



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis espacio-temporal de
variables climatológicas en
la cuenca del río Piaxtla**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero civil

P R E S E N T A

Luis Armando Hernández González

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Luis Aragón Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Resumen

En los años recientes se ha descubierto que el cambio climático en México ocurre más allá del aumento de la temperatura promedio, pues casi todos los impactos de este fenómeno se encuentran en el ciclo hidrológico. En este contexto se realizan investigaciones a lo largo del país que permiten conocer mejor cómo se presenta el cambio climático, sus efectos en los ecosistemas y en las actividades humanas y, por tanto, la elaboración de planes para la gestión sostenible. Dentro del área de interés de estas investigaciones está la zona continental de las cuencas hidrológicas que aportan al golfo de California. Es por ello que en este trabajo se eligió la cuenca del río Piaxtla para estudiar la variabilidad espacial y temporal de 3 variables climatológicas, así como su interacción y relación. Los hallazgos coinciden con los encontrados en otros estudios realizados en zonas como la península de Baja California o Nevado de Toluca, con lo que también se puede identificar los escenarios de cambio climático que ya experimenta el país.

Este análisis consistió en primer lugar, en recabar la información necesaria. La cuenca si bien cuenta con una gran cantidad de estaciones de medición, distribuidas espacialmente de tal forma que representan satisfactoriamente toda la zona, no todas presentan un periodo de registro útil para fines de análisis de tendencias. Esto llevó a realizar una reconstrucción importante de datos faltantes, mediante tres métodos de interpolación para obtener resultados representativos de la cuenca y de buena calidad.

Posteriormente, se analizó la tendencia temporal (mensual y anual) que presentan la precipitación, temperatura y caudal a lo largo de todo el año y sus valores promedio anuales. La evidencia encontrada indica que el caudal no ha presentado variación significativa, sin embargo, se logró identificar que la frecuencia de años secos y cálidos es mayor en los últimos años del registro. Tanto en el caudal como en la precipitación se identifica una gran variación entre valores máximos y valores promedio, mostrando así las diferencias que existen entre las épocas de estiaje y húmeda, principalmente. La precipitación presenta una tendencia en general decreciente sobre todo en los meses de invierno. Además, los registros indican algunas tendencias decrecientes y significativas de la temperatura máxima, sin embargo, la temperatura mínima presenta resultados con tendencias de menor magnitud, aunque también se encontraron zonas de la cuenca donde esta variable no presentó evidencia de cambio.

Finalmente, respecto a la variación espacial de los valores, los resultados son congruentes con la forma en la cual se comporta la temperatura y la precipitación en el país. Esto es, mayor temperatura en las zonas más bajas y/o secas y, mayor precipitación en la cara de las cordilleras montañosas que dan a los océanos. Del mismo modo, los valores medios de precipitación y temperatura coinciden con estudios realizados por el INEGI, el IMTA y la CONAGUA.

Con esto, se hizo clara la importancia de que la hidrología y la ingeniería civil deben incluir nuevas metodologías a las ya existentes para garantizar la funcionalidad de la infraestructura y con ello, el desarrollo económico y social, pues hasta la fecha el análisis hidrológico sólo considera los registros en el pasado y no los escenarios futuros, como aquellos de cambio climático aquí presentados.

Agradecimientos especiales:

A mis compañeros y amigos, Edni Hernández, Noé Guzmán, Donají Aguilar, Armando León, Abigail Báez, Raúl Machicao, Daniela Hernández, Ángel Juárez y Aldo Muciño, porque gracias a ustedes he crecido y alcanzado metas que no imaginaba antes de conocerlos.

A mis profesores y síndos Dr. José Luis Aragón Hernández, M.I. Amalia Adriana Cafaggi Félix, M.I. Alejandro Maya Franco, M.I. Alba Beatriz Vázquez González e Ing. Heriberto Esquivel Castellanos, por participar como parte del grupo de síndos y por sus comentarios para enriquecer este proyecto. Así como al profesor José Luis Trejo, cuyo apoyo hace 7 años me permitió entrar a la universidad y cambiar mi vida para siempre.

Al Dr. José Luis Aragón Hernández por permitirme participar en el proyecto de investigación *Análisis de las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar como base para su gestión sustentable* y realizar así el proyecto escrito presente, así como su asesoría.

A mi familia, especialmente a mis padres Marcela González y Justo Hernández, quienes me brindaron un apoyo incalculable durante mi vida académica.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IG100421 *Análisis de las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar como base para su gestión sustentable*. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

ÍNDICE

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XV
INTRODUCCIÓN	1
Problemática	1
Justificación	2
Hipótesis	2
Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	3
Descripción del trabajo	3
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y CONCEPTOS GENERALES	5
1.1. Aspectos hidrológicos	5
1.1.1. Ciclo hidrológico	5
1.1.2. Precipitación	6
1.1.3. Esguerrimiento	6
1.1.4. Infiltración	7
1.1.5. Temperatura	7
1.1.6. Evapotranspiración	7
1.1.7. Cuencas y ríos	7
1.1.8. Pérdidas de precipitación	9
1.2. Medición de variables	12
1.2.1. Estaciones de registro	12
1.2.2. Instrumentos de medición	13
1.2.3. Fuentes de consulta	15
1.3. Series de tiempo	15
1.3.1. Análisis estadístico	16
1.3.2. Parámetros estadísticos	16
1.3.3. Prueba de hipótesis	17
1.3.4. Pruebas estadísticas	19

1.4. Métodos de interpolación	21
1.4.1. Regresión y correlación (lineal).....	21
1.4.2. Ajuste polinómico	22
1.4.3. Inverso de la distancia	23
1.4.4. Polígonos de Thiessen	23
1.4.5. Kriging ordinario.....	24
1.5. Usos y disponibilidad del agua.....	25
1.5.1. Cálculo del balance hídrico	28
1.6. Cambio climático	28
1.6.1. Observaciones generales.....	29
1.6.2. Causas del cambio climático actual	31
1.6.3. Consecuencias del cambio climático	32
1.6.4. Estudios en México	35
CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO PIAXTLA.....	39
2.1. Golfo de California.....	39
2.2. Localización	39
2.2.1. Delimitación hidrológica	41
2.2.2. Delimitación política	41
2.3. Características generales.....	42
2.3.1. Topografía y orografía.....	43
2.3.2. Geología	44
2.3.3. Clima.....	45
2.3.4. Hidrografía	47
2.3.5. Estaciones de medición de variables climatológicas	48
2.3.6. Flora y fauna.....	51
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	53
3.1. Delimitación de la zona de estudio.....	53
3.1.1. Criterios de selección.....	53
3.1.2. Selección de la cuenca.....	54
3.1.3. Delimitación de la cuenca.....	54

3.2. Caracterización de la zona de estudio	55
3.2.1. Uso y tipo de suelo	55
3.2.2. Población	59
3.2.3. Sectores económicos.....	62
3.2.4. Usos del agua.....	66
3.3. Información climatológica.....	70
3.3.1. Criterios de selección de estaciones.....	70
3.3.2. Estaciones hidrométricas	70
3.3.3. Estaciones climatológicas	71
3.4. Análisis de las series de tiempo	73
3.4.1. Reconstrucción de series de tiempo de precipitación y temperatura	73
3.4.2. Indicadores hidrológicos.....	78
3.5. Resultados	82
3.5.1. Análisis puntual: variabilidad temporal	82
3.5.2. Análisis de valores medios. Variabilidad temporal.....	109
3.5.3. Distribución espacial. Valores medios.....	114
3.5.4. Disponibilidad de agua	118
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	123
4.1. Tasa de cambio de los indicadores hidrológicos	123
4.2. Distribución espacio-temporal de variables climatológicas	127
4.2.1. Temperatura.....	127
4.2.2. Precipitación.....	133
4.2.3. Caudal	136
4.2.4. Escenarios RCP	137
4.2.5. Precipitación-temperatura-caudal	139
4.2.6. Usos del agua-caudal	141
4.2.7. Elevación-precipitación, temperatura	144
4.2.8. Uso de suelo y cobertura vegetal	146
4.3. Comparación con investigaciones en México.....	147
4.3.1. Península de Baja California.....	147

4.3.2. Nevado de Toluca.....	148
4.4. Escenarios Futuros	148
4.4.1. Ajuste lineal.....	148
4.5. Balance hídrico.....	150
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	153
Referencias.....	155
ANEXOS	165

Índice de figuras

Figura 1. Esquema del ciclo hidrológico (USGS, 2019).....	5
Figura 2. Parteaguas de cuencas hidrológicas según la topografía.....	8
Figura 3. Características de una cuenca (abierta).	8
Figura 4. Cuencas exorreica y endorreica.....	9
Figura 5. Solución gráfica a la ecuación de escurrimiento del SCS (Chow et al, 1994).	10
Figura 6. Estación Climatológica típica.....	13
Figura 7. Tipos de estaciones hidrométricas.....	14
Figura 8. Limnógrafo.	14
Figura 9. Componentes de una serie de tiempo. (Medina et al, 2009).	16
Figura 10. Regiones críticas para prueba de dos colas y una cola.	19
Figura 11. Curva de ajuste lineal y distribución de probabilidad (Wackerly, 2010).	22
Figura 12. Polígonos de Thiessen.....	24
Figura 13. Valores medios anuales del ciclo hidrológico en México (CONAGUA, 2017).....	27
Figura 14. Precipitación normal anual en México (1981-2010).	27
Figura 15. Precipitación normal mensual en México (1984-2010 y 2017).	28
Figura 16. Concentración de CO ₂ atmosférico en los últimos 420 mil años.....	30
Figura 17. Concentración GEI en los últimos 2,000 años.....	30
Figura 18. Reconstrucción de la temperatura de los últimos 2,000 años.	30
Figura 19. Mayores efectos al calentamiento o enfriamiento global.....	32
Figura 20. Consecuencias globales del calentamiento global.	34
Figura 21. Indicadores del cambio climático global en los próximos 100-300 años (IPCC, 2018).....	35
Figura 22. Tendencia de la precipitación a lo largo de México (1945-1995).....	37
Figura 23. Variabilidad interanual de la precipitación, temperaturas máximas y mínimas promedio [°C] noroeste de México (Fernández <i>et al</i> , 2013).....	38
Figura 24. Delimitación de cuencas que descargan al golfo de California (Barradas, 2022).	40
Figura 25. Cuencas que aportan al golfo de California.....	40
Figura 26. Delimitación hidrológica de la cuenca del río Piaxtla.	41
Figura 27. División política de la cuenca del río Piaxtla.	42
Figura 28. Poblado de Tayoltita, San Dimas, Durango.....	43

Figura 29. Elevación del terreno en la cuenca (CEM, INEGI, 2012).....	44
Figura 30. Mapa geológico de la cuenca del río Piaxtla, modificado de CONAGUA (2015).....	45
Figura 31. Climas dentro de la cuenca.....	46
Figura 32. Afluentes del río Piaxtla.....	48
Figura 33. Estaciones climatológicas e hidrométricas en la cuenca del río Piaxtla.....	49
Figura 34. Uso de suelo y vegetación en la cuenca río Piaxtla.....	52
Figura 35. Diagrama de flujo para la selección de la cuenca.....	53
Figura 36. Parteaguas calculado y según CONAGUA de la cuenca del río Piaxtla.....	54
Figura 37. Uso de suelo y vegetación en la cuenca, Serie I.....	55
Figura 38. Uso de suelo y vegetación en la cuenca serie VI.....	56
Figura 39. Edafología de la cuenca del río Piaxtla.....	57
Figura 40. Número de curva en la cuenca Piaxtla-Ixpalino.....	58
Figura 41. Valor K según la NOM-011-CONAGUA-2015 de la cuenca Piaxtla-Ixpalino.....	58
Figura 42. Evolución de la población en la cuenca.....	60
Figura 43. Densidad y distribución poblacional en la cuenca del río Piaxtla.....	61
Figura 44. Distribución de la población con la elevación.....	62
Figura 45. Sectores económicos en la cuenca del río Piaxtla.....	63
Figura 46. Sectores económicos en las principales localidades de la cuenca.....	64
Figura 47. Distritos de riego en la cuenca del río Piaxtla.....	68
Figura 48. Volumen del agua concesionado en la cuenca del río Piaxtla.....	68
Figura 49. Acuífero y cuenca del río Piaxtla.....	70
Figura 50. Estaciones analizadas con influencia en la cuenca del río Piaxtla.....	71
Figura 51. Esquema resumen de las estaciones, longitud de registro y tipos de análisis.....	73
Figura 52. Temperatura medida y estimada con el método IDW para la EC 10042.....	75
Figura 53. Registros de Tmax en la E.C. 10031.....	75
Figura 54. Registro de Tmax de la E.C. 10042.....	76
Figura 55. Curva de ajuste para la Tmax entre las EE.CC. 10042 y 10031.....	76
Figura 56. Valores de Tmax calculados en la E.C. 10031 a partir de la E.C. 10042.....	76
Figura 57. Tmax de la E.C. 10031 reconstruida.....	77
Figura 58. Caudales acumulados anuales E.H. 10065 y E.H. 10111.....	77

Figura 59. Reconstrucción del caudal acumulado anual de las EE.HH. 10065 y 10111.....	78
Figura 60. Pacu en el mes de septiembre de la E.C. 10031.	82
Figura 61. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 10031.	90
Figura 62. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 10042	91
Figura 63. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual E.C. 25001	92
Figura 64. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25021	93
Figura 65. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25045.	94
Figura 66. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25084.	95
Figura 67. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25118.	96
Figura 68. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 10031.....	101
Figura 69. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 10042.....	102
Figura 70. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25001.....	103
Figura 71. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25021.....	104
Figura 72. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25045.....	105
Figura 73. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25084.....	106
Figura 74. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25118.....	107
Figura 75. Qacu del mes de enero de la E.H. 10111.....	108
Figura 76. Series de tiempo de Qacu y Qmax de noviembre de la E.H. 10065.	109
Figura 77. Pacu promedio por parteaguas.	110
Figura 78. Max(Tmax) promedio por parteaguas.	110
Figura 79. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i>	112
Figura 80. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i>	113
Figura 81. Distribución espacial: precipitación acumulada promedio anual.....	115
Figura 82. Distribución espacial: temperatura máxima promedio anual.	116
Figura 83. Distribución espacial: temperatura mínima promedio anual.....	117
Figura 84. Balance hídrico en la cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i>	121
Figura 85. Balance hídrico en la cuenca del río <i>Piaxtla</i>	121
Figura 86. Cambio promedio anual en la cuenca del río <i>Piaxtla</i> : Max(Tmax) (septiembre y anual).	128
Figura 87. Cambio promedio anual en la cuenca del río <i>Piaxtla</i> : Min(Tmax) (enero y anual).....	129
Figura 88. Cambio promedio anual en la cuenca del río <i>Piaxtla</i> : Max(Tmin) (diciembre y anual).....	130

Figura 89. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: Min(Tmin) (junio y anual).	131
Figura 90. Localización de las EE.CC. 25084 y 25118.	132
Figura 91. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: Pacu (septiembre y diciembre).....	134
Figura 92. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: Pacu.	135
Figura 93. Años secos y húmedos según el caudal acumulado anual E.H. 10065.	137
Figura 94. P, T y Q promedios anuales de la cuenca Piaxtla-Ixpalino (1961-2009).	141
Figura 95. Usos del agua en la cuenca del río Piaxtla por tipo de uso, municipio y fuente.....	142
Figura 96. Uso de suelo agrícola en la cuenca.	143
Figura 97. Cortes en perfil para análisis.	144
Figura 98. Elevación-precipitación-temperatura: corte A-1 y A-2.	145
Figura 100. Elevación-precipitación-temperatura: corte A-3 y B-B.	145
Figura 102. Elevación-precipitación-temperatura: corte C-C y D-D.	146
Figura 104. Pronóstico de Tmax en la cuenca Piaxtla-Ixpalino.	149
Figura 105. Pronóstico de Tmin en la cuenca Piaxtla-Ixpalino.....	149

Índice de tablas

Tabla 1. Instrumentos de medición de una estación climatológica.	12
Tabla 2. Errores en prueba de hipótesis.....	18
Tabla 3. Descripción de la significancia de Mann-Kendall.	20
Tabla 4. Usos del agua en México.....	26
Tabla 5. Municipios en la cuenca del río Piaxtla	42
Tabla 6. Estaciones hidrométricas en el río Piaxtla	49
Tabla 7. Estaciones climatológicas con influencia en la cuenca del río Piaxtla	50
Tabla 8. Tipos de suelos en la cuenca del río Piaxtla.....	56
Tabla 9. Cálculo del NC y K de la cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i>	59
Tabla 10. Población de la cuenca por censo según el INEGI.....	60
Tabla 11. Tipo de localidades dentro de la cuenca del río Piaxtla	61
Tabla 12. Localidades más grandes en la cuenca del río Piaxtla.....	62
Tabla 13. Unidades económicas por localidad en la cuenca	65
Tabla 14. Unidades económicas por tamaño en la cuenca	65
Tabla 15. Actividades económicas en la cuenca.....	66
Tabla 16. Volumen concesionado de agua dentro de la cuenca	69
Tabla 17. Usos del agua en San Ignacio y San Dimas	69
Tabla 18. Áreas de influencia de cada E.C.	71
Tabla 19. Indicador de registro: precipitación y temperatura.	72
Tabla 20. Número de registros nulos (precipitación) por año en las estaciones climatológicas.	74
Tabla 21. Indicadores propuestos para tres variables.....	79
Tabla 22. Registro de precipitación en diciembre 1962 y enero 1963 en la E.C. 10031.	80
Tabla 23. Registros de temperatura diciembre 1962 y enero 1963, E.C. 10031.	81
Tabla 24. Obtención de los estadísticos de la prueba de Pettitt.	85
Tabla 25. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 10031 (temperatura).....	87
Tabla 26. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 10042 (temperatura).	87
Tabla 27. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25001 (temperatura).	87
Tabla 28. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25021 (temperatura).	88

Tabla 29. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25045 (temperatura).	88
Tabla 30. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25084 (temperatura)-.....	88
Tabla 31. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25118 (temperatura).	89
Tabla 32. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: de la E.C. 10031 (precipitación).....	98
Tabla 33. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y de la Pettitt: E.C. 10042 (precipitación).....	98
Tabla 34. Resultados de las pruebas Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25001 (precipitación).....	99
Tabla 35. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25021 (precipitación)	99
Tabla 36. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: 25045 (precipitación).	99
Tabla 37. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25084 (precipitación).	100
Tabla 38. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25118 (precipitación).	100
Tabla 39. Resumen de resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.H. 10111 (caudal).	108
Tabla 40. Resumen de resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.H. 10065 (caudal).	109
Tabla 41. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt de la cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i> (temperatura).	111
Tabla 42. Resumen de resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt de la cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i> (precipitación).	111
Tabla 43. Volumen de agua concesionado.	119
Tabla 44. Porcentaje de usos del agua en la cuenca del río <i>Piaxtla</i>	119
Tabla 45. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: $\text{Max}(T_{\text{max}})$	123
Tabla 46. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: $\text{min}(T_{\text{max}})$	124
Tabla 47. Tasa de cambio y promedio por estación y por cuenca: $\text{Max}(T_{\text{min}})$	124
Tabla 48. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: $\text{Min}(T_{\text{min}})$	124
Tabla 49. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: DTR.	125
Tabla 50. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: P_{acu}	125
Tabla 51. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: P_{max}	125
Tabla 52. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: NWD.	126
Tabla 53. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: CDD.....	126
Tabla 54. Tasa de cambio y promedio por estación y por cuenca: SDII.	126
Tabla 55. Tasa de cambio y promedio para ambas E.E.H.H: Qacu, Qmax y QAA.	127
Tabla 56. Resultados de cambio: Pacu anual y escenarios de cambio climático según el IMTA (2015). ...	137

Tabla 57. Resultados de cambio: Tmax y Tmin anual y escenarios de cambio climático según el IMTA (2015).	138
Tabla 58. Precipitación-temperatura y caudal promedio anuales de la cuenca Piaxtla-Ixpalino.	140
Tabla 59. Área destinada a la agricultura dentro de la cuenca.	143
Tabla 60. Áreas del uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Piaxtla.	147
Tabla 61. Estimación a largo plazo de las variables climatológicas.	149
Tabla 62. Balance hídrico de la cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i> (valores calculados y medidos).....	150
Tabla 63. Estimación del balance hídrico para los años 2035, 2050 y 2100.	151

INTRODUCCIÓN

Para el siglo XXI, el fenómeno del cambio climático asociado a las emisiones de carbono de origen fósil por actividades humanas se encuentra muy estudiado y es innegable. La evidencia encontrada en los registros de temperatura de todo el mundo en el siglo XX coincide con los modelos teóricos que se han desarrollado y, en ocasiones, incluso los superan. Lo complicado es la relación que puede tener este aumento de la temperatura con otras variables climatológicas y, del mismo modo, el impacto que pueda tener en la humanidad y el ambiente.

Con el tiempo se pudo comprobar que, el aumento de la temperatura y el carbono se relacionan directamente con las actividades humanas, especialmente con la generación de energía. Este fenómeno lleva ocurriendo desde la revolución industrial y continúa hasta nuestros días. Sin embargo, el impacto en el clima no es tan inmediato y es bastante difícil de modelar y comprender. Pero el cambio climático también se puede entender a través del agua pues muchos de sus efectos se relacionan con esta, por ejemplo: aumento del nivel del mar, la pérdida de glaciares, el cambio en la precipitación, etc.

Especialmente por esto último, el cambio climático tiene un impacto importante en las personas, pues el acceso al agua es vital para el desarrollo de actividades económicas, esparcimiento y necesidades biológicas. Más aún, si se considera que en general, la infraestructura hidráulica está diseñada con registros climatológicos del siglo XX, y generalmente no se consideran los efectos del cambio climático en el siglo XXI y décadas posteriores. En este contexto se desarrollan distintas investigaciones para la gestión sostenible, donde el principal factor a considerar es el cambio climático, como lo es el proyecto PAPITT IG100421 *Análisis de las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar como base para su gestión sustentable*, con lo cual se espera conocer la naturaleza del cambio en la zona continental del golfo de California.

Es así que se eligió estudiar la variabilidad espacio-temporal de variables climatológicas en cuencas aforadas (medición del caudal del río) que descargan al golfo de California y específicamente en este trabajo la cuenca del río Piaxtla. La zona de esta cuenca se encuentra poco impactada por las actividades humanas, presenta una cantidad suficiente de estaciones de medición lo que permite un análisis adecuado de la relación que puedan tener la precipitación, la temperatura y el caudal del río, tomando en cuenta factores naturales como antropogénicos. De tal forma que, de reconocer algún impacto entre esta interacción de las variables es posible remarcar la importancia de que el análisis hidrológico tradicional, debe considerar nuevos métodos que tomen en cuenta los escenarios futuros y no sólo el registro de datos en el pasado.

Problemática

El calentamiento global tiene un impacto especial en el ciclo hidrológico: sequías, inundaciones, cambio en la duración y ocurrencia de la temporada de lluvias, etc. Todo esto se ve reflejado en el volumen que presentan los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, los cuales son necesarios para el desarrollo económico de la sociedad. Son además, estos dos factores: precipitación y temperatura, los que rigen en la clasificación climática más común. Si bien existen distintos escenarios de cómo podría cambiar la precipitación y la temperatura a fines del siglo XXI de manera global y en promedio, pero no se conoce con el detalle apropiado

el impacto en los cuerpos de agua de un lugar en específico. Además, se suma que el estado de la información climatológica disponible en México no es la ideal, limitando las investigaciones correspondientes. Es decir, la representatividad espacio-temporal se ve afectada por una menor concentración de estaciones de medición en zonas alejadas (como las zonas montañosas del norte del país) y, que pueden llegar a tener largos periodos sin datos. Esto limita la elaboración de investigaciones a partir de ciertos indicadores climatológicos que son utilizados a lo largo del mundo como la humedad superficial del suelo, del cual no se tiene registro en el país de manera directa.

Justificación

Si bien está perfectamente demostrado que a la fecha de la elaboración de este proyecto, el cambio climático contemporáneo está causado por las actividades humanas relacionadas con el empleo de combustibles fósiles, todavía es necesario realizar investigación respecto a la interacción de las distintas variables climáticas y su impacto en las actividades humanas debido a la alteración del ciclo hidrológico. También, se ha registrado que el calentamiento en el país ocurre de forma heterogénea y es propio de la temperatura máxima diaria.

El cambio en la temperatura y la precipitación implican necesariamente un cambio en el acceso, uso y consumo del agua para el correcto aprovechamiento de esta. Típicamente, el diseño y análisis de la infraestructura hidráulica y de los planes de uso y consumo del agua se realizan en función de los registros existentes de precipitación y escurrimiento. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta el impacto que puede tener el cambio climático. Se establece así una relación precipitación-temperatura-elevación-caudal para que sea de utilidad en futuros proyectos de gestión sostenible, como en el cálculo de la humedad del suelo, indicador climatológico en el análisis de cambio climático, el cual no es conocido ampliamente en el país y la elaboración de este trabajo permite tener un punto de partida.

Por último, se elige como zona de estudio a la cuenca del río Piaxtla debido a que es un área con poco impacto por usos del agua y cuenta con suficientes estaciones de medición de variables climatológicas (hidrométricas y climatológicas). La mayor cantidad de actividades económicas que tienen un impacto en el ciclo del agua se encuentran aguas abajo de las estaciones hidrométricas, lo cual permite identificar de forma relativamente sencilla la relación natural entre las distintas variables, con respecto al tiempo y el espacio.

Hipótesis

El calentamiento global antropogénico actual presenta efectos ya medibles en las cuencas de aportación al golfo de California: disminución de la precipitación, aumento de la temperatura máxima, aumento de la temperatura mínima y disminución del escurrimiento superficial. Lo anterior se ve reflejado en la interacción entre estas variables, su distribución espacial y con efectos económicos y ambientales, requiriendo la elaboración de propuestas de gestión sostenible.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el comportamiento de variables hidrológicas para determinar las tendencias temporales y espaciales que se presentan en la cuenca del río Piaxtla.

Objetivos específicos

- Obtener datos de precipitación, caudal, temperaturas máxima y mínima para la cuenca del río Piaxtla y analizar el comportamiento diario, mensual y anual.
- Establecer la tendencia de las series de tiempo de cada variable, tanto para cada estación de monitoreo (climatológicas e hidrométricas) como para toda la cuenca.
- Realizar la comparación del comportamiento de las tres variables individualmente y si existe relación entre la temperatura-precipitación, temperatura/precipitación-elevación y precipitación-caudal.
- Explicar el comportamiento, en función de la caracterización hidrológica, de las actividades humanas, fenómenos naturales y cambio climático, que presenten las tres variables.
- Realizar una estimación de la disponibilidad de agua en la cuenca en función de los resultados obtenidos.

Descripción del trabajo

El presente trabajo inicia con una introducción al tema: cambio climático, acceso al, así como la descripción de los objetivos y justificación de la elaboración de la tesis. Es una sección breve pues el detalle, en concreto, inicia en el primer capítulo *Antecedentes y Conceptos Generales*. Aquí, se deja claro la base teórica empleada en la tesis, se abordan principalmente conceptos de hidrología, estadística, cambio climático y sus aspectos más generales.

En seguida se realiza la descripción de la zona de estudio, en el segundo capítulo *Zona de Estudio*. Es aquí donde se describe la cuenca del río Piaxtla: localización, tipo y uso de suelo, etc., así como las características generales de la información climatológica y económica que se consideró relevante. Tras conocer la cuenca de análisis, continua el capítulo III *Metodología*, describiendo a detalle el proceso y pasos que se siguieron para: la selección de la cuenca, delimitación y caracterización de la misma, obtención de la información climatológica, análisis de la distribución de las variables, cálculo de la disponibilidad del agua, etc.

El proceso de análisis mencionado anteriormente, vital para el entendimiento de la variabilidad de lluvia, temperatura y caudal se aborda en el capítulo 4 *Análisis de Resultados*; dicho análisis muestra la relación que presentan las variables entre sí y sus impactos en la cuenca. El trabajo termina con el capítulo de *Conclusiones*, recapitulando lo más importante del análisis de resultados, pero también acerca de la totalidad del trabajo. Tras esto, se presentan las referencias utilizadas y anexos, cada uno en un apartado distinto, donde se puede consultar a fondo más información que no es propiamente el interés de los objetivos.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y CONCEPTOS GENERALES

Antes de entrar en tema, es propio explicar los conceptos más fundamentales para este trabajo, desde el ciclo hidrológico hasta el cambio climático, así como datos relevantes tanto del mundo como del país. Para mayor profundidad en cada tema se pueden consultar las referencias mencionadas. Esto es especialmente recomendado para cambio climático, pues el tema es muy extenso. En el caso de las estadísticas del agua en México, estas se actualizan con el paso del tiempo. Del mismo modo, la investigación hidrológica y de cambio climático está en constante evolución, por lo que se recomienda siempre tomar esto en consideración y contrastar con las publicaciones más recientes.

1.1. Aspectos hidrológicos

1.1.1. Ciclo hidrológico

El agua en la tierra presenta diversos procesos, los cuales ocurren de forma continua. A este conjunto de procesos se les denomina *ciclo hidrológico* (Figura 1), originados en esencia por el Sol y la fuerza de gravedad de la Tierra y con él se describe el movimiento del agua en la Tierra. Si bien el ciclo no tiene principio ni fin, es común iniciar con el proceso de *evaporación* en los océanos, los cuales son calentados por el Sol formando vapor de agua y elevándose a la atmósfera.



Figura 1. Esquema del ciclo hidrológico (USGS, 2019).

Conforme se eleva el vapor de agua se encuentra con menores temperaturas causando que el vapor se condense y forme nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes hacia los continentes. Las partículas de agua en las nubes chocan y se unen entre sí y crecen hasta que caen en forma de *precipitación* (lluvia, granizo

o nieves). Al caer puede ser interceptada por la vegetación y, en función de la permeabilidad del suelo, el agua podrá escurrir superficialmente o infiltrarse en el subsuelo para formar parte del agua subterránea.

El agua subterránea puede formar también ríos subterráneos, que pueden llegar al océano o eventualmente emerger a la superficie, uniéndose a los cuerpos de agua superficiales. A poca profundidad, el agua puede ser tomada por las raíces de las plantas y transpirada posteriormente a través de las hojas. Existe un volumen importante de agua que no fluye hacia los ríos ni al océano y se queda en el suelo, formando acuíferos, los cuales almacenan el agua por largos periodos de tiempo. Esta agua continúa moviéndose y parte de ella retornará a los océanos.

La actividad humana también tiene su parte en el ciclo: una parte del agua se utiliza en distintas actividades pero eventualmente regresa a la naturaleza (flujos de retorno), generalmente con menor cantidad y calidad.

1.1.2. Precipitación

La precipitación incluye la lluvia, la nieve, el granizo, nevisca y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre. Para que se forme la precipitación se requiere que una masa de vapor de agua en la atmósfera se eleve de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Las gotas de agua que han crecido lo suficiente para caer por efecto de la fuerza de gravedad, pueden seguir aumentando de tamaño en la propia caída. Debido a la fricción, la gota puede evaporarse superficialmente, disminuyendo su tamaño y si existe una corriente de aire puede elevarse. Este proceso de condensación, caída, evaporación y elevación se repite varias veces hasta que la gota alcanza un tamaño crítico tal que finalmente cae.

Según la causa que origina la precipitación se puede clasificar en: *convectiva*, *orográfica* y *ciclónica* (o de frentes). La primera, tiende a ocurrir en tiempos cálidos por una masa de aire caliente que asciende y se enfría hasta alcanzar la condensación. La precipitación orográfica ocurre cuando un viento húmedo (típicamente desde el mar) se encuentra con una barrera montañosa y es forzado a ascender. Por último, las ciclónicas están asociadas al paso de un ciclón o frente frío o cálido.

En lo que respecta al país, en México tienen enorme importancia los ciclones tropicales y explican gran parte de la precipitación que recibe el territorio, así como el cuándo: verano y otoño. En el caso del norte del país, también tienen importancia los frentes fríos (o simplemente frentes), los cuales aumentan la precipitación invernal. Es común pues observar que la mayor parte de la precipitación en el país se da hacia el sur y en las zonas montañosas (Campos, 1998).

1.1.3. Escurrimiento

El escurrimiento es el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre. Se puede clasificar en: *escurrimiento superficial* (por arriba de la superficie), *escurrimiento subsuperficial* y *subterráneo*, siendo la diferencia entre estos que, el último ocurre debajo del nivel freático (nivel del agua de los acuíferos). Tal clasificación no es del todo realista, pues el agua bien puede escurrir superficial, subsuperficial y/o subterráneamente en distintos puntos de su viaje hasta la salida de la cuenca.

El escurrimiento superficial es el que más rápido llega a la salida de una cuenca y se le relaciona directamente con una tormenta dada; a esto se refiere el *escurrimiento directo* y su precipitación asociada como *precipitación en exceso o efectiva*. Por su parte, el escurrimiento subterráneo puede tardar años en llegar a la salida por lo que no se le puede relacionar con una tormenta en particular. El escurrimiento subsuperficial es el más difícil de distinguir, pues puede ser tan lento o rápido como éstos. (Aparicio, 1989).

1.1.4. Infiltración

La infiltración es el movimiento del agua a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo originado por la fuerza de gravedad y las fuerzas capilares. Cuando el agua logra introducirse en el suelo, se dice que se trata de un suelo permeable, en caso contrario, esta escurre superficialmente. También si el suelo se encuentra seco, podrá absorber más agua y por más tiempo, es decir, la infiltración es mayor al inicio de una tormenta. Conforme llueve el suelo empieza a saturarse y el agua ya no puede entrar más y escurre superficialmente. Lo anterior ilustra el concepto de *capacidad de infiltración*.

1.1.5. Temperatura

La temperatura se relaciona con la actividad (movimiento) molecular que resulta de la transferencia de calor. Cotidianamente, se entiende como la magnitud física que mide qué tan frío o caliente se encuentra algo pero, como tal, la temperatura no mide calor y la forma más correcta de describirla es como el promedio de la energía de las moléculas. A lo largo del tiempo se han definido varias unidades para la temperatura fijando ciertos puntos para la escala. La escala Celsius o de grados centígrados establece el punto de congelación del agua como el cero de la escala y el de ebullición, en condiciones estándar (una atmósfera de presión o, a nivel del mar) a 100°C. Algunos autores dejan indicada la temperatura en grados centígrados sencillamente como 100°.

1.1.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de evaporación y la transpiración de la vegetación. La evaporación es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido de cuerpos de agua superficiales o de las capas cercanas a la superficie a estado gaseoso transfiriéndose a la atmósfera. Lo que interesa a la hidrología es el flujo neto de estas partículas hacia la atmósfera. Por su parte, el agua que las plantas toman para su metabolismo a través de las raíces y liberan a la atmósfera a través de las hojas es la *transpiración*.

Como se puede ver, el ciclo hidrológico es muy amplio y tiene una gran importancia para los ecosistemas naturales, el clima y las actividades humanas. Es de hecho, el agua en sus tres estados como uno de los factores importantes que permiten la vida en el planeta. Esto más allá de la dependencia de los seres vivos al agua, pues la formación de nubes y precipitación tienen un impacto importante en la temperatura del planeta. En último lugar, también permite la distribución del agua prácticamente en todo el mundo, lo cual aprovecha en gran medida el humano para las actividades económicas y la generación de energía.

1.1.7. Cuencas y ríos

1.1.7.1. Cuenca hidrográfica

La *cuenca hidrográfica*, (*cuenca hidrológica* o simplemente *cuenca*), es el área de la superficie terrestre que drena una corriente a un lugar determinado. En otras palabras, es el área en la cual el agua que precipitó (o proveniente del deshielo) fluye superficialmente y converge a un punto de salida. Es importante mencionar que, el agua que se infiltra no necesariamente converge al mismo punto que el agua que escurre sobre la superficie. Al perímetro de la cuenca que delimita sus fronteras, se le denomina *parteaguas* (*divisoria de*

aguas¹) y, para el caso del escurrimiento superficial, se encuentra en las zonas más altas de la misma. De tal modo que, el principal factor que determina la cuenca es la topografía del terreno (Figura 2). Eventualmente se forma un entramado de ríos, arroyos y barrancos que conducen el flujo del agua hacia un *cauce principal*, que es el que normalmente da nombre a la cuenca (ej. cuenca del río Piaxtla). Los ríos que no forman parte del cauce principal se llaman *corrientes tributarias*. Así, el agua que se mueve por toda la superficie de la cuenca constituye una *red de drenaje*.



Figura 2. Parteaguas de cuencas hidrológicas según la topografía. Se muestran tres cuencas abiertas con descarga al mar, su parteaguas y redes de drenaje.

La Figura 3 representa las partes de una cuenca y también ejemplifica la clasificación de los tributarios. La red de drenaje inicia con tributarios de primer orden (1) y van aumentando conforme más ríos se unen al cauce; para esto se requieren que se unan al menos 2 tributarios del orden anterior. Por ejemplo, para tener un tributario de orden 3, es necesario que a este se unan dos o más tributarios de orden 2. El orden de la cuenca será el orden del cauce principal en su salida.

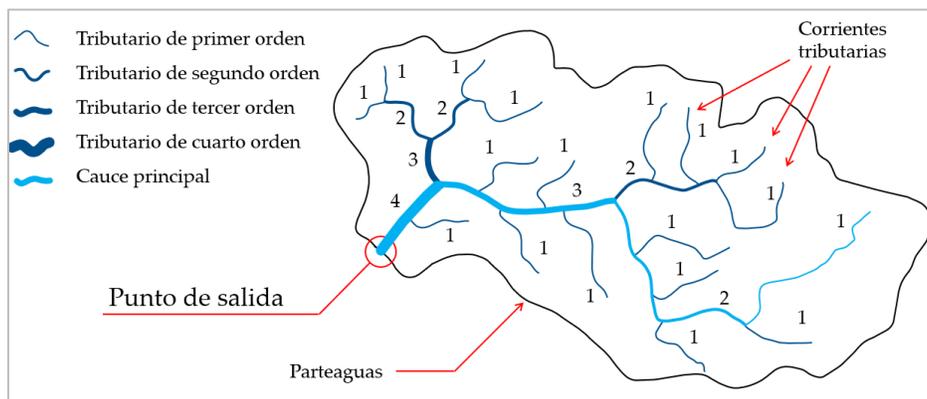


Figura 3. Características de una cuenca (abierta). Modificado de Aparicio (1989).

¹ Divisoria de aguas y cuenca hidrográfica son términos más comunes entre autores españoles.

1.1.7.2. Clasificación de las cuencas

Ya se mencionó que los ríos bien pueden llegar al mar o no y esto origina la clasificación más común de las cuencas según su salida (Figura 4):

- *Cuenca exorreica (abierta)*: Cuenca que tiene una salida o punto de descarga fuera de los límites del parteaguas, como a un cauce mayor o al mar. De este modo una cuenca puede componerse a su vez de subcuencas exorreicas.
- *Cuenca endorreica (cerrada)*: Su punto de salida se encuentra dentro de sus límites y si el suelo (impermeabilidad) lo permite pueden dar origen a un lago.
- *Cuenca arreica*. En este tipo de cuenca el agua se evapora o se infiltra antes de formar una red de drenaje. Algunos arroyos y riachuelos que no descargan en ningún río u otro cuerpo de agua son un ejemplo del escurrimiento de estas cuencas.

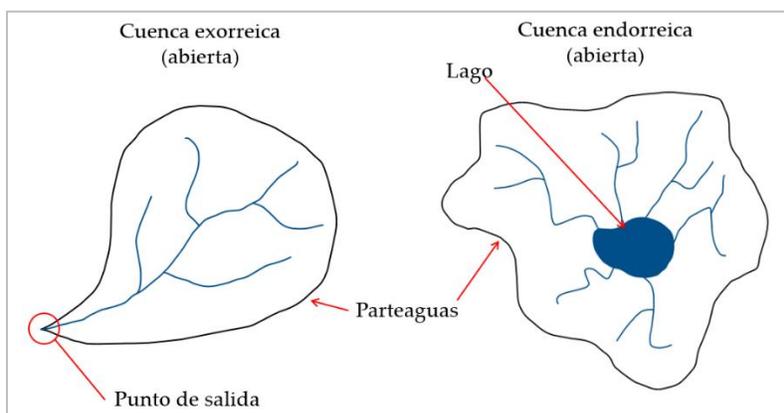


Figura 4. Cuencas exorreica y endorreica. Modificado de Aparicio (1989).

1.1.8. Pérdidas de precipitación

Las pérdidas de precipitación son el volumen de agua que no contribuye al escurrimiento directo, es decir, son la diferencia del volumen de agua proveniente de la precipitación y el volumen de agua que llega a la salida de la cuenca; se integran por los procesos de interceptación (vegetación y construcciones), infiltración, retención en depresiones del terreno y evapotranspiración. De estos procesos, la infiltración es el más importante en cuanto a volumen, por lo que en la práctica es común calcularla con distintos modelos de pérdidas en función de la información disponible, entre los que se encuentran el coeficiente de escurrimiento y el número de curva.

1.1.8.1. Número de Curva

El número de curva (*NC*) es un parámetro hidrológico que permite caracterizar el potencial de escurrimiento superficial en una cuenca, o precipitación efectiva que produce una tormenta. Tal parámetro proviene de la representación gráfica de la precipitación total y la precipitación en exceso (o efectiva) en una cuenca, pues forman una serie de curvas con valores de 1 a 100, donde 100 indica una superficie impermeable o corresponde a un cuerpo de agua (Figura 5). La precipitación en exceso se refiere a la precipitación que genera escurrimiento superficial y existen diversos métodos para calcularla; uno de ellos a partir del método

propuesto por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés, anteriormente conocido como Soil Conservation Service, SCS) (Chow et al, 1994, García 2020).

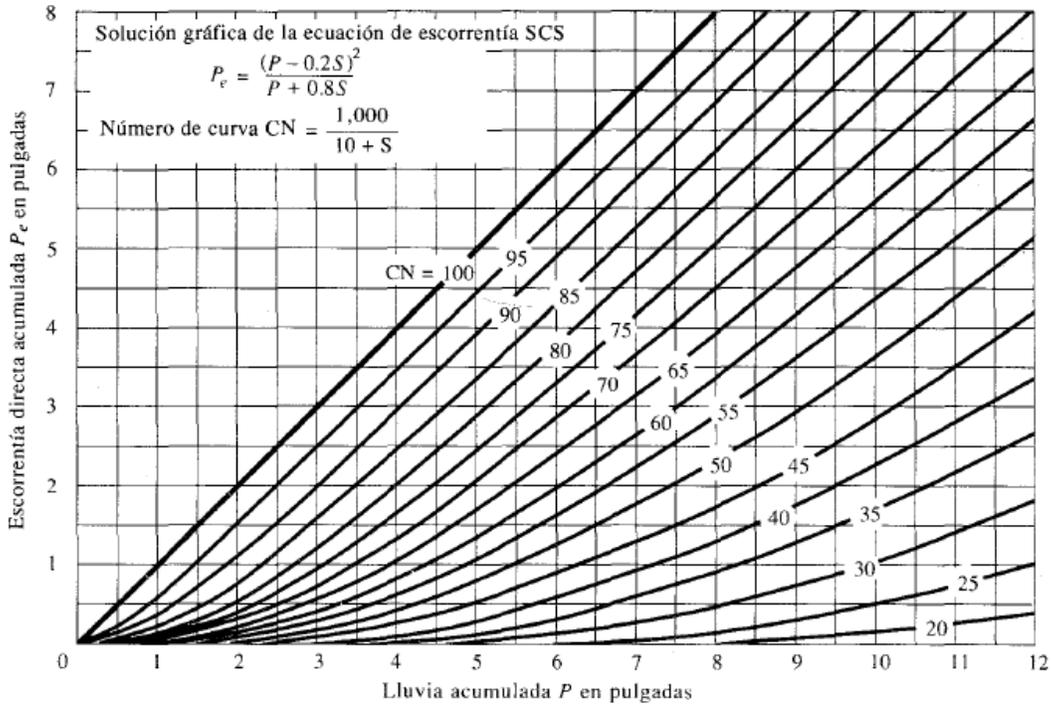


Figura 5. Solución gráfica a la ecuación de escurrimiento del SCS (Chow et al, 1994).

La altura de precipitación total P se relaciona con la altura de precipitación efectiva Pe mediante las curvas de la Figura 5 o, algebraicamente mediante la ecuación 1 (en milímetros):

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{5080}{NC} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20320}{NC} - 203.2} \quad 1$$

$$Pe = 0 \quad \text{si} \quad P - \frac{5080}{NC} + 50.8 \leq 0$$

El número de curva NC depende de las características edafológicas (tipo de suelo), uso de suelo y vegetación de la superficie de la cuenca. Debido a la gran variabilidad que se presenta en la combinación de estos factores, el cálculo para una cuenca completa puede resultar complicado. En el Anexo 1- 1, Anexo 1- 2 y Anexo 1- 3, se presentan algunos valores del número de curva para ciertos usos de la tierra y la clasificación hidrológica del suelo. La última clasificación está en función de la tasa mínima de infiltración del suelo y se divide en cuatro grupos (A, B, C y D). Dentro del grupo A se encuentran los suelos que tienen alta velocidad de infiltración ($> 7.6 [mm/h]$), como lo son las arenas y gravas profundas, por su parte, al grupo D lo componen suelos con velocidades muy bajas, como son las arcillas, suelos con nivel freático alto (nivel del agua subterránea cercano a la superficie), por mencionar algunos.

1.1.8.2. Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento C_e se define como la relación entre el escurrimiento directo y la intensidad promedio de la precipitación en una tormenta (Chow et al, 1994). Este valor es difícil de determinar a partir de la información observada debido a la variabilidad de la precipitación, por lo que es más común definirlo como la relación entre el volumen de escurrimiento directo y el volumen de precipitación en la cuenca para un periodo de tiempo, esto es:

$$C_e = \frac{V_{ED}}{V_P} \quad 2$$

Donde: C_e es el coeficiente de escurrimiento (adimensional), V_{ED} es el volumen de escurrimiento directo (ΔtQ) y V_P el volumen de precipitación en la cuenca (PA).

El método depende de la disponibilidad de registros simultáneos de precipitación y escurrimiento de un evento de lluvia.

Cuando no se dispone de la información suficiente, en México, la norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, *Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*, establece la metodología para calcularlo a partir de información disponible del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual de una cuenca como:

$$C_e = \begin{cases} K \frac{P - 250}{2,000}, & \text{Si } K \leq 0.15 \\ K \frac{P - 250}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5}, & \text{Si } K > 0.15 \end{cases} \quad 3$$

Donde: K es el parámetro que depende del tipo y uso de suelo y P es la precipitación acumulada media anual [mm]. El valor K se determina a partir de la información de la tabla 1 de la norma (Anexo 1- 4).

Las fórmulas anteriores se consideran válidas para valores de precipitación anual entre 350 y 2,150 [mm].

