%$) del rendimiento hídrico en la cuenca del río La Sierra

- Escorrentía superficial:* El 30% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 23%, este incremento se da en algunas subcuencas localizadas en la parte alta y baja de la cuenca (Figura 3-51B). Los cambios de las coberturas en estas subcuencas son reducción de las coberturas forestales, principalmente FRST, e incremento del uso de AGRL (Figura 3-48A). El 22% del área de la cuenca presenta una reducción de la *SURQ* menor a -2%. En estas subcuencas hubo disminución marcada de la cobertura PAST e incremento de la cobertura FOEB (Figura 3-48B). Mientras que, el 64% del área de la cuenca presenta una variación de cambio entre -2% a 2%.

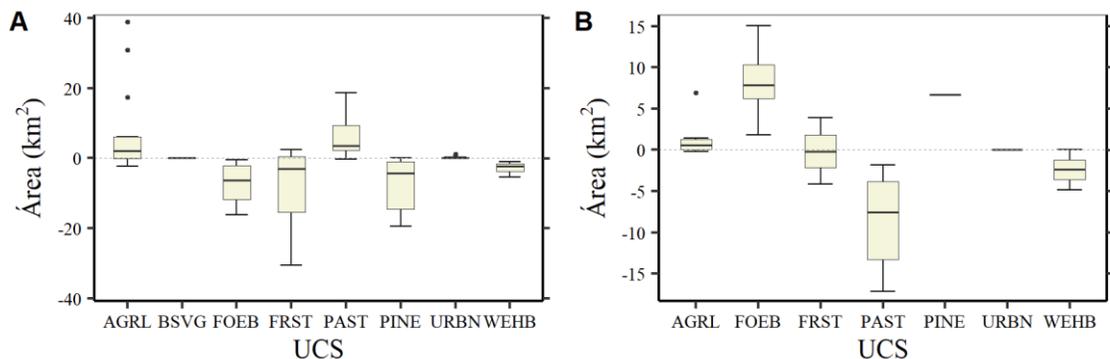


Figura 3-48. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó $\geq 2\%$; (B) disminuyó $\leq -2\%$

- Flujo base:* El 15% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 20%, este incremento se presenta mayormente en algunas subcuencas localizadas en la parte alta (Figura 3-51C). Los cambios de las coberturas en estas subcuencas son reducción de las coberturas forestales, principalmente FRST, e incremento del uso de AGRL (Figura 3-49A). El 20% del área de la cuenca presenta una reducción de

la *BF* menor a -2%. En estas subcuencas hubo disminución de las coberturas FOEB y PINE e incremento de la cobertura PAST y AGRL (Figura 3-49B). Mientras que, el 65% del área de la cuenca presenta una variación de cambio entre -2% a 2%.

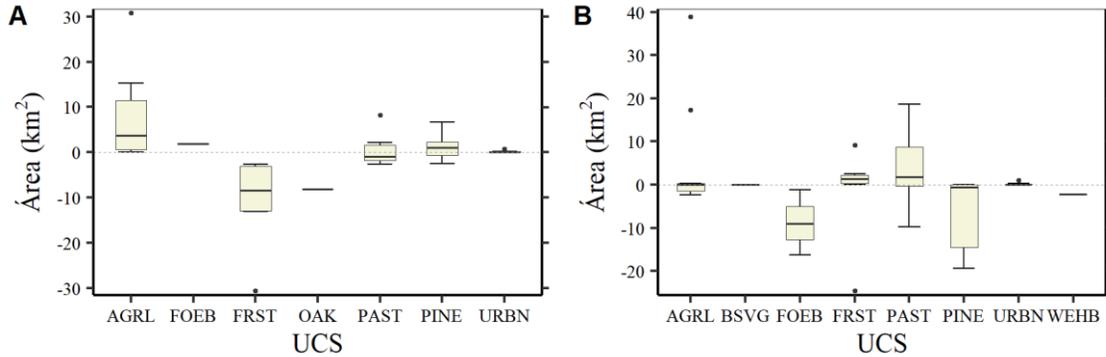


Figura 3-49. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó $\geq 2\%$ y (B) disminuyó $\leq -2\%$ del flujo base en la cuenca del río La Sierra

- *Evapotranspiración real*: El 14% del área de la cuenca presenta una reducción entre -2% a -4%, esta reducción se presenta en algunas subcuencas localizadas en la parte alta (Figura 3-51D). Los cambios de las coberturas en estas subcuencas son reducción de las coberturas forestales, principalmente FRST y PINE, e incremento del uso de AGRL y PAST (Figura 3-50A). El 86% del área de la cuenca presentan cambios $> -2\%$ y $< 2\%$ de la *et*.

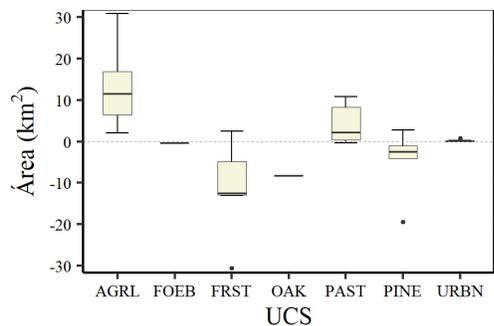


Figura 3-50. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó $\geq 2\%$ y (B) disminuyó $\leq -2\%$ del flujo base en la cuenca del río La Sierra

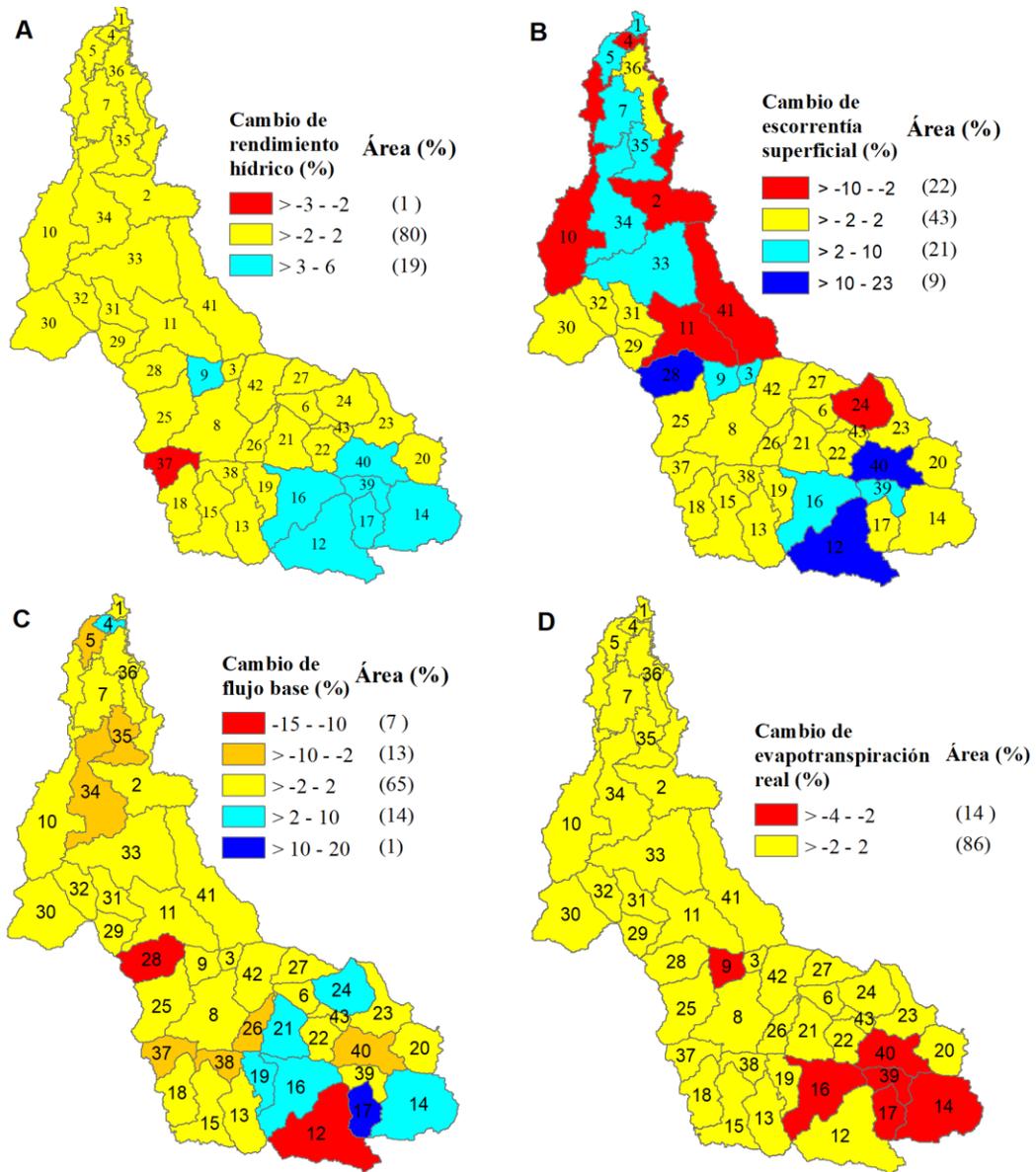


Figura 3-51. Cambios promedios por el cambio de UCS del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río La Sierra

Tabla 3-48. Impactos por los cambios del UCS actuales en la cuenca del río La Sierra, cambios evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y el mapa de cambio de UCS 2008

Variables	Cambio (%)	Nº de subcuencas	Área (%)	Principales cambios de los usos y coberturas del suelo	
				Disminución	Incremento
Rendimiento hídrico	≥ 2	7	19	FRST, PINE, OAK	AGRL, PAST, URBN
	≤ -2	1	1	PAST	FRST
Escorrentía superficial	≥ 2	13	30	FRST, FOEB, PINE, WEHB	AGRL, PAST, URBN
	≤ -2	6	22	PAST, WEHB	FOEB, AGRL, PINE
Flujo base	≥ 2	7	15	FRST, OAK	AGRL, PINE, PAST, FOEB
	≤ -2	9	20	FOEB, PINE, FRST	AGRL, PAST, URBN
Evapotranspiración real	≥ 2	-	-	-	-
	≤ -2	6	14	FRST, PINE, OAK	AGRL, PAST, URBN

3.5.2. Cuenca del río Amacuzac

3.5.2.1. Impactos de la variabilidad climática en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos promedios en los procesos hidrológicos por variabilidad climática son positivos, varían entre 1.6 mm (~ 1.2%) a 43 mm (~ -14%) (Tabla 3-49). La escorrentía superficial es el proceso con mayor impacto (~ -23%) con respecto a su valor inicial; mientras que, el flujo base es la variable con menor impacto (~ -1.2%). Estos impactos ocasionados por la variabilidad climática están explicados por un incremento de la precipitación del ~ -7% y un incremento del 4 % de la evapotranspiración potencial (Tabla 3-50).

Tabla 3-49. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac

Variable	M1	M2	M3	M4	IC1 (mm)	IC2 (mm)	IC̄ (mm)	IC̄ (%)
WY	322	320	365	363	43.8	43.3	43.6	13.6
SURQ	182	177	223	218	41.4	40.7	41.0	22.9
BF	131	134	133	135	1.5	1.6	1.6	1.2
PERCO	123	125	141	144	18.2	18.5	18.3	14.8
ET	760	762	776	778	15.4	15.6	15.5	2.0

M1: clima 1982-2000, UCS 1996
M2: clima 1982-2000, UCS 2008
M3: clima 2001-2012, UCS 1996
M4: clima 2001-2012, UCS 2008
IC1: impacto por variabilidad climática 1 (M3-M1)
IC2: impacto por variabilidad climática 2 (M4-M2)
IC̄: impacto promedio ((IC1 + IC2)/2)

Tabla 3-50. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2000) y el periodo de cambio (2001-2012), en la cuenca del río Amacuzac

Variable	Periodo de referencia	Periodo de cambio	Δ (mm/°C)	Δ (%)
	1982-2000	2001-2012		
PET	1523	1585	61.6	4.0
TMAX	24.1	24.8	0.7	2.9
TMIN	10.0	9.8	-0.02	-2
PRECIP	1122	1204	81.3	7.2

En la Figura 3-43 se presenta los impactos a nivel de cuenca por mes. Los cambios del *WY* durante el año varían entre -32 a 47%. La mayor disminución se da en los meses de enero (~ -19%) y abril (~ -32%), y el mayor incremento en los meses de febrero (48%) y septiembre (~ 28%). La *SURQ* incrementa en siete meses, sus incrementos varían entre el ~16% (julio) hasta el ~500% (febrero) y las reducciones varían entre -95% (diciembre) hasta el -16% (junio). El *BF* presenta reducción en la mayoría de los meses, los cambios negativos varían entre -50% a -1%; mientras que, el incremento del *BF* se da en los meses de agosto (~6%), septiembre (~11%) y octubre (~2%). La *ET* presenta cambios menores en comparación del resto de procesos, varían entre -10% a 10%. Los cambios negativos se dan mayormente en el mes de enero (-9%), mayo (-6%), diciembre (-9%); mientras que, los cambios positivos son en los meses de febrero (~10%) a abril (~2%) y de julio (~6%) a octubre (3%).

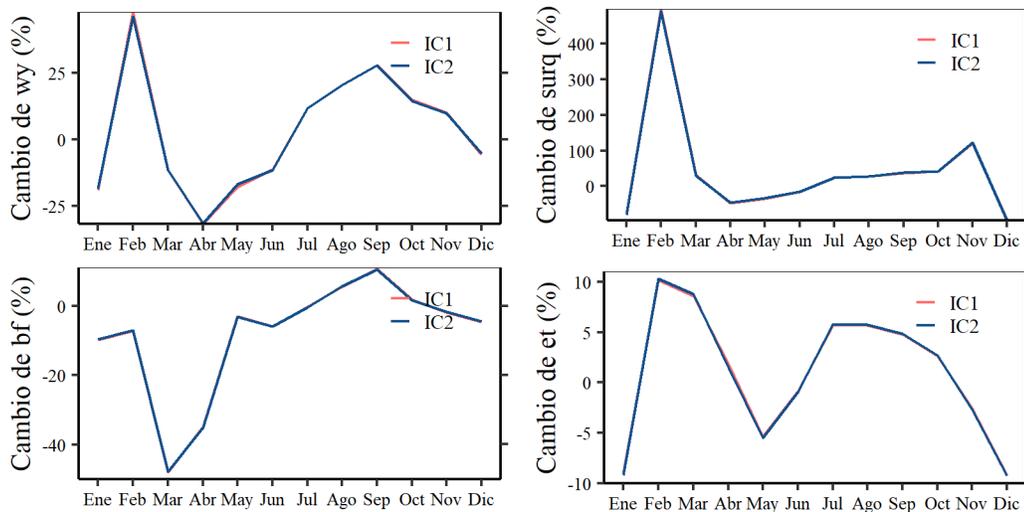


Figura 3-52. Cambios promedios mensuales por variabilidad climática en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac

Los cambios mensuales en la precipitación varían entre -90% a 124% (Figura 3-53A). Los meses de febrero a marzo y de julio a octubre presentan incrementos de la precipitación; mientras que, los meses de noviembre a enero y de abril a junio presentan disminución de la precipitación. Los cambios de la evapotranspiración potencial son positivos durante todo el año, varían entre ~ 2% a ~6% (Figura 3-53B). Los meses con mayor incremento son julio (6%) y octubre (5%); mientras que, los meses con menos cambio son los meses de abril (~3%) y noviembre (~3%).

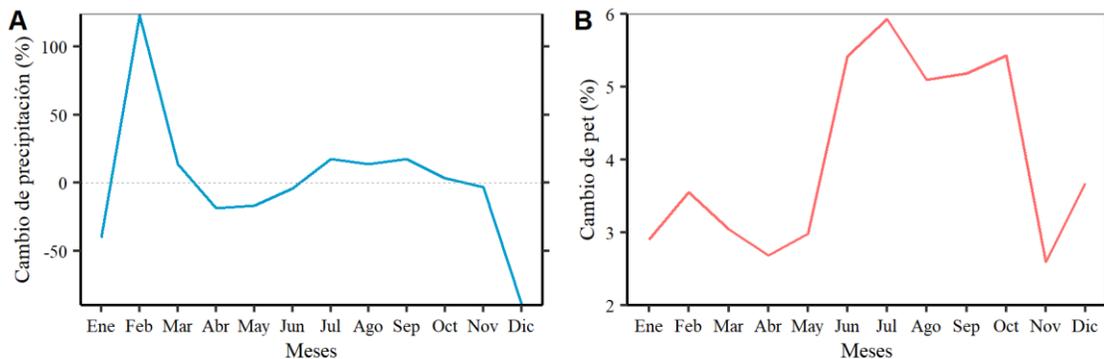


Figura 3-53. Cambios promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac

Análisis a nivel de subcuencas: En la Figura 3-55 se presentan los cambios espaciales a nivel de subcuencas en los procesos hidrológicos por la variación de la precipitación y evapotranspiración potencial.

- *Rendimiento hídrico:* la variación espacial de los cambios del WY es de -25% a 100% (Figura 3-55A). El 33% del área de la cuenca presenta una reducción del WY menor a -2%; mientras que, el 64% del área presenta un incremento >2%. La reducción de WY se presenta en la parte centro-norte de la cuenca y el incremento en las subcuencas de la parte baja y alta (noroeste y noreste).
- *Escorrentía superficial:* los cambios espaciales varían entre -24% a 100%, siguen una distribución espacial similar a los cambios de WY (Figura 3-55B). El 30% del área de la cuenca presenta una reducción menor a -2%, mientras que el 64% de la cuenca presenta un incremento mayor que 2%.
- *Flujo base:* la variación espacial de los cambios es de -32% a 70% (Figura 3-55C). El 52% del área de la cuenca presentan una reducción del BF menor a -2%; mientras que, el 49% del área presenta un incremento mayor a 2%. Los cambios

negativos están distribuidos en toda la cuenca, mientras que los cambios positivos se presentan principalmente en la parte media-alta (noreste y noroeste). Y los cambios positivos en la parte alta de la cuenca (suroeste) de la cuenca.

- *Evapotranspiración real*: los cambios espaciales varían entre -5 a 7% (Figura 3-55C). Toda la parte baja de la cuenca y en algunas subcuencas de la parte alta (54% del área) presenta un incremento de la *ET* entre 2 a 7%. Por otro lado, sólo una subcuenca localizada en la parte alta de la cuenca (4% del área) presentó reducción de la *et*. Por último, la parte media-alta de la cuenca (42% del área) presenta una variación del cambio entre > -2% a 2%.

Los cambios en los procesos hidrológicos están explicados por los cambios espaciales de la precipitación que varían entre -7% a 30% (Figura 3-54A); y por la variación espacial de la *PET* que varía entre -1% a 10% (Figura 3-54B). Las subcuencas localizadas en la parte alta de la cuenca presentan reducciones entre -7% a -2% de la precipitación, estas subcuencas representan el 16% del área de la cuenca; mientras que, la mayoría de las subcuencas presentan incrementos de la precipitación entre 2% a 30%, estas subcuencas representan el 64% del área de la cuenca. Por otro lado, todas las subcuencas presentan cambios positivos de la *PET* entre el 1% a 10%. Algunas subcuencas ubicadas en la parte media-alta de la cuenca (28% del área) presenta los incrementos mayores, entre 5% a 10%.

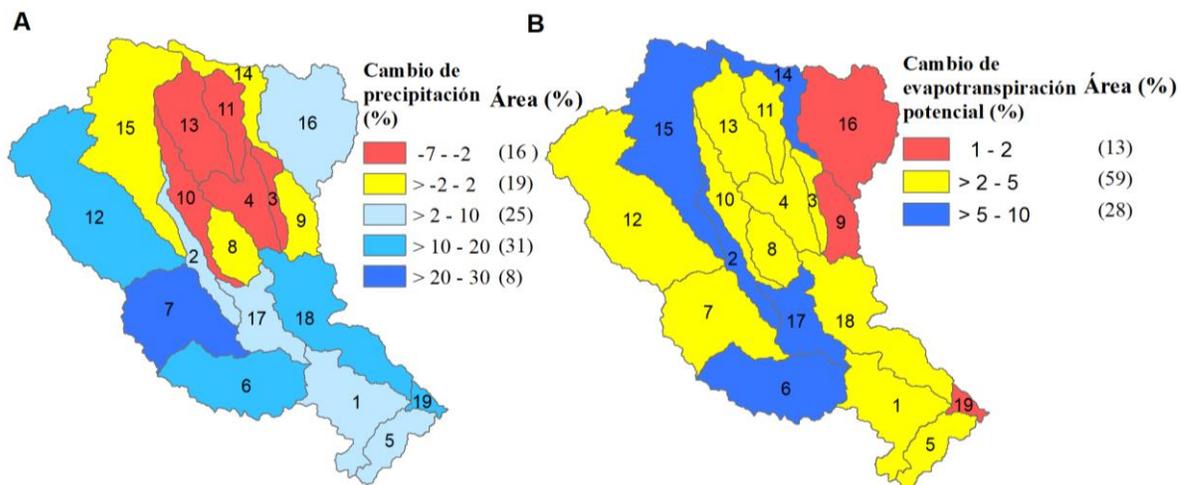


Figura 3-54. Cambios a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac

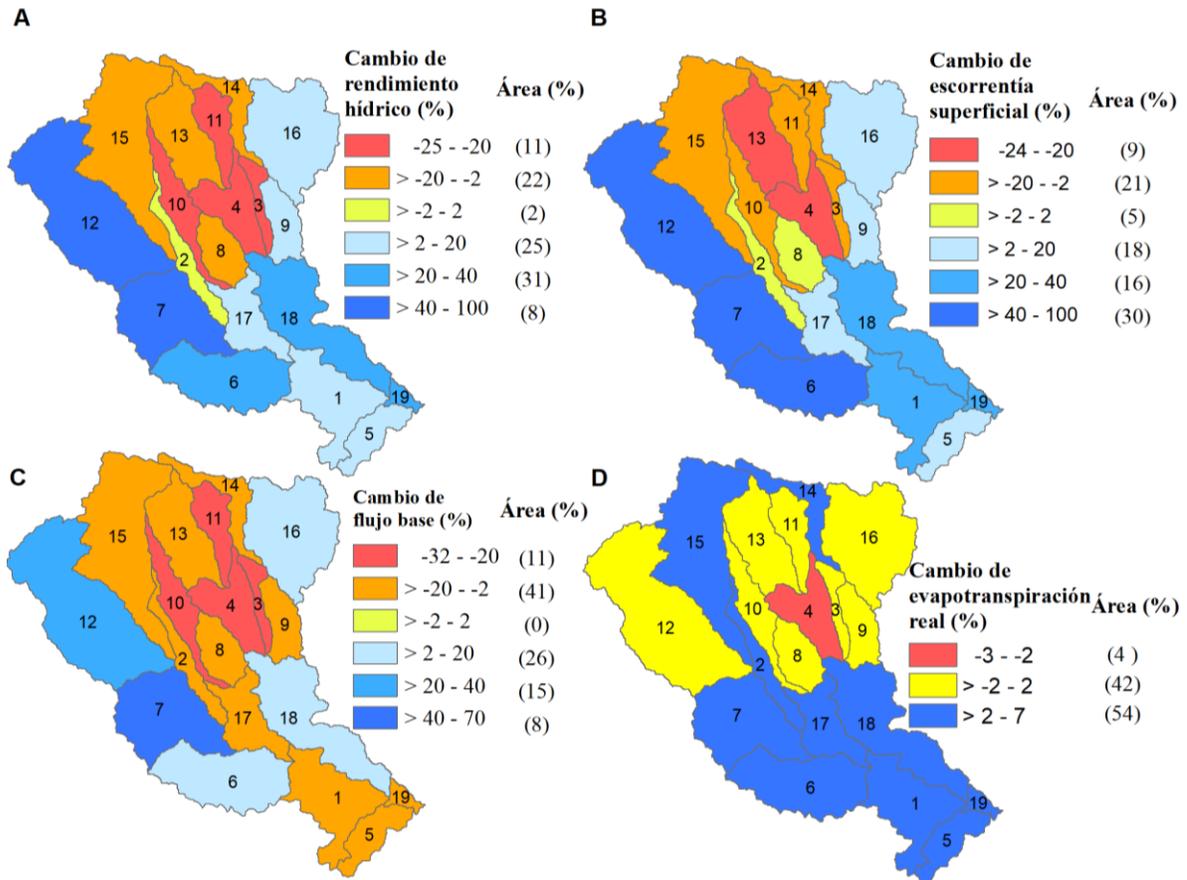


Figura 3-55. Cambios promedios por variabilidad climática del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac.

3.5.2.2. Impactos de los cambios del uso y cobertura del suelo en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos promedios en los procesos hidrológicos por los cambios del UCS varían entre ~ -5 mm (-0.6%) a ~ 6 mm (0.9%) (Tabla 3-47). La escorrentía superficial (*SURQ*) es el proceso hidrológico con mayor impacto ($\sim 0.9\%$) con respecto a su valor inicial; mientras que, el flujo base (*BF*) es la variable con menor impacto ($\sim 0.1\%$). Estos impactos son pequeños en comparación con los impactos ocasionados por la variabilidad climática. Sin embargo, en el análisis a nivel de subcuencas se presentan valores de cambio mayores.

Tabla 3-51 Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por UCS en la cuenca del río Amacuzac. Los cambios son evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2008.

Variable	M1	M2	M3	M4	IU1 (mm)	IU2 (mm)	IŪ (mm)	IŪ (%)
WY	322	320	365	363	-2.0	-2.6	-2.3	-0.7
SURQ	182	177	223	218	-4.8	-5.5	-5.1	-2.5
BF	131	134	133	135	2.6	2.7	2.7	2.0
perco	123	125	141	144	2.0	2.3	2.1	1.6
et	760	762	776	778	2.0	2.2	2.1	0.3

M1: clima 1982-2000, UCS 1996
M2: clima 1982-2000, UCS 2008
M3: clima 2001-2012, UCS 1996
M4: clima 2001-2012, UCS 2008

IU1: impacto por UCS, evaluación 1 (M2-M1)
IU2: impacto por UCS, evaluación 2 (M4-M3)
IŪ: impacto promedio del ucs ((IU1 + IU2) / 2)

Análisis a nivel de subcuencas: los impactos espaciales se presentan en la Figura 3-56 y un resumen en la Tabla 3-52. A continuación se describen los impactos en los principales procesos hidrológicos.

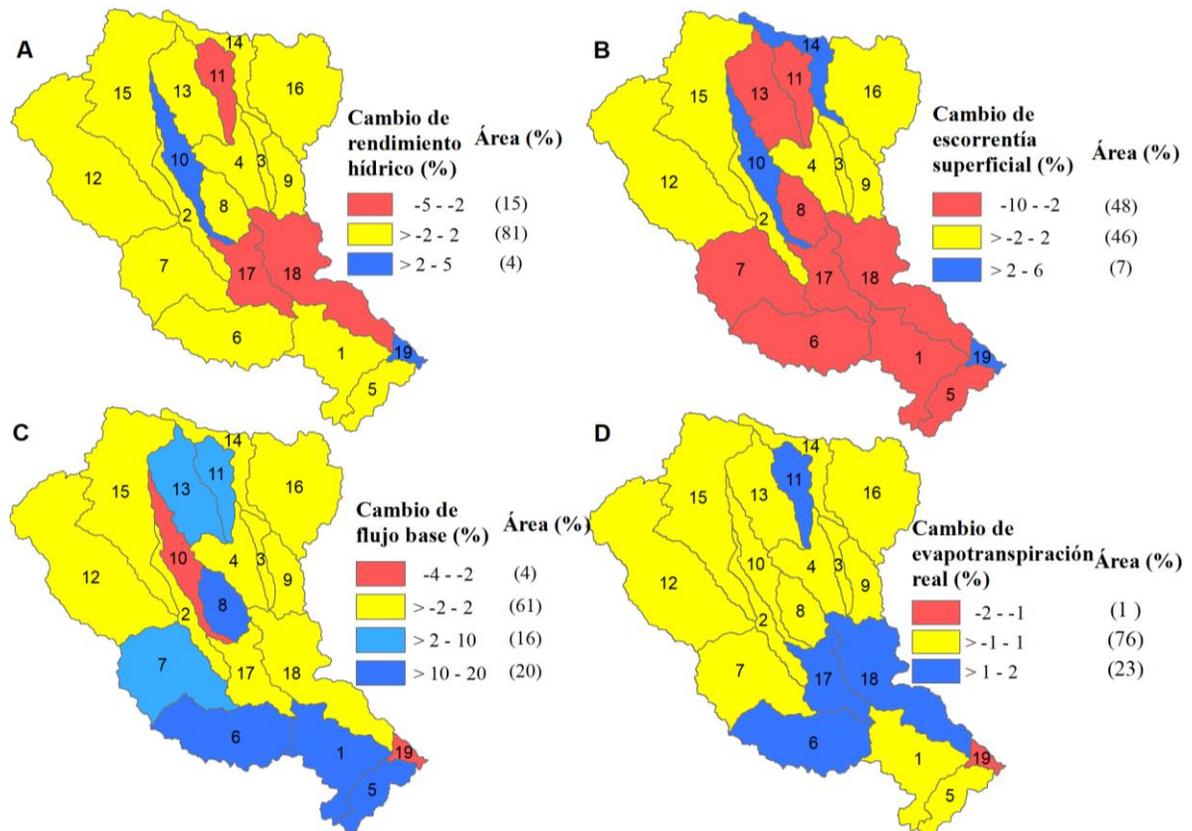


Figura 3-56. Cambios promedios por el cambio de UCS del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Amacuzac

- Rendimiento hídrico:** En la variable rendimiento hídrico, solo el 4% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 5%, este cambio se presenta en algunas subcuencas localizadas en la parte alta y baja de la cuenca (Figura 3-56A). En estas subcuencas se identificó reducción de las coberturas forestales, principalmente PINE, e incremento del uso de CRDY (Figura 3-57A). Por otro lado, el 15% del área de la cuenca presenta una reducción del *WY* entre -5% a -2%, este cambio se presenta en algunas subcuencas localizadas en la parte media-alta de la cuenca. En estas subcuencas se identificó principalmente disminución del uso CRDY e incremento de las coberturas forestales como FRSD (Figura 3-57B). Mientras que, el 81% del área de la cuenca presenta una variación de cambio entre -2% a 2%.

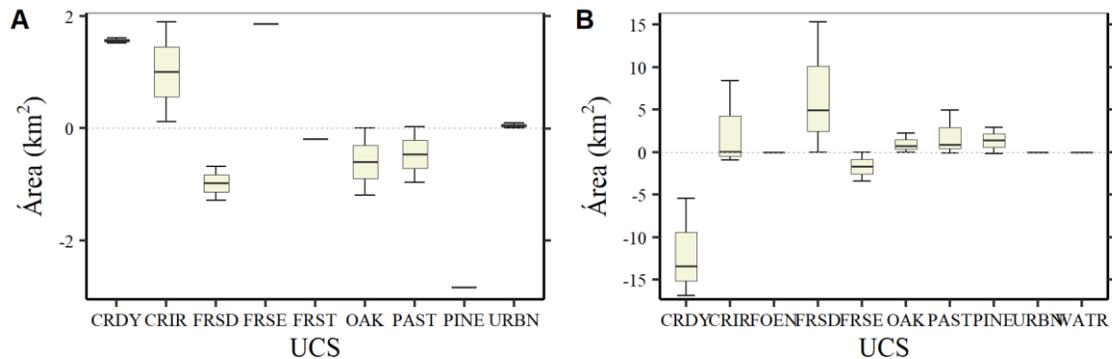


Figura 3-57. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$); (B) disminuyó ($\leq -2\%$) y (C) el cambio fue mínimo ($> -2\%$ a $< 2\%$) del rendimiento hídrico en la cuenca del río Amacuzac

- Escurrentía superficial:** El 7% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 6%, este incremento se presenta en algunas subcuencas localizadas en la parte alta y en la salida de la cuenca (Figura 3-56B). Los cambios de los UCS en estas subcuencas son principalmente reducción de coberturas forestales, como PINE y FRSD e incremento del uso de CRIR (Figura 3-58A). El 48% del área de la cuenca presenta una reducción de la *SURQ* entre -10% a -2%. En estas subcuencas se identificó principalmente disminución del uso CRDY e incremento de coberturas forestales como FRSD (Figura 3-58B). Mientras que, el 46% del área de la cuenca presenta una variación de cambio entre -2% a 2%.

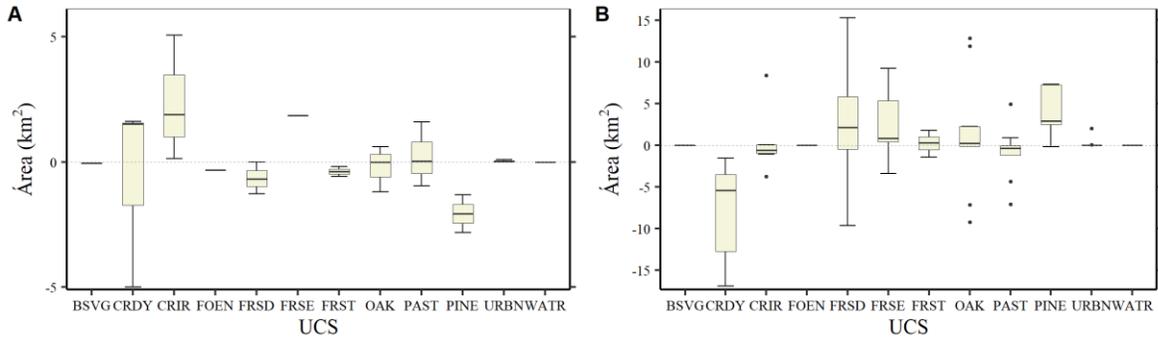


Figura 3-58. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$) y (B) disminuyó ($\leq 2\%$) de la escorrentía superficial en la cuenca del río Amacuzac

- Flujo base:** El 36% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 20%, este incremento se presenta mayormente en algunas subcuencas localizadas en la parte baja y alta de la cuenca (Figura 3-58C). Los cambios de las coberturas en estas subcuencas son reducción principalmente de los usos CRDY y PAST, e incremento de las coberturas forestales como FRSE y PINE (Figura 3-59A). Por otro lado, sólo el 4% del área de la cuenca presenta una reducción del *BF* que varía entre 4% a 2%. En estas subcuencas hubo disminución de las coberturas forestales como PINE y FRSD e incremento del uso CRIR y la cobertura forestal FRSE (Figura 3-59B). Mientras que, el 61% del área de la cuenca presenta una variación de cambio entre -2% a 2%.

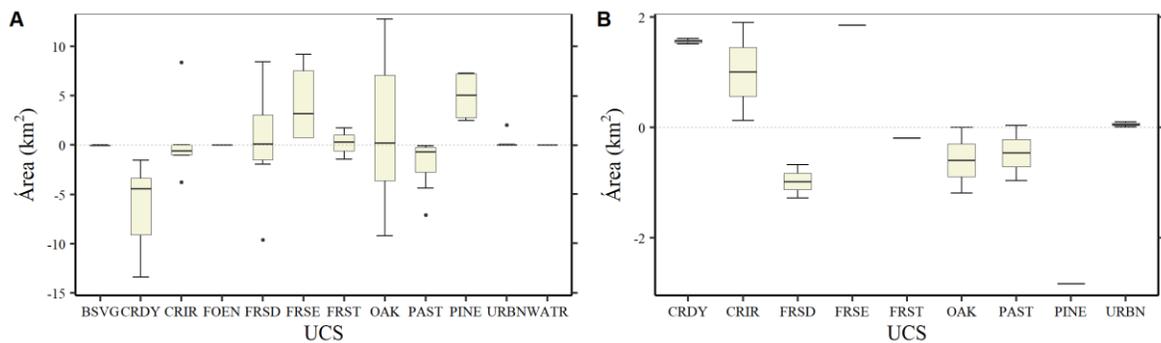


Figura 3-59. Cambios de las áreas de los UCS en las subcuencas donde (A) incrementó ($\geq 2\%$) y (B) disminuyó ($\leq 2\%$) el flujo base en la cuenca del río Amacuzac

- Evapotranspiración real:** toda la cuenca presenta cambios entre -2% a 2%. El 23% del área de la cuenca presenta un incremento mayor a 1%; mientras que, sólo el 1% del área de la cuenca presenta reducción de la *et*. EL 76% del área de la cuenca presenta cambios mínimos entre -1% a 1%. En las subcuencas donde se está

incrementando ligeramente la *et*, existe reducción del uso CRDY e incremento de las coberturas forestales FRSD, OAK y PINE.

Tabla 3-52. Impactos por los cambios del UCS actuales en la cuenca del río Amacuzac, cambios evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2008

Variables	Cambio (%)	N° de subcuencas	Área (%)	Principales cambios de los usos y coberturas del suelo (> 1 km ²)	
				Disminución	Incremento
Rendimiento hídrico	≥ 2	2	4	PINE, FRSD, OAK	CRDY, CRIR, FRSE
	≤ -2	3	15	CRDY, FRSE	FRSD, CRIR, PAST, OAK, PINE
Escorrentía superficial	≥ 2	3	7	PINE, FRSD, CRDY, FRST, OAK	CRIR, FRSE, PAST
	≤ -2	9	48	CRDY, PAST	FRSD, PINE, FRSE, OAK, URBN, CRIR
Flujo base	≥ 2	7	36	CRDY, PAST	FRSE, PINE, OAK, CRIR, URBN, FRSD
	≤ -2	2	4	PINE, FRSD, OAK	CRDY, CRIR, FRSE
Evapotranspiración real	≥ 2	-	-	-	-
	≤ -2	-	-	-	-

3.6. Impactos futuros en los procesos hidrológicos

3.6.1. Cuenca del río La Sierra

3.6.1.1. Impactos del cambio climático en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos promedios en los procesos hidrológicos por cambio climático en su mayoría son negativos (Tabla 3-53). El *BF* son los procesos con mayor impacto con respecto a su valor inicial, -31% y -32% respectivamente. Mientras que, la *SURQ* es el proceso con menor impacto, su cambio es de -4%. La *ET* es la única variable que presenta un cambio positivo, el incremento es de 240 mm (25%). Estos impactos ocasionados por el cambio climático están explicados por una reducción de la precipitación del ~ -0.2% y un incremento del 8% de la evapotranspiración potencial (Tabla 3-54).

Tabla 3-53. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por cambio climático en la cuenca del río La Sierra

Variable	M1	M2	M3	M4	IC1 (mm)	IC2 (mm)	IC1 (%)	IC2 (%)	IC̄ (mm)	IC̄ (%)
<i>WY</i>	1435	1477	1188	1228	-247	-249	-17	-17	-248	-17
<i>SURQ</i>	709	778	698	732	-11	-46	-2	-6	-28	-4
<i>BF</i>	695	670	469	475	-226	-195	-33	-29	-210	-31
<i>PERCO</i>	608	588	405	412	-203	-176	-33	-30	-190	-32
<i>ET</i>	981	939	1221	1181	239	241	24	26	240	25

M1: clima 1982-2012, UCS 1996
M2: clima 1982-2012, UCS 2008
M3: clima 2042-2072, UCS 1996
M4: clima 2042-2072, UCS 2008

IC1: impacto por variabilidad climática 1 (M3-M1)
IC2: impacto por variabilidad climática 2 (M4-M2)
IC̄: impacto promedio ((IC1 + IC2)/2)

Tabla 3-54. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2012) y el periodo de cambio (2042-2072) en la cuenca del río La Sierra

Variable	Periodo de referencia	Periodo de cambio	Δ (mm)	Δ (%)
	1982-2012	2042-2072		
<i>PET</i>	1574	1706	132	8
<i>TMAX</i>	26.9	29.2	2.3	8.6
<i>TMIN</i>	15.1	16.8	1.7	11.3
<i>PRECIP</i>	2447	2442	-5	-0.2

En la Figura 3-60 se presenta los impactos a nivel de cuenca por mes. Los cambios del rendimiento hídrico durante el año en su mayoría son negativos, varían entre ~ -64 a ~9 %. La mayor disminución se da en el mes de mayo (~ -64%) y un incremento en el mes de octubre (~ 9%). La escorrentía superficial presenta cambios positivos y negativos durante todo el año, los meses de noviembre a agosto tienden a disminuir entre ~ -2% a ~ -92%; mientras que, los meses de septiembre a octubre incrementan en ~5% y ~39% respectivamente. El flujo base presenta reducciones en todos los meses, los cambios varían entre ~ -72% (julio) a ~ -10% (enero). La evapotranspiración real presenta incrementos en todos los meses, los cambios positivos varían entre ~15% (junio) a ~52% (febrero).

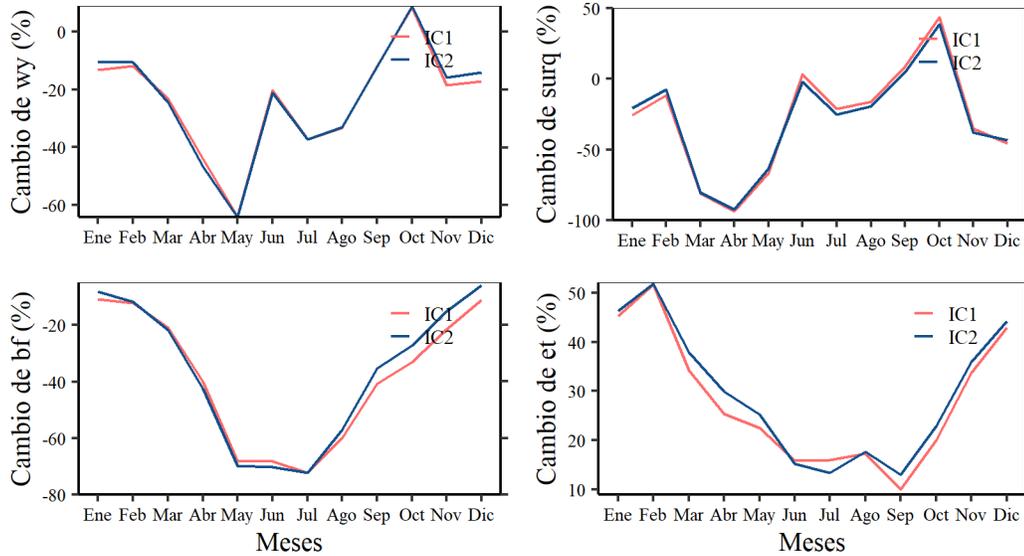


Figura 3-60. Cambios actuales promedios mensuales por variabilidad climática en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac

Los cambios mensuales en la precipitación varían entre -15% a 23% (Figura 3-61A). Los meses de octubre a febrero presentan cambios positivos que varían entre ~ 1% a ~ 14%; mientras que, los meses de marzo a septiembre presentan cambios negativos que varían entre 4% a 23%. La evapotranspiración potencial presenta cambios positivos que varían entre ~4% a ~13% (Figura 3-61B). Los meses con mayor incremento son julio (13%) y agosto (12%); mientras que, los meses con menor cambio son octubre (4%) y noviembre (5%).