García (2020) propuso una clasificación del grupo hidrológico del suelo en función de la clasificación edafológica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), coincidiendo así con la clasificación de Chow et al (1994) y el SCS y permite un uso más sencillo de las tablas de NC y C_e . De forma similar, realizó una propuesta para el tipo y uso de suelo del INEGI (Anexo 1- 5).

En ambos casos, cuando se desea determinar el valor medio de toda una cuenca, este se pondera en función del área (ecuación 6).

1.1.8.3. Ecuación de Turc

A partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo, Turc obtuvo la siguiente expresión (Remenieras, 1974; Custodio y Llamas, 2001):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}; \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad 4$$

Donde: *ETR* es la evapotranspiración potencial anual en mm, *P* es la precipitación media anual en mm y *T* la temperatura media anual en °C.

Esta ecuación es una versión simplificada de la ecuación de Turc original, que involucra también la radiación solar y la humedad relativa. Sin embargo, es más fácil aplicar la fórmula a partir de los valores de precipitación y temperatura pues son las variables que se registran en las estaciones de medición climatológica del país, como se describirá a continuación.

1.2. Medición de variables

En este trabajo son de gran interés las estaciones de registro, los instrumentos de medición y las fuentes de consulta que permiten conocer los registros diarios de las variables: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y caudal. Se describen a continuación los más comunes para el caso de México y empleados en este trabajo.

1.2.1. Estaciones de registro

Estación climatológica (E.C.)

Se denominan así a la infraestructura que alberga el conjunto de instrumentos colocados a la intemperie que permiten medir las variaciones del clima. La Tabla 1 enlista los instrumentos de medición que se manejan en las estaciones climatológicas de México, así como la variable (evento climático) que miden. Se muestra además en la Figura 6 los 4 instrumentos de una estación climatológica convencional.

Tabla 1. Instrumentos de medición de una estación climatológica.

Evento climático	Instrumento de medición
Precipitación	Pluviómetro/pluviógrafo
Temperatura	Termómetro tipo <i>SIX</i>
Evaporación	Tanque evaporómetro
Viento	Veleta o anemoscopio
Tiempo y visibilidad	Observación

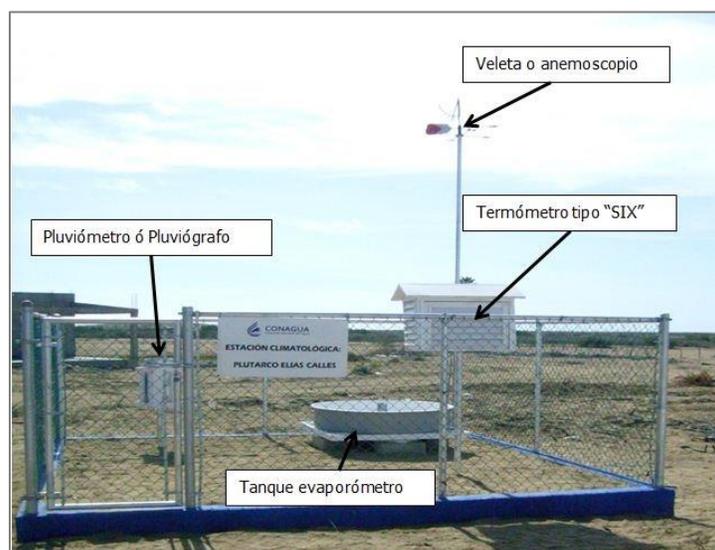


Figura 6. Estación Climatológica típica.

Estación Hidrométrica

Una estación hidrométrica (E.H.) es aquella instalación que permite obtener datos sobre el agua de los ríos (caudal, nivel, sedimentos, temperatura, etc.). Algunas son tan sencillas como una serie de reglas graduadas y otras pueden además incluir una estación climatológica. Las más simples son aquellas que cuentan con un limnómetro, que registra el nivel del río respecto a una referencia fija (Figura 7A). Otras estaciones, cuentan además con un limnógrafo y se suelen ubicar en cauces donde las variaciones de caudal son muy rápidas y es importante disponer de un registro continuo (Ochoa, 2019) (Figura 8).

Para la obtención de los distintos datos del cauce, se requiere también conocer otras variables relacionadas al nivel de la superficie del río. Por lo que las estaciones hidrométricas pueden contar también con un correntómetro para la realización de labores de aforo. Dependiendo del tamaño del cauce, este instrumento puede utilizarse con apoyo de un cable, bote o hasta de una estructura como un puente (Figura 7B).

Hay también estaciones hidrométricas automáticas, las cuales constan de un sensor tipo radar que se ubica en la margen del cauce del río y mide constantemente la cota de la superficie del agua (Figura 7C).

1.2.2. Instrumentos de medición

Pluviómetro

El pluviómetro es un aparato que consiste de cilindros de lámina que recogen el agua de lluvia a través de un embudo, protegidos contra pérdidas de agua, evaporación y salpicaduras. El agua se recoge en una probeta, dividida en milímetros, los cuales equivalen a una precipitación de un litro sobre cada metro cuadrado. La precipitación se mide una vez al día y corresponde al volumen de lluvia acumulado en 24 horas, por lo que no se puede determinar si ha ocurrido en una o más tormentas.



Figura 7. Tipos de estaciones hidrométricas. Estación con limnómetro (A), estación con cable colgante (B) y estación con sensor (C)

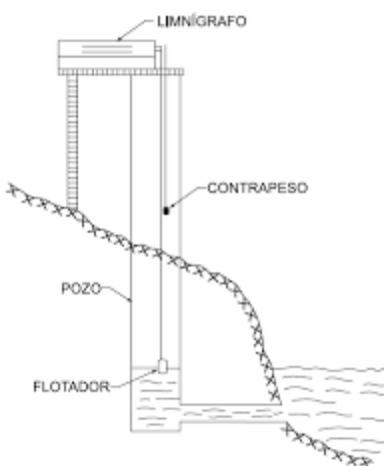


Figura 8. Limnógrafo. Esquema del interior de un limnógrafo con flotador (derecha).

Termómetro SIX

Es un termómetro usado para indicar la temperatura ambiente; también cuenta con dos índices que marcan uno la temperatura máxima y otro la temperatura mínima, generalmente en un periodo de un día.

Limnómetro

Es una regla que permite registrar el nivel de la superficie del agua respecto a una referencia fija (Figura 7A).

Limnógrafo

Es también un instrumento que permite registrar el nivel de la superficie del agua, pero con mayor precisión que el limnómetro y de forma continua, por lo que se puede conocer la variación del nivel del agua con respecto al tiempo. Es común que el nivel se registre con un flotador o boya (Figura 8).

Correntómetro

Se trata de un instrumento que permite medir la velocidad del agua y dirección. A su vez, algunos también pueden registrar la temperatura y presión.

1.2.3. Fuentes de consulta

CLICOM-CICESE

Se trata de un sitio de consulta y descarga de datos de las estaciones climatológicas del país administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). El *Climate Computing Project* (CLICOM) es un sistema de software de manejo de datos climatológicos, que fue desarrollado por las Naciones Unidas. Los datos recopilados por este se basan en las observaciones diarias, durante 24 horas finalizando a las 08:00 am. La información más reciente de los fenómenos meteorológicos e hidrométricos del país no se encuentra en el sitio de CLICOM. El retraso que pueden presentar los registros de las estaciones climatológicas operando es del orden de 5 años.

Información Estadística Climatológica CONAGUA

Es un sitio del Servicio Meteorológico Nacional donde se puede consultar la información climatológica nacional desde el año 1900 a la fecha, con información más actualizada que CLICOM-CICESE, proveniente de los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la CONAGUA. Tiene aproximadamente 55 millones de registros diarios de lluvia acumulada en 24 horas y temperatura máxima y mínima además de contar con documentos donde se encuentra un análisis de cada estación (CONAGUA, 2021).

1.3. Series de tiempo

El análisis hidrológico utiliza como base la estadística y, por ello se requiere una descripción de algunos conceptos básicos de ésta. El primer concepto a mencionar es *serie de tiempo*, el cual es una secuencia de datos (observaciones) registradas en intervalos de tiempo iguales y ordenados cronológicamente. Ejemplos de series de tiempo pueden ser la temperatura a lo largo del día, el número de viajeros que hay diariamente en una aerolínea, etc. De tal forma que una serie de tiempo puede ser diaria, semanal, anual, etc., en función del intervalo de las observaciones.

Una serie de tiempo puede presentar un comportamiento “errático”, propiamente dado por tratarse de un conjunto de variables aleatorias, sin embargo también puede explicarse como consecuencia de las 4 componentes de una serie de tiempo (Figura 9):

- Tendencia secular (regular, T), que indica el comportamiento general del fenómeno, reflejado en la evolución a largo plazo.
- Variación estacional (E), la cual representa la variabilidad de los datos debida a la influencia de las estaciones.
- Variación cíclica (C). En ocasiones las series de tiempo presentan secuencias alternas de valores “arriba” y “abajo” de la línea de tendencia que duran más de un año.
- Variación irregular (I). Debida a factores de corto plazo, imprevisibles y no recurrentes que afectan a la serie de tiempo y su impacto sobre la misma es impredecible.

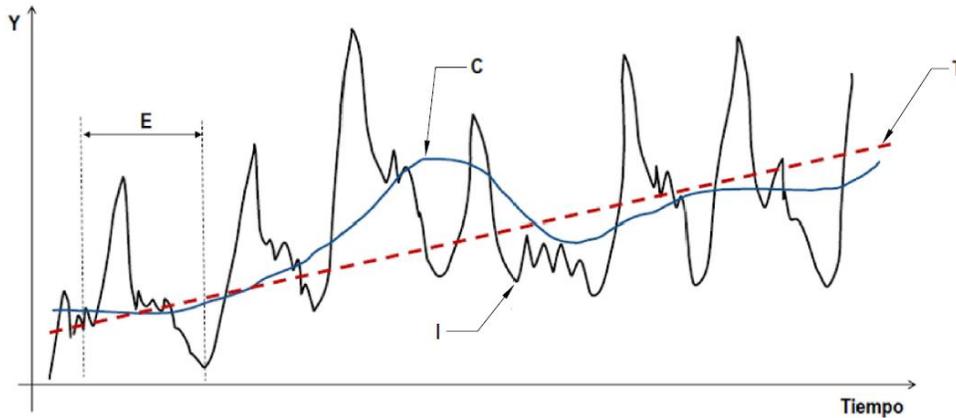


Figura 9. Componentes de una serie de tiempo. (Medina et al, 2009).

1.3.1. Análisis estadístico

El análisis estadístico permite recopilar, explorar y presentar grandes cantidades de datos para descubrir patrones y tendencias implícitos en una serie de tiempo. La situación más deseable sería conocer completamente todos los parámetros de una serie de tiempo, sin embargo por su tamaño, la recolección de información se torna complicada. Por lo que el trabajo se realiza a partir de muestras, las cuales se suponen representativas de la población. Propiamente, se define a la *población* como el conjunto de todas las mediciones de interés para alguna investigación. La *muestra* es un subconjunto de la población y se considera representativa cuando tiene características similares a las de la población (media, varianza, etc.). A continuación se describen aquellos conceptos más importantes para el desarrollo de este trabajo.

Como nota, es importante mencionar que las definiciones corresponden a datos sin agrupar y, que todos suponen la existencia de una muestra X de n observaciones x_1, x_2, \dots, x_n , todas aleatorias e independientes entre sí.

1.3.2. Parámetros estadísticos

Media (promedio)

La media muestral \bar{x} se obtiene como la media aritmética de los valores. Esto es la suma de los valores dividido por el tamaño de la muestra:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 5$$

Media ponderada

Se denomina así al promedio de los valores x_1, x_2, \dots, x_n cuando se les asocia factores de peso w_1, w_2, \dots, w_n :

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad 6$$

Hasta este momento han sido mencionadas las medidas de tendencia central, pues indican valores con respecto a los cuales los datos parecen agruparse. Existen también medidas de dispersión (o variabilidad) los cuales indican la mayor o menor concentración de los datos respecto a las medidas de centralización.

Rango (rank)

Se trata de un estadístico de orden, es decir, los datos de la muestra se ordenan según su valor (de mayor a menor). Supóngase que una muestra X consiste de cuatro observaciones a lo largo del tiempo:

$$x_1 = 5, \quad x_2 = 8, \quad x_3 = 7, \quad x_4 = 3$$

Donde el subíndice indica el orden en que fueron observadas. El rango de cada observación R_1, \dots, R_n corresponde a:

$$R_1 = 8, \quad R_2 = 7, \quad R_3 = 5, \quad R_4 = 3$$

Es decir, el primer rango corresponde al máximo valor de la serie y, el último es el mínimo valor de la serie.

En el caso de que dos o más observaciones presenten un empate en cuanto a su orden de rango, a estas les corresponde el promedio de R .

Varianza

Mide el promedio de las desviaciones al cuadrado de las observaciones con respecto a la media.

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{7}$$

Desviación estándar (desviación típica)

Es la raíz cuadrada de la varianza

$$S = \sqrt{S^2} \tag{8}$$

Valor acumulado

Se define así a la suma de los valores de la población:

$$x_{acu} = \sum_{i=1}^n x_i \tag{9}$$

Así, teniendo ya claro los conceptos estadísticos más importantes, se pueden describir las dos pruebas estadísticas que se proponen para el análisis de tendencias de series de tiempo y conceptos asociados.

1.3.3. Prueba de hipótesis

Una prueba de hipótesis es un procedimiento de toma de decisión sobre una hipótesis en particular. En otras palabras, permite aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población. Para tal efecto se define la

hipótesis nula H_0 como una afirmación sobre un parámetro de la población. De no cumplirse la hipótesis nula, entonces se cumple la hipótesis alternativa H_1 . Usualmente, la hipótesis nula define lo contrario a lo que se desea probar.

Sea pues una población dada sobre la que se desea probar si la media es igual a cierto valor:

$$H_0: \mu = 8$$

$$H_1: \mu \neq 8$$

Si se conoce la desviación estándar σ se recomienda trabajar con la distribución Z y se calcula el valor de Z_0 como:

$$Z_0 = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

Se define una zona de aceptación y una zona de rechazo de la hipótesis que se compara con el valor calculado Z_0 . Si Z_0 pertenece a la zona de aceptación entonces se concluye que H_0 es cierta y que existe evidencia para decir que $\mu = 8$. En caso contrario, H_0 se rechaza y se dice que no existe evidencia de que $\mu = 8$ (o que la evidencia muestra que $\mu \neq 8$).

Sin embargo, esto no es una conclusión al 100%, sino una inferencia estadística. Existen dos decisiones: aceptar o rechazar H_0 y, existen dos escenarios: donde H_0 es verdadera y donde H_0 es falsa. En función de la decisión y el escenario se definen 2 tipos de error, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Errores en prueba de hipótesis

Decisión	H0 es verdadera	H0 es falsa
Aceptar H0	No hay error (1- α)	Error tipo II (β)
Rechazar H0	Error tipo I (α)	No hay error (1- β)

El primer error, es el error tipo I y se define como el rechazo de la hipótesis nula cuando esta es verdadera y se denota con α , también conocida como la significancia de la prueba. Más correctamente hablando, es la probabilidad del error tipo I: $P(\text{rechazar } H_0 | H_0 \text{ es verdadera}) = \alpha$. Por su parte, el error tipo II se define como la aceptación de la hipótesis nula cuando esta es falsa (β): $P(\text{aceptar } H_0 | H_0 \text{ es falsa}) = \beta$. También, existe la denominada *potencia de la prueba* de hipótesis a la probabilidad de rechazar la hipótesis nula dado que esta es falsa: $P(\text{rechazar } H_0 | H_0 \text{ es falsa}) = 1 - \beta$

Los valores más usuales de α son 0.1, 0.01 y 0.05. Conforme disminuye el valor de α se va perdiendo precisión y por ello es más común encontrar que $\alpha = 0.05$, cuya interpretación puede asociarse a que en el 95% de los casos, estará contenido el valor verdadero en la zona de aceptación. La zona de aceptación dependerá de las hipótesis alternativas, pudiendo ser bilateral o unilateral (ver Figura 10).

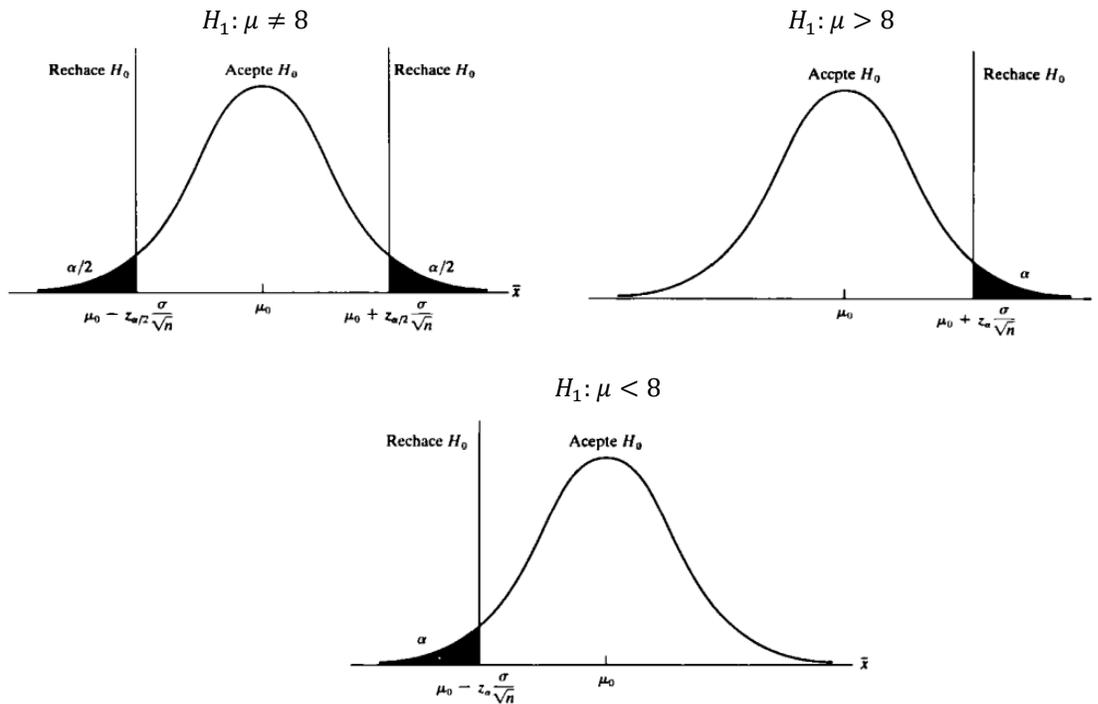


Figura 10. Regiones críticas para prueba de dos colas y una cola. Tomado de Freund, (2000).

1.3.4. Pruebas estadísticas

Las pruebas estadísticas se utilizan cuando se quiere hacer una afirmación respecto a una población (prueba de hipótesis), calculando un estadístico de prueba, el cual es un número que describe la relación entre los valores y se compara con lo que se espera bajo la hipótesis nula. Estas pruebas suponen que: las observaciones son independientes, homogéneas y siguen una distribución dada (normal, t de Student, etc.). Cuando los datos no siguen las dos últimas suposiciones (se desconoce), se realizan pruebas no paramétricas y, en caso contrario se utilizan pruebas paramétricas. También existen pruebas para series cuyos datos no son independientes entre sí (fuera del alcance de este trabajo). A continuación se describen 2 pruebas estadísticas no paramétricas que son ampliamente usadas en el análisis de series de tiempo climatológicas.

1.3.4.1. Prueba de Mann-Kendall

La prueba de Mann-Kendall está considerada dentro de los métodos más apropiados para el análisis de tendencias en series de tiempo climatológicas, es decir, datos ambientales. Consiste en la comparación entre los valores que componen una serie de tiempo en orden secuencial, considerando la hipótesis de estabilidad de la misma. Mann (1945) propone que:

En una serie temporal de observaciones ordenadas x_1, x_2, \dots, x_n la hipótesis nula H_0 es verdadera si los datos que la componen son variables aleatorias, independientes e igualmente distribuidas. Para que la hipótesis alternativa H_1 sea verdadera, los datos de la serie deben seguir una tendencia monoatómica.

Para lo anterior se define el estadístico S de Mann-Kendall como:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad 10$$

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

Donde: x_j, x_i : son las observaciones j, i de la serie de tiempo, respectivamente y siempre que: $j > i$ y, n : el tamaño de la serie de tiempo.

Se dice que el estadístico S se distribuye aproximadamente normal, con media cero y varianza $V(S)$ para el caso $\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = 0$:

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)] \quad 11$$

Por último, se calcula el estadístico Z_{MK} estandarizado, como:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad 12$$

La hipótesis H_0 es verdadera si:

$$|Z_{MK}| \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

Que consiste en comparar el valor calculado anteriormente con el valor de Z de la distribución normal para un $\alpha = 0.05$.

Hasta este punto, la prueba sólo indica la existencia o no de una tendencia en una serie de tiempo dada. Para una mejor interpretación, Alencar (2017) adaptó la significancia de la prueba según Alves *et al*, (2015), y lo resume de acuerdo con el valor que puede tomar el estadístico Z_{MK} en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción de la significancia de Mann-Kendall. Alves et al (2015), modificado por Alencar (2017).

SIGNIFICANCIA	SIMBOLOGÍA	Z
Sin tendencia	ST	0
Tendencia significativa creciente	TSC	> + 1,96
Tendencia significativa decreciente	TSD	< - 1,96
Tendencia no significativa creciente	TNSC	< + 1,96
Tendencia no significativa decreciente	TNSD	> - 1,96

1.3.4.2. Prueba de Pettitt

Pettitt (1979) propuso una prueba no paramétrica para evaluar el punto de cambio en una serie de tiempo, es decir, el momento en el cual se produce un cambio en la tendencia de los datos. Se le usa como una prueba de homogeneidad y suele aplicarse, junto con la prueba de Mann-Kendall, en estudios climatológicos. Pettitt (1979) propone que:

Sea una serie de tiempo compuesta por variables aleatorias X_1, X_2, \dots, X_n , se dice que existe un punto de cambio en X_τ si X_1, X_2, \dots, X_τ presentan una misma distribución $F_1(x)$ y $X_{\tau+1}, \dots, X_n$ presentan una distribución $F_2(x)$ distinta a la primera, es decir: $F_1(x) \neq F_2(x)$. La prueba permite probar la hipótesis de no cambio: H_0 si $\tau = n$, contra la alternativa de cambio: H_1 si $1 \leq \tau < n$.

Para ello se define el estadístico U :

$$U = 2W_d - d(n + 1) \quad 13$$

Suponiendo que R_1, R_2, \dots, R_n son el orden de rangos de las observaciones X_1, X_2, \dots, X_n de la serie de tiempo:

$$W_d = \sum_{i=1}^d R_i \quad 14$$

Para $d = 1, 2, \dots, n$.

Donde n es el número total de observaciones en la serie de tiempo y cuando U ha llegado a su máximo, se dice que este es una variación fuerte en la serie y τ es el punto de cambio.

$$X_\tau = \max |U|$$

1.4. Métodos de interpolación

Los métodos de interpolación son técnicas que permiten estimar valores (desconocidos) ubicados entre datos conocidos, basándose en la relación estadística entre estos y su causalidad, construyendo una función f . La elección de la función adecuada dependerá de las características de los datos que se analizan como la suavidad de la curva. Por ejemplo, métodos de interpolación lineales son sencillos y rápidos pero la curva resultante no es suave. En contraste, métodos polinómicos generan curvas más suaves pero su comportamiento fuera del dominio de los datos originales puede no satisfacer las características de los mismos, además de ser más complicados. Existen también métodos multivariados (x, y, z, \dots) que se recomiendan sobre los univariados cuando se conoce un conjunto de variables y/o para interpolaciones espaciales. En este punto, se describen los métodos de interés para este trabajo.

1.4.1. Regresión y correlación (lineal)

Sea una muestra de valores de tamaño n , donde y es la variable dependiente de x , por lo que se encuentran relacionadas con la ecuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad 15$$

Esta ecuación que establece una relación lineal, se le llama **ajuste lineal simple**. Donde ε suele referirse típicamente como “error”. La existencia de este valor obedece a que se está obteniendo un ajuste para variables aleatorias (tanto X como Y . Es decir, tienen una distribución de probabilidad dada (como se aprecia en la Figura 11) y el valor de la ecuación anterior es en realidad el promedio de y según cada valor de x . Matemáticamente: $E(Y|X = x)$.

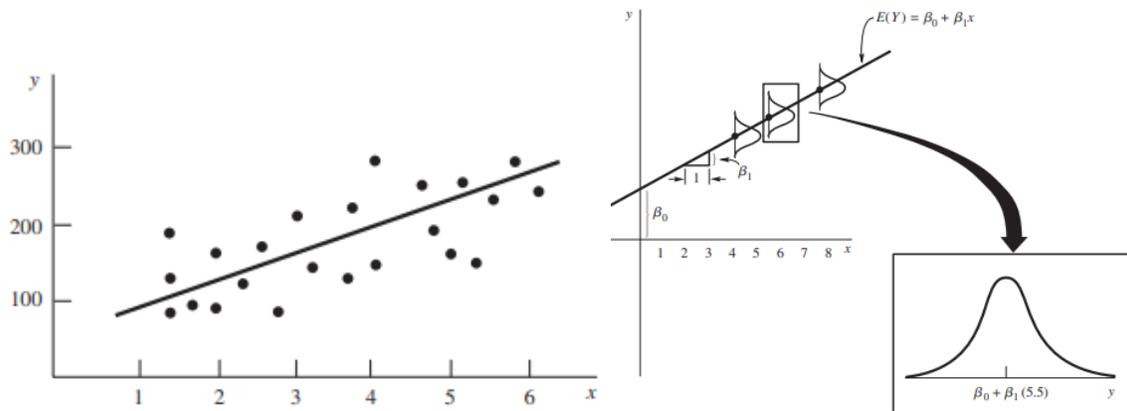


Figura 11. Curva de ajuste lineal y distribución de probabilidad (Wackerly, 2010).

La relación lineal entre estas dos variables aleatorias se puede conocer a partir de un **coeficiente de correlación muestral** r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{S_x S_y}$$

Donde: S_x, S_y son la desviación estándar de X_i y Y_i respectivamente.

El estadístico r^2 se denomina coeficiente de determinación y su interpretación es útil para encontrar la curva de mejor ajuste. Si $r = 1$ se interpreta como que existe una relación lineal perfecta, el signo estará relacionado con la pendiente. Es decir, si $r = -1$ la pendiente es negativa. Finalmente, si $r = 0$ no existe relación entre las variables

1.4.2. Ajuste polinómico

Se trata de la reconstrucción de datos faltantes de una serie de tiempo basada en una curva de ajuste o función $F(X)$, al representar un valor promedio, se representa mejor de la siguiente forma:

Si X representa la precipitación acumulada en 24 horas:

$$P_y = \begin{cases} 0, & P_x = 0 \\ F(X) - 0.5\sigma \leq F(X) \leq F(X) + 0.5\sigma, & P_x > 0 \end{cases} \quad 16$$

$$P_y \in \mathbb{R} | P_y \geq 0$$

Donde: P_y es la precipitación faltante a estimar, P_x es la precipitación medida en la estación de apoyo y σ es la desviación estándar de la variable Y . $F(X)$ es el valor esperado de P_y , pero, si $P_x > 0$ entonces P_y será un número aleatorio menor a $F(X) + 0.5\sigma$ pero mayor que $F(X) - 0.5\sigma$.

Adicionalmente, si $P_x = 0$, lo más representativo de la realidad es que P_y también lo sea. Lo anterior basado en que se debe representar correctamente los periodos de días secos consecutivos. Evitando algún comportamiento extraño de la curva de ajuste, se acota el resultado a no ser negativo.

Si X representa la temperatura máxima o mínima en un día:

$$T_y = F(X) - 0.5\sigma \leq F(X) \leq F(X) + 0.5\sigma \quad 17$$

$$T_y \in \mathbb{Z}$$

Donde: T_y es la temperatura faltante a estimar, T_x es la temperatura medida en la estación de apoyo y σ es la desviación estándar de la variable Y . Quedando nuevamente T_y definida como un número aleatorio en un rango $\pm 0.5\sigma$ respecto al valor $F(X)$. Dado que la lectura de la temperatura es un valor entero se define también T_y como un número entero.

1.4.3. Inverso de la distancia

El método del inverso de la distancia (IDW por sus siglas en inglés) supone que con el aumento de esta, el valor de una variable entre dos puntos disminuye. La variable debe ser continua en el espacio y esto justifica el uso un factor de ponderación dependiente de una función inversa de la distancia. Así pues, se define:

$$P(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{d_i^b(x, y)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^b(x, y)}} \quad 18$$

Donde: n : número de estaciones más cercanas, $P(x, y)$: precipitación en las coordenadas x, y . Es un valor desconocido, P_i : precipitación conocida para la estación i para el mismo periodo que $P(x, y)$, $d_i(x, y)$: distancia en línea recta entre la estación i y $P(x, y)$, b : exponente de ponderación, ($b > 0$). En aplicaciones prácticas se suele usar $b = 2$.

1.4.4. Polígonos de Thiessen

El método de los polígonos de Thiessen es un método de carácter geométrico (Figura 12). Consiste en extrapolar la precipitación registrada en un punto al conjunto de puntos de la cuenca que contengan a ese punto muestral como el más cercano (Aparicio, 1989).

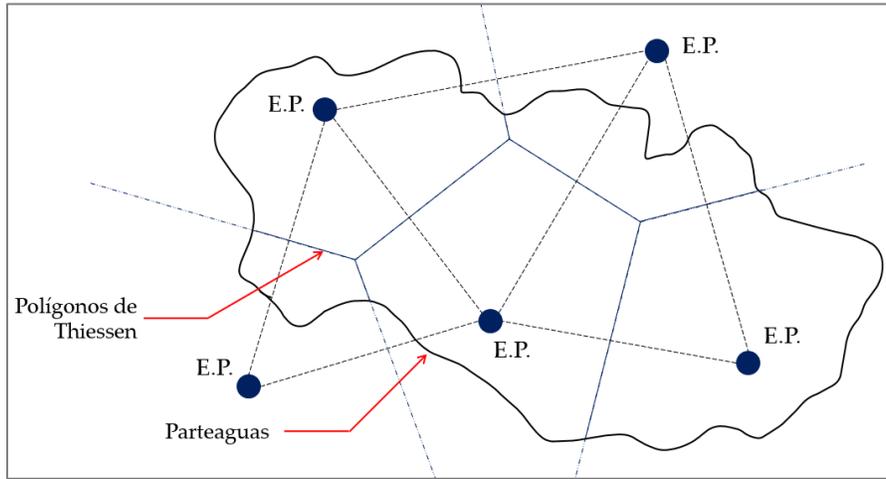


Figura 12. Polígonos de Thiessen. Basado en Aparicio (1989). Se muestran los polígonos de Thiessen (línea continua azul) de cada estación pluviométrica (E.P.) y las líneas de apoyo para su trazo (líneas azul punteadas), así como el parteaguas de la cuenca (línea negra).

La lluvia promedio de la cuenca según este método se obtiene a partir de un promedio ponderado a partir del área de influencia de cada estación (área del polígono) como:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n P_i(x, y) a_i \quad 19$$

Donde: A : área de la cuenca y a_i : área de influencia de la estación i .

1.4.5. Kriging ordinario

El método de Kriging, a diferencia de los anteriores, es un método estadístico y predice el valor de una variable climatológica como una combinación de las variables conocidas. Aquí se menciona la combinación lineal para Kriging ordinario, la cual propone que el valor en un punto no muestral $P_o(x, y)$ es igual a:

$$P_o(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(x, y) \quad 20$$

Donde: w_i : área o ponderación de los valores originales, en función de la distancia entre los puntos muestrales y el punto de predicción, tal que: $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Lo anterior parte de que la esperanza del predictor debe ser igual a la esperanza de la variable:

$$E(P_o(x, y)) = E(P(x, y))$$

y, como base, se tiene la función del semivariograma. Un semivariograma representa la autocorrelación espacial de los distintos puntos muestrales. Para el método queda:

$$w_i = \gamma_{i,j}^{-1} \gamma_{i,0} \quad 21$$

La varianza del error se obtiene como:

$$\sigma_k^2 = \sigma^2 \left(1 - \sum_{i=1}^n w_i \gamma_{i,0} + \mu \right) \quad 22$$

Los valores $\gamma_{i,j}^{-1}, \gamma_{i,0}$ se determinan a partir de un modelo teórico y se recomienda utilizar modelos acotados para garantizar una semivarianza finita, destacando los modelos exponencial, Gaussiano y esférico.

Hoy en día, los Sistemas de Información Geográfica (SIG, por sus siglas o GIS en inglés) facilitan la implementación de este método. Para este proyecto bastó utilizar las herramientas incluidas en QGIS.

1.5. Usos y disponibilidad del agua

El camino del agua a través de las actividades humanas es variado. En primer lugar, se toma de un cuerpo de agua (o fuente), se transporta y posteriormente se distribuye, para finalmente descargarse de regreso a un cuerpo de agua (retornos de agua). Propiamente, debe existir un tratamiento antes de su consumo y antes de que regrese al medio. Hasta este punto se identifican tres volúmenes: extraído, utilizado y descargado. En principio, son el mismo pero los distintos procesos anteriormente descritos hacen que difieran. La clasificación del uso del agua se basa justo en si existe una diferencia entre el volumen extraído y descargado. Si existe diferencia entre estos, se dice que se trata de uso *consuntivo* (en el proceso se consumió una parte del volumen del agua) y, si no hay diferencia, se denomina uso *no consuntivo*. Un buen ejemplo de este último son las actividades recreativas, como el turismo en las playas o también económicas como la pesca. En México, la clasificación de los usos del agua se encuentra en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), conformando la lista de la Tabla 4. En la misma se indica el volumen de agua concesionado a cada una.

Según la CONAGUA, para 2018 el 61% del agua destinada a los usos consuntivos proviene de fuentes superficiales (lagos, ríos) y, el 39% restante del agua subterránea (acuíferos). La misma Comisión establece que, el mayor uso es el que se destina al sector agrícola, con el 76% del volumen de agua. Le sigue el abastecimiento público con el 14.4%, la industria (4.9%) y, finalmente la generación de energía eléctrica la cual, excluyendo a las hidroeléctricas, consume el 4.7%. El método de riego por gravedad es el más usado en México y es también el método que registra la mayor pérdida de agua debido a fugas, infiltración y evapotranspiración. Hay municipios del país donde las pérdidas del agua que se destinan a la agricultura ascienden a un 46% (Carabias et al 2005), aunque debe reconocerse que la medición es insuficiente en el sector agrícola del país, por lo que este porcentaje puede ser distinto.

Tabla 4. Usos del agua en México.

Clave	Rubro de clasificación del REPDA	Vol. Concesionado (hm ³)	Usos agrupados consuntivos	Definición	Vol. Concesionado (hm ³)	%
A	Agrícola (inscrito + pendiente)	59 621	Agrícola	A+D+G+I+L	66 799	76.0
B	Agroindustrial	3.81	Abastecimiento público	C+H	12 628	14.4
C	Doméstico	38	Industrial integrado	B+E+F1+K	4 267	4.9
D	Acuacultura	1 159	Electricidad excluyendo hidroelectricidad	F2	4 147	4.7
E	Servicios	1 600	Subtotal consuntivo		87 842	100.0
F1	Industrial	2 663	Uso agrupado no consuntivo			
F2	Termoeléctricas	4 147	Hidroeléctricas	J	183 066	
G	Pecuario	218	Conservación Ecológica	N	9.46	
H	Público Urbano	12 591	Subtotal no consuntivo		183 075	
I	Múltiples	5 800	Total		270 917	
K	Comercio	0.08				
L	Otros	0.59				
Subtotal consuntivo		87 842				
J	Hidroeléctricas	183 066				
N	Conservación Ecológica	9.46				
Subtotal no consuntivo		183 076				
Total		270 917				

Nota: Se añaden las claves arbitrarias F1 y F2, como componentes de la clave REPDA F Industria. Estas dos claves arbitrarias permiten distinguir entre la generación de electricidad consuntiva (por centrales térmicas) de la no consuntiva (por hidroelectricidad). Fuente: Elaborado con base en CONAGUA (2017c).

También, con información de la CONAGUA, se presentan 740 mm de precipitación promedio a lo largo del país, la cual corresponde a 1,449,471 hm³ de agua. Se estima que se evapotranspira el 72.1% de este volumen y sólo el 21.4% escurre por los ríos: el 6.4% restante se infiltra de forma natural. El país no sólo recibe el agua a través de la precipitación, se define un volumen por “importaciones”, el cual proviene de otros países (Estados Unidos de América y Guatemala), con un total de 48,381 hm³ de agua al año. Tomando en cuenta este sistema hidrológico, que se puede ver en la Figura 13, el país cuenta con 451,585 hm³ de agua dulce que se puede utilizar, a este volumen se le denomina “agua renovable”.

En la misma figura también se aprecian las salidas del sistema como “exportaciones”; es agua que se entrega a otros países (EE. UU., Guatemala y Belice). Es también, el menor de todos los volúmenes del sistema hidrológico nacional.

Sin embargo, la distribución de los valores medios anteriores no es homogénea a lo largo del territorio ni en el tiempo (Figura 14). La región norte del país, así como el centro, presentan el menor nivel de “agua renovable” y, también de precipitación. En contraste, los mayores valores se encuentran en la zona sur, en estados como Chiapas y Tabasco. También, la precipitación disminuye de forma muy importante en la zona comprendida entre las cadenas montañosas, es decir, el altiplano. Destaca la península de Baja California la cual, en general, es muy seca, registrando en ocasiones los menores valores de precipitación. Adicionalmente a esto, la lluvia presenta una variación a lo largo del año: el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre junio y septiembre. Continúa lloviendo en los meses de diciembre y enero todavía, y bajan muy considerablemente para marzo (Figura 15).

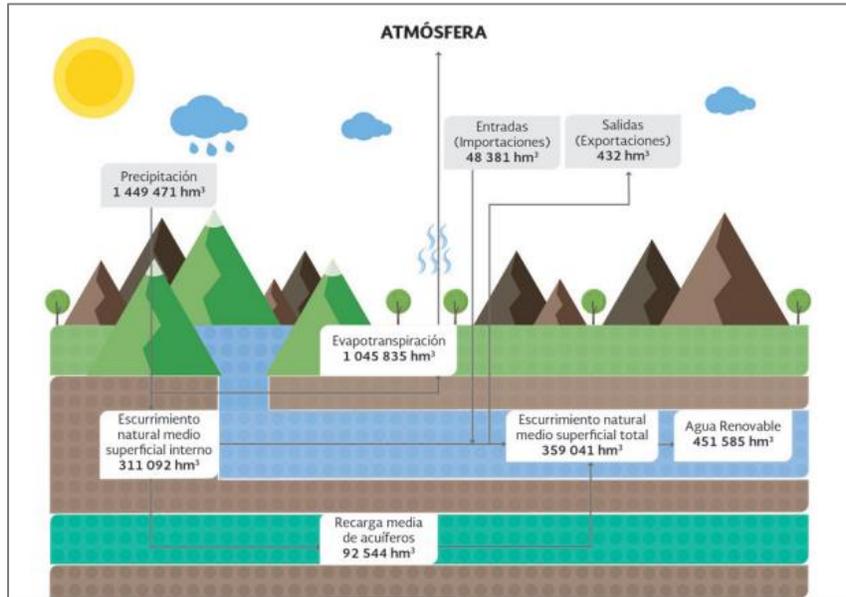


Figura 13. Valores medios anuales del ciclo hidrológico en México (CONAGUA, 2017).

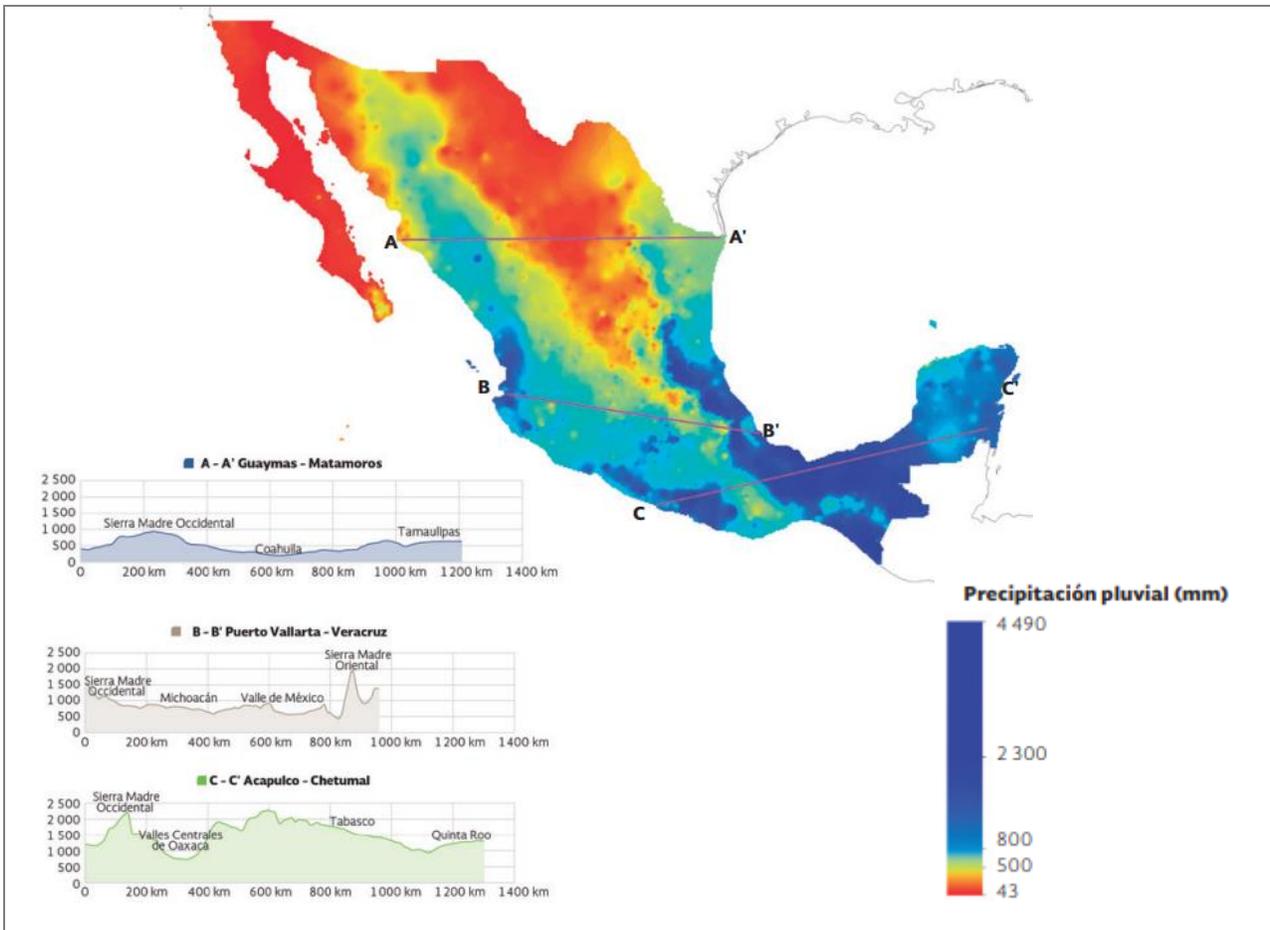


Figura 14. Precipitación normal anual en México (1981-2010). (CONAGUA, 2018).

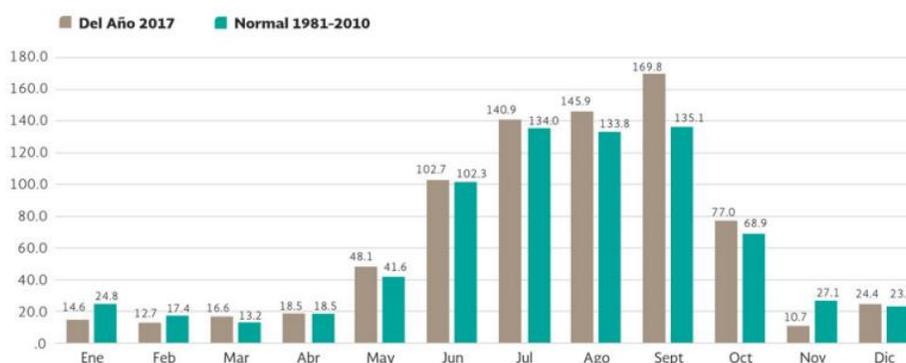


Figura 15. Precipitación normal mensual en México (1984-2010 y 2017). (CONAGUA, 2018).

1.5.1. Cálculo del balance hídrico

Este concepto es comúnmente utilizado en tópicos relativos a la evaluación de los recursos hídricos de una cuenca, siendo parte fundamental de la gestión de cuencas. Como tal, la ecuación del balance hidrológico parte de una idea sencilla: la conservación de la materia. Por lo que el sistema cuenca se puede simplificar en los distintos procesos del ciclo hidrológico mediante la ecuación de continuidad:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de almacenamiento} \quad 23$$

De forma particular, la expresión (ecuación de balance hídrico) más común encontrada en la literatura para el cálculo del balance hídrico es (Ordoñez, 2011; Morejón, Vega y Escarré, 2015; Toro *et al* 2014):

$$P = Q + ETR \pm \Delta S + I \quad 24$$

Donde: P : precipitación, Q : escurrimiento superficial, ETR : evapotranspiración, ΔS : cambios en el almacenamiento (suelo, vegetación, agua subterránea, lagos, presas, etc.) e, I : infiltración.

El estudio de cada cuenca definirá la forma final de la ecuación, por ejemplo dentro del término ΔS , quedarían incluidas presas y usos del agua, impacto de aguas subterráneas entre otros.

Esta ecuación aparentemente sencilla, puede tornarse complicada especialmente en la obtención de la I y la ET . En primer lugar, como ya se mencionó, es difícil medir el agua que circula bajo la superficie y, a falta de información de evapotranspiración, es necesario además obtener información de temperatura en la cuenca. Análogamente, ΔS también puede ser difícil de estimar. Hay autores que consideran que para un análisis de periodos suficientemente largos, entre otras consideraciones, la ecuación del balance hídrico puede completamente ignorar el efecto de ΔS (Morejón, Vega y Escarré, 2015).

1.6. Cambio climático

El **clima** es el estado medio de la atmósfera de un lugar determinado, o mejor dicho, se trata de las condiciones meteorológicas promedio de temperatura, precipitación, humedad, presión, radiación solar, viento entre otras variables, a través de un número dado de años (INEGI, 2005). El INEGI establece un mínimo de 10 años para los análisis climatológicos, pero preferentemente se deben utilizar periodos de 30 años o más. Las mediciones climáticas son “estables” con el tiempo, en cambio el **tiempo atmosférico**, el cual es el estado específico de

las variables anteriormente mencionadas en un momento dado es bastante “errático” (INEGI, 2005). Los términos suelen confundirse usándose como sinónimos muy frecuentemente.

El entendimiento del clima y sus factores es un campo extenso y que abarca tanto lo que ocurre en el planeta como la actividad solar, la órbita y rotación del planeta. Para más información en el tema se recomienda el informe técnico *Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático* (Benavides y León, 2007).