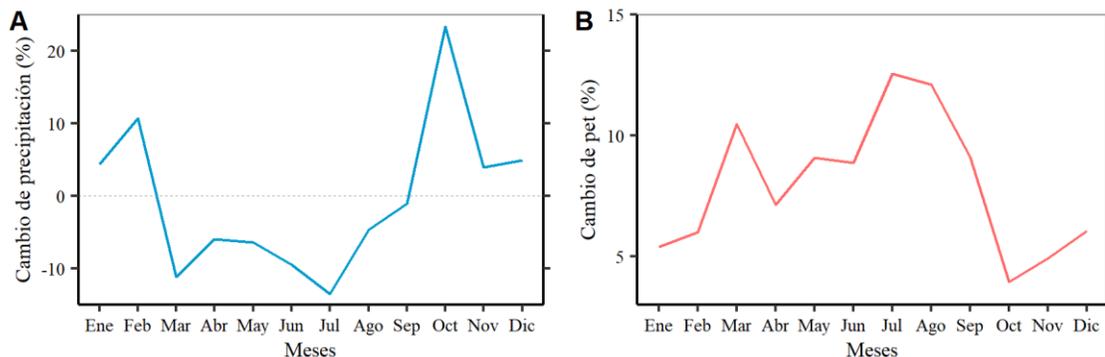


Figura 3-61. Cambios futuros promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra

Análisis a nivel de subcuencas: En la Figura 3-62 se presentan los cambios espaciales a nivel de subcuencas en los procesos hidrológicos por el cambio climático.

- *Rendimiento hídrico*: los cambios son negativos en todas las subcuencas, la variación espacial de los cambios es de -25% a -10% (Figura 3-62A). Los cambios mayores se dan en la parte alta de la cuenca (sureste), estos cambios varían entre -25% a -20%. El menor cambio se da principalmente en la parte baja de la cuenca, sus cambios varían entre -20% a -10%.
- *Escorrentía superficial*: se presentan cambios espaciales positivos y negativos, los cuales varían entre -30% a 25% (Figura 3-62B). Los incrementos se presentan en algunas subcuencas localizadas en la parte alta y baja de la cuenca; con respecto al área de la cuenca estos cambios representan el 18%. Mientras que, el 63% del área de la cuenca presenta una reducción de la *SURQ*, estos cambios negativos varían entre -20% a -2% y se encuentran distribuidos espacialmente en casi toda la cuenca. Finalmente, el 19% del área de la cuenca presenta cambios mínimos que van entre -2% a 2%.
- *Flujo base*: los cambios son negativos en toda la cuenca, la variación espacial de los cambios es de -60% a -10% (Figura 3-62C). El mayor impacto se presenta en las subcuencas localizadas en la parte baja de la cuenca, los cambios varían entre -60% a 50%. El menor impacto se presenta en algunas cuencas localizadas en la parte alta de la subcuenca, su cambio varía entre -20% a -10%.
- *Evapotranspiración real*: los cambios espaciales son positivos en todas las subcuencas varían entre 10 a 40% (Figura 3-62D). Los cambios mayores se presentan en la parte baja de la cuenca entre 30% a 40%; mientras que, los cambios con menor incremento en la parte baja de la cuenca entre 10% a 20%.

Estos cambios en los procesos hidrológicos están explicados por los cambios espaciales de la precipitación que varían entre -2% a 1% (Figura 3-63A); y por la variación espacial de la *PET* que varía entre -8% a 10% (Figura 3-63B). Las subcuencas localizadas en la parte alta presentan reducciones de la precipitación entre -2% a -1%, estas subcuencas representan el 54% del área de la cuenca; mientras que, las subcuencas localizadas en la zona baja de la cuenca presentan cambios entre -1% a 1%, estas subcuencas representan el 46% del área de la cuenca. Por otro lado, la *PET* presenta incrementos en todas las subcuencas que varían entre 8% a 10%.

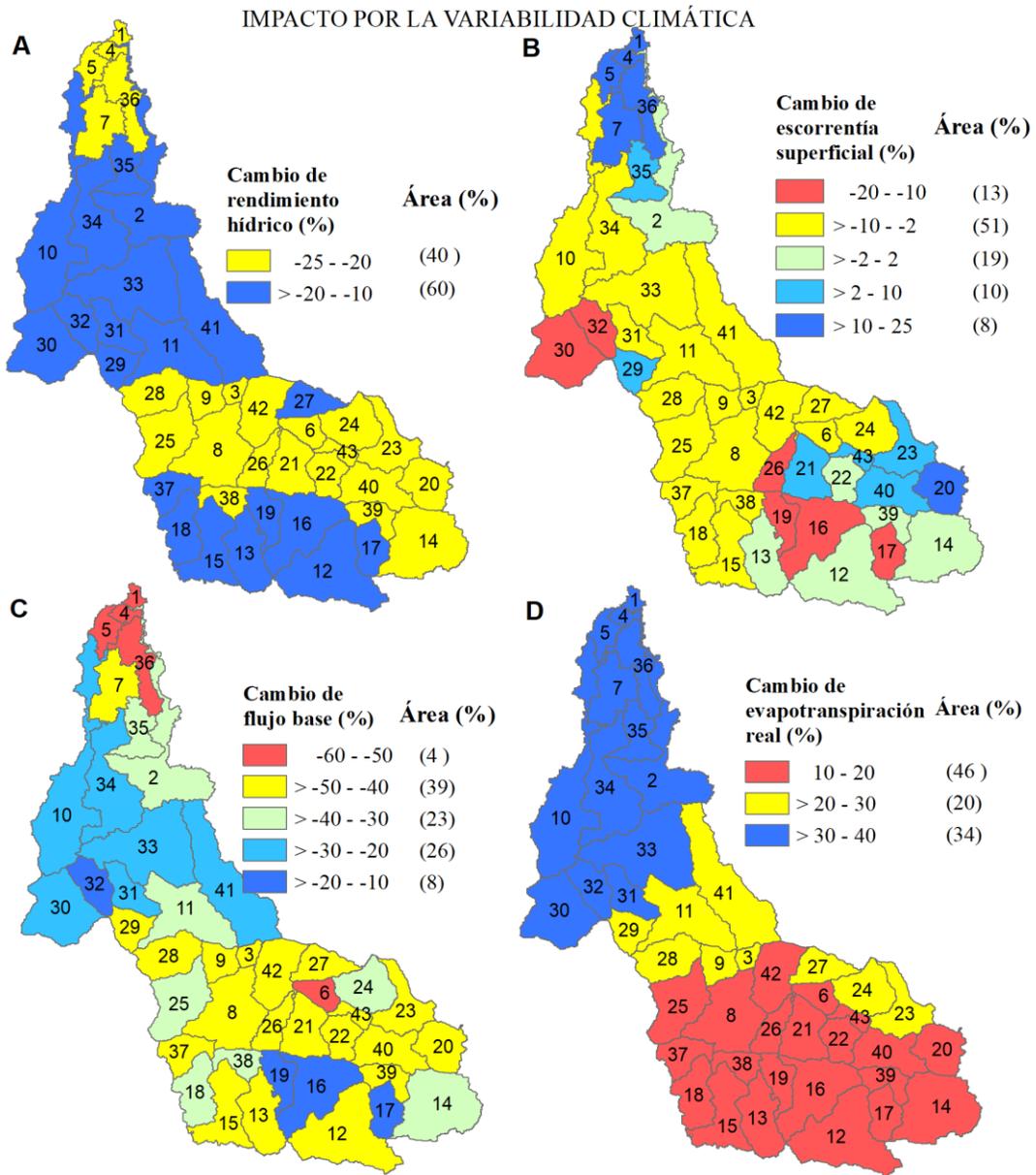


Figura 3-62. Cambios futuros a nivel de subcuencas por la influencia del cambio climático en el rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) en la cuenca del río La Sierra

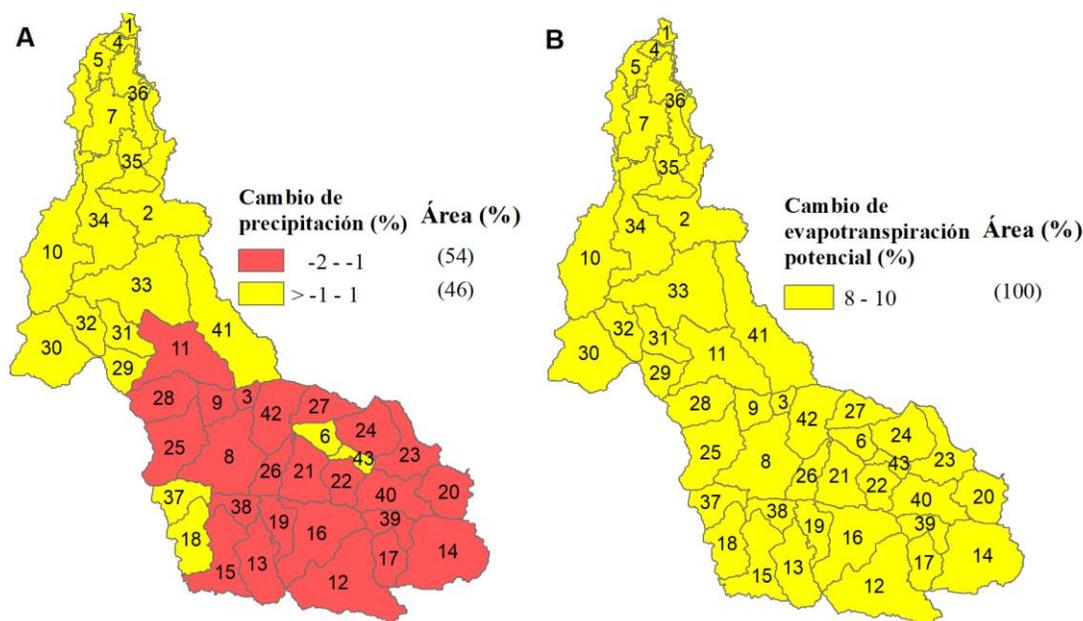


Figura 3-63. Cambios futuros a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río La Sierra

3.6.1.2. Impactos futuros de los cambios del uso y cobertura del suelo en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos promedios en los procesos hidrológicos por los cambios del ucs varían entre ~ -41 mm (-4%) a ~ 41 mm (3%) (Tabla 3-55). La *SURQ* es el proceso hidrológico con mayor impacto ($\sim 7\%$) con respecto a su valor inicial; mientras que, el *BF* y *perco* son las variables con menor impacto ($\sim -1\%$). Estos impactos son pequeños en comparación con los impactos ocasionados por la variabilidad climática. Sin embargo, en el análisis a nivel de subcuencas se presentan valores de cambio mayores.

Tabla 3-55. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por UCS proyectado, en la cuenca La Sierra

Variable	M1	M2	M3	M4	IU1 (mm)	IU2 (mm)	IU1 (%)	IU2 (%)	IŪ (mm)	IŪ (%)
<i>WY</i>	1435	1477	1188	1228	42	40			41	3
<i>SURQ</i>	709	778	698	732	69	34			51	7
<i>BF</i>	695	670	469	475	-25	6			-10	-1
<i>PERCO</i>	608	588	405	412	-20	8			-6	-1
<i>ET</i>	981	939	1221	1181	-42	-40			-41	-4

M1: clima 1982-2000, UCS 1996
M2: clima 1982-2000, UCS 2008
M3: clima 2001-2012, UCS 1996
M4: clima 2001-2012, UCS 2008

IU1: impacto por UCS, evaluación 1 (M2-M1)
IU2: impacto por UCS, evaluación 2 (M4-M3)
IŪ: impacto promedio del UCS ((IU1 + IU2) / 2)

Análisis a nivel de subcuencas: los impactos espaciales se presentan en la Figura 3-51 y un resumen en la Tabla 3-48. A continuación se describen los impactos en los principales procesos hidrológicos.

- *Rendimiento hídrico:* los cambios por UCS son positivos en todas las subcuencas, varían entre 0 a 20% (Figura 3-68A). El 47% del área de la cuenca presenta incrementos mayores a 2%, en estas áreas se identificó reducción de las coberturas forestales, principalmente FRST y PINE, e incremento del uso de AGRL (Figura 3-64). Los mayores cambios de WY se presentan en las subcuencas localizadas en la parte alta de la cuenca (17% del área), estos cambios varían entre 10% a 20%

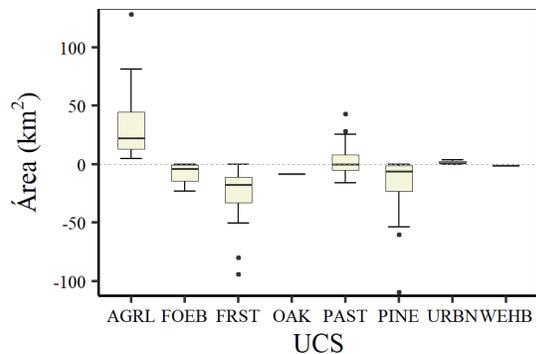


Figura 3-64. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ el rendimiento hídrico en la cuenca del río La Sierra

- *Escorrentía superficial:* los cambios son positivos en todas las subcuencas. El 70% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 63%. El mayor incremento se presenta en las subcuencas localizadas en la parte alta de la cuenca, su variación de cambio es de 40% a 63% (Figura 3-68B). Los cambios de las coberturas en las subcuencas con un cambio mayor a 2% son reducción de las coberturas forestales, principalmente FRST, e incremento del uso de AGRL (Figura 3-65). El 30% del área de la cuenca presenta cambios menores que 2%.

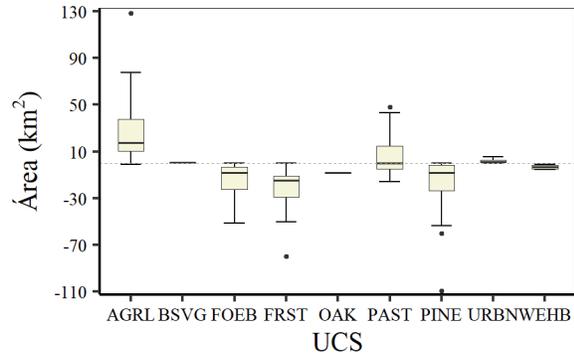


Figura 3-65. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ la escorrentía superficial en la cuenca del río La Sierra

- Flujo base:* los cambios espaciales son negativos y positivos, su variación es de -10% a 41%. El 28% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 41%, este incremento se presenta mayormente en algunas subcuencas localizadas en la parte media-alta (Figura 3-68C). Los cambios de las coberturas en estas subcuencas son reducción de las coberturas forestales, principalmente FRST, e incremento del uso de AGRL (Figura 3-66A). El 50% del área de la cuenca presenta una reducción del BF menor a -2%. En estas subcuencas hubo disminución principalmente de las coberturas PINE y FOEB e incremento de la cobertura AGRL y PAST (Figura 3-66B).

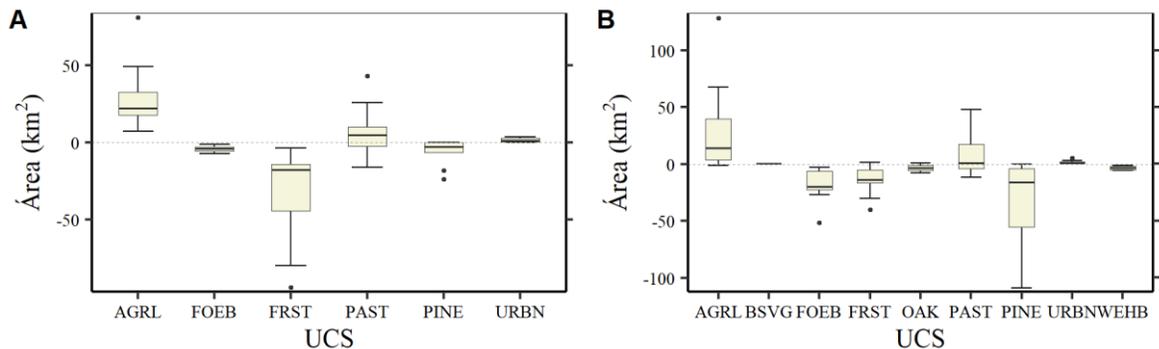


Figura 3-66. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ (A) y disminuyó $< 2\%$ (B) el flujo base en la cuenca del río La Sierra

- Evapotranspiración real:* los cambios son negativos en todas las subcuencas, varían entre -11% a 0%. El 64% del área de la cuenca presenta una reducción entre -11% a 2%, esta reducción se presenta en algunas subcuencas localizadas en la parte media-alta (Figura 3-68D). Los cambios de los UCS en estas subcuencas son reducción de las

coberturas forestales, principalmente FRST y PINE, e incremento del uso de AGRL y PAST (Figura 3-67). El 36% del área de la cuenca presentan cambios entre -2% a 0%, estos cambios se presentan en subcuencas localizadas en la parte baja de la cuenca.

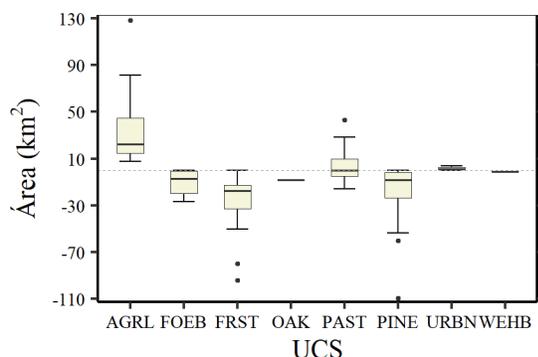


Figura 3-67. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde disminuyó $\leq -2\%$ la evapotranspiración real en la cuenca del río La Sierra

Tabla 3-56. Impactos futuros por los cambios futuros del UCS en la cuenca del río La Sierra. Los cambios son evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2050

Variables	Cambio (%)	N° de subcuencas	Área (%)	Principales cambios de los usos y coberturas del suelo	
				Disminución	Incremento
Rendimiento hídrico	≥ 2	28	47	FRST, PINE, FOEB, OAK	AGRL, PAST, URBN
	≤ -2	-	-	-	-
Escorrentía superficial	≥ 2	33	70	FRST, PINE, FOEB, WEHB, OAK	AGRL, PAST, URBN
	≤ -2	0	-	-	-
Flujo base	≥ 2	14	28	FRST, PINE, FOEB	AGRL, PAST, URBN
	≤ -2	18	50	PINE, FOEB, FRST, WEHB, OAK	AGRL, PAST, URBN
Evapotranspiración real	≥ 2	0	-	-	-
	≤ -2	28	64	FRST, PINE, FOEB, OAK	AGRL, PAST, URBN

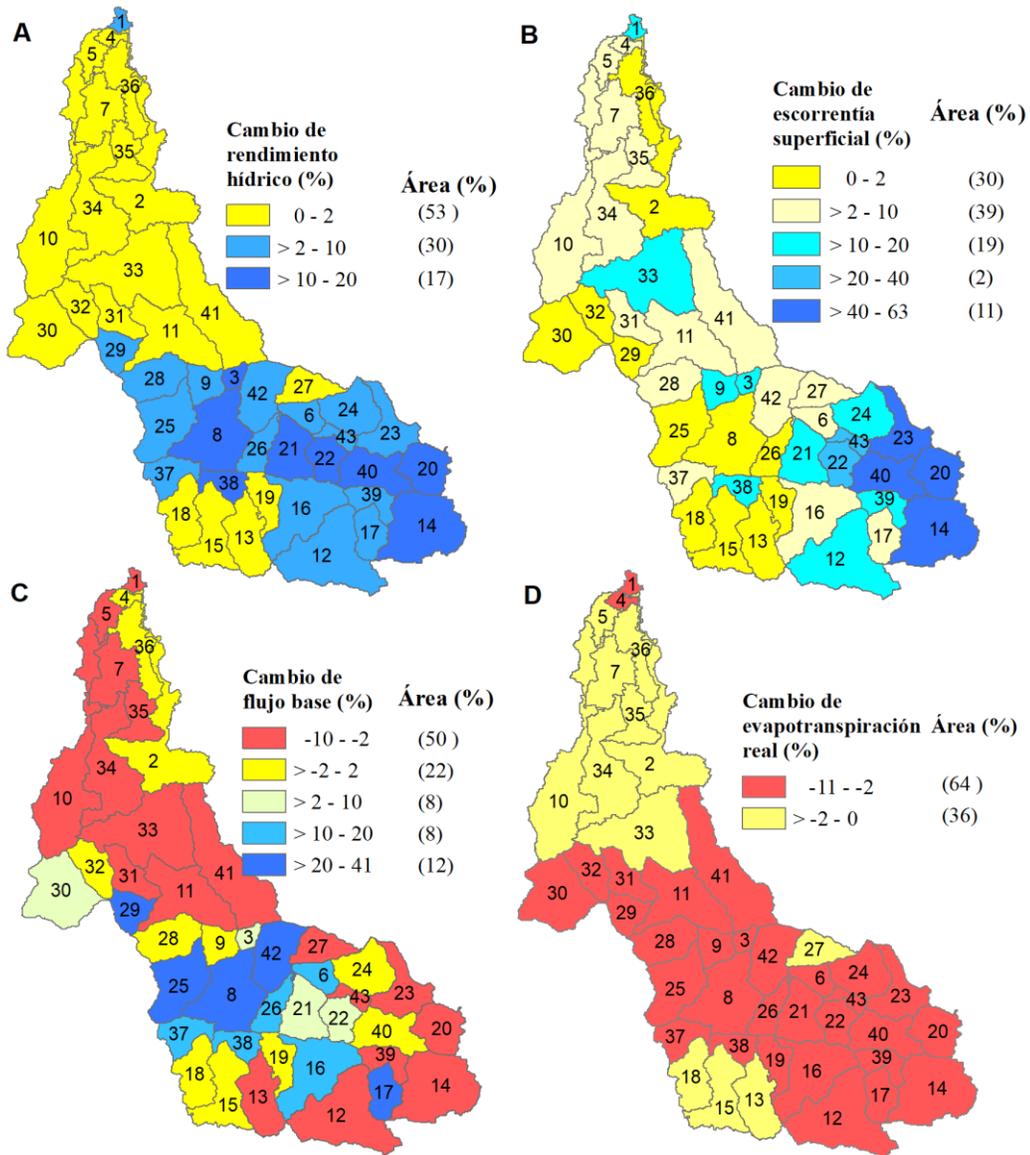


Figura 3-68. Cambios del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río La Sierra

3.6.2. Cuenca del río Amacuzac

3.6.2.1. Impactos del cambio climático en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos futuros promedios en los procesos hidrológicos por cambio climático son positivos y negativos, varían entre ~ -40 mm (~ -28%) a 57 mm (~ 7%) (Tabla 3-57). El *BF* es el proceso con mayor impacto (~ -28%) con respecto a su

valor inicial; mientras que, el *WY* es la variable con menor impacto ($\sim -7\%$). Estos impactos ocasionados por el cambio climático están explicados por un incremento de la precipitación del $\sim 3\%$ y un incremento del $\sim 7\%$ de la evapotranspiración potencial (Tabla 3-58).

Tabla 3-57 Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac

Variable	M1	M2	M3	M4	IC1 (mm)	IC2 (mm)	\bar{IC} (mm)	\bar{IC} (%)
<i>WY</i>	349	343	325	319	-24.8	-24.5	-24.6	-7.1
<i>SURQ</i>	198	187	215	206	17.4	19.1	18.3	9.5
<i>BF</i>	142	147	103	106	-39.8	-41.0	-40.4	-27.9
<i>PERCO</i>	130	134	95	98	-35.3	-36.2	-35.8	-27.1
<i>ET</i>	766	773	823	829	57.0	56.5	56.8	7.4

M1: clima 1982-2000, UCS 1996
M2: clima 1982-2000, UCS 2008
M3: clima 2001-2012, UCS 1996
M4: clima 2001-2012, UCS 2008
IC1: impacto por variabilidad climática 1 (M3-M1)
IC2: impacto por variabilidad climática 2 (M4-M2)
 \bar{IC} : impacto promedio ((IC1 + IC2)/2)

Tabla 3-58. Cambio de la evapotranspiración potencial, precipitación, temperatura máxima y mínima entre el periodo de referencia (1982-2012) y el periodo de cambio (2042-2072), en la cuenca del río Amacuzac.

Variable	Periodo de referencia	Periodo de cambio	Δ (mm)	Δ (%)
	1982-2012	2042-2072		
<i>PET</i>	1547	1651	104.4	6.8
<i>TMAX</i>	24.4	26.5	2.1	8.6
<i>TMIN</i>	9.9	11.8	1.9	19.2
<i>PRECIP</i>	1154	1189	35.2	3.1

En la Figura 3-69 se presenta los impactos futuros a nivel de cuenca por mes. Los cambios del rendimiento hídrico durante el año en su mayoría son negativos, varían entre ~ -33 a $\sim 20\%$. La mayor disminución se da en los meses de febrero (27%) y agosto ($\sim -33\%$); mientras que, los meses con mayor incremento son los meses de enero (18%) y octubre (5%). La escorrentía superficial presenta cambios positivos y negativos durante todo el año. Los cambios negativos varían entre -58% a -7% ; mientras que, los cambios positivos varían entre 3% a 700% . Los cambios superiores a 100% se da en los meses con valores bajos de *SURQ*. El flujo base presenta cambios negativos en la mayoría de los meses, estos varían entre -38% a 3% . Únicamente los meses de marzo y abril presentan cambios positivos, 32% y 30% respectivamente. La *ET* presenta incrementos en la mayoría de los meses, estos varían entre 2% a 55% . El mes de agosto es el único mes que presenta una reducción de la *et*, el cambio es de -2% .

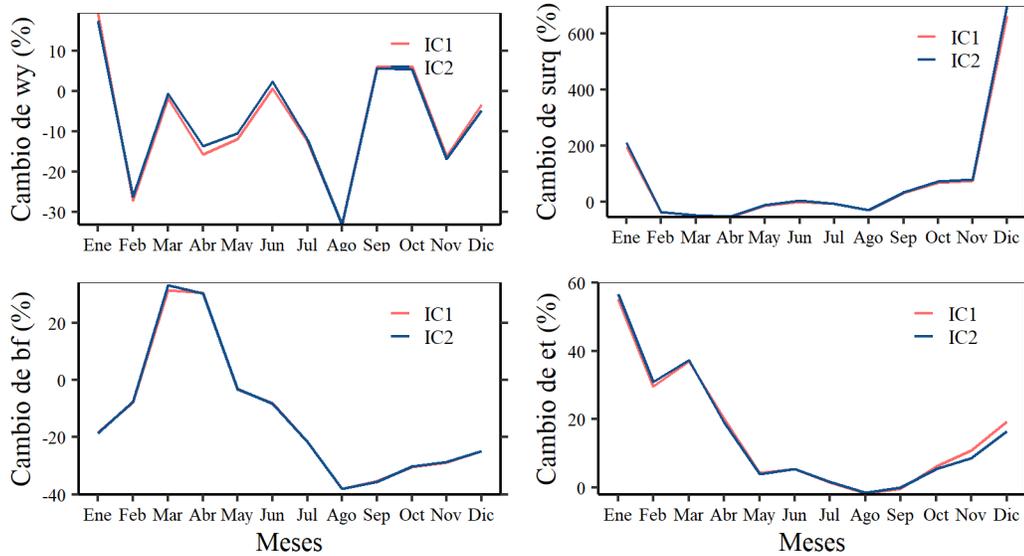


Figura 3-69. Cambios futuros promedios mensuales por cambio climático en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac

Los cambios mensuales en la precipitación varían entre -14% a 275% (Figura 3-70A). Los meses de noviembre a abril presentan los mayores cambios porcentuales entre 30% a 275%. Mientras que, los meses de mayo a agosto presentan reducciones de la precipitación, entre -14% a -3%. La evapotranspiración potencial presenta cambios positivos que varían entre ~5% a ~10% (Figura 3-70B). Los meses con mayor incremento son mayo (8%) y agosto (10%); mientras que, los meses con menor cambio son de octubre a enero (~5%).

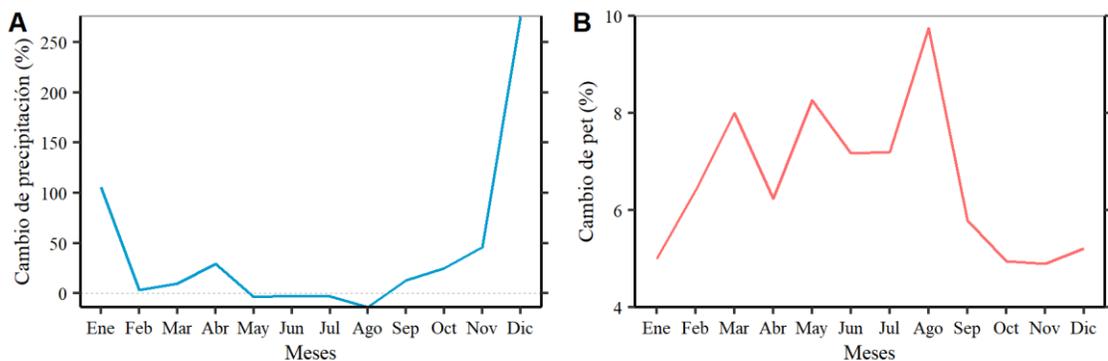


Figura 3-70. Cambios futuros promedios mensuales de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac

Análisis a nivel de subcuencas: En la Figura 3-71 se presentan los cambios espaciales a nivel de subcuencas en los procesos hidrológicos por el cambio climático.

- *Rendimiento hídrico:* se presentan cambios positivos y negativos en las subcuencas (Figura 3-71A). El 64% del área de la cuenca presenta cambios negativos, varían entre -20% a -2%; los cambios mayores se dan en la parte alta de la cuenca (noreste). Mientras que, el 25% del área de la cuenca presenta incrementos del WY entre 2% a 30%. Estos cambios se dan en la parte media de la cuenca. El 11% de la cuenca presenta cambios entre -2% a 2%.
- *Escorrentía superficial:* se presentan cambios espaciales positivos y negativos (Figura 3-71B). El 75% del área de la cuenca presenta incrementos que varían entre 2% a 41%, estos incrementos están distribuidos en casi toda la cuenca. El 19% del área de la cuenca presentan reducciones que varían entre -15% a -2%. Finalmente, el 7% del área de la cuenca presenta cambios mínimos que varían entre -2% a 2%.
- *Flujo base:* se presentan cambios espaciales positivos y negativos (Figura 3-71C). El 74% del área de la cuenca presenta cambios negativos que varían entre -40% a -2%. Mientras que, el 25% del área presenta cambios positivos que varían entre 2% a 40%, estos cambios principalmente están impactado a la zona media de la cuenca.
- *Evapotranspiración real:* los cambios espaciales en su mayoría son positivos en todas las subcuencas (Figura 3-71D). El 90% del área de cuenca presenta incrementos entre 2% a 16%. Los cambios mayores se presentan en algunas subcuencas de la parte alta y baja. El 10% del área de la cuenca presenta cambios menores entre -2 a 2%.

IMPACTO POR LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

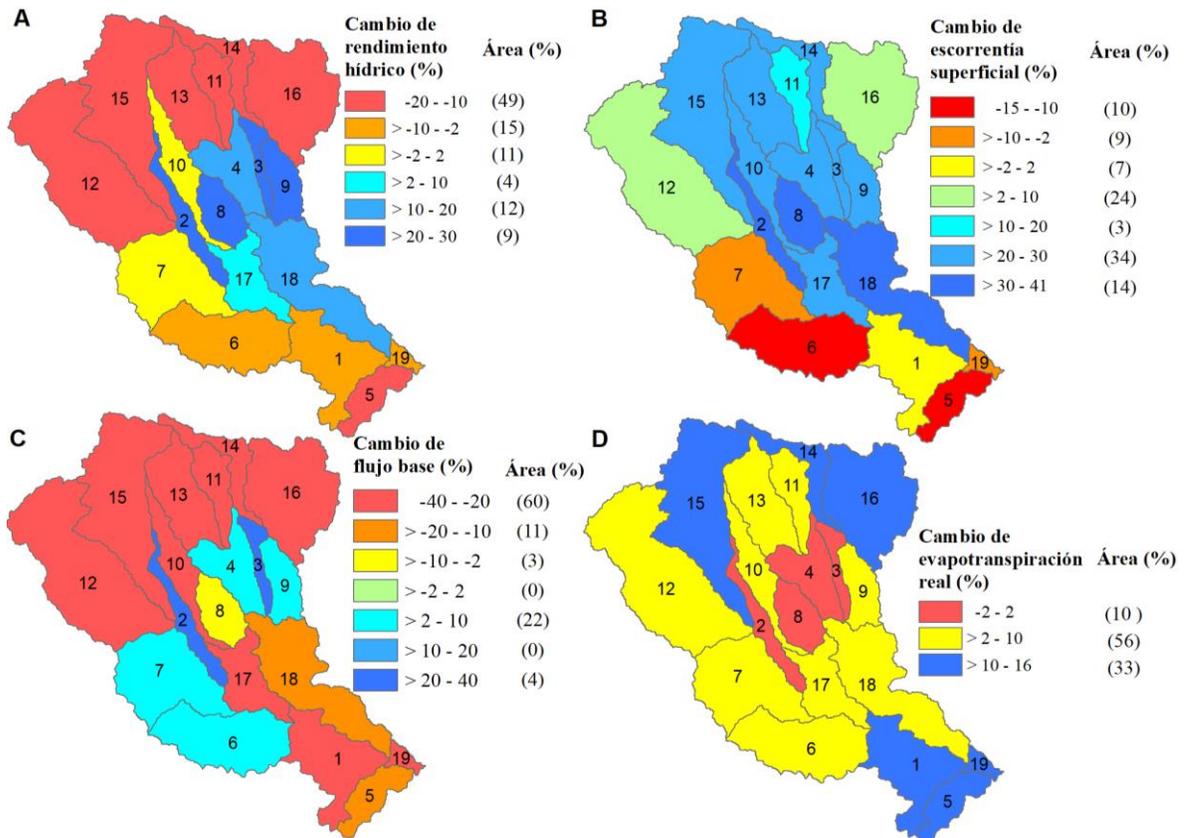


Figura 3-71. Cambios futuros a nivel de subcuencas por la influencia del cambio climático en el rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) en la cuenca del río Amacuzac.

Estos cambios en los procesos hidrológicos están explicados por los cambios espaciales de la precipitación que varían entre 0.1% a 10% (Figura 3-72A); y por la variación espacial de la *PET* que varía entre 6% a 8% en toda la cuenca (Figura 3-72B). Las subcuencas localizadas en la parte baja-media de la cuenca presentan los mayores incrementos de precipitación, su variación es entre 2% a 10%, estas subcuencas representan el 56% del área de la cuenca. Mientras que, las subcuencas localizadas en la parte alta de la cuenca presentan cambios entre 0.1% a 2%, estas subcuencas representan el 44% del área de la cuenca.

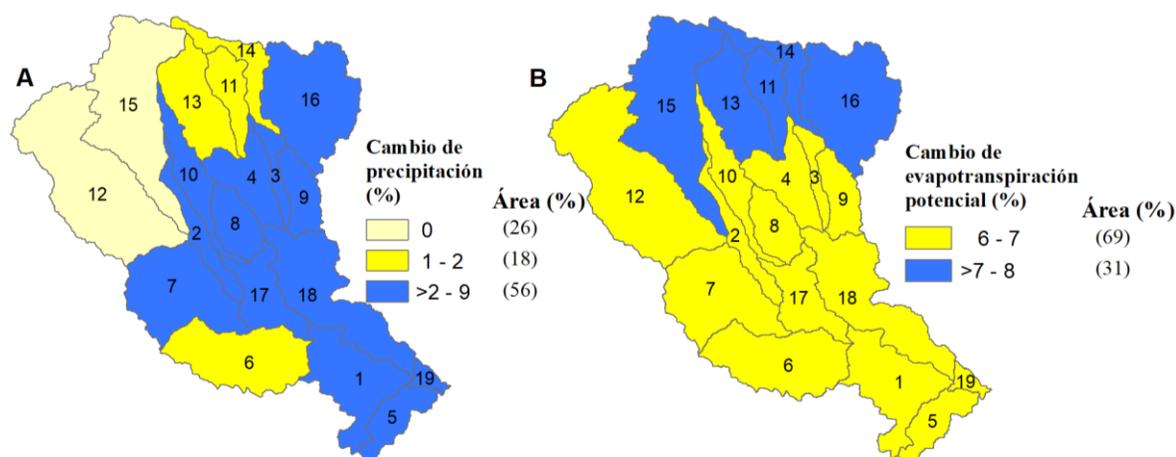


Figura 3-72. Cambios futuros a nivel de subcuencas de la precipitación (A) y la evapotranspiración potencial (B) en la cuenca del río Amacuzac

3.6.2.2. Impactos futuros de los cambios del uso y cobertura del suelo en los procesos hidrológicos

Análisis a nivel de cuenca: Los impactos futuros promedios en los procesos hidrológicos por los cambios del UCS varían entre ~ -10 mm (-5%) a ~ 6 mm (1%) (Tabla 3-59 Tabla 3-55). La *SURQ* es el proceso hidrológico con mayor impacto ($\sim -5\%$) con respecto a su valor inicial; seguido del *BF* (3%). Estos impactos son pequeños en comparación con los impactos ocasionados por el cambio climático. Sin embargo, en el análisis a nivel de subcuencas se presentan valores de cambio mayores.

Tabla 3-59. Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por UCS en la cuenca Amacuzac

Variable	M1	M2	M3	M4	IU1 (mm)	IU2 (mm)	\bar{IU} (mm)	\bar{IU} (%)
<i>WY</i>	349	343	325	319	-6.4	-6.1	-6.3	-1.9
<i>SURQ</i>	198	187	215	206	-11.1	-9.5	-10.3	-5.0
<i>BF</i>	142	147	103	106	4.4	3.2	3.8	3.1
<i>perco</i>	130	134	95	98	3.4	2.5	2.9	2.6
<i>et</i>	766	773	823	829	6.7	6.2	6.4	0.8

M1: clima 1982-2000, UCS 1996
M2: clima 1982-2000, UCS 2050
M3: clima 2001-2012, UCS 1996
M4: clima 2001-2012, UCS 2050

IU1: impacto por UCS, evaluación 1 (M2-M1)
IU2: impacto por UCS, evaluación 2 (M4-M3)
 \bar{IU} : impacto promedio del UCS ((IU1 + IU2) / 2)

Análisis a nivel de subcuencas: los impactos espaciales se presentan en la Figura 3-73 y un resumen en la Tabla 3-60. A continuación se describen los impactos en los principales procesos hidrológicos.

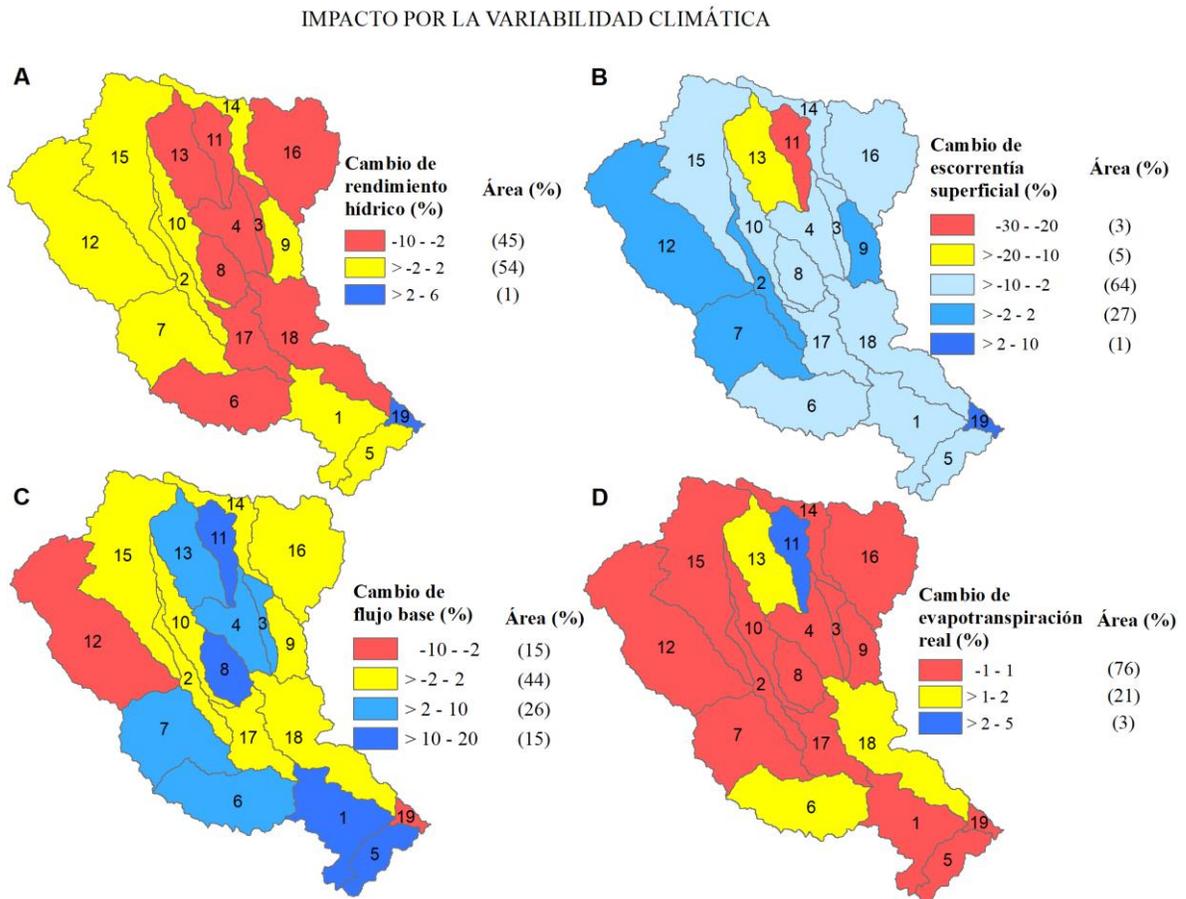


Figura 3-73. Cambios futuros del rendimiento hídrico (A), escorrentía superficial (B), flujo base (C) y evapotranspiración real (D) a nivel de subcuencas por los cambios del uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Amacuzac.

- Rendimiento hídrico:* los cambios futuros por UCS son positivos y negativos, varían entre -10% a 6% (Figura 3-73A). El 45% del área de la cuenca presenta cambios negativos entre -10% a -2%, en estas áreas se identificó reducción de los usos CRDY y PAST, e incremento de la cobertura forestal OAK, así como también del uso CRIR (Figura 3-74). Los mayores cambios de *WY* se presentan en las subcuencas localizadas en la parte alta y media de la cuenca. Únicamente una subcuenca presenta incremento de *WY* superior a 2%. En esta subcuenca disminuyó CRDY e incrementó URBN.

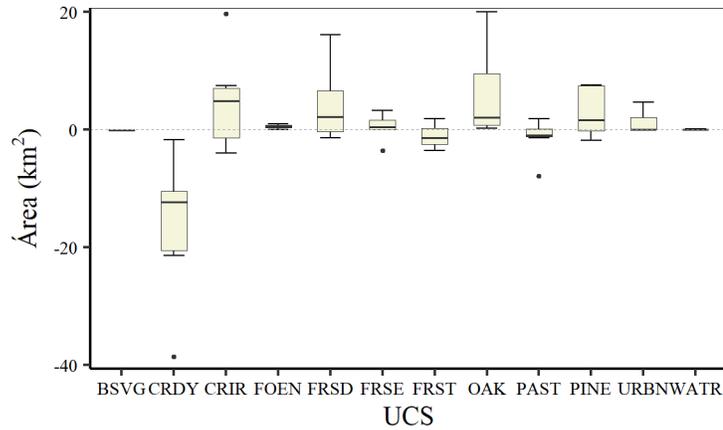


Figura 3-74. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde disminuyó $\leq -2\%$ el rendimiento hídrico en la cuenca del río Amacuzac.

- Escorrentía superficial*: los cambios en su mayoría son negativos en todas las subcuencas. El 72% del área de la cuenca presenta una reducción entre -30% a -2%. El mayor incremento se presenta en dos subcuencas localizadas en la parte alta de la cuenca (Figura 3-73B). Los cambios de los UCS en las subcuencas con un cambio menor a -2% son reducción de los usos CRDY y PAST e incremento de la cobertura forestal FRSD y el uso CRIR (Figura 3-75Figura 3-65). Únicamente una subcuenca presenta incremento de *SURQ* superior a 2%. En esta subcuenca disminuyó CRDY e incrementó URBN.

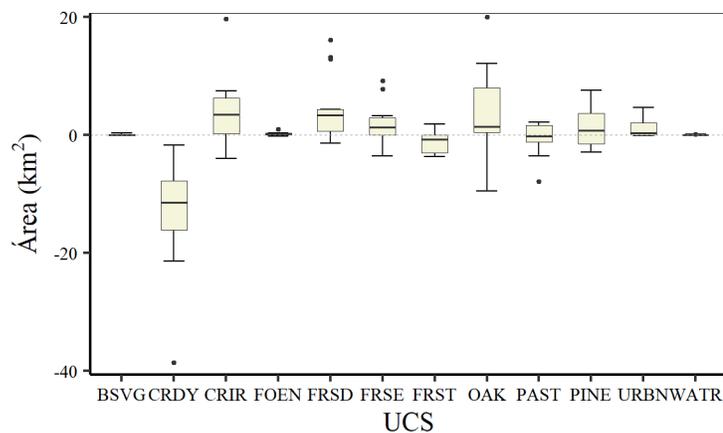


Figura 3-75. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde disminuyó $\leq -2\%$ la escorrentía superficial en la cuenca del río Amacuzac.

- Flujo base:* los cambios espaciales son negativos y positivos, su variación es de -10% a 20%. El 41% del área de la cuenca presenta un incremento entre 2% a 20% (Figura 3-73C). Los cambios de las coberturas en estas subcuencas son reducción de los usos CRDY y PAST e incremento de las coberturas forestales FRST y OAK (Figura 3-76A). El 15% del área de la cuenca presenta una reducción del *BF* menor a -2%. En estas subcuencas hubo disminución principalmente de las coberturas CRDY y PINE e incremento de la cobertura OAK y CRIR (Figura 3-76B).

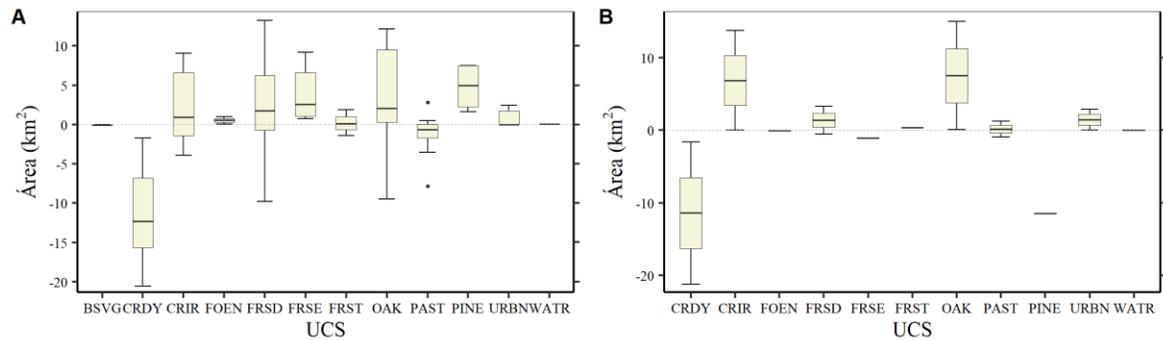


Figura 3-76. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 2\%$ (A) y disminuyó $\leq -2\%$ (B) el flujo base en la cuenca del río Amacuzac.

- Evapotranspiración real:* el 76% de la cuenca presenta cambios entre -1% a 1%, mientras que, el 21% del área presenta cambios entre 1 a 2%, y únicamente una subcuenca localizada en la parte alta de la cuenca presenta un incremento de ~5% (Figura 3-76D). Los cambios de los UCS en las subcuencas con cambios mayor a 1% presentan incrementos de las áreas de las coberturas forestales, principalmente FRSD y OAK, y disminución del uso de CRDY y PAST (Figura 3-77).

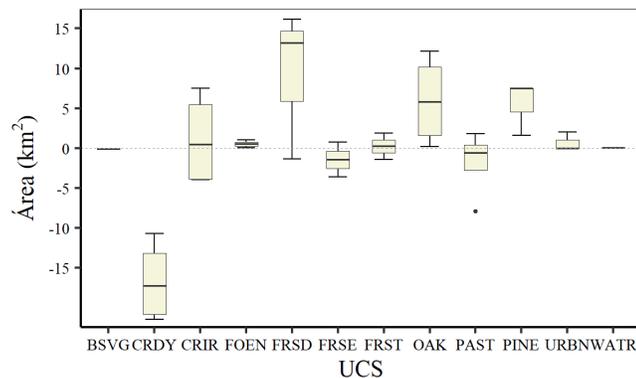


Figura 3-77. Cambios futuros de las áreas de los UCS en las subcuencas donde incrementó $\geq 1\%$ la evapotranspiración real en la cuenca del río Amacuzac

Tabla 3-60. Impactos futuros por los cambios futuros del UCS en la cuenca del río La Amacuzac, cambios evaluados con el mapa de referencia de UCS 1996 y mapa de cambio de UCS 2050

Variables	Cambio (%)	N° de subcuencas	Área (%)	Principales cambios de los usos y coberturas del suelo (> 1 km ²)	
				Disminución	Incremento
Rendimiento hídrico	≥2	1	1	CRDY	URBN
	≤-2	9	45	CRDY, PAST, FRST	OAK, CRIR, FSRD, PINE, URBN,
Escorrentía superficial	≥2	1	1	CRDY	URBN
	≤-2	14	72	CRDY, PAST, FRST	FRSD, CRIR, OAK, FRSE, URBN, PINE
Flujo base	≥2	9	41	CRDY, PAST	FRSE, OAK, FSRD, CRIR, PINE, URBN, FOEN
	≤-2	2	15	CRDY, PINE, FRSE	OAK, CRIR, URBN, FSRD
Evapotranspiración real	≥2	1	3	CRDY, CRIR	FRSD, OAK, PINE, FOEN
	≤-2	-	-	-	-

3.7. Atribuciones de los impactos por los cambios del uso y cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático en los procesos hidrológicos

3.7.1. Cuenca del río La Sierra

Los impactos conjuntos tanto por la variabilidad climática y los cambios de UCS en los procesos hidrológicos fueron negativos (*IT*, Tabla 3-61). Por ejemplo, el *WY* disminuyó -126 mm desde el período de referencia 1982-2000 hasta el período de cambio 2001-2012. La variabilidad climática contribuyó en -131 mm (-104%); mientras que, por los cambios de UCS aumentó 5.4 mm (4%). Esto indica que la variabilidad climática es la responsable del mayor impacto en la reducción del rendimiento hídrico.

Tabla 3-61. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y la variabilidad climática en la cuenca del río La Sierra

Variable	M1	M2	M3	M4	$\bar{I}C$ (mm)	$\bar{I}U$ (mm)	<i>IT</i> (mm)	<i>ITC</i> (%)	<i>ITU</i> (%)
<i>WY</i>	1485	1491	1354	1359	-131.1	5.4	-126	-104	4
<i>SURQ</i>	740	746	662	668	-78	6.1	-72	-108	8
<i>BF</i>	713	713	664	663	-49.1	-0.7	-50	-99	-1
<i>ET</i>	991	986	966	960	-25.7	-5.4	-31	-83	-17

M1: clima 1982-2000, UCS 1996
M2: clima 1982-2000, UCS 2008
M3: clima 2001-2012, UCS 1996
M4: clima 2001-2012, UCS 2008

$\bar{I}C$: impacto promedio del cambio climático
 $\bar{I}U$: impacto promedio del UCS
IT: Impacto total ($\bar{I}C + \bar{I}U$)
ITC: Porcentaje de cambio por variabilidad climática
ITU: Porcentaje de cambio por UCS

Por otro lado, los impactos futuros por el cambio climático y los cambios del UCS fueron positivos o negativos dependiendo del proceso hidrológico (Tabla 3-62). El proceso mayormente impactado fue el *BF*, este disminuyó -220 mm desde el período de referencia 1982-2010 hasta el período de cambio 2042-2072. El cambio climático contribuyó con la reducción del 95 % (-210 mm) y los cambios de UCS condujo a una reducción del 5% (-10 mm). La *SURQ* fue el proceso menor impactado, incrementó 23 mm desde el período de referencia hasta el período de cambio. Los cambios de UCS contribuyeron con un incremento de la *SURQ* de 51 mm (222%) y la variabilidad climática contribuyó con reducción de la *SURQ* de -28 mm (-122%).

Tabla 3-62. Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y el cambio climático en la cuenca del río La Sierra

Variable	M1	M2	M3	M4	$\bar{I}C$ (mm)	$\bar{I}U$ (mm)	IT (mm)	ITC (%)	ITU (%)
<i>WY</i>	1435	1477	1188	1228	-248	41	-207	-120	20
<i>SURQ</i>	709	778	698	732	-28	51	23	-122	222
<i>BF</i>	695	670	469	475	-210	-10	-220	-95	-5
<i>ET</i>	981	939	1221	1181	240	-41	199	121	-21

M1: clima 1982-2012, UCS 1996
M2: clima 1982-2012, UCS 2050
M3: clima 2042-2072, UCS 1996
M4: clima 2042-2072, UCS 2050

$\bar{I}C$: impacto promedio del cambio climático
 $\bar{I}U$: impacto promedio del UCS
IT: impacto total ($\bar{I}C + \bar{I}U$)
ITC: Porcentaje de cambio por variabilidad climática
ITU: Porcentaje de cambio por UCS

3.7.2. Cuenca del río Amacuzac

Los impactos por la variabilidad climática y los cambios de UCS en los procesos hidrológicos fueron positivos (Tabla 3-49). El *WY* incrementó 41 mm desde el período de referencia 1982-2000 hasta el período de cambio 2001-2012. La variabilidad climática contribuyó con el incremento de 43.6 mm (106%); mientras que, por los cambios de UCS disminuyó -2.3 mm (-6%). La variabilidad climática fue la mayor responsable del incremento de la magnitud de cambio en los procesos hidrológicos, a excepción del *BF* el cual se ve mayormente afectado por los cambios de UCS.

Tabla 3-63. Evaluación de los impactos en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac

Variable	M1	M2	M3	M4	$\bar{I}C$ (mm)	$\bar{I}U$ (mm)	IT (mm)	ITC (%)	ITU (%)
<i>WY</i>	322	320	365	363	43.6	-2.3	41	106	-6
<i>SURQ</i>	182	177	223	218	41	-5.1	36	114	-14
<i>BF</i>	131	134	133	135	1.6	2.7	4	37	63
<i>ET</i>	760	762	776	778	15.5	2.1	17.6	88	12

M1: clima 1982-2000, UCS 1996	$\bar{I}C$: impacto promedio del cambio climático
M2: clima 1982-2000, UCS 2008	$\bar{I}U$: impacto promedio del UCS
M3: clima 2001-2012, UCS 1996	IT: Impacto total ($\bar{I}C + \bar{I}U$)
M4: clima 2001-2012, UCS 2008	ITC: Porcentaje de cambio por variabilidad climática
	ITU: Porcentaje de cambio por UCS

En cuanto a los impactos futuros por el cambio climático y los cambios del UCS fueron positivos en la *SURQ* y *et*, y negativos en *WY* y *BF* (Tabla 3-64). El proceso mayormente impacto fue la *et*, esta incrementó 63.2 mm desde el período de referencia 1982-2012 hasta el período de cambio 2042-2072. La variabilidad climática contribuyó en el incremento de 56.8 mm (90%) y los cambios de UCS condujo a un incremento del 6.4 mm (10%). La *SURQ* fue el proceso menor impactado, incrementó 8 mm desde el período de referencia hasta el período de cambio. La variabilidad climática contribuyó con un incremento de la *SURQ* de 18.3 mm (229%) y los cambios de UCS contribuyeron con reducción de la *SURQ* de -10.3 mm (-129%).

Tabla 3-64. Evaluación de los impactos futuros en los principales componentes del balance hídrico por los cambios del UCS y el cambio climático en la cuenca del río Amacuzac

Variable	M1	M2	M3	M4	$\bar{I}C$ (mm)	$\bar{I}U$ (mm)	IT (mm)	ITC (%)	ITU (%)
<i>WY</i>	349	343	325	319	-24.6	-6.3	-31	80	20
<i>SURQ</i>	198	187	215	206	18.3	-10.3	8	229	-129
<i>BF</i>	142	147	103	106	-40.4	3.8	-37	110	-10
<i>et</i>	766	773	823	829	56.8	6.4	63.2	90	10

M1: clima 1982-2012, UCS 1996	$\bar{I}C$: impacto promedio del cambio climático
M2: clima 1982-2012, UCS 2050	$\bar{I}U$: impacto promedio del UCS
M3: clima 2042-2072, UCS 1996	IT: Impacto total ($\bar{I}C + \bar{I}U$)
M4: clima 2042-2072, UCS 2050	ITC: Porcentaje de cambio por variabilidad climática
	ITU: Porcentaje de cambio por UCS

3.8. Análisis individuales de los impactos actuales y futuros por la variabilidad y el cambio climático

Cuenca del río La Sierra

En el análisis de impactos por variabilidad climática a nivel de cuenca, la precipitación disminuyó un -6%; sin embargo, en el análisis a nivel de subcuencas la variación de cambios es mayor. El 15% del área de la cuenca presenta cambios positivos que varían entre 2% a 10%; mientras que, el 66% del área de la cuenca presenta cambios negativos que varían entre -20% a -2%. Por otro lado, el cambio de la *PET* a nivel de la cuenca es mínima, su cambio es de 0.1%, pero al igual que la precipitación su cambio a nivel de

subcuencas incrementa, pero en menor magnitud. El 17% del área de la cuenca presenta cambios positivos entre 2% a 4%; mientras que, el 22% del área presenta cambios negativos entre 6% a 2%.

Estos cambios de precipitación y evapotranspiración se reflejaron en impactos en los procesos hidrológicos. En el *WY*, el 24% del área de la cuenca presentó incrementos que varían entre 2% a 20%; mientras que, el 67% de la cuenca presentó disminuciones entre -30% a -2%. La *SURQ*, el 18% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 20% y el 69% del área de la cuenca presentó disminuciones entre -40% a -2%. Y el *BF*, el 34% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 35% y el 57% de la cuenca presentó reducciones entre -25% a -2%.

En el análisis de impactos por cambio climático a nivel de cuenca, la precipitación disminuyó en 0.2%, y en el análisis por subcuencas el 54% del área de la cuenca presentó incrementos entre 2% a 1% y el 46% del área presentó cambios entre -1% a 1%. Por otro lado, el cambio de la *PET* a nivel de la cuenca fue de 8% y en el análisis a nivel de subcuencas sus variaciones fueron entre 8 a 10%. Estos cambios de la precipitación y la *PET* se reflejaron en los cambios de los procesos hidrológicos. En el *WY*, todas las subcuencas presentaron disminuciones que variaron entre 25% a 30%. La *SURQ*, el 18% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 25% y el 63% del área de la cuenca presentó disminuciones entre -20% a -2%. En el *BF*, todas las subcuencas presentaron reducciones entre -60% a -10%. Y en la *ET* todas las subcuencas presentaron incrementos entre 10% a 40%.

En los impactos actuales por la variabilidad climática se observó que la precipitación tuvo mayor cambio que la *PET*; mientras que, en los impactos futuros por el cambio climático la *PET* tuvo mayores cambios que la precipitación. Entonces, los impactos actuales en los procesos hidrológicos por la variabilidad climática se les atribuye principalmente a los cambios de la precipitación; mientras que, los impactos futuros por el cambio climático se les atribuye principalmente a los incrementos de la *PET*. Los incrementos de la *PET* están directamente relacionados con los incrementos de la temperatura máxima y mínima, los cuales tuvieron incrementos promedios de 2.3° y 1.7° respectivamente.

Cuenca del río Amacuzac

En el análisis de impactos por variabilidad climática a nivel de cuenca, la precipitación incrementó 7%; en el análisis a nivel de subcuencas la variación de cambios fue mayor. El 64% del área de la cuenca presentó cambios positivos que varían entre 2% a 30%; mientras que el 16% del área de la cuenca presenta cambios negativos que varían entre -7% a -2%. Por otro lado, el cambio de la *PET* a nivel de la cuenca es de 4%, al igual que la precipitación su cambio a nivel de subcuencas incrementa. Los cambios en todas las subcuencas son positivos, el 87% del área de la cuenca presentó cambios entre 2% a 10%.

Estos cambios de precipitación y evapotranspiración se reflejaron en impactos en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac. En el *WY*, el 64% del área de la cuenca presentó incrementos que varían entre 2% a 90%; mientras que, el 33% de la cuenca presentó disminuciones entre -25% a -2%. La *SURQ*, el 64% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 100% y el 34% del área de la cuenca presentó disminuciones entre -24% a -2%. El *BF*, el 49% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 70% y el 52% de la cuenca presentó reducciones entre -32% a -2%. Y la *et*, el 54% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 7% y el 4% del área de la cuenca presenta disminuciones entre -3% a -2%.

En el análisis de impactos por cambio climático a nivel de cuenca, la precipitación incrementó en 3%, y en el análisis por subcuencas toda el área presentó incrementos, el 56% del área de la cuenca presentó incrementos entre 2% a 9%. Por otro lado, el cambio de la *PET* a nivel de la cuenca fue de 7% y en el análisis a nivel de subcuencas las variaciones fueron entre 6% a 8%. Estos cambios de la precipitación y la *PET* se reflejaron en los cambios de los procesos hidrológicos. En el *WY*, el 25% del área de la cuenca presentó incrementos que varían entre 2% a 30%; mientras que, el 64% de la cuenca presentó disminuciones entre -20% a -2%. La *SURQ*, el 75% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 41% y el 19% del área de la cuenca presentó disminuciones entre -15% a -2%. El *BF*, el 25% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 40% y el 74% de la cuenca presentó reducciones entre -40% a -2%. Y la *et*, el 90% del área de la cuenca presenta incrementos entre 2% a 16% y el 10% del área de la cuenca presenta cambios mínimos entre -2% a 2%.

En los impactos actuales por la variabilidad climática se identificó que la precipitación tuvo mayor cambio que la *PET*; y en los impactos futuros por el cambio climático, la *PET* tuvo cambios similares con la precipitación en cuanto a la magnitud; sin embargo, los cambios de la *PET* presentaron mayor área de impacto. En este caso para determinar los impactos actuales en los procesos hidrológicos por la variabilidad climática sería prudente realizar una evaluación por separado, es decir fijando la precipitación y modificando *PET*.

3.9. Análisis de impactos actuales y futuros por los cambios de uso y cobertura del suelo

Cuenca del río La Sierra

En los análisis de los impactos por los cambios de UCS a nivel de cuenca no se identificaron grandes cambios, sin embargo, esto no significa que no están impactando a los procesos hidrológicos, sino que los cambios se están cancelando debido a la variación espacial de los impactos positivos y negativos que está ocurriendo en cada subcuenca. Por ejemplo, en el análisis de los impactos actuales, en la variable *SURQ* se identificó que el 30% del área de la cuenca está presentando cambios positivos; mientras que, el 22% del área de la cuenca presentan cambios negativos. Y el resto del área (48%) presenta cambios entre -2% a 2%. Esto conlleva a que el promedio del cambio de la *SURQ* en la cuenca sea de un incremento mínimo de 0.9%.

En los impactos actuales a nivel de cuenca los cambios en las variables hidrológicas analizadas variaron entre -0.6% a 0.9%; mientras que, en el análisis de impactos futuros los cambios variaron entre -4% a 7%. La disminución de las coberturas forestales e incremento de los usos fue mayor en los cambios futuros, por lo tanto, la magnitud del cambio futuro se incrementó, pero conservando el mismo tipo de cambio dependiendo de la variable hidrológica. Por ejemplo, el impacto actual del rendimiento hídrico fue de 0.4%, mientras que el impacto futuro es de 3%, en la *SURQ* el impacto actual fue de 0.9% y el futuro es de 7%, el *BF* su impacto actual fue de -0.1% y el futuro de -1% y finalmente la *ET* disminuyó -0.6% en el impacto actual, y en el futuro -4%.

Como se mencionó anteriormente los impactos a nivel de cuenca no reflejan los cambios que están sucediendo a nivel de subcuencas, estos impactos pueden llegar a ser grandes con

respecto al valor promedio de cambio de toda la cuenca. Por ejemplo, en el análisis actual, la escorrentía superficial y el flujo base son dos de los procesos hidrológicos mayormente impactados, sus cambios a nivel espacial varían entre -10% a 23% y entre -15% a 20%, respectivamente; mientras que, en el análisis futuro las mismas variables presenta cambios entre 1% a 63% y entre -10% a 41% respectivamente.

La *ET* es una de las variables de menor impacto en el análisis actual, sus cambios varían entre -4% a 2%; mientras que, en el análisis futuro la *ET* presenta disminuciones que van desde -11% a -0.1%. El *WY* es también otros de las variables con menor impacto con respecto al resto de variables, debido a que *WY* refleja la cantidad total del agua (*SURQ* + *BF*). Estos cambios de *WY* pueden verse afectados por el tipo de cambio (positivo o negativo) de las variables *SURQ* y *BF* en las diferentes cuencas.

No solo se identificó la variación del rango de los cambios entre el periodo actual y futuro, sino que también se identificó un incremento de las posibles áreas a ser impactadas en el futuro. Por ejemplo, en el análisis del impacto actual de los cambios de UCS sobre *WY* se identificó que el 19% del área de la cuenca presenta cambios positivos mayores 2%; mientras que, en el análisis a nivel futuro el área incrementó a 47%. En la *SURQ*, en el análisis de impactos actuales se identificó un área de 30% de cambios positivos mayores a 2%; mientras que, en el análisis futuro, el área con cambios positivos mayores a 2% subió a 70% del área de la cuenca. Los principales cambios de UCS que ocurrieron en las subcuencas con cambios positivos de *WY* y *SURQ* fue disminución de coberturas forestales como FRST, FOEB y PINE e incremento de los usos AGRL y PAST. La disminución de las coberturas forestales e incremento de los usos fue mayor en los cambios futuros, por lo tanto, la magnitud del impacto futuro se incrementó.

Cuenca del río Amacuzac

Al igual que en la cuenca del río La Sierra, en el análisis de impactos a nivel de cuencas los cambios son pequeños debido a la variación espacial de los tipos de cambios (positivos y negativos) en las subcuencas. En el análisis de los impactos actuales, en la variable *SURQ* se identificó que el 7% del área de la cuenca está presentado cambios positivos; mientras que, el 48% del área de la cuenca presentan cambios negativos. Y el resto del área (45%)

presenta cambios entre -2% a 2%. Esto conlleva a que el promedio del cambio de la *SURQ* en la cuenca sea de una reducción -2.5%.

En el análisis de los impactos futuros, en las variables *WY* y *SURQ* se identificaron que solo el 1% del área de la cuenca está presentado cambios positivos; mientras que, el 45% y 72% del área de la cuenca presentan cambios negativos, respectivamente. Y el resto del área (54% para *WY* y 33% para *SURQ*) presentan cambios entre -2% a 2%. Esto conlleva a que el promedio del cambio en la cuenca de la *WY* y *SURQ* sea de una reducción de -0.7% y -5%, respectivamente.

En la variable *BF* se identificó que el 41% del área de la cuenca está presentado cambios positivos; mientras que, el 15% del área de la cuenca presentan cambios negativos. Y el 46% del área presenta cambios entre -2% a 2%. Esto conlleva a que el promedio del cambio de la *BF* en la cuenca sea de un incremento de 3%.

La *ET* es el proceso con menor impacto en la cuenca Amacuzac, el 21% del área de la cuenca presentó incrementos entre 1% a 2% y solo el 3% de la cuenca presenta incrementos entre 2 a 5%; mientras que, la mayoría del área (76%) presenta cambios entre -2% a 2%.

CAPÍTULO 4 DISCUSIONES

Este estudio aplicó un modelo hidrológico para evaluar y cuantificar los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo, la variabilidad y cambio climático sobre los procesos hidrológicos en cuencas mexicanas.

Datos hidro climáticos

El control de calidad es un proceso previo importante antes de utilizar la información hidroclimática. La validación de los datos garantiza que la información sea lo más cercana a la realidad, la identificación de valores sospechosos permitió detectar errores en los datos que puedan alterar la variabilidad natural de los datos. Los datos de alta calidad son vitales para reducir la incertidumbre de los resultados en los procesos que vayan a ser utilizados.

En general, los datos sospechosos no fueron erróneos sino son producto de eventos climáticos como ciclones, huracanes, depresiones tropicales, los mismos que forman parte de la variabilidad climática. México es uno de los países con mayor incidencia de ciclones tropicales del planeta, los cuales se generan tanto en el Océano Pacífico y el Océano Atlántico (Rosengaus, 2010). Estos eventos han causado inundaciones en las cuencas de estudios. Por ejemplo, la inundación en el mes de abril del año 2004 en la cuenca del río Escondido la cual fue provocada por una tormenta sobre el suroeste de los Estados Unidos que afectó al norte de México. En el año 2013 hubo un desbordamiento del río Amacuzac por lluvias intensas asociadas con el Huracán Manuel. En Tabasco, en los años 2010 y 2011 hubo inundaciones ocasionadas por la influencia de la tormenta tropical Matthew y por la tormenta tropical Harvey, respectivamente.

Por otro lado, el análisis de tendencias de las series hidrométricas se llevó a cabo por subseries mensuales, estacionales y anuales. El análisis por subseries mensual y estacional evitó enmascarar posibles tendencias en las series por la estacionalidad. Este análisis identificó la presencia de tendencias positivas o negativas en las series, y el mes que está experimentando cambios significativos. Por ejemplo, en la cuenca del río Escondido (estación 24290) se detectó un incremento del caudal en todos los niveles de análisis, pero en el análisis temporal y anual estos incrementos no fueron significativos; mientras que en

el análisis por subseries mensuales se identificó incrementos significativos en cinco meses (febrero, marzo, octubre a diciembre). Por otro lado, en la cuenca del río Amacuzac (estación 18232) se identificó una disminución significativa del caudal a nivel anual y temporal. Esta disminución del caudal está sucediendo principalmente en los meses de enero a abril y junio. En la cuenca del río La Sierra se identificó incremento significativo del caudal principalmente en los meses de enero, febrero y abril, meses que forman parte de la temporada seca.

Soare (2006) menciona que el problema de la reducción de agua en la cuenca del río Amacuzac es principalmente por el severo proceso de deforestación que sufrió esta zona, además por las pérdidas de agua por evaporación, y desvío de agua. Menciona que la planta potabilizadora opera con alrededor del 70% de la cantidad de agua de hace algunos años. En tiempo de estiaje las condiciones de los canales de mampostería a cielo abierto generan pérdida de agua por evaporación, y derrumbes en tiempo de lluvias. Sumando a esto, los robos de agua del canal mediante mangueras que llegan a tener tres pulgadas de diámetro, esto sucede principalmente en Ixtapan de la Sal, Tonatico y Villa Guerrero para uso en invernaderos.

Es importante mencionar que estas tendencias fueron identificadas durante el periodo del registro histórico de cada estación hidrométrica, así, la cuenca del río La Sierra se evaluó desde el periodo 1948-2014, Amacuzac desde 1955-2014 y Escondido, 1932-2010. Mientras que, la evaluación de los impactos por UCS, variabilidad y cambio climático se evaluaron durante el periodo 1982-2012, en este periodo también se identificaron tendencias, pero no significativas. En la cuenca del río Amacuzac, la tendencia identificada en el periodo 1955-2014 fue reducción del caudal, sin embargo, en el periodo 1982-2012, la tendencia fue positiva, pero no significativa.

En cuanto a la identificación de puntos de cambios en las series hidrométricas no hay suficiente evidencia para afirmar que existen puntos de quiebre. El análisis de las subseries mensuales, estacionales y series anuales no detectaron puntos de quiebre claros y significativos durante el periodo analizado de cada estación hidrométrica, lo que indica que las series son homogéneas. Lo que permitió replantear el análisis de la evaluación de los impactos de la variabilidad climática y uso y cobertura de suelo sobre la hidrología de

acuerdo con el método propuesto inicialmente que consistía en la selección de periodos antes y después con base a puntos de cambio.

Datos climáticos Daymet

En las cuencas de los ríos Amacuzac y La Sierra las validaciones de los datos de Daymet en mayor medida presentaron un buen ajuste con los datos climáticos observados. Un estudio en una cuenca agrícola de Kansas (Muche et al., 2020) evaluaron diferentes conjunto de datos climáticos (Daymet, GLDAS, NLDAS, y PRISM), su estudio demostró que Daymet fue uno de los que mejor ajuste tuvieron con los datos observados, además que en mayor medida coincidieron con los índices de precipitación. Sin embargo, el rendimiento de las diferentes bases de datos climáticos va a depender de la región, en la cuenca del río Escondido las validaciones de precipitación no fueron satisfactorias. La cuenca del río Escondido posee una red meteorológica bastante escasa y la calidad de las superficies Daymet está relacionada directamente con la cantidad y calidad de estaciones meteorológicas presente en la cuenca. De acuerdo a Thornton et al. (2020), Daymet estima los parámetros meteorológicos en lugares que carecen de instrumentación con base a una combinación de interpolación y extrapolación, utilizando datos de múltiples estaciones meteorológicas y pesos para cada sitio que reflejan las relaciones espaciales y temporales de la ubicación de estimación con los datos observados.

Es importante mencionar que la validación de los datos climáticas de temperatura Daymet variaron en cada cuenca hidrográfica. En la cuenca del río Escondido y la Sierra, las temperaturas Daymet se ajustaron bien a los datos observados. En cambio, en la cuenca del río Amacuzac las validaciones presentaron un buen ajuste, pero en menor medida. Esto se justifica por la variación de la temperatura con respecto a la altitud, ya que la cuenca del río Amacuzac presenta una topografía mayormente accidentada con respecto a las otras cuencas. A demás, por lo general las estaciones meteorológicas están localizadas en las zonas bajas debido a limitaciones de accesibilidad y mantenimiento.

Las validaciones de las precipitaciones Daymet en la cuenca del río Escondido fueron regulares (NSE entre 0.3 a 0.75), esto debido a que los datos Daymet resultan de la interpolación a partir de datos observados por lo que este producto no se considera

apropiado en esta cuenca. La cuenca cuenta con aproximadamente una estación por 600 km², las pocas estaciones están localizadas en la parte baja y media de la cuenca de modo que la precipitación Daymet en esta zona dependió de la interpolación de datos observados no representativos para toda la cuenca. Previos estudios que simularon los escurrimientos en esta cuenca utilizaron datos de precipitación estimada por radar (Eleuch et al., 2010; Magaña-Hernández et al., 2013)

Cambios en el uso y cobertura vegetal

La dinámica de cambios que suceden en las cuencas tienen un similar comportamiento con la dinámica de cambios que ocurre a nivel del país. De acuerdo con Sánchez et al. (2009) hasta el año 2002 habría ocurrido una pérdida neta de hasta 103 289 km² de selvas húmedas, 94 223 km² de selvas subhúmedas y 129 000 km² de bosques templados. La mayor parte de estas pérdidas ocurrió antes de los años setenta, pero en las últimas décadas esta dinámica se mantiene. La expansión de las fronteras agrícola y pecuaria ha sido el proceso más importante de transformación de los ecosistemas. En la cuenca del río La Sierra, el mayor cambio fue el incremento de áreas destinadas a la agricultura y este incremento redujo coberturas de bosque (como mesófilo de montaña, encino-pino y pino). La pérdida de bosque fue 542 km² durante el periodo 1996-2015, representado un reducción del 12 % con respecto al área inicial.

Por otro lado, la cuenca del río Amacuzac se caracteriza por la predominancia de cultivos de temporal; sin embargo, durante el periodo analizado ha perdido área (1985 y 2019), la cual ha sido remplazada principalmente por la agricultura de riego. Esto responde posiblemente a que en la cuenca las lluvias se concentran en los meses de junio a octubre lo que se vuelve una limitación para este tipo de cultivo que depende directamente de las lluvias. Esto también es un problema para la demanda de consumo humano durante el periodo de estiaje (noviembre a junio). Mientras que, en los meses de julio a septiembre presenta el volumen pico de agua, situación que incluso provoca desbordamientos del río.

Modelación hidrológica

La evaluación de la configuración de los modelos sin calibrar permitió identificar la influencia de los diferentes métodos seleccionados para la estimación de la

evapotranspiración potencial y cálculo del valor diario de CN. Así como, los ajustes de umbrales del número de clases de pendiente, porcentaje de área de coberturas vegetales y tipo de suelo para la conformación HRUs. La ecuación de Hargreaves tuvo mejor rendimiento que la ecuación Penman-Monteith. Se obtuvieron diferentes valores simulados de *PET*, Hargreaves estimó un mayor valor que Penman-Monteith. La ecuación de Penman-Monteith requiere de una mayor cantidad de datos en comparación con la de Hargreaves.

Las variables humedad relativa y velocidad del viento fueron simuladas por SWAT utilizando la base de datos meteorológicos *WGEN_CFSR_World* para la estimación de la *PET* por el método Penman-Monteith. Esta base de datos contiene estadísticas meteorológicas mensuales a largo plazo que cubren todo el mundo y se obtienen a partir del conjunto de datos global del Reanálisis del Sistema de Pronóstico climático (CFSR) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP). Razón por la que posiblemente se obtiene mejor resultados con el método de Hargreaves, ya que no se contó con datos observados para la estimación con Penman-Monteith. Estudios como Chen et al. (2020); Odusanya et al., (2019) evaluaron varios métodos para la estimación de la *PET* usando SWAT, cada estudio con diferentes objetivos. Al igual que este estudio, simularon las variables humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar usando SWAT. Los resultados de estos estudios señalaron un mayor rendimiento del modelo donde se usó la ecuación de Hargreaves.

El método ICN1 permitió un mejor ajuste del modelo que el ICN0 en la cuenca del río La Sierra (NSE: 0.47, 0.3, respectivamente). La escorrentía superficial fue mayor y el flujo lateral menor usando el método ICN0. SWAT incorporó el cálculo del valor diario de la CN en función de la evapotranspiración de las plantas porque el método de la humedad del suelo predice demasiada escorrentía en los suelos poco profundos. Estimar la CN diaria en función de la evapotranspiración de las plantas permite que este valor dependa menos del almacenamiento del suelo y más del clima precedente (Neitsch et al., 2011a).

Los ajustes de umbrales para la determinación del número de cuencas y HRUs según los criterios de evaluación, NSE y PIBIAS, no presentaron una influencia significativa. La elección del modelo dependió del objetivo del estudio. En este caso el modelo seleccionado cuenta con 43 subcuencas, 819 HRUs, y con dos agrupaciones de pendientes: 0-15, 15-999.

Las subcuencas se consideraron un número adecuado para la evaluación espacial de las variables hidrológicas en función de los cambios del uso y cobertura vegetal.

Los resultados de las simulaciones con los parámetros iniciales en las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac identificaron que el flujo lateral era muy cercano a la escorrentía superficial, y mayor que el flujo de retorno. Distribución que no se acerca a la realidad física de estas cuencas, por ejemplo, la cuenca del río La Sierra presenta el ~77 % de su área en pendientes superiores a 10 %, la pendiente media es de ~25% (Tabla 2-5). De acuerdo con Campos Aranda (1998) la pendiente de una cuenca tiene una importante relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces. Conforme aumenta la pendiente de las cuencas, crece la velocidad del escurrimiento y en función de esta, disminuye la infiltración. En este contexto los parámetros *SURLAG*, *CN2*, *ESCO*, *EPCO*, *GWQMN* permitieron ajustar una distribución del agua cercana a la realidad.

Los parámetros seleccionados para la calibración son parámetros de calibración propuestos por el modelo y no una propiedad que puedan medirse o estimarse directamente. Los parámetros *ESCO* y *EPCO* ayudaron a ajustar la evaporación en función del suelo y la demanda de absorción de las plantas, respectivamente. En el caso del parámetro *ESCO*, a medida que se acerca a 1, la profundidad a la que se puede satisfacer la demanda de evaporación del suelo disminuye, lo que limita la evaporación del suelo y reduce el valor simulado de evapotranspiración (Bonumá et al., 2013). El parámetro *EPCO*, a medida que se acerca a 1, el modelo permite que una mayor parte de la demanda de absorción de agua sea satisfecha por las capas más bajas del suelo, lo que implica una mayor extracción de agua y mayor evapotranspiración. Si *EPCO* se ajusta a cero, el 50% de la absorción de agua se producirá en el 6% superior de la zona radicular (Neitsch et al. 2011). *SURLAG* es el coeficiente de retraso de la escorrentía superficial. Ayudó a retrasar una parte de la liberación de la escorrentía superficial al canal principal. *SURLAG* controla el total de agua disponible que podrá entrar en el canal principal en un día cualquiera (Yacoub and Foguet, 2013)

Muche et al. (2020) evaluaron diferentes bases de datos de precipitación con el fin de conocer cómo afectan al rendimiento del modelo hidrológico, el estudio reveló que los

conjuntos de datos de precipitación afectaron a los parámetros sensibles por lo que recomendaron adoptar un enfoque cauteloso cuando se utilizan valores calibrados regionales de la literatura, para estudios sin aforar, ya que los resultados son específicos de las fuentes de datos utilizadas y de los años de estudio.

En las cuencas de los ríos de La Sierra y Amacuzac, en general la calibración y validación mensual considerando los estadísticos R^2 y NSE fue muy buena según la clasificación de los criterios propuestos por Moriasi et al. (2015). El PBIAS fue más variable entre satisfactoria a muy buena. Estudios previos de modelación hidrológica en estas cuencas, como por ejemplo en la cuenca del río Amacuzac el estudio de Bâ et al. (2001) lograron simular con éxito los caudales a nivel diario utilizando dos modelos CEQUEAU y SSARR durante el periodo 1961-1985. Con el modelo CEQUEAU, los valores del criterio NSE de los hidrogramas anuales observados y simulados variaron entre 0.51 y 0.84; mientras que el modelo SSARR, los valores NSE variaron entre 0.34 a 0.82. Resultados similares se obtuvieron en este estudio utilizando el modelo SWAT, los valores del NSE variaron entre 0.58 a 0.88 durante el periodo 1982-2000. La diferencia de estos modelos radican en la discretización de la cuenca y en la conceptualización de algunos procesos hidrológicos.

En la cuenca del río La Sierra, el estudio Diaz Mercado et al. (2015) simularon los caudales durante el periodo 1968 a 1999. Los resultados de la simulación de los caudales diarios interanuales y de los caudales medios mensuales para la cuenca del río La Sierra fueron de un NSE de 0.88 y 0.89, respectivamente. Mientras que el presente estudio, los valores de estos criterios mejoraron, el valor del NSE para los caudales diarios interanuales observados y simulados fue de 0.96 y para los caudales medios mensuales fue de 0.98.