1.6.1. Observaciones generales

Se ha observado un incremento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (GEI) desde el año 1750, causado por actividades humanas. A su vez, las últimas 4 décadas han tenido una temperatura mayor que cualquier otra antes de 1850 (Anexo 1- 6). Es así que se asocian las actividades humanas con un aumento de la temperatura global de $1.0^{\circ} C$ aproximadamente sobre los niveles pre-industriales (Anexo 1- 7) (IPCC, 2018). Igualmente, el promedio global de precipitación sobre la superficie continental ha cambiado desde 1950, sirviendo de ejemplo el cambio de las trayectorias de las tormentas hacia los polos, en ambos hemisferios.

Para poder llegar a las anteriores conclusiones se creó el *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC, por sus siglas en inglés-*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Destacan sus constantes informes que resumen la investigación en el tema, así como las medidas que recomiendan y el énfasis en que es posible detener las emisiones de GEI para 2050. Al tener confirmado que existe un aumento de la temperatura, se habla de un **calentamiento global**. Por ser causado por las emisiones de GEI debido a las actividades humanas se denomina **antropogénico**, pero adicionalmente considerando sus efectos en el ciclo hidrológico (precipitación), se habla de un **cambio climático antropogénico**.

Se ha determinado que en los últimos 420,000 años la concentración de CO_2 en la atmósfera nunca fue mayor a 300 *ppm* (Figura 16, Anexo 1- 7). Las concentraciones de CO_2 además han tenido un comportamiento relativamente estable los últimos 2,000 años, como se puede constatar en la Figura 17. Mann y Bradley (1999) lograron reconstruir la variación de la temperatura global para el mismo periodo de tiempo, teniendo como resultado que esta no era mayor a $\pm 0.5^{\circ} C$ y con una ligera tendencia a la baja (ver Figura 18) (Lüthi *et al*, 2008).

En resumen, se ha observado un aumento sostenido y constante primero de GEI y posteriormente de la temperatura media global después de la revolución industrial que supera los valores naturales de los últimos 420,000 años. Aunque también hay autores que han logrado constatar que estas variaciones son mayores que las vistas en los últimos 800,000 años y no se explican por cambios en la órbita de la Tierra y su rotación o la actividad solar (Anexo 1- 8) (Jouzel *et al*, 2007, Benavides y León, 2007).

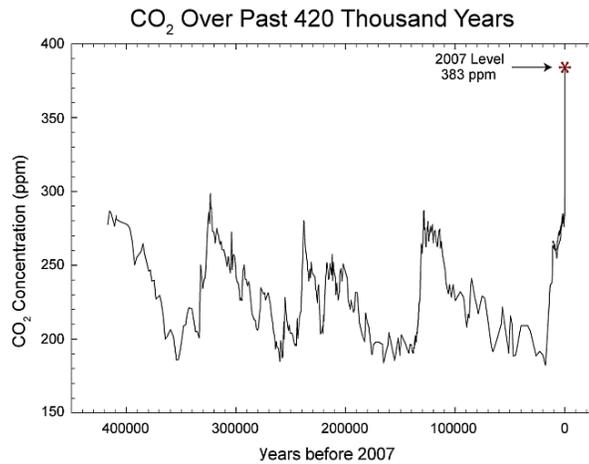


Figura 16. Concentración de CO₂ atmosférico en los últimos 420 mil años. Con información de Lüthi (2007) antes de 1950 y Keeling (1976) de 1950 en adelante.

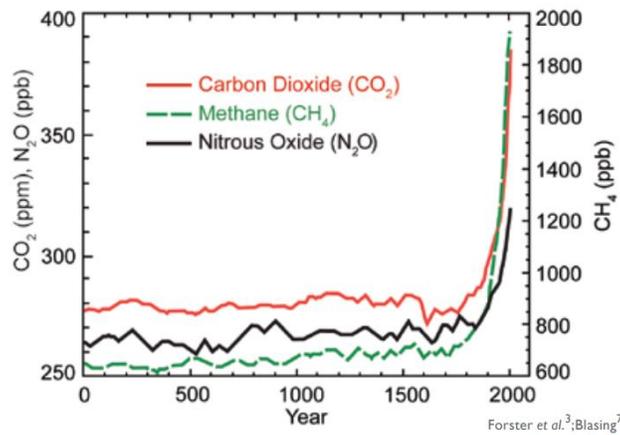


Figura 17. Concentración GEI en los últimos 2,000 años. Concentración de CO₂ (rojo), CH₄ (verde) y N₂O (negro) en la atmósfera en los últimos 2,000 años según Foster (2007) y Blasing (2008).

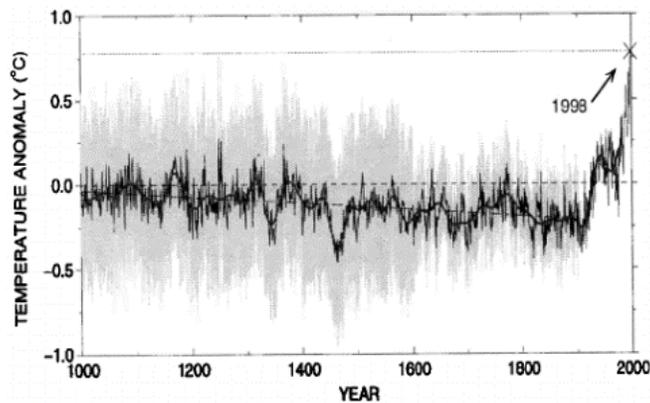


Figura 18. Reconstrucción de la temperatura de los últimos 2,000 años. Variación de la temperatura respecto de la media global según Mann y Bradley (1999).

1.6.2. Causas del cambio climático actual

De las observaciones recientes y estimaciones de los últimos miles de años se concluye que la causa del cambio climático actual es la emisión de carbono (C) de origen fósil por actividades humanas y, que otros factores naturales no han jugado un papel importante. Lo anterior gracias al **efecto invernadero**, el cual consiste en:

Tras llegar la luz del Sol al planeta, parte de esta es reflejada al espacio y otra es absorbida, calentando el planeta y emitiendo radiación infrarroja. Esta también escapa al espacio, pero en su camino se encuentra con moléculas de GEI, las cuales la absorben y reflejan nuevamente a la Tierra. El efecto perceptible es el aumento de la temperatura y, se ha determinado que sin este efecto, la temperatura promedio en la superficie sería de -18°C (Benavides y León, 2007). A esto se le denomina efecto invernadero y depende pues de la composición atmosférica, aumentando a mayor concentración de GEI (vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), gases que se encuentran de forma natural en la Tierra).

Se determinó que la fuente del carbono son primordialmente los seres vivos, debido al aumento de la relación de los isótopos de carbono $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ (Quay, Tilbrook y Wong, 1992). El ^{12}C es el isótopo que se encuentra en mayor proporción dentro de los tejidos de los seres vivos, el cual también es liberado al ambiente gracias al metabolismo de estos. Adicionalmente, se encontró que el origen del carbono entrante a la atmósfera es prácticamente de origen fósil gracias a la datación por relación ^{14}C (Bozhinova *et al*, 2014; Suess, 1986). Es decir, dada la nula concentración del isótopo ^{14}C en el carbono entrante a la atmósfera, debe provenir de seres vivos que lleven miles de años muertos. Esto permite descartar fuentes naturales como el océano, erupciones volcánicas, incendios forestales o metabolismo general de los actuales seres vivos y directamente señalar combustibles fósiles.

Se descarta como causa los factores astronómicos tales como la actividad solar reciente, el comportamiento de la órbita y rotación de la Tierra. La actividad solar no ha presentado variaciones importantes que impliquen un cambio en la temperatura para el mismo periodo de 1749 a 2007 (Anexo 1- 8) (Benavides y León, 2007; Steinhilber *et al*, 2009). Los movimientos del planeta alrededor del Sol, así como la actividad solar presentan cierta periodicidad definida en miles de años incongruente así con la variación vista tan sólo en un par de siglos.

Como ya se mencionó, los factores del clima son muchos y su interacción es muy compleja y, reducirla al efecto invernadero por GEI de carbono es bastante limitado. En el planeta existen factores que contribuyen al calentamiento, como al enfriamiento, como ilustra la Figura 19.

De entre estos últimos se encuentra el efecto del albedo que pueden originar las nubes o el hielo. El *albedo*, es la radiación incidente que refleja una superficie y, en el caso de superficies claras, reflejan mayor energía que aquellas oscuras, enfriándose. La resultante de todos los factores climáticos es un calentamiento global por factores humanos (Karl *et al*, 2009).

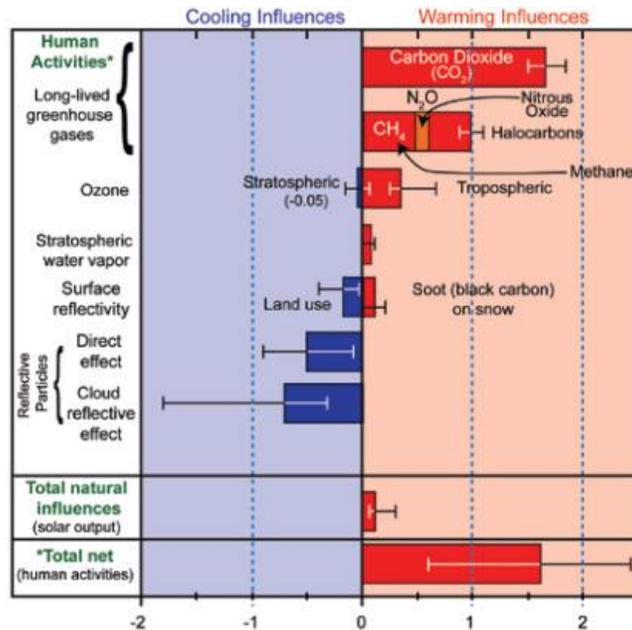


Figura 19. Mayores efectos al calentamiento o enfriamiento global. Cantidad de influencia en el calentamiento (barras rojas) y enfriamiento (barras azules) en el clima terrestre en los años post-industriales (1750 a 2005), en W/m^2 . Se muestran sólo aquellos con impacto a largo plazo, por lo que queda excluido el efecto de volcanes (2 a 3 años). Las líneas delgadas en cada barra indican el rango de incertidumbre estimado (Karl *et al*, 2009).

1.6.3. Consecuencias del cambio climático

Del efecto invernadero destaca un balance entre la energía absorbida y reflejada y es conocido como **balance radiativo**. Cualquier alteración en sus factores, siendo la actividad solar, reflectividad y absorción de varios gases tiende a buscar un nuevo balance (IMTA, 2015). Las emisiones de GEI tienen mayores impactos que el aumento en la temperatura media global, especialmente en la litósfera, esto es: los cuerpos de agua del planeta.

Globalmente, el calentamiento es (y será) muy heterogéneo, con mayor impacto en el hemisferio norte (Figura 20) y, la primera consecuencia de mayor preocupación es el cambio en la precipitación. En la misma figura se observa el cambio en la precipitación anual para cada escenario por el aumento de la temperatura (+1.5, +2, +4 [°C]) del IPCC. En general, las zonas cercanas a los polos recibirán mayor precipitación a lo largo del año así como las zonas ecuatoriales. Son las zonas intertropicales, como México, las que experimentarán una disminución en la lluvia promedio anual.

A la fecha está claro el nivel de emisiones de GEI, pero es todavía incierto lo que ocurrirá en los años siguientes. De la información que presenta el IPCC y entre varios acuerdos internacionales se han establecido metas para la completa reducción de las emisiones de GEI. Los escenarios de los que más comúnmente se hace divulgación todavía se basan en que se logra la interrupción de emisión de CO_2 para 2050. Por otra parte, los escenarios más pesimistas consideran que la tendencia actual persistiría a lo largo del siglo XXI, sin embargo sus resultados varían más y se tiene una confianza menor respecto a los otros modelos (IPCC, 2021).

El cuándo y cómo se cumplen los acuerdos y metas del IPCC y el Acuerdo de París determinará las consecuencias que se experimentarán del cambio climático. Si al llegar el 2050 la civilización sigue sin presentar un cambio significativo, los modelos tenderán cada vez más al “pesimismo”. A pesar de ello, incluso en el mejor escenario, es inevitable algún grado de cambio.

También, el calentamiento global ha causado (y seguirá causando) un aumento del nivel medio del mar debido a la pérdida de hielo que anteriormente estaba sobre los continentes, así como expansión térmica del propio océano. El IPCC menciona que desde 1971 hasta 2018 el 50% del aumento del nivel del mar se explicaba sólo por expansión térmica, mientras que la pérdida de los glaciares y la capa de hielo contribuyeron un 22% y 20%, respectivamente. En último lugar estarían cambios en el almacenamiento de agua terrestre, con un 8%. La contribución por parte de los factores de pérdida de hielo ha ido en aumento en los últimos años hasta ser los factores dominantes en 2018.

Un aspecto clave a entender es, que con cada aumento en la temperatura media global, las consecuencias del cambio climático serán cada vez mayores, como se muestra en la Figura 20. Esto además se relaciona con olas de calor, mayor intensidad de precipitación, cambio en la frecuencia e intensidad de sequías, etc.

Gracias a que el Ártico experimentará los mayores incrementos de temperatura seguramente, se reducirá considerablemente la capa de hielo del polo norte. La capa de hielo estacional en esta región podrá perderse, así como el propio hielo ártico, dependiendo del escenario, al menos una vez antes de 2050, con mayor ocurrencia entre más se caliente el planeta. Esta capa de hielo no tendrá un impacto en el aumento del nivel del mar, en contraste con los glaciares continentales, ya sea en alta montaña o, Groenlandia o la Antártida. Sin embargo, todavía existe mucha variabilidad del impacto en las capas de hielo, habiendo modelos con gran sensibilidad y otros con poca. Es en general, de los pocos escenarios con baja confianza de todo el trabajo del IPCC. La dificultad de establecer un modelo confiable para la capa de hielo antártica es que se pueden desprender grandes masas de hielo en un solo evento y, con ello acelerar su deshielo. Se cree también que este impacto mayor de la temperatura a altas latitudes impacte en la actividad de los nortes en invierno. Es muy probable que las tormentas de gran intensidad se intensifiquen y sean más frecuentes, con una tasa del 7% por cada 1°C de calentamiento global. De forma similar se prevé que la intensidad de los ciclones tropicales y los vientos picos de los ciclones más intensos se incrementen. También se espera que la precipitación aumente en la franja costera y, decrezca tierra adentro, dado por un mayor calentamiento sobre los continentes que sobre el océano.

Existen también modelos que estiman una acidificación del océano, debido al intercambio de CO₂ entre la atmósfera y el océano de forma natural: el gas se incorpora al agua en forma de anión carbonato CO₃⁻² y como resultado se liberan dos cationes de hidrógeno (H⁺). De esta forma también se puede entender al océano como un almacenamiento de carbono, sin embargo, esto tiene impactos especiales en la flora y fauna, especialmente en especies de arrecifes de coral. Además, esta capacidad de captar carbono no es ilimitada y, se cree que entre mayor sea la emisión de GEI menor será la capacidad del océano de realizar el intercambio.

Como ya se dijo, sin importar el aumento de la temperatura que se tenga finalmente, cualquier nivel de cambio climático es inevitable. Pero no es tan comúnmente divulgado que, los efectos del cambio climático anteriormente mencionados son irreversibles en escalas de tiempo desde siglos hasta milenios, especialmente aquellos cambios en el océano, capa de hielo y nivel medio del mar. Es decir, incluso si se detuvieran las emisiones de GEI para la fecha en la que se escribe esta tesis, se seguirán observando los efectos en el planeta. Aquellas consecuencias completamente irreversibles con un gran nivel de confianza en los próximos milenios son el aumento del nivel medio del océano y su acidificación. Incluso si el calentamiento global se limita a 1.5°C, el nivel medio del mar continuará en aumento los próximos 2,000 años entre 2 y 3 m. Por su parte,

los glaciares polares y de montaña continuarán derritiéndose a lo largo de las próximas décadas o siglos y, la pérdida de hielo a lo largo del siglo XXI es virtualmente segura para Groenlandia.

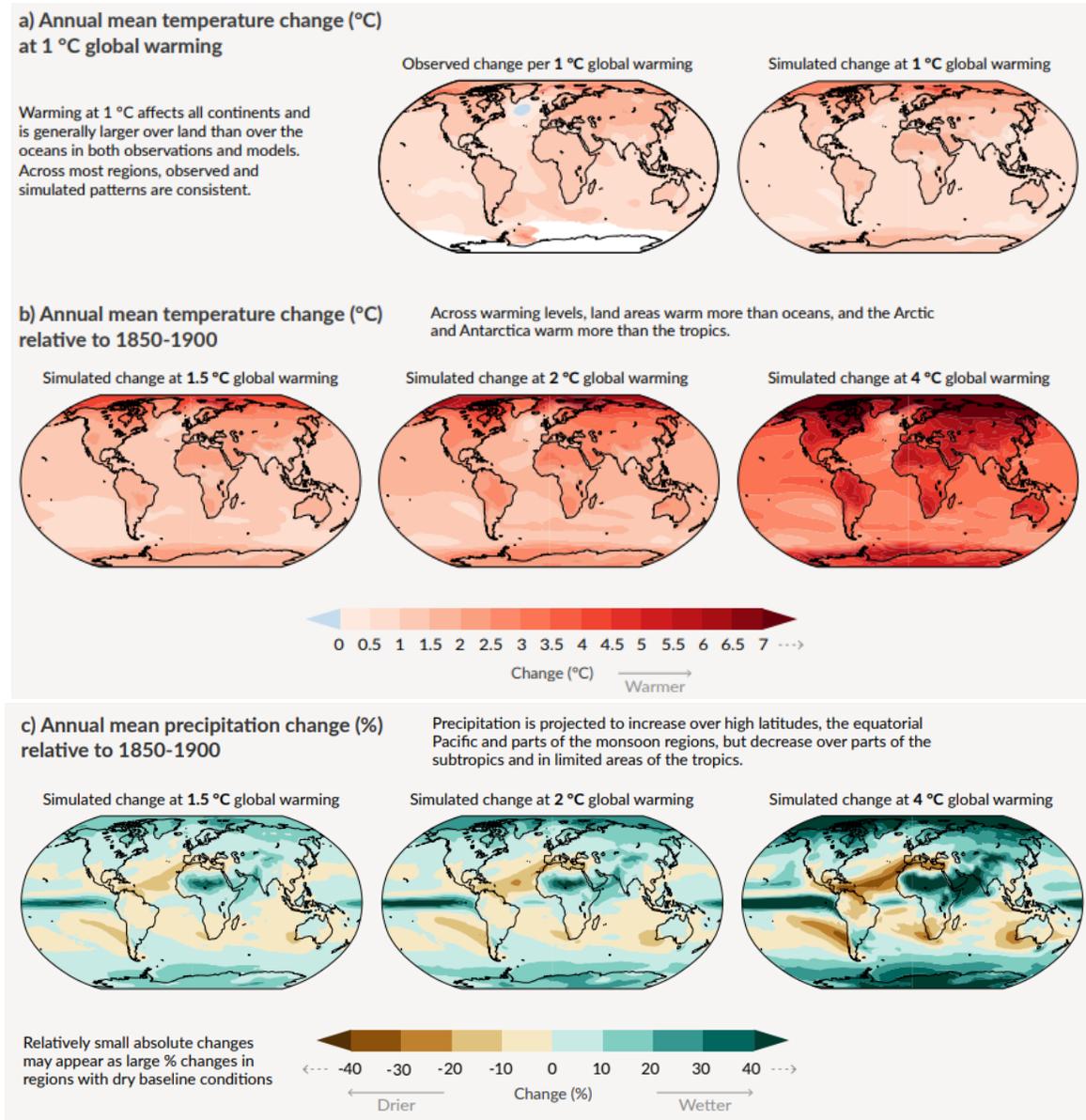


Figura 20. Consecuencias globales del calentamiento global. A y B) Cambio respecto a la temperatura media en °C; C) cambio respecto a la precipitación promedio en % (sin cambios en las emisiones) (IPCC, 2021).

El IPCC ha definido 5 indicadores principales del cambio climático, todos respecto a los niveles preindustriales que son: cambios en la temperatura superficial global, área de hielo ártico en septiembre, pH superficial del océano a nivel global, cambio en el nivel medio del mar a nivel global, nivel medio del mar para el año 2300, cuyos escenarios se encuentran en la Figura 21. Ahí mismo se muestran por líneas de colores el escenario para cada indicador según los distintos modelos de aumento del calentamiento global (desde 1.5 °C para SSP1-1.9 hasta 5°C para SSP5-8.5) y, el área sombreada en cada color muestra la incertidumbre asociada a cada uno. La línea negra indica las observaciones realizadas hasta la fecha (IPCC, 2018).

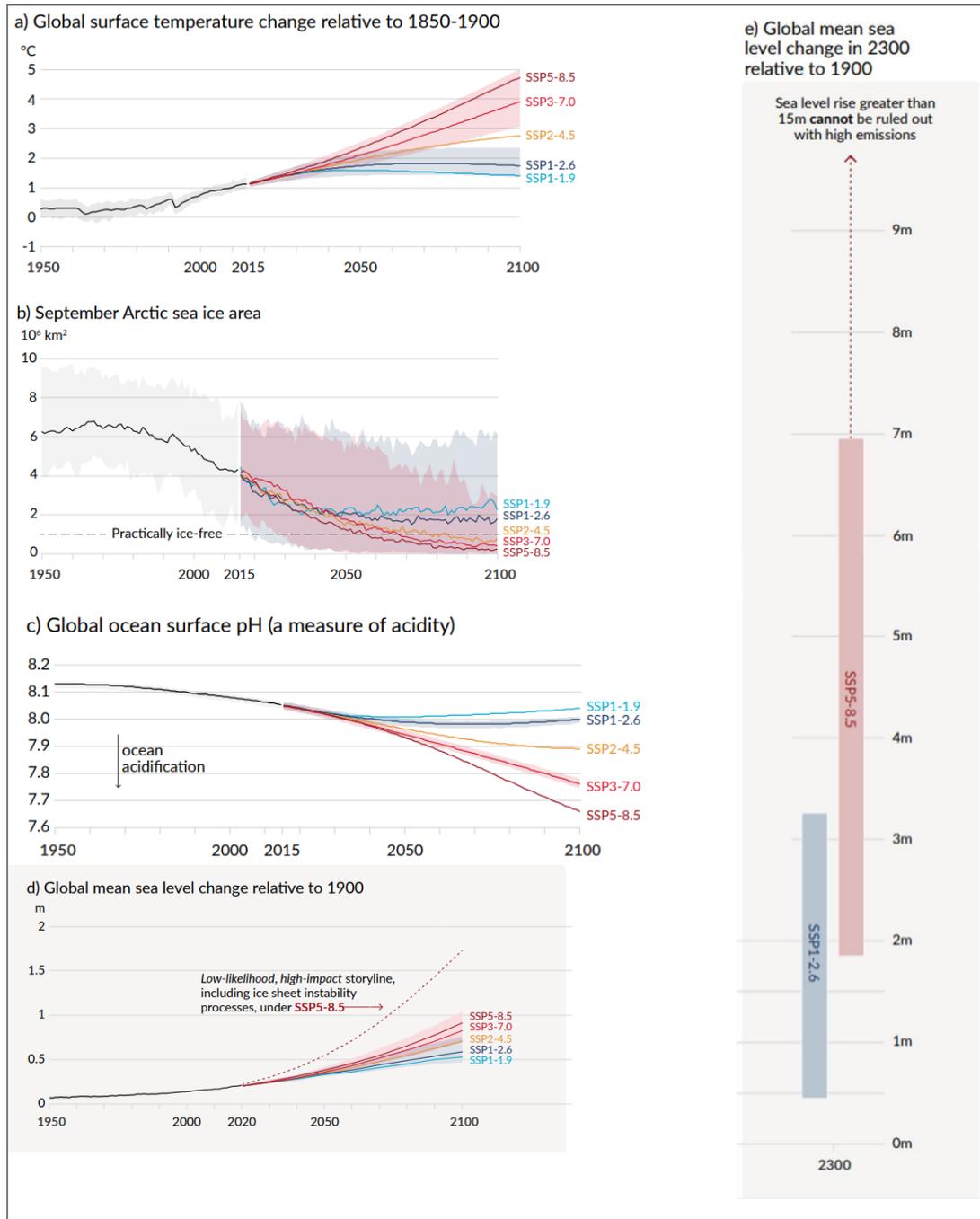


Figura 21. Indicadores del cambio climático global en los próximos 100-300 años (IPCC, 2018).

1.6.4. Estudios en México

En el país, se han elaborado diversos estudios que utilizan la información de las estaciones climatológicas, como en este trabajo, los cuales abarcan la última mitad del siglo XX y principios del siglo XXI. Martínez y Jano (2021) observaron un aumento importante de la temperatura en la península de Baja California, especialmente de las temperaturas máximas anuales. Las temperaturas mínimas también registran una

tendencia creciente pero a un ritmo menor y sólo significativas hacia la parte norte de la península. Sus resultados son consistentes con el escenario RCP 8.5², el cual establece un incremento en la temperatura media entre 0.4°C y 0.5°C por década.

En el Nevado de Toluca, Soto *et al* (2020) encontraron un incremento en la temperatura para el periodo de 1965 a 2015 que no es significativo, sin embargo aumentaron los días de helada, el volumen anual de lluvia y la variación de la temperatura a lo largo del día (oscilación térmica diaria). También encontraron que no existe mayor influencia de los efectos del niño y la niña (Niño-oscilación del Sur, ENSO, por sus siglas en inglés) en el volumen de precipitación anual.

En el país, el Niño se manifiesta generalmente como una disminución generalizada de las lluvias, contrastante con Baja California Norte y Sonora, donde aumenta la lluvia invernal. Suele pues relacionarse con graves sequías, como la ocurrida en 1997 y 1998 donde la agricultura tuvo enormes pérdidas y se tuvo récord en incendios forestales. No existe completa certidumbre de qué factores y fenómenos gobiernan la variabilidad interanual del clima en la totalidad del país y el ENSO no es suficiente (como concluyeron Soto *et al* (2020)). De entre los hallazgos de los dos estudios anteriores, destaca que existe una tendencia clara creciente en la temperatura máxima y, que las mínimas presentan un cambio menor, o que en ocasiones no es significativo. A este fenómeno se refieren como “deformación” de la oscilación térmica.

Las montañas de los trópicos registran una disminución considerable de sus glaciares y también se observa en México. Beniston *et al* (1997) explican esto debido a que el calentamiento se amplifica con la altitud. Sin embargo, esto no es la única causa que explica el retroceso de los glaciares aun cuando la precipitación aumente localmente. También se ha observado que este retroceso no es continuo, sino más bien se da por fases según se combinen aumentos en la temperatura como disminución en la humedad y precipitación. Hay casos como el Popocatepetl donde la tendencia se explica pero por la actividad volcánica (Delgado, 1997). Martínez y Fernández (2004) mencionaban que se espera que los glaciares mexicanos desaparezcan por completo en menos de 30 años.

La situación futura en México debido al cambio climático no es del todo favorable. En primer lugar, la mayor parte del país se encuentra en climas semiáridos, con poca precipitación la mayor parte del año. Por lo que cambios en la precipitación resultan especialmente amenazantes. La gran mayoría de modelos estiman un aumento en la temperatura máxima a lo largo del país y una pequeña disminución de la precipitación anual, aunque las variaciones estacionales son poco entendidas. Más específicamente, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha determinado que el mayor aumento de temperatura (máxima y mínima) ocurre en la región norte del país, con valores tan grandes como 5°C en el peor escenario para fines de este siglo (ver Anexo 1- 11 al Anexo 1- 13). En contraste, la precipitación cambia con una tendencia decreciente, siendo la península de Baja California y la de Yucatán donde se presentan los mayores decrementos, de 20% (RCP4.5) a 50% (RCP8.5) (Fernández *et al*, 2013).

Al contexto climático, se le debe sumar el socioeconómico donde, por ejemplo al norte del país, incluso un aumento en la precipitación (Figura 22) puede no ser suficiente para satisfacer la creciente demanda originada por los sectores agro-industrial y demográfico. Y todavía, es posible que el crecimiento de las temperaturas

² RCP: Escenario Radiativo de Trayectorias de Concentración Representativas. Se basan en el balance energético entre la radiación entrante y saliente en el planeta. Ej: RCP8.5 es el escenario más extremo, con un aumento de 8.5 W/m² para el 2100. Los RCP no son necesariamente equivalentes a los escenarios basados en los reportes del IPCC.

implique que disminuya la humedad en el suelo, impactando en las actividades agrícolas (Martínez y Fernández, 2004).

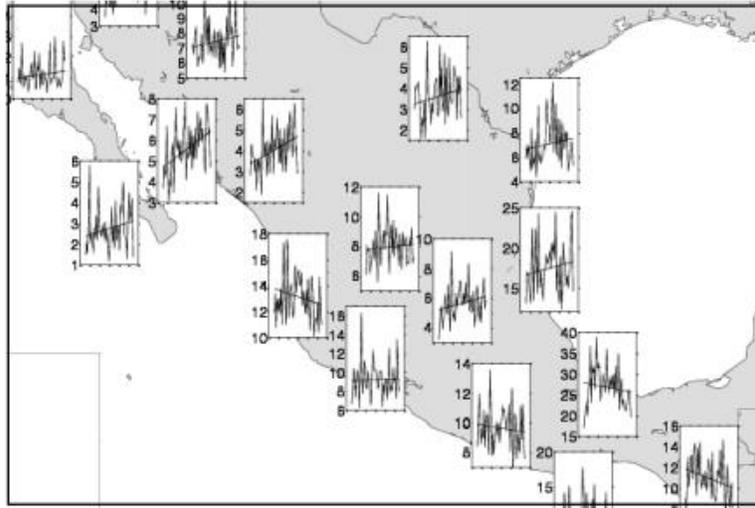


Figura 22. Tendencia de la precipitación a lo largo de México (1945-1995). Medias anuales (mm/100) de precipitación regional, elaborado por Englehart y Douglas, (2001). Tomado Martínez y Fernández, (2004).

De las diversas proyecciones hechas para el país, se estima que la precipitación de la región noroeste del país podría disminuir de 0.91 mm/día (promedio de 1961-2000) hasta 0.72 mm/día a fines de siglo (una reducción del 21% anual) (Figura 23) Los escenarios de cambio en la temperatura son del orden de 1.5 hasta 5°C en el más extremo (Fernández *et al*, 2013).

Los estudios climatológicos como los presentados hasta este punto, se basan en el análisis de una serie de indicadores que derivan del registro original de precipitación y temperatura. Estos indicadores se han definido especialmente para el análisis de cambio climático y se han coordinado por el Programa de Predictibilidad y Variabilidad Climática de Estados Unidos (US CLIVAR por sus siglas en inglés) (Anexo 1- 14). En general, el IMTA y la CONAGUA concluyen que es vital la elaboración de programas en aquellos municipios que se hayan identificado como vulnerables. Son además, municipios que ya se encuentran en una situación socioeconómica crítica. Se reconoce que nada de esto es estático y es indispensable la continua investigación para identificar zonas vulnerables, anticipar efectos y elaborar mejores políticas públicas.

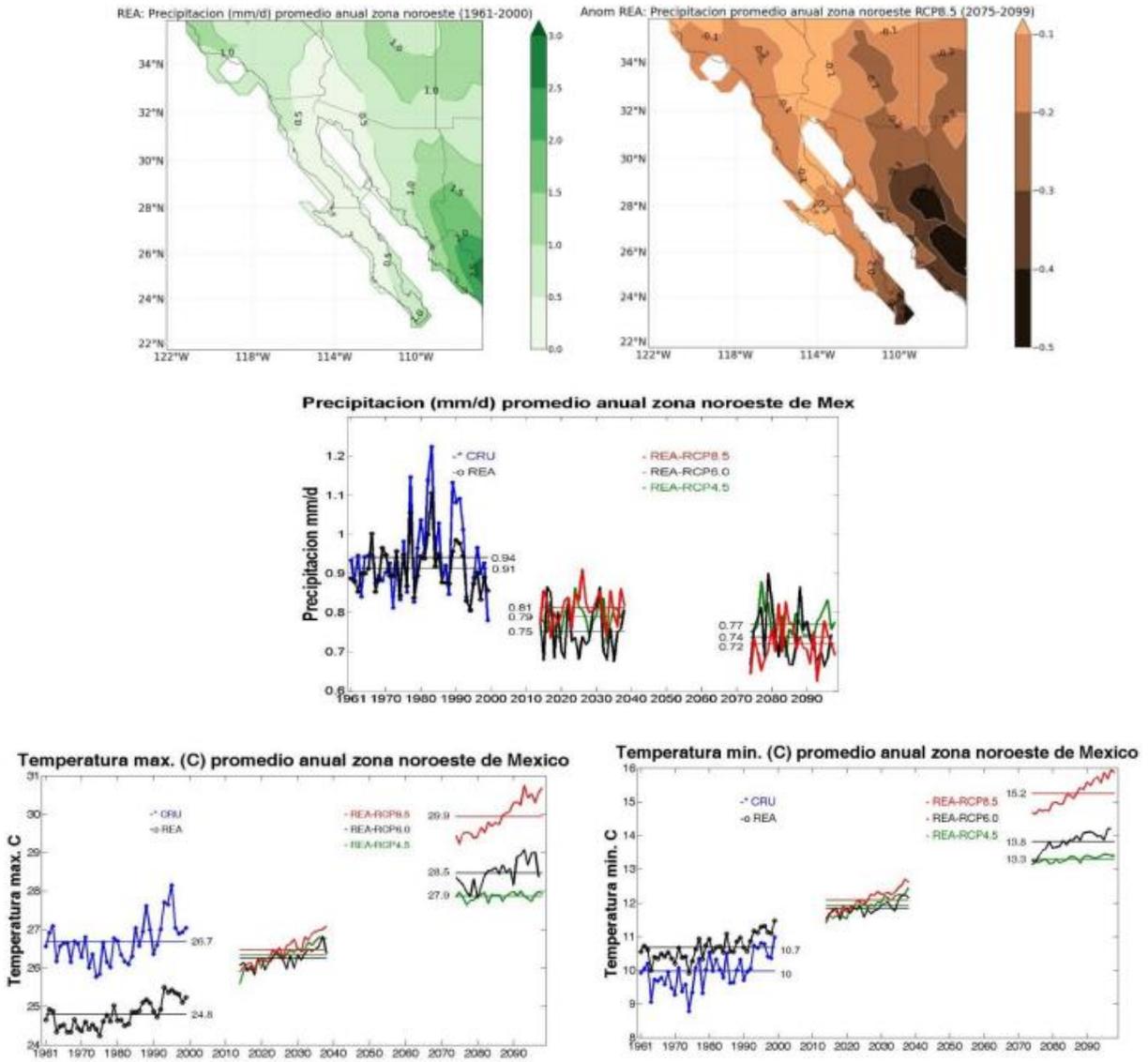


Figura 23. Variabilidad interanual de la precipitación, temperaturas máximas y mínimas promedio [°C] noroeste de México (Fernández *et al*, 2013).

CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO PIAXTLA

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Piaxtla, ubicada en los estados de Sinaloa y Durango. La cuenca forma parte de las cuencas hidrológicas que descargan al golfo de California, zona de estudio del proyecto *Análisis de las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar como base para su gestión sustentable*. Se trata de una cuenca con un esquema hidrográfico simple, con poco impacto de las actividades humanas, y una gran cantidad de estaciones de medición climatológica, características que la colocan como una zona de estudio hidrológica de interés.

2.1. Golfo de California

El golfo de California (mar de Cortés), es un cuerpo de agua salada ubicado al noroeste de México y su delimitación varía según varios autores. En primer lugar, está la delimitación oficial definida por el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, donde secretarías como la Secretaría de la Marina Armada de México (SEMAR) que delimitan el golfo con la línea recta que une Punta Arena en Baja California Sur y Altata, Sinaloa. (SEMAR, 2018) (Anexo 2- 1). Investigadores hidrólogos, biólogos, ambientales, entre otros, toman en cuenta otros aspectos como los parteaguas de las cuencas o la zona de influencia de las aguas del golfo. Así, existen quienes marcan el límite del golfo en la barra de Piaxtla del lado continental (*International Hydrographic Organization*, 1953). También hay delimitaciones todavía más al sur, en Cabo Corrientes, Jalisco (Moreno y Polanco 2000 (Anexo 2- 2); Espinosa y Valdez, 2007). El proyecto PAPIIT mencionado ha establecido que el golfo de California está limitado por la península de Baja California, los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit, siendo la frontera marítima la línea imaginaria que une Los Cabos en Baja California con Punta Mita, Nayarit (Barradas, 2021, ver Figura 24). Y la zona de estudio completa resulta de los parteaguas de las cuencas que descargan al mismo, al norte de tal línea y dentro de los límites nacionales. Es decir, la cuenca del río Colorado, que desemboca en la frontera de Baja California Norte y Sonora no se estudia en este proyecto, más allá de la frontera del país con Estados Unidos de América (Figura 25).

2.2. Localización

La cuenca del río Piaxtla se ubica del lado continental y sur del golfo de California, el cual contrasta con la zona de la península, donde las cuencas son de menor tamaño. Presenta una gran variación en el relieve que da lugar a zonas planas y montañosas que alcanzan elevaciones superiores a 3,000 *msnm*. Por su ubicación geográfica también recibe a lo largo del año fenómenos meteorológicos de interés como las tormentas tropicales (verano-otoño) y frentes (otoño-primavera), generando un régimen de lluvias en verano e invierno, así como climas variados desde cálidos hasta fríos. Debido a su ubicación al sur del estado de Sinaloa no se encuentra tan alterada por actividades agrícolas como, por ejemplo, la cuenca del río Fuerte (al norte de dicho estado).

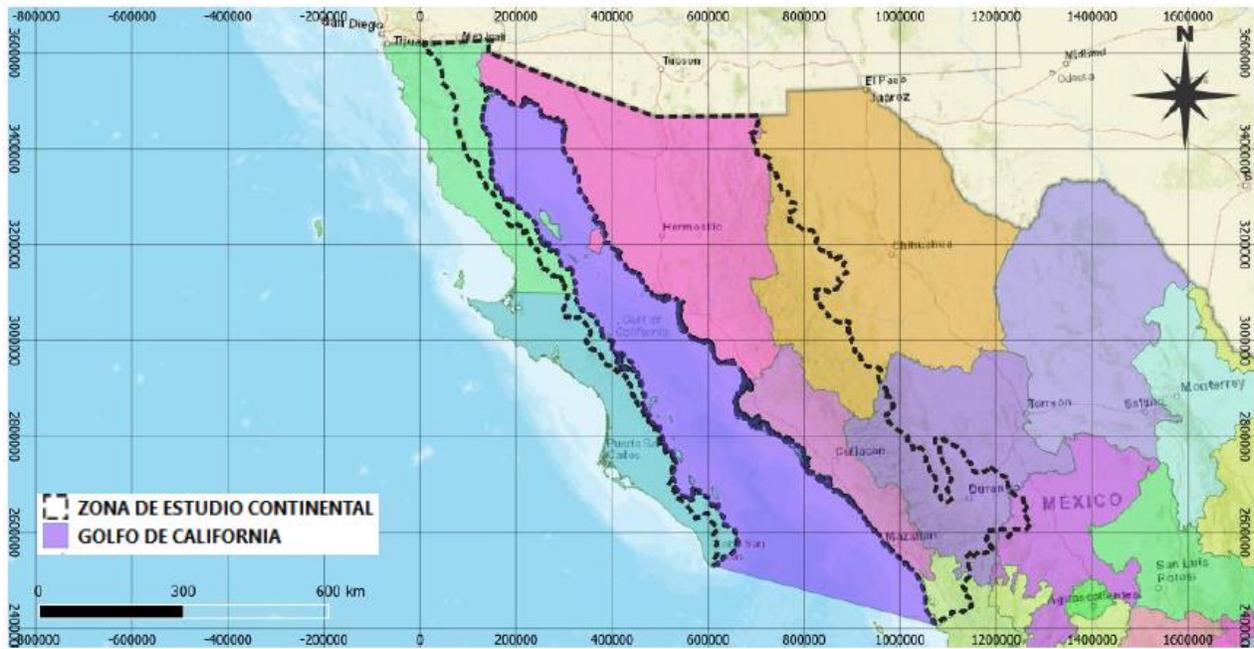


Figura 24. Delimitación de cuencas que descargan al golfo de California (Barradas, 2022).

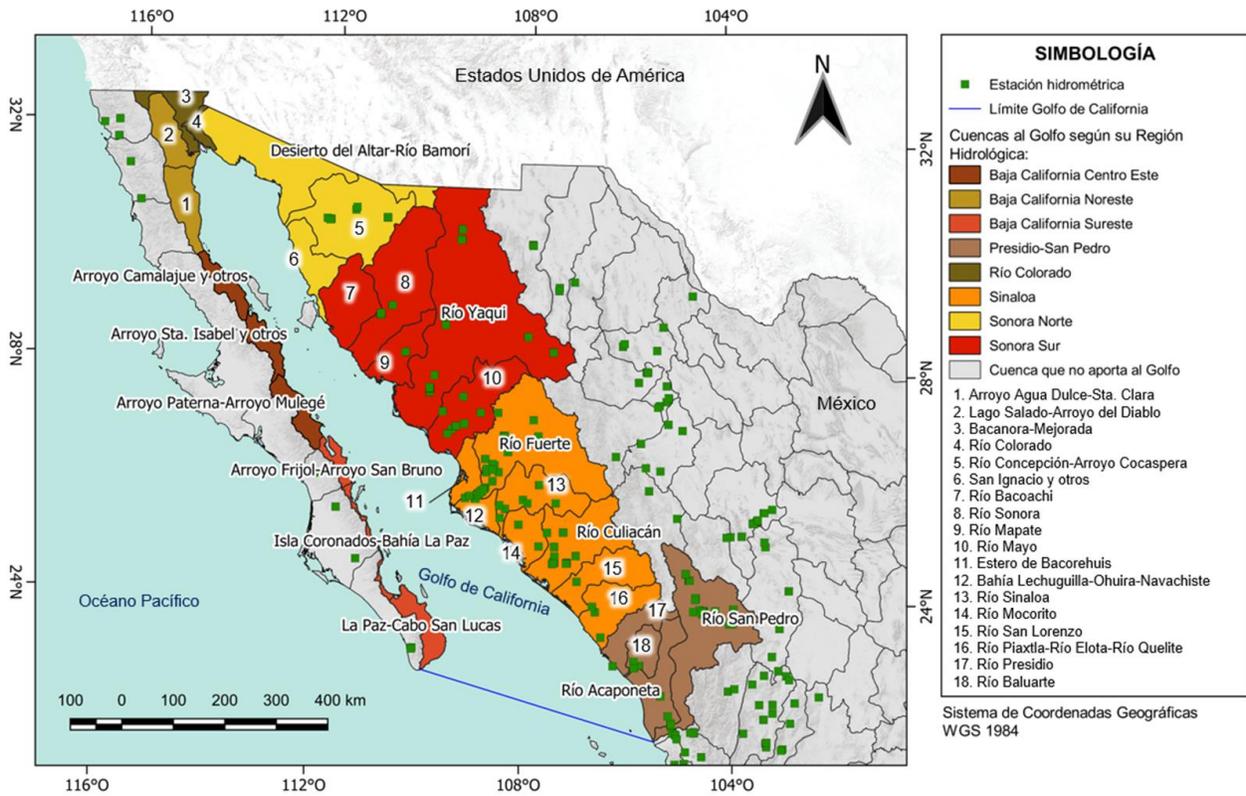


Figura 25. Cuencas que aportan al golfo de California.

2.2.1. Delimitación hidrológica

La cuenca del río *Piaxtla* se ubica en la Región Hidrológica (RH) No. 10 *Sinaloa* (Figura 26) y también dentro de la Región Hidrológica Administrativa (RHA) III *Pacífico Norte*. Toma el nombre de su cauce principal, el río Piaxtla, también conocido como río *San Ignacio*. El río desemboca al golfo de California en una zona denominada *Barra de Piaxtla*. El río Piaxtla, es el 5to mayor río dentro de los grandes ríos de Sinaloa, con un cauce principal de 220 km aproximadamente y un área de aportación de 6,984 km².

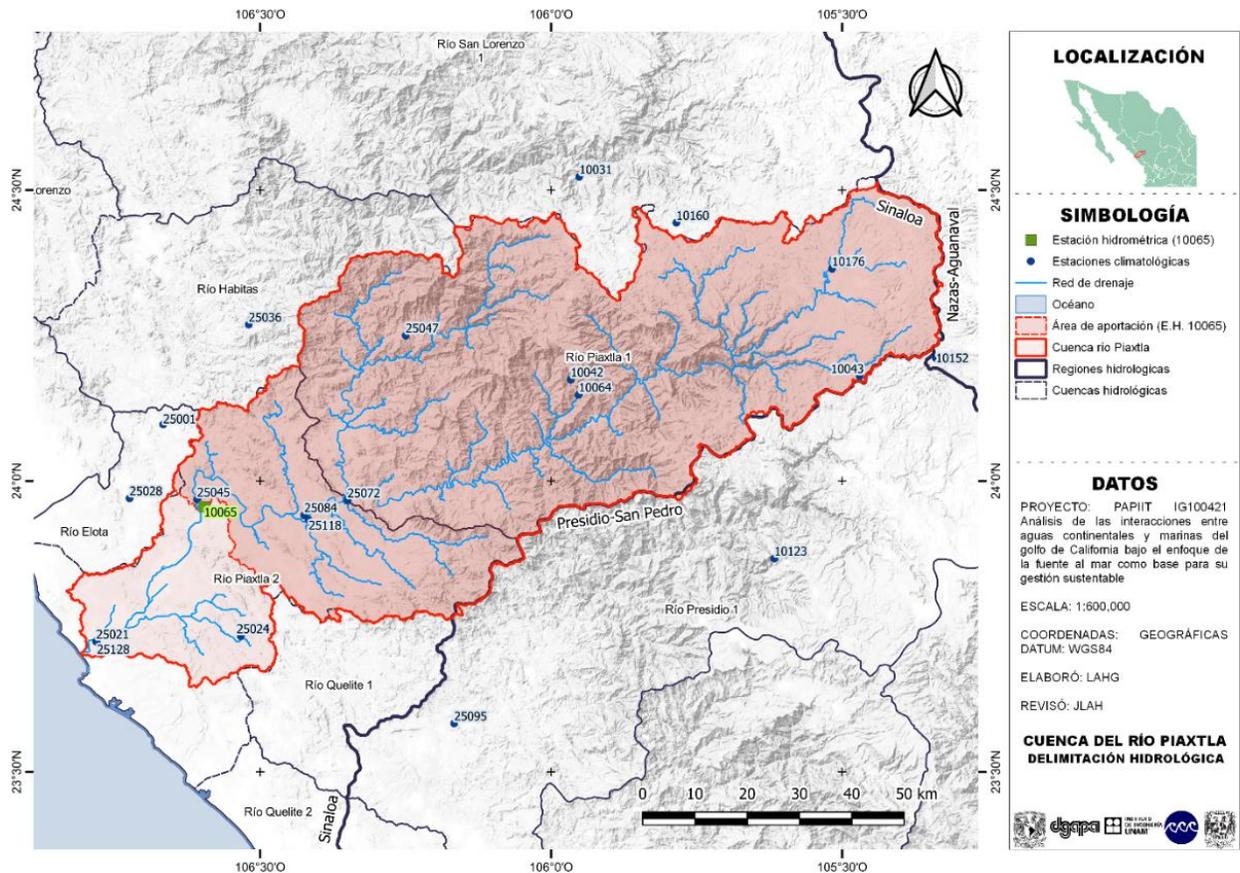


Figura 26. Delimitación hidrológica de la cuenca del río Piaxtla.