La selección del modelo dependió del objetivo de la investigación, en este caso el modelo SWAT fue seleccionado por su orientación en predecir el impacto ambiental del uso de la tierra, las prácticas de gestión de la tierra y el cambio climático. El mismo que ha sido evaluado ampliamente alrededor del mundo con resultados satisfactorios.

Método de evaluación de impactos por la variabilidad climática, el cambio climático y los cambios de uso y cobertura del suelo sobre los procesos hidrológicos

Para evaluar y separar los impactos ocasionados por la variabilidad climática, el cambio climático y el cambio de UCS no existe un solo camino, se realizó una revisión de métodos que se han utilizado en diferentes partes del mundo (ver sección 1.1.4), con el fin de evaluar, seleccionar o combinar los mejores métodos que se adapten en el presente estudio. El método seleccionado fue el de fijación-cambio de las variables, este método permitió evaluar tanto la variabilidad climática, cambio climático y los cambios de UCS.

Para evaluar los impactos por los cambios del UCS en los procesos hidrológicos varios estudios como Chauhan et al. (2020), Hu et al. (2021) y Samal y Gedam (2021) ejecutaron varias veces el modelo calibrado en un periodo determinado cambiando el mapa de UCS y manteniendo constante el resto de las variables. En este estudio se aplicó el mismo concepto, sin embargo, aquí se debía evaluar también la variabilidad y cambio climático, por lo que se dividió el periodo actual disponible (1982-2012) en dos subperiodos 1980-2000 y 2001-2012. Por ejemplo, se contó con dos resultados de los impactos por variabilidad climática, IC1 y IC2. El IC1, es la magnitud de cambio entre el periodo 1982-2000 y 2001-2012 con el UCS de 1996. Mientras que, IC2 es la magnitud de cambio entre los mismos periodos del IC1, pero con el UCS de 2008. La magnitud del cambio tanto para IC1 y IC2 es similar, esto se puede observar en las gráficas mensuales de cambio de la cuenca del río La Sierra en la Figura 3-43 y en la cuenca del río Amacuzac en la Figura 3-52, sus diferencias son menores a 1%. Por lo tanto, con la finalidad de resumir la presentación de resultados se obtuvo el promedio entre IC1 y IC2 como la magnitud del impacto por la variabilidad climática.

Por otro lado, las magnitudes de los impactos por los cambios del UCS en IU1 y IU2 fueron diferentes por la influencia del impacto del clima. El IU1 es la magnitud de cambio entre el UCS 1996 y el UCS 2008 durante el periodo 1982-2000; mientras que, IU2 es la magnitud de cambio entre el UCS 1996 y el UCS 2008 pero durante el periodo 2001-2012. Sin embargo, el patrón del cambio es similar. Al igual que IC1 y IC2 la presentación de resultados se expuso el promedio entre IU1 y IU2 (Anexo 14). El mismo proceso de evaluación y presentación y análisis de resultados fueron aplicados.

Periodo de evaluación de impactos

El periodo de impactos actuales evaluado fue durante 1982-2012. No se evaluó un periodo más actual (2013-2020) debido a que un análisis de tendencias de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de Daymet determinó reducciones e incrementos drásticos a partir del año 2013. A pesar de que los resultados de las validaciones de los datos climáticos Daymet fueron buenos, la disponibilidad de datos observados permitió realizar estas validaciones únicamente durante el periodo 1980-2010.

Impactos por la variabilidad y cambio climático sobre los procesos hidrológicos

Los impactos por la variabilidad y cambio climático va a depender de los cambios climáticos específicos que está atravesando cada cuenca. Así, en la cuenca del río La Sierra, el impacto de la variabilidad climática global fue la disminución de todos los procesos hidrológicos analizados, esto fue resultado de la reducción de la precipitación (6%) e incremento de la temperatura máxima (0.2°C) y mínima (0.4°C). El *WY* y *SURQ* fueron las variables mayormente impactadas con reducciones de ~9% y ~11%, respectivamente. En cambio, el efecto del cambio climático global fue la disminución del *WY* (-17%), *SURQ* (-4%), *BF* (-31%) e incremento de *ET* (20%) resultado de la reducción de precipitación (0.2%) e incremento de la temperatura máxima (2.3°C) y mínima (1.7°C). Aquí, el *BF* y la *ET* fueron las variables mayormente afectadas.

En la cuenca del río Amacuzac, el impacto por la variabilidad climática fue incremento de la magnitud de todos los procesos hidrológicos, siendo el más afectado la *SURQ* (23%) y *WY* (14%), resultado del incremento de la precipitación (7%) y de la temperatura máxima (0.7%) y ligera reducción de la temperatura mínima (0.02%). Por lo contrario, el efecto del cambio climático fue reducción del *WY* (7%), *BF* (28%) e incremento de la *SURQ* (10%) y la *ET* (7%), esto como resultado del incremento de la precipitación (3%) y de la temperatura máxima (2.1°C) y mínima (1.9°C).

En este contexto, en ambas cuencas de estudio los impactos por la variabilidad climática actual se atribuyen principalmente a la reducción de la precipitación y los impactos por el cambio climático futuro se le atribuye al incremento de la temperatura máxima y mínima. Estudios que evalúen los impactos por la variabilidad y cambio climático sobre los

procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos Amacuzac y La Sierra no están disponibles en la literatura. Sin embargo, estudios recientes a nivel global con patrones similares de cambios en las variables climáticas son suficientes (p. ej. Ayalew et al., 2022 y De Girolamo et al., 2022). En el estudio de De Girolamo et al. (2022), las proyecciones de los modelos climáticos predijeron un aumento en la temperatura diaria y una disminución en las precipitaciones (4-9%) en comparación con el periodo base (1980-2009) como resultado, el modelo predijo reducciones en el caudal anual medio de hasta un 21%. Esto confirma que la variabilidad y cambio climático son un importante impulsor del régimen hídrico ya que los cambios detectados en estas variables, en específico precipitación y temperatura, durante los periodos de estudio dieron lugar a cambios en la dinámica de los procesos hidrológicos.

En este estudio el modelo climático GFDL-ESM4 prevé incrementos de temperaturas máxima y mínima entre 1.5 a 2.3°C con respecto al periodo histórico en ambas cuencas. El aumento de la temperatura provocó una mayor evapotranspiración lo que se reflejó en una disminución de la distribución del agua en los procesos hidrológicos futuros.

Impactos por el cambio de uso y cobertura del suelo sobre los procesos hidrológicos

En la cuenca del río La Sierra se identificó que en las subcuencas donde hubo disminución de las áreas de bosque e incrementos de áreas de agricultura, urbanización y pastizal resultó en incrementos de *WY* y *SURQ* y, por lo contrario, disminución de *ET* y de *BF*. Algunos estudios recientes que evaluaron únicamente los impactos del UCS sobre los procesos hidrológicos presentaron comportamientos similares (Chauhan et al., 2020; Samal y Gedam, 2021). Por ejemplo, Chauhan et al. (2020) detectaron que el incremento de áreas urbanizadas y agrícola y reducción de bosque, resultó en un aumento de la descarga anual del caudal de 0.2%, escorrentía superficial de 12.23% y el rendimiento del hídrico de 0.22%, y por lo contrario, resultó en disminución de la evapotranspiración de 0.08%, flujo de agua subterránea de 8.62%, y flujo lateral 3.92%. Los resultados de Samal y Gedam (2021) mostraron que la urbanización tiene una relación positiva significativa ($p < 0.001$) con la escorrentía superficial ($R = 0.96$), el rendimiento del agua ($R = 0.57$) y por otro lado, una relación negativa con el flujo base ($R = -0.95$) y la percolación ($R = -0.99$).

La reducción de las coberturas de bosque en la cuenca del río La Sierra nos sugiere que puede ser una de las causas de las inundaciones en la parte baja de la cuenca. Estudios previos han demostrado que un aumento en la cobertura bosque, conduce a la disminución de la *SURQ* y por lo tanto disminución de la ocurrencia de inundaciones (Chauhan et al., 2020; Said et al., 2021; Samal and Gedam, 2021)

Por el contrario, en la cuenca del río Amacuzac se identificó que en las subcuencas donde hubo en su mayoría ganancias de áreas de coberturas de bosque y pérdidas de agricultura temporal resultó en disminución del *WY* y *SURQ*; mientras que, el *BF* en la mayoría de las subcuencas incrementó; y la *ET* se mantuvo con cambios pequeños, entre -2% a 2%. Hu et al. (2021) dividieron la cuenca de estudio en montañas, colinas y llanuras; en la zona montañosa identificaron que el principal cambio fue de cultivos a bosques, lo que resultó en efectos negativos en el contenido de agua del suelo y en el rendimiento hídrico.

Los incrementos de cobertura de bosque en la cuenca del río Amacuzac posiblemente se deban al resultado de programas de reforestación locales. La disminución del *WY* y *SURQ*, puede llegar a ser positivo para la cuenca. De acuerdo Said et al. (2021) una mayor cobertura de bosque podría reducirá el flujo de la estación húmeda, aumentará el flujo de la estación seca. Mientras que, el aumento de la escorrentía puede implicar un aumento de la erosión del suelo y la sedimentación.

Los diferentes impactos detectados en las cuencas de estudio sobre los procesos hidrológicos se atribuye a los diferentes cambios paisajísticos que están sufriendo cada cuenca. Así que, los impactos por los UCS en la cuenca del río la Sierra se le atribuye principalmente a la reducción de coberturas forestales e incremento de la agricultura. En cambio, en la cuenca del río Amacuzac se atribuye a los incrementos de las coberturas de bosque y a la agricultura de riego y a la reducción de la agricultura temporal. La *ET* sufrió mayor impacto en la cuenca del río La Sierra en comparación con la cuenca Amacuzac, eso debido a las reducciones de las coberturas de bosque que sufrió esta cuenca.

Atribución de los impactos por uso y cobertura del suelo, variabilidad y cambio climático

Este estudio identificó que los mayores impactos sobre los procesos hidrológicos en las cuencas de estudio están dados por la variabilidad y cambio climático en comparación con

los cambios del cambio del UCS. Algunos estudios donde encontraron mayor impacto por el cambio del UCS, son cuencas generalmente urbanizadas. Por ejemplo, en la cuenca de estudio de Bian et al. (2021) encontraron mayor impacto por el cambio del UCS, debido a que la cuenca de estudio se caracteriza por un rápido proceso de urbanización. Li et al. (2021) encontraron que los mayores impactos globales en la cuenca de estudio fue por el efecto del cambio climático; sin embargo, el cambio del UCS impulsado únicamente por la urbanización contribuyó al >80% de los cambios del agua disponible en las áreas urbanas, en comparación, el cambio climático contribuyó al >55% de los cambios.

Por otro lado, se encuentra más fácilmente en la literatura estudios donde el mayor impacto identificado sobre los procesos hidrológicos son por la variabilidad y cambio climático (p. ej. Ma et al., 2010; Nie et al., 2020; Sun et al., 2014; Zango et al., 2022). Sin embargo, es importante mencionar, que los datos climáticos son muy sensibles en la modelación hidrológica, por lo que la incertidumbre puede llegar a ser alta. En el estudio de Muche et al. (2020) evaluaron un conjunto de datos de precipitación de diferentes fuentes, aunque la mayoría de los parámetros sensibles en el proceso de calibración son los mismos en la mayoría de los casos, sus mejores valores y rangos de incertidumbre de los parámetros fueron diferentes. Estas incertidumbres de parámetros pueden causar incertidumbre de predicción por lo que los impactos evaluados por la variabilidad y cambio climático están sujetos a la calidad de los datos utilizados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El análisis de datos tanto de las series hidrométricas y climáticas permitió evaluar la disponibilidad y la calidad de información. La información hidrométrica presentó un amplio registro histórico, se evaluaron tres estaciones hidrométricas correspondientes a cada cuenca hidrográfica. La información meteorológica dependió de cada cuenca hidrográfica, siendo la cuenca del río Amacuzac con mayor distribución de estaciones meteorológicas (1 estación por ~52 km²) y la cuenca del río Escondido con menor distribución (1 estación por ~600 km²). La disponibilidad de datos varió de acuerdo con cada estación, mencionando que en su mayoría las estaciones poseen muchos datos faltantes.

Se identificó presencia de tendencias en las series de caudal. La cuenca del río Escondido (estación Villa de Fuente, 24290) presentó un incremento del caudal significativo en los meses de febrero, marzo y de octubre a diciembre. En cambio, en la cuenca del río Amacuzac (estación Amacuzac, 18232) mostró una disminución significativa principalmente en los meses de enero a abril y junio. Por último, en la cuenca del río La Sierra (estación Pueblo Nuevo, 30016) existe un incremento significativo del caudal en los meses de enero, febrero y abril.

La evaluación de datos climáticos permitió conocer que los datos Daymet en la cuenca la río Escondido no se ajustaron adecuadamente, las validaciones no fueron satisfactorias por lo que no fueron útiles en el proceso de modelación hidrológica y posterior evaluación de los impactos sobre los procesos hidrológicos.

De acuerdo con los datos del modelo GFDL-ESM4 escenario SSP8.5 la variable precipitación no presentó un patrón claro de cambio con respecto al histórico. En la cuenca del río La Sierra se prevé menor variabilidad de precipitación en contraste con la precipitación histórica, la precipitación anual disminuirá ligeramente (11 mm). Por lo contrario, en la cuenca del río Amacuzac se prevé un ligero incremento de la precipitación

anual (34 mm). Las variables temperaturas máximas y mínimas incrementarán considerablemente en ambas cuencas. En la cuenca del río La Sierra se prevé incrementos de 2.3°C y 1.6°C para temperatura máxima y mínima respectivamente; mientras que, para la cuenca del río Amacuzac la temperatura máxima y mínima incrementará en 2.2°C y 1.8°C, respectivamente.

Se analizaron las series de uso y cobertura del suelo escala 1:250 000 generadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. La información fue homogenizada con el fin de evaluar posibles cambios de cobertura. Se detectó una expansión de la frontera agrícola en las cuencas de estudio. En la cuenca del río La Sierra la agricultura reemplazó en su mayoría coberturas de bosque, mientras que, en la cuenca del río Amacuzac la agricultura de riego y coberturas bosque ganaron área al remplazar a la agricultura de temporal.

En las proyecciones de UCS para el año 2050 en las cuencas de estudio, las validaciones fueron satisfactorios con base al índice Kappa. Las tendencias proyectadas de UCS se basaron en los cambios actuales. En la cuenca del río La Sierra las tendencias proyectadas de cambio fueron disminución de las coberturas bosque mesófilo de montaña (-16%), bosque de pino (-9%); y un incremento de la agricultura (24%). En la cuenca del río Amacuzac, la cobertura selva caducifolia está proyectada en un incremento de 2.5%, la agricultura de riego en un incremento de 3.3%; y una disminución de la agricultura temporal de -10%.

Los parámetros del modelo SWAT fueron calibrados satisfactoriamente de acuerdo con el criterio numérico objetivo NSE en las cuencas de los ríos La Sierra (0.97) y Amacuzac (0.99) a un paso de tiempo mensual interanual. En la validación, los NSE fueron de 0.95 y 0.98 para las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac, respectivamente. En comparación a modelaciones previas en estas cuencas con el modelo CEQUEAU, los resultados del presente estudio fueron similares en la cuenca del río Amacuzac y mejores en la cuenca del río La Sierra. Estos resultados fueron útiles para evaluar los posibles impactos del cambio de UCS y variabilidad y cambio climático sobre los procesos hidrológicos.

Este estudio identificó que la mayoría de los impactos sobre los procesos hidrológicos detectados en las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac están dados por la variabilidad

y el cambio climático. Los impactos en los procesos hidrológicos por la variabilidad climática son resultado principalmente de los cambios de la precipitación; mientras que, los impactos por el cambio climático se atribuyen principalmente a los incrementos de la temperatura máxima y mínima.

En el análisis a nivel de cuenca, los impactos por los cambios de UCS en los procesos hidrológicos son pequeños en comparación con los impactos por la variabilidad y cambio climático, sin embargo, esto no significa que no estén sucediendo cambios, sino que los cambios se están cancelando debido a la variación espacial de los impactos positivos y negativos que está ocurriendo en cada subcuenca. Se identificó subcuencas que están sufriendo cambios en la dinámica de sus procesos hidrológicos por los cambios de UCS.

En la cuenca del río La Sierra, se encontró que el impacto de la variabilidad climática a nivel de cuenca fue la disminución de todos los procesos hidrológicos analizados. En cambio, el efecto del cambio climático fue la disminución del *WY* (-17%), *SURQ* (-4%), *BF* (-31%) e incremento de *ET* (20%). Por otro lado, en la cuenca del río Amacuzac el impacto de la variabilidad climática a nivel de cuenca fue el incremento de todos los procesos hidrológicos; mientras que, el efecto del cambio climático global fue la disminución del *WY* (-7%), *BF* (-31%) e incremento de la *SURQ* (10%) y *ET* (20%).

Las áreas impactadas por el UCS, la variabilidad y el cambio climático va a depender de los procesos específicos que esté pasando en cada subcuenca y la respuesta del proceso hidrológico ante estos cambios. En el análisis por subcuencas de los impactos por la variabilidad climática en la cuenca del río La Sierra se detectó que el 67% del área de la cuenca presentó reducción del *WY* (<-2%), siendo la parte alta (sureste) y media-baja de la cuenca mayormente afectada. En cambio, los impactos por el cambio climático son negativos en todas las subcuencas a excepción de la *ET*, la parte alta de la cuenca (sureste) es la más afectada.

En el análisis por subcuencas de los impactos por la variabilidad climática en la cuenca del río Amacuzac se detectó que el 64% del área de la cuenca presenta un incremento del *WY* (>2%), siendo la zona más afectada la parte media-alta de la cuenca (noroeste). Por lo

contrario, el impacto por el cambio climático prevé que el 64% del área de la cuenca presente reducción del *WY*, este cambio será mayor en la parte alta de la cuenca (noreste).

En los impactos actuales y futuros por el cambio del UCS a nivel de subcuencas, en la cuenca del río La Sierra se identificó subcuencas donde hubo disminución de áreas de bosque e incrementos de áreas de agricultura, urbanización y pastizal lo cual resultó en incrementos de *WY* y *SURQ* y, por lo contrario, disminución de *ET* y de *BF*. En la cuenca del río Amacuzac se identificó subcuencas donde hubo en su mayoría ganancias de áreas de coberturas de bosque y agricultura de riego y, por lo contrario, pérdida de agricultura temporal lo que resultó en disminución del *WY* y *SURQ*; mientras que, el *BF* incrementó; y la *ET* se mantuvo con cambios pequeños.

Los resultados de este estudio proporcionan información de cómo la variabilidad climática y el UCS histórico afectaron los procesos hidrológicos en dos cuencas con diferentes condiciones hidro-climáticas. Además, proporciona información de cómo las proyecciones climáticas futuras y las proyecciones de UCS podrían afectar los procesos hidrológicos si sigue esta línea de cambio. Esta información se vuelve útil para la gestión de los recursos hídricos a nivel local ya que estas cuencas no han sido objeto de estudios previos en la evaluación de impactos por el clima y UCS. Finalmente puede servir como guía de referencia comparativa para estudios en cuencas con predominancia de coberturas de bosque y agricultura.

5.2. Recomendaciones

La cuenca del río Escondido cuenta con una amplia base de datos hidrométricos útiles en la modelación hidrológica, específicamente en los procesos de calibración y validación. Sin embargo, no se logró la modelación hidrológica por la mala representatividad de los datos climáticos Daymet en esta región, por lo que se sugiere la exploración de bases de datos climáticos alternativos como satelitales o de radar.

Con base a la recomendación anterior también se puede derivar un estudio enfocado en la comparación y evaluación de bases de datos climáticos alternativos, esto con el fin de identificar bases de datos que sean representativos en diferentes regiones de México y sean útiles en la modelización hidrológica y posterior evaluación de impactos.

Los datos Daymet tuvieron mala representatividad a partir del año 2013 en las cuencas de estudio, razón por lo que el presente estudio evaluó los impactos actuales durante el periodo 1980-2012, en un futuro con la exploración de productos alternativos se recomienda ampliar el periodo de simulación para tener un análisis más amplio del fenómeno.

En este estudio se utilizó las proyecciones de un único modelo climático (GFDL-ESM4), por lo que sería recomendable evaluar el rendimiento de los modelos en el marco del CMIP6 en la reproducción de patrones de lluvia, temperatura máxima y mínima en las cuencas de estudio.

Las características físicas de suelo pueden verse afectados por el cambio de UCS, estas características no fueron incluidos explícitamente en este estudio, por lo que en futuros estudios se recomienda su consideración. Estos resultados puede servir como una guía para llegar a mejores predicciones.

En estudios futuros se recomienda realizar un análisis de las variaciones espaciales y temporales (anuales, estacionales y mensuales) de los impactos de los cambios de UCS, variabilidad y cambio climático sobre los procesos hidrológicos en las cuencas de estudio.

Los resultados de las simulaciones de los procesos hidrológicos con el modelo SWAT en el presente estudio pueden ser útiles para realizar un análisis comparativo con el modelo CEQUEAO utilizando el producto Daymet.

Los parámetros del modelo SWAT fueron calibrados satisfactoriamente de acuerdo con el criterio numérico objetivo NSE en las cuencas de los ríos Amacuzac y La Sierra, así que en un futuro se puede utilizar estos resultados para la modelación de la calidad del agua y evaluación de diferentes prácticas de gestión de la tierra con el fin mitigar los efectos de las actividades agrícolas presentes en estas cuencas y mejorar la calidad del agua.

En este estudio se utilizó los mapas de UCS de las series desarrolladas por INEGI con el fin de evaluar los impactos por sus cambios, por lo que se puede mejorar la resolución de esta información mediante la generación de mapas con procesos de clasificación supervisada.

En este estudio se utilizó el producto Daymet, el cual proviene de interpolaciones de datos observados, lo evidenció la importancia de la instrumentación hidrometeorológica al norte del país, y una mejor distribución espacial de las estaciones meteorológicas.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Kløve, B.: A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model, *J. Hydrol.*, 524, 733–752, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.03.027, 2015.

Acosta, I. R. and Martínez, M. J. M.: Assessment of Surface Runoff Vulnerability to Climate Change in the Lerma-Chapala Basin, Mexico, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 140(12), 04014042, doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000433, 2014.

Alexandersson, H.: A homogeneity test applied to precipitation data, *J. Climatol.*, 6(6), 661–675, doi:10.1002/joc.3370060607, 1986.

Arnold, J. G., Allen, P. M., Muttiah, R. and Bernhardt, G.: Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques, *Ground Water*, 33(6), 1010–1018, doi:10.1111/j.1745-6584.1995.tb00046.x, 1995.

Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B. and Neitsch, S. L.: Input/Output Documentation - Version 2012, Texas. [online] Available from: <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>, 2012a.

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N. and Jha, M. K.: SWAT: Model use, calibration, and validation, *Trans. ASABE*, 55(4), 1491–1508, 2012b.

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. ., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Griensven, A. Van, Van Liew, M. W., Kannan, N. and Jha, M. K.: SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION, *Trans. ASABE*, 55(4), 1491–1508, 2012c.

Ayalew, D. W., Asefa, T., Moges, M. A. and Leyew, S. M.: Evaluating the potential impact of climate change on the hydrology of Ribb catchment, Lake Tana Basin, Ethiopia, *J. Water Clim. Chang.*, 13(1), 190–205, doi:10.2166/wcc.2021.049, 2022.

Bâ, K. and Serrat-Capdevila, A.: Modelación hidrológica con precipitación estimada por imágenes satelitales: El caso del río La Sierra (México), in *La Importancia de las Inundaciones en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México*, edited by E. González Sosa, C. Díaz-Delgado, V. H. Guerra-Cobián, M. A. Gutiérrez López, and N. M. Ramos Salinas, pp. 261–287, Querétaro., 2012.

Bâ, K. M., Díaz-Delgado, C. and Rodríguez Osorio, V.: Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de Mexico, México, *Ing. Hidráulica en México*,

XVI(4), 177–126, 2001.

Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S. and Palutikof, J.: El Cambio Climático y El Agua, edited by B. Bates, Z. Kundzewicz, S. Wu, and J. Palutikof, Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, Suiza. [online] Available from: <http://216.92.126.55/publicaciones/climate-change-water-sp.pdf>, 2008.

Behzadi, F., Wasti, A., Haque Rahat, S., Tracy, J. N. and Ray, P. A.: Analysis of the climate change signal in Mexico City given disagreeing data sources and scattered projections, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 27(December 2019), 100662, doi:10.1016/j.ejrh.2019.100662, 2020.

Bhatta, B., Shrestha, S., Shrestha, P. K. and Talchabhadel, R.: Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin, *Catena*, 181(104082), 13, doi:10.1016/j.catena.2019.104082, 2019.

Bian, G., Wang, G., Chen, J., Zhang, J. and Song, M.: Spatial and seasonal variations of hydrological responses to climate and land-use changes in a highly urbanized basin of Southeastern China, *Hydrol. Res.*, 52(2), 506–522, doi:10.2166/nh.2021.087, 2021.

Blunden, J., Arndt, D. S. and Hartfield, G., Eds.: *State of the Climate in 2017.*, 2018.

Bonumá, N. B., Rossi, C. G., Arnold, J. G., Reichert, J. M. and Paiva, E. M. C. D.: Hydrology evaluation of the soil and water assessment tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil, *Appl. Eng. Agric.*, 29(2), 189–200, doi:10.13031/2013.42651, 2013.

Bosmans, J. H. C., van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H. and Bierkens, M. F. P.: Hydrological impacts of global land cover change and human water use, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(11), 5603–5626, doi:10.5194/hess-21-5603-2017, 2017.

Breuer, L., Plesca, I., Buytaert, W., Ehmann, T., Peters, T., Timbe, E., Trachte, K. and Windhorst, D.: Global Climate Change Impacts on Local Climate and Hydrology, in *Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador*, vol. 221, edited by J. Bendix, E. Beck, A. Bräuning, F. Makeschin, R. Mosandl, S. Scheu, and W. Wilcke, pp. 265–274, Berlin, Heidelberg., 2013.

Buishand, T. A.: Some methods for testing the homogeneity of rainfall records, *J. Hydrol.*, 58(1–2), 11–27, doi:10.1016/0022-1694(82)90066-X, 1982.

Buytaert, W. and Bievre, B. De: Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes, *Water Resour. Res.*, 48(8), 1–13, doi:10.1029/2011WR011755, 2012.

Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. and Hofstede, R.: Human impact on the hydrology of the Andean páramos, *Earth-Science Rev.*, 79(1–2), 53–72, doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.002, 2006.

- Buytaert, W., Célleri, R. and Timbe, L.: Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: Effects of GCM uncertainty, *Geophys. Res. Lett.*, 36(7), 1–5, doi:10.1029/2008GL037048, 2009.
- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A. and Célleri, R.: Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(7), 1247–1258, doi:10.5194/hess-14-1247-2010, 2010.
- Campos Aranda, D. F.: *Procesos del Ciclo Hidrológico*, San Luis Potosí, S.L.P, Mexico., 1998.
- CEPAL and GIZ: *Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe*, Los Serv. agua potable y Saneam. en el umbral del siglo XXI, 57, doi:10.3989/arbor.2000.i653.1000, 2016.
- Chauhan, N., Kumar, V. and Paliwal, R.: Quantifying the impacts of decadal landuse change on the water balance components using soil and water assessment tool in Ghaggar river basin, *SN Appl. Sci.*, 2(11), 1–19, doi:10.1007/s42452-020-03606-0, 2020.
- Chen, M., Gassman, P. W., Srinivasan, R., Cui, Y. and Arritt, R.: Analysis of alternative climate datasets and evapotranspiration methods for the Upper Mississippi River Basin using SWAT within HAWQS, *Sci. Total Environ.*, 720, 137562, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137562, 2020.
- CONAFOR: *Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009 - 2014*, México. [online] Available from: [https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados_Históricos_INFyS/2009 - 2014/Informe de resultados/Informe inventario 2009 - 2014.pdf](https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados_Históricos_INFyS/2009-2014/Informe_de_resultados/Informe_inventario_2009-2014.pdf), 2018.
- CONAGUA: *Atlas del Agua en México 2015*, Ciudad de México., 2015.
- CONAGUA: *Estadísticas del agua en México*, Ciudad de México., 2018.
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P. and De Bièvre, B.: Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos, in *Avances en investigación para la conservación de los páramos Andinos*, edited by F. Cuesta, J. Sevink, L. Llambí, B. De Bièvre, and P. J, pp. 288–304, Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). [online] Available from: http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/25_Agua_Crespo_Uso_tierra_LpS.pdf, 2014.
- Dagnino, J., Sturzenegger, A., Charreau, E., Vardé, O., Bauer, C. and Bereciartúa, P.: Diagnóstico del agua en las Américas, in *Foro Consultivo Científico y Tecnológico*, edited by J. Laclette and P. Zúñiga, pp. 1–448, México., 2012.
- DeFries, R. and Eshleman, K. N.: Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future, *Hydrol. Process.*, 18(11), 2183–2186, doi:10.1002/hyp.5584, 2004.

- Deng, C., Pisani, B., Hernández, H. and Li, Y.: Assessing the impact of climate change on water resources in a semi-arid area in central Mexico using a SWAT model, *Boletín la Soc. Geológica Mex.*, 72(2), A150819, doi:10.18268/BSGM2020v72n2a150819, 2020.
- Deng, Z., Zhang, X., Li, D. and Pan, G.: Simulation of land use/land cover change and its effects on the hydrological characteristics of the upper reaches of the Hanjiang Basin, *Environ. Earth Sci.*, 73(3), 1119–1132, doi:10.1007/s12665-014-3465-5, 2015.
- Díaz-Delgado, C., Esteller Alberich, M. V. and López-Vera, F.: Recursos Hídricos. Conceptos básicos y estudio de caso en Iberoamerica, edited by C. Díaz, M. Esteller, and F. Lopez-Vera, Toluca, Mexico., 2005.
- Diaz Mercado, V., Ba, K., Quentin, E., Ortiz, F. and Gama, L.: Hydrological Model to Simulate Daily Flow in a Basin with the Help of a GIS, *Open J. Mod. Hydrol.*, 5, 58–67, 2015.
- Dwarakish, G. S. and Ganasri, B. P.: Impact of land use change on hydrological systems : A review of current modeling approaches, *Cogent Geosci.*, 1(1), 1–18, doi:10.1080/23312041.2015.1115691, 2015.
- Eastman, J. R., Solorzano, L. and Fossen., M. Van: Transition Potential Modeling for Land-Cover Change, in *In GIS, Spatial Analysis and Modeling*, edited by David J. Maguire, M. Batty, and M. F. Goodchild, Redlands, CA., 2005.
- Eastman, R. J.: *TerrSet Manual*, USA. [online] Available from: www.clarklabs.org, 2016.
- Eleuch, S., Carsteanu, A., Bâ, K., Magagi, R., Goïta, K. and Diaz, C.: Validation and use of rainfall radar data to simulate water flows in the Rio Escondido basin, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 24(5), 559–565, doi:10.1007/s00477-009-0336-9, 2010.
- Escalante-Sandoval, C. and Nuñez-Garcia, P.: Meteorological drought features in northern and northwestern parts of Mexico under different climate change scenarios, *J. Arid Land*, 9(1), 65–75, doi:10.1007/s40333-016-0022-y, 2017.
- Fan, M. and Shibata, H.: Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan, *Ecol. Indic.*, 50, 79–89, doi:10.1016/j.ecolind.2014.11.003, 2015.
- FAO-AQUASTAT: Resumen general - América del Sur, Centroamérica y Caribe, Aquastat [online] Available from: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/americas/indexesp3.stm (Accessed 23 April 2017), 2016.
- FAO: *Crops and Drops*, Roma, Italia., 2002.
- Franco-Plata, R.: Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos, Universidad Autónoma del Estado de México., 2008.

Garret, C., Boongaling, K., Faustino-eslava, D. V and Lansigan, F. P.: Land Use Policy Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management : The case of an ungauged catchment in the Philippines, *Land use policy*, 72(August 2016), 116–128, doi:10.1016/j.landusepol.2017.12.042, 2018.

Gilbert, R.: *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York,, United States., 1987.

De Girolamo, A. M., Barca, E., Leone, M. and Lo Porto, A.: Impact of long-term climate change on flow regime in a Mediterranean basin, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 41(February 2021), 101061, doi:10.1016/j.ejrh.2022.101061, 2022.

Graham, L. P., Andréasson, J. and Carlsson, B.: Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin, *Clim. Change*, 81(S1), 293–307, doi:10.1007/s10584-006-9215-2, 2007.

Guo, Y., Li, Z., Amo-Boateng, M., Deng, P. and Huang, P.: Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes for the upper reaches of Weihe River, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 28(2), 333–346, doi:10.1007/s00477-013-0752-8, 2014.

Guzha, A. C., Rufino, M. C., Okoth, S., Jacobs, S. and Nóbrega, R. L. B.: Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 15(November 2017), 49–67, doi:10.1016/j.ejrh.2017.11.005, 2018.

Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Orsini, J. A. M., Nicholls, N., Penner, J. E. and Stott, P. A.: Understanding and Attributing Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, 80(3–4), 213–238 [online] Available from: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter9.pdf>, 2007.

Hu, J., Ma, J., Nie, C., Xue, L., Zhang, Y., Ni, F., Deng, Y., Liu, J., Zhou, D., Li, L. and Wang, Z.: Attribution Analysis of Runoff Change in Min-Tuo River Basin based on SWAT model simulations, *China, Sci. Rep.*, 10(1), 1–16, doi:10.1038/s41598-020-59659-z, 2020.

Hu, J., Wu, Y., Wang, L., Sun, P., Zhao, F., Jin, Z., Wang, Y., Qiu, L. and Lian, Y.: Impacts of land-use conversions on the water cycle in a typical watershed in the southern Chinese Loess Plateau, *J. Hydrol.*, 593, 125741, doi:10.1016/J.JHYDROL.2020.125741, 2021.

Hyandye, C. B., Worqul, A., Martz, L. W. and Muzuka, A. N. N.: The impact of future climate and land use/cover change on water resources in the Ndembera watershed and their mitigation and adaptation strategies, *Environ. Syst. Res.*, 7(1), 24, doi:10.1186/s40068-018-0110-4, 2018.

INECC and IMTA: Actualización y divulgación de los nuevos escenarios de cambio climático aplicados a México para fortalecer las capacidades nacionales., 2014.

INEGI: Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie I (continuo nacional), [online] Available from: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250kcs1agw.html> (Accessed 31 October 2021), 1997.

INEGI: Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie II (continuo nacional), [online] Available from: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks2gw.html> (Accessed 31 October 2021), 2001.

INEGI: Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie III (continuo nacional), [online] Available from: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks3gw.html> (Accessed 31 October 2021), 2005.

INEGI: Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie IV (continuo nacional), [online] Available from: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks4gw.html> (Accessed 31 October 2021), 2009.

INEGI: Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie V (continuo nacional), [online] Available from: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s5ugw.html> (Accessed 31 October 2021), 2013.

INEGI: Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional), [online] Available from: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s6gw.html> (Accessed 31 October 2021), 2016.

INIFAP and CONABIO: Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). “Edafología”. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México., , 1–5 [online] Available from: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/eda251mgw> (Accessed 1 October 2021), 1995.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC): Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el período 2020-2030 – México., 2015.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI, México., 2017.

IPCC-Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del ipcc, edited by J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, D. J. Griggs, and K. Maskell., 1997.

IPCC: Glosario, in Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nau, edited by S. Planton, pp. 185–204, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. [online]

Available from:
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf, 2013.

IPCC: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Wwww.Ipcc.Sh, 4–5, 2014.

James, C.: SWAT+ Toolbox v0.45, [online] Available from:
https://celray.github.io/docs/swatplus_toolbox/introduction.html#, 2020.

Krasting, J. P., John, J. G., Blanton, C., McHugh, C., Nikonov, S., Radhakrishnan, A., Rand, K., Zadeh, N. T., Balaji, V., Durachta, J., Dupuis, C., Menzel, R., Robinson, T., Underwood, S., Vahlenkamp, H., Dunne, K. A., Gauthier, P. P. G., Ginoux, P., Griffies, S. M., Hallberg, R., Harrison, M., Hurlin, W., Malyshev, S., Naik, V., Paulot, F., Paynter, D. J., Ploshay, J., Reichl, B. G., Schwarzkopf, D. M., Seman, C. J., Silvers, L., Wyman, B., Zeng, Y., Adcroft, A., Dunne, J. P., Dussin, R., Guo, H., He, J., Held, I. M., Horowitz, L. W., Lin, P., Milly, P. C. D., Shevliakova, E., Stock, C., Winton, M., Wittenberg, A. T., Xie, Y. and Zhao, M.: NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 CMIP esm-hist, , doi:10.22033/ESGF/CMIP6.8522, 2018.

Kundzewicz, Z. W. and Robson, A. J.: Change detection in hydrological records - A review of the methodology, *Hydrol. Sci. J.*, 49(1), 7–19, doi:10.1623/hysj.49.1.7.53993, 2004.

Lang, Y., Song, W. and Zhang, Y.: Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China, *Phys. Chem. Earth*, 101(October), 102–111, doi:10.1016/j.pce.2017.06.003, 2017.

Li, Q., Chen, Y., Shen, Y., Li, X. and Xu, J.: Spatial and temporal trends of climate change in Xinjiang, China, *J. Geogr. Sci.*, 21(6), 1007–1018, doi:10.1007/s11442-011-0896-8, 2011.

Li, X., Zhang, Y., Ma, N., Li, C. and Luan, J.: Contrasting effects of climate and LULC change on blue water resources at varying temporal and spatial scales, *Sci. Total Environ.*, 786, 147488, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147488, 2021.

Llamas, J.: *Hidrología General Principios y Aplicaciones*, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, España., 1993.

López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J. and García-Ruiz, J. M.: Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the ebro basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(1), 311–322, doi:10.5194/hess-15-311-2011, 2011.

López, C., Zambrano, L., Ruiz, R., Guzmán, M., Pérez, R., Sandoval, R., Hatch, G., Pineda, N., Pacheco-Vega, R. and Caldera, A.: *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica*, edited by C. Denzin, F. Taboada, and R. Pacheco-Vega, Ciudad de México, México., 2017.

López Díaz, F., Nava Assad, Y. and Rojas Baraja, M.: *Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones*, Ciudad de México. [online] Available from:

- https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/conten_intro/Guia_de_Escenarios_CC_mar2022.pdf, 2022.
- Ma, H., Yang, D., Tan, S. K., Gao, B. and Hu, Q.: Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment, *J. Hydrol.*, 389(3–4), 317–324, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.010, 2010.
- Ma, X., Xu, J., Luo, Y., Prasad Aggarwal, S. and Li, J.: Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China, *Hydrol. Process.*, 23(8), 1179–1191, doi:10.1002/hyp.7233, 2009.
- Magaña-Hernández, F., Bâ, K. M. and Guerra-Cobián, V. H.: Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar, *Agrociencia*, 47(8), 739–752, 2013.
- Mahmoud, S. H. and Alazba, A. A.: Hydrological Response to Land Cover Changes and Human Activities in Arid Regions Using a Geographic Information System and Remote Sensing, *PLoS One*, 10(4), 1–19, doi:10.1371/journal.pone.0125805, 2015.
- Makhtoumi, Y., Li, S., Ibeanusi, V. and Chen, G.: Evaluating water balance variables under land use and climate projections in the upper choctawhatchee River Watershed, in Southeast US, *Water (Switzerland)*, 12(8), 1–33, doi:10.3390/w12082205, 2020.
- Mccoll, C. and Aggett, G.: Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support, *Environ. Manage.*, 84, 494–512, doi:10.1016/j.jenvman.2006.06.023, 2007.
- Mehan, S., Kannan, N., Neupane, R., McDaniel, R. and Kumar, S.: Climate Change Impacts on the Hydrological Processes of a Small Agricultural Watershed, *Climate*, 4(4), 56, doi:10.3390/cli4040056, 2016.
- Meng, F., Su, F., Yang, D., Tong, K. and Hao, Z.: Impacts of recent climate change on the hydrology in the source region of the Yellow River basin, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 6, 66–81, doi:10.1016/j.ejrh.2016.03.003, 2016.
- Mishra, Y., Nakamura, T., Babel, M. S., Ninsawat, S. and Ochi, S.: Impact of climate change on water resources of the Bheri River Basin, Nepal, *Water (Switzerland)*, 10(2), 1–21, doi:10.3390/w10020220, 2018.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L.: Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Trans. ASABE*, 50(3), 885–900, doi:10.13031/2013.23153, 2007.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N. and Daggupati, P.: Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria, *Trans. ASABE*, 58(6), 1763–1785, doi:10.13031/trans.58.10715, 2015.
- Muche, M. E., Sinnathamby, S., Parmar, R., Knightes, C. D., Johnston, J. M., Wolfe, K.,

- Purucker, S. T., Cyterski, M. J. and Smith, D.: Comparison and Evaluation of Gridded Precipitation Datasets in a Kansas Agricultural Watershed Using SWAT, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 56(3), 486–506, doi:10.1111/1752-1688.12819, 2020.
- Mwangi, H. M., Julich, S., Patil, S. D., McDonald, M. A. and Feger, K. H.: Relative contribution of land use change and climate variability on discharge of upper Mara River, Kenya, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 5, 244–260, doi:10.1016/j.ejrh.2015.12.059, 2016.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10(3), 282–290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6, 1970.
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A. and Ramirez-Villegas, J.: High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments, *Sci. Data*, 7(1), 1–14, doi:10.1038/s41597-019-0343-8, 2020.
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. . and Williams, J. .: Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Texas., 2011a.
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. . and Williams, J. .: Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Texas., 2011b.
- Nepal, S., Krause, P., Flügel, W.-A., Fink, M. and Fischer, C.: Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model, *Hydrol. Process.*, 28(3), 1329–1344, doi:10.1002/hyp.9627, 2014.
- Nie, N., Zhang, W., Liu, M., Chen, H. and Zhao, D.: Separating the impacts of climate variability, land-use change and large reservoir operations on streamflow in the Yangtze River basin, China, using a hydrological modeling approach, *Int. J. Digit. Earth*, 14(2), 231–249, doi:10.1080/17538947.2020.1812740, 2020.
- NRCS: Chapter 22 Glossary, in *National Engineering Handbook*, p. 15., 2012.
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G. and Arias, S.: Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments, *Hydrol. Process.*, 30(22), 4074–4089, doi:10.1002/hyp.10980, 2016.
- Odusanya, A. E., Mehdi, B., Schürz, C., Oke, A. O., Awokola, O. S., Awomeso, J. A., Adejuwon, J. O. and Schulz, K.: Multi-site calibration and validation of SWAT with satellite-based evapotranspiration in a data-sparse catchment in southwestern Nigeria, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23(2), 1113–1144, doi:10.5194/hess-23-1113-2019, 2019.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO): *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales-Informe nacional- México*, Roma., 2010.

Organización Meteorológica Mundial (OMM): Guía de prácticas hidrológicas: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas, Sexta., Ginebra, Suiza. [online] Available from: https://www.google.com/search?q=omm&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ei=TIYtV9TpI8_EjwOvn7mYAg, 2009.

Park, G. A., Park, J. Y., Joh, H. K., Lee, J. W., Ahn, S. R. and Kim, S. J.: Evaluation of mixed forest evapotranspiration and soil moisture using measured and swat simulated results in a hillslope watershed, *KSCE J. Civ. Eng.*, 18(1), 315–322, doi:10.1007/s12205-014-0193-z, 2014.

Pettitt: A Non-parametric to the Approach Problem, *Appl. Stat.*, 28(2), 126–135, 1979.

Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E. and Rossiter, D.: SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, *Soil*, 7(1), 217–240, doi:10.5194/soil-7-217-2021, 2021.

Pohlert, T.: trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection, , 1–18 [online] Available from: [https://cran.r-project.org/package=trend%0Ahttps://orcid.org/0000-0003-3855-3025%0Afile:///C:/Users/staff/Documents/WSU/Central University of Technology/CENTRAL UNIVERSITY/Master of Civil Engineering/My Thesis/Literature/ARIMA/New folder \(2\)/Pohlert 2020.](https://cran.r-project.org/package=trend%0Ahttps://orcid.org/0000-0003-3855-3025%0Afile:///C:/Users/staff/Documents/WSU/Central%20University%20of%20Technology/CENTRAL%20UNIVERSITY/Master%20of%20Civil%20Engineering/My%20Thesis/Literature/ARIMA/New%20folder%20(2)/Pohlert%202020.), 2020.

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., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A. and Tavoni, M.: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Glob. Environ. Chang.*, 42, 153–168, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009, 2017.

Ríos Patrón, E., González Terrazas, D. I. and González Mora, I. D.: Climate Change and Vulnerability of Water Resources in Mexico: Challenges for Basin Management, in *Water Policy in Mexico: Economic, Institutional, and Environmental Considerations*, vol. 20, pp. 283–307., 2019.

Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., Willaarts, B. and De Miguel, Á.: An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja, *Agric. Water Manag.*, 212(September 2018), 211–225, doi:10.1016/j.agwat.2018.09.012, 2019.

Rosengaus, M.: Impacto de los ciclones tropicales en las cuencas de México, in *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*, edited by H. Cotler Ávalos, pp. 32–37, Mexico, D.F. [online] Available from: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/02/CuencasHidrográficas-1.pdf>, 2010.

RStudio Team: RStudio: Integrated Development Environment for R, Boston, MA. [online] Available from: <http://www.rstudio.com>, 2019.

Ryu, C.: Package 'dlookr' - Tools for Data Diagnosis, Exploration, Transformation, , 1–123 [online] Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/dlookr/index.html>, 2020.

Said, M., Hyandy, C., Mjemah, I. C., Komakech, H. C. and Munishi, L. K.: Evaluation and Prediction of the Impacts of Land Cover Changes on Hydrological Processes in Data Constrained Southern Slopes of Kilimanjaro, Tanzania, *Earth*, 2(2), 225–247, doi:10.3390/earth2020014, 2021.

Samal, D. R. and Gedam, S.: Assessing the impacts of land use and land cover change on water resources in the Upper Bhima river basin, India, *Environ. Challenges*, 5(August), 100251, doi:10.1016/j.envc.2021.100251, 2021.

Sánchez, C. S., Flores, M. A., Cruz-Leyva, I. A. and Velázquez, A.: Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas, en *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio, in *Capital natural de México*, vol. II, pp. 75–129, Conabio, México. [online] Available from: https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol_II/II02_Estado_y_transformacion_de_los_ecosistemas_terrestres.pdf, 2009.

Saxton, K. E. and Willey, P. H.: The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation, *Watershed Model.*, 401–435, doi:10.1201/9781420037432.ch17, 2005.

Schurz, C., Hollosi, B., Matulla, C., Pressl, A., Ertl, T., Schulz, K. and Mehdi, B.: A comprehensive sensitivity and uncertainty analysis for discharge and nitrate-nitrogen loads involving multiple discrete model inputs under future changing conditions., 2019.

Schürz, C.: SWATplusR: Running SWAT2012 and SWAT+ Projects in R, , doi:10.5281/zenodo.3373859, 2019.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat): *El Medio Ambiente en México 2005: en resumen*, México D.F., 2006.

Sen, P. K.: Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau, *J. Am. Stat. Assoc.*, 63(324), 1379–1389, doi:10.1080/01621459.1968.10480934, 1968.

Shahid, M., Cong, Z. and Zhang, D.: Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow: a case study of the Soan River basin, Pakistan, *Theor. Appl. Climatol.*, 134(1–2), 205–219, doi:10.1007/s00704-017-2269-4, 2018.

Shen, M., Chen, J., Zhuan, M., Chen, H., Xu, C. and Xiong, L.: Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology, *J. Hydrol.*, 556, 10–24, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.004, 2018.

Shrestha, S. and Htut, A. Y.: Land Use and Climate Change Impacts on the Hydrology of the Bago River Basin, Myanmar, *Environ. Model. Assess.*, 21(6), 819–833, doi:10.1007/s10666-016-9511-9, 2016.

Skoulikaris, C. and Ganoulis, J.: Climate Change Impacts on River Catchment Hydrology Using Dynamic Downscaling of Global Climate Models, in *National Security and Human Health Implications of Climate Change*, edited by H. J. S. Fernando, Z. Klaić, and J. L. McCulley, pp. 281–287, Springer Netherlands, Dordrecht., 2012.

Soare, D.: LA DESCENTRALIZACIÓN EN LA GESTIÓN DEL AGUA POTABLE: ALGUNOS LOGROS, MUCHOS FRACASOS Y DEMASIADOS PENDIENTES, in *La gestión del agua en la cuenca del río Amacuzac: diagnósticos, reflexiones y desafíos*, edited by S. Vargas, México., 2006.

von Storch, H.: Misuses of Statistical Analysis in Climate Research, in *Analysis of Climate Variability*, pp. 11–26, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg., 1995.

Stucker, D. and Lopez-Gunn, E.: Adaptation to climate change through water resources management: Capacity, equity and sustainability, *Adapt. to Clim. Chang. Through Water Resour. Manag. Capacit. Equity Sustain.*, 1–446, doi:10.4324/9780203085875, 2014.

Sun, Y., Tian, F., Yang, L. and Hu, H.: Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods, *J. Hydrol.*, 508, 170–180, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.11.004, 2014.

Tang, Y., Tang, Q., Tian, F., Zhang, Z. and Liu, G.: Responses of natural runoff to recent climatic variations in the Yellow River basin, China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(11), 4471–4480, doi:10.5194/hess-17-4471-2013, 2013.

Tech, J.: SWAT+ Editor 2.0 Documentation, , (February) [online] Available from: <https://swatplus.gitbook.io/docs/> (Accessed 29 March 2021), 2021.

Theil, H.: A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. III, in *Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A 53*:, vol. XII., 1950.

Thornton, M. M., Shrestha, R., Wei, Y., Thornton, P. E., Kao, S. and Wilson, B. E.: Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4, , doi:10.3334/ORNLDAAAC/1840, 2020.

Thornton, P. E., Shrestha, R., Thornton, M., Kao, S. C., Wei, Y. and Wilson, B. E.: Gridded daily weather data for North America with comprehensive uncertainty quantification, *Sci. Data*, 8(1), 1–17, doi:10.1038/s41597-021-00973-0, 2021.

UNDESA: A guidebook to the Green Economy Issue: exploring green economy policies and international experience with national strategies., 2012.

UNESCO-WWAP: Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo, París, UNESCO., 2016.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura) and WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas): El agua, una responsabilidad compartida. 2° Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo, , 587 [online] Available from: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001495/149519s.pdf>, 2006.

Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G. and Salles, C.: Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 111(22), 1–11, doi:10.1029/2006JD007169, 2006.

Vilchis-Mata, I., Bâ, K. M., Franco-Plata, R. and Díaz-Delgado, C.: Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos, *Tecnol. y Ciencias del Agua*, 6(4), 45–60, 2015.

Wijesekara, G. N., Gupta, A., Valeo, C., Hasbani, J., Qiao, Y., Delaney, P. and Marceau, D. J.: Assessing the impact of future land-use changes on hydrological processes in the Elbow River watershed in southern Alberta , Canada, *J. Hydrol.*, 412–413, 220–232, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.04.018, 2012.

Xu, S., Qin, M., Ding, S., Zhao, Q., Liu, H., Li, C., Yang, X., Li, Y., Yang, J. and Ji, X.: The impacts of climate variation and land use changes on streamflow in the Yihe River, China, *Water (Switzerland)*, 11(5), 1–18, doi:10.3390/w11050887, 2019.

Yacoub, C. and Foguet, A. P.: Slope Effects on SWAT Modeling in a Mountainous Basin, *J. Hydrol. Eng.*, 18(12), 1663–1673, doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0000756, 2013.

Yan, R., Cai, Y., Li, C., Wang, X. and Liu, Q.: Hydrological Responses to Climate and Land Use Changes in a Watershed of the Loess Plateau, China, *Sustainability*, 11(1443), 1–19, doi:10.3390/su11051443, 2019.

Yang, H. and Yang, D.: Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff, *Water Resour. Res.*, 47(7), 1–12, doi:10.1029/2010WR009287, 2011.

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. and Cavadias, G.: The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series, *Hydrol. Process.*, 16(9), 1807–1829, doi:10.1002/hyp.1095, 2002.

Zango, B.-S., Seidou, O., Sartaj, M., Nakhaei, N. and Stiles, K.: Impacts of urbanization and climate change on water quantity and quality in the Carp River watershed, *J. Water Clim. Chang.*, 13(2), 786–816, doi:10.2166/wcc.2021.158, 2022.

Zhan, C., Xu, Z., Ye, A. and Su, H.: LUCC and its impact on run-off yield in the Bai River catchment--upstream of the Miyun Reservoir basin, *J. Plant Ecol.*, 4(1–2), 61–66,

doi:10.1093/jpe/rtr003, 2011.

Zhang, D., Liu, X., Liu, C. and Bai, P.: Responses of runoff to climatic variation and human activities in the Fenhe River, China, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 27(6), 1293–1301, doi:10.1007/s00477-012-0665-y, 2012.

Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y. and Shao, Q.: Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing, *J. Hydrol.*, 360(1–4), 117–131, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.021, 2008.

Zhang, L., Zhao, F., Chen, Y. and Dixon, R. N. M.: Estimating effects of plantation expansion and climate variability on streamflow for catchments in Australia, *Water Resour. Res.*, 47(12), 1–13, doi:10.1029/2011WR010711, 2011.

Zhang, L., Cheng, L., Chiew, F. and Fu, B.: Understanding the impacts of climate and landuse change on water yield, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 33, 167–174, doi:10.1016/j.cosust.2018.04.017, 2018.

Zhao, F., Zhang, L., Xu, Z. and Scott, D. F.: Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow, *Water Resour. Res.*, 46(3), 1–14, doi:10.1029/2009WR007702, 2010.

Zhao, F. F., Zhang, L. and Xu, Z. X.: Effects of vegetation cover change on streamflow at a range of spatial scales, in 18th World IMACS / MODSIM Congress, pp. 3591–3597, Cairns, Australia., 2009.

Anexos

Anexo 1. Clasificación climática Koppen-García

Tabla 6-1. Clasificación climática Koppen-García, cuenca del río Escondido

Tipo de clima	Condición Térmica	Régimen de lluvias	Rango de oscilación	Sequía intraestival	Porcentaje del área (%)
BS ₁ hx'(w)(e)w''	Seco semiárido	Con régimen de lluvias entre verano e invierno y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Muy extremo	Sequía intraestival	27
BS ₀ hw(e)w''	Seco árido	Con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Muy extremo	Sequía intraestival	2
BS ₀ hw(x')(e)w''	Seco árido	Con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal mayor al 10.2 por ciento	Muy extremo	Sequía intraestival	1
BS ₀ hx'(w)(e)w''	Seco árido	Con régimen de lluvias entre verano e invierno y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Muy extremo	Sequía intraestival	70

Tabla 6-2. Clasificación climática Koppen-García, cuenca del río Amacuzac

Tipo de clima	Condición Térmica	Régimen de lluvias	Rango de oscilación	Sequía intraestival	Porcentaje del área
Aw ₂ (w)(i')gw''	Cálido	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.1
Aw ₁ (w)(i')gw''					4.8
Aw ₀ (w)(i')gw''					3.1
Aw ₁ (w)(i')g	Cálido	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica		0.3
Aw ₀ (w)(i')g					1.8
Aw ₀ (w)(e)gw''	Cálido	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Extremoso	Sequía intraestival	0.0
A(C)w ₂ (w)(i')gw''	Semicálido (cálido)	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.8
A(C)w ₁ (w)(i')gw''					9.4
E(T)HC(w ₂)(w)ig	Frío	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Isotermal		0.7
(A)Cb(w ₂)(w)igw''	Semicálido (templado)	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Isotermal	Sequía intraestival	1.3
(A)Ca(w ₂)(w)igw''					0.1
(A)Cb(w ₂)(w)(i')gw''	Semicálido (templado)	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	2.4
(A)Ca(w ₂)(w)(i')gw''					0.8
(A)Cb(w ₁)(w)(i')gw''					5.0
(A)Ca(w ₁)(w)(i')gw''					7.8
(A)Cb(w ₁)(w)(i')g	Semicálido (templado)	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca Oscilación térmica		0.3
(A)Ca(w ₁)(w)(i')g					0.9
Cb(w ₂)(w)igw''	Templado	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Isotermal	Sequía intraestival	13.7
Cb(w ₂)(w)(i')g	Templado	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica		3.1
Cb(w ₂)(w)(i')gw''	Templado	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	10.5
Cb(w ₂)(w)ig	Templado	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Isotermal		26.4
Cb'(w ₂)(w)ig					2.6
Cc(w ₂)(w)ig					2.3
Cb'(w ₂)ig	Templado	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Isotermal		1.0
Cc(w ₂)ig					0.9

Tabla 6-3. Clasificación climática Koppen-García, cuenca del río Sierra

Tipo de clima	Condición Térmica	Régimen de lluvias	Rango de oscilación	Sequía intraestival	Porcentaje del área
Af(m)(i)gw"		Húmedo con régimen de lluvias entre verano e invierno y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	26.9
Ax'(w ₂)(i)gw"	Cálido	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	1.9
Aw ₂ (w)(i)gw"	Cálido	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.0
Aw ₂ (i)gw"	Cálido	Húmedo con régimen de lluvias entre verano e invierno y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Extremoso	Sequía intraestival	0.4
Af(m)(e)gw"	Cálido	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	3.7
A(C)f(m)(i)gw"	Semicálido (cálido)	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	1.1
A(C)x'(w ₂)(i)gw"	Semicálido (cálido)	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.2
A(C)w ₂ (w)(i)gw"	Semicálido (cálido)	Subhúmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.4
A(C)w ₂ (i)gw"	Semicálido (cálido)	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal inferior al 5 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.2
(A)Ca(m)(w)(i)gw"	Semicálido (templado)	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.9
(A)Cb(m)(i)gw"	Semicálido (templado)	Húmedo con régimen de lluvias entre verano e invierno y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	1.0
(A)Ca(m)(i)gw"	Semicálido (templado)	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	7.4
(A)Cb(fm)(i)gw"	Semicálido (templado)	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	11.4
(A)Ca(fm)(i)gw"	Semicálido (templado)	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Isotermal	Sequía intraestival	0.0
Cb(m)igw"	Templado	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.2
Cb(m)(i)gw"	Templado	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Isotermal	Sequía intraestival	14.4
Cb(fm)igw"	Templado	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre el 5 y 10.2 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	0.1
Cb'(fm)igw"	Templado	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	5.5
Cb(fm)(i)gw"	Templado	Húmedo con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor al 18 por ciento.	Con poca oscilación térmica	Sequía intraestival	

Anexo 2. Rutina en RStudio para leer archivos .mdb de BANDAS

```

1  ###SCRIPT PARA LEER ARCHIVOS DE CAUDAL CON FORMATO .mdb DE BANDAS###
2
3  #paquetes necesarios
4
5  #instalar paquetes
6  install.packages('RODBC')
7  install.packages('tidyverse')
8
9  #cargar paquetes
10 library(RODBC)
11 library(tidyverse)
12
13 #Dirección de carpeta de archivos .mdb
14 #reemplazar dirección
15 path <- 'C:/Conchos/Qmex'
16
17 #Crea una lista de las direcciones de los archivos .mdb
18 lf <- list.files(path = path, pattern = '.mdb$',
19                recursive = T, full.names = T) %>%
20   set_names(str_replace(basename(.), ".mdb|.MDB", ""))
21
22 #Función para leer los datos
23 mdb_get <- function(mdb, prefix = "^DD|dd|dD") {
24   con <- odbcDriverConnect(
25     paste0('driver=Microsoft Access Driver (*.mdb, *.accdb);DBQ=', mdb)
26   )
27   f <- sqlTables(con)
28   tbl <- f[grepl(prefix, f$TABLE_NAME), "TABLE_NAME"]
29   data <- sqlQuery(con, paste0("select * from ", tbl))
30   close(con)
31   data
32 }
33
34 #lee los archivos y los agrupa en un data.frame, utiliza la función creada (mdb_get).
35 datos <- purrr::map_df(lf, mdb_get, .id = "clave")
36
37 #Guarda la base de datos en formato csv
38 #reemplazar dirección
39 write.csv(datos, 'C:/Conchos/Qmex.csv', row.names = F)

```

Anexo 3. Rutina en RStudio para el diagnóstico de calidad de datos

```

1  ###DIAGNOSTICO DE CALIDAD DE DATOS###
2  #Este script realiza un diagnóstico de la calidad de datos a subseries mensuales,
3  #consta de tres partes, la primera parte se enfoca en la disponibilidad de datos,
4  #la segunda, se enfoca en la identificación de valores atípicos y
5  #la tercera, en un resumen estadístico de la distribución de datos.
6
7  #Variables de entrada
8  #La base de datos debe tener
9  #clave denominada 'clave'
10 #año denominado 'year'
11 #mes denominado 'month'
12 #day denominado 'day'
13 #valor de la variable 'v'
14
15 #Variables de salida
16 #Diagnóstico 1: inicio y fin del periodo (pin, pfin), número de años (anio),
17 # número de datos (num), número y porcentaje de datos faltantes
18 # (missing_count, missing_percent), número de datos únicos
19 # (unique_count)
20 #Diagnóstico 2: pin, pfin, anio, num, número de datos atípicos (outliers_cnt),
21 # media aritmética de los outliers (outliers_mean),
22 # media aritmética de la variable con outliers (with_mean),
23 # media aritmética de la variable sin outliers (without_mean)
24 #Diagnóstico 3 pin, pfin, anio, num, valor mínimo (min), primer cuartil (Q1),
25 # media aritmética (mean), mediana (median), tercer cuartil (Q3),
26 # valor máximo (max), número de ceros en la serie (zero),
27 # número de valores negativos (minus), número de outliers (outlier)
28
29 #Este script utiliza la librería dlookr y tidyverse
30
31 #instalar paquetes
32 install.packages("dlookr")
33 install.packages("tidyverse")
34
35 #cargar paquetes
36 library(dlookr)
37 library(tidyverse)
38
39
40 #cargar base de datos
41 #ejemplo
42 datos <- read.csv("../data/qmx/Qmex.csv", header = T)
43
44 #lista de estaciones analizar
45 #ejemplo
46 cvl <- c(18232, 24290, 30016)
47
48
49 #estructurar base de datos
50 #si ya se cuenta con la base estructurada como se indica
51 #en la línea 7 saltar a línea 64
52 x <- datos %>%
53 #cambiar nombres de variables
54 rename(year=pk_anio, mon=pk_mes) %>%
55 #eliminar lo que no se necesita
56 select(-X.1, -X) %>%
57 #filtrar la base de datos por las estaciones analizar
58 filter(clave %in% cvl) %>%
59 gather(day, v, 4:34) %>%
60 mutate(day = gsub("ngasto_d", "", day)) %>%
61 arrange(clave, year, mon, day)
62
63
64 ###INICIO DE DIAGNOSTICO DE DATOS
65
66 #extrae códigos de las estaciones
67 site <- unique(x$clave)
68
69 #se crea un dataFrame vacío, donde se guardarán los resultados
70 diagnostico1 <- data.frame()
71 diagnostico2 <- data.frame()
72 diagnostico3 <- data.frame()
73
74 #inicio del ciclo para extraer información
75 #ciclo para extraer la informaci?n
76 for(i in site){
77   dat <- subset(x, clave == i)
78
79   bd1 <- dat %>%
80     #spread(clave,v) %>%
81     mutate(date = as.Date(ISOdate(year, mon, day)))
82
83   #crea date frame con fechas considerando el min y max de los años de bd2
84   date <- data.frame(date = seq(as.Date(ISOdate(min(bd1$year), 01, 01)),
85     as.Date(ISOdate(max(bd1$year), 12, 31)),
86     by = "day"))
87
88   #une el date con elbd2 con base a la columna date
89   bd2 <- left_join(date, bd1, by = 'date')
90   #arregla la base bd2
91   bd2 <- bd2 %>%
92     mutate (clave= i, year= year(date), mon= month(date), day= day(date)) %>%
93     mutate (new = paste(clave, mon, sep = '_'))
94
95   #periodo de disponibilidad de datos
96   pin<- min(bd2$year, na.rm = T)
97   pfi<- max(bd2$year, na.rm = T)
98
99   #número de años
100  anio<- (pfi-pin)+1
101
102  #extrae códigos de las estaciones
103  sitel <- unique(bd2$new) %>% na.omit()

```

Anexo 3...Continuación

```
104
105 for(j in sitel){
106   dat1 <- subset(bd2, new == j)
107
108   #numero de meses (datos) que debe tener el periodo
109   num= length(dat1$v)
110
111   #diagnóstico de datos
112   #valores faltantes
113   d1 <- diagnose (dat1, cols= v)
114   diagnostico1 <- bind_rows(diagnostico1,
115                             c(cod = j, pin=pin,pfin= pfi,anio=anio,num=num,d1))
116
117   #valores atipicos
118   d2 <- diagnose_outlier(dat1, cols= v)
119   diagnostico2 <- bind_rows(diagnostico2,
120                             c(cod = j, pin=pin,pfin= pfi,anio=anio,num=num,d2))
121
122   #static summary
123   d3<- diagnose_numeric(dat1, cols= v)
124   diagnostico3 <- bind_rows(diagnostico3,
125                             c(cod = j, pin=pin,pfin= pfi,anio=anio,num=num,d3))
126
127 }
128
129 }
130
131
132 #imprimir el diagnóstico en R
133 diagnostico1
134 diagnostico2
135 diagnostico3
136
137 #guarda el diagnóstico en hojas de excel
138 #ejemplo
139 write.xlsx(diagnostico1, file="../results/diagnose/dgnq_prdmon.xlsx",
140           sheetName="Vfaltantes", row.names=FALSE)
141 write.xlsx(diagnostico2, file="../results/diagnose/dgnq_prdmon.xlsx",
142           sheetName="Vatipicos", append=TRUE, row.names=FALSE)
143 write.xlsx(diagnostico3, file="../results/diagnose/dgnq_prdmon.xlsx",
144           sheetName="Restadistico", append=TRUE, row.names=FALSE)
```

Anexo 4. Rutina en RStudio para ejecutar pruebas de homogeneidad

```

1  ###PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD###
2  #Este script ejecuta tres pruebas de homogeneidad:
3  #Pettitt's test
4  #Standard Normal Homogeinity Test (SNHT)
5  #Buishand Range Test
6
7  #Librerías necesarias
8  library(trend)
9  library(tidyverse)
10
11 #La base da datos debe contener "clave, fecha y variable a evaluar"
12
13 #Elimina NA de la base de datos
14 x <- Qm %>% #cambiar Qm por el nombre de la base de datos a evaluar
15   na.omit()
16
17 #Extrae códigos de las estaciones
18 site <- unique(x$clave)
19
20 #Se crea dataFrames vacíos, donde se guardará los resultados
21 dataFrame1 <- data.frame()
22 dataFrame2 <- data.frame()
23 dataFrame3 <- data.frame()
24
25 #Ciclo para extraer la información
26 for(i in site){
27   dat <- subset(x, x$clave == i)
28
29   ##Pettitt's test
30   pettitt<- pettitt.test(x = dat[['variable']])
31   n <- pettitt$nobs #número de datos
32   pc <- as.integer(str_extract(pettitt$estimate, "[1-9]\\d{2}")) #punto de cambio
33   y <- as.character.Date(dat[['fecha']][pettitt$estimate]) #fecha de cambio
34   s.1 <- mean(dat$variable[1:pc]) #saca la media del primer periodo
35   s.2 <- mean(dat$variable[(pc+1):n]) ##saca la media del segundo periodo
36   p.value <- pettitt$p.value
37
38
39   dataFrame1 <- dplyr:: bind_rows(dataFrame1,
40     c(cod = i, Ndatos = n, Pcambio = pc, Fcambio = y,
41       Prom1= s.1, Prom2= s.2, pvalue= p.value))
42
43   ##Standard Normal Homogeinity Test (SNHT)
44   snht<- snht.test(x = dat[['variable']])
45   t <- snht$statistic #estadístico T
46   n1 <- snht$parameter #número de datos
47   pc1 <- as.integer(str_extract(snht$estimate, "[1-9]\\d{2}")) #punto de cambio
48   y1 <- as.character.Date(dat[['fecha']][snht$estimate]) #fecha de cambio
49   s.1_1 <- mean(dat$variable[1:pc1]) #saca la media del primer periodo
50   s.2_1 <- mean(dat$variable[(pc1+1):n]) ##saca la media del segundo periodo
51   p.value1 <- snht$p.value
52
53   dataFrame2 <- dplyr:: bind_rows(dataFrame2,
54     c(cod = i, Ndatos = n1, t= t,
55       Pcambio = pc1, Fcambio = y1,
56       Prom1= s.1_1, Prom2= s.2_1,
57       pvalue= p.value1))
58
59   ##Buishand Range Test
60   buishand<- br.test(x = dat[['variable']])
61   rsqrt <- buishand$statistic #estadístico T
62   n2 <- buishand$parameter #número de datos
63   pc2 <- as.integer(str_extract(buishand$estimate, "[1-9]\\d{2}")) #punto de cambio
64   y2 <- as.character.Date(dat[['fecha']][buishand$estimate]) #fecha de cambio
65   s.1_2 <- mean(dat$variable[1:pc2]) #media del primer periodo
66   s.2_2 <- mean(dat$variable[(pc2+1):n]) #media del segundo periodo
67   p.value2 <- buishand$p.value
68
69
70   dataFrame3 <- dplyr:: bind_rows(dataFrame3,
71     c(cod = i, Ndatos = n2, rsqrt= rsqrt,
72       Pcambio = pc2, Fcambio = y2,
73       Prom1= s.1_2, Prom2= s.2_2,
74       pvalue= p.value2))
75
76 }
77
78 #imprime resultados in R
79 Rpettit <- dataFrame1
80 Rsnht <- dataFrame2
81 Rbuishand <- dataFrame3
82
83 #imprime resultados en archivos .csv, ejemplo write.csv(Rpettit, "C:/R work/Rpettit.csv")
84 write.csv(Rpettit, "dirección y nombre del archivo a guardar con la extensión .csv")
85 write.csv(Rsnht, "dirección y nombre del archivo a guardar con la extensión .csv")
86 write.csv(Rbuishand, "dirección y nombre del archivo a guardar con la extensión .csv")
87

```

Anexo 5. Clasificación de las coberturas vegetales en códigos SWAT

Id	Categoría	Código SWAT
1	Vegetación secundaria arbórea de selva baja perennifolia	FRSE
2	Agricultura de temporal plantación agrícola permanente	AGRL
3	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	AGRL
4	Agricultura de temporal anual	AGRL
5	Agricultura de temporal anual y permanente	AGRL
6	Agricultura de temporal semipermanente	AGRL
7	Bosque de encino	OAK
8	Bosque de encino-pino	FRST
9	Bosque de pino	FRSE
10	Bosque de pino-encino	FRST
11	Bosque mesófilo de montaña	FRSE_TEMS
12	Pastizal cultivado permanente	PAST
13	Pastizal inducido	PAST
14	Selva alta perennifolia	FRSE
15	Selva baja caducifolia	FRSD
16	Selva baja perennifolia	FRSE
17	Selva mediana subperennifolia	FRSE
18	Tular	WEHB
19	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	OAK
20	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	FRST
21	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	PINE
22	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	FRST
23	Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña	FRSE_TEMS
24	Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia	FRSD
25	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	FRSD
26	Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia	FRSE
27	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	OAK
28	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	FRST
29	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	PINE
30	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	FRST
31	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	FRSE_TEMS
32	Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia	FRSE
33	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	FRSD
34	Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	FRSE
35	Zona urbana	URMD

Anexo 6. Propiedades físicas del suelo de la cuenca de los ríos La Sierra y Amacuzac

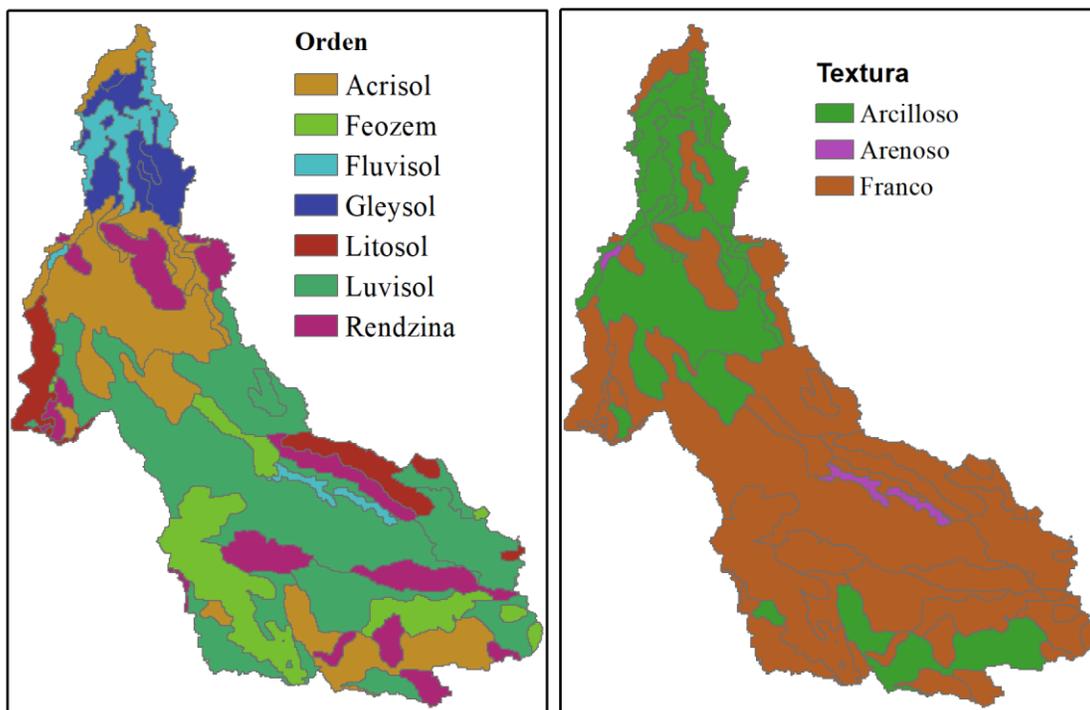


Figura 6-1. Tipo y textura del suelo de la cuenca del río La Sierra

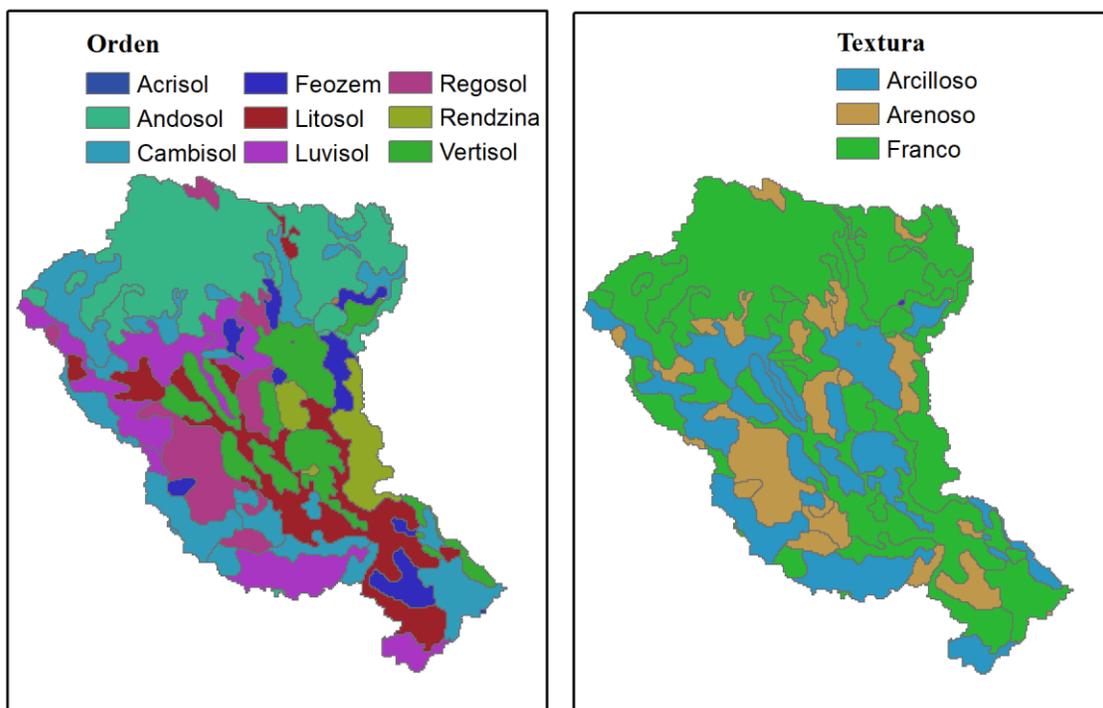


Figura 6-2. Tipo y textura del suelo de la cuenca del río Amacuzac

Tabla 6-4. Propiedades físicas del suelo a una profundidad 0 – 300 mm, en la cuenca del río La Sierra

SNAM	Orden	HYCGRP	Z	BD	AWC (mm)	K (mm/h)	CBN (%)	CLAY (%)	SILT (%)	SAND (%)
Gv	Gleysol	C	300	1.42	0.13	4.82	1.3	33	31	37
Ge	Gleysol	C	300	1.44	0.13	7.06	1.3	29	31	40
Ap	Acrisol	C	300	1.42	0.14	5.88	1.3	31	31	37
Lc	Luvisol	C	300	1.44	0.13	5.14	1.3	32	26	42
Ah	Acrisol	C	300	1.44	0.13	4.64	1.3	33	27	41
Gm	Gleysol	C	300	1.44	0.13	6.38	1.3	30	30	41
Jg	Fluvisol	C	300	1.4	0.14	6	1.3	31	37	33
Ao	Acrisol	C	300	1.44	0.13	6.34	1.3	30	27	43
E	Rendzina	C	300	1.44	0.13	5.73	1.3	31	26	42
I	Litosol	C	300	1.44	0.13	5.18	1.3	32	26	41
Je	Fluvisol	C	300	1.44	0.13	4.64	1.3	33	25	41
Lo	Luvisol	C	300	1.43	0.13	4.14	1.3	34	25	41
Hh	Feozem	C	300	1.43	0.13	4.14	1.3	34	25	41
La	Luvisol	C	300	1.43	0.13	4.69	1.3	33	27	40
HYCGRP	Grupo hidrológico				CBN	Organic carbon content				
Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa				CLAY	Contenido de arcilla				
BD	Densidad aparente húmeda				SILT	Contenido de limo				
AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo				SAND	Contenido de arena				
K	Conductividad hidráulica saturada									

Tabla 6-5. Principales propiedades físicas del suelo a una profundidad 300 – 2000 mm, en la cuenca del río La Sierra

SNAM	Orden	Z	BD	AWC	K	CBN	CLAY	SILT	SAND	
Gv	Gleysol	2000	1.39	0.14	3.05	0.6	38	29	33	
Ge	Gleysol	2000	1.4	0.13	3.69	0.6	36	30	34	
Ap	Acrisol	2000	1.4	0.14	4.51	0.6	35	30	35	
Lc	Luvisol	2000	1.41	0.13	2.52	0.6	39	25	36	
Ah	Acrisol	2000	1.39	0.13	2.11	0.6	41	25	34	
Gm	Gleysol	2000	1.41	0.13	4.03	0.6	36	29	35	
Jg	Fluvisol	2000	1.37	0.14	3.74	0.6	37	35	28	
Ao	Acrisol	2000	1.4	0.13	2.91	0.6	38	26	35	
E	Rendzina	2000	1.41	0.13	2.52	0.6	39	24	36	
I	Litosol	2000	1.41	0.13	2.78	0.6	38	25	37	
Je	Fluvisol	2000	1.4	0.13	2.03	0.6	41	24	35	
Lo	Luvisol	2000	1.4	0.12	1.72	0.6	42	22	36	
Hh	Feozem	2000	1.4	0.13	1.96	0.6	41	23	36	
La	Luvisol	2000	1.4	0.13	2.3	0.6	40	25	35	
HYCGRP	Grupo hidrológico				CBN	Organic carbon content				
Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa				CLAY	Contenido de arcilla				
BD	Densidad aparente húmeda				SILT	Contenido de limo				
AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo				SAND	Contenido de arena				
K	Conductividad hidráulica saturada									

Tabla 6-6. Propiedades físicas del suelo a una profundidad 0 – 300 mm, en la cuenca del río Amacuzac

SNAM	Orden	HYCGRP	Z	BD	AWC (mm)	K (mm/h)	CBN (%)	CLAY (%)	SILT (%)	SAND (%)
Th	Andosol	C	300	1.46	0.12	11.65	1.9	24	29	47
Hh	Feozem	C	300	1.45	0.13	7.03	1.9	29	26	44
Tm	Andosol	C	300	1.46	0.12	11.72	1.9	24	28	48
Vp	Vertisol	C	300	1.44	0.13	5.1	1.9	32	25	43
To	Andosol	C	300	1.46	0.12	11.79	1.9	24	27	49
Be	Cambisol	C	300	1.44	0.13	7.04	1.9	29	28	43
Re	Regosol	C	300	1.44	0.13	5.7	1.9	31	27	43
I	Litosol	C	300	1.44	0.13	5.7	1.9	31	26	43
Bc	Cambisol	C	300	1.44	0.13	7.04	1.9	29	28	43
Lc	Luvisol	D	300	1.44	0.13	5.73	1.9	31	26	42
Ah	Acrisol	D	300	1.44	0.13	4.64	1.9	33	26	41
HI	Feozem	D	300	1.45	0.12	5.06	1.9	32	24	44
IC	Poblado	C	300	0	0	0	1.9	0	0	0
Lf	Luvisol	C	300	1.43	0.13	5.22	1.9	32	28	40
HYCGRP	Grupo hidrológico				CBN	Organic carbon content				
Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa				CLAY	Contenido de arcilla				
BD	Densidad aparente húmeda				SILT	Contenido de limo				
AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo				SAND	Contenido de arena				
K	Conductividad hidráulica saturada									

Tabla 6-7. Principales propiedades físicas del suelo a una profundidad 300 – 2000 mm, en la cuenca del río Amacuzac

SNAM	Orden	Z	BD	AWC	K	CBN	CLAY	SILT	SAND	
Th	Andosol	2000	1.45	0.12	8.64	1	27	27	46	
Hh	Feozem	2000	1.44	0.13	5.14	1	32	26	42	
Tm	Andosol	2000	1.46	0.12	9.58	1	26	27	47	
Vp	Vertisol	2000	1.43	0.13	4.14	1	34	25	41	
To	Andosol	2000	1.46	0.12	8.68	1	27	26	48	
Be	Cambisol	2000	1.43	0.13	4.25	1	34	27	39	
Re	Regosol	2000	1.43	0.13	3.8	1	35	26	39	
I	Litosol	2000	1.43	0.13	4.19	1	34	26	40	
Bc	Cambisol	2000	1.43	0.13	3.8	1	35	26	39	
Lc	Luvisol	2000	1.42	0.13	3	1	37	24	39	
Ah	Acrisol	2000	1.41	0.13	2.23	1	40	24	36	
HI	Feozem	2000	1.44	0.12	3.63	1	35	23	42	
IC	Poblado	2000	0	0	0	1	0	0	0	
Lf	Luvisol	2000	1.41	0.13	2.46	1	39	25	37	
HYCGRP	Grupo hidrológico				CBN	Organic carbon content				
Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa				CLAY	Contenido de arcilla				
BD	Densidad aparente húmeda				SILT	Contenido de limo				
AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo				SAND	Contenido de arena				
K	Conductividad hidráulica saturada									

Anexo 7. Parámetros estadísticos del generador meteorológico (WGN)