La cuenca limita con la RH 11 *Presidio-San Pedro* y la RH 36 *Nazas-Aguanaval*, como se aprecia en la Figura 26. También, se observa el parteaguas sobrepuesto a la división hidrológica que maneja la CONAGUA, así como el correspondiente a la estación hidrométrica (EH) *Ixpalino*. Más adelante se describirá a detalle esta subcuenca.

2.2.2. Delimitación política

El río Piaxtla inicia en la Sierra Madre Occidental al suroeste de Durango, en los municipios de *Canatlán* y *San Dimas*. Desde ahí, sigue con dirección suroeste principalmente hasta llegar a Sinaloa, en el municipio de *San Ignacio*. La cuenca también abarca parte de los municipios de *Tamazula* del lado de Durango y *Mazatlán* en Sinaloa. Los municipios de San Dimas y San Ignacio abarcan más del 95% de la superficie de la cuenca, en cambio, a los otros municipios les corresponde una superficie menor al 2% (Figura 27 y Tabla 5).

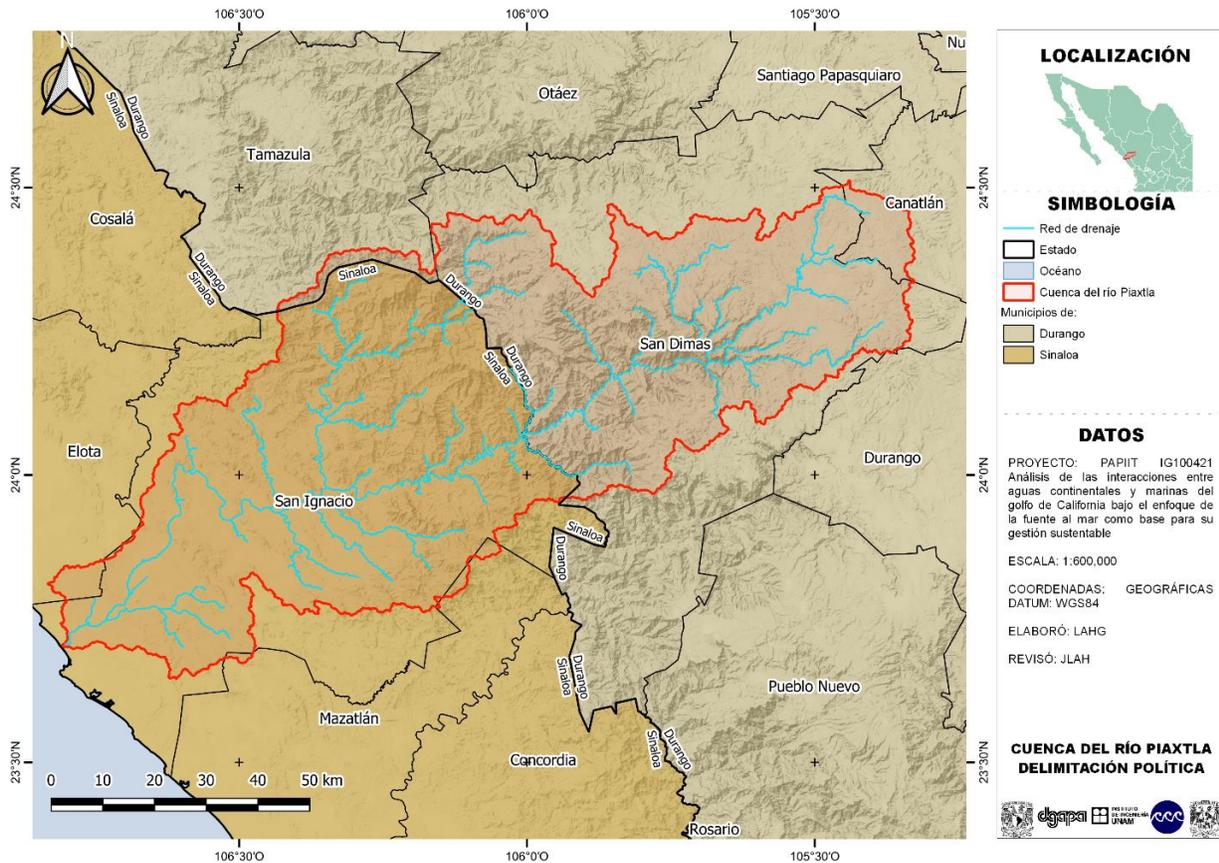


Figura 27. División política de la cuenca del río Piaxtla.

Tabla 5. Municipios en la cuenca del río Piaxtla

Estado	Municipio	Área	
		km ²	%
Sinaloa	San Ignacio	3837	55.0%
Sinaloa	Elota	51	0.7%
Sinaloa	Mazatlán	27	0.4%
Durango	San Dimas	2852	40.8%
Durango	Canatlán	139	2.0%
Durango	Tamazula	76	1.1%

2.3. Características generales

La cuenca del río Piaxtla presenta una gran variación topográfica y climática, las cuales definen las características generales de la misma. En primer lugar, la cuenca se puede dividir en dos zonas, una baja y al oeste con pocas formaciones montañosas donde se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola y la vegetación predominante es selva caducifolia. En contraste, la zona este ya cuenta con mayores elevaciones del terreno, en ocasiones casi formando cañones o valles muy estrechos. Es en esta región donde el clima predominante es templado a frío y la vegetación es prácticamente bosque de pino-encino sin mayor variación.

Adicionalmente, es también la región donde se registra la mayor precipitación. El mismo relieve es el factor que define el patrón de la red de drenaje de la cuenca y, la forma alargada de la misma.

2.3.1. Topografía y orografía

La cuenca del río Piaxtla carece de construcciones importantes que tengan un impacto en la topografía limitándose las más importantes a carreteras y puentes, así como un aeropuerto en el poblado de San Ignacio, Sinaloa (INEGI, 2019) (Revisado en Google Maps, 2021). El mayor impacto lo tiene una minera en el poblado de Tayoltita (Figura 28), ubicado en las márgenes del río, un aeropuerto sencillo y el impacto minero en las montañas.

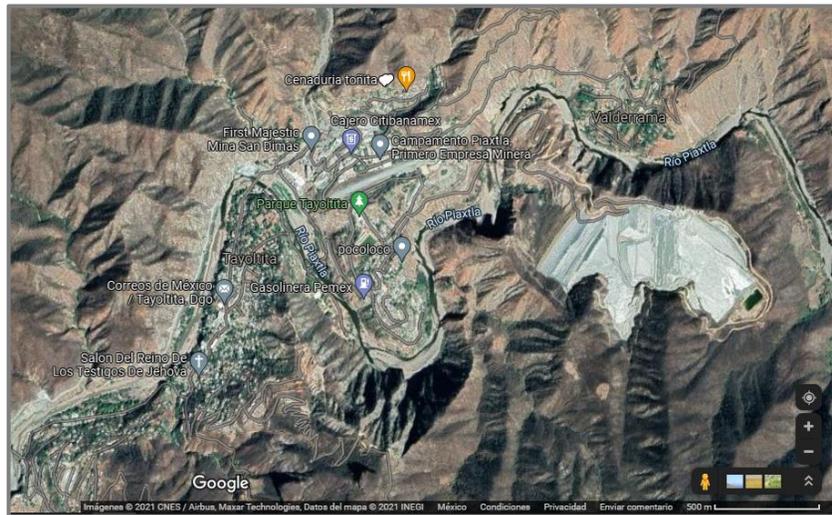


Figura 28. Poblado de Tayoltita, San Dimas, Durango.

El relieve continental que se presenta resulta suficiente para hacer una caracterización general para fines hidrológicos y no considera el impacto de actividades humanas, como el caso de la minera. No existe otra región de la cuenca que presente un impacto en la topografía.

En Durango se encuentran las zonas más altas de la cuenca, siendo la mayor elevación de 3,120 msnm. La zona de mayor variación en elevaciones se encuentra en la zona central y la más plana, hacia el suroeste, entre más se acerca el río al mar (Figura 29).

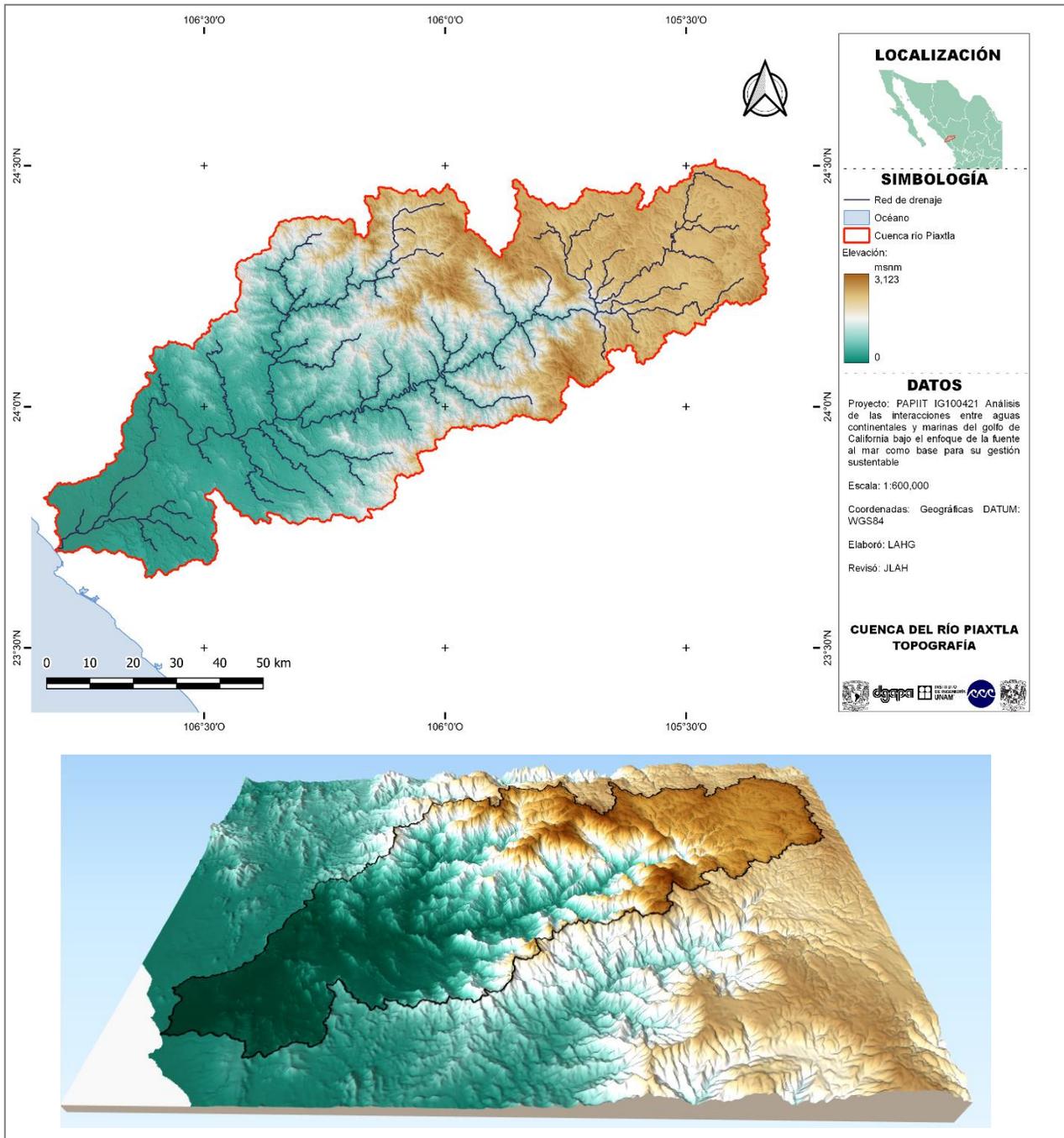


Figura 29. Elevación del terreno en la cuenca (CEM, INEGI, 2012). Mapa de elevaciones de terreno (arriba) y modelo digital en 3D (abajo).

2.3.2. Geología

En la cuenca del río Piaxtla, se encuentran distintas unidades litológicas, entre ellas destaca la presencia de riolita-toba ácida en gran parte de la cuenca, principalmente en la zona este que también corresponde a las

zonas más altas (Figura 30). También se aprecia granodiorita, esto en la parte suroeste, en menor medida y apenas apreciable, existe también limolita-arenisca, arenisca-toba intermedia y conglomerado.

La geología de la región se clasifica en función de su comportamiento hidrogeológico, esto es en: permeables, de baja permeabilidad e impermeables. En general, destacan la mayor parte de suelos permeables hacia la costa y, los suelos más impermeables corresponden a las rocas del batolito en la sierra de Sonora y Sinaloa.

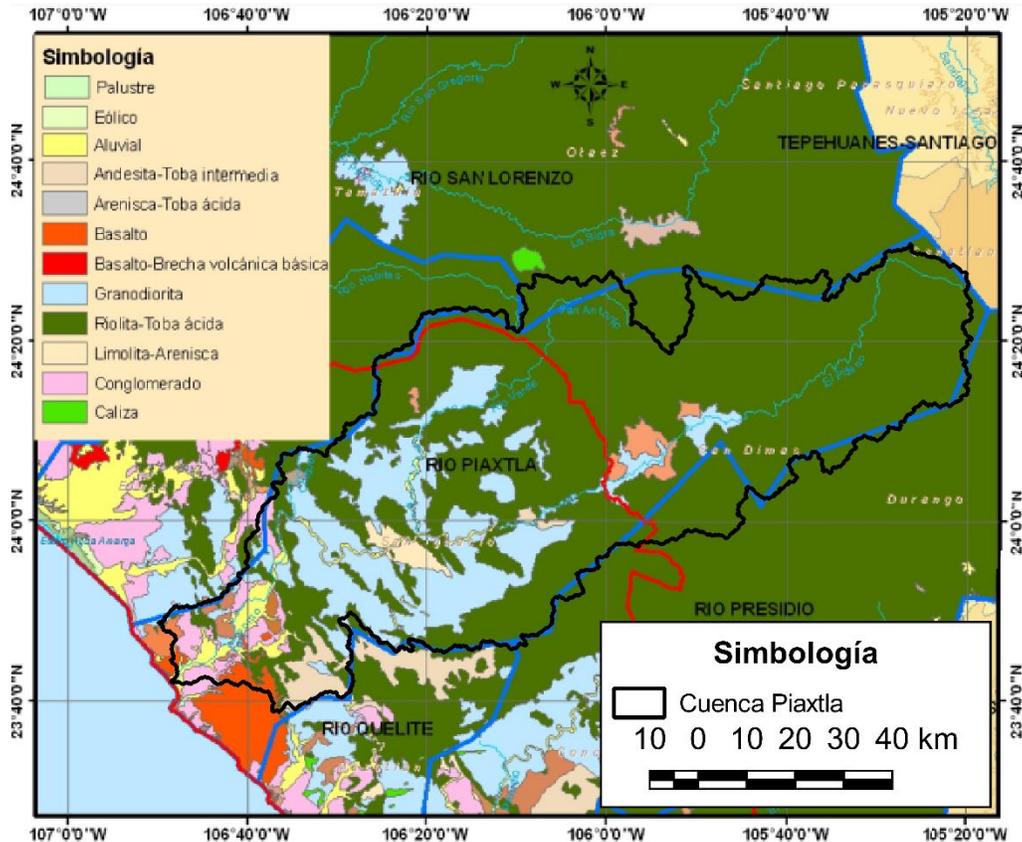


Figura 30. Mapa geológico de la cuenca del río Piaxtla, modificado de CONAGUA (2015).

La historia geológica de la zona se puede sintetizar en dos periodos importantes. Uno inicial que corresponde al Precámbrico e inicios del Cenozoico que dio origen al paisaje actual de las zonas de la sierra, con estructuras dómicas, fallas y fracturas. El segundo, da a lugar hacia el final del Cenozoico con la combinación de los fenómenos de marea, oleaje y pluviales que originaron la planicie costera, barras, albardones y esteros (CONAGUA, 2015).

2.3.3. Clima

En la cuenca predominan los climas secos y cálidos, según el Sistema de Köppen modificado por García (1964), como se aprecia en la Figura 31. En general, entre menor sea la elevación más cálido y seco es el clima. Los climas más fríos corresponden a las zonas más altas. Predominan en la cuenca los climas semisecos y cálidos, especialmente hacia la costa y el centro de la cuenca.

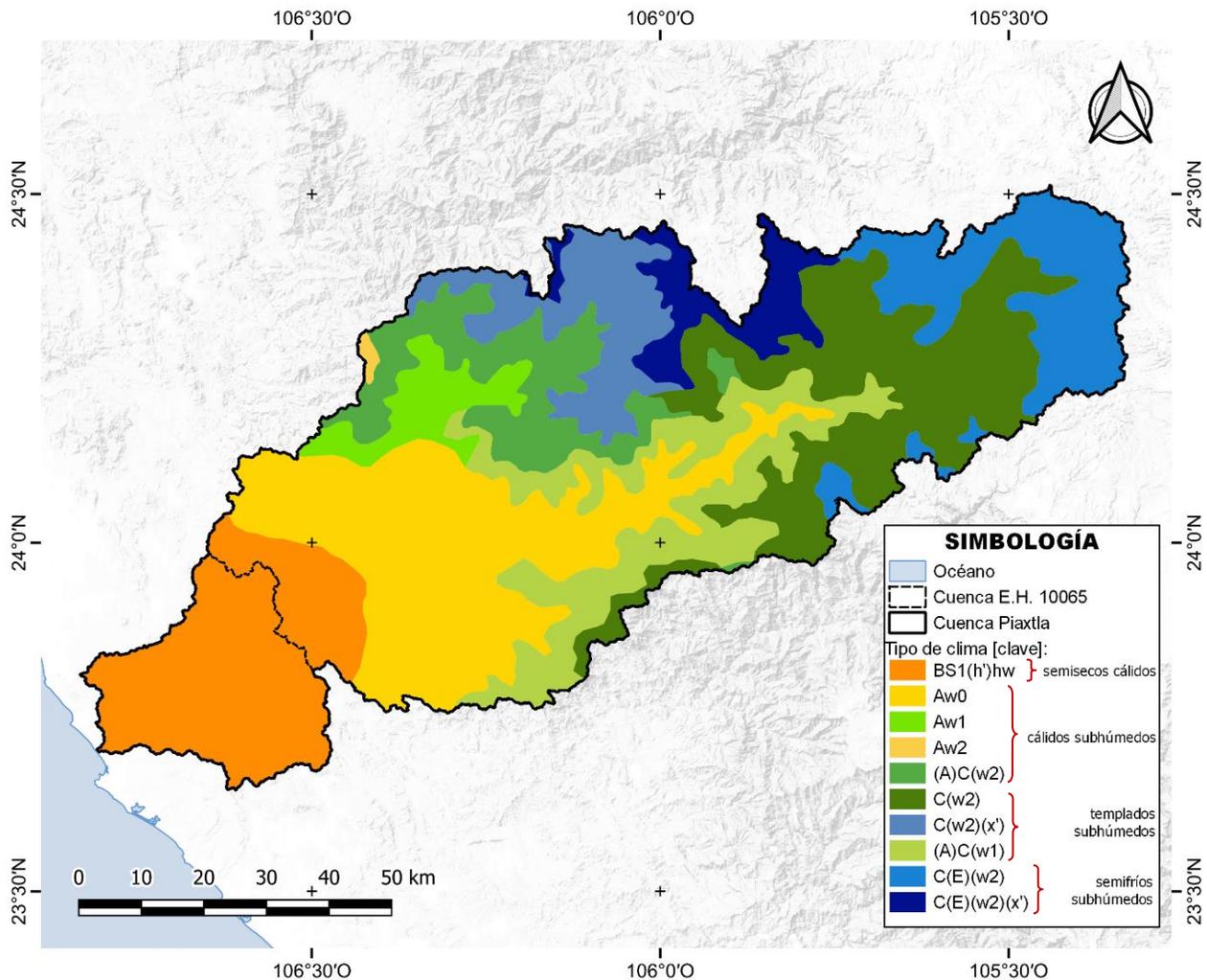


Figura 31. Climas dentro de la cuenca.

La clasificación oficial que maneja el INEGI de las unidades climatológicas puede resultar muy específica y, por tanto, complicada, pudiéndose entender mejor para esta cuenca a partir de 4 tipos (INEGI, 2008):

- Semisecos cálidos
- Cálidos subhúmedos
- Templados subhúmedos
- Semifríos subhúmedos

En general, la cuenca presenta temperaturas medias mayores a 22°C, con lluvias intensas en verano que pueden llegar a compensar la temporada de estiaje. El invierno presenta todavía precipitaciones, no mayores al 10% anual. Hacia las zonas montañosas se presentan las menores temperaturas y las mayores precipitaciones y, se van invirtiendo en dirección al mar: es decir, se tiene el clima más cálido y seco en la costa. En esta zona de clima seco el régimen de lluvias en invierno es mayor al 10%. Destaca el contraste entre las temperaturas medias en la parte de la sierra y de la costa, por ejemplo, los climas semifríos presentan valores entre 5 y 12°C. La clasificación de los climas que hace el INEGI se basa, en general, en datos del periodo de 1921 a 1975 y, en la temperatura y humedad de cada región (Anexo 2- 3).

Sequías recientes

Derivado de la preocupación de la sequía que ocurrió a nivel nacional entre los años 2011 y 2013, se instauró el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), el cual tiene como objetivo la elaboración de instrumentos para la gestión del agua, administrado por la CONAGUA. Se integraron así una serie de Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía (PMPMS) por Consejo de Cuenca, es decir, una serie de informes técnicos basados en la delimitación de las cuencas del país. Dentro de estos se encuentra el correspondiente al Consejo de Cuenca *Ríos Mocorito al Quelite* (CONAGUA, 2014), en el cual se incluye la cuenca del río Piaxtla. En este documento se hacen observaciones importantes, destacando:

- Bajos niveles de almacenamiento en las presas del Consejo, calificados como críticos, menores al 20% en 8 años desde 1996 hasta 2014.
- Precipitación efectiva de los últimos 72 años al momento de elaboración del informe, menor que el promedio en 37 años y, sólo en 35 superior al promedio.
- Manejo inadecuado del agua frente a un escenario de escasez, relacionado con un alto consumo del sector agrícola, con baja eficiencia y alta morosidad.
- Cuatro grandes periodos de sequía en la segunda mitad del siglo XX en la R.H. 10 Sinaloa: 1978-1987, 1988-1997, 1998-2007 y 2008-2013.
- Tras la sequía ocurrida entre 1996 y 1999, las presas de la RH 10 Sinaloa tardaron hasta el año 2000, e incluso 2004 en recuperarse.
- A pesar de las grandes precipitaciones del año 2007, la gran extensión de las temperaturas máximas contribuyó a la sequía.

Adicionalmente, hacia inicios del 2018, empezaba a aumentar en el país el área afectada por sequía, aunque sin realmente ser de la magnitud como ocurrió hacia el 2011 cuando la mayor parte se clasificaba como anormalmente seco. Fue hasta el 2020 que el área afectada por sequía extrema y excepcional empezó a aumentar. Si bien no fue tan amplia como la sequía de inicios de la década, se caracterizó por valores bajos de la precipitación en la época de lluvias (CONAGUA, 2021).

2.3.4. Hidrografía

El río Piaxtla nace en la Sierra Madre Occidental, conocido en ese punto como *Ventanas* (IMTA, s.f.). Su único afluente de importancia es el río *Verde*, en la margen derecha del río (norte), 12 km aguas arriba del poblado de San Ignacio. En total, hasta el mar presenta una longitud de 220 km aproximadamente. Existen afluentes de menor tamaño a los dos mencionados pero su ubicación no es específica en la bibliografía. También se menciona que el río se le suele llamar como río *Tayoltita* y, a sus dos afluentes como los ríos *San Dimas* y *San Jerónimo* (Lanza et al, 2014). Al final, el río desemboca al mar en la *Barra de Piaxtla* en Sinaloa (Figura 32).

El escurrimiento medio anual del río Piaxtla es del orden de $1,038 \text{ hm}^3$, con un mínimo de 411 hm^3 . Su régimen es perenne, con un escurrimiento base de 250 l/s (CONAGUA, 2020). Por este régimen, se debe entender que, en general, siempre lleva agua. En el *Consejo de Cuenca Ríos Mocorito al Quelite* se distinguen 4 periodos de sequía importantes en la segunda mitad del siglo XX: 1948 a 1954, 1960 a 1964, 1970 a 1978 y 1993 a 1996 (CONAGUA, 2014).

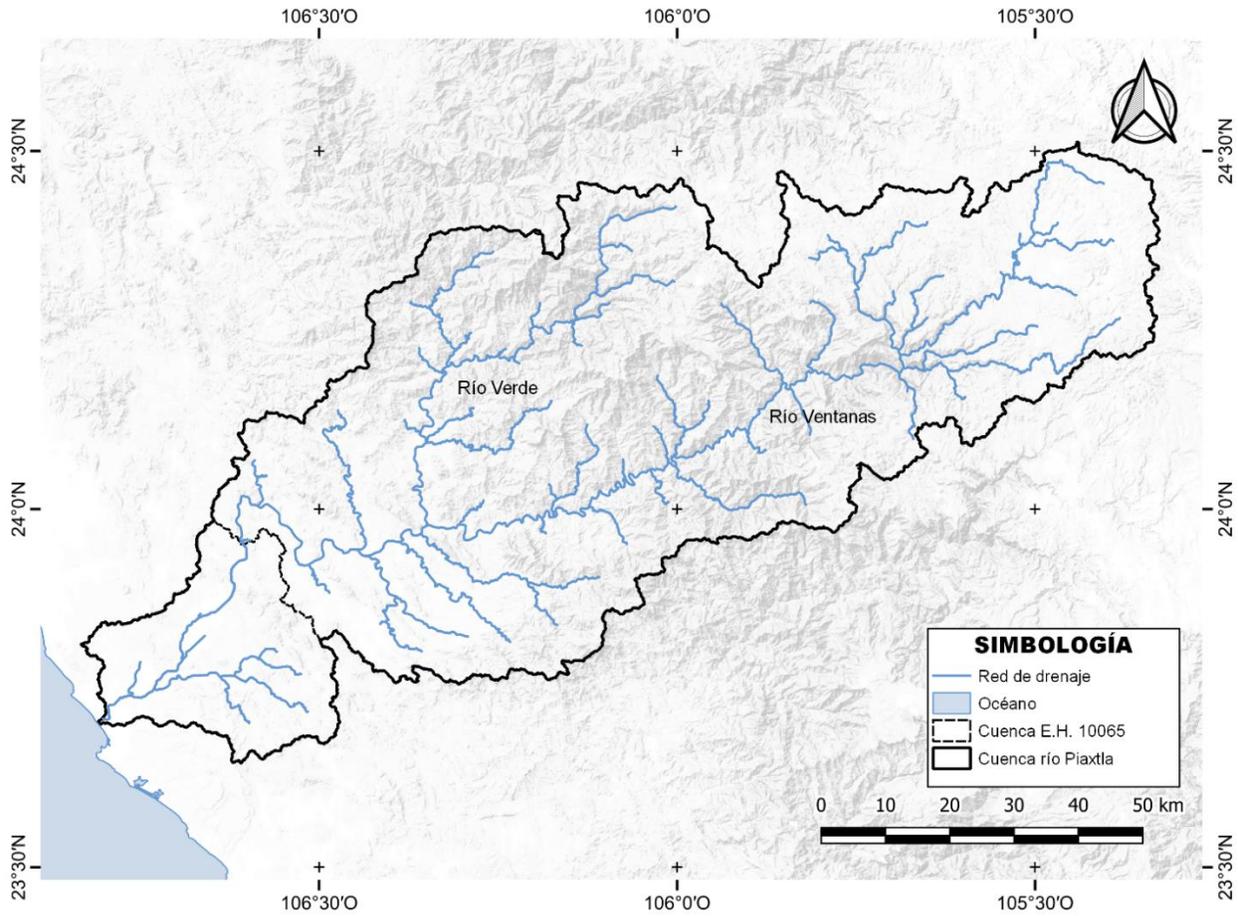


Figura 32. Afluentes del río Piaxtla

2.3.5. Estaciones de medición de variables climatológicas

La información del caudal que pasa por el río se estima con dos estaciones hidrométricas, ambas, relativamente cercanas entre sí (Figura 33). Estas son: la 10065 *Ixpalino* y la 10111 *Piaxtla* (CFE). Ambas presentan un registro amplio, iniciando desde la década de 1950 hasta inicios del siglo XXI (Tabla 6). La E.H. 10065 *Ixpalino* es la primera estación instalada en la cuenca, y se encuentra aproximadamente 5 km aguas arriba del pueblo de *Ixpalino* y a 42 km de la línea de costa. Tiempo después, la CFE colocaría la E.H. 10111 *Piaxtla* sobre el río a la altura de la población de *San Ignacio*.

Adicionalmente, se cuenta con un gran número de estaciones climatológicas con influencia en la cuenca, tanto en Durango como en Sinaloa. Estas, a diferencia del registro de caudales, inician por lo general en la década de 1960 y llegan a presentar registros todavía en años tan recientes como el 2018. La ubicación de las estaciones se aprecia en la Figura 33 y, sus respectivos datos generales en la Tabla 7. A continuación se da una descripción general de la zona donde se encuentran ubicadas las estaciones con el mejor registro.

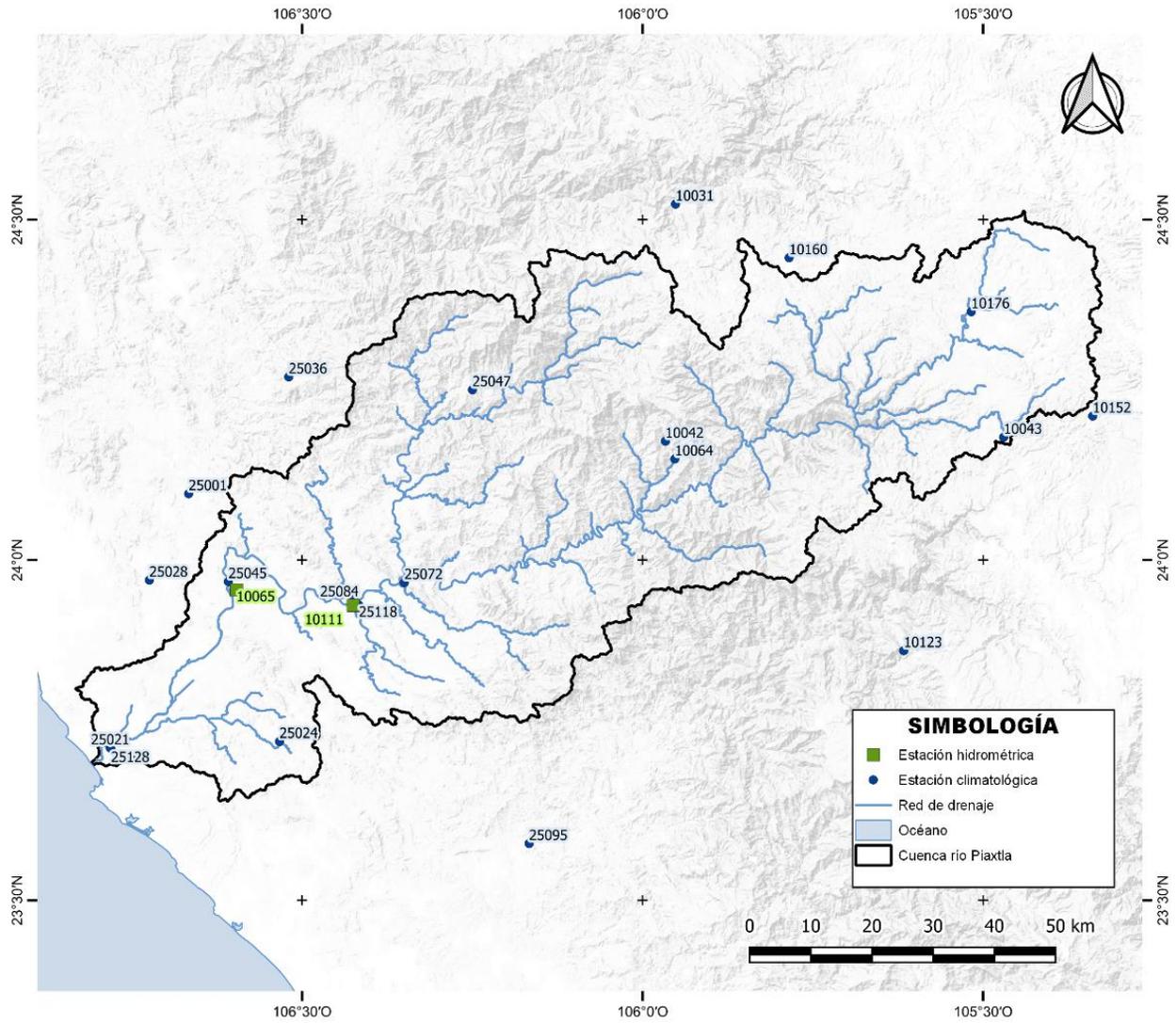


Figura 33. Estaciones climatológicas e hidrométricas en la cuenca del río Piaxtla.

Tabla 6. Estaciones hidrométricas en el río Piaxtla

Estación	Nombre	Estado	Municipio	Latitud	Longitud	Área drenada [km ²]	Inicio de registro	Fin de registro
10065	Ixpalino	Sinaloa	San Ignacio	23°57'20"	-106°35'45"	6166	22/10/1952	31/12/2011
10111	Piaxtla (CFE)	Sinaloa	San Ignacio	23°56'00"	-106°25'30"	5307	01/01/1958	31/12/2009

Tabla 7. Estaciones climatológicas con influencia en la cuenca del río Piaxtla

Estación	Nombre	Estado	Municipio	Situación	Latitud [°]	Longitud [°]	Altitud [msnm]	Inicio de registro	Fin de registro
10031	Huahuapan	Durango	San Dimas	Operando	24.523	-105.952	1170	04/05/1966	31/10/2017
10042	Las Truchas	Durango	San Dimas	Operando	24.174	-105.967	1794	17/04/1962	31/05/2018
10043	Las Vegas	Durango	San Dimas	Suspendida	24.180	-105.470	1391	01/01/1969	31/12/1983
10064	San Dimas	Durango	San Dimas	Operando	24.148	-105.953	880	08/12/1961	31/05/2018
10123	San Pablo	Durango	Pueblo Nuevo	Suspendida	23.867	-105.617	1885	01/01/1969	31/12/1983
10152	Cerro Prieto	Durango	Durango	Suspendida	24.211	-105.339	2660	01/05/1981	30/11/1983
10160	Agua Blanca	Durango	San Dimas	Operando	24.444	-105.785	2500	01/04/1981	31/05/2018
10176	Río Miravalles	Durango	San Dimas	Operando	24.365	-105.518	2413	01/01/2007	31/07/2018
25001	Acatitán	Sinaloa	San Ignacio	Operando	24.097	-106.667	96	01/01/1961	31/07/2018
25021	Dimas	Sinaloa	San Ignacio	Operando	23.724	-106.782	19	24/11/1962	30/04/2018
25024	El Limón (CFE)	Sinaloa	San Ignacio	Suspendida	23.733	-106.533	331	01/01/1961	30/09/1999
25028	Elota (CFE)	Sinaloa	Elota	Suspendida	23.970	-106.724	110	01/01/1961	31/03/2001
25036	Guadalupe de los Reyes	Sinaloa	Cosala	Operando	24.269	-106.520	696	01/01/1961	30/11/2018
25045	Ixpalino	Sinaloa	San Ignacio	Operando	23.968	-106.608	69	01/01/1961	31/03/2019
25047	Jocuitita	Sinaloa	San Ignacio	Suspendida	24.250	-106.250	1272	09/03/1972	31/07/1988
25072	Piaxtla (CFE)	Sinaloa	San Ignacio	Suspendida	23.967	-106.350	341	01/01/1971	31/03/2001
25084	San Ignacio	Sinaloa	San Ignacio	Suspendida	23.941	-106.424	158	01/01/1976	30/11/2005
25095	Tapichahua (CFE)	Sinaloa	Mazatlán	Suspendida	23.583	-106.167	270	01/05/1955	31/12/1968
25118	San Ignacio (CFE)	Sinaloa	San Ignacio	Suspendida	23.933	-106.417	176	01/01/1961	31/12/1999

Se cuenta con una gran cantidad de estaciones climatológicas con influencia en la cuenca repartidas a todo lo largo de la misma. Muy marcadamente, las estaciones del estado de Durango (clave 10####) se encuentran en zonas montañosas y a elevada altura. Contrastando con las estaciones de Sinaloa (clave 25####) las cuales se localizan a una altitud menor. Por ejemplo, la E.H. 10031 *Huahuapan* se encuentra en la margen de un río, similar a la E.H. 10042 *Las Truchas*, aunque esta última se localiza más alejada del río, es decir, hacia arriba en la montaña. Ambas estaciones se encuentran dentro de un valle de pequeñas dimensiones. La E.H. 10065 *San Dimas*, se ubica en la localidad homónima, bastante cercana a la E.H. 10042, ligeramente se adentra a la montaña sin alejarse del pueblo y el valle donde se ubica ya es de mayor dimensión al de la E.H. 10065. En los alrededores se observa el relieve típico de una sierra montañosa.

Aguas abajo, ya en la población de San Ignacio se pueden encontrar dos estaciones climatológicas: 25084 *Elota* (CFE) y 25118 *San Ignacio* (CFE), cada una en cada margen del río, correspondiendo a esta última la margen izquierda y es también la estación que se encuentra propiamente fuera de la población. A ambas les corresponde un valle muy amplio, donde las montañas más cercanas no son de gran elevación. Continuando por el cauce del río, se puede encontrar la E.C. 25045 *Ixpalino*, ubicada en el lugar en que se encuentra la hidrométrica del mismo nombre. También se ubica dentro de un valle, casi sobre la margen del río, con montañas pequeñas.

En dirección noroeste, fuera de la cuenca, se encuentra la E.C. 25001 *Acatitán*. Se trata de una estación en una zona de campos agrícolas, más o menos llana del Valle en que se encuentra. A una elevación mayor y al sureste, en la zona del último tributario de importancia que tiene el río, se encuentra la E.C. 25024 *El Limón* (CFE); se ubica en una montaña pequeña sin deforestación aparente (constatado vía imagen satelital), cerca del pueblo *Limón de los Peraza* y en su alrededor sí existe una gran cantidad de campos agrícolas. Por último, está la estación 25021 *Dimas*, la más cercana al mar y, también a menor elevación, apenas 19 msnm. La zona de esta estación ya es carente prácticamente de montañas y se encuentra dentro del pueblo del mismo nombre, el cual está rodeado de campos agrícolas.

2.3.6. Flora y fauna

La cuenca del río Piaxtla presenta esencialmente dos ecosistemas muy marcados: bosque de pino-encino y selva caducifolia. En la Figura 34, se observa que la mayor parte de la cuenca, especialmente en las zonas altas y de climas subhúmedos y templados se encuentra bosque de pino-encino. Son características de las zonas montañosas de México, entre los 1,200 a 3,200 msnm, cuya vegetación consiste principalmente de pinos y encinos. Del mapa de la Figura 34 se engloban en esta categoría todas las combinaciones de bosque de este tipo, dentro de los que se puede encontrar: encino-pino, vegetación secundaria de bosque de pino-encino etc. La diferencia entre cada una de estas categorías radica en la predominancia de la primera sobre la segunda.

A diferencia del bosque, la selva caducifolia predomina en las zonas bajas de la cuenca y hacia la costa. El bosque presenta alturas de los árboles entre 8 y 35 m, en cambio, los de las selvas bajas y medianas son de entre 4 a 10 m y entre 15 a 20 m, respectivamente. En estos, las hierbas y arbustos son reducidos, siendo más comunes durante la época de lluvias.

En menor medida se pueden encontrar otros ecosistemas como el bosque mesófilo de montaña y manglar. El manglar se encuentra en un área muy reducida de la cuenca, en la desembocadura del río. De la biodiversidad en la cuenca, destacan por mucho el de la flora, con más de 600 especies, como el cedro, acacia, pino apache, pino amarillo, encino blanco, agave, espino, abedul, chiles, nopal, maíz, etc. (CONABIO, 2021).

La Comisión Nacional de la Biodiversidad (CONABIO) registra los mayores avistamientos de fauna en la zona baja de la cuenca y en las zonas más cercanas a la red de drenaje. Son los reptiles y anfibios los que se encuentran más hacia la costa; en los ecosistemas de selva baja, destaca mayor diversidad de culebras, serpientes, sapos y ranas, como: culebra coralillo, víbora de cascabel, sapo de Mazatlán, rana de árbol mexicana, etc. Las aves presentan la misma distribución y se les ha visto también en las zonas altas de la Sierra, tales como: aguilillas, carpinteros y tecolotes. Mayor distribución tienen los mamíferos e invertebrados, desde la costa hasta las zonas más alejadas de ésta. En el primero, se encuentra una gran variedad especialmente de mamíferos de tamaño pequeño como: tlacuaches, conejos, ardillas, armadillos, ratones, musarañas, etc. y, mayores como: lobos, coyotes, pumas y venados. El grupo con mayor diversidad es el de los invertebrados, desde hormigas, mariposas, abejas, cangrejos ermitaños, mosquitos, chapulines, etc. En contraste, los menores avistamientos que se tienen corresponden al de los peces, incluyendo: mojarra de agua dulce, tilapia, robalos, topote mexicano, etc.

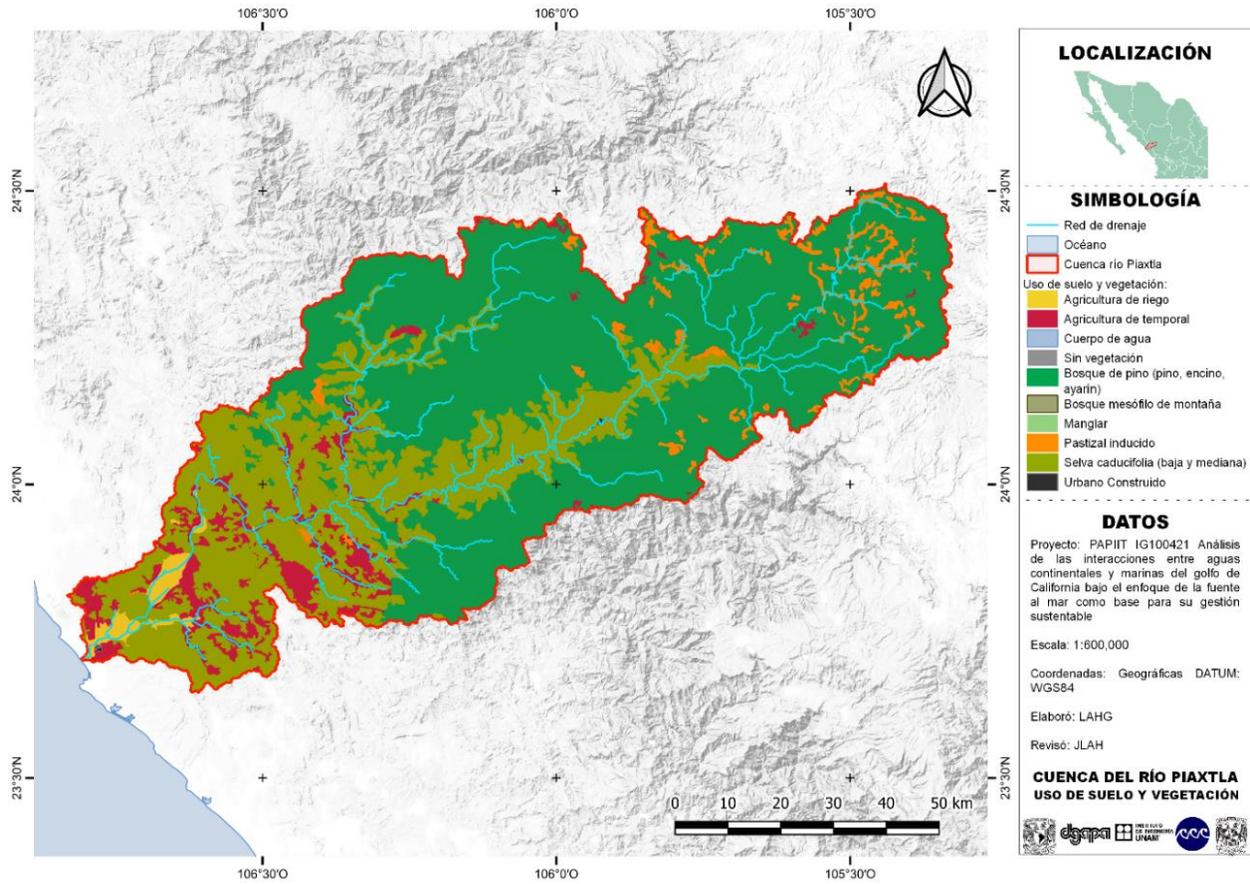


Figura 34. Uso de suelo y vegetación en la cuenca río Piaxtla.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Este capítulo se divide esencialmente en tres partes: caracterización de la cuenca, obtención de la información climatológica y, el análisis de las variables climatológicas propiamente. Dado el interés del proyecto de analizar la zona del golfo de California, se trabajó primero delimitando las cuencas que aportan a este. La mayoría de las cuencas están dentro del país, con excepción de la cuenca del río Colorado. (Anexo 3- 1). A su vez, la cuenca de estudio debe estar aforada, es decir, que cuente con información de caudal del río, adicional a la precipitación y temperatura. Y por último, se agregó como criterio el que la cuenca carezca de presas y/o embalses. Esto es un indicador indirecto de la presencia de actividades humanas que impactan en el ciclo hidrológico, por lo que facilita el análisis de relación entre variables.

3.1. Delimitación de la zona de estudio

3.1.1. Criterios de selección

Con la finalidad de realizar los análisis correspondientes de forma adecuada en la cuenca de estudio, se establecieron ciertos criterios que debe cumplir la cuenca y la información disponible. Entre ellos:

- Información de caudal, precipitación y temperatura máxima y mínima.
- Al menos: una estación hidrométrica y una estación climatológica dentro de la cuenca.
- Periodo de registro continuo de al menos 30 años para las estaciones en común para todas las variables.
- Preferentemente contar con disponibilidad de datos recientes.
- Carecer de presas y/o embalses

El proceso de selección se puede ver de forma esquemática en la Figura 35.