Parámetro	Descripción
Wlatitude	Latitud de la estación utilizada para crear los parámetros estadísticos
Wlongitude	longitud de la estación utilizada para crear los parámetros estadísticos
WELEV	elevación de la estación utilizada para crear los parámetros estadísticos
RAIN_YRS	El número de años de datos de precipitación máxima mensual de 0.5 h usados para definir valores para RAIN_HHMX (1) - RAIN_HHMX (12). Si no se ingresa ningún valor para RAIN_YRS, SWAT establecerá RAIN_YRS = 10.
tmp_max_ave	Temperatura máxima promedio
tmp_min_ave	Temperatura mínima promedio
tmp_max_sd	Desviación estándar de la temperatura máxima
tmp_min_sd	Desviación estándar de la temperatura mínima
pcp_ave	Precipitación mensual promedio
pcp_sd	Desviación estándar de la precipitación diaria en el mes
pcp_skew	Coefficiente de sesgo para la precipitación diaria en el mes
wet_dry	Probabilidad de un día húmedo después de un día seco en el mes
wet_wet	Probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo en el mes
pcp_days	Número medio de días de precipitación en el mes
pcp_hhr	Precipitación máxima de 0,5 horas en todo el período de registro del mes (mm H ₂ O). Este valor representa la intensidad de lluvia de 30 minutos más extrema registrada en todo el período de registro.
slr_ave	Radiación solar media diaria por mes (MJ/m ² /día)
dew_ave	Temperatura promedio diaria del punto de rocío para cada mes (°C) o la humedad relativa (fracción)
wnd_ave	Velocidad media diaria del viento en el mes (m/s)

Anexo 8. Rutina en RStudio - estructura de datos Daymet en .txt para el modelo SWAT

```

1  ###ESTRUCTURA DE DATOS DAYMET EN ARCHIVOS .txt PARA EL MODELO SWAT###
2
3  #Paquetes necesarios
4
5  #instalar paquetes
6  install.packages('tidyverse')
7
8  #cargar paquetes
9  library(tidyverse)
10
11 #Lee base de datos Daymet
12 datos.f2 <- readRDS('C:\\R work\\daymet\\r2Pixel\\rds_datosdiarios\\prcS.rds')
13
14 #vector de las claves de estaciones
15 #reemplazar
16 station<- c('7324', '27094', '27044', '27068', '7389')
17
18 #crea date frame de fechas considerando el min y max de la base de datos
19 date <- data.frame(date = seq(as.Date(ISOdate(1980, 01, 01)),
20                               as.Date(ISOdate(2010, 12, 31)),
21                               by = "day"))
22
23 #ordenar datos para unir con el dataframe 'date'
24 d1 <-datos.f2 %>%
25   select(-num, -x)%>%
26   spread(site, y)
27
28 #une los dataframe 'date' con 'd1' considerando la columna date
29 d2 <- left_join(date, d1, by = 'date')
30
31 #Girar datos
32 d3<- d2 %>%
33   pivot_longer(cols = 3:ncol(.),
34               names_to = "site",
35               values_to = "prc")
36
37 #llenar los datos del 31 de diciembre de Daymet con los datos observados
38
39 #cargar la base de datos observados
40 #reemplazar
41 prcd<- readRDS("C:\\R work\\daymet\\r2Pixel\\rds_datosdiarios\\prcdS.rds")
42
43 #llenar campos con NA para tener un serie de la misma longitud con los datos
44 bd1<- prcd %>%
45   filter(year>= 1980 & year <= 2010) %>%
46   select(-date) %>%
47   spread(dia, Prc) %>%
48   pivot_longer(cols = 4:34, values_to = 'prc', names_to = 'dia')
49
50 bd2 <- bd1 %>%
51   spread(Station.ID, prc) %>%
52   mutate(date = as.Date(ISOdate(year, mes, dia)))
53
54 #une los dataframe 'date' con 'bd2' considerando la columna date
55 bd3 <- left_join(date, bd2, by = 'date')
56
57 #girar datos
58 bd4<- bd3 %>%
59   pivot_longer(cols = 5:ncol(.),
60               names_to = "Station.ID",
61               values_to = "prc_ob")
62
63 #unir datos
64 a<- left_join(d3,bd4, by = c('date'= 'date', "site" = "Station.ID")) %>%
65   arrange(site, date) %>%

```

Anexo 8.. Continuación

```

66   filter(site %in% station) %>%
67   select(-year.x,-year.y, -mes, -dia)
68
69   #reemplazar datos de 31 de diciembre de daymet con datos observados
70   a <- a %>% mutate(prc = ifelse(is.na(prc), prc_ob, prc))
71
72   a<- a %>% mutate(prc = ifelse(is.na(prc), -99, prc))
73
74   #asignación de variables necesarias en el bucle for
75   date <- 19800101
76   site <- unique(a$site)
77
78   #inicia el bucle para exportar cada estación en archivos .txt
79   for(i in site){
80     dat <- subset(a, a$site == i)
81     dat2 <- dplyr::select(dat, prc)
82     dat3 <- rbind(date, dat2)
83
84     #reemplazar dirección para guardar los archivos .txt
85     write_csv(x = dat3, path = paste0('../results/swat_txt/', i, 'pcp.txt'),
86             col_names = F)
87   }
88
89   #ESTRUCTURA DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES (station information)
90   #debe tener la siguiente información: ID, NAME, LAT, LONG an ELEVATION
91   #leer la base de datos utilizada para descargar los datos de daymet (script daymtr)
92
93   s.i <- read.csv("../data/swat/stations_sie.csv", header = TRUE)
94
95   s.ii<- s.i %>%
96     filter(NAME %in% station)%>%
97     mutate(NAME = paste0(NAME, 'pcp'), ID = 1:nrow())
98
99   s.ii <- s.ii %>%
100     select(ID, NAME, LAT, LONG, ELEVATION)
101
102   write_csv(x = s.ii, path = '../results/swat_txt/pcp.txt')

```

Anexo 9. Lluvias asociadas a ciclones tropicales

Tabla 6-8. Lluvias asociadas a ciclones tropicales durante el periodo 1950-2020

Año	Océano Pacífico	Mes	Océano Atlántico	Mes
1950	Huracán 1	Junio	Tormenta tropical How	Octubre
			Huracán Item	Octubre
1951	Tormenta tropical 1	Mayo	Huracán Charlie primer impacto	Agosto
	Tormenta tropical 7	Septiembre	Huracán Charlie segundo impacto	Agosto
1952	Tormenta tropical 2	Junio		
1953	Huracán 4	Octubre		
1954	Huracán 3	Julio	Huracán Florence	Septiembre
	Tormenta tropical 10	Octubre		
			Huracán Gladys	
			Huracán Hilda primer impacto	
1955	Huracán 6	Octubre	Huracán Hilda segundo impacto	Septiembre
			Huracán Janet primer impacto	
			Huracán Janet segundo impacto	
			Huracán Anna	Julio
1956			Tormenta tropical Dora	Septiembre
			Huracán Flossy	Septiembre
	Huracán 5			
1957	Huracán 8			
	Huracán 11			
1958	Huracán 1	Junio	Tormenta tropical Alma	Junio
			Huracán Ella	Septiembre
	Tormenta tropical 1	Junio		
1959	Huracán 9	Septiembre	Tormenta tropical Beulah	Junio
	Huracán 12	Octubre		
	Huracán Diana	Agosto		
1960	Huracán Estelle	Agosto	Huracán Abby	Julio
	Huracán Iva	Junio		
1961	Tormenta Tropical Simone	Noviembre		
	Huracán Tara	Noviembre		
	Huracán Valerie	Junio		
1962	Tormenta tropical Claudia	Septiembre		
	Huracán Doreen	Octubre		
	Huracán Emily	Junio		
1963	Tromenta tropical Jen-Kath	Septiembre		
	Tormenta tropical Lilian	Septiembre		
1964	Tormenta tropical Natalie	Julio	Tormenta tropical 12	Noviembre
	Tormenta tropical Wallie	Junio		
1965	Huracán Emily	Septiembre	Tormenta tropical 1	Junio
	Tormenta tropical Hazel	Septiembre	Tormenta tropical Debbie	Septiembre
	Huracán Adele	Junio		
	Huracán Helga	Septiembre	Tormenta tropical Hallie	Septiembre
1966	Tormenta tropical Kristen	Septiembre	Huracán Inez primer impacto	Octubre
	Tormenta tropical Lorraine	Octubre	Huracán Inez segundo impacto	Octubre
	Tormenta tropical Maggie	Octubre		
			Huracán Beulah primer impacto	Septiembre
1967	Huracán Katrina	Septiembre	Huracán Beulah segundo impacto	Septiembre
	Huracán Olivia	Octubre	Huracán Fern	Octubre
	Tormenta tropical Annette	Junio		
	Tormenta tropical Hyacinth	Agosto		
1968	Huracán Naomi	Septiembre	Tormenta tropical Candy	Junio
	Huracán Pauline	Octubre		
	Huracán Rebecca	Octubre		
	Tormenta tropical Simone	Octubre		
	Tormenta tropical Ava	Julio	Depresión tropical DT4	Junio
1969	Huracán Glenda	Septiembre	Huracán Laurie primer impacto	Octubre
	Huracán Jennifer	Octubre	Huracán Laurie segundo impacto	Octubre
	Tormenta tropical Eileen	Junio		
	Tormenta tropical Helga	Julio	Huracán Ella primer impacto	Septiembre
1970	Tormenta tropical Kristen	Septiembre	Huracán Ella Segundo impacto	Septiembre
	Tormenta tropical Norma	Octubre	Tormenta tropical Greta primer impacto	Octubre
	Tormenta tropical Orlene	Septiembre	Tormenta tropical Greta segundo impacto	Octubre
	Huracán Agatha	Mayo	Huracán Fern	Septiembre
1971	Huracán Bridget	Junio	Huracán Edith primer impacto	Septiembre
	Tormenta tropical Katrina	Agosto	Huracán Edith segundo impacto	Octubre

Año	Océano Pacífico	Mes	Océano Atlántico	Mes
1972	Huracán Lily	Septiembre	Depresión tropical DT20	Octubre
	Huracán Nanette	Septiembre		
	Huracán Priscila	Octubre		
	Huracán Annette	Junio	Huracán Agnes	Junio
1973	Huracán Joanne	Octubre		
	Tormenta tropical Bernice	Junio		
	Tormenta tropical Claudia	Junio		
	Huracán Florence	Julio	Huracán Brenda	Agosto
	Tormenta tropical Heather	Agosto-septiembre	Tormenta tropical Delia	Septiembre
1974	Huracán Irah	Septiembre	Depresión tropical DT11	Septiembre
	Tormenta tropical Yennifer	Septiembre		
	Tormenta tropical Aletta	Mayo	Depresión tropical DT1	Junio
	Huracán Dolores	Junio	Huracán Carmen	Septiembre
1975	Huracán Norma	Septiembre	Huracán Fifi	Septiembre
	Huracán Orlene	Septiembre	Depresión tropical DT16	Septiembre
	Tormenta tropical Eleanor	Julio	Depresión tropical DT5	Julio
	Huracán Olivia	Octubre	Huracán Caroline	Septiembre
1976			Depresión tropical DT11	Septiembre
	Huracán Kathleen	Septiembre	Depresión tropical DT21	Noviembre
	Huracán Liza	Septiembre		
	Huracán Madeline	Septiembre		
1977	Tormenta tropical Naomi	Octubre		
	Huracán Doreen	Agosto	Huracán Anita	Septiembre
1978			Depresión tropical DT9	Septiembre
	Huracán Aletta	Junio	Tormenta tropical Bess	Agosto
	Huracán Olivia	Septiembre	Depresión tropical DT14	Septiembre
	Tormenta tropical Paul	Septiembre	Huracán Greta	Septiembre
1979	Huracán Rosa	Octubre	Depresión tropical DT8	Septiembre
			Depresión tropical DT10	Agosto
	Huracán Andres	Junio	Huracán Henri	Septiembre
1980			Depresión tropical DT17	Octubre
			Huracán Allen	Agosto
			Tormenta tropical Hermine	Septiembre
	Tormenta tropical Adrian	Junio		
1981	Tormenta tropical Irwin	Agosto	Depresión tropical DT4	Junio
	Tormenta tropical Knut	Septiembre	Depresión tropical DT5	Junio
	Tormenta tropical Lidia	Octubre	Depresión tropical DT8	Julio
	Huracán Norma	Octubre	Depresión tropical DT12	Agosto
1982	Huracán Otis	Octubre		
	Huracán Paul	Septiembre		
1983	Huracán Adolph	Mayo		
	Huracán Tico	Octubre	Huracán Barry	Agosto
1984	Huracán Genevieve	Julio		
	Huracán Odile	Septiembre	Depresión tropical DT2	Junio
	Huracán Norbert	Septiembre	Depresión tropical DT9	Septiembre
1985	Huracán Polo	Octubre		
	Huracán Waldo	Octubre		
1986	Huracán Newton	Septiembre	Depresión Tropical DT7_Primer impacto	Septiembre
	Huracán Paine	Octubre	Depresión Tropical DT7_Segundo impacto	Septiembre
	Huracán Roslyn	Octubre		
1987	Huracán Eugene	Julio		
	Huracán Norma	Septiembre		
1988			Huracán Debby	Septiembre
			Huracán Gilbert_Primer impacto	Septiembre
			Huracán Gilbert_Segundo impacto	Septiembre
1989	Huracán Cosme	Junio		
	Huracán Kiko	Agosto		
1990	Huracán Raymond	Octubre		
	Tormenta tropical Douglas	Junio	Huracán Diana	Agosto
1991	Huracán Rachel	Octubre		
	Depresión tropical DT5E	Junio	Depresión tropical DT2	Julio
1992	Huracán Nora	Octubre		
	Huracán Lester	Agosto		
	Huracán Virgil	Octubre		
1993	Huracán Winifred	Octubre		
	Tormenta tropical Beatriz	Junio	Huracán Gert	Septiembre
	Depresión tropical DT3E	Julio		

Año	Océano Pacífico	Mes	Océano Atlántico	Mes
	Huracán Calvin	Julio		
	Huracán Hilary	Agosto		
	Tormenta tropical Irwin	Agosto		
	Huracán Lidia	Septiembre		
1994	Depresión tropical DT14E	Septiembre		
	Huracán Rosa	Octubre	Depresión tropical DT5	Agosto
			Depresión tropical DT6	Agosto
1995	Huracán Henriette	Septiembre	Tormenta tropical Gabrielle	Agosto
	Huracán Ismael	Septiembre	Huracán Opal	Septiembre
			Huracán Roxanne	Octubre
	Huracán Alma	Junio		
	Tormenta tropical Cristina	Julio		
1996	Huracán Boris	Julio	Huracán Dolly	Agosto
	Huracán Fausto	Septiembre		
	Huracán Hernan	Octubre		
	Tormenta tropical Andres	Junio		
	Huracán Nora	Septiembre		
1997	Tormenta tropical Olaf	Septiembre		
	Huracán Pauline	Octubre		
	Huracán Rick	Noviembre		
	Tormenta tropical Frank	Agosto		
1998	Huracán Isis	Septiembre	Huracán Mitch	Noviembre
	Huracán Madeline	Octubre		
1999	Huracán Greg	Septiembre	Depresión tropical DT7	Noviembre
			Tormenta tropical Katrina	Noviembre
	Tormenta tropical Ileana	Agosto	Tormenta Tropical Beryl	Agosto
2000	Tormenta tropical Miriam	Septiembre	Huracán Gordon	Septiembre
	Tormenta tropical Norman	Septiembre	Huracán Keith_Primer impacto	Octubre
	Tormenta tropical Rosav	Noviembre	Huracán Keith_Segundo impacto	Octubre
2001	Huracán Juliette	Septiembre	Tormenta tropical Chantal	Agosto
	Tormenta tropical Lorena	Octubre	Huracán Iris	Octubre
	Tormenta tropical Iselle	Septiembre		
2002	Tormenta tropical Julio	Septiembre	Tormenta tropical Fay	Septiembre
	Huracán Kenna	Octubre	Huracán Isidore	Septiembre
	Tormenta tropical Carlos	Junio	Huracán Claudette_Primer impacto	Julio
2003	Huracán Ignacio	Agosto	Huracán Claudette_Segundo impacto	Julio
	Huracán Marty	Agosto		Agosto
	Huracán Olaf	Octubre	Huracán Erika	Octubre
	Huracán Nora	Octubre	Tormenta tropical Larry	
2004	Huracán Javier			
	Tormenta tropical Lester			
	Depresión tropical DT16E			
			Tormenta tropical Bret	Junio
			Huracán Emily	Julio
			Huracán Gert	Julio
2005	Tormenta tropical Dora	Julio	Tormenta tropical Jose	Agosto
			Huracán Stan	Octubre
			Huracán Wilma	Octubre
			Huracán Cindy	Julio
	Tormenta tropical Emilia	Julio		
2006	Huracán John	Septiembre		
	Huracán Lane	Septiembre		
	Huracán Paul	Octubre		
2007	Tormenta tropical Barbara	Junio	Huracán Dean	Agosto
	Huracán Henriette	Septiembre	Huracán Lorenzo	Septiembre
	Depresión tropical DT5E	Julio		
	Tormenta tropical Julio	Agosto	Tormenta tropical Arthur	Junio
2008	Tormenta tropical Lowell	Septiembre	Huracán Dolly	Julio
	Huracán Norbert	Octubre	Tormenta tropical Marco	Octubre
	Tormenta tropical Odile	Octubre		
2009	Huracán Jimena	Septiembre		
	Huracán Rick	Octubre		
	Tormenta tropical Agatha	Mayo	Huracán Alex_Primer impacto	Junio
	Depresión tropical DT2E	Junio	Huracán Alex_Segundo impacto	Julio
2010	Huracán Darby	Junio	Depresión tropical DT2	Julio
	Depresión tropical DT11E	Septiembre	Tormenta tropical Hermine	Septiembre
	Tormenta tropical Georgette	Septiembre	Huracán Karl_Primer impacto	Septiembre
			Huracán Karl_Segundo impacto	Septiembre

Año	Océano Pacífico	Mes	Océano Atlántico	Mes
			Tormenta tropical Matthew	Septiembre
			Tormenta tropical Richard	Octubre
				Julio
2011	Huracán Beatriz	Junio	Tormenta tropical Arlene	Agosto
	Huracán Hilary	Septiembre	Tormenta tropical Harvey	Septiembre
	Huracán Jova	Septiembre	Tormenta tropical Nate	Octubre
	Depresión tropical DT12E	Octubre	Huracán Rina	
2012	Huracán Bud	Mayo		
	Huracán Carlotta	Junio	Huracán Ernesto	Agosto
	Tormenta tropical Norman	Septiembre	Tormenta tropical Helene	Agosto
	Huracán Paul	Octubre		
	Huracán Barbara	Mayo		Junio
	Tormenta tropical Juliette	Agosto	Tormenta tropical Barry	Agosto
2013	Huracán Manuel	Septiembre	Tormenta tropical Fernand	Septiembre
	Tormenta tropical Octave	Octubre	Depresión tropical DT8	Septiembre
	Tormenta tropical Sonia	Noviembre	Huracán Ingrid	
	Tormenta tropical Boris	Junio		
2014	Huracán Odile	Septiembre	Tormenta tropical Dolly	Septiembre
	Tormenta tropical Trudy	Octubre	Tormenta tropical Hanna	Octubre
	Huracán Vance	Noviembre		
	Huracán Blanca	Junio		
2015	Huracán Carlos	Junio		
	Huracán Patricia	Octubre		
	Depresión tropical DT1E	Junio	Tormenta tropical Colin	Junio
2016	Tormenta tropical Javier	Agosto	Tormenta tropical Danielle	Junio
	Huracán Newton	Septiembre	Huracán Earl	Agosto
			Tormenta tropical Cindy	
	Tormenta tropical Beatriz	Junio	Huracán Franklin Primer impacto	Junio
	Tormenta tropical Calvin	Junio		Agosto
2017	Tormenta tropical Lidia	Agosto	Huracán Franklin Segundo impacto	Agosto
	Huracán Max	Septiembre		Agosto
	Tormenta tropical Pilar	Septiembre	Huracán Harvey	Septiembre
			Huracán Katia	
	Huracán Bud	Junio		
	Tormenta tropical Carlotta	Junio		
	Tormenta tropical Ileana	Agosto		
	Depresión tropical DT19E	Septiembre		
2018	Huracán Rosa	Octubre	Tormenta subtropical Alberto	Mayo
	Huracán Sergio	Octubre	Huracán Michael	Octubre
	Tormenta tropical Tara	Octubre		
	Tormenta tropical Vicente	Octubre		
	Huracán Willa	Octubre		
	Tormenta tropical Xavier	Noviembre		
	Huracán Lorena Primer impacto	Septiembre		
	Huracán Lorena Segundo impacto	Septiembre		
2019	Huracán Lorena	Septiembre	Tormenta tropical Fernand	Septiembre
	Tormenta tropical Narda	Octubre		
	Ciclón tropical potencial 17E	Octubre		
	Tormenta tropical Priscilla	Octubre		
2020	Tormenta tropical Amanda	Mayo	Tormenta tropical Cristobal	Junio

Fuente: <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/lluvias-asociadas-a-ciclones-tropicales>

Anexo 10. Valores atípicos de la serie temporal de caudal

Valores atípicos de la estación hidrométrica 24290

Mes	Años	Valores atípicos	Acción
1	1972, 1977, 1979, 1987, 2009	4.84, 8.72, 6.33, 6.75, 5.18	No se eliminaron los datos sospechosos al verificar que son consistentes con los datos consecutivos y a eventos climáticos.
2	1977, 1979, 1987	7.36, 4.65, 5.50	
3	1977, 1987	5.32, 4.63	
4	1957, 1977, 1981, 1987, 1992, 2004, 2010	10.45, 3.37, 5.65, 3.62, 3.64, 67.61 , 12.15	
5	1951, 1954, 1957, 1981, 1987, 1992, 2004, 2010	3.76, 7.43, 11.73, 9.83, 4.64, 5.27, 10.25, 5.49	
6	1961, 1979, 1981, 1987, 1992, 2004, 2010	6.06, 5.80, 7.91, 12.20, 4.96, 6.57, 2.45	
7	1955, 1961, 1976, 1979, 1981, 1987, 1992, 2004, 2010	2.79, 3.01, 7.17, 2.41, 5.55, 12.21, 10.69, 4.6, 49.95	
8	1969, 1971, 1972, 1976, 1980, 1987, 1992, 1999, 2004, 2007, 2010, 2010	8.11, 6.76, 6.88, 13.86, 4.73, 9.96, 7.41, 7.81, 4.78, 4.40, 17.51	
9	1953, 1964, 1976, 1986, 2008, 2010	10.3, 23.4, 11.9, 14.3, 12.0, 12.31	
10	1958, 1971, 1976, 1986, 2010	9.45, 13.05, 10.89, 13.18, 10.34	
11	1958, 1971, 1976, 1978, 1986, 2010	12.25, 8.38, 10.62, 12.23, 9.09, 8.12	
12	1958, 1971, 1976, 1978, 1986, 2010	7.18, 6.17, 9.81, 8.17, 7.21, 7.34	

Valores atípicos de la estación hidrométrica 18232

Mes	Años	Valores atípicos	Acción
1	1967	19.71	Se revisaron los valores diarios del mes 2 de 1995. Y se encontró dos valores aislados (281, 1002 mm) que elevan la media mensual en 362.03, se eliminaron los valores y se recalculó la media. El resto de los valores marcados como atípicos se corresponden con los valores diarios consecutivos y a eventos climáticos.
2	1967, 1992, 1995, 2010	12.13, 18, 362.03 , 40.14	
3	1966, 1969, 1975	7.55, 7.39, 8.6	
4	1968, 1969	6.87, 7.01	
5	1956	17.27	
6	1981	84.29	
7	1955, 1958, 1981	105.75, 116.01, 105.95	
8	1969, 1995, 2010	104.77, 105.70, 124.65	
9	1955, 1961	150.88, 161.22	
10	1959, 1971, 1976, 1990	99.37, 85.62, 101.18, 108.26	
11	1958, 2002	78.89, 54.67	
12	1958	18.45	

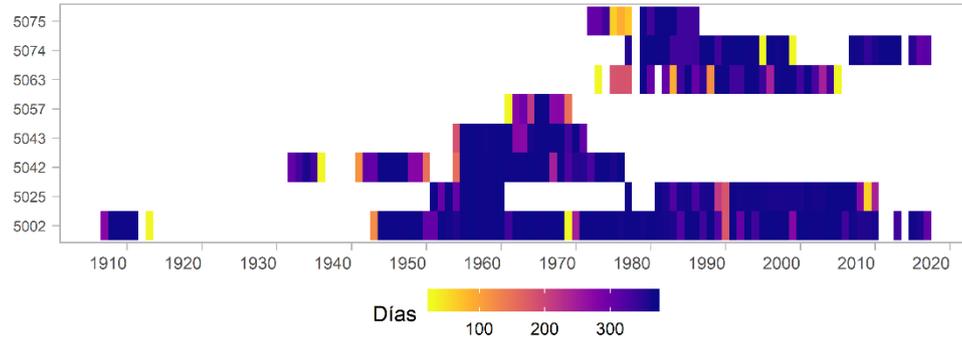
Valores atípicos de la estación hidrométrica 30016

Mes	Años	Valores atípicos	Acción
2	1981, 2002	302.95, 386.21	No se eliminaron los datos sospechosos al verificar que son consistentes con los datos consecutivos y a eventos climáticos.
3	1954, 1981, 2002	202.27, 196.12, 237.32	
4	1959, 1962, 1974, 1994, 2008	272.79, 162.93, 176.52, 139.08, 154.43	
5	1956, 1996, 2001	155.08, 176.06, 145.13	
8	1981, 2010	496.77, 854.4	
9	2010	861.90	
12	1979, 1990	470.87, 524.81	

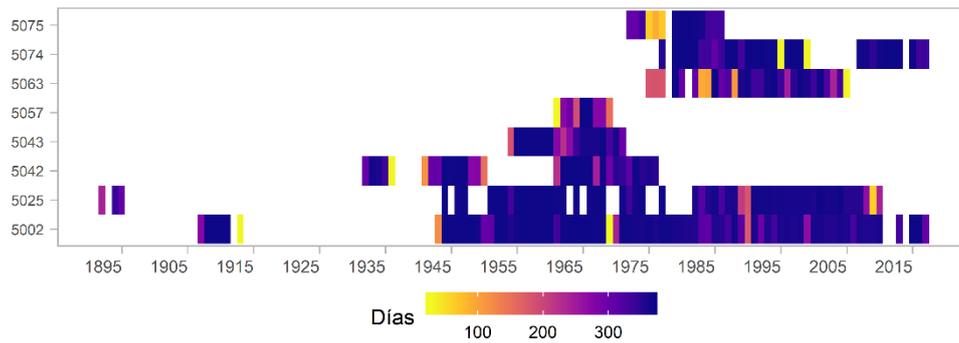
Anexo 11. Disponibilidad de datos de las variables climáticas

Cuenca Rio Escondido

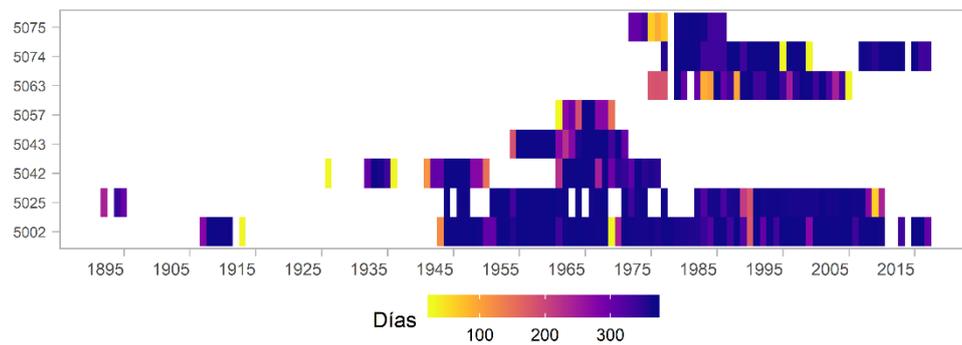
Precipitación



Temperatura máxima

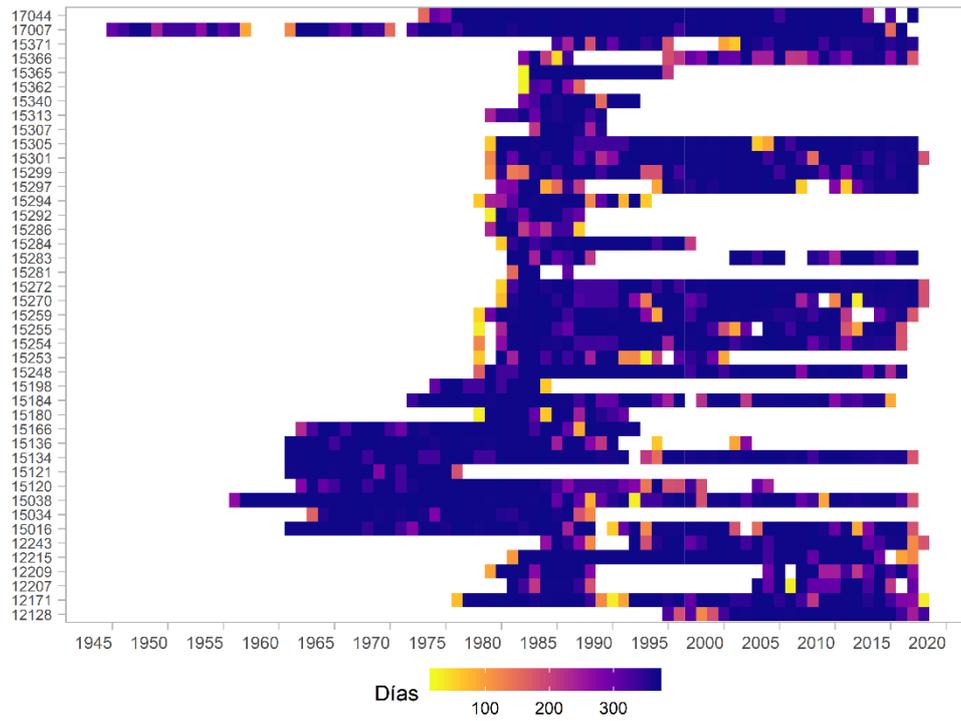


Temperatura mínima

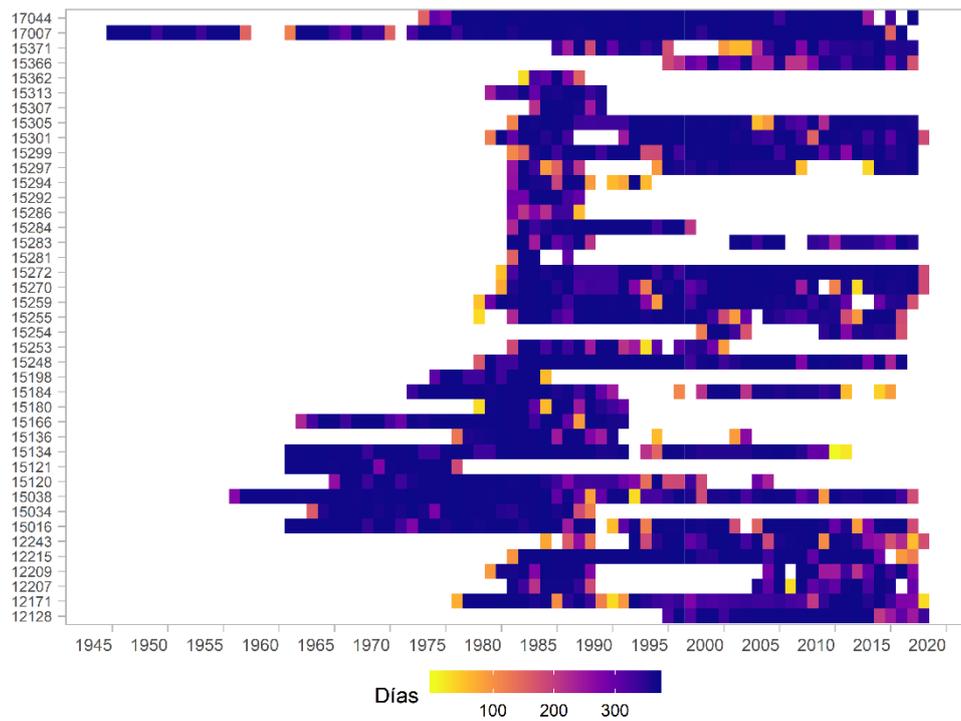


Cuenca Amacuzac

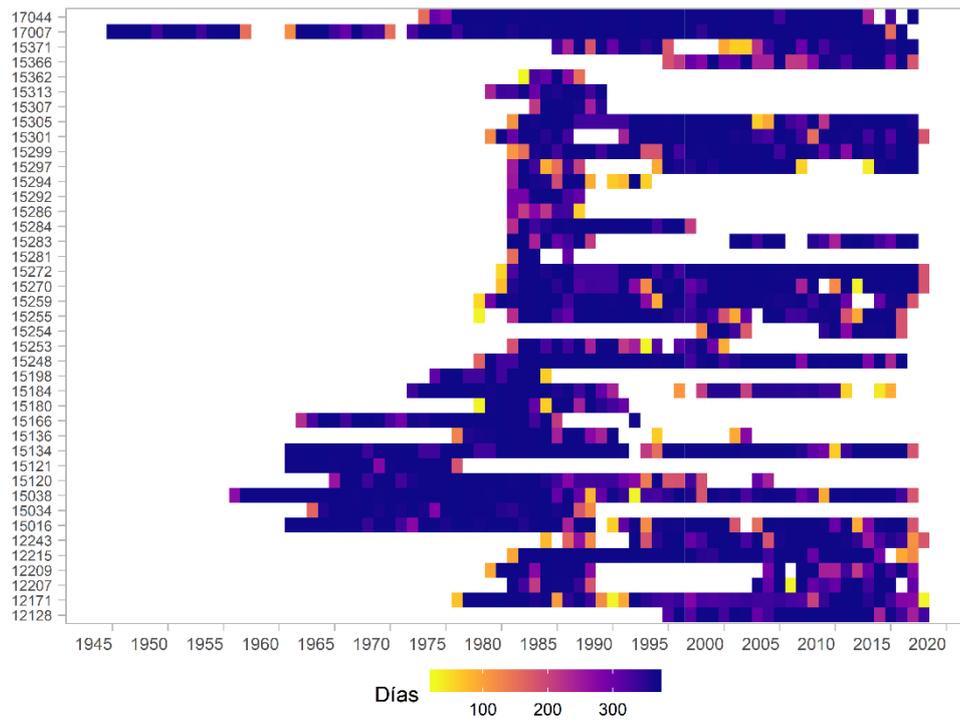
Precipitación



Temperatura máxima

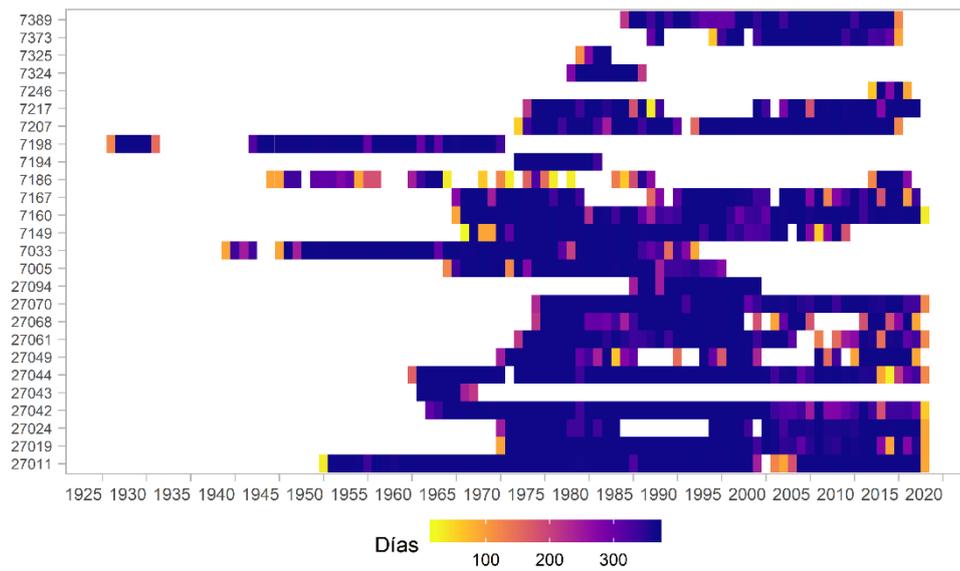


Temperatura mínima

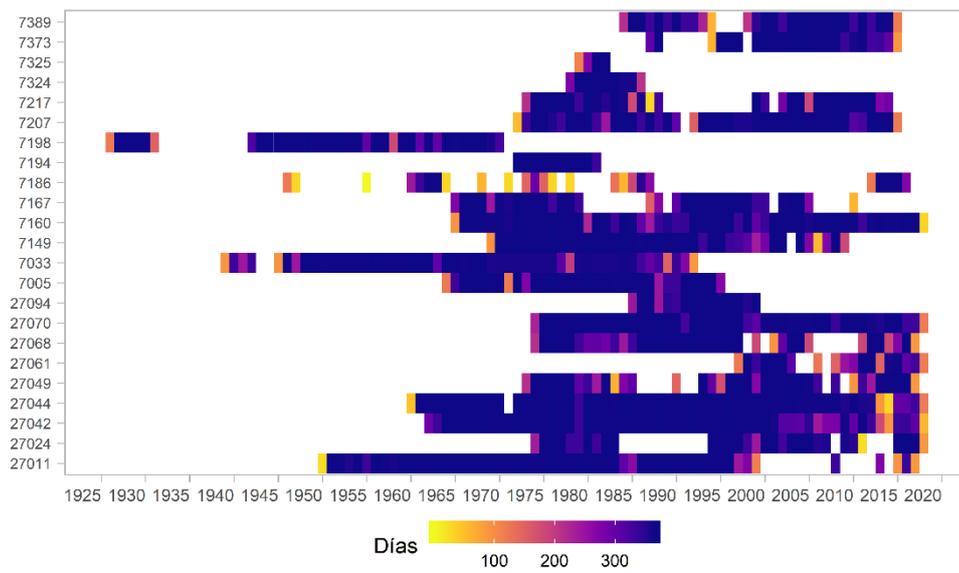


Cuenca del río La Sierra

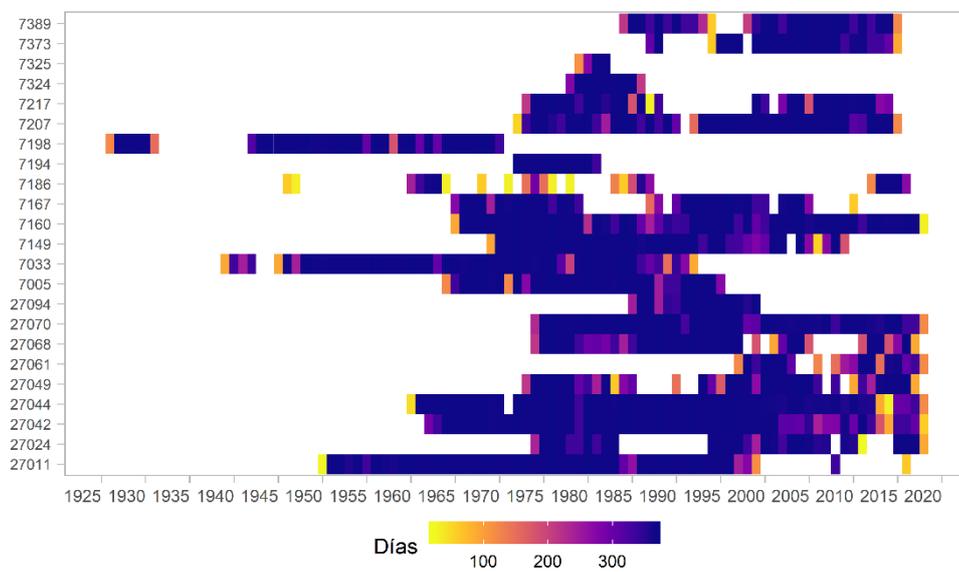
Precipitación



Temperatura máxima



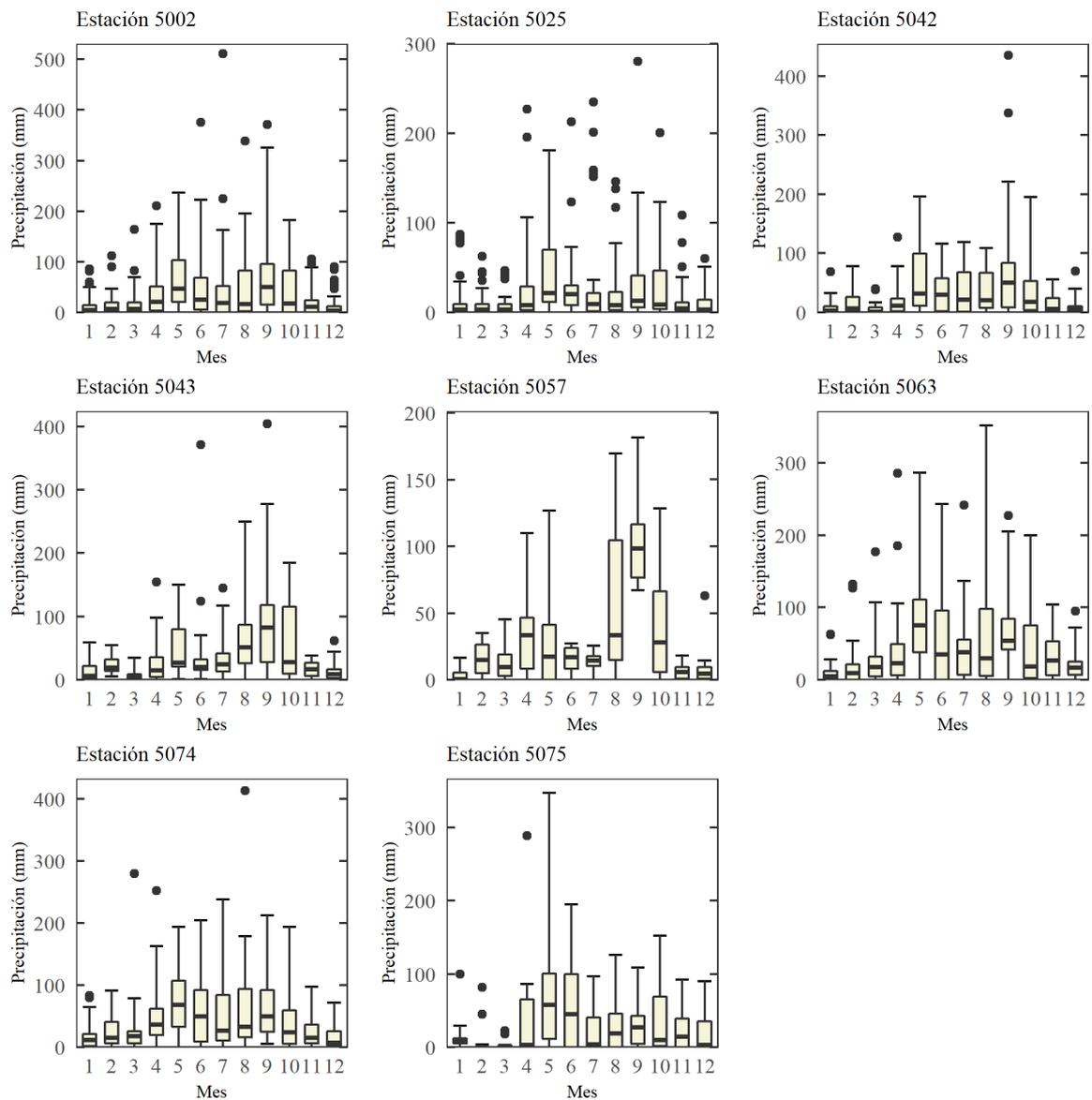
Temperatura mínima



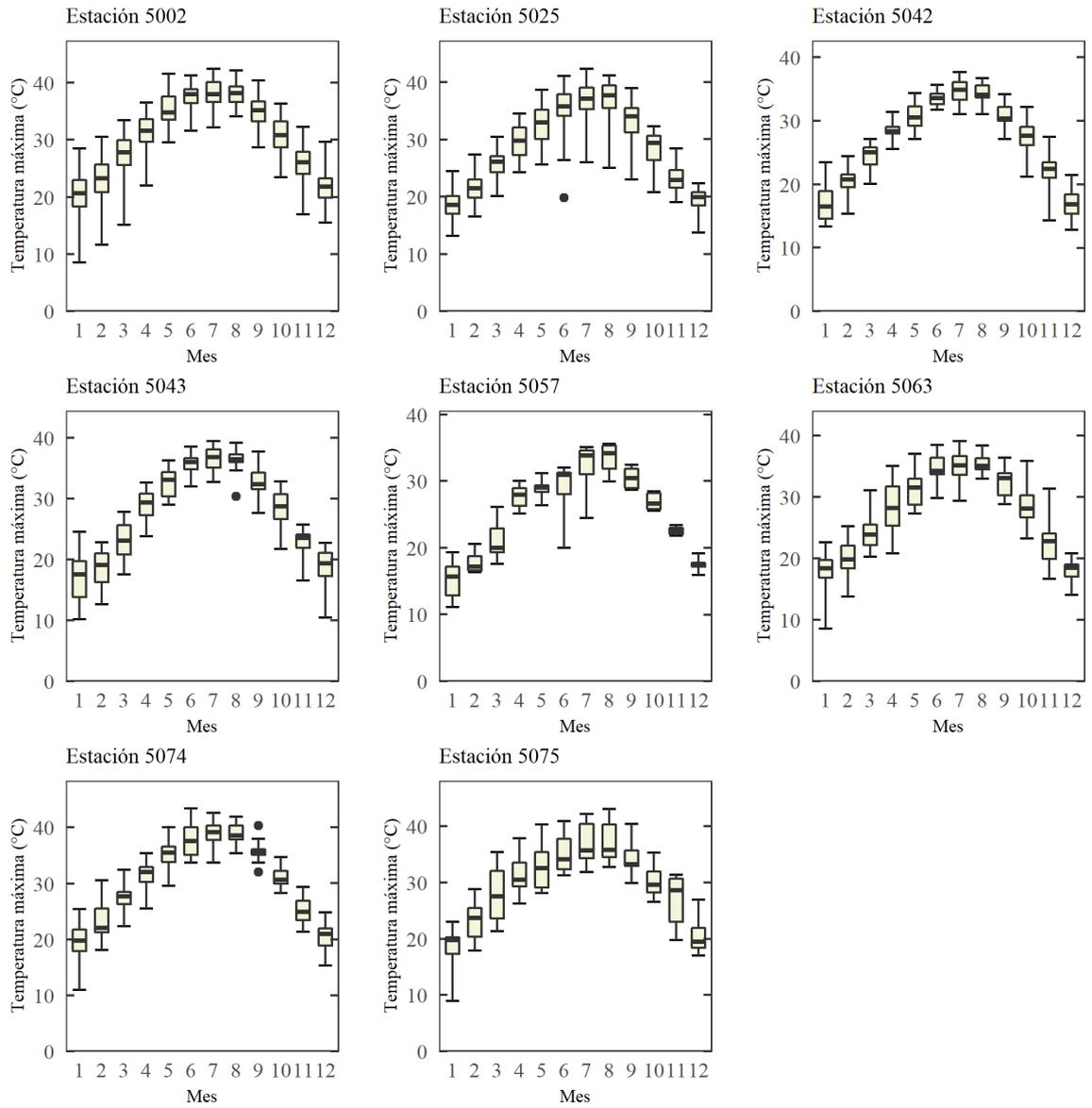
Anexo 12. Magnitud de las variables climáticas, periodo 1950-2010

Cuenca río Escondido

Precipitación

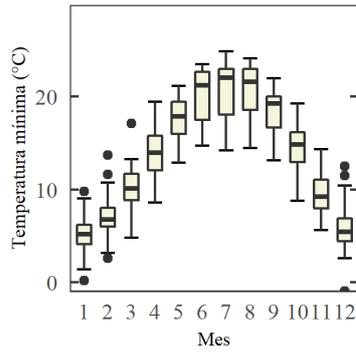


Temperatura máxima

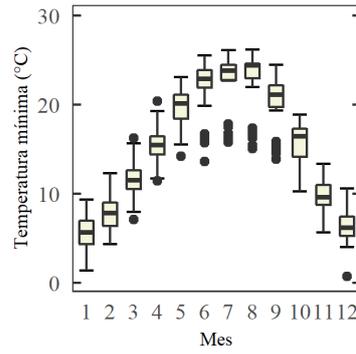


Temperatura mínima

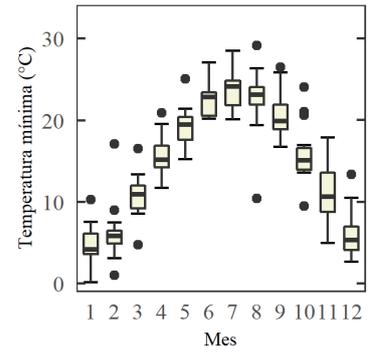
Estación 5002



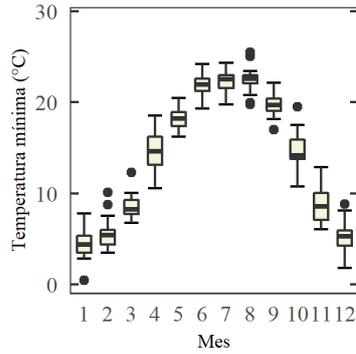
Estación 5025



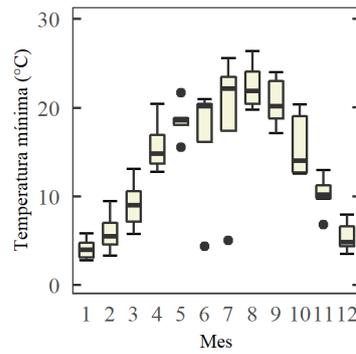
Estación 5042



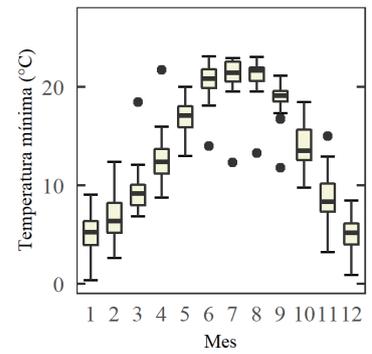
Estación 5043



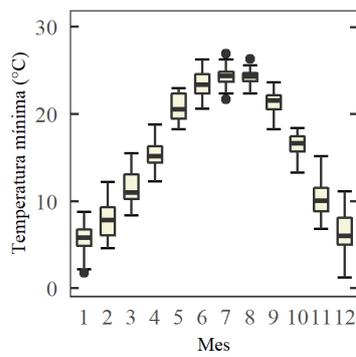
Estación 5057



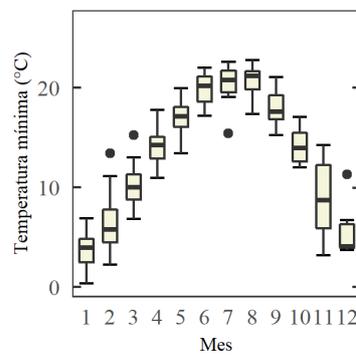
Estación 5063



Estación 5074

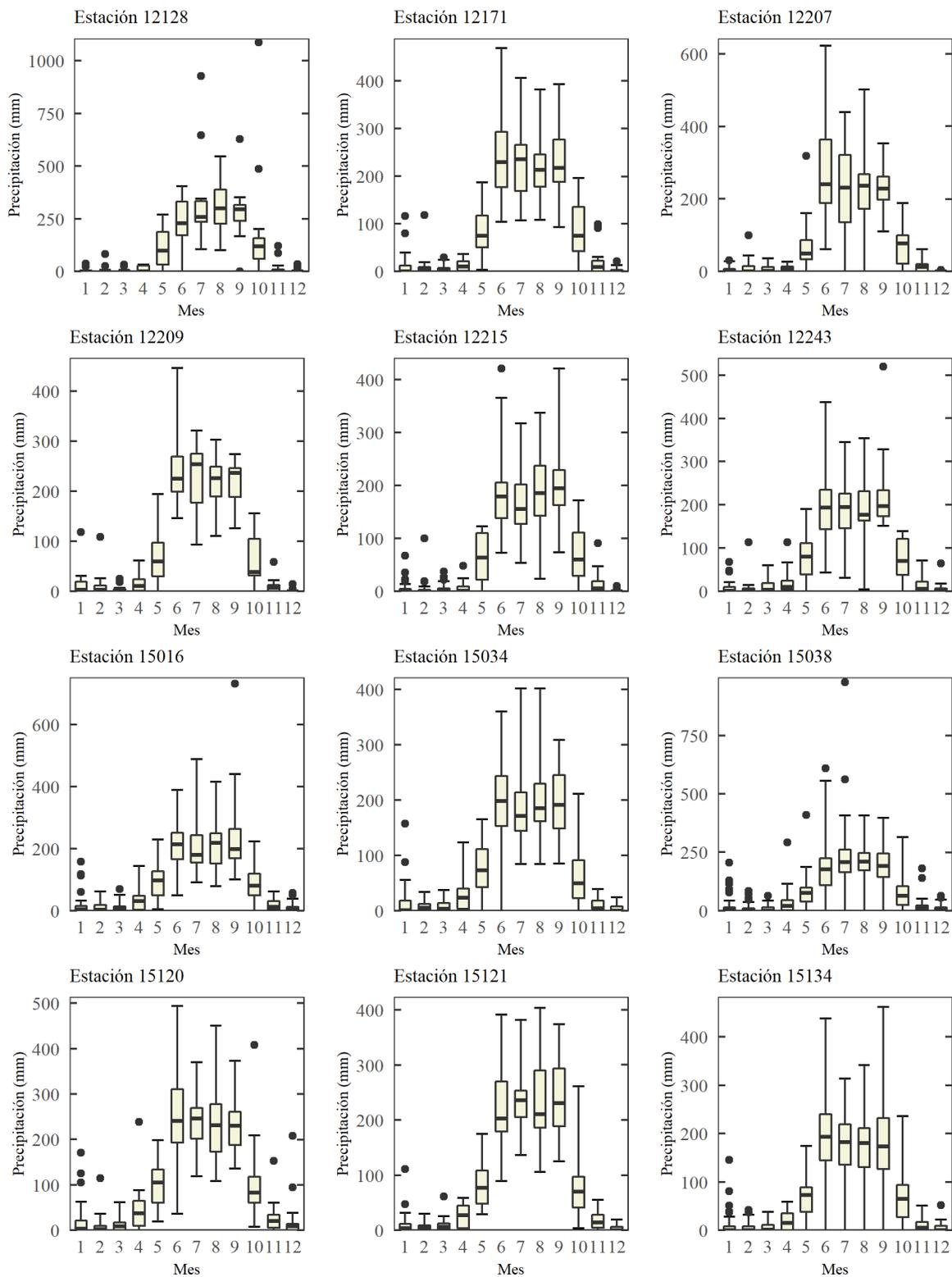


Estación 5075

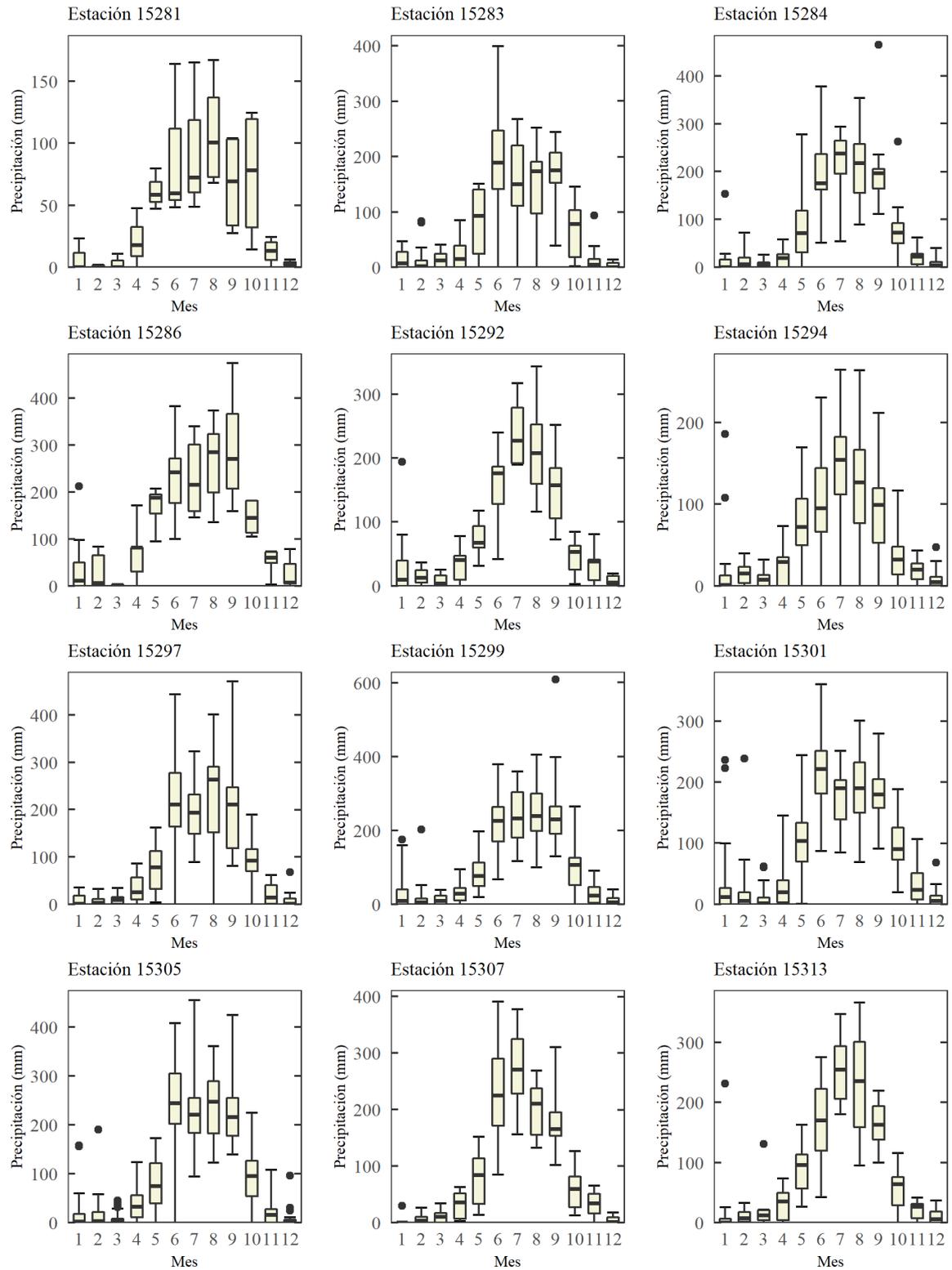


Cuenca del río alto Amacuzac

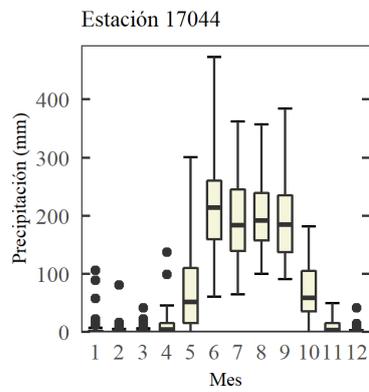
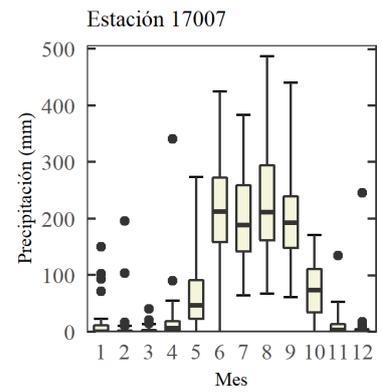
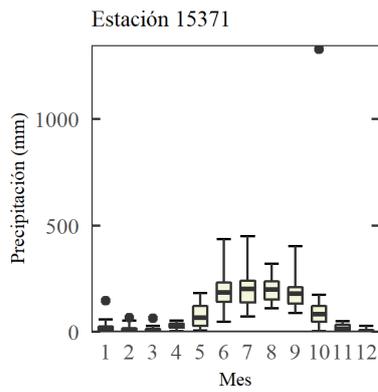
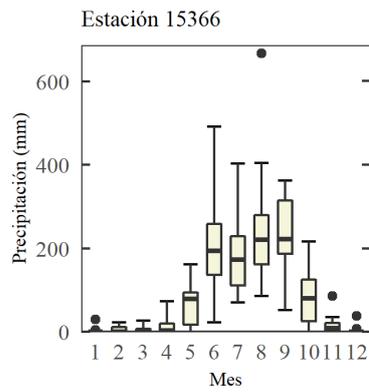
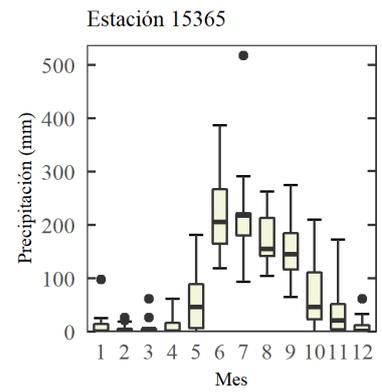
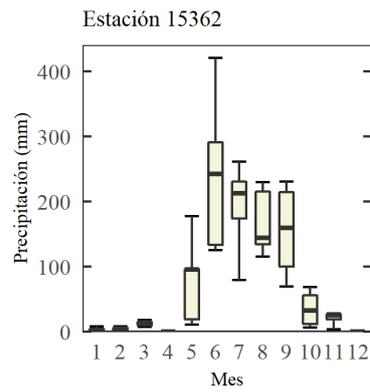
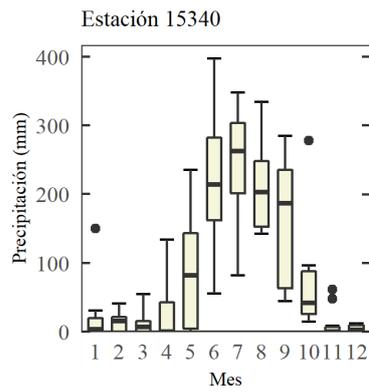
Precipitación



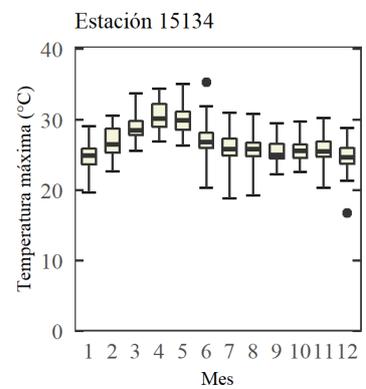
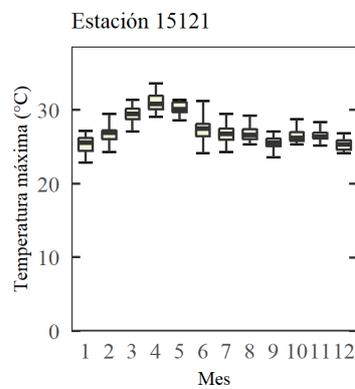
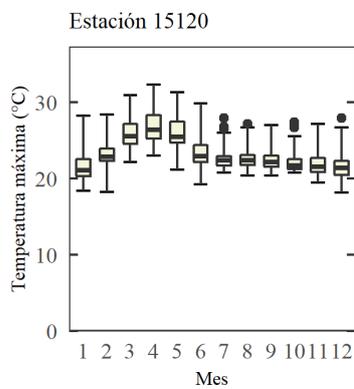
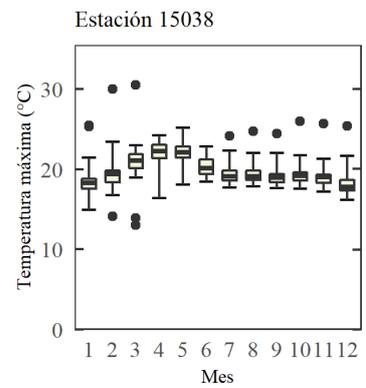
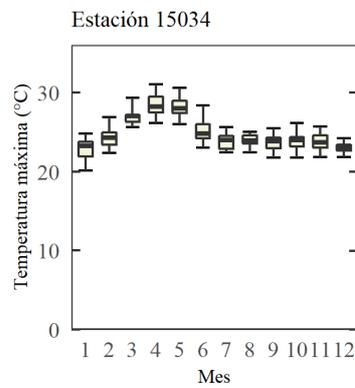
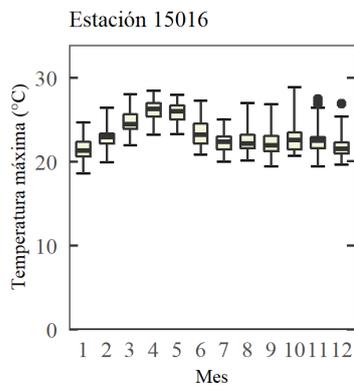
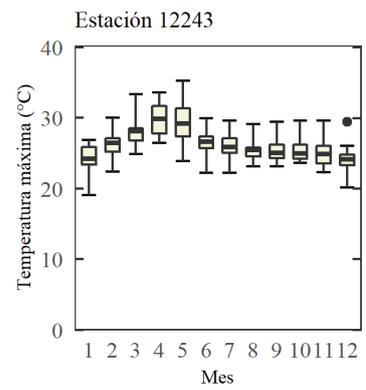
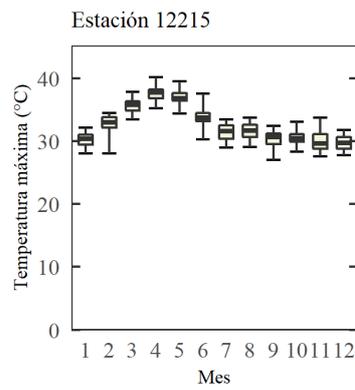
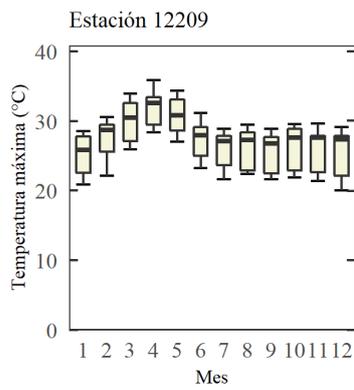
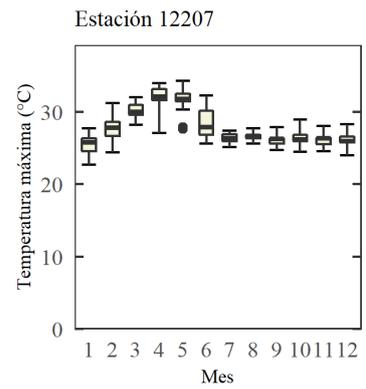
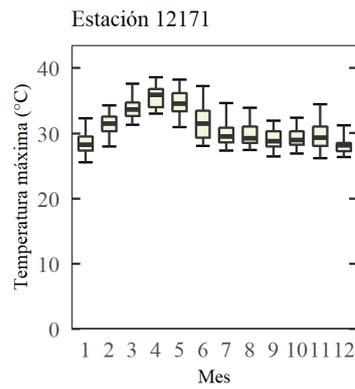
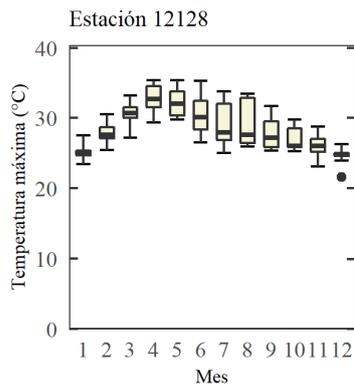
Precipitación



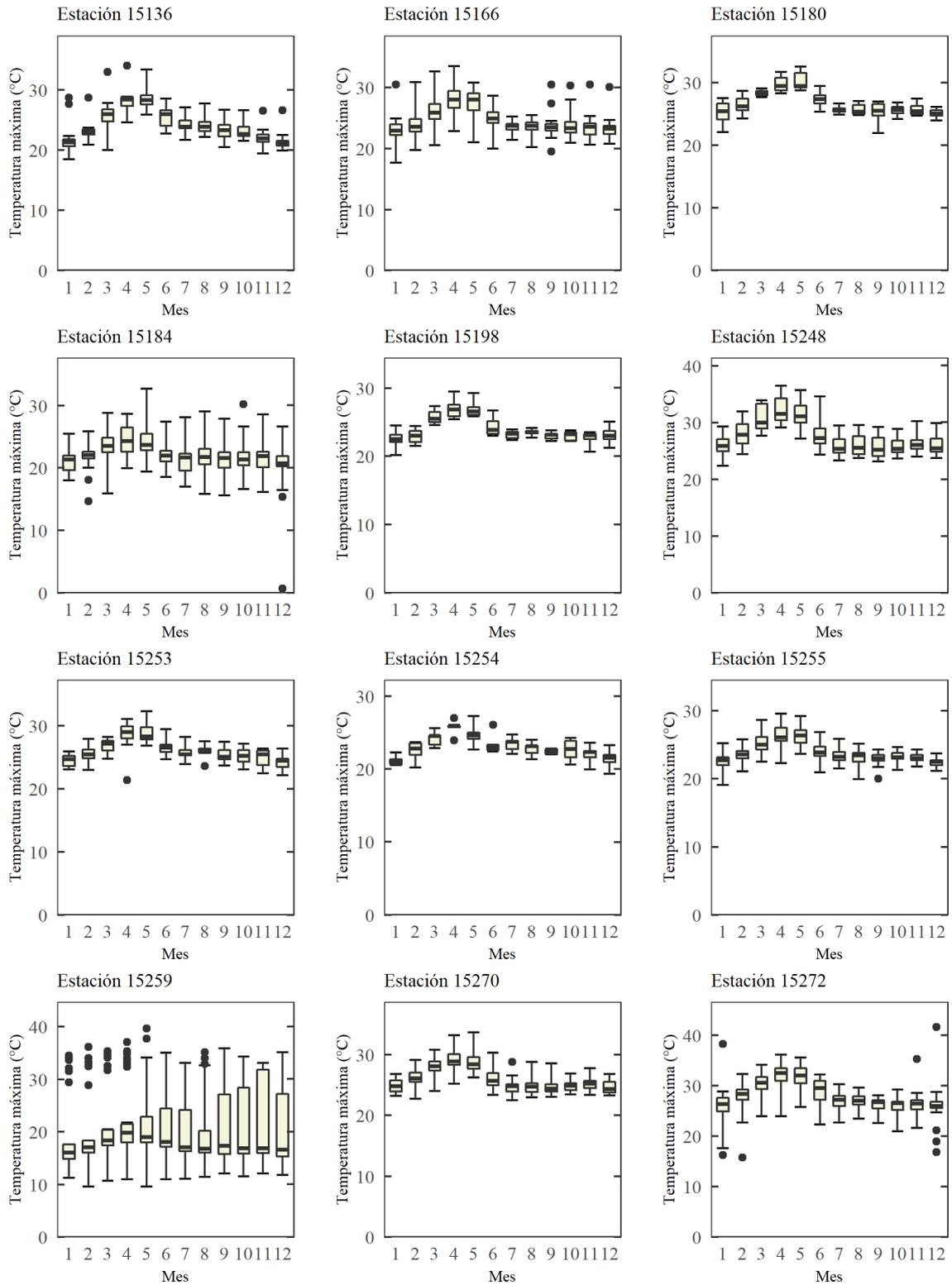
Precipitación



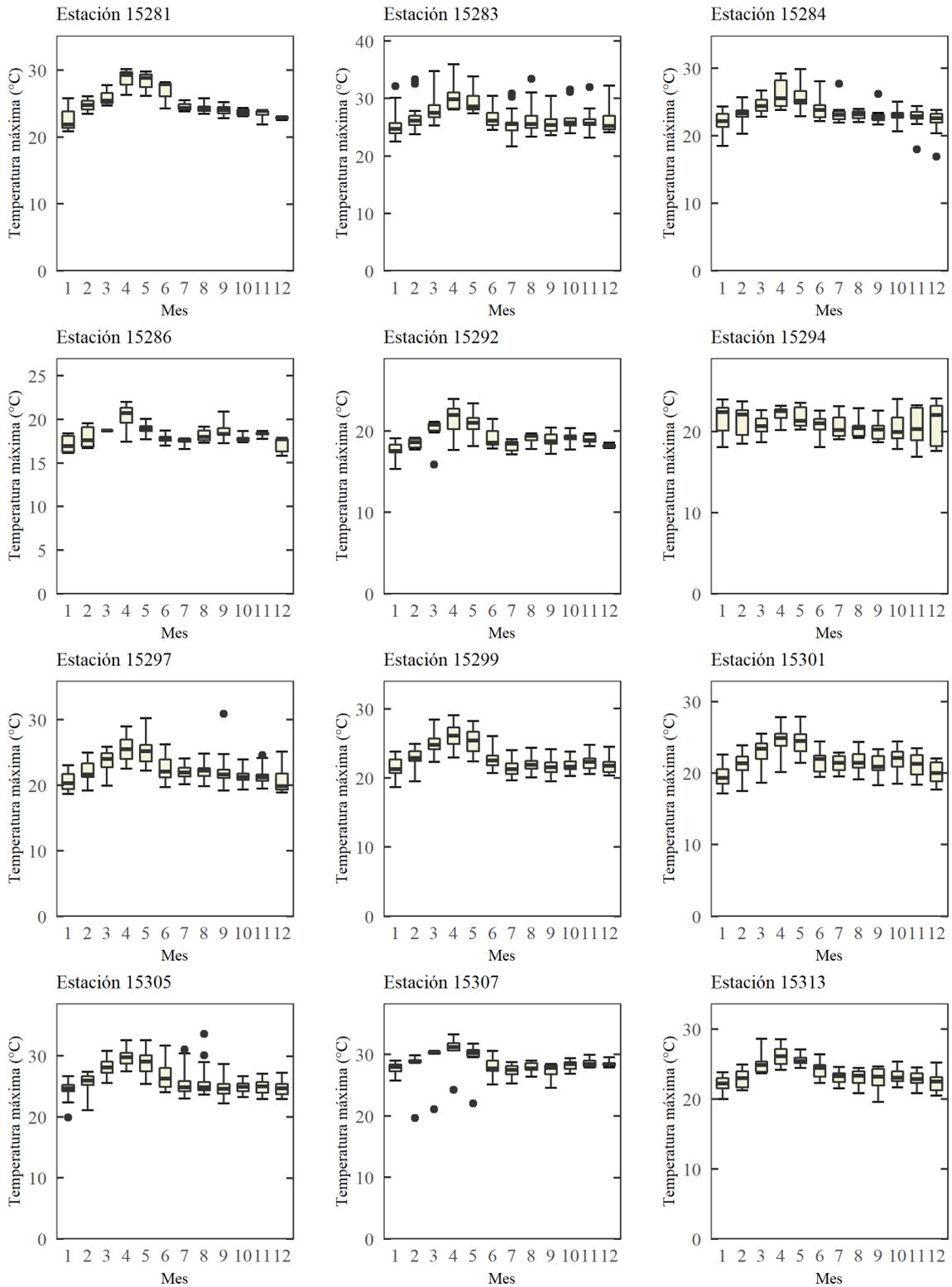
Temperatura máxima



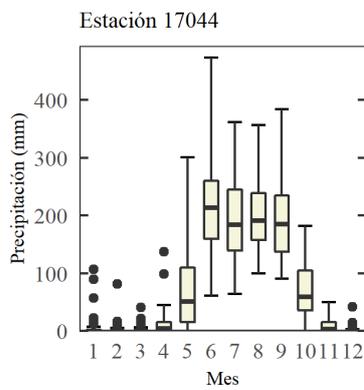
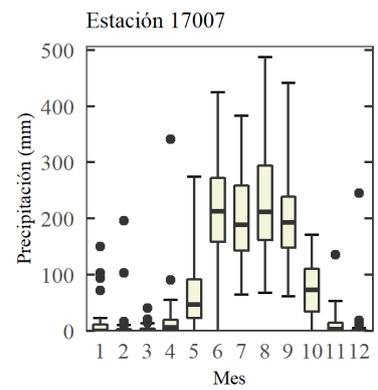
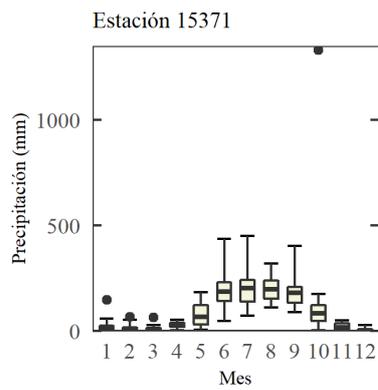
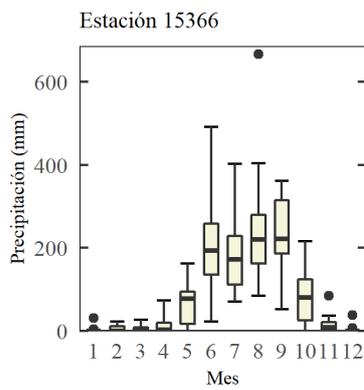
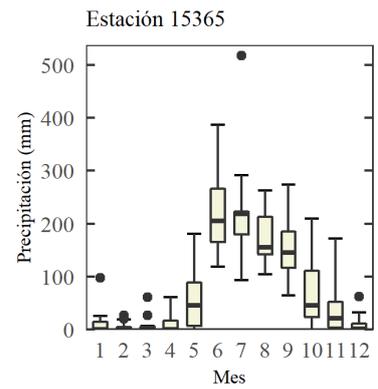
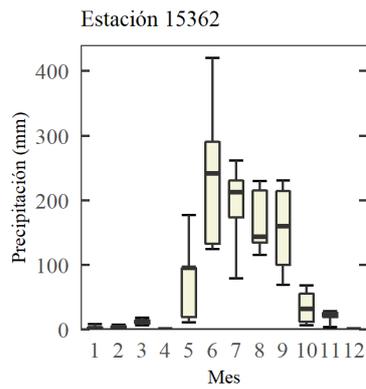
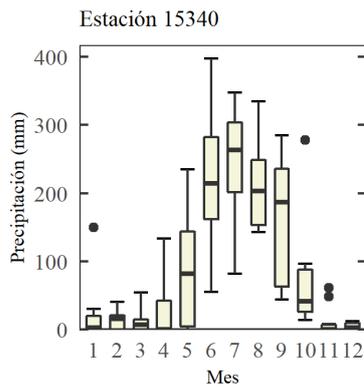
Temperatura máxima