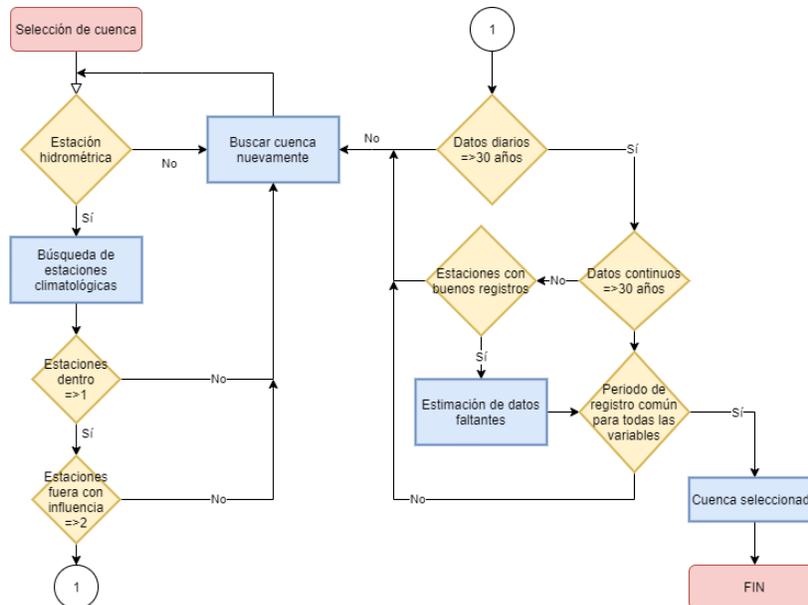


Figura 35. Diagrama de flujo para la selección de la cuenca.

3.1.2. Selección de la cuenca

El proceso de selección de la cuenca se realizó mediante un SIG. Para ello, en primer lugar se descargó la información necesaria para la identificación de las cuencas de aportación al golfo de California desde los portales de geoinformación de la CONABIO y de la CONAGUA. (Anexo 3- 2 al Anexo 3- 5). Una de las cuencas que cumple con todos los criterios anteriormente mencionados es la cuenca del **río Piaxtla**. A continuación se detalla más acerca del proceso de delimitación de esta.

3.1.3. Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca se descargó el Modelo Digital de Terreno (MDT) con una resolución de 15 m del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) (INEGI, 2012). Enseguida se determinó el parteaguas y la red de drenaje de la cuenca, resultando un área de 6,984 km² y un perímetro de 804 km (Figura 36); existen algunas diferencias con el parteaguas propuesto por la CONAGUA, el cual incluye cuencas de arroyos pequeños que descargan directamente al mar. También se determinó el parteaguas correspondiente a las áreas de aportación de las dos estaciones hidrométricas dentro de la cuenca, con la finalidad de realizar el análisis de la cuenca hasta estos puntos. La subcuenca de la estación 10065 *Ixpalino* se le denominó *Piaxtla-Ixpalino* y tiene un área de 6,194 [km²].

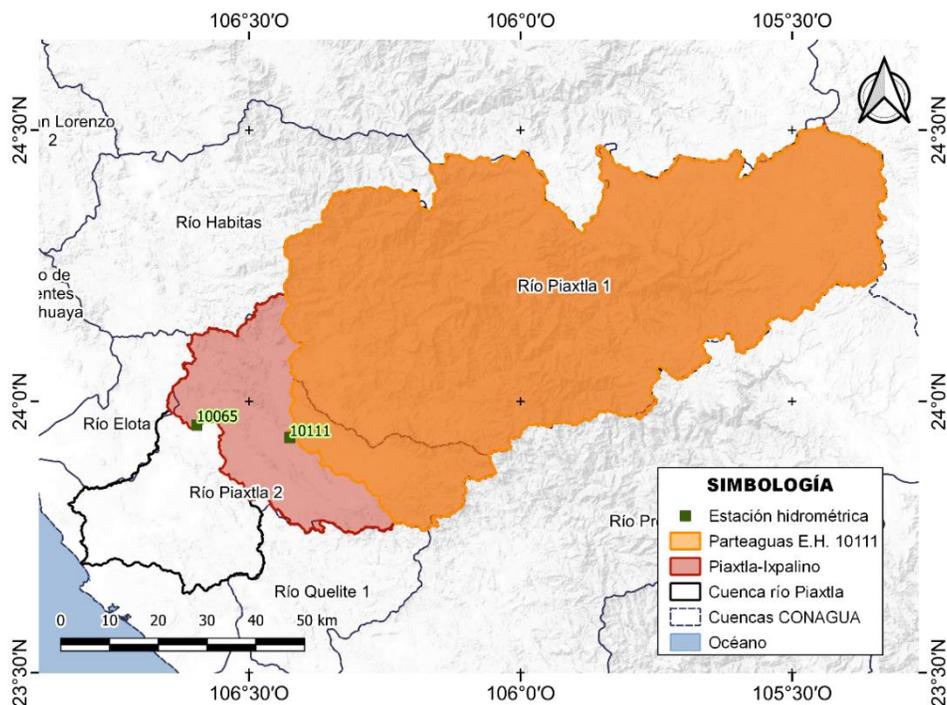


Figura 36. Parteaguas calculado y según CONAGUA de la cuenca del río Piaxtla. Cuenca del río Piaxtla y las subcuencas de cada estación hidrométrica calculadas. La línea delgada punteada de color azul, corresponde a la división hidrológica nacional según la CONAGUA.

3.2. Caracterización de la zona de estudio

El análisis de las variables climatológicas requiere de hacer una caracterización de la cuenca del río Piaxtla, la cual consiste en conocer el tipo de suelo, la vegetación, la población de un municipio, etc. con la finalidad de establecer una relación entre la lluvia, la infiltración, los usos del agua y el escurrimiento.

3.2.1. Uso y tipo de suelo

La información del uso de suelo y vegetación (USV) de la cuenca se obtuvo a partir de la Serie I del *Uso de Suelo y Vegetación* (INEGI, 1992) y la Serie VI (INEGI, 2016). Estas corresponden a la primera y última capa de información a nivel nacional disponible, además se utilizan para estudiar la evolución espacio-temporal, principalmente debido al crecimiento de las actividades humanas (Figura 37 y Figura 38).

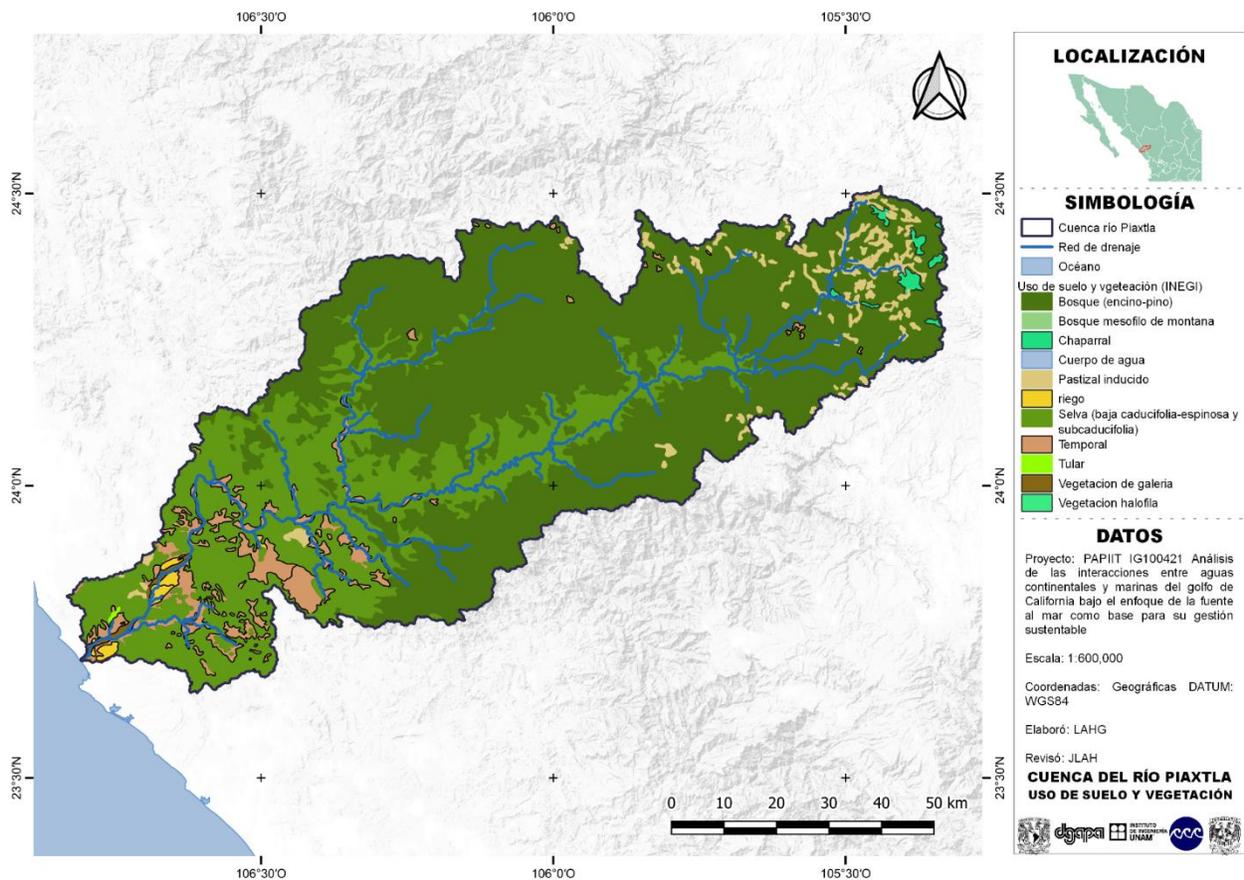


Figura 37. Uso de suelo y vegetación en la cuenca, Serie I.

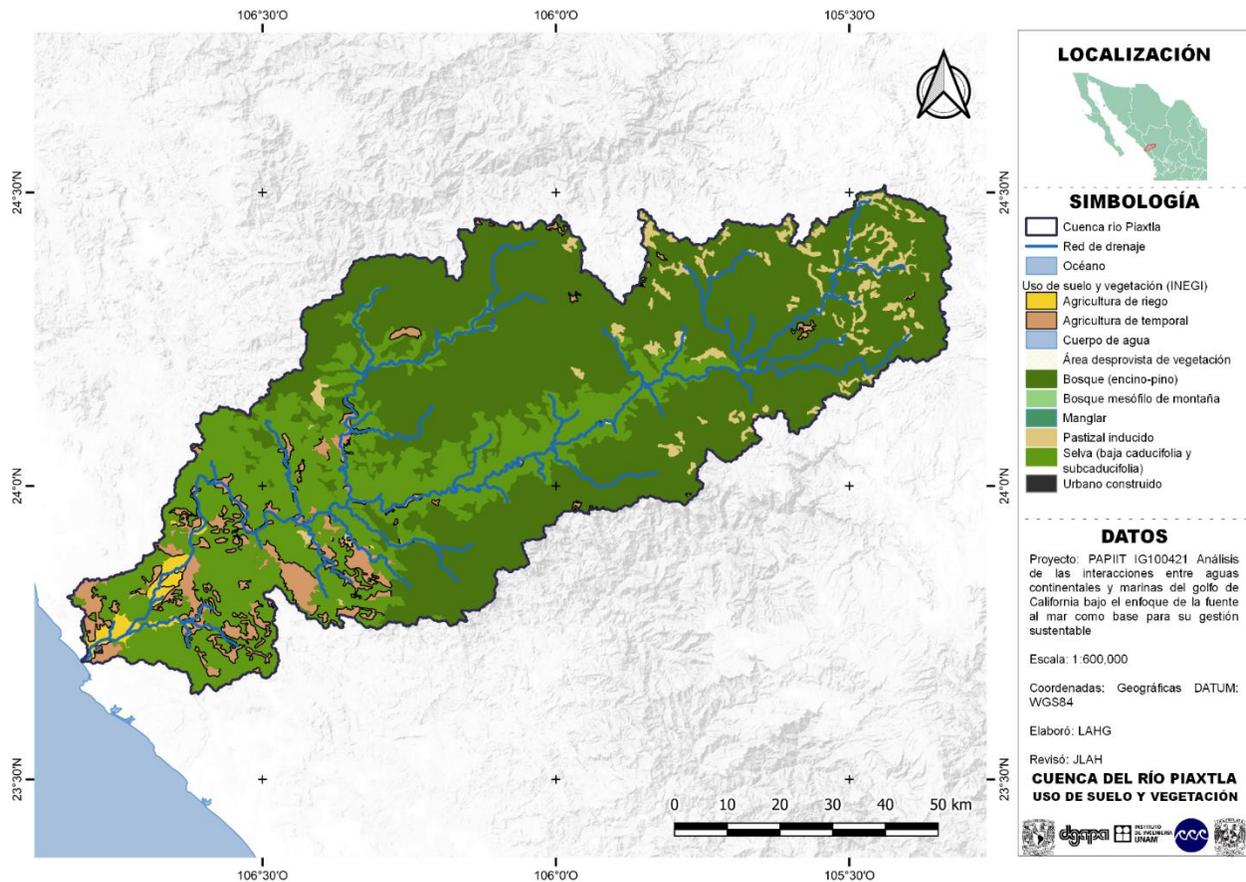


Figura 38. Uso de suelo y vegetación en la cuenca serie VI.

El tipo de suelo se obtuvo de la Serie I *Conjunto de datos de Perfiles de suelos-Continuo Nacional*, también del INEGI (INEGI, 2013). Según el suelo dominante (suelo que ocupa el 60% o más de extensión en la unidad edafológica) en la cuenca son abundantes los litosoles, regosoles, cambisoles, vertisoles, feozems y fluvisoles (Figura 39 y Tabla 8); estos suelos se clasificaron en función del grupo hidrológico del suelo (Anexo 1-1 y Anexo 1-2), con la finalidad de determinar los valores de NC y K.

Tabla 8. Tipos de suelos en la cuenca del río Piactla.

Tipo de suelo	INEGI-Chow	INEGI-NOM-011
Cambisol	D	C
Fluvisol	A	A
Litosol	B	B
Regosol	B	B
Feozem	C	C
Vertisol	D	C

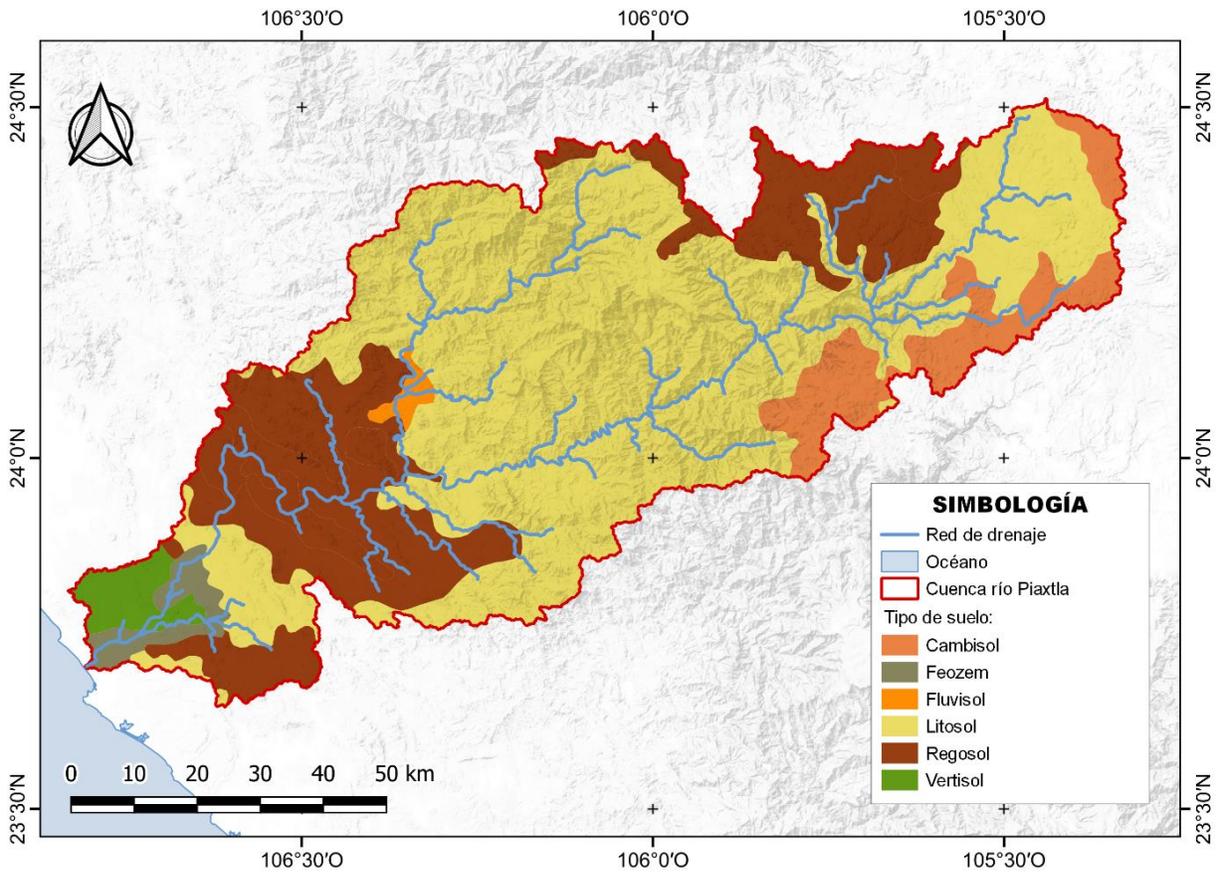


Figura 39. Edafología de la cuenca del río Piaxtla.

Ambas capas se intersectaron y se obtuvieron polígonos con información simultánea de USV y TS. Así tanto NC como K se calcularon, primero asignando un valor para cada polígono (Figura 40 y Figura 41), y posteriormente como un promedio ponderado de toda la subcuenca Piaxtla-Ixpalino (Tabla 9): el resultado final fue de: $NC = 60.37$ y $K = 0.197$ hasta la EH 10065 ($NC = 63.94$ para la cuenca completa).

Con el valor de K y la precipitación media anual de la subcuenca Piaxtla-Ixpalino (1,011.24 [mm], Tabla 50), se obtuvo un $C_e = 0.106$ (ecuación 3). En contraste, al realizar el cálculo de C_e (ecuación 2) mediante la razón del volumen de escurrimiento (1,461.89 [hm^3], Tabla 55) y de precipitación (6,239.05 [hm^3]) se obtiene un $C_e = 0.234$.

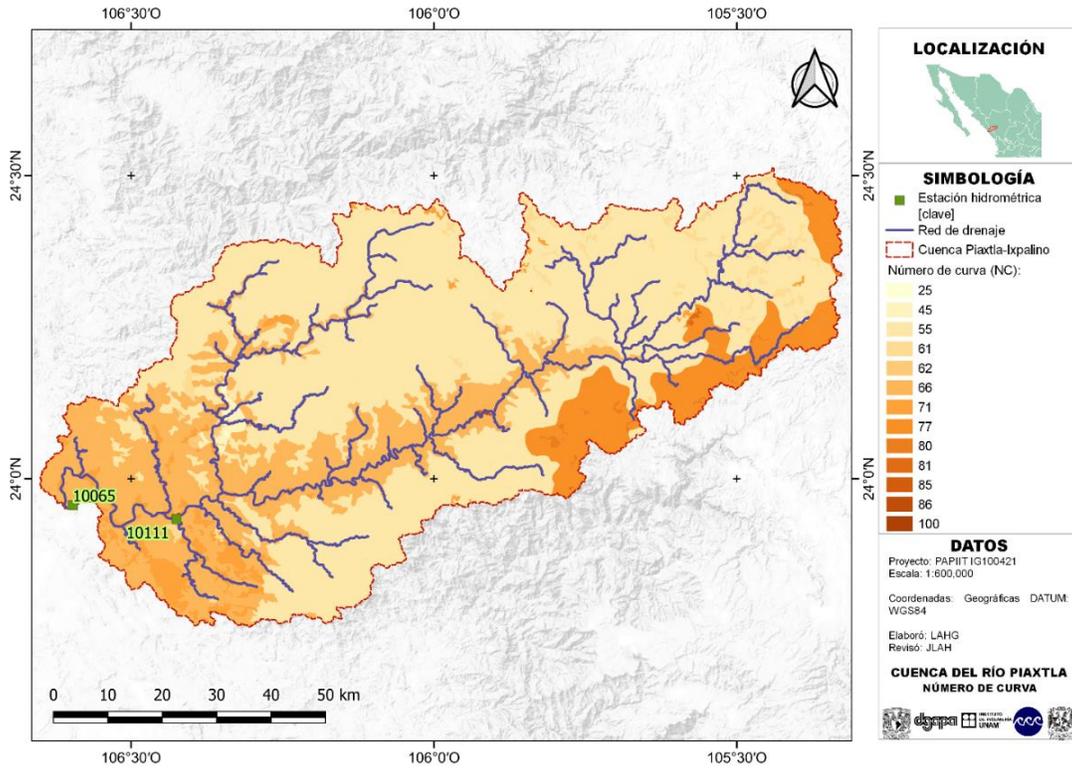


Figura 40. Número de curva en la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

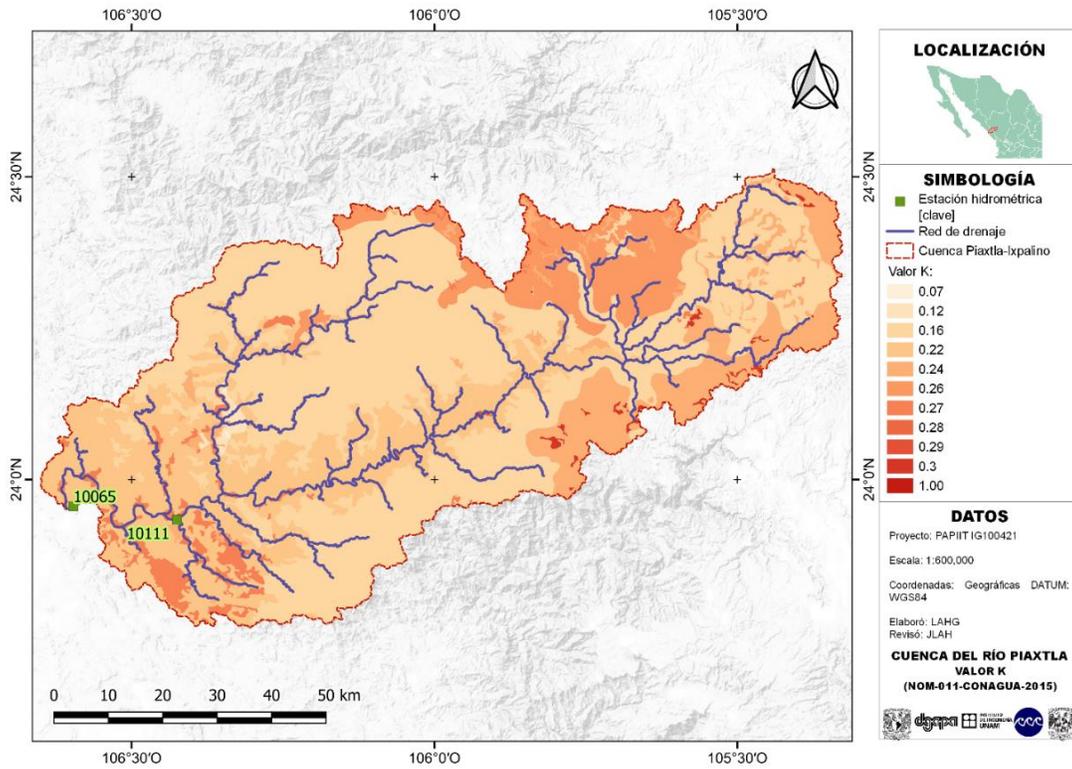


Figura 41. Valor K según la NOM-011-CONAGUA-2015 de la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

Tabla 9. Cálculo del NC y K de la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

Polígono	Uso de Suelo/Vegetación	Tipo de Suelo	Area km2	NC	K
1	Bosque de pino	Litosol	985.51	55	0.16
2	Selva baja caducifolia	Litosol	650.42	66	0.22
3	Bosque de pino	Regosol	437.70	55	0.26
4	Bosque de pino	Cambisol	436.36	77	0.24
5	Bosque de pino	Litosol	329.18	55	0.16
6	Selva baja caducifolia	Regosol	252.56	66	0.22
7	Bosque de encino-pino	Litosol	226.14	55	0.16
8	Selva baja caducifolia	Regosol	128.58	66	0.22
9	Selva baja caducifolia	Litosol	109.63	66	0.22
~					
385	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	Regosol	0.02	55	0.26
386	Agricultura de temporal anual	Regosol	0.02	71	0.27
387	Agricultura de temporal anual	Litosol	0.02	71	0.27
388	Pastizal inducido	Cambisol	0.01	80	0.3
389	Bosque de encino	Fluvisol	0.01	25	0.07
390	Pastizal inducido	Litosol	0.01	61	0.24
Área total			6,173	60.37	0.20

3.2.2. Población

La población dentro de la cuenca es relativamente pequeña. Las comunidades existentes no son de gran tamaño y la infraestructura existente tampoco lo es. Este factor, en conjunto con la ausencia de obras hidráulicas, permiten describir a la cuenca del río Piaxtla como poco alterada frente a otras cuencas del golfo de México.

3.2.2.1. Densidad y tamaño de la población

La población de la cuenca se estimó a partir de la densidad de población y el área de los municipios dentro de la misma, con la información de los Censos Generales de Población y Vivienda del INEGI de 1990, 2000, 2010 y 2020. El procedimiento consistió en obtener la población total por municipio y posteriormente la densidad poblacional según el área de cada uno. Al final, la población de la cuenca se obtuvo como el resultado de la densidad calculada por el área de cada municipio dentro de la cuenca. Por ejemplo, el municipio de Elota tiene un área de 1,643 [km²] y en el 2020 tenía una población de 55,339 [hab], le corresponde una densidad de población de 33.7 [hab/km²]. Además, considerando que 39 [km²] del mismo están dentro de la cuenca, el municipio aporta 1,323 [hab] a la cuenca. La población total en la cuenca del río Piaxtla es de 32,135 habitantes (Tabla 10).

De esta forma se obtuvo que la población en la cuenca ha mantenido una tendencia decreciente desde al año 2000 (Figura 42), siendo un comportamiento también para todos los municipios de la cuenca, con excepción de Mazatlán.

Tabla 10. Población de la cuenca por censo según el INEGI.

Municipio	Área		CPV INEGI 2020			CPV INEGI 2010			CPV INEGI 2000			CPV INEGI 1990		
	A _T	A _{Piaxtla}	CPV	Densidad	Pop	CPV	Densidad	Pop	CPV	Densidad	Pop	CPV	Densidad	Pop _{Piaxtla}
	[km ²]	[km ²]	[hab]	[hab/km ²]	[hab]									
Elota	1643	39	55,339	33.7	1,323	42,907	26.1	1,026	49,471	30.1	1,183	30,319	18	725
Mazatlán	2533	27	501,441	198.0	5,422	438,434	173.1	4,740	380,509	150.2	4,114	314,345	124	3,399
San Ignacio	5070	3837	19,505	3.8	14,762	22,527	4.4	17,049	26,762	5.3	20,255	24,085	5	18,229
Canatlán	3492	139	31,454	9.0	1,248	31,401	9.0	1,246	31,291	9.0	1,241	34,773	10	1,380
San Dimas	5483	2852	17,333	3.2	9,015	19,691	3.6	10,242	21,907	4.0	11,394	23,318	4	12,128
Tamazula	5801	76	26,300	4.5	345	26,368	4.5	346	27,144	4.7	356	21,842	4	286
Suma:					32,115			34,649			38,543			36,146

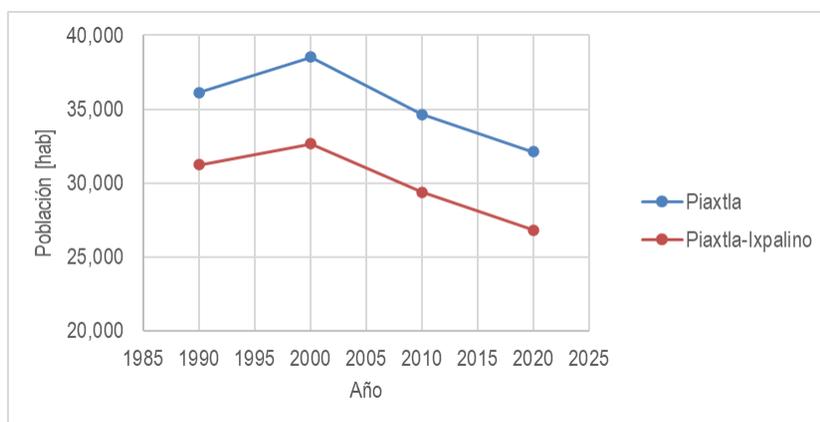


Figura 42. Evolución de la población en la cuenca.

3.2.2.2. Distribución territorial

El INEGI también dispone de información de la ubicación y población de las localidades del país. Dentro de la cuenca se encuentran 286 localidades, de las cuales la gran mayoría se trata de localidades rurales de tamaño pequeño (población menor a 100 habitantes) (INEGI, 2010). A su vez, se encuentran también alejadas de los caminos y carreteras principales que cruzan la cuenca. La población total en las localidades dentro de la cuenca es de 34,651 habitantes, congruente con lo calculado anteriormente (INEGI, 2010). Existen 3 localidades que superan los 2,500 habitantes: Tayoltita en Durango y, San Ignacio y Dimas en Sinaloa. Las tres se encuentran en las márgenes del río y son clasificadas como semiurbanas (Figura 43, Tabla 11 y Tabla 12). Además, en la Figura 44 se puede observar la variación del número de localidades respecto a la elevación.

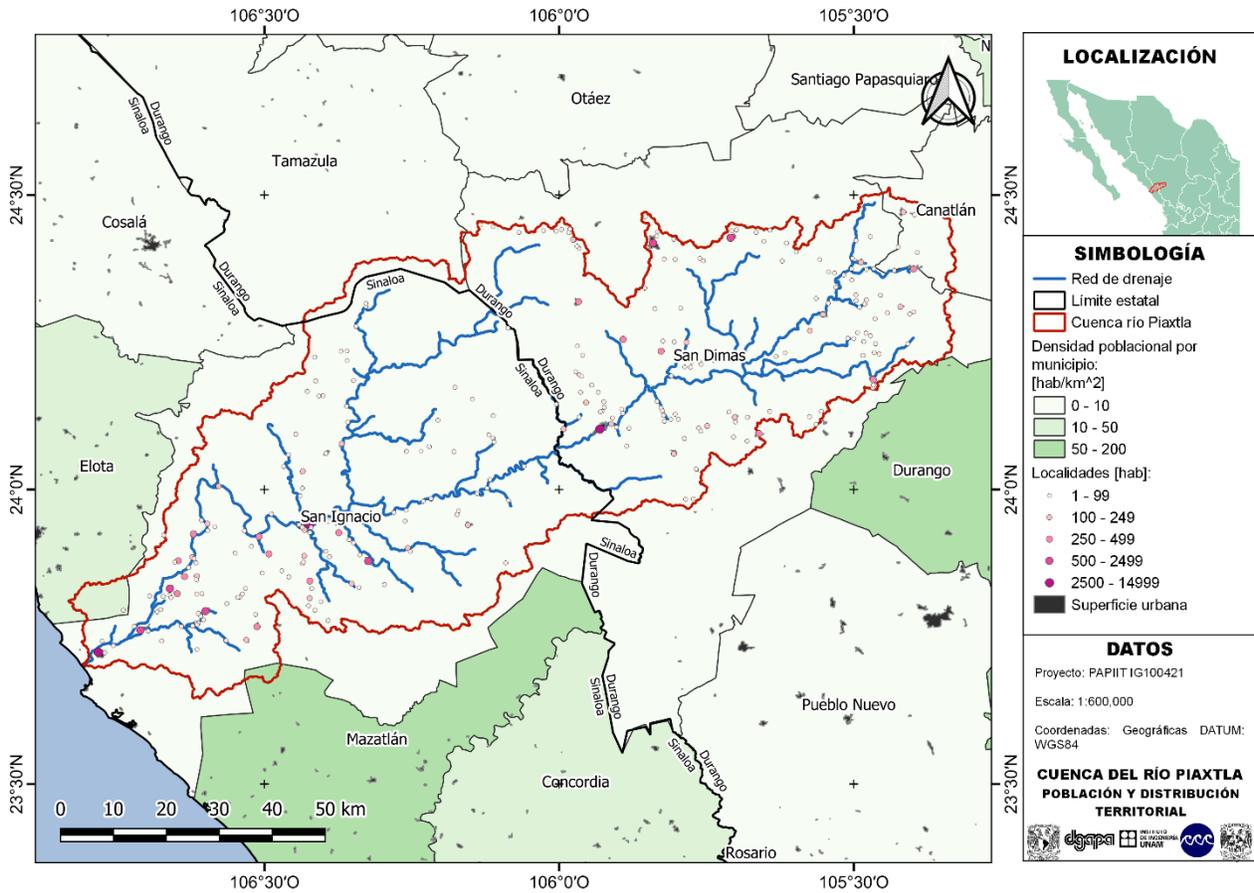


Figura 43. Densidad y distribución poblacional en la cuenca del río Piaxtla (INEGI, 2010). La división municipal varía en el mapa mostrado respecto a otros y no es la correcta. Para fines de cálculo se utilizó la división municipal mostrada en el Capítulo II.

Tabla 11. Tipo de localidades dentro de la cuenca del río Piaxtla (INEGI, 2010).

Tipo de localidad	Población [habitantes]	No.
Urbana	15,000 o más	0
Rural	2,500 a 14,999	3
	500 a 2,499	6
	250 a 499	15
	100 a 249	27
	1 a 99	235
Total:		286

Tabla 12. Localidades más grandes en la cuenca del río Piaxtla (INEGI, 2010).

Estado	Municipio	Localidad	Población	Altitud
			[hab]	[msnm]
Durango	San Dimas	Tayoltita	5,124	525
Sinaloa	San Ignacio	San Ignacio	4,543	151
Sinaloa	San Ignacio	Dimas (Estación Dimas)	3,550	10
Sinaloa	San Ignacio	Piaxtla de Abajo	1,877	40
Durango	San Dimas	San Miguel de Cruces	1,816	2,662

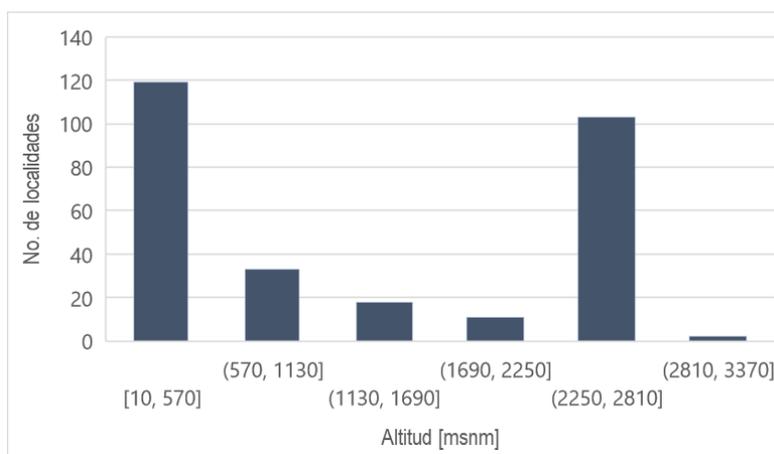


Figura 44. Distribución de la población con la elevación (INEGI, 2010).

3.2.3. Sectores económicos

La información de los sectores económicos de la cuenca, también se obtuvo del INEGI. En este caso, se consultó el portal de Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (INEGI, 2022); del mismo se descargó un archivo vectorial con la información de todas las unidades económicas (UE) de la cuenca (Figura 45). La mayor parte de las UE se concentran en 3 localidades en particular, Tayoltita, San Ignacio y Dimas (Figura 46).

En total existen 996 unidades económicas dentro de la cuenca y todas dentro de los municipios de San Dimas y San Ignacio. Es decir, ninguno se encuentra dentro de los límites de los municipios de Canatlán, Tamazula, Mazatlán y Elota (Tabla 13). A su vez, 902 UE se clasifican como microempresas, lo cual representa el 93 [%] del total. El número de UE disminuye según aumenta su tamaño, resultando en total 4 unidades económicas medianas y 4 grandes (Tabla 14). De las 4 UE grandes, un par de ellas (Primero Empresa Minera SA de CV. y *First Mayestic Silver Corp* SA de CV) se dedican a la extracción de plata, es decir compañías mineras, ubicadas en la localidad de Tayoltita. Las 2 unidades económicas restantes son el H. Ayuntamiento de San Ignacio y oficinas de la SEDENA en el mismo municipio.

Respecto a las unidades medianas, se encuentran oficinas de la administración pública, el Hospital Integral de San Ignacio, una contratista de desarrollo minero y otra de autotransporte de carga, todas actividades económicas terciarias. Las unidades pequeñas presentan mayor variedad, entre las que se encuentran escuelas,

iglesias, oficinas del sector público, ejidos, empresas de la construcción y contratistas del sector minero. Las micro unidades dentro de la cuenca son en su mayoría, empresas dentro de las localidades antes mencionadas dedicadas al comercio, farmacias, restaurantes, cafeterías, bares, abarrotes, minisúpers, papelerías y tiendas de ropa, entre otros. Existen también micro UE que se clasifican igual que las unidades medianas como escuelas e iglesias, así como aquellas dedicadas a la agricultura, ganadería y pesca, distribución de energía eléctrica (CFE), etc. (Tabla 15).

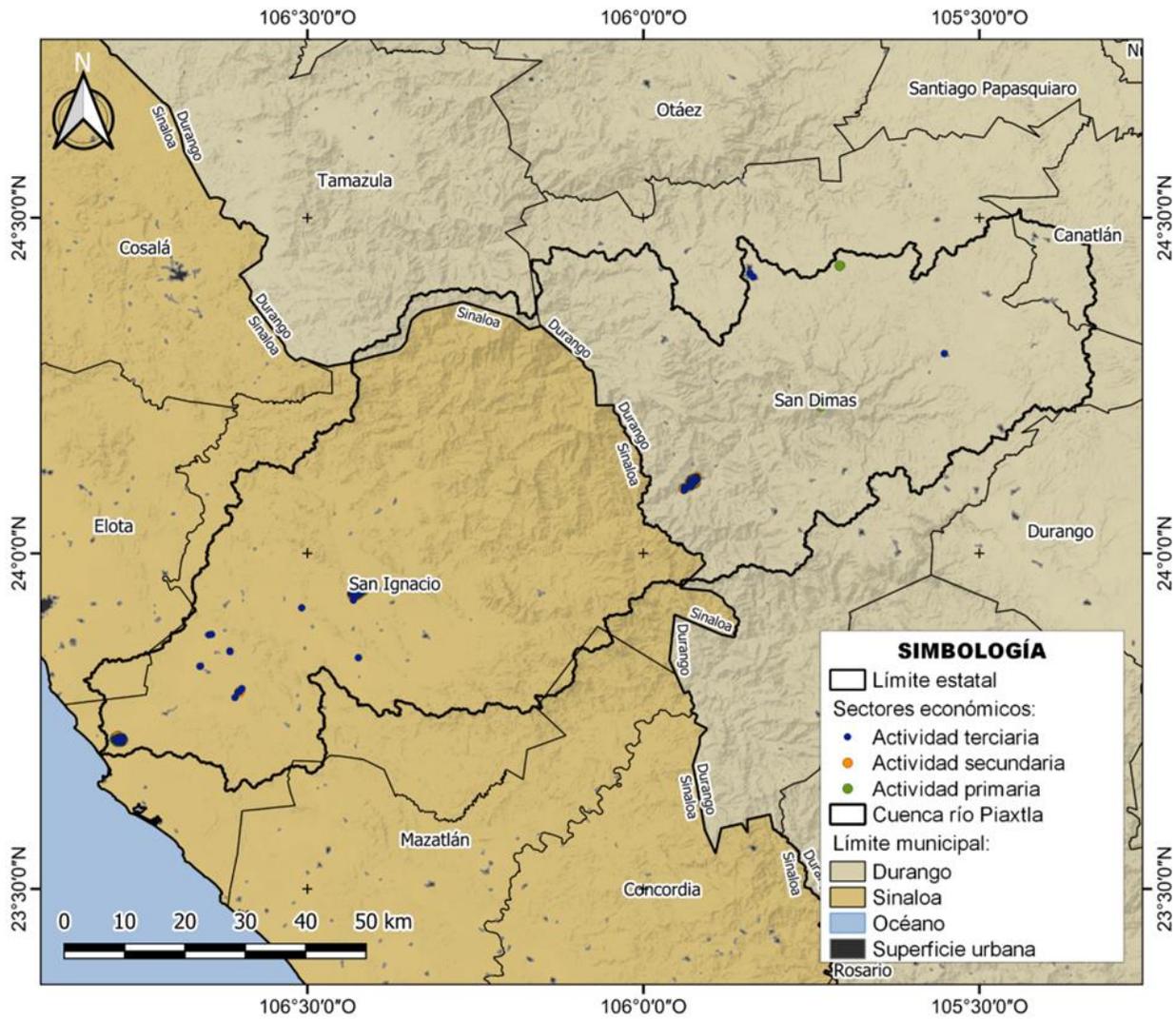


Figura 45. Sectores económicos en la cuenca del río Piaxtla. Con información del DENUE (INEGI, 2022).

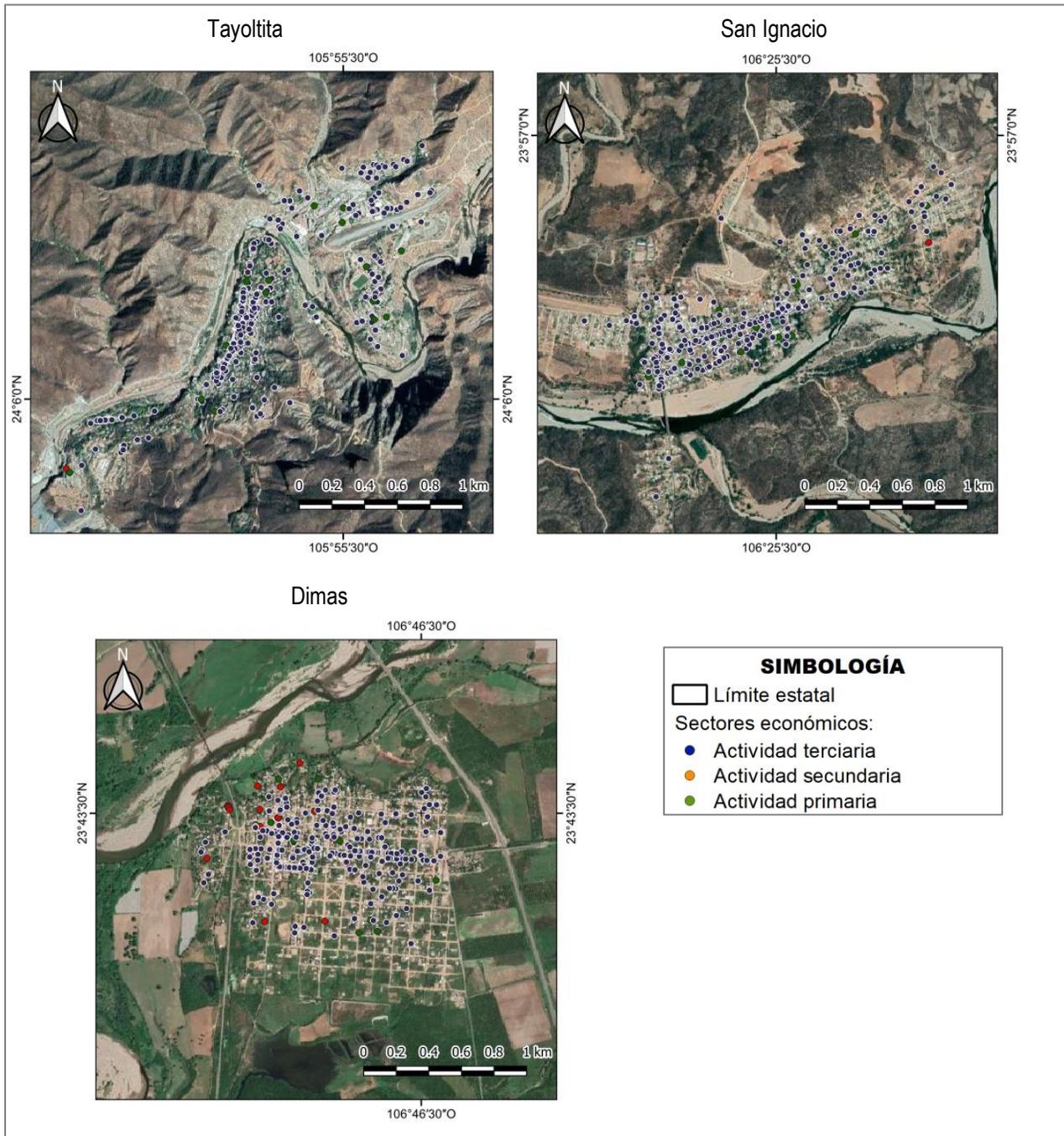


Figura 46. Sectores económicos en las principales localidades de la cuenca.

Tabla 13. Unidades económicas por localidad en la cuenca (INEGI, 2022).

Localidad	Municipio	Estado	No. UE
Tayoltita	San Dimas	Durango	378
San Ignacio	San Ignacio	Sinaloa	296
Dimas (Estación Dimas)	San Ignacio	Sinaloa	270
Coyotitán	San Ignacio	Sinaloa	5
Piaxtla de Abajo	San Ignacio	Sinaloa	2
La Labor	San Ignacio	Sinaloa	2
San Miguel de Cruces	San Dimas	Durango	2
Crucero de Piaxtla (La Cacharola)	San Ignacio	Sinaloa	2
Camino Real de Piaxtla	San Ignacio	Sinaloa	2
Río de Miravalles	San Dimas	Durango	1
San Javier	San Ignacio	Sinaloa	1
Vencedores	San Dimas	Durango	1
Crucero de Coyotitán	San Ignacio	Sinaloa	1
Gavilanes	San Dimas	Durango	1
La Chora (Colonia Renato Vega)	San Ignacio	Sinaloa	2
Total:			966

Tabla 14. Unidades económicas por tamaño en la cuenca (INEGI, 2022).

Tamaño UE	Tamaño INEGI	No.
0 a 5 personas	Micro	853
6 a 10 personas		49
11 a 30 personas	Pequeña	48
31 a 50 personas		8
51 a 100 personas	Mediana	3
101 a 250 personas		1
251 y más personas	Grande	4

Tabla 15. Actividades económicas en la cuenca (INEGI, 2022).

Tipo de actividad	Clasificación	No.
Comercio	Terciaria	409
Cementerios y servicios funerarios (públicos y privados)	Terciaria	5
Administración pública y servicios públicos (ej. orientación y capacitación laboral, difusión cultural, etc.)	Terciaria	31
Actividades militares	Terciaria	2
Servicios de alquiler	Terciaria	5
Servicios de alquiler y mantenimiento de maquinaria y construcción	Terciaria	11
Asociaciones civiles, sindicales y religiosas	Terciaria	2
Autotransporte (construcción)	Terciaria	2
Autotransporte	Terciaria	4
Bancos, cajas de ahorro y de empeño	Terciaria	13
Servicios de comida (restaurantes, bares, cafeterías, etc.)	Terciaria	136
Camaronicultura	Primaria	2
Servicios de agua potable	Secundaria	3
Entretenimiento y recreación (museos, parques acuáticos, billares, videojuegos, etc.)	Terciaria	23
Servicios profesionales públicos e independientes (atención médica, laboratorios, veterinaria, farmacias, contaduría, auditoría, publicidad, etc.)	Terciaria	41
Generación y comercialización de energía eléctrica	Secundaria	3
Servicios de costura y confección	Terciaria	4
Conservación y elaboración de alimentos	Terciaria	25
Construcción y edificación	Secundaria	1
Servicios educativos y guarderías (públicos y privados)	Terciaria	40
Servicios de estacionamiento	Terciaria	2
Fabricación de materiales	Secundaria	11
Fabricación de materiales (construcción)	Secundaria	15
Hojalatería	Terciaria	3
Servicios de hospedaje (hoteles y moteles)	Terciaria	15
Centros de lavado (ropa y autotransporte)	Terciaria	8
Ganadería	Primaria	4
Minería y relacionados	Secundaria	3
Museos	Terciaria	1
Pesca	Primaria	25
Purificación y embotellado de agua	Secundaria	10
Servicios de reparación y mantenimiento (excepto construcción)	Terciaria	36
Salones de belleza	Terciaria	34
Servicios de acceso a comunicación (computadoras, teléfono y telecomunicaciones inalámbricas)	Terciaria	11
Servicios postales	Terciaria	1
Transporte aéreo no regulado	Terciaria	1

3.2.4. Usos del agua

Los resultados a continuación mostrados se basan en una estimación sencilla a partir de la caracterización que se ha hecho de la cuenca. Esto es, en función del clima, de la población y de las actividades económicas.

3.2.4.1. Consumo urbano

La cuenca del río Piaxtla es una cuenca con poco impacto de las actividades económicas humanas por lo tanto el uso del agua es en gran medida, debido a la agricultura y al consumo urbano. Para hacer una estimación del consumo de agua para abastecimiento urbano se siguió la metodología propuesta por la CONAGUA (MAPAS, 2019).

Para la obtención del consumo de agua del abastecimiento pública urbana se calcula la “Demanda”, concepto que considera el consumo para todos los usuarios más las pérdidas físicas, es decir, fugas. En primer lugar, se consideró un consumo medio de 203 [l/hab/d] (Anexo 3- 7).

Por otra parte, Capella (2015) estimó que en las ciudades mexicanas, el porcentaje de pérdidas en una red de agua potable está entre 30 y 50% del volumen total. Sin embargo, este porcentaje también puede variar mucho en cada ciudad, dependiendo de la presión bajo la cual opere la red, así como del estado de las tuberías (Ochoa, 2017). Se propuso así un porcentaje de fugas del 40% para este proyecto, por lo que la demanda de agua en la cuenca resulta de $D = 338$ [l/hab/d] (caudal medio diario de 135.69 l/s), considerando una población de 34,651 [hab] (consumo de 7.03 [m³/d] o 2,566 [m³/año]).

3.2.4.1. Distritos y unidades de riego

Dentro de la cuenca sólo se encuentra un distrito de riego: *Elota-Piaxtla* (Figura 47), según el Sistema de Información Nacional del Agua SINA (CONAGUA, 2020). Se trata de un distrito de riego de 408 [km²] que se encuentra principalmente en la cuenca del río Elota y el área correspondiente a la zona de estudio (Piaxtla) es de 6.44 [km²]. Dicho distrito tiene asignado un volumen total de agua de 184.9 [hm³]; 64.5 [hm³] superficial y 20.39 [hm³] subterráneo. En función de la superficie 1.58 [%], a la cuenca del río Piaxtla le corresponde un volumen de 2.92 [hm³], es decir, 0.45 [hm³/km²]; 2.6 [hm³] superficial y 0.32 [hm³] subterráneo.

En contraste, la información correspondiente a las unidades de riego (UR) sólo se encuentra disponible según la RHA correspondiente (Anexo 3- 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), por lo que con dicha información se calculó el área de las UR dentro de la cuenca del río Piaxtla, la cual asciende a un total de 44.72 [km²]. Considerando un consumo igual al distrito de riego, a las UR les corresponde un volumen de 20.28 [hm³].

3.2.4.1. Registro Público de Derechos de Agua

El Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) especifica el volumen concesionado por municipio y por tipo de fuente: superficial y subterránea, además del total (Figura 48). Es importante mencionar que tal volumen de agua representa el máximo que pueden extraer los concesionarios, de tal forma que es posible que el uso de agua de la cuenca sea menor al aquí presentado.

Por lo tanto, para determinar el volumen concesionado dentro de la cuenca se siguió un procedimiento similar al hecho con la densidad de población y con los distritos de riego, es decir, basándose en el área correspondiente al área de estudio (Tabla 16). El mayor volumen concesionado corresponde al municipio de San Ignacio y, la mayor parte del agua se obtiene de forma subterránea (17 [hm³] de un total de 25.2 [hm³]). En total, en la cuenca están concesionados 38.6 [hm³] de agua al año.

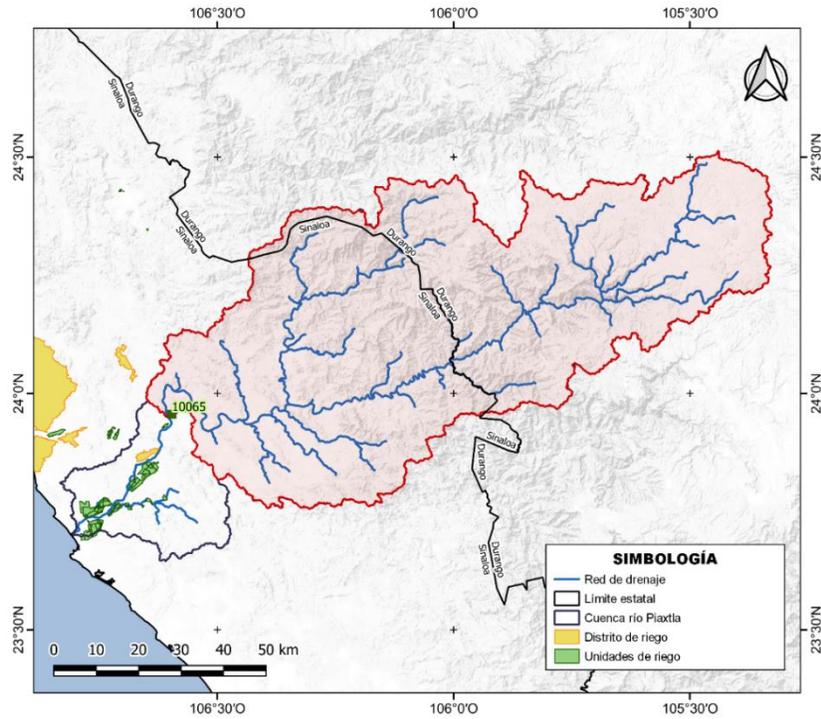


Figura 47. Distritos de riego en la cuenca del río Piaxtla (CONAGUA, 2020).

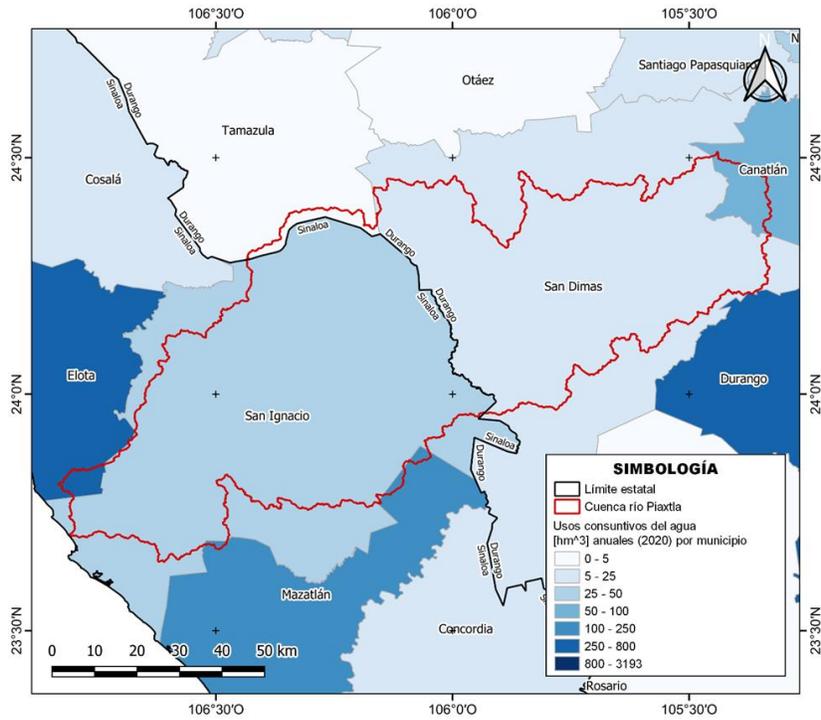


Figura 48. Volumen del agua concesionado en la cuenca del río Piaxtla (CONAGUA, 2021).

Tabla 16. Volumen concesionado de agua dentro de la cuenca (CONAGUA, 2021).

Municipio	Area [km ²]	A _{Piaxtla} [km ²]	Total Municipio			Dentro de Piaxtla		
			VT [hm ³]	Vsb [hm ³]	Vsp [hm ³]	VT [hm ³]	Vsb [hm ³]	Vsp [hm ³]
San Ignacio	5,070	3,837	33.3	22.5	10.8	25.2	17.0	8.2
San Dimas	5,483	2,852	5.4	0.2	5.2	2.8	0.1	2.7
Elota	1,643	39	259.1	9.4	249.7	6.1	0.2	5.9
Tamazula	5,801	76	1.7	0.1	1.6	0.02	0.002	0.02
Mazatlán	2,533	27	172.8	79.7	93.2	1.8	0.8	1.0
Canatlán	3,505	139	64.4	23.0	41.4	2.5	0.9	1.6
Durango	9,326	0.2	258.0	126.1	131.9	0.01	0.00	0.00
Total:			794.8	261.0	533.8	38.6	19.1	19.5

Adicionalmente se complementó el análisis mediante los distintos usos de los municipios de San Ignacio y San Dimas, ya que son los únicos municipios con sectores económicos dentro de la cuenca (Tabla 17). Se encontró que 26.5 [hm³] de agua se destinan anualmente a la agricultura y 25.6 [hm³] a la generación de energía eléctrica a través de la empresa *Primero Empresa Minera S.A. de C.V.*

Tabla 17. Usos del agua en San Ignacio y San Dimas (CONAGUA, 2021).

San Ignacio			
Uso	V _{EAN} [hm ³ /año]	V _{ASB} [hm ³ /año]	V _{ASP} [hm ³ /año]
Agrícola	26.2	17.1	9.1
Diferentes usos	3.2	3.0	0.2
Público urbano	3.0	2.1	0.9
Pecuario	0.0	0.0	0.0
Total:	32.4	22.3	10.1
San Dimas			
Uso	V _{EAN} [hm ³ /año]	V _{ASB} [hm ³ /año]	V _{ASP} [hm ³ /año]
Diferentes usos	0.3	0.0	0.3
Acuicultura	0.3	0.0	0.3
Público urbano	1.3	0.2	1.0
Servicios	0.1	0.0	0.1
Industrial	0.6	0.0	0.6
Generación de energía eléctrica*	25.6	0.0	25.6
Total:	31.1	0.2	27.9

*Referencia a la empresa Primero Empresa Minera con registro del año 1994.

3.2.4.1. Acuífero del río Piaxtla

En la cuenca en estudio se ubica el acuífero río Piaxtla con una cuenca similar a la superficial (Figura 49). Las extracciones de agua del acuífero alcanzan un promedio de 19.1 hm³/año y se reparten de la siguiente manera: uso agrícola 16.8 hm³/año, público urbano 2.1 hm³/año, abrevadero 0.1 hm³/año y uso doméstico 0.1 hm³/año. Bajo esta clasificación se debe entender como: “público urbano” aquel destinado

al gobierno en cualquiera de sus niveles (generalmente oficinas), “abrevadero” al cual se destina al ganado y, “doméstico” al consumo de cada hogar.

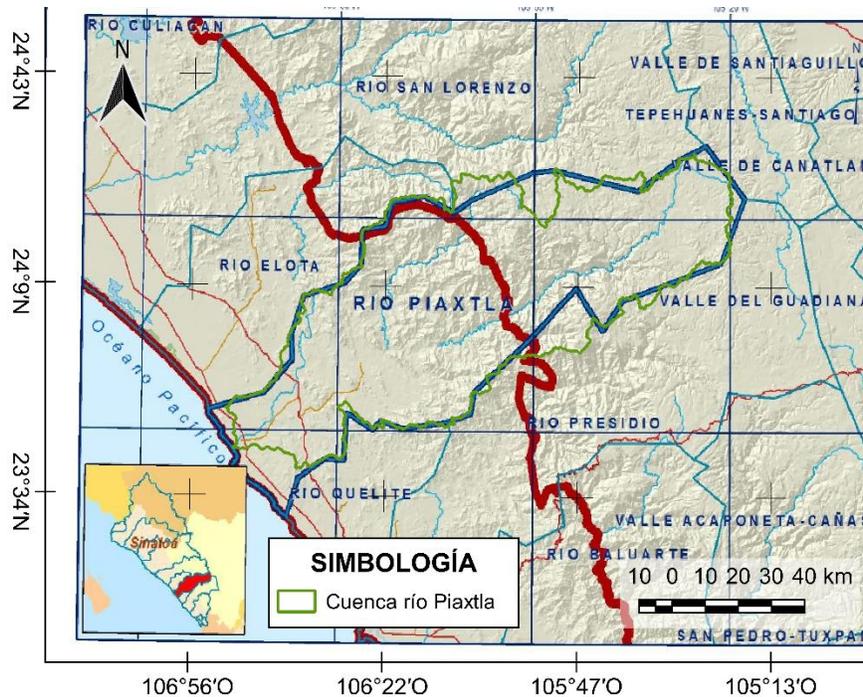


Figura 49. Acuífero y cuenca del río Piaxtla. Modificado de CONAGUA (2020).

Según la CONAGUA, entre 1982 y 2001 no hubo evolución significativa del nivel estático del agua subterránea debido en parte a los niveles de precipitación y al pequeño incremento de la explotación del acuífero. En 1982 existían 74 obras que bombeaban agua del acuífero para su aprovechamiento en la cuenca, extrayendo en total $5.1 \text{ hm}^3/\text{año}$. De estas, 67 obras estaban destinadas para el uso agrícola, para el abastecimiento público 5 y para abrevadero 2.

3.3. Información climatológica

3.3.1. Criterios de selección de estaciones

Los criterios de selección de la cuenca establecen un periodo de análisis de al menos 30 años continuos y con periodo de tiempo en común entre estaciones hidrométricas y climatológicas, para tener una representatividad apropiada de la cuenca. Dadas las condiciones de la información se permitió un periodo de registro menor.

3.3.2. Estaciones hidrométricas

La cuenca del río Piaxtla cuenta con dos estaciones hidrométricas (Figura 50); la estación hidrométrica elegida para el control del escurrimiento fue la 10065 *Ixpalino* y cuenta con información desde 1953 hasta 2011, con periodos sin datos de 1989-1990 y 2000-2006 (CONAGUA, 2021). En cambio, la estación 10111 *Piaxtla CFE* cuenta con registros prácticamente continuos desde 1958 hasta 2009. Por lo que se utilizó para estimar datos faltantes de la EH 10065. El periodo a considerar para las dos estaciones en ambos análisis se indica en la Figura 51. En estas estaciones, se tiene registro de caudales instantáneos y medios diarios (promedio de los valores instantáneos registrados en un día).

3.3.3. Estaciones climatológicas

El periodo de registro se determinó, en primer lugar a partir del periodo de operación para cada estación, sin considerar la cantidad de días nulos o sin registro (días con dato “nulo” e inexistentes en el registro de la estación, respectivamente). De todas las estaciones existentes en la región se inició con aquellas que presentaron al menos 30 años de registro. En ocasiones, se consideró correcto disminuir esta limitante hasta 20 años continuos.

Tras el análisis de cada estación se determinó que aquellas que pueden utilizarse en el análisis son: 10031, 25001, 25021, 25024, 25045, 25084 y 25118 (Figura 50, Tabla 19 y Tabla 18), de un total de 19. Esto deja la zona central con poca información, por lo que se decidió utilizar la estación 10042, a pesar de tener dos periodos de registro continuos separados; cada estación dispone de al menos 30 años de registros efectivos. En los registros existen datos nulos dentro del periodo determinado (Figura 51) en general, no superior a los 4 años (espacios en blanco de la Tabla 19), los cuales fueron estimados mediante métodos de interpolación: ello dio lugar a un periodo de datos común en todas las estaciones, incluidas las hidrométricas de 48 años (1961-2009).

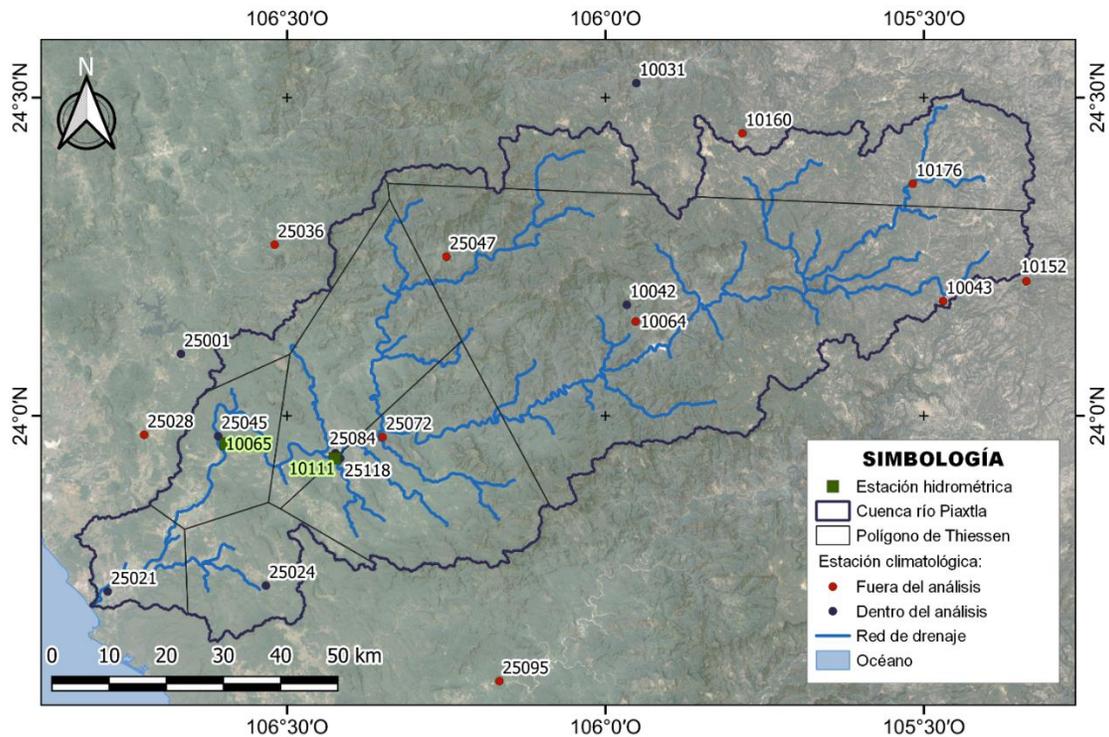


Figura 50. Estaciones analizadas con influencia en la cuenca del río Piaxtla.

Tabla 18. Áreas de influencia de cada E.C.

Cuenca	Áreas según Polígonos de Thiessen de cada E.C. [km ²]								
	10031	10042	25001	25021	25024	25045	25084	25118	Total
Piaxtla	956.6	3,176.9	223.9	243.9	385	371	682.2	935.4	6,974.9
Piaxtla-Ixpalino	964.7	3,175.9	223.9	-	37.4	179.3	682.2	935.1	6,198.3

Tabla 19. Indicador de registro: precipitación y temperatura. Cada década se representa en un tono de verde

Año	10031		10042		25001		25021		25024		25045		25084		25118	
	T _{max}	P _{30u}														
1961																
1962																
1963																
1964																
1965																
1966																
1967																
1968																
1969																
1970																
1971																
1972																
1973																
1974																
1975																
1976																
1977																
1978																
1979																
1980																
1981																
1982																
1983																
1984																
1985																
1986																
1987																
1988																
1989																
1990																
1991																
1992																
1993																
1994																
1995																
1996																
1997																
1998																
1999																
2000																
2001																
2002																
2003																
2004																
2005																
2006																
2007																
2008																
2009																
2010																
2011																
2012																
2013																
2014																
2015																
2016																
2017																
2018																
2019																

Con las estaciones (climatológicas e hidrométricas) anteriores se realizó el análisis de la variabilidad climatológica por estación y por cuenca, tanto temporal (mensual y anual) como espacial de las variables: precipitación acumulada en 24 horas, temperatura máxima, temperatura mínima y caudal. Cabe mencionar que el registro de la EC 25024 se utilizó sólo para el análisis de precipitación de la cuenca completa.

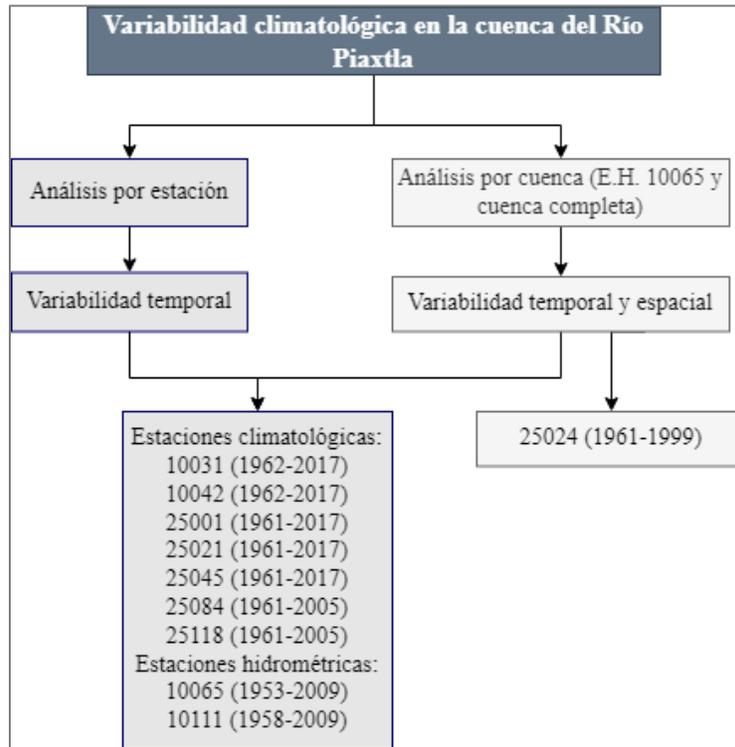


Figura 51. Esquema resumen de las estaciones, longitud de registro y tipos de análisis.

3.4. Análisis de las series de tiempo

El trabajo que se realizó con las series de tiempo de las variables hidrológicas consistió en 3 etapas. La primera, fue la identificación del periodo de análisis (ya descrito en el punto anterior), seguida de la búsqueda de datos nulos o fechas faltantes. La tercera consistió en la aplicación de los métodos de interpolación (regresión simple, IDW y Kriging Ordinario) y las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt. Al final, se describieron y analizaron los resultados derivados de la tercera etapa, el análisis de los resultados se presenta en el siguiente capítulo.

3.4.1. Reconstrucción de series de tiempo de precipitación y temperatura

Propiamente todas las series de tiempo de las estaciones propuestas requieren del uso de algún método de interpolación para estimar datos faltantes, como se observa en la Tabla 20; si no aparece el número de datos nulos para un año dado, se considera que no dispone de registro. Por lo tanto, para analizar el periodo definido, es necesario hacer una reconstrucción importante de todas las estaciones para las 3 variables. En general, se encontró que el registro de precipitación es mejor que el de temperatura, por ejemplo, la E.C. 25024 carece completamente de un registro útil de temperatura y esta variable se descartó del análisis.

Tabla 20. Número de registros nulos (precipitación) por año en las estaciones climatológicas.

Fecha	Número de datos nulos							
Año	10031	10042	25001	25021	25024	25045	25084	25118
1961			0		30	0		0
1962		106	0	327	0	0		0
1963		0	0	1	0	0		0
1964		0	1	29	1	0		0
1965		0	0	1	0	0		0
1966	123	0	1	1	3	0		0
1967	0	0	0	3	30	0		0
1968	0	0	0	0	0	0		0
1969	2	0	30	0	0	31		31
1970	0	1	0	0	0	0		0
1971	0	0	0	0	0	0		0
1972	31	0	0	1	0	0		30
1973	61	0	0	0	0	0		0
1974	0	0	0	0	31	0		0
1975	0	0	0	0	120	0		0
1976	0	0	31	0	60	0	17	91
1977	0	0	0	0	92	0	0	89
1978	0	0	0	0	0	0	0	0
1979	0	0	0	30	0	0	0	0
1980	0	0	0	17	0	0	0	0
1981	0	0	0	0	1	0	0	31
1982	0	0	0	0	0	0	0	0
1983	0	59	0	0	31	0	0	0
1984	0	0	0	0	153	0	0	153
1985	0	0	0	0	64	0	0	62
1986	31	31	0	31	92	31	0	92
1987	276		0	0	120	0	0	120
1988	182		0	0	0	0	1	0
1989	334		61	0	0	0	0	0

Fecha	Número de datos nulos							
Año	10031	10042	25001	25021	25024	25045	25084	25118
1990	243	0	92	92	31	61	0	0
1991	0	0	1	61	0	0	0	0
1992	212	0	21	154	0	0	0	31
1993	123	0	275	0	0	0	0	0
1994	215	0	275	0	0	0	0	0
1995	212	0	0	0	0	0	0	0
1996	29	0	31	0	0	0	0	0
1997	123	1	0	31	0	31	0	0
1998	151	17	0	61	273	0	122	273
1999	30	123	9	0	92	0	0	0
2000	59	127	0	0	0	31	0	0
2001	0	121	2	0	0	0	2	0
2002	295	29	0	182	0	30	0	0
2003	0	0	0	0	0	61	0	0
2004	31	31	0	275	0	0	0	0
2005	31	122	0	243	0	0	31	0
2006	31	67	0	151	0	0	0	0
2007	0	183	31	0	0	31	0	0
2008	30	0	31	0	0	0	0	0
2009	31	0	0	151	0	0	0	0
2010	59	16	31	0	0	0	0	0
2011	0	2	31	0	0	151	0	0
2012	0	18	23	0	0	0	0	0
2013	0	2	31	1	0	0	0	0
2014	0	37	0	0	0	0	0	0
2015	31	0	31	0	0	0	0	0
2016	0	2	31	0	0	31	0	0
2017	61	61	62	0	0	30	0	0
Total:	3037	1156	1132	1843	1224	519	173	1003

Estaciones climatológicas

Para las series de tiempo de las estaciones climatológicas (precipitación y temperatura), inicialmente se utilizó el método del inverso de la distancia (IDW) por su sencillez, pues sólo requiere de la información que ya se tiene y de la distancia entre estaciones. Para ello se programó el código correspondiente en Fortran 95 y se obtuvieron buenos resultados para aquellos años cuyos nulos equivalían a semanas o, especialmente para la precipitación. En periodos de reconstrucción más amplios y, en específico para la temperatura, no se obtuvieron resultados satisfactorios. Por ejemplo, en la E.C. 10042 entre los años 1987 y 1997, se observó un comportamiento incongruente con los datos medidos (Figura 52). Esto es, los valores calculados son mayores. La existencia de pocas estaciones en la zona montañosa de la cuenca, así como la poca correlación (en general, $r < 0.6$) explica este fenómeno, siendo la reconstrucción según IDW un reflejo de las otras estaciones.

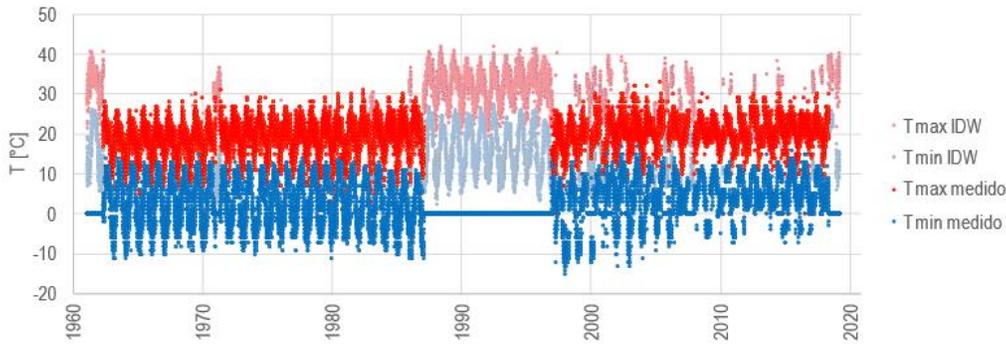


Figura 52. Temperatura medida y estimada con el método IDW para la EC 10042.

Debido a lo anterior se perfeccionó el procedimiento para la reconstrucción de datos faltantes. En cada estación primero se utilizó una curva de ajuste con al menos otra estación, según el número de datos faltantes y la correlación entre estaciones. Algunas estaciones mostraban muy buena correlación entre sí, como fue el caso de las EE.CC. 25084 y 25118. En el caso de las estaciones de la zona montañosa (10042 y 10031) la cantidad de registros nulos es de casi una década, además de ser coincidentes. En este par de casos el análisis se amplió fuera de los límites de las estaciones ya mencionadas; es decir, se realizaron curvas de ajuste con las estaciones climatológicas 10118 y 10122, no consideradas en el análisis.

En la Figura 53 se observan los registros de temperatura máxima de la E.C. 10031. Los espacios entre puntos, así como los que tienen valor de -0.001 se interpretan como nulos. De todas las estaciones propuestas, la más cercana es la E.C. 10042 la cual, presenta un periodo de interrupción mayor y coincide con el de la E.C. 10031 (Figura 54), previo y posterior a este, el registro es prácticamente completo. La curva y ecuación de ajuste entre ambas estaciones se muestra en la Figura 55, donde x es la temperatura de la E.C. 10042 y, y la temperatura de la E.C. 10031.

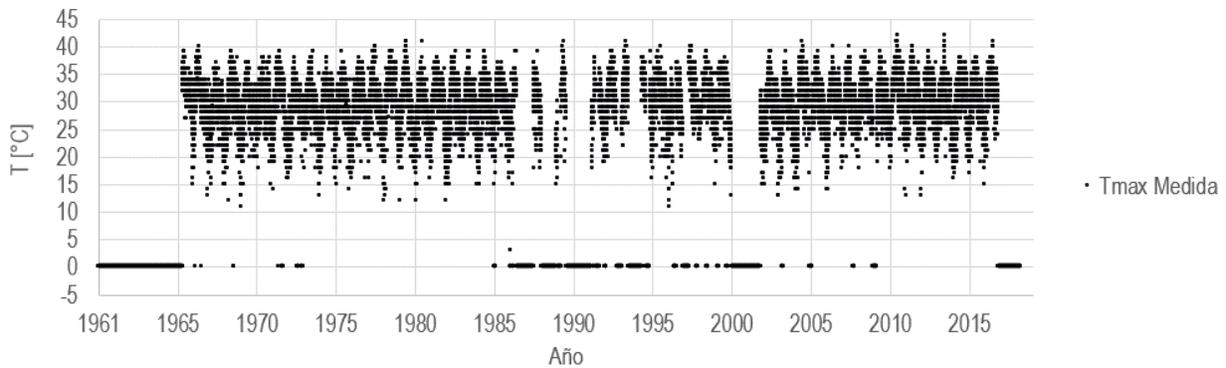


Figura 53. Registros de Tmax en la E.C. 10031.

Es importante mencionar que las curvas de mayor orden siempre tendrán un coeficiente de correlación R más cercano a $|1|$, pero fuera del rango de los datos medidos, tienden a dar valores “extraños”. Además, conforme aumenta el orden de la curva también aumenta su complejidad, por lo que se descartaron curvas de ajuste de orden mayor a 3. Además como el ajuste no es propiamente perfecto, se agregó un número aleatorio como se describió en el capítulo I. El resultado final del proceso de estimar datos faltantes se muestra en la Figura 56.

Todavía se observan algunos valores nulos que no se pudieron estimar, los cuales, al ser menos que en la serie original, se estimaron con otras estaciones más alejadas.

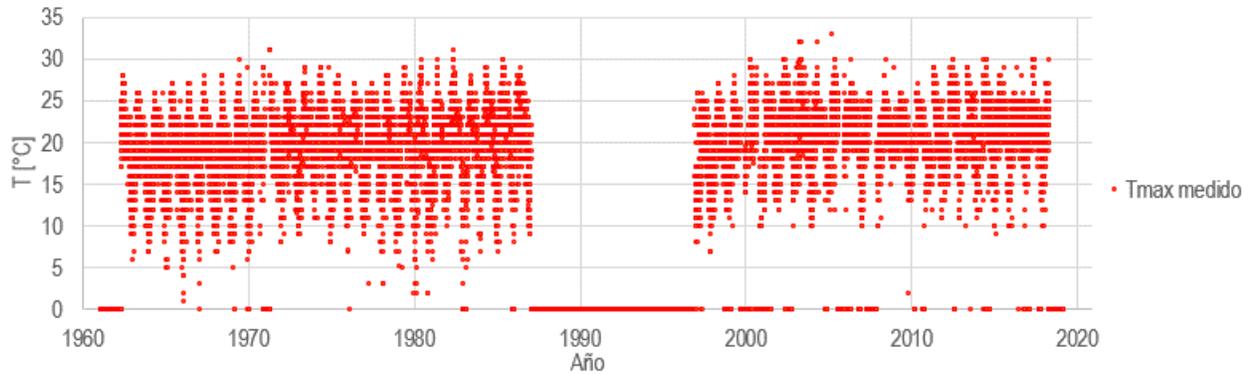


Figura 54. Registro de Tmax de la E.C. 10042

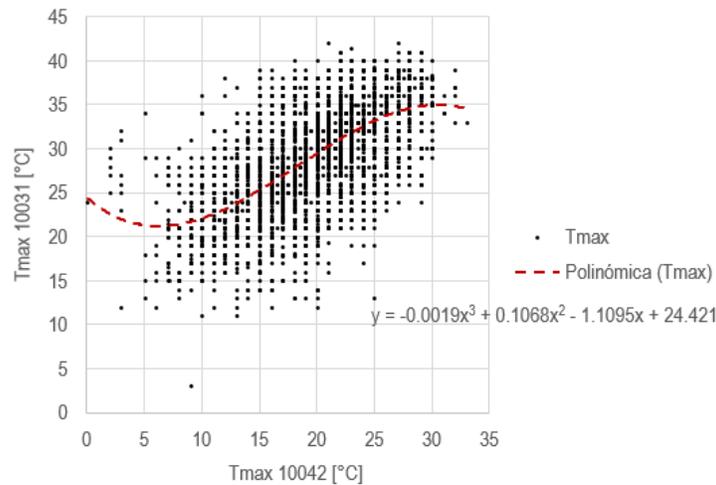


Figura 55. Curva de ajuste para la Tmax entre las EE.CC. 10042 y 10031.

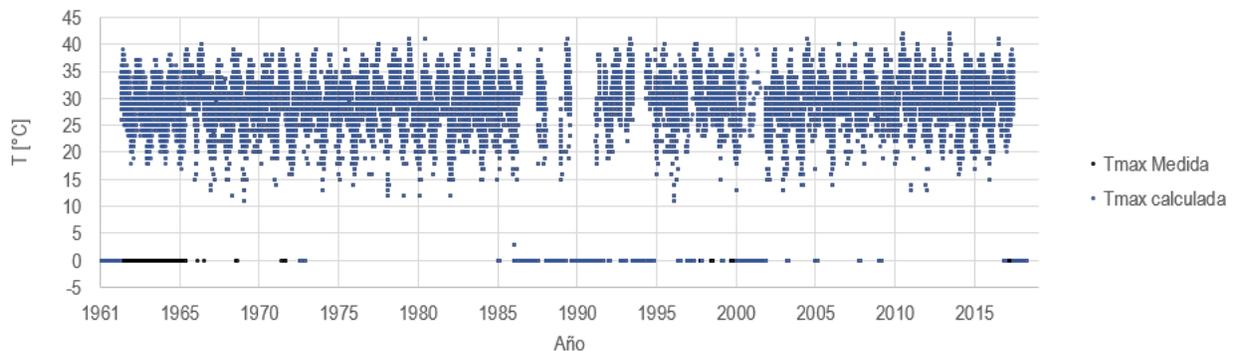


Figura 56. Valores de Tmax calculados en la E.C. 10031 a partir de la E.C. 10042.

En general, el proceso de estimar datos faltantes o nulos se logró utilizando entre 1 y 3 curvas de ajuste. En el caso de la estación 10042, el proceso también incluyó las EE.CC. 10122, 10118 y 10042. El resultado mediante curvas de ajuste se observa en la Figura 57.

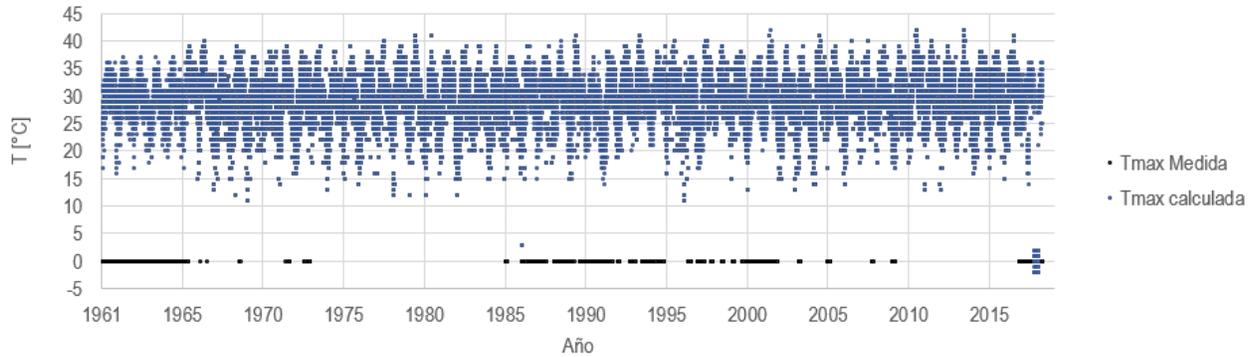


Figura 57. Tmax de la E.C. 10031 reconstruida.

Al final, e independientemente de los resultados obtenidos hasta este punto, se aplicó el método IDW a todas las series de tiempo, pues permite asegurarse que no existan valores nulos no estimados con curvas de ajuste como se observa en la Figura 57.

Reconstrucción de Caudales

Se identificó que, los caudales medios de la E.H. 10065, presentan un comportamiento no congruente con la E.H. aguas arriba 10111 a partir de 1988 (Figura 58). El comportamiento a lo largo del tiempo es bastante similar hasta antes de 1988. A partir de este año el comportamiento de la E.H. 10065 deja de corresponder al de la estación aguas arriba. Se observa primero una disminución incluso por debajo de la E.H. 10111 y después un crecimiento muy rápido que vuelve a bajar, también de forma rápida. Después de esto, los valores de caudal medio suben de forma constante hasta el año 1999.

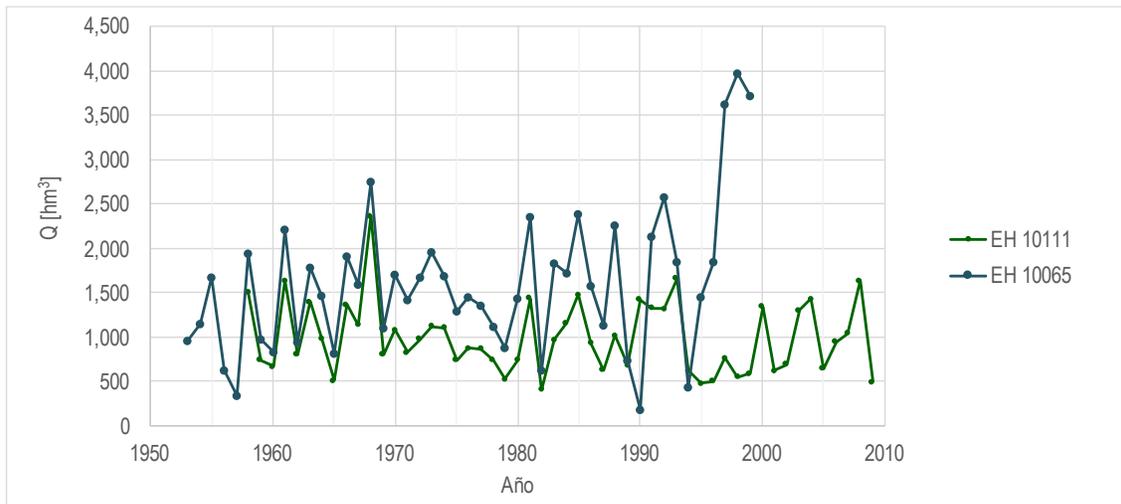


Figura 58. Caudales acumulados anuales E.H. 10065 y E.H. 10111.

Por otra parte, en la cuenca se presentó una sequía importante a finales de los años 90, por lo tanto, los datos de la última década de operación de la E.H. 10065 resultan incongruentes. Es por esto que se reconstruyeron los datos correspondientes al periodo 1990-1999, mediante un ajuste polinómico entre los caudales de ambas estaciones; tras obtener resultados satisfactorios se reconstruyeron los datos hasta el año 2009.

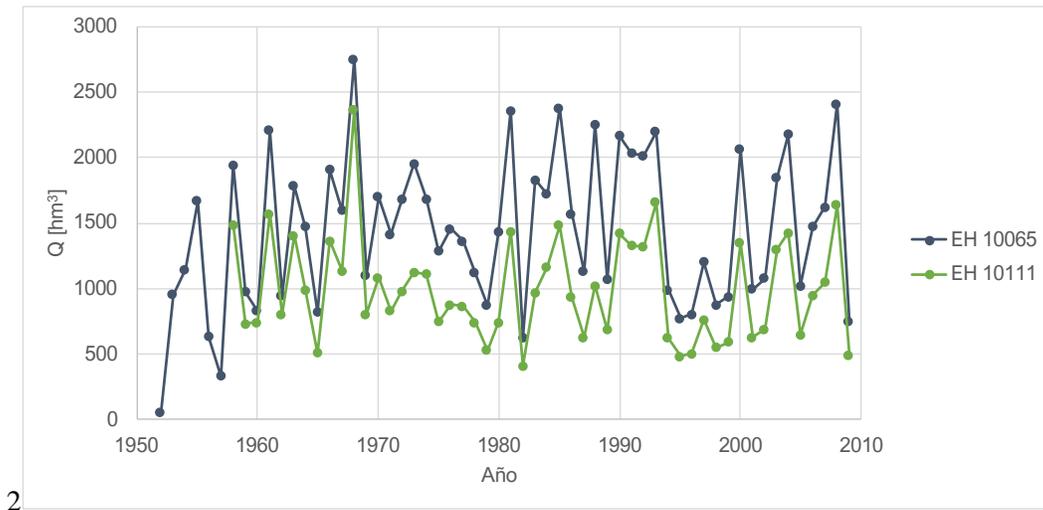


Figura 59. Reconstrucción del caudal acumulado anual de las EE.HH. 10065 y 10111.

3.4.2. Indicadores hidrológicos

La variabilidad temporal de variables hidrológicas generalmente se realiza directamente sobre la magnitud de los registros, lo cual puede conducir a resultados no satisfactorios. Es por ello que algunos estudios climatológicos utilizan indicadores para identificar dicha variabilidad. En este trabajo se utilizaron 13 de ellos. De esta forma se permite ampliar la perspectiva de cada variable y servirán de referencia para compararse con otras investigaciones de cambio climático en el país, especialmente en cuencas que aportan al golfo de California.

Los indicadores para la precipitación son (Tabla 21):

- Precipitación acumulada: suma de la precipitación acumulada en 24 h para un periodo de tiempo dado.
- Precipitación máxima: máximo valor de la precipitación acumulada en 24 h en un periodo dado.
- Número de días húmedos (*number of wet days, NWD*): número total de días en los que la precipitación acumulada en 24 h es superior a 1 mm (lluvia apreciable).
- Días secos consecutivos (*consecutive dry day, CDD*): número total de días secos consecutivos que se presentan dentro de un periodo dado. El valor de CDD puede acumularse desde un periodo de tiempo anterior; caso común en la temporada de estiaje donde se tienen meses sin presentar precipitación.
- Índice simple de intensidad diaria (*simple dairy intensity index, SDII*): es el resultado de dividir la precipitación acumulada de un periodo dado entre el número de días húmedos del mismo periodo. Dado que no es posible analizar la intensidad de una tormenta en lo individual, se utiliza este indicador.

Los indicadores para la temperatura son (Tabla 21):

- Máximo de la temperatura máxima/mínima: es el máximo valor registrado en un periodo dado.
- Mínimo de la temperatura máxima/mínima: es el mínimo valor registrado en un periodo de tiempo.
- Rango diurno de temperatura (*diurnal temperature range, DTR*): es la diferencia entre la temperatura mínima y máxima de un mismo día.

Los indicadores para caudal en la Tabla 21 fueron propuestos a partir de los 13 indicadores de precipitación y temperatura para identificar tendencias en la magnitud del caudal. Para el análisis se construyeron series de tiempo para los 12 meses del año y para cada año correspondiente, para todas las estaciones de medición y para la cuenca.

Tabla 21. Indicadores propuestos para tres variables.