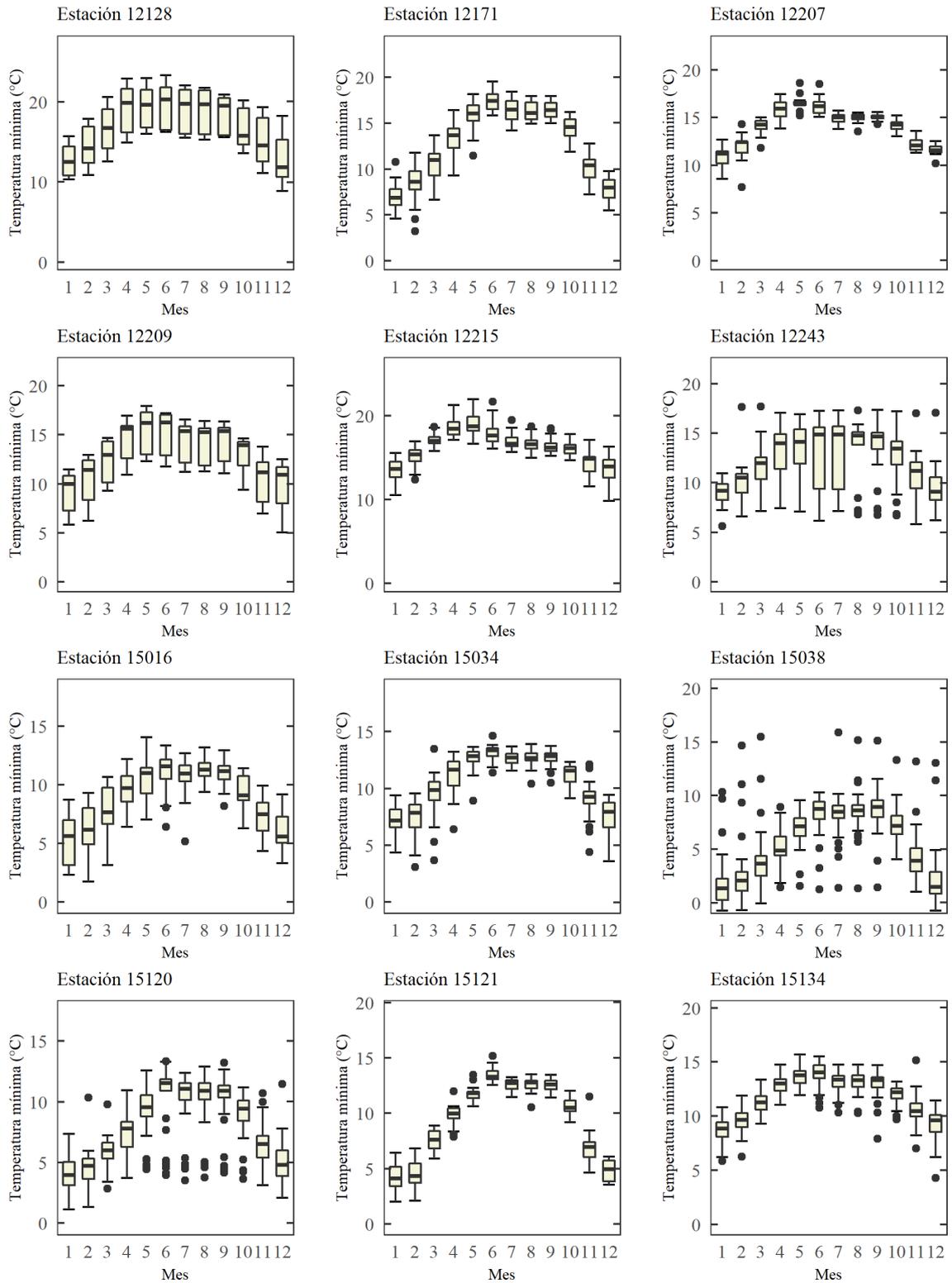
Temperatura máxima



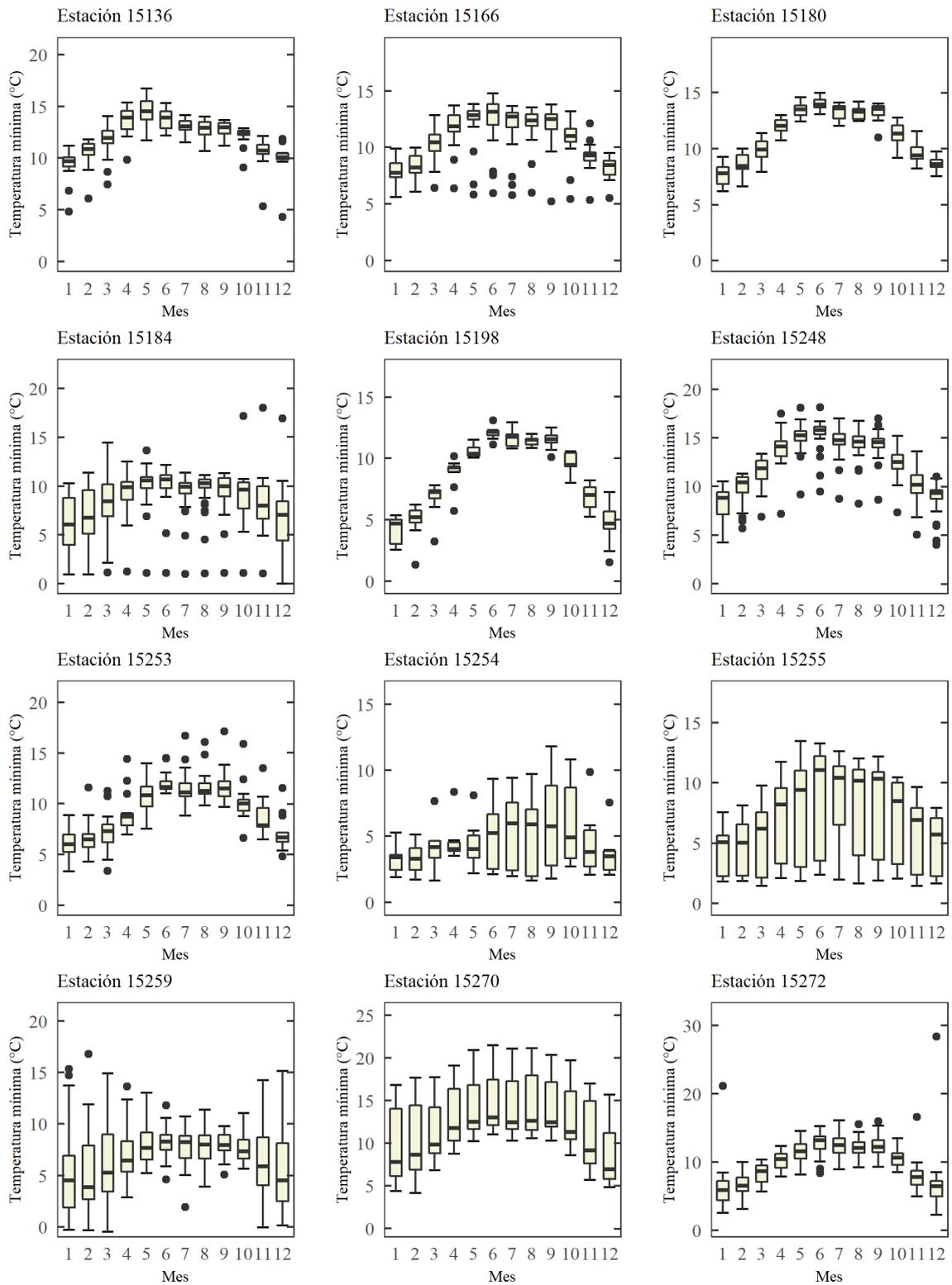
Temperatura máxima



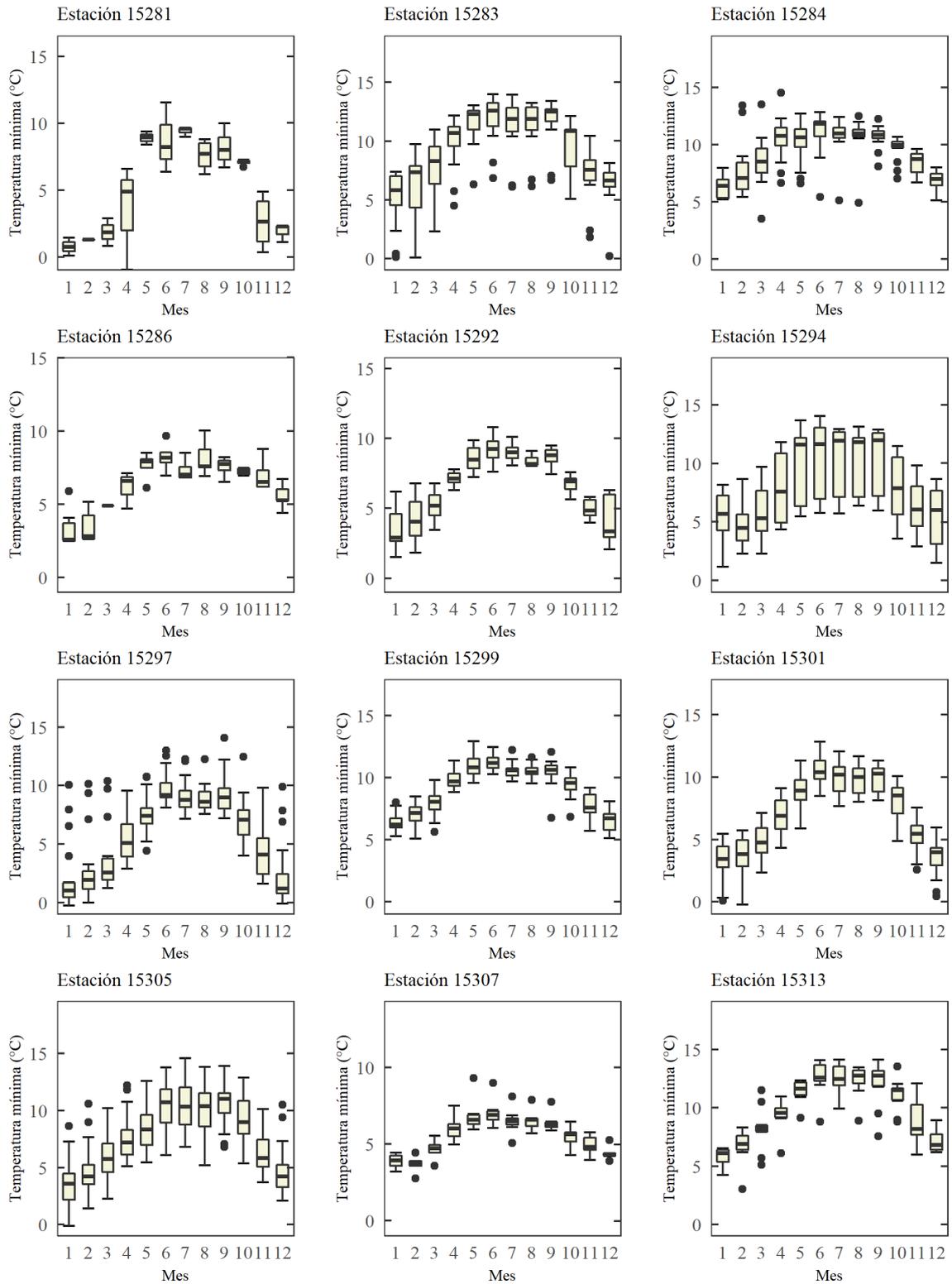
Temperatura mínima



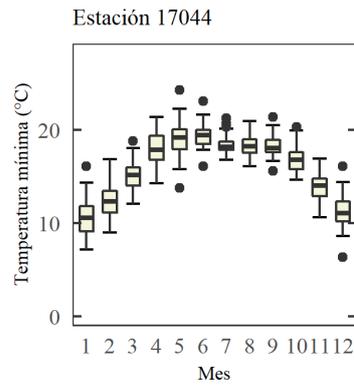
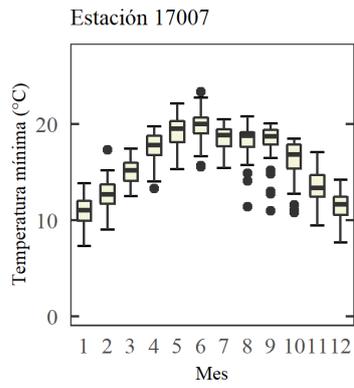
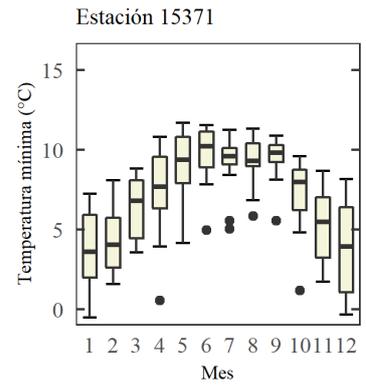
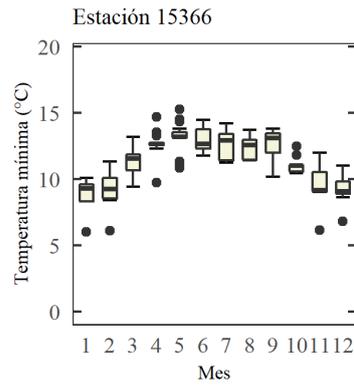
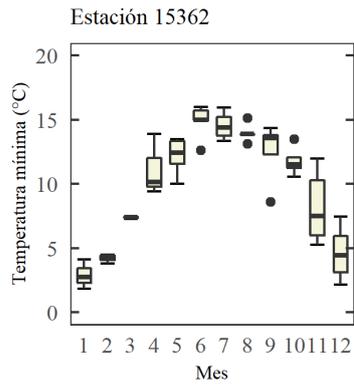
Temperatura mínima



Temperatura mínima

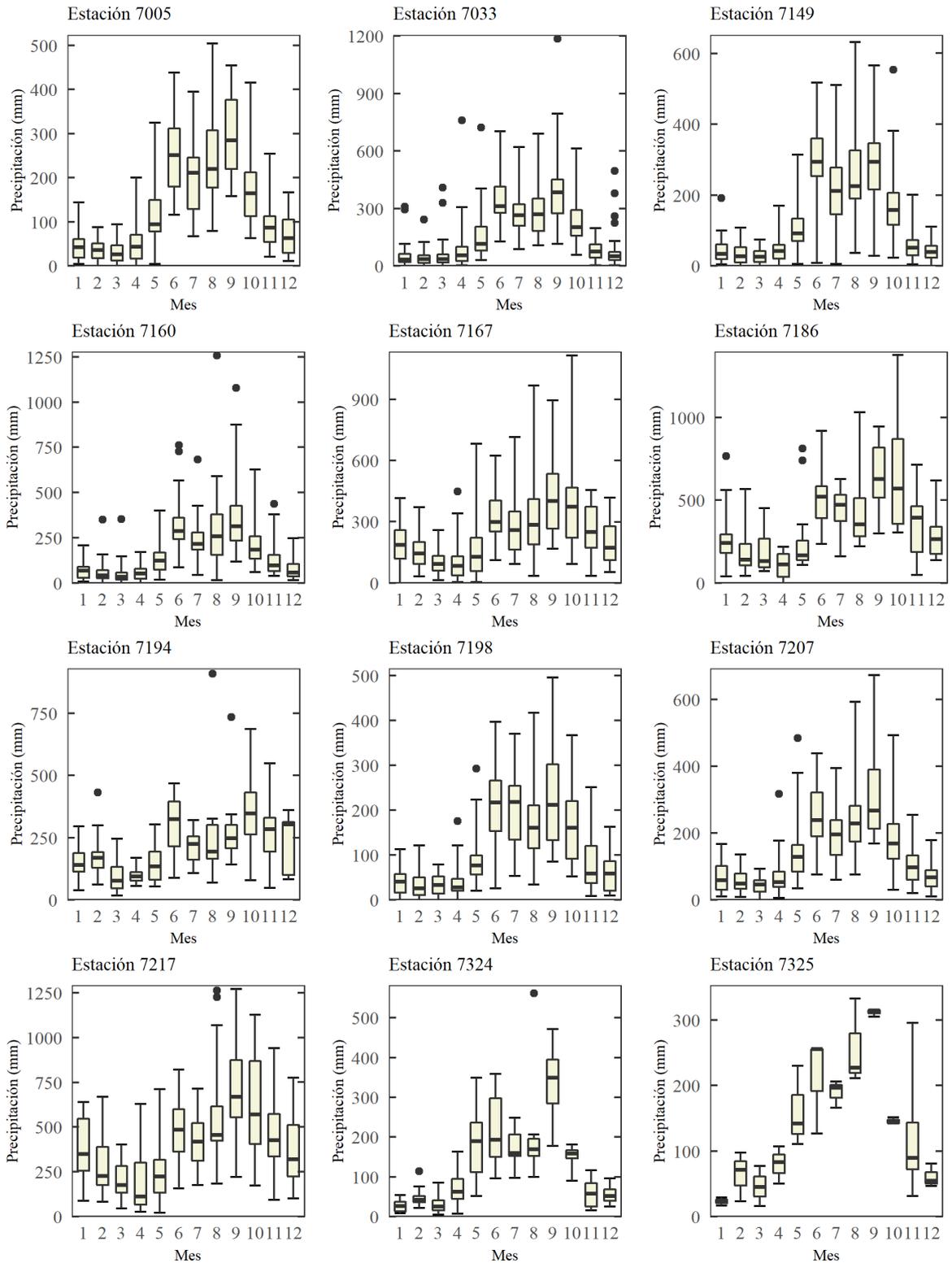


Temperatura mínima

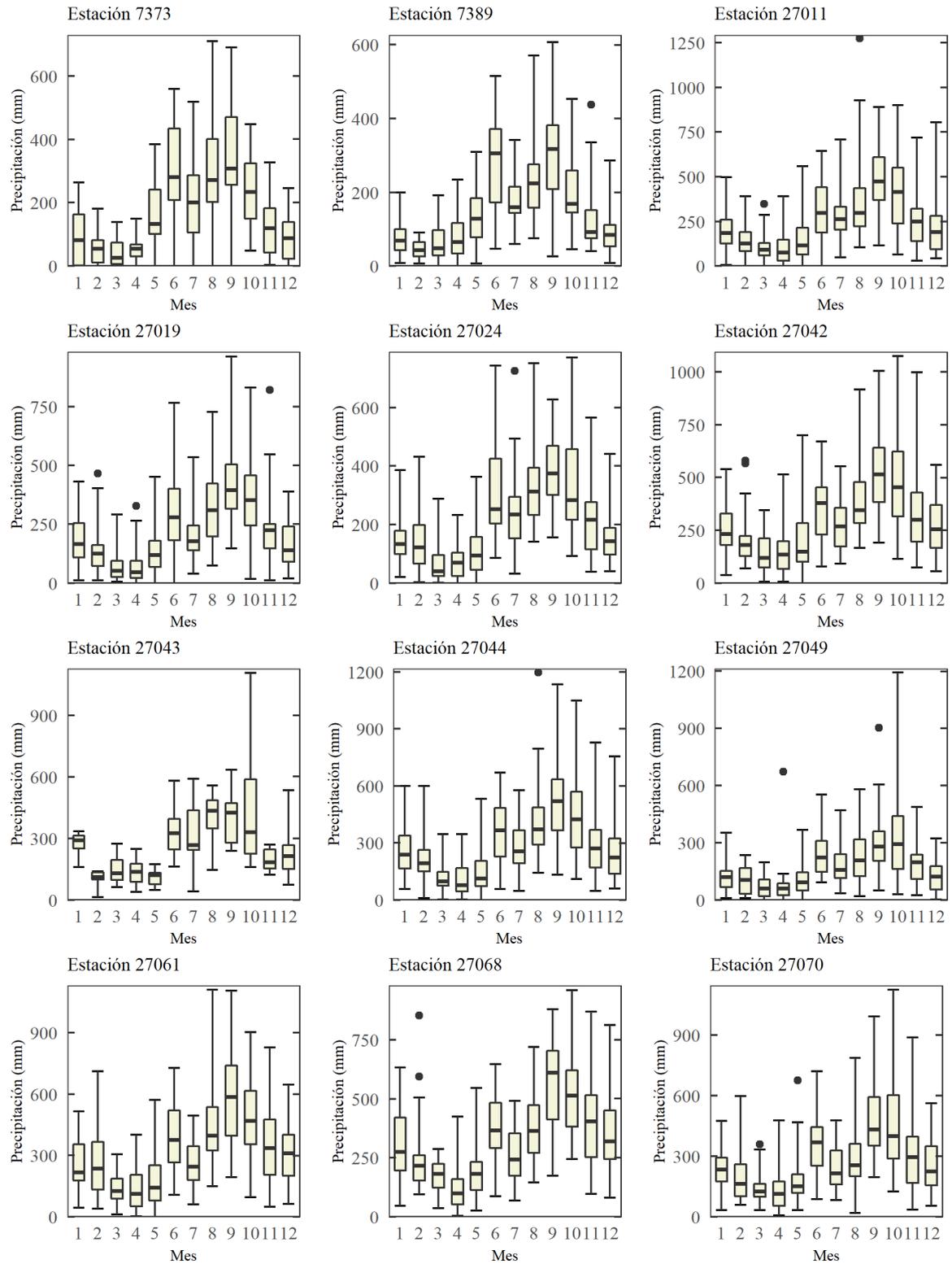


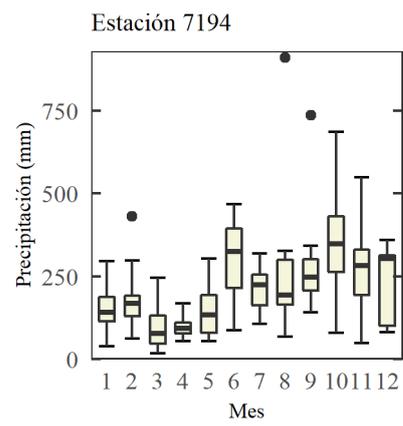
Cuenca río La Sierra

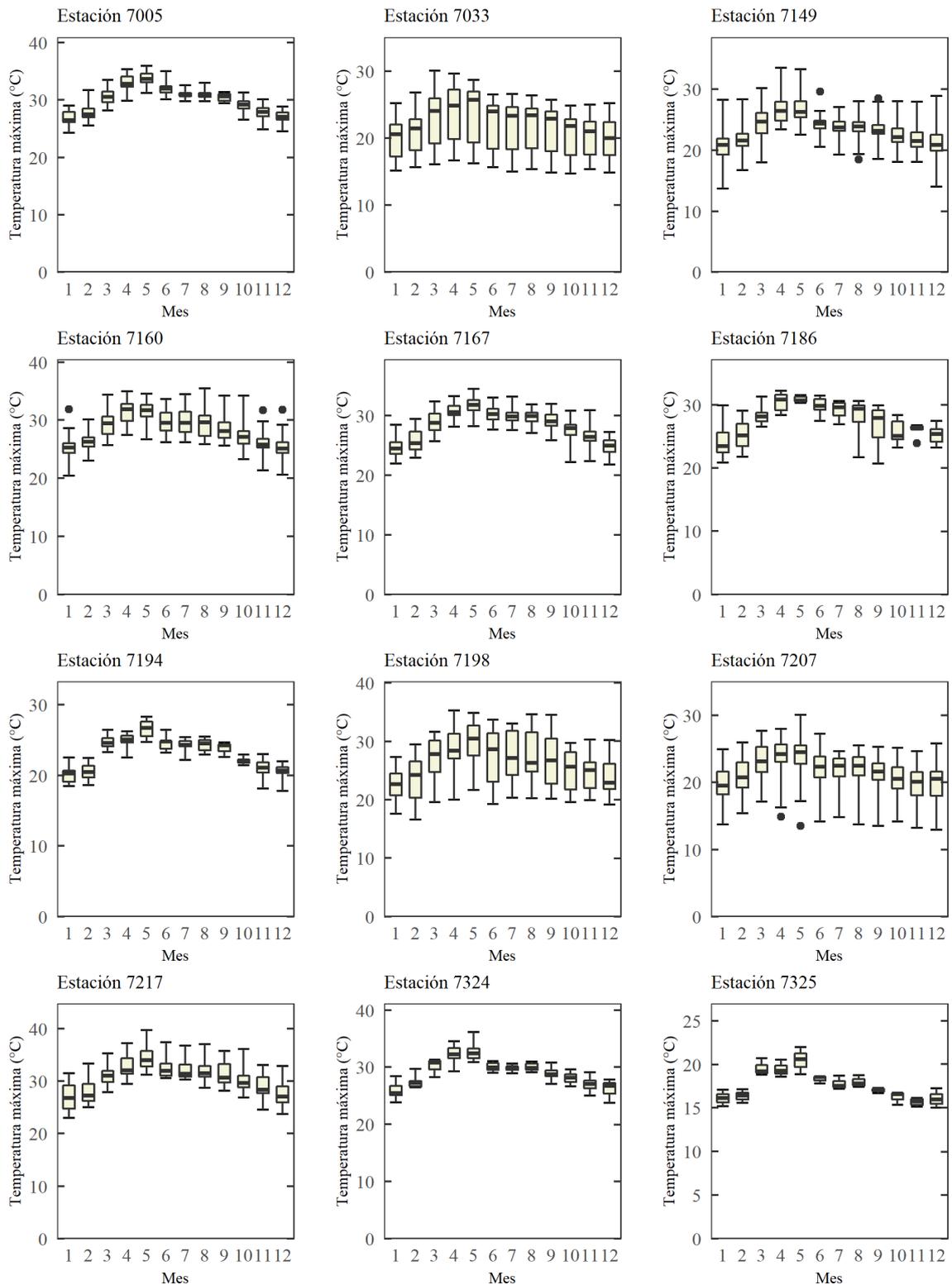
Precipitación



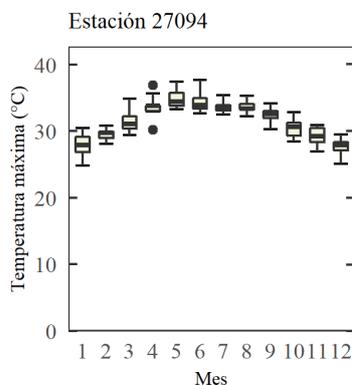
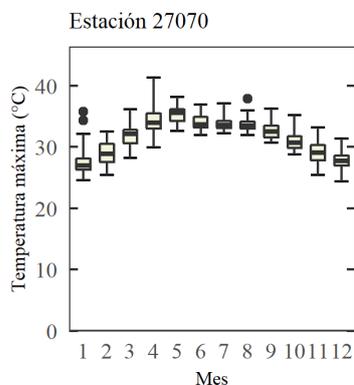
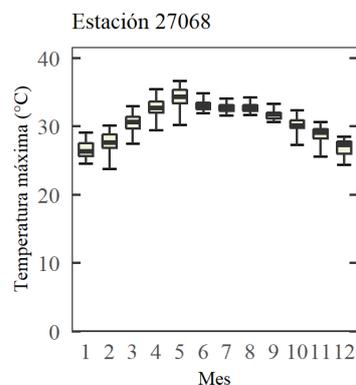
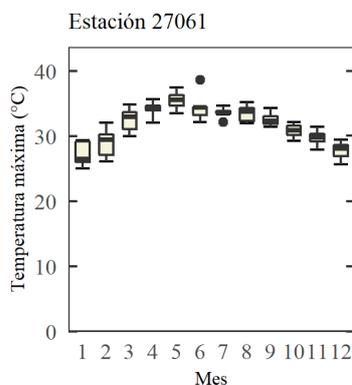
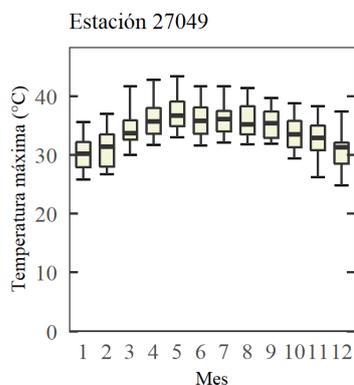
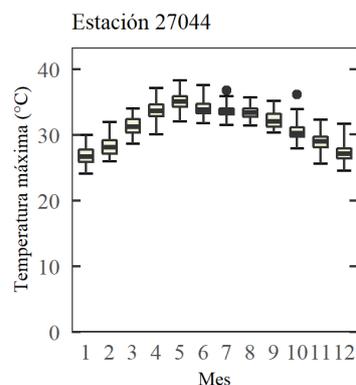
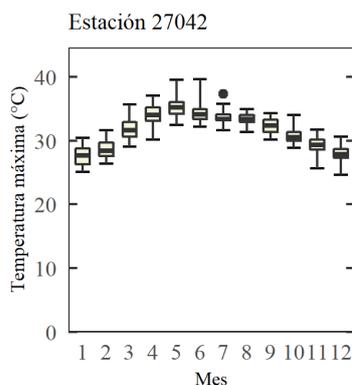
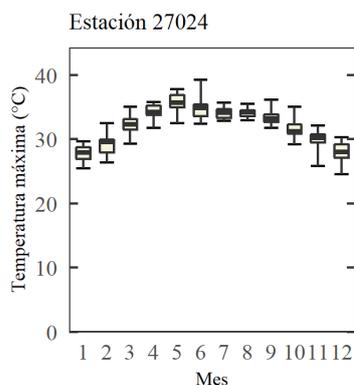
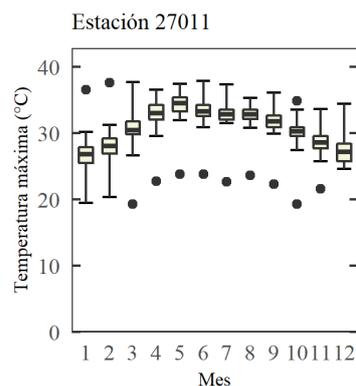
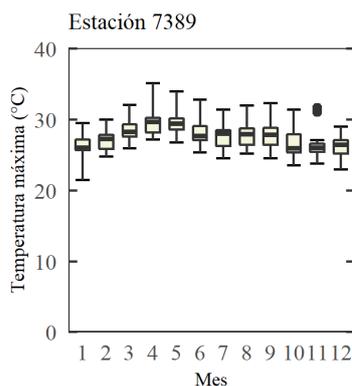
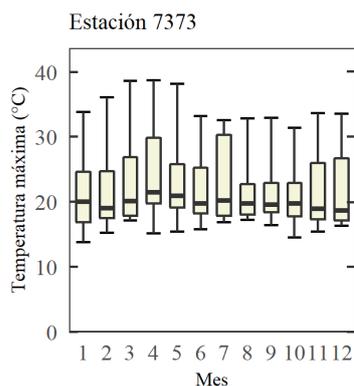
Precipitación

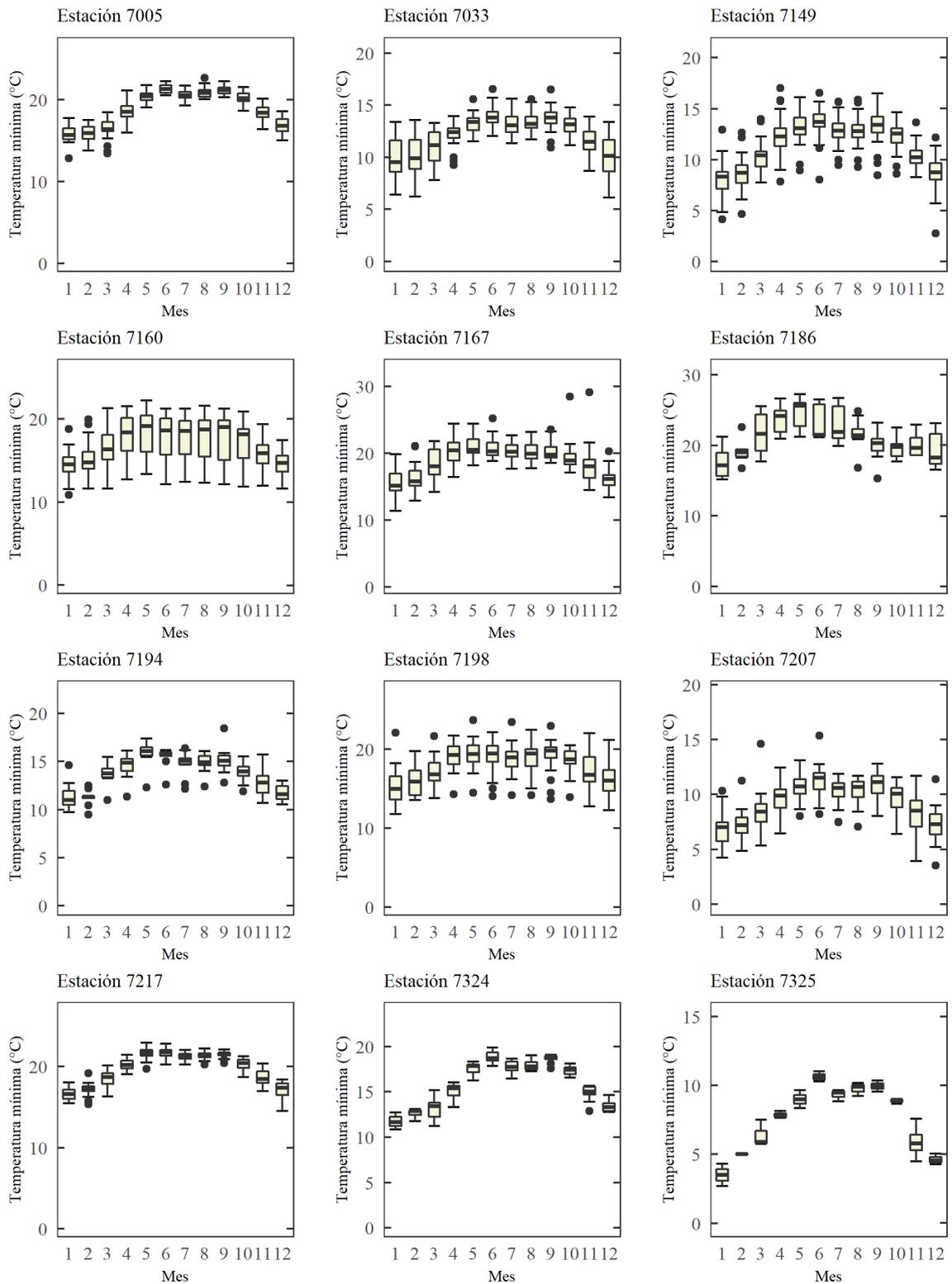


Precipitación

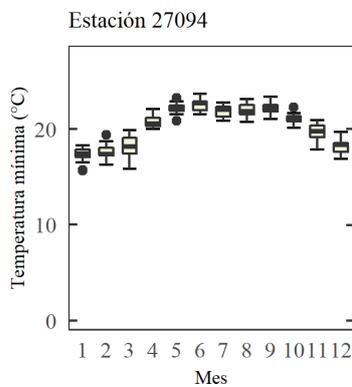
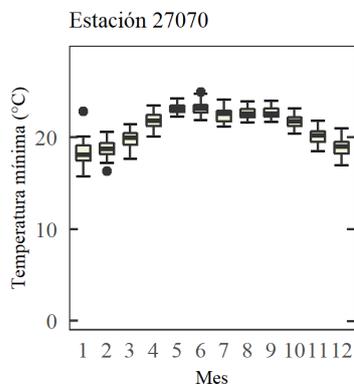
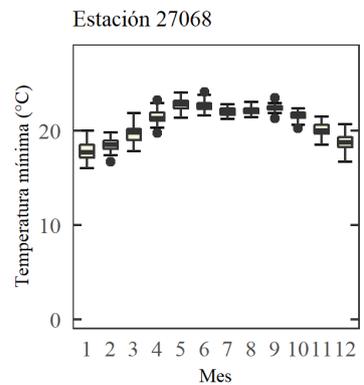
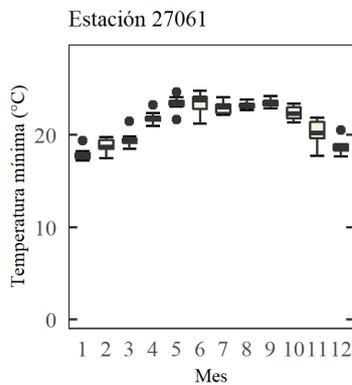
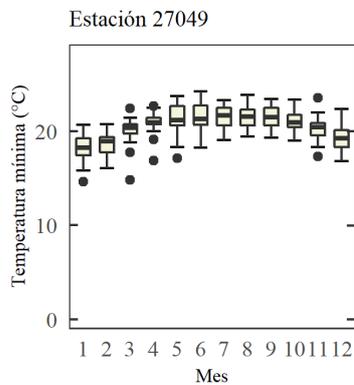
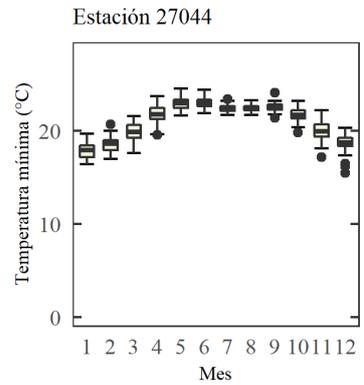
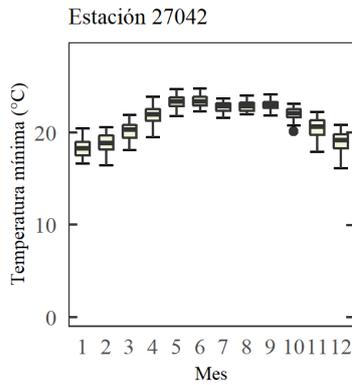
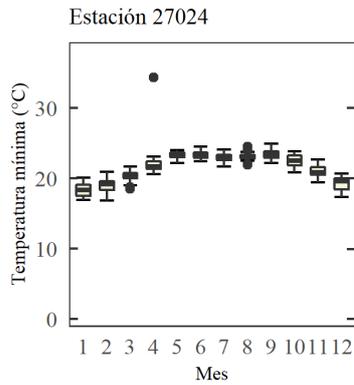
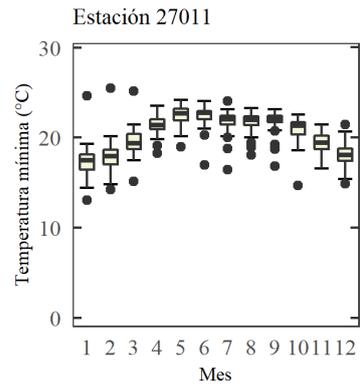
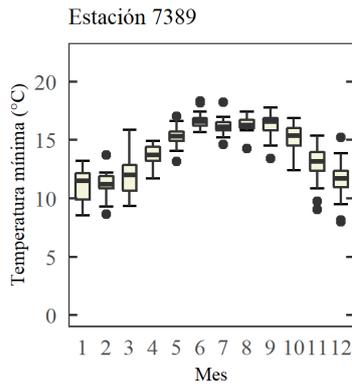
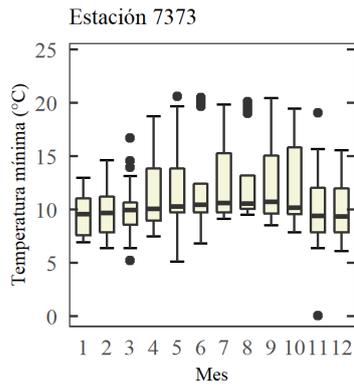
Temperatura máxima

Temperatura máxima



Temperatura mínima

Temperatura mínima



Anexo 13. Estaciones climáticas eliminadas

Cuenca	Estaciones	
	Precipitación	Temperatura máxima y mínima
Escondido	5042, 5043, 5057	5042, 5043, 5057
Amacuzac	15121, 15198, 15281, 15362, 12207, 12209, 15254, 15281, 15283, 15366	15121, 15198, 15281, 15362, 12207, 12209, 15136, 15254, 15281, 15283, 15297, 15259
La Sierra	7325, 7246, 7186, 7194, 7198, 27043, 27049	7325, 7186, 7194, 7198

Anexo 14. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS en los procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos La Sierra y Amacuzac

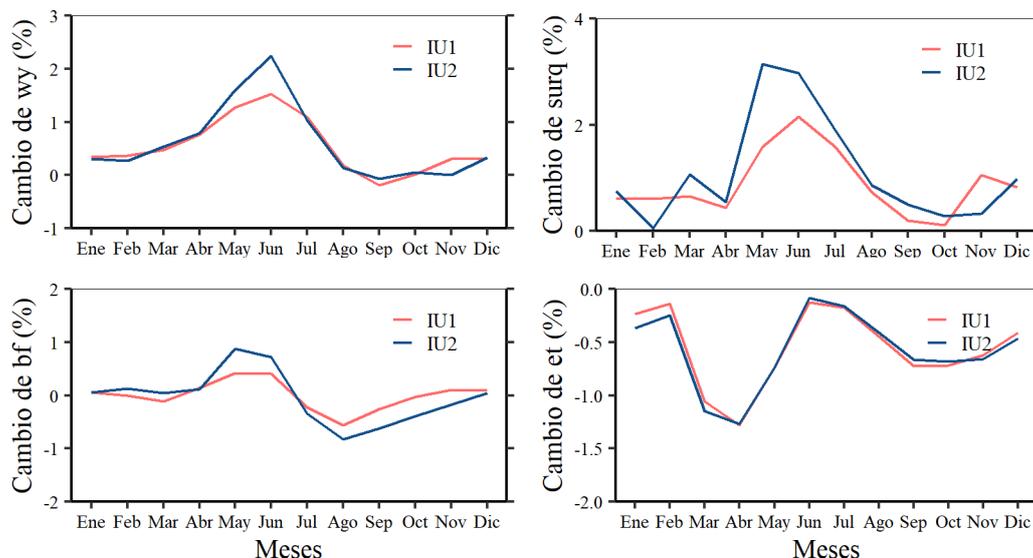


Figura 6-3. promedios mensuales por el cambio de UCS históricos en los procesos hidrológicos en la cuenca del río La Sierra

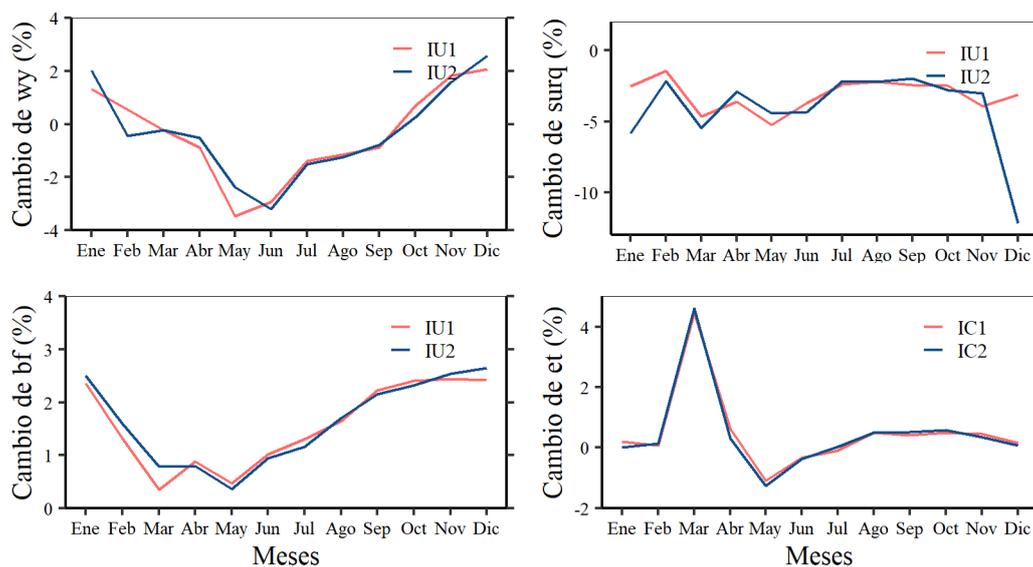


Figura 6-4. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS históricos en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac

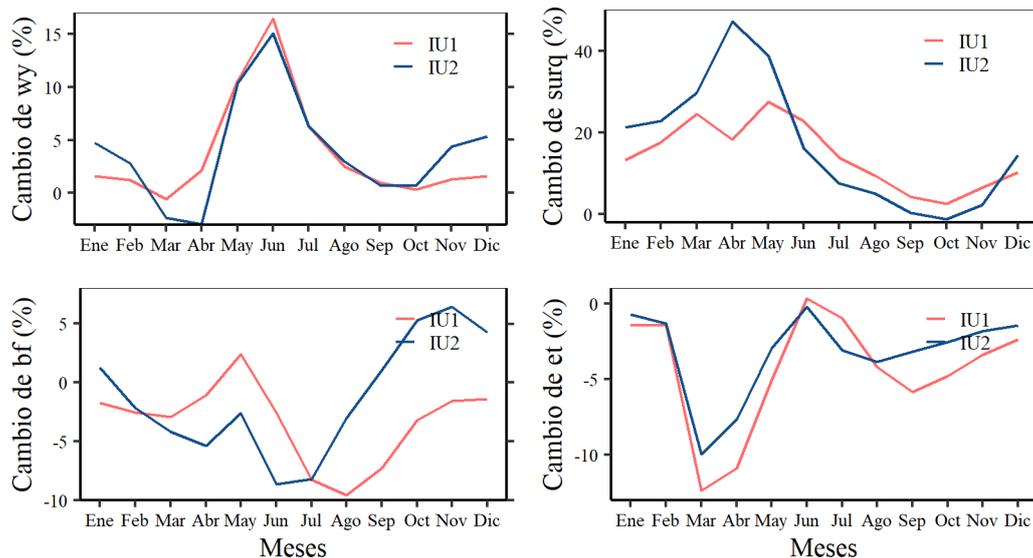


Figura 6-5. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS proyectado en los procesos hidrológicos en la cuenca del río La Sierra

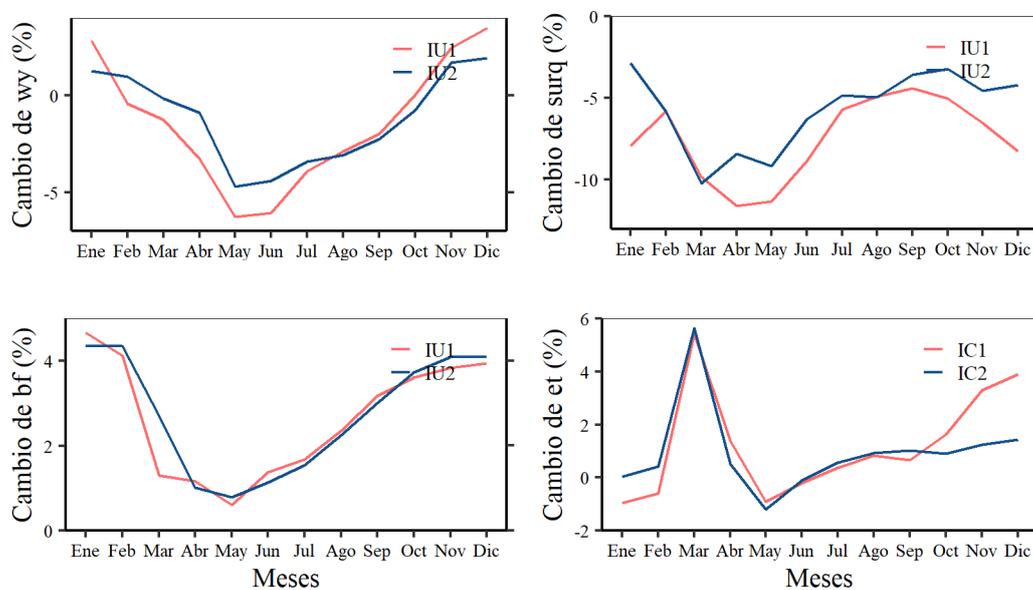


Figura 6-6. Cambios promedios mensuales por el cambio de UCS proyectado en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Amacuzac