Nombre del indicador	ID	Obtención
Precipitación		
Precipitación acumulada	P_{acu}	$P_{24\ h}$
Precipitación máxima	P_{max}	$\max(P_{24\ h})$
Número de días húmedos	NWD	$P_{24\ h} > 1\ mm$
Días secos consecutivos	CDD	$P_{24\ h} < 1\ mm$
Índice simple de intensidad diaria	SDII	P_{acu}/NWD
Temperatura		
Valor máximo de la temperatura máxima	$T_{max}M$	$\max(T_{max})$
Valor mínimo de la temperatura máxima	$T_{max}m$	$\min(T_{max})$
Valor máximo de la temperatura mínima	$T_{min}M$	$\max(T_{min})$
Valor mínimo de la temperatura mínima	$T_{min}m$	$\min(T_{min})$
Rango diurno de temperatura	DTR	Promedio($T_{max}-T_{min}$)
Caudal		
Caudal acumulado	Q_{acu}	
Caudal máximo	Q_{max}	$\max(Q_{DD})$
Número de días con caudal por arriba de la media	QAA	$Q_{DD} > Q_{med} + 0.5\sigma$

El indicador más sencillo de obtener es el P_{acu} , por ejemplo, para las series mensuales de diciembre de 1962 y enero de 1963 de precipitación de la estación 10031 (Tabla 22), se suman los datos registrados diariamente durante diciembre y enero, resultando de 20.10 [mm] y 14.58 [mm] respectivamente. La P_{max} corresponde a los máximos registros diarios: 8.60 [mm] para diciembre de 1962 y 9.30 [mm] en enero de 1963. El NWD para el mes de diciembre suma un total de 4 [d] y, 2 [d] para enero. Para determinar el CDD, en primer lugar se identifican los días secos y húmedos (a partir de un número 1 y 0, respectivamente en la Tabla 22), en la columna “día seco consecutivo” se hace la suma de los días secos consecutivos y al identificarse un día húmedo se detiene la suma y el valor de la celda se reinicia a 0. De tal forma que se presentan 3 periodos de días secos consecutivos en diciembre y 2 en enero; se observa que el primer periodo seco del mes de enero inicia en diciembre. Los CDD de diciembre resultan a partir del periodo seco más largo, es decir 17 [d] y, para enero de 21 [d], justo al término del mes.

Tabla 22. Registro de precipitación en diciembre 1962 y enero 1963 en la E.C. 10031.

Fecha	P [mm]	Día seco	Día seco consecutivo	Fecha	P [mm]	Día seco	Día seco consecutivo
01/12/1962	0.325	1	1	01/01/1963	0	1	5
02/12/1962	0	1	2	02/01/1963	0	1	6
03/12/1962	0	1	3	03/01/1963	0.331	1	7
04/12/1962	2.059	0	0	04/01/1963	4.185	0	0
05/12/1962	5.993	0	0	05/01/1963	0	1	1
06/12/1962	0.9	1	1	06/01/1963	0	1	2
07/12/1962	0	1	2	07/01/1963	0	1	3
08/12/1962	0	1	3	08/01/1963	0	1	4
09/12/1962	0	1	4	09/01/1963	0	1	5
10/12/1962	0	1	5	10/01/1963	9.301	0	0
11/12/1962	0	1	6	11/01/1963	0.767	1	1
12/12/1962	0	1	7	12/01/1963	0	1	2
13/12/1962	0	1	8	13/01/1963	0	1	3
14/12/1962	0	1	9	14/01/1963	0	1	4
15/12/1962	0	1	10	15/01/1963	0	1	5
16/12/1962	0	1	11	16/01/1963	0	1	6
17/12/1962	0	1	12	17/01/1963	0	1	7
18/12/1962	0	1	13	18/01/1963	0	1	8
19/12/1962	0.976	1	14	19/01/1963	0	1	9
20/12/1962	0	1	15	20/01/1963	0	1	10
21/12/1962	0	1	16	21/01/1963	0	1	11
22/12/1962	0.174	1	17	22/01/1963	0	1	12
23/12/1962	1.071	0	0	23/01/1963	0	1	13
24/12/1962	0	1	1	24/01/1963	0	1	14
25/12/1962	0	1	2	25/01/1963	0	1	15
26/12/1962	0	1	3	26/01/1963	0	1	16
27/12/1962	8.604	0	0	27/01/1963	0	1	17
28/12/1962	0	1	1	28/01/1963	0	1	18
29/12/1962	0	1	2	29/01/1963	0	1	19
30/12/1962	0	1	3	30/01/1963	0	1	20
31/12/1962	0	1	4	31/01/1963	0	1	21

Finalmente, el $SDII$ se obtiene al dividir la P_{acu} de cada mes entre el NWD correspondiente, resultando para los meses mencionados de 5.03 [mm/d] y 7.29 [mm/d], respectivamente.

En el caso de la temperatura (Tabla 23), la obtención del $\max(T_{max})$ del mes de diciembre de 1962, consiste en buscar el valor máximo de los registros diarios del mes de la temperatura máxima, que resulta de 31 [°C] y, de forma similar el $\min(T_{max})$ resulta de 17 [°C]. Análogamente se procede con la serie de la temperatura mínima para el mes de enero.

Tabla 23. Registros de temperatura diciembre 1962 y enero 1963, E.C. 10031.

Fecha	Tmax [°C]	Tmin [°C]	DTR [°C]	Fecha	Tmax [°C]	Tmin [°C]	DTR [°C]
01/12/1962	28	14	14	01/01/1963	27	9	18
02/12/1962	28	9	19	02/01/1963	28	9	19
03/12/1962	27	9	18	03/01/1963	26	10	16
04/12/1962	27	10	17	04/01/1963	24	13	11
05/12/1962	26	14	12	05/01/1963	27	11	16
06/12/1962	25	14	11	06/01/1963	26	12	14
07/12/1962	28	9	19	07/01/1963	29	11	18
08/12/1962	26	7	19	08/01/1963	23	11	12
09/12/1962	30	9	21	09/01/1963	25	9	16
10/12/1962	28	11	17	10/01/1963	26	10	16
11/12/1962	25	10	15	11/01/1963	28	10	18
12/12/1962	25	10	15	12/01/1963	23	5	18
13/12/1962	27	8	19	13/01/1963	18	9	9
14/12/1962	26	9	17	14/01/1963	20	6	14
15/12/1962	31	11	20	15/01/1963	26	6	20
16/12/1962	25	9	16	16/01/1963	28	6	22
17/12/1962	30	9	21	17/01/1963	26	5	21
18/12/1962	27	10	17	18/01/1963	24	5	19
19/12/1962	25	10	15	19/01/1963	25	7	18
20/12/1962	25	10	15	20/01/1963	24	7	17
21/12/1962	25	9	16	21/01/1963	27	2	25
22/12/1962	23	10	13	22/01/1963	29	2	27
23/12/1962	21	11	10	23/01/1963	29	4	25
24/12/1962	28	7	21	24/01/1963	29	4	25
25/12/1962	25	4	21	25/01/1963	31	7	24
26/12/1962	24	4	20	26/01/1963	29	8	21
27/12/1962	17	9	8	27/01/1963	30	3	27
28/12/1962	21	9	12	28/01/1963	31	5	26
29/12/1962	23	7	16	29/01/1963	29	9	20
30/12/1962	30	10	20	30/01/1963	32	8	24
31/12/1962	27	9	18	31/01/1963	33	10	23

Por su parte, el *DTR* se calcula diariamente, como la diferencia entre T_{max} y T_{min} para, al final, hacer un promedio de los valores de cada mes: en enero, el *DTR* es 19.32 [°C].

Para el caudal, la obtención de los valores es similar, haciendo una conversión de unidades a hm^3 pues conservar las unidades del registro (m^3) genera valores muy grandes.

De esta forma, para cada serie de tiempo (mensual y anual) se calcularon los indicadores de las variables consideradas (precipitación acumulada en 24 horas, temperatura máxima, temperatura mínima y caudal medio/volumen diario) para los 12 meses de cada año y para cada año del registro de cada estación

(climatológica e hidrométrica). Además del análisis por estación (puntual), se realizó un análisis a nivel de subcuenca (hasta la estación hidrométrica 10065).

3.5. Resultados

En este apartado se presentan los resultados de las pruebas estadísticas; para su aplicación, la prueba de Mann-Kendall se programó en Fortran y con la prueba de Pettitt se utilizó la herramienta XLSTAT de Excel. Los resultados de las pruebas anteriores se resumen en una tabla con 5 secciones; cada una muestra el valor de los indicadores (Tabla 25 a la Tabla 42). Las secciones corresponden a los resultados de Mann-Kendall (estadístico Z_{MK}), la significancia de la prueba (TSD, TNSD, ST, TNSC, TSC) y los resultados de la prueba de Pettitt (promedio de la variable antes (X_{med1}) y después (X_{med2}) del punto y año de cambio. Si no se presenta el resultado, la prueba de Mann-Kendall y/o Pettitt dio como resultado H_0 (sin cambio). En general, suelen corresponder ambos resultados.

3.5.1. Análisis puntual: variabilidad temporal

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar las pruebas estadísticas a las series de tiempo (mensual y anual) de los indicadores de las distintas variables de cada estación (análisis puntual). Para ello, sirva de ejemplo la serie de precipitación acumulada (P_{acu}) del mes de septiembre de la E.C. 10031, con un total de 56 datos ($n = 56$) (Figura 60). En esta serie de tiempo, se encontró evidencia de cambio y se realizó un ajuste lineal para conocer la tasa de cambio, la cual se muestra en la misma figura. Este procedimiento se aplicó a todas las series de tiempo que mostraron evidencia de tendencia significativa (creciente o decreciente).

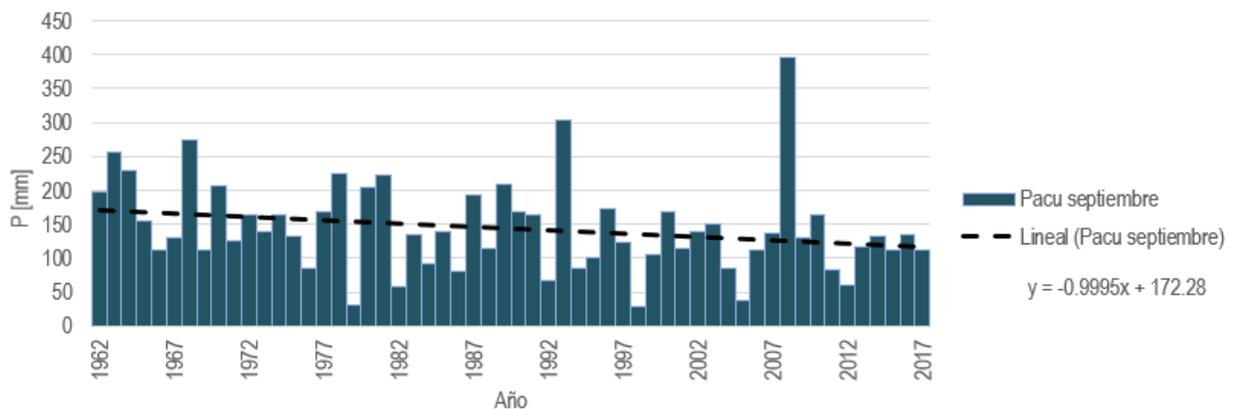


Figura 60. Pacu en el mes de septiembre de la E.C. 10031.

La aplicación de la prueba de Mann-Kendall consiste en:

Paso 1. Se comparan los valores de la serie de tiempo entre sí. Se inicia con la primera observación $i_1 = 1$, la cual se compara con las observaciones siguientes (desde $j = i + 1$, esto es $j = 2$ hasta $i = n$, $n = 56$); enseguida se evalúa $sgn(X_j - X_i)$. Si $X_1 = 198.13 [mm]$, $X_2 = 255.49 [mm]$, $X_3 = 230 [mm]$ y $X_4 = 154.49 [mm]$, son los valores de la lluvia acumulada en el mes de septiembre, entonces:

$$sgn(X_2 - X_1) = sgn(255.49 - 198.13) = sgn(57.4) = 1$$

$$\text{sgn}(X_3 - X_1) = \text{sgn}(230 - 198.13) = -1$$

$$\text{sgn}(X_4 - X_1) = \text{sgn}(154.49 - 198.13) = -1$$

Posteriormente, se suman todos los valores calculados anteriormente:

$$\sum \text{sgn}(X_j - X_1) = 1 - 1 - 1 + \dots + 1 = -35$$

Se continúa con la segunda observación i_2 y se compara con las observaciones subsecuentes (desde $j = i + 1$, esto es $j = 3$ hasta $i = n$; nuevamente se evalúa $\text{sgn}(X_j - X_i)$); el resultado es:

$$\text{sgn}(X_3 - X_2) = \text{sgn}(230 - 255.49) = -1$$

$$\text{sgn}(X_4 - X_2) = \text{sgn}(154.49 - 255.49) = -1$$

$$\sum \text{sgn}(X_i - X_2) = -48$$

El procedimiento se repite para $i = 3$ hasta n y finalmente se suman todos los resultados de estas sumas:

$$\sum \text{sgn}(X_i - X_1) + \sum \text{sgn}(X_i - X_2) + \dots + \sum \text{sgn}(X_i - X_n) = -35 - 48 + \dots - 1 = -321$$

El resultado, es decir, el estadístico S de Mann-Kendall es $S = -321$.

Paso 2. Se calcula la varianza $V(S)$ (ecuación 13) para $n = 56$, esto es:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [56(56 - 1)(2 \times 56 + 5)]$$

$$V(S) = 20,020$$

Paso 3. Se calcula el estadístico Z_{MK} (ecuación 12):

$$Z_{MK} = \frac{S - 1}{\sqrt{V(S)}} = \frac{-321 - 1}{\sqrt{20020}} = -2.26$$

Paso 4. Se compara el valor del estadístico Z_{MK} con el valor de Z_n . El valor de Z_n de la distribución normal para un $\alpha = 0.05$ es $Z_n = 1.96$. Dado que:

$$Z_{MK} > Z_n$$

Se rechaza H_0 y se concluye que la evidencia indica que existe una tendencia significativa decreciente (TSD).

Una vez que se determina que existe una tendencia en la serie, se le realiza un ajuste lineal y la pendiente de la recta resultante, representa el cambio promedio anual. Es decir, se deriva la función mostrada en la Figura 60: $f(x) = -0.9995x + 172.28$, dando como resultado -0.9995 , lo cual se interpreta como que

anualmente, la precipitación acumulada disminuye 1 [mm]. Este ajuste se aplicó a todas aquellas series de tiempo cuyo resultado de Mann-Kendall y/o Pettitt sea significativa (creciente o decreciente).

En la serie de tiempo de P_{acu} del mes de septiembre de la estación 10032, no se identificó punto de cambio según la prueba de Pettitt, pero sí sucedió en la serie de tiempo anual de $\max(T_{max})$. Para la aplicación de la prueba de Pettitt, se utiliza como apoyo la Tabla 24, en la cual se encuentran los valores de cada variable empleada. De esta forma, para determinar el rango de cada observación, primero se identifican los valores extremos:

$$X_{max} = 42 [^{\circ}C], X_{min} = 36 [^{\circ}C]$$

Existen dos registros en la serie igual a 42 [°C] (año 2002 y 2011), es decir, un empate y por tanto no hay rango $R = 1$, y las dos observaciones presentan un rango $R = 2$.

De tal forma que, ordenando los valores de mayor a menor y considerando empates de rangos, a la primera observación $X_{d=1} = 37 [^{\circ}C]$ le corresponde el rango $R_1 = 51.5$.

La suma W_d y el estadístico U hasta este punto sólo considera la primera observación $d = 1$:

$$W_d = \sum_{i=1}^d R_i = 51.5$$

$$U = 2W_d - d(n + 1) = 2(51.5) - 1(56 + 1) = 46$$

A la segunda observación $X_{d=2} = 36 [^{\circ}C]$ le corresponde un rango $R_2 = 56$. La diferencia entre el rango de la segunda observación con la primera (1 [°C]) se debe a la repetición de los valores observados. La nueva suma W_d y estadístico U resultan:

$$W_d = 51.5 + 56 = 107.5$$

$$U = 2(107.5) - 2(56 + 1) = 101$$

El procedimiento se repite hasta la última observación de la serie de tiempo ($d = n = 56$) y se busca el máximo valor del estadístico U . En caso de existir un punto de cambio, el estadístico U alcanza su valor máximo antes de que d alcance el valor de n y, la aplicación correcta de la prueba se comprueba si la última observación tiene como resultado $U = 0$. En este caso $U_{max} = 294$ para $d = 32$, es decir, en el año 1993.

Tabla 24. Obtención de los estadísticos de la prueba de Pettitt.

Año	d	Xd	Ri	Wi	U	Año	d	X _d [°C]	Ri	Wi	U
1962	1	37	51.5	51.5	46	1990	29	41	6.5	947	241
1963	2	36	56	107.5	101	1991	30	38	42.5	989.5	269
1964	3	37	51.5	159	147	1992	31	38	42.5	1032	297
1965	4	37	51.5	210.5	193	1993	32	39	27	1059	294
1966	5	39	27	237.5	190	1994	33	41	6.5	1065.5	250
1967	6	40	13	250.5	159	1995	34	39	27	1092.5	247
1968	7	37	51.5	302	205	1996	35	40	13	1105.5	216
1969	8	39	27	329	202	1997	36	37	51.5	1157	262
1970	9	37	51.5	380.5	248	1998	37	40	13	1170	231
1971	10	38	42.5	423	276	1999	38	39	27	1197	228
1972	11	39	27	450	273	2000	39	38	42.5	1239.5	256
1973	12	38	42.5	492.5	301	2001	40	37	51.5	1291	302
1974	13	39	27	519.5	298	2002	41	42	2	1293	249
1975	14	38	42.5	562	326	2003	42	39	27	1320	246
1976	15	39	27	589	323	2004	43	39	27	1347	243
1977	16	38	42.5	631.5	351	2005	44	41	6.5	1353.5	199
1978	17	40	13	644.5	320	2006	45	39	27	1380.5	196
1979	18	39	27	671.5	317	2007	46	40	13	1393.5	165
1980	19	41	6.5	678	273	2008	47	40	13	1406.5	134
1981	20	41	6.5	684.5	229	2009	48	39	27	1433.5	131
1982	21	38	42.5	727	257	2010	49	39	27	1460.5	128
1983	22	39	27	754	254	2011	50	42	2	1462.5	75
1984	23	39	27	781	251	2012	51	40	13	1475.5	44
1985	24	39	27	808	248	2013	52	39	27	1502.5	41
1986	25	37	51.5	859.5	294	2014	53	42	2	1504.5	-12
1987	26	39	27	886.5	291	2015	54	38	42.5	1547	16
1988	27	39	27	913.5	288	2016	55	38	42.5	1589.5	44
1989	28	39	27	940.5	285	2017	56	41	6.5	1596	0

A continuación, se muestran los resultados correspondientes de todas las estaciones y se presentan en orden cronológico según la clave de la estación, iniciando con las estaciones climatológicas del estado de Durango.

3.5.1.1. Temperatura

En general, la temperatura muestra gran variabilidad, casi en todos los meses del año y en las series anuales. Además, se observan valores de los estadísticos S y Z_{MK} considerablemente altos. Los resultados obtenidos para la E.C. 10031, muestran una tendencia significativa creciente en $\max(T_{max})$ en los meses de junio, septiembre y octubre y, una tendencia decreciente significativa para el mes de diciembre (Tabla 25). Los otros meses del año registran una tendencia no significativa creciente, con excepción de enero, donde $Z_{MK} = -0.67$. El comportamiento es suficiente para que los máximos anuales presenten una tendencia creciente significativa, con un $Z_{MK} = 3.06$. Los mínimos de la temperatura máxima ($\min(T_{max})$) no presentan cambio, salvo el mes de octubre que presenta una tendencia significativa creciente, con un $Z_{MK} = 2.29$. En cambio, la prueba de Pettit, detecta un cambio creciente para los meses de enero y mayo.

En la temperatura mínima se observa un cambio más marcado que en las máximas. Por ejemplo, para $\max(T_{min})$ se presenta un cambio creciente significativo en el periodo mayo-agosto y a nivel anual, con un aumento de casi 2.0 [°C] en 56 años. El valor mínimo de la temperatura mínima $\min(T_{min})$ presenta un mayor cambio, desde febrero hasta octubre, pero no representa en ningún momento un cambio importante a nivel anual. El *DTR* presenta un cambio decreciente entre abril y agosto y también a nivel anual.

En la Figura 61 se muestra gráficamente las series de tiempo correspondientes a los mayores cambios observados en cada indicador según Mann-Kendall; en cada gráfica, una línea punteada indica el ajuste lineal y las líneas continuas horizontales corresponden a los dos promedios de la prueba de Pettitt. Se observa que el aumento de la temperatura y disminución del *DTR* ha ocurrido de forma constante en todo el periodo de registro, con excepción de la temperatura mínima donde el cambio creciente se observa más en los últimos años.

En la E.C. 10042 (Tabla 26), se observa un cambio creciente importante a lo largo de todo el año de la temperatura, tanto de la máxima como de la mínima. Sin embargo, en $\max(T_{max})$ sólo se observa evidencia de cambio en 3 meses del año. El *DTR* no presenta un cambio tan marcado como la temperatura y se da en dos periodos: marzo-mayo (tendencia decreciente) y julio-septiembre (tendencia creciente). En la Figura 62 se observa cómo el cambio en los dos indicadores de la temperatura máxima para el mes de enero crece de la misma manera, es decir, un aumento promedio de 0.1 [°C] por año y el punto de cambio coincide para ambas en el año 1985. Destaca cómo en general, los valores máximos de la temperatura mínima no presentan evidencia de cambio, en contraste de los valores mínimos.

En la E.C. 25001, ya en el estado de Sinaloa, se observa una reducción general de la temperatura máxima y muy poco cambio en la temperatura mínima (Tabla 27). De tal forma que, los únicos indicadores que presentan evidencia de cambio a lo largo del año son $\max(T_{max})$ y *DTR*.

En la E.C. 25021 (Tabla 28), el cambio de la temperatura se da esencialmente en la temperatura máxima y prácticamente se mantiene sin cambios la temperatura mínima. Adicional a esto, se observa también una tendencia creciente en el *DTR*, aunque no coincide del todo con el cambio de la temperatura máxima. Las series de temperatura donde se observó el mayor cambio anual para esta estación se encuentran en la Figura 64, destacando que en $\min(T_{min})$ sólo existe evidencia de cambio en el mes de marzo.

En la E.C. 25045 (Tabla 29 y Figura 65), es notable el aumento de la temperatura máxima a lo largo del año en comparación del ocasional aumento de la temperatura mínima. De hecho, el cambio observado en $\max(T_{min})$ es decreciente. Gracias a esto el *DTR* cambia de forma creciente en casi todos los meses y muy marcadamente en enero y diciembre. En ocasiones, el incremento anual del *DTR* es similar al de $\max(T_{max})$.

En la E.C. 25084 (Tabla 30 y Figura 66) se observan tanto tendencias crecientes como decrecientes en T_{min} , T_{max} y *DTR* para el mismo indicador de forma marcada, esto es, los cambios decrecientes ocurren principalmente entre noviembre y marzo y los crecientes entre mayo y octubre.

Por último, en la Tabla 31 y Figura 67 se muestran los resultados de la E.C. 25118, los cuales son similares a la estación anterior. Esto es, presentando reducción de la temperatura en la temporada de invierno aunque el cambio del *DTR* es menor.

Tabla 25. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 10031 (temperatura).

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año
ene	-0.67	TNSD			1.54	TNSC	16.6-19	1985	0.41	TNSC			0.04	TNSC			-0.22	TNSD		
feb	1.39	TNSC			0.74	TNSC			0.72	TNSC			2.99	TSC	2.3-3.4	1992	-0.53	TNSD		
mar	1.69	TNSC			0.23	TNSC			0.96	TNSC			2.55	TSC			-1.56	TNSD		
abr	1.37	TNSC			0.75	TNSC			1.66	TNSC	13.9-16.4	1998	3.50	TSC	5.5-8.1	2001	-2.23	TSD	21.9-20.5	1995
may	1.83	TNSC			1.81	TNSC	27.1-29.4	1986	2.79	TSC	16.8-18.8	1993	3.15	TSC	8.7-10.8	1992	-2.02	TSD	20.8-19.4	2002
jun	2.84	TSC	37.9-39.5	2001	0.55	TNSC			3.15	TSC	20.2-22.1	2002	2.78	TSC	12.2-15.4	2003	-2.42	TSD	17.5-16.2	1991
jul	0.07	TNSC			0.34	TNSC			2.97	TSC	19.5-21	1996	3.39	TSC	12.9-15.2	1996	-3.29	TSD	14.1-12.4	1997
ago	0.74	TNSC			-0.30	TNSD			1.97	TSC	18.9-19.7	1988	3.76	TSC	13-14.4	1994	-1.85	TNSD	14.4-12.7	2002
sep	3.41	TSC	33.6-35.1	1986	0.79	TNSC			1.76	TNSC			1.68	TNSC	11.9-13.3	1998	-0.56	TNSD		
oct	2.05	TSC			2.29	TSC	22.8-24.8	1986	-0.03	TNSD			2.05	TSC			0.13	TNSD		
nov	0.98	TNSC			-0.01	TNSD			-0.94	TNSD			0.61	TNSC			-0.65	TNSD		
dic	-2.67	TSD	31.2-29.1	1977	0.36	TNSC			-2.13	TSD			-0.13	TNSD			1.05	TNSC		
Anual	3.06	TSC	38-39.4	1977	0.97	TNSC			4.07	TSC	20.6-22.9	2002	1.05	TNSC			-2.14	TSD	18.2-17.5	1999

Tabla 26. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 10042 (temperatura).

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año
ene	4.14	TSC	19.4-22.7	1985	3.72	TSC	8.3 (13)	1985	1.55	TNSC			3.55	TSC	-7.6 (-4.8)	1987	-0.23	TNSD		
feb	2.57	TSC	21-22.5	1981	3.50	TSC	8.7 (13.3)	1986	1.69	TNSC			3.85	TSC	-7.9 (-4.2)	1986	-0.94	TNSD		
mar	0.78	TNSC			2.21	TSC	11.2 (14.4)	1983	0.70	TNSC			4.65	TSC	-7.9 (-3.9)	1986	-1.86	TNSD	20.9-17.6	2000
abr	-0.94	TNSD	25.6-22.7	2006	1.79	TNSC			0.43	TNSC			2.88	TSC	-5.0 (0.1)	2001	-3.45	TSD	20.9-17.2	1998
may	-1.34	TNSD			1.36	TNSC	16.3 (18.4)	1983	2.22	TSC			3.80	TSC	-2.7 (1.6)	2001	-3.73	TSD	20.8-17.7	1989
jun	1.28	TNSC			2.94	TSC			-2.77	TSD	12.6-11.3	1981	3.98	TSC	0.8 (3.8)	1991	-0.05	TNSD		
jul	3.35	TSC	24.4-26.4	1999	4.82	TSC	16.4 (18.8)	1991	-1.49	TNSD			-0.23	TNSD	5.2 (8.5)	2007	4.90	TSC	10.9-13.3	1982
ago	4.39	TSC	24.1-26.2	1999	3.97	TSC	17.5 (19.8)	1999	0.55	TNSC			0.81	TNSC	5.1 (7.5)	2000	3.22	TSC	11.3-13.4	1981
sep	3.58	TSC	22.2-25	1970	3.02	TSC	16.8 (18.9)	1998	-1.50	TNSD	12.3-11.21	1981	0.79	TNSC	2.8 (5.8)	2000	2.12	TSC	11.7-13.8	1981
oct	1.84	TNSC	22.9-24.7	1973	4.23	TSC	13.7 (16.8)	1981	0.30	TNSC			2.82	TSC	-1.9 (1.1)	2001	-0.69	TNSD		
nov	4.21	TSC	22.4-23.8	1983	3.59	TSC	10.9 (14.2)	1986	1.19	TNSC			3.16	TSC	-5.9 (3.4)	1986	-0.61	TNSD		
dic	2.46	TSC			4.30	TSC	8.5 (12.4)	1986	-0.59	TNSD			3.88	TSC	-7.6 (-5)	1986	1.09	TNSC		
Anual	1.65	TNSC	27.7-29.6	1999	4.01	TSC	5.9 (10.7)	1987	-0.27	TNSD			2.60	TSC	-9.2 (-7.1)	1987	-0.93	TNSD		

Tabla 27. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25001 (temperatura).

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[°C]}$	Año
ene	-0.83	TNSD			2.42	TSC	22.9-25.6	1993	0.72	TNSC			-0.06	TNSD			0.34	TNSC		
feb	-0.83	TNSD			0.73	TNSC			-0.61	TNSD			0.81	TNSC			-0.23	TNSD		
mar	-3.09	TSD	38.7-37.4	1992	-0.94	TNSD			-0.89	TNSD			2.11	TSC			-2.31	TSD		
abr	-4.12	TSD	40.6-38.3	1992	-0.14	TNSD			-1.39	TNSD			1.36	TNSC			-2.65	TSD	22.3-20.8	1991
may	-4.29	TSD	41.3-39.5	1990	-1.49	TNSD			0.00	ST			1.36	TNSC			-3.18	TSD	21-18.5	2008
jun	-2.87	TSD	41-40	1993	0.54	TNSC			-0.31	TNSD			1.32	TNSC	15.4-19.1	2003	-1.98	TSD	16.4-13.7	2005
jul	-3.04	TSD	40-38.5	1998	-0.59	TNSD			-1.34	TNSD			0.23	TNSC	19.7-22.5	2005	-0.96	TNSD	13.1-10.4	2008
ago	-1.56	TNSD			-1.91	TNSD			-0.95	TNSD			0.83	TNSC			-0.56	TNSD	12.4-10.3	2007
sep	-1.20	TNSD			0.85	TNSC			-0.31	TNSD			0.59	TNSC	18.8-22.2	2008	-0.06	TNSD	12.1-9.2	2009
oct	-1.07	TNSD			1.76	TNSC			0.94	TNSC			0.30	TNSC			-1.19	TNSD		
nov	-1.36	TNSD			0.60	TNSC			-0.43	TNSD			-0.22	TNSD			-1.09	TNSD		
dic	-2.69	TSD	36-34.7	1988	0.92	TNSC			-1.42	TNSD			-1.05	TNSD			0.14	TNSC		
Anual	-4.89	TSD	42.3-40.3	1993	1.48	TNSC			-1.89	TNSD			0.00	ST			-2.22	TSD	17.2-15.4	2008

Tabla 28. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25021 (temperatura).

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año
ene	1.16	TNSC			3.34	TSC	19.8-22.8	1981	-0.67	TNSD			-0.87	TNSD			3.15	TSC	13.9-17.1	1992
feb	1.67	TNSC			3.32	TSC	21-23.4	1979	-0.87	TNSD			0.76	TNSC			1.79	TNSC		
mar	1.76	TNSC			2.52	TSC			-1.62	TNSD			2.08	TSC			1.59	TNSC		
abr	1.13	TNSC			2.77	TSC	24.5-28.1	2003	-1.47	TNSD			1.56	TNSC			1.36	TNSC		
may	1.93	TNSC	33.6-35.7	1984	3.08	TSC	26.4-29.9	1992	-0.67	TNSD			1.58	TNSC			1.89	TNSC	13.3-16	1992
jun	0.50	TNSC			2.49	TSC	27.9-30.8	1981	0.12	TNSC			1.69	TNSC			1.20	TNSC		
jul	1.56	TNSC	34.5-36.7	1973	2.62	TSC	29.3-30.8	1983	-1.51	TNSD			1.09	TNSC			2.28	TSC	7.7-10.8	1973
ago	0.78	TNSC	34.4-36.5	1972	2.23	TSC			-0.41	TNSD			1.87	TNSC			1.82	TNSC	7.8-10.6	1972
sep	1.73	TNSC	33.7-36.5	1972	1.67	TNSC			-0.45	TNSD			0.96	TNSC			2.63	TSC	7.7-10.5	1973
oct	0.56	TNSC			3.58	TSC	27.2-30.5	2003	0.11	TNSC			0.45	TNSC			1.78	TNSC		
nov	1.51	TNSC			3.23	TSC	24.4-26.7	1990	-1.17	TNSD			0.53	TNSC			1.90	TNSC		
dic	-0.30	TNSD			4.16	TSC	20.4-23.6	1972	-1.69	TNSD			-1.36	TNSD			3.29	TSC	13-16.1	1991
Anual	1.02	TNSC			3.35	TSC	18.9-21	1981	-1.22	TNSD			-0.51	TNSD			2.49	TSC	11.2-13.6	1973

Tabla 29. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25045 (temperatura).

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año
ene	4.43	TSC	33.6-37	1985	3.07	TSC	22.3-36	1993	-1.27	TNSD			-0.61	TNSD			3.73	TSC	17.6-20.9	1985
feb	4.16	TSC	35.2-37.3	1998	2.33	TSC	24.3-27.1	1987	-0.52	TNSD			1.26	TNSC			2.97	TSC	19.6-21.6	1987
mar	2.75	TSC			2.52	TSC	26.9-28.8	1994	-2.13	TSD			2.42	TSC			2.60	TSC	20.4-22.2	1983
abr	2.00	TSC			3.07	TSC			-1.50	TNSD			1.49	TNSC			2.82	TSC	20-21.8	1986
may	3.68	TSC	38.7-39.8	1980	2.15	TSC	31.5-33.6	1993	-1.30	TNSD			0.44	TNSC			4.02	TSC	18.4-20.2	1996
jun	5.95	TSC	39.1-40.5	1986	3.06	TSC	31-33.6	1986	-0.94	TNSD			2.74	TSC	17.8-19.8	1995	4.17	TSC	13-14.7	1986
jul	5.43	TSC	38.1-39.7	1986	1.98	TSC			-2.82	TSD	26.6-25.6	1995	1.78	TNSC			6.01	TSC	11-12.9	1993
ago	4.87	TSC	37.1-38.7	1987	3.10	TSC	29.9-31.3	1989	-1.52	TNSD			1.94	TNSC			6.72	TSC	10.3-12.5	1995
sep	4.23	TSC	36-38	1981	1.95	TNSC			-1.76	TNSD			2.51	TSC	20.7-21.6	1998	5.38	TSC	9.5-11.4	1981
oct	3.86	TSC	37-38.5	1991	3.41	TSC	27.2-30.7	1987	0.25	TNSC			1.49	TNSC			2.84	TSC	13-14.8	1994
nov	4.63	TSC	35.6-38.4	1994	1.31	TNSC			-0.74	TNSD			1.04	TNSC			2.49	TSC	16.6-19	1994
dic	3.79	TSC	34.2-36.3	1991	2.89	TSC	23-25	1992	-2.88	TSD	18.3-16.1	1994	-0.87	TNSD			4.16	TSC	16.6-20.4	1993
Anual	5.56	TSC	39.3-41	1977	2.86	TSC	20.5-23	1992	-1.87	TNSD	27.2-26.5	1995	-0.02	TNSD			5.82	TSC	15.7-17.8	1993

Tabla 30. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25084 (temperatura)-

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año
ene	-4.40	TSD	33.9-28.7	1988	-1.97	TSD	21.2-17.5	1986	-1.68	TNSD	16.3-14.2	1985	-2.63	TSD	7.4-4.7	1986	-3.10	TSD	19.6-14.5	1988
feb	-3.02	TSD	35.7-31.4	1988	-2.22	TSD	23.7-19.9	1986	0.95	TNSC			1.28	TNSC			-3.88	TSD	19.6-15.1	1986
mar	-1.81	TNSD	38-35.5	1982	-2.92	TSD	27.3-22.6	1986	1.62	TNSC			1.95	TNSC			-3.90	TSD	21.3-17.3	1982
abr	0.28	TNSC			-2.14	TSD	30.5-25.9	1980	3.56	TSC	19.2-21.6	1988	1.87	TNSC	10.3-12	1988	-3.34	TSD	21-17.3	1989
may	3.58	TSC	40.6-43.1	1991	-0.07	TNSD			4.22	TSC	22.6-25.9	1988	2.07	TSC	13.6-15.6	1987	-3.03	TSD	19.4-17	1989
jun	3.87	TSC	40.7-43.5	1987	2.31	TSC			3.65	TSC	25.9-29	1988	3.67	TSC	18-22.2	1995	0.26	TNSC		
jul	2.25	TSC			-0.97	TNSD			2.69	TSC	25.6-27.4	1988	0.57	TNSC			-0.24	TNSD		
ago	2.18	TSC			-0.46	TNSD			0.51	TNSC			1.74	TNSC	20.4-21.7	1989	0.81	TNSC		
sep	4.50	TSC	36.7-39.5	1986	0.42	TNSC			2.86	TSC	25-26	1987	-0.17	TNSD			2.04	TSC		
oct	2.43	TSC	36.7-38.5	1984	-0.67	TNSD			1.31	TNSC			-0.94	TNSD			-0.31	TNSD		
nov	-1.39	TNSD			-3.67	TSD	26.1-21.2	1985	-1.60	TNSD			-2.94	TSD	10.6-8.4	1985	-2.81	TSD	17.2-14	1988
dic	-3.41	TSD	34.9-29.8	1985	-2.61	TSD	22.2-18.3	1984	-3.77	TSD	17.6-15.6	1984	-2.60	TSD	7.7-5.1	1984	-2.57	TSD	17.2-14.4	1983
Anual	4.18	TSC	41.7-44.4	1991	-3.66	TSD	19.8-16	1986	4.42	TSC	26.3-29.3	1988	-2.16	TSD	5.6-3.4	1984	-2.51	TSD	16.1-14.1	1988

Tabla 31. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25118 (temperatura).

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^{\circ}C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^{\circ}C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^{\circ}C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^{\circ}C]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^{\circ}C]}$	Año
ene	-2.88	TSD	34.3-31.4	1992	2.98	TSC	20-23.2	1973	-1.86	TNSD	16.2-14.2	1985	-2.85	TSD	7.4-4.5	1986	0.72	TNSC		
feb	-2.76	TSD	35.7-33.1	1991	1.62	TNSC			-0.37	TNSD			0.04	TNSC			-1.82	TNSD		
mar	-2.42	TSD	37.7-35.4	1992	-0.47	TNSD			0.17	TNSC			0.69	TNSC			-2.80	TSD	21.6-19.6	1979
abr	-2.36	TSD	39.9-37.5	1991	-0.95	TNSD			1.48	TNSC			-0.06	TNSD			-3.13	TSD	21.2-18.5	1990
may	-1.28	TNSD	40.9-39.2	1990	-0.34	TNSD			1.71	TNSC	22.3-26.1	1993	0.04	TNSC			-3.35	TSD	19.6-15.9	1993
jun	-0.03	TNSD			3.18	TSC	31.6-34	1981	2.48	TSC	25.6-28.1	1991	2.43	TSC	17.5-21.5	1995	-1.22	TNSD		
jul	-0.48	TNSD			2.01	TSC			1.03	TNSC			-0.09	TNSD			-0.05	TNSD		
ago	1.52	TNSC			3.64	TSC	30-32	1981	-1.25	TNSD			0.76	TNSC	20.5-21.6	1993	2.59	TSC	10.6-12.1	1981
sep	2.83	TSC	36.2-38.1	1976	3.49	TSC	28.4-31.4	1983	0.22	TNSC			-0.53	TNSD			3.35	TSC	10.4-12.3	1983
oct	1.05	TNSC			1.34	TNSC			0.06	TNSC			-0.68	TNSD			0.64	TNSC		
nov	-1.61	TNSD			-0.18	TNSD	26.9-25.9	1971	-2.14	TSD			-3.10	TSD	10.6-8.4	1985	-0.76	TNSD		
dic	-1.69	TNSD	34.9-31.7	1993	2.57	TSC	20.7-24.1	1972	-4.29	TSD	17.6-15.5	1984	-2.29	TSD	8.1-5.7	1984	1.46	TNSC		
Anual	-1.09	TNSD	42-40.1	1993	3.31	TSC	19.9-22.5	1988	2.65	TSC	26.2-28.6	1991	-2.73	TSD	5.6-3.3	1984	-0.34	TNSD		

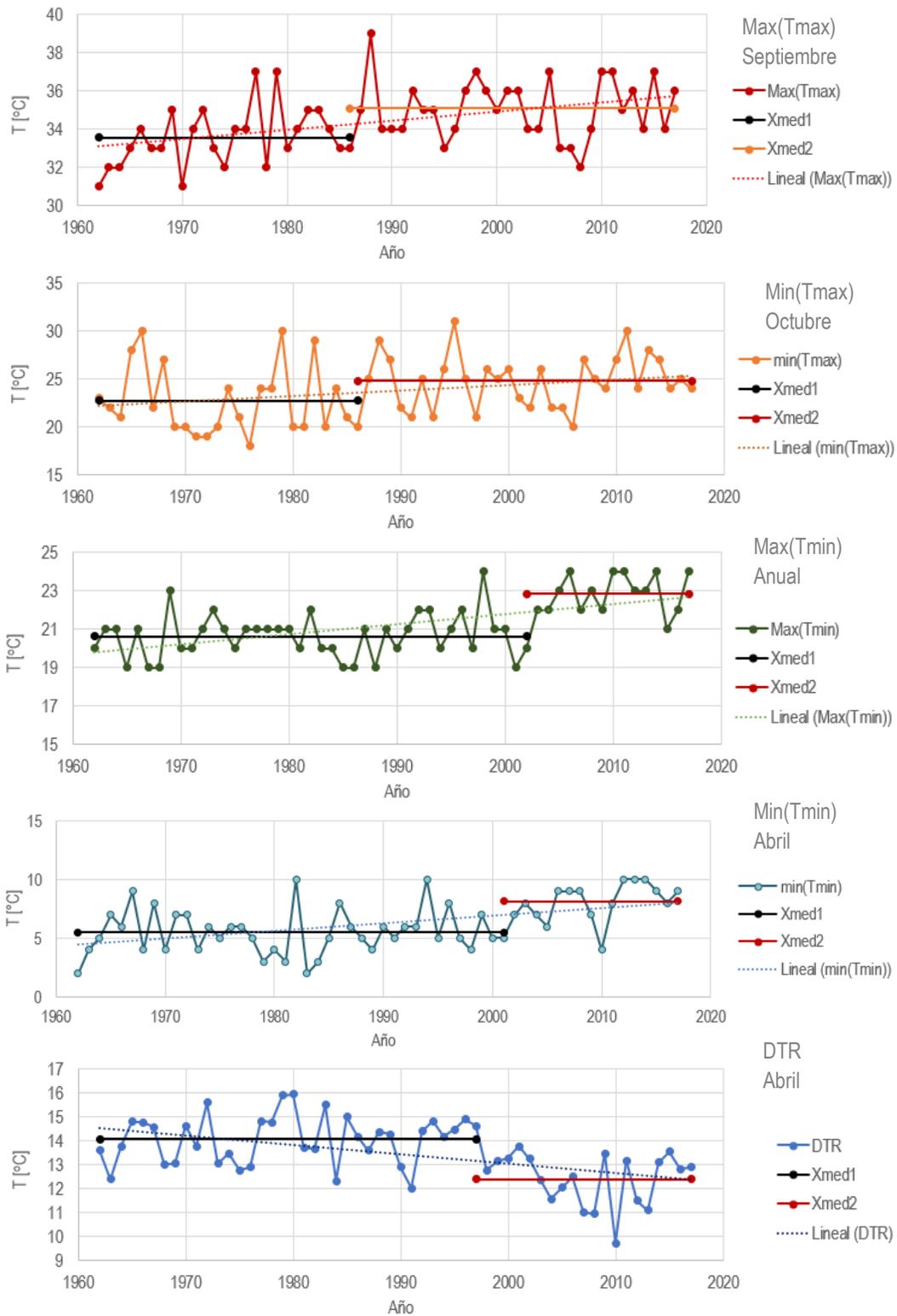


Figura 61. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 10031.

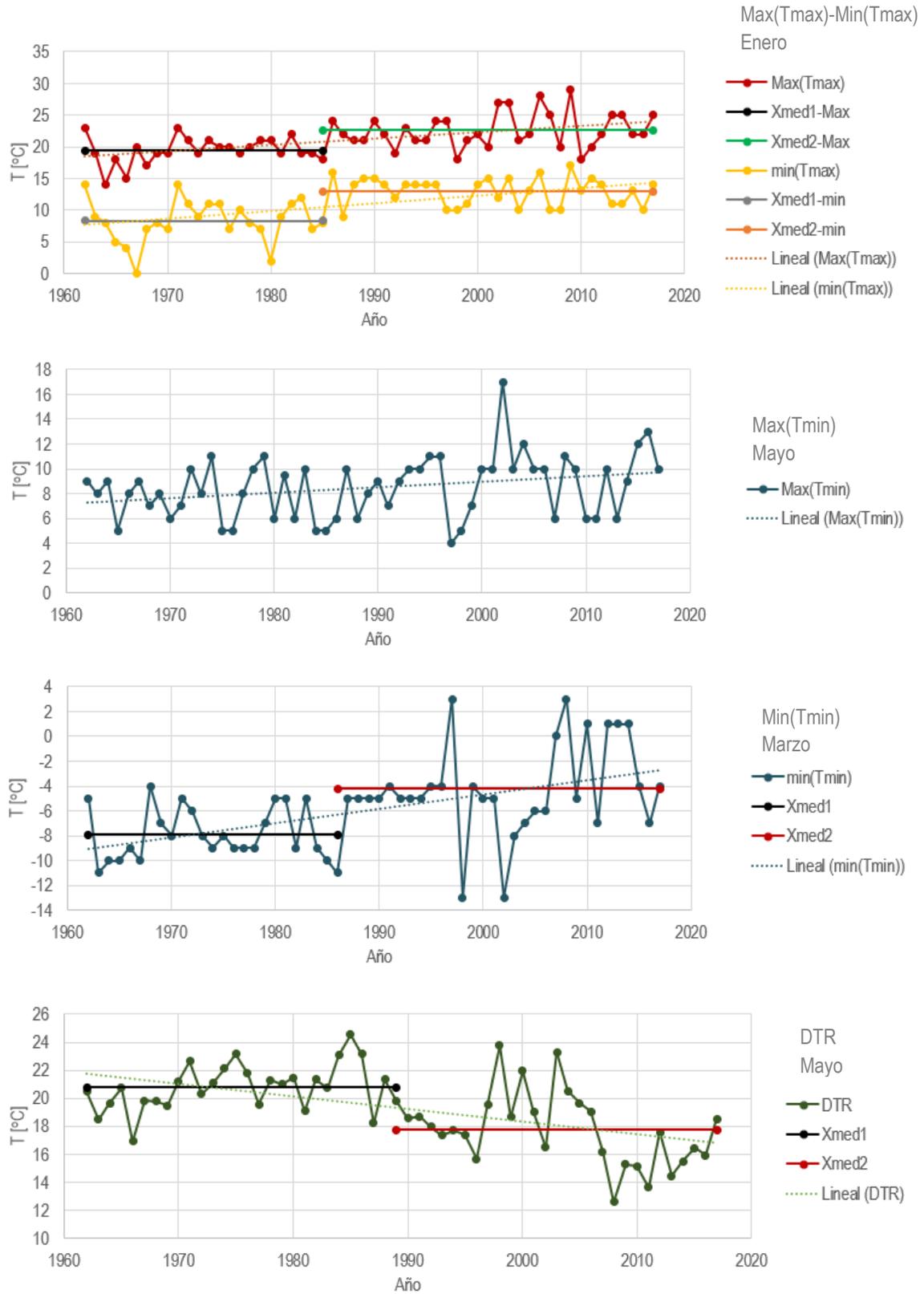


Figura 62. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 10042

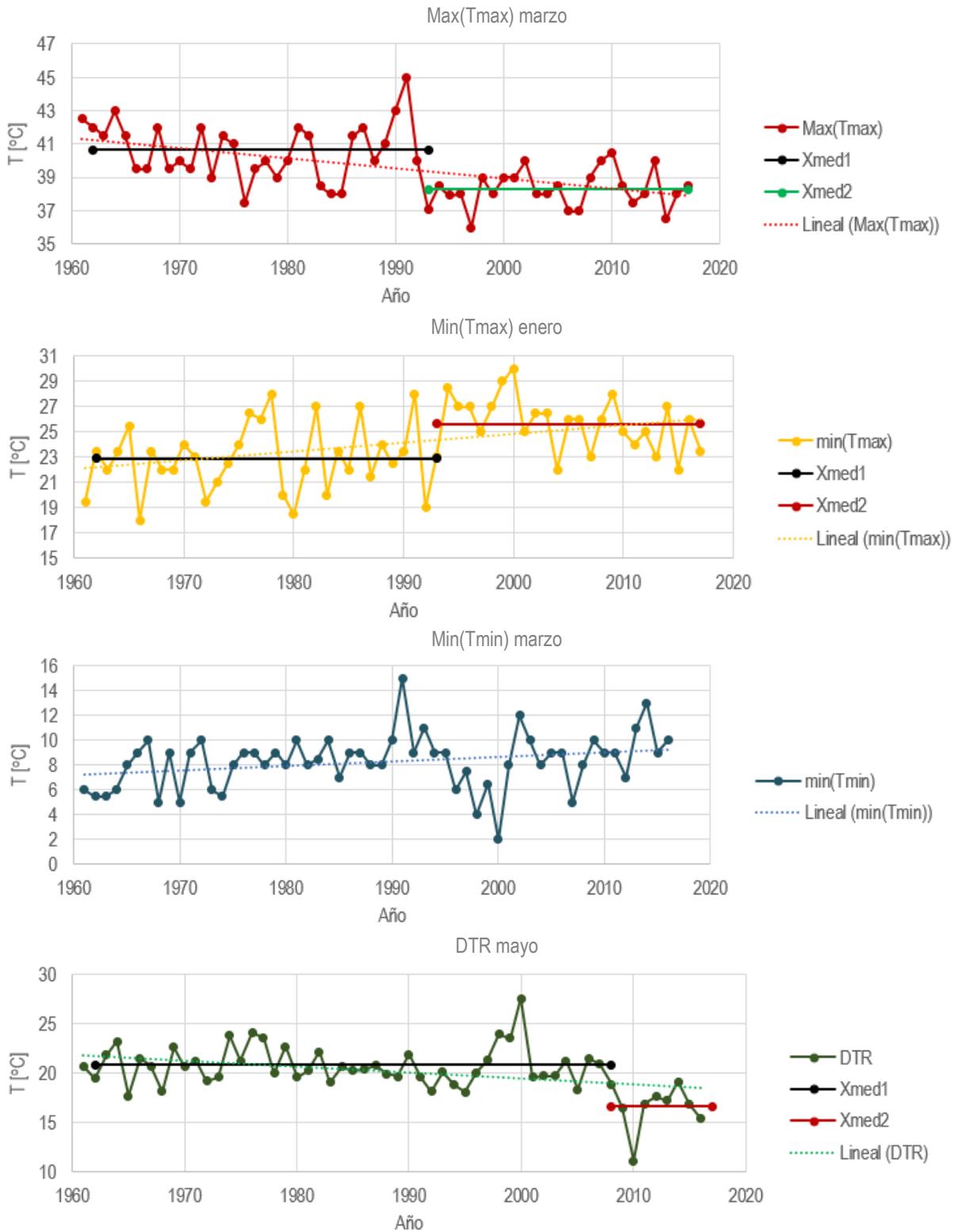


Figura 63. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual E.C. 25001

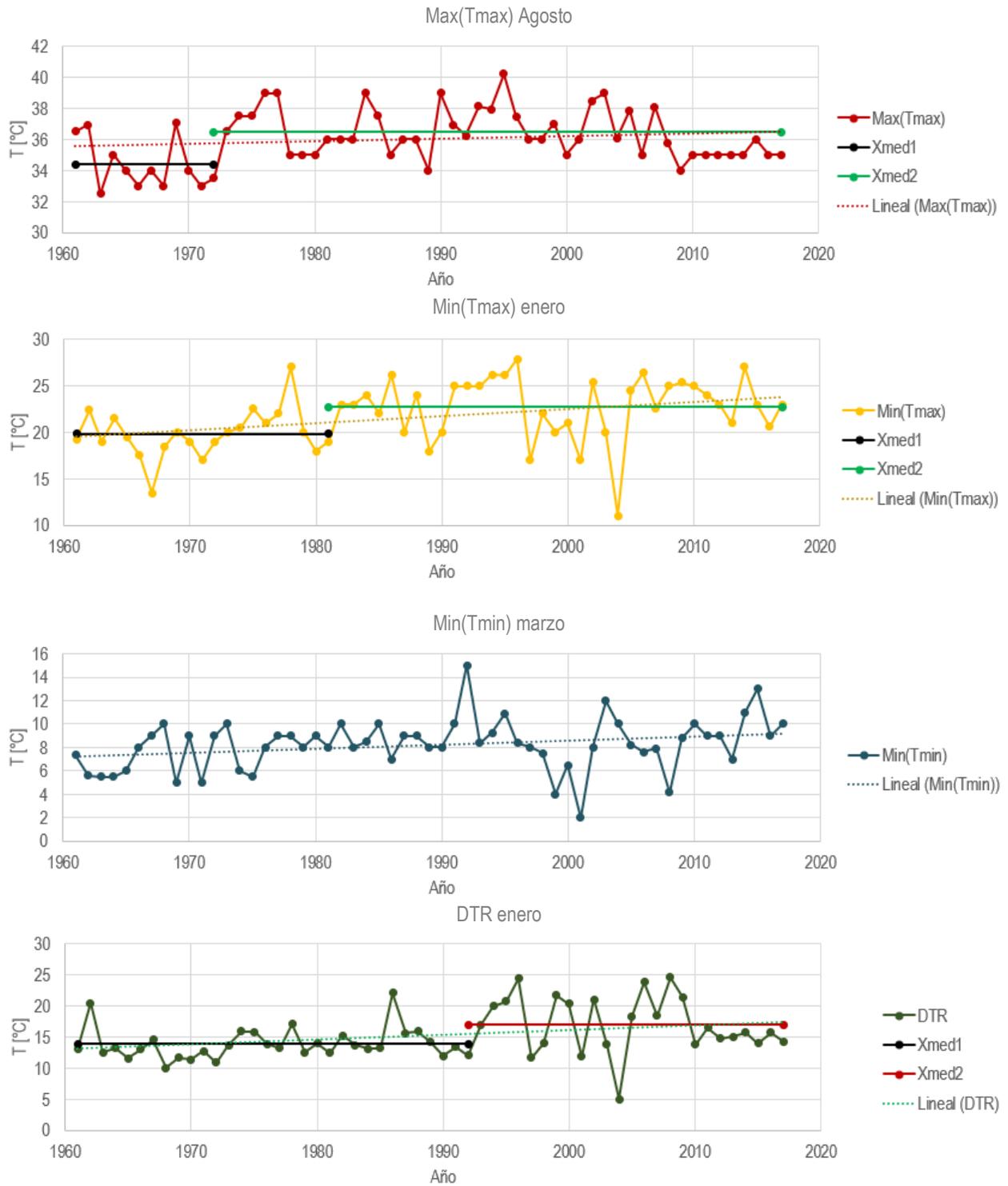


Figura 64. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25021

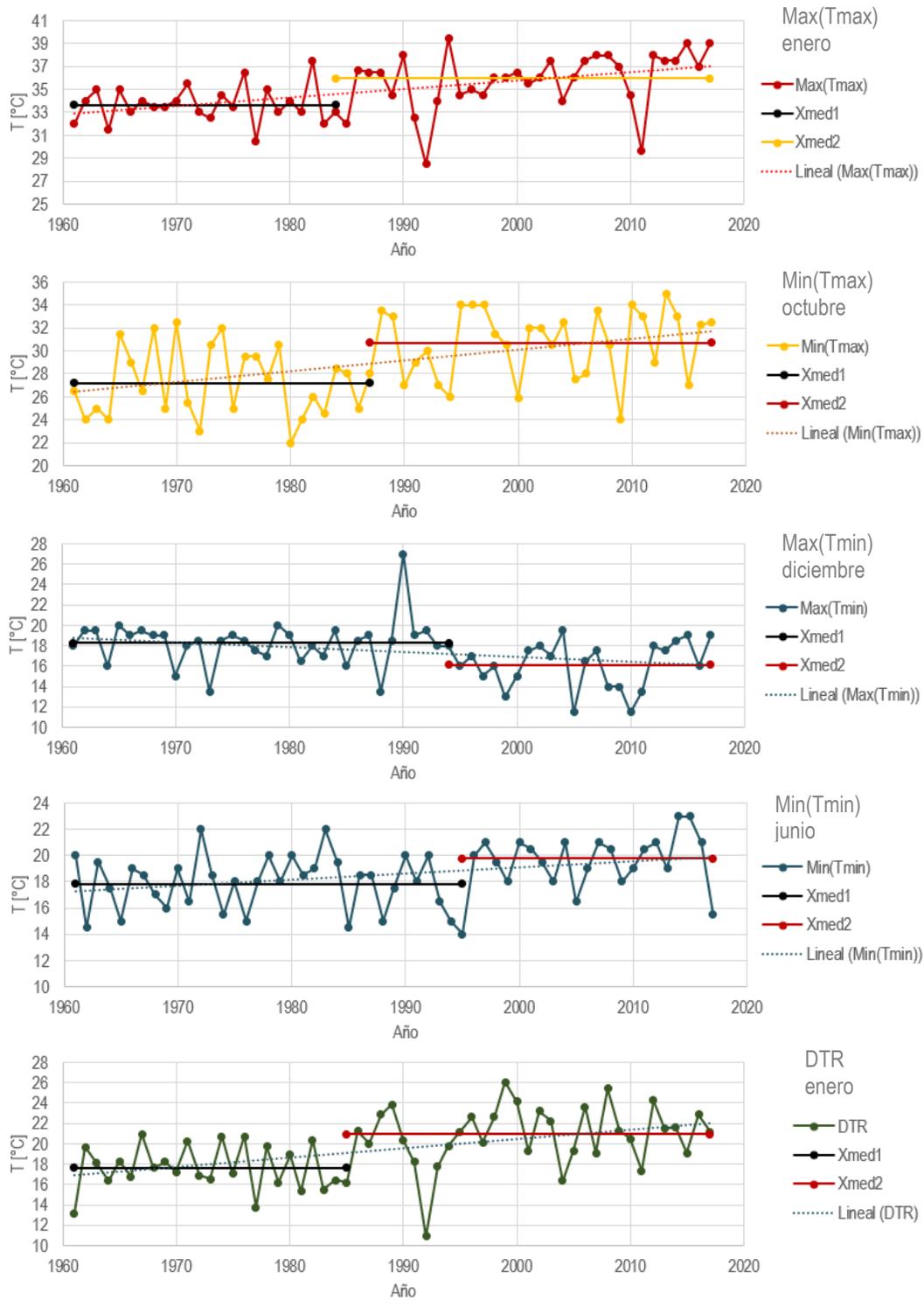


Figura 65. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25045.

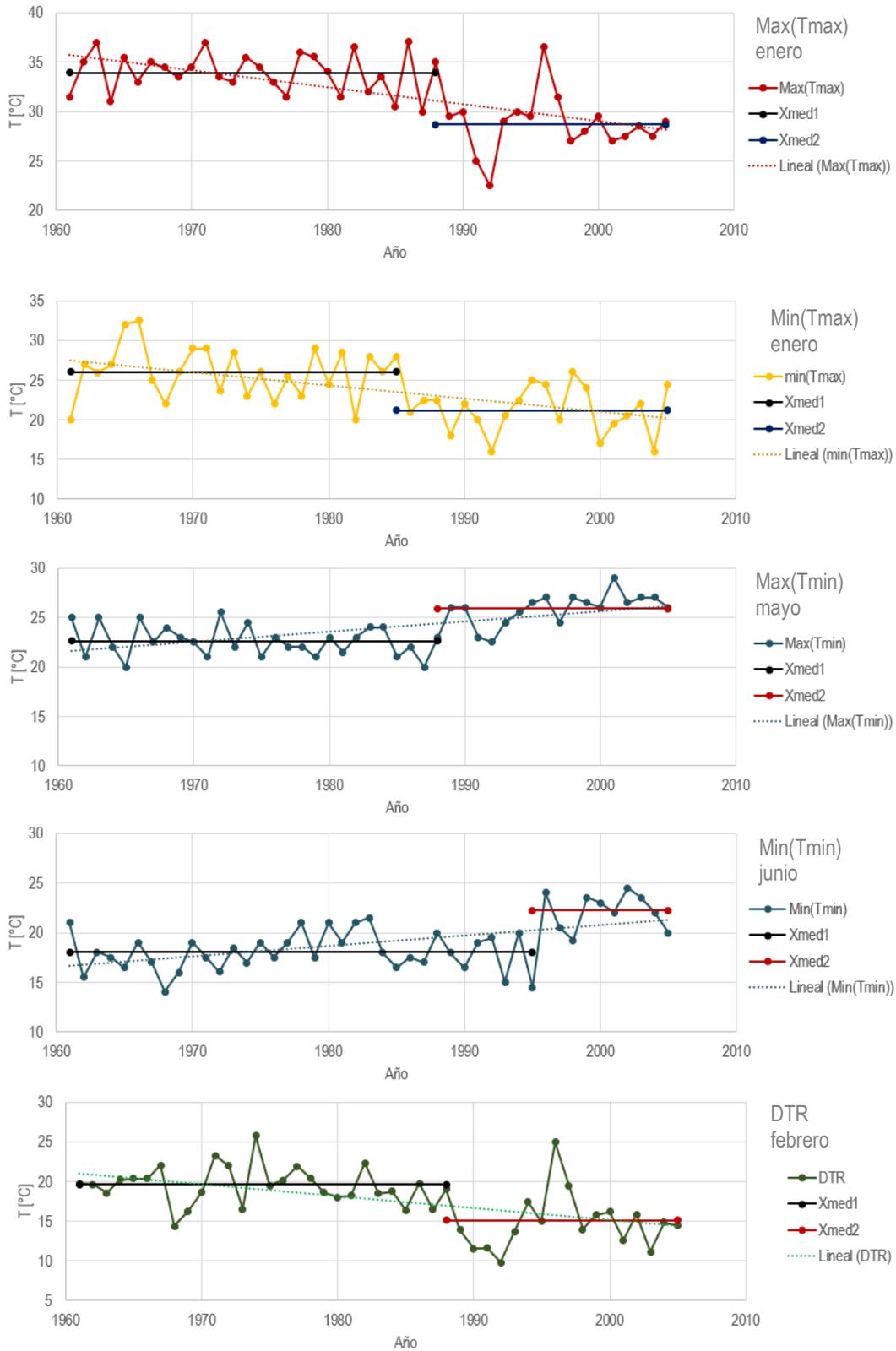


Figura 66. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25084.

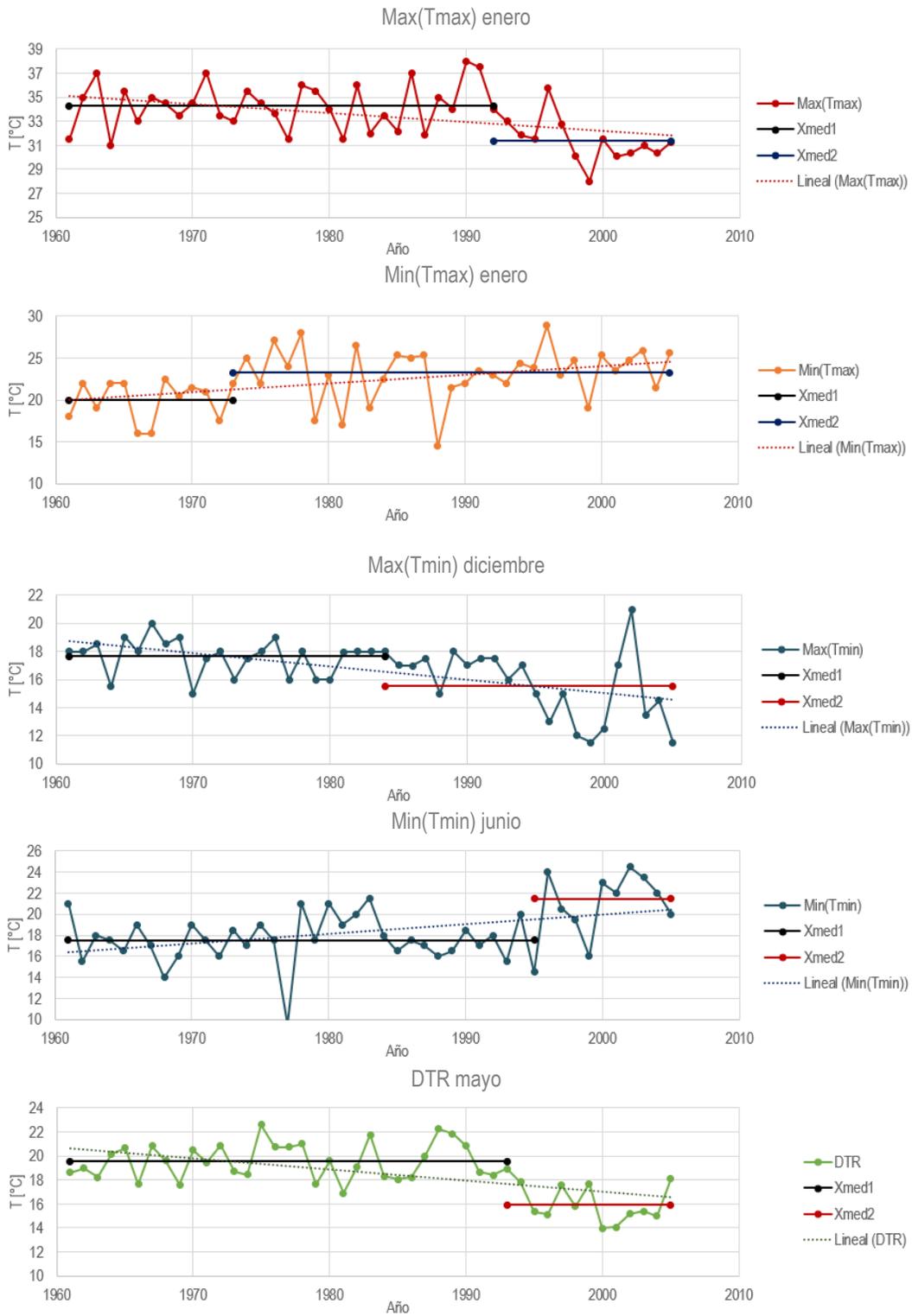


Figura 67. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la E.C. 25118.

3.5.1.2. Precipitación

En la precipitación se observó poco cambio en los indicadores, ocurriendo sólo para algún mes del año o, en ocasiones en ninguna serie de tiempo pero se identificó una disminución de la precipitación en el mes de diciembre.

La Tabla 32 muestra los resultados de las dos pruebas estadísticas para la precipitación acumulada de la E.C. 10031; se observa que sólo existe evidencia de cambio en 5 series de tiempo, sin embargo, no necesariamente ambas pruebas coinciden en el resultado. Lo anterior no permite relacionar los resultados directamente entre sí, por ejemplo, existe una disminución de la P_{acu} en el mes de septiembre pero no se puede explicar ni por una disminución en la precipitación máxima, el número de días húmedos, el número de días consecutivos ni existe un impacto en el SDII. Sólo en el mes de agosto se puede relacionar una disminución del NWD con un aumento de SDII. Nuevamente, las series de tiempo graficadas corresponden a aquellas donde se observó el mayor cambio mensual o anual (Figura 68).

En la E.C. 10042 se presenta evidencia de cambio, especialmente de los días secos consecutivos (Tabla 33). En el mes de diciembre existe tendencia significativa en todos los indicadores y en ambas pruebas: tendencia significativa decreciente en P_{acu} ($Z_{MK} = -3.13$), P_{max} ($Z_{MK} = -2.85$), NWD ($Z_{MK} = -2.89$) y SDII ($Z_{MK} = -2.71$) y tendencia significativa creciente para CDD ($Z_{MK} = 2.36$). No se relaciona tan directamente el aumento de CDD con un cambio de los otros indicadores en el periodo de octubre-junio. En la Figura 69 se puede observar que en el mes de diciembre, el cambio decreciente está dado por una frecuencia mayor de años con $P_{max} = 0$ [mm] y NWD = 0 [d].

En la E.C. 25001 (Tabla 34) se encuentra un cambio en la precipitación en los meses de diciembre y enero en casi todos los indicadores menos SDII. Disminuyen tanto P_{acu} , P_{max} como NWD y aumentan los CDD. Gráficamente (Figura 70) se observa que ha aumentado la frecuencia de años en los que la precipitación acumulada del mes de diciembre es nula y por tanto, se entiende por qué la tendencia creciente de CDD se da propiamente en enero, a pesar de no ser significativa en diciembre.

Algunos cambios en la E.C. 25021 según Pettitt contrastan con valores pequeños del estadístico de Mann-Kendall (Tabla 35): el caso de los indicadores del mes de febrero. Otros, como las series de tiempo anuales presentan valores Z_{MK} no lo suficientemente grandes para rechazar H_0 , pero la prueba de Pettitt sí identifica un punto de cambio. La gran mayoría de las series de tiempo no presentan una tendencia importante ni se encuentran cerca del límite.

En la E.C. 25045 se observa un comportamiento decreciente de la precipitación tanto en enero como en diciembre (Tabla 36). Es más claro el cambio para el primer mes del año en todos los indicadores menos SDII ($Z_{MK} = -1.95$), aunque el valor del estadístico apenas cumple con la condición de no cambio: $|Z_{MK}| < 1.96$. El mayor cambio anual se observa en diciembre, relacionándose la disminución de la precipitación acumulada con la precipitación máxima (Figura 72) y una disminución de NWD. El impacto alcanza el CDD del mes de enero.

Los resultados de las estaciones E.C. 25084 y 25118 son similares entre sí, pues en ambas se observa una disminución de la precipitación en los meses de septiembre y en la serie anual. Son de hecho, las únicas

estaciones donde ocurre un cambio en la P_{acu} anual. Los resultados se encuentran en la Tabla 37, Figura 73, Tabla 38 y Figura 74.

Tabla 32. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: de la E.C. 10031 (precipitación).

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm/d]	Año
ene	-0.91	TNSD			-1.00	TNSD			-0.69	TNSD			1.19	TNSC			-1.55	TNSD		
feb	-0.14	TNSD			-0.59	TNSD			0.13	TNSC			-0.85	TNSD			-0.59	TNSD		
mar	0.36	TNSC			0.27	TNSC			0.44	TNSC			-0.24	TNSD			0.07	TNSC	4 (10.2)	2014
abr	-0.66	TNSD			-0.59	TNSD			-0.52	TNSD			0.08	TNSC			-0.40	TNSD		
may	-0.52	TNSD			-0.04	TNSD			-0.59	TNSD			-0.16	TNSD			-0.43	TNSD		
jun	0.50	TNSC			1.03	TNSC			0.51	TNSC			-0.37	TNSD			0.86	TNSC		
jul	-0.85	TNSD			0.29	TNSC			-1.54	TNSD			0.76	TNSC			0.99	TNSC		
ago	0.46	TNSC			0.54	TNSC			-2.42	TSD			1.20	TNSC			2.11	TSC		
sep	-2.26	TSD			-1.60	TNSD			-1.14	TNSD			0.75	TNSC			-1.68	TNSD		
oct	-1.03	TNSD			-1.01	TNSD			-0.23	TNSD			0.14	TNSC			-1.43	TNSD		
nov	0.01	TNSC			0.49	TNSC			-0.83	TNSD			1.14	TNSC			0.25	TNSC		
dic	-1.68	TNSD	63.8 (25.4)	1992	-1.35	TNSD			-1.94	TNSD			0.55	TNSC			-1.07	TNSD		
Anual	-0.70	TNSD			-0.24	TNSD			-1.29	TNSD			-0.67	TNSD			-0.05	TNSD		

Tabla 33. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y de la Pettitt: E.C. 10042 (precipitación).

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z_{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm/d]	Año
ene	-1.14	TNSD			-1.51	TNSD			-1.44	TNSD			3.11	TSC	21-42.4	1994	-0.98	TNSD		
feb	-0.64	TNSD			-0.88	TNSD			-0.47	TNSD			1.89	TNSC	25.1-44.4	1993	-0.89	TNSD		
mar	-1.00	TNSD			-1.13	TNSD			-0.68	TNSD			1.33	TNSC			-1.17	TNSD		
abr	-1.60	TNSD	15-2.3	1997	-1.39	TNSD			-1.41	TNSD	1.6-0.4	1997	2.25	TSC	39.2-75.5	1994	-0.92	TNSD		
may	-1.75	TNSD			-1.34	TNSD			-2.42	TSD	3.1-1.8	1993	2.11	TSC	41-90.5	1997	-1.39	TNSD		
jun	0.28	TNSC			-2.33	TSD	34.6-24.2	1986	0.69	TNSC			2.47	TSC			-1.09	TNSD		
jul	1.66	TNSC	260.4-363.6	2000	-0.78	TNSD			1.89	TNSC			0.00	ST			0.78	TNSC		
ago	1.97	TSC			-0.30	TNSD			1.29	TNSC			-0.53	TNSD			1.84	TNSC		
sep	-1.24	TNSD			-1.35	TNSD			-0.46	TNSD			0.87	TNSC			-0.04	TNSD		
oct	-1.72	TNSD			-1.75	TNSD			-0.33	TNSD			1.75	TNSC	13.6-19.5	1993	-2.09	TSD		
nov	-0.16	TNSD			-0.45	TNSD			0.61	TNSC			1.56	TNSC	23.4-35.9	2000	-0.46	TNSD		
dic	-3.13	TSD	101.6-32	1992	-2.85	TSD	44.4-18.2	1986	-2.89	TSD	6.2-2.1	1994	2.36	TSC	23.4-35.4	1994	-2.71	TSD	17.3-8.8	1986
Anual	-0.04	TNSD			-1.88	TNSD	73-49	1986	-0.34	TNSD			2.76	TSC	55.8-98.5	1994	0.08	TNSC		

Tabla 34. Resultados de las pruebas Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25001 (precipitación).

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm/d]	Año
ene	-1.68	TNSD			-1.75	TNSD			-1.98	TSD	2.2-0.9	1992	2.00	TSC	36.1-54.4	1993	-1.49	TNSD		
feb	-0.27	TNSD	13.8-10.7	2005	-0.61	TNSD			0.25	TNSC			0.84	TNSC			-0.57	TNSD		
mar	0.77	TNSC			0.61	TNSC			0.72	TNSC			-0.03	TNSD			0.76	TNSC		
abr	-0.26	TNSD			-0.41	TNSD			-0.54	TNSD			0.25	TNSC	57.3-81.5	1966	-0.43	TNSD		
may	0.92	TNSC			0.85	TNSC			0.58	TNSC			0.31	TNSC			0.63	TNSC		
jun	1.71	TNSC			1.87	TNSC			1.57	TNSC			0.12	TNSC			1.26	TNSC		
jul	-0.10	TNSD			0.27	TNSC			-0.80	TNSD			-0.65	TNSD			0.52	TNSC		
ago	0.90	TNSC			0.61	TNSC			-0.63	TNSD			0.47	TNSC			1.66	TNSC		
sep	0.89	TNSC			1.15	TNSC			-0.05	TNSD	11.1-9.9	2010	0.11	TNSC			1.33	TNSC		
oct	-0.52	TNSD			-0.61	TNSD			-1.04	TNSD			0.91	TNSC			-0.41	TNSD		
nov	0.01	TNSC			0.19	TNSC			0.05	TNSC			0.74	TNSC			0.47	TNSC		
dic	-2.18	TSD	42.7-12.8	1991	-1.99	TSD	23.1-8.3	1991	-1.90	TNSD	3.3-1.2	1991	1.05	TNSC			-1.31	TNSD		
Anual	0.43	TNSC			-0.12	TNSD			-1.00	TNSD			0.43	TNSC			1.54	TNSC		

Tabla 35. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25021 (precipitación)

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm/d]	Año
ene	-1.19	TNSD			-1.29	TNSD			-0.61	TNSD			1.63	TNSC			-1.42	TNSD		
feb	0.33	TNSC	7.710.3	1977	0.08	TNSC	6.1-3.7	2005	1.05	TNSC			-0.38	TNSD			0.28	TNSC		
mar	0.95	TNSC			0.96	TNSC			0.71	TNSC			-1.03	TNSD			0.74	TNSC		
abr	-0.09	TNSD			-0.10	TNSD			-0.25	TNSD			-0.96	TNSD			-0.19	TNSD		
may	1.42	TNSC			1.44	TNSC			0.94	TNSC			-0.89	TNSD			0.96	TNSC		
jun	0.78	TNSC			0.30	TNSC			1.28	TNSC			-1.26	TNSD			0.34	TNSC	7.9-6.9	2006
jul	-0.31	TNSD			-1.07	TNSD			0.92	TNSC			-1.75	TNSD	54.9-26.5	1989	-2.22	TSD	18.9-12	1990
ago	-0.03	TNSD			-0.08	TNSD			0.35	TNSC			0.13	TNSC			-0.96	TNSD		
sep	-0.31	TNSD			-1.02	TNSD			1.48	TNSC	7.1-11	1992	-1.10	TNSD			-1.23	TNSD		
oct	-0.55	TNSD			-0.35	TNSD			-0.16	TNSD			0.36	TNSC			-0.30	TNSD		
nov	0.47	TNSC			0.43	TNSC			0.28	TNSC			-0.19	TNSD			0.47	TNSC		
dic	-1.81	TNSD			-1.73	TNSD			-1.31	TNSD			0.41	TNSC	46-49.2	1997	-1.43	TNSD		
Anual	-1.26	TNSD			-1.69	TNSD			1.20	TNSC			-1.38	TNSD			-2.58	TSD	20.5-13.5	1985

Tabla 36. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: 25045 (precipitación).

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	X _{m1} -X _{m2} [mm/d]	Año
ene	-2.22	TSD	21.2-15.3	1987	-2.05	TSD			-2.13	TSD	2.1-1.1	1987	2.02	TSC	35.9-57.1	1993	-1.95	TNSD		
feb	-0.23	TNSD			-0.40	TNSD			0.18	TNSC			1.04	TNSC			-0.23	TNSD		
mar	0.50	TNSC			0.55	TNSC			0.29	TNSC			0.24	TNSC			0.65	TNSC		
abr	-0.40	TNSD			-0.41	TNSD			-0.30	TNSD			0.78	TNSC			-0.31	TNSD		
may	-0.30	TNSD			-0.32	TNSD			-0.15	TNSD			0.90	TNSC			-0.11	TNSD		
jun	1.26	TNSC			1.17	TNSC			1.34	TNSC			0.76	TNSC			1.15	TNSC		
jul	-1.12	TNSD			0.62	TNSC			-1.45	TNSD			-0.08	TNSD			0.57	TNSC		
ago	0.02	TNSC	204-227.9	1993	0.92	TNSC			-0.08	TNSD			-0.10	TNSD			-0.35	TNSD		
sep	0.03	TNSC			-1.06	TNSD			-0.62	TNSD			1.26	TNSC			0.95	TNSC		
oct	-0.64	TNSD			-0.68	TNSD			-0.62	TNSD			0.19	TNSC	20.8-22.2	1986	-0.71	TNSD		
nov	0.36	TNSC			0.50	TNSC			-0.03	TNSD			0.54	TNSC			0.90	TNSC		
dic	-2.55	TSD	42.9-10.6	1991	-2.35	TSD	25.3-7.5	1991	-1.90	TNSD	2.8-0.9	1991	1.20	TNSC			-1.75	TNSD		
Anual	-0.60	TNSD			-0.47	TNSD			-1.42	TNSD			0.42	TNSC			0.56	TNSC		

Tabla 37. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25084 (precipitación).

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm/d]	Año
ene	-0.48	TNSD			-0.61	TNSD			0.02	TNSC			0.77	TNSC			-0.46	TNSD		
feb	1.80	TNSC			1.74	TNSC			1.78	TNSC			-1.09	TNSD			1.88	TNSC		
mar	0.78	TNSC			0.82	TNSC			0.64	TNSC			-1.79	TNSD			1.14	TNSC		
abr	0.16	TNSC			0.10	TNSC			1.18	TNSC			-1.91	TNSD			1.27	TNSC		
may	-0.36	TNSD			-0.42	TNSD			1.64	TNSC			-2.26	TSD			1.64	TNSC		
jun	1.08	TNSC			0.30	TNSC			0.86	TNSC	2.9-6.1	1989	-2.33	TSD			1.11	TNSC		
jul	-0.77	TNSD			-1.99	TSD			-1.50	TNSD			0.29	TNSC			0.50	TNSC		
ago	-1.42	TNSD			-1.87	TNSD	69.4-40.3	1981	-1.99	TSD			0.09	TNSC			-1.22	TNSD		
sep	-3.76	TSD	174.6-99.6	1983	-2.04	TSD			-4.11	TSD	12.1-8.4	1983	3.41	TSC	5.4-9.6	1985	-1.34	TNSD		
oct	-0.72	TNSD			-0.72	TNSD			-0.96	TNSD			0.98	TNSC			-0.18	TNSD		
nov	1.02	TNSC			1.01	TNSC			1.54	TNSC			-1.44	TNSD			1.19	TNSC		
dic	-1.44	TNSD			-1.73	TNSD			-1.42	TNSD			-0.15	TNSD			-1.33	TNSD		
Anual	-2.55	TSD	871.7-706.8	1984	-3.40	TSD	99.8-55.3	1986	-1.88	TNSD			-2.02	TSD			-1.24	TNSD	15.1-12.5	1987

Tabla 38. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.C. 25118 (precipitación).

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [mm/d]	Año
ene	-0.98	TNSD			-1.14	TNSD			-0.30	TNSD			1.05	TNSC			-1.16	TNSD		
feb	1.36	TNSC			1.22	TNSC			1.39	TNSC			-0.30	TNSD			0.87	TNSC		
mar	1.05	TNSC			1.08	TNSC			0.72	TNSC			-0.76	TNSD			1.03	TNSC		
abr	0.46	TNSC			0.42	TNSC			0.49	TNSC			-0.24	TNSD			0.56	TNSC		
may	1.12	TNSC			1.09	TNSC			1.13	TNSC			-0.75	TNSD			1.11	TNSC		
jun	0.93	TNSC			0.14	TNSC			1.61	TNSC	2.8-7	1989	-1.17	TNSD			0.08	TNSC		
jul	-0.70	TNSD			-1.79	TNSD	58.7-40.5	1992	0.79	TNSC			-0.08	TNSD			-1.17	TNSD	16-11.4	1991
ago	-1.18	TNSD			-1.93	TNSD			1.57	TNSC			-0.02	TNSD	4-4.9	1967	-3.15	TSD	17.4-11.2	1993
sep	-2.94	TSD	172.2-92.2	1993	-1.80	TNSD			-2.52	TSD			2.80	TSC	5.3-8.6	1985	-2.29	TSD	15.9-8.7	1993
oct	-0.50	TNSD			-0.71	TNSD			-0.07	TNSD			0.31	TNSC			-0.71	TNSD		
nov	1.03	TNSC			1.03	TNSC			1.60	TNSC			-1.18	TNSD			0.91	TNSC		
dic	-1.53	TNSD			-1.59	TNSD			-1.14	TNSD			0.28	TNSC			-1.30	TNSD		
Anual	-2.16	TSD	869.6-666.7	1983	-3.44	TSD	104.1-72.1	1981	1.33	TNSC			-0.88	TNSD			-2.38	TSD	166.1-10.3	1993

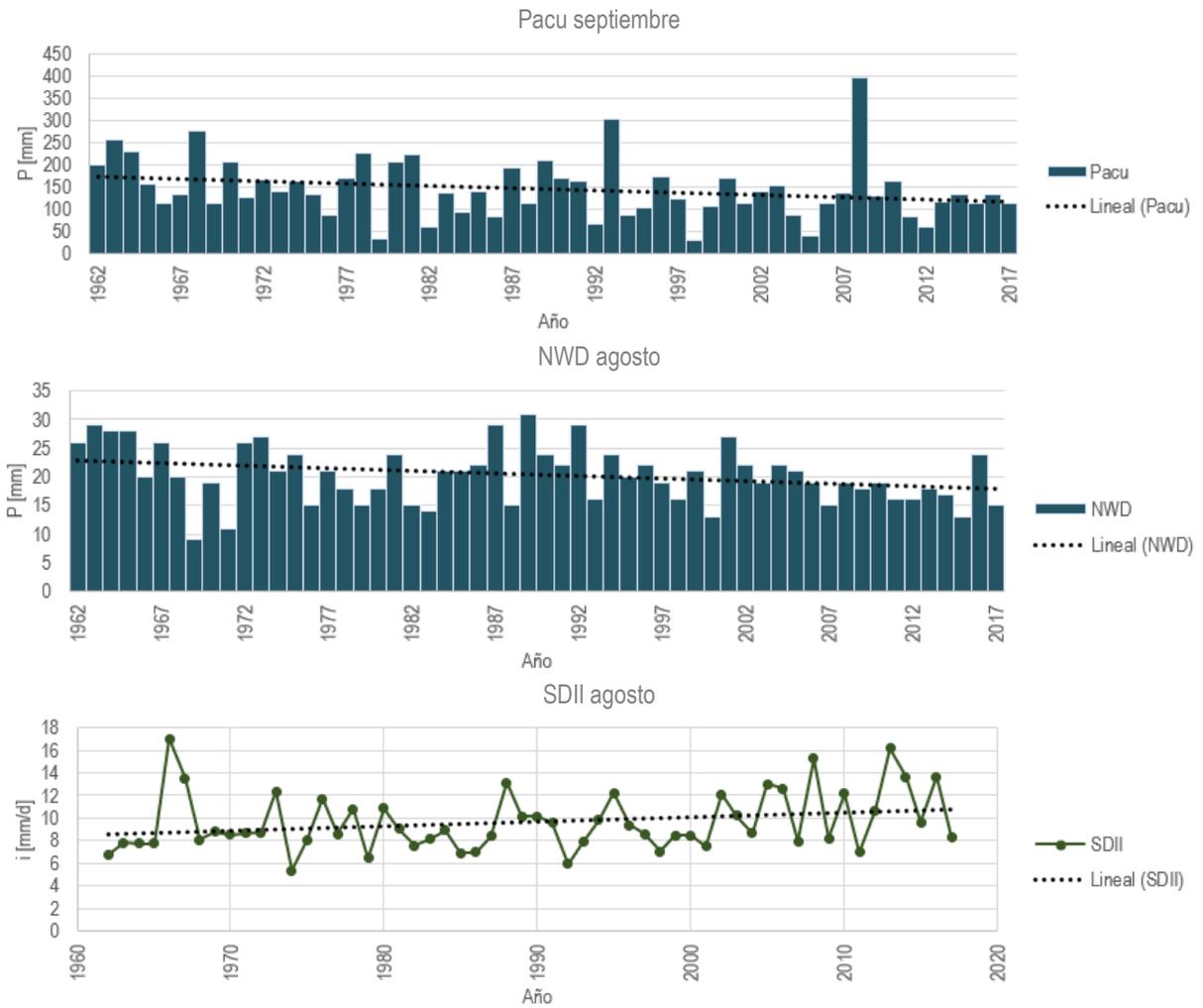


Figura 68. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 10031.

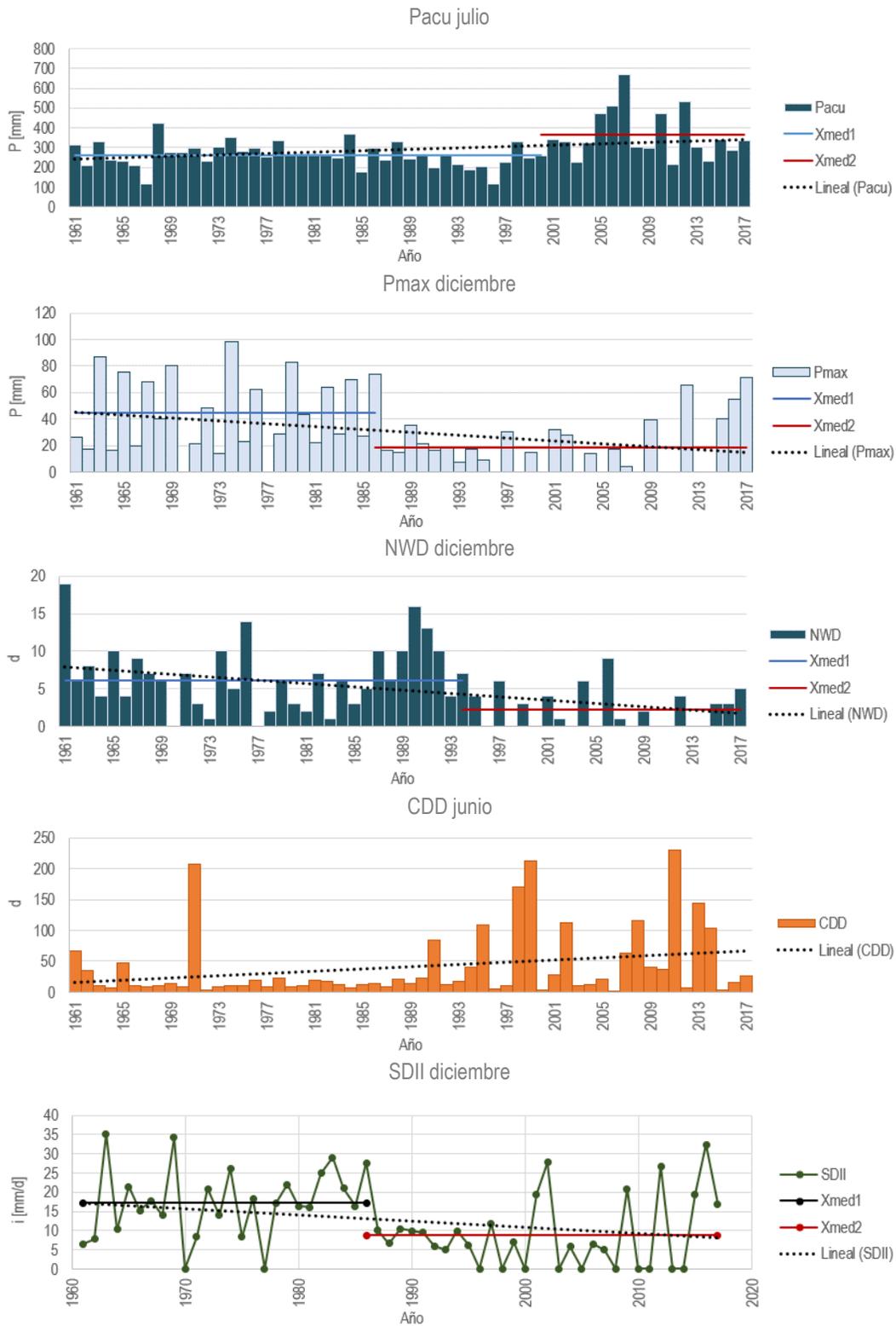


Figura 69. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 10042.

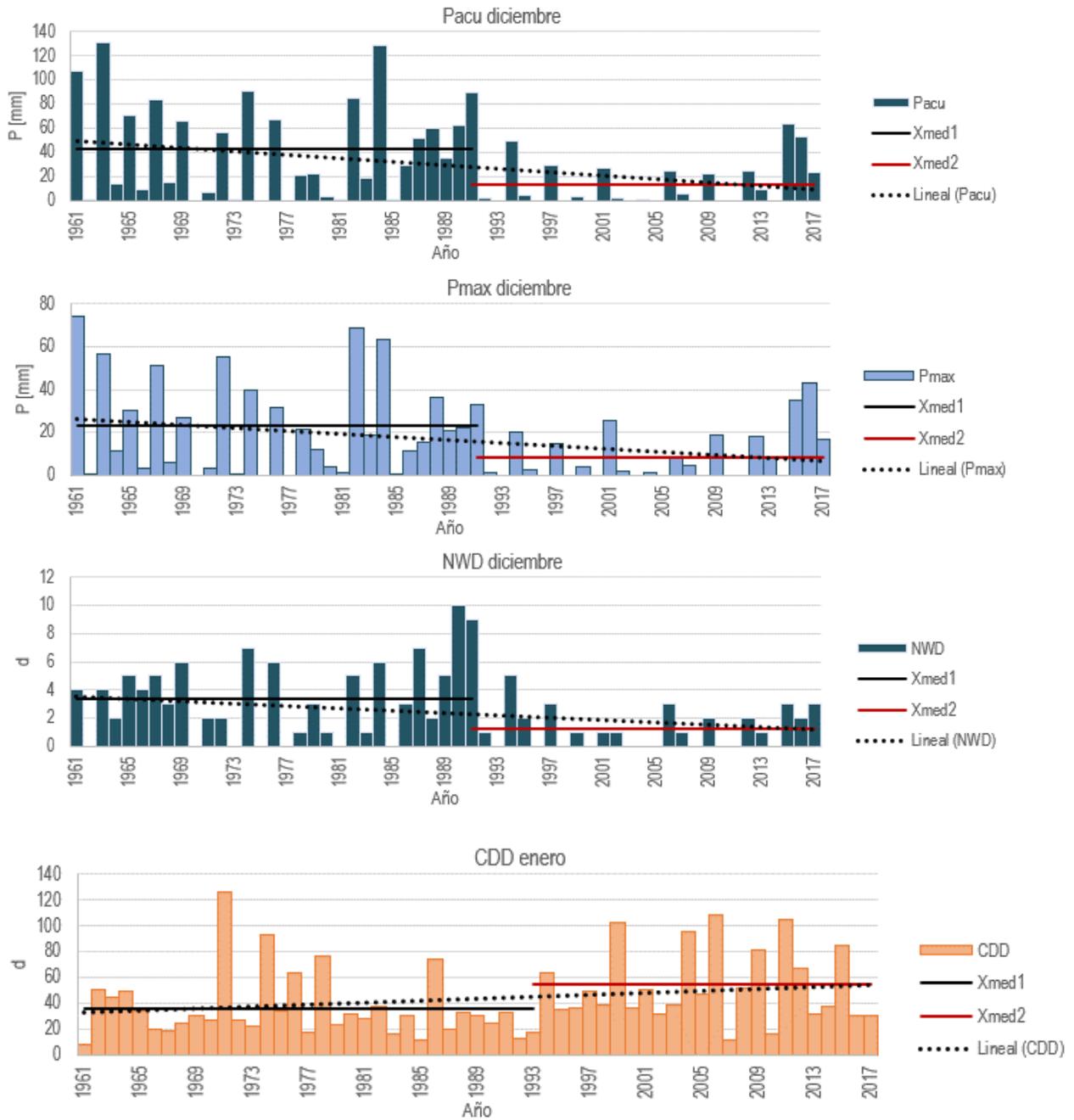


Figura 70. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25001.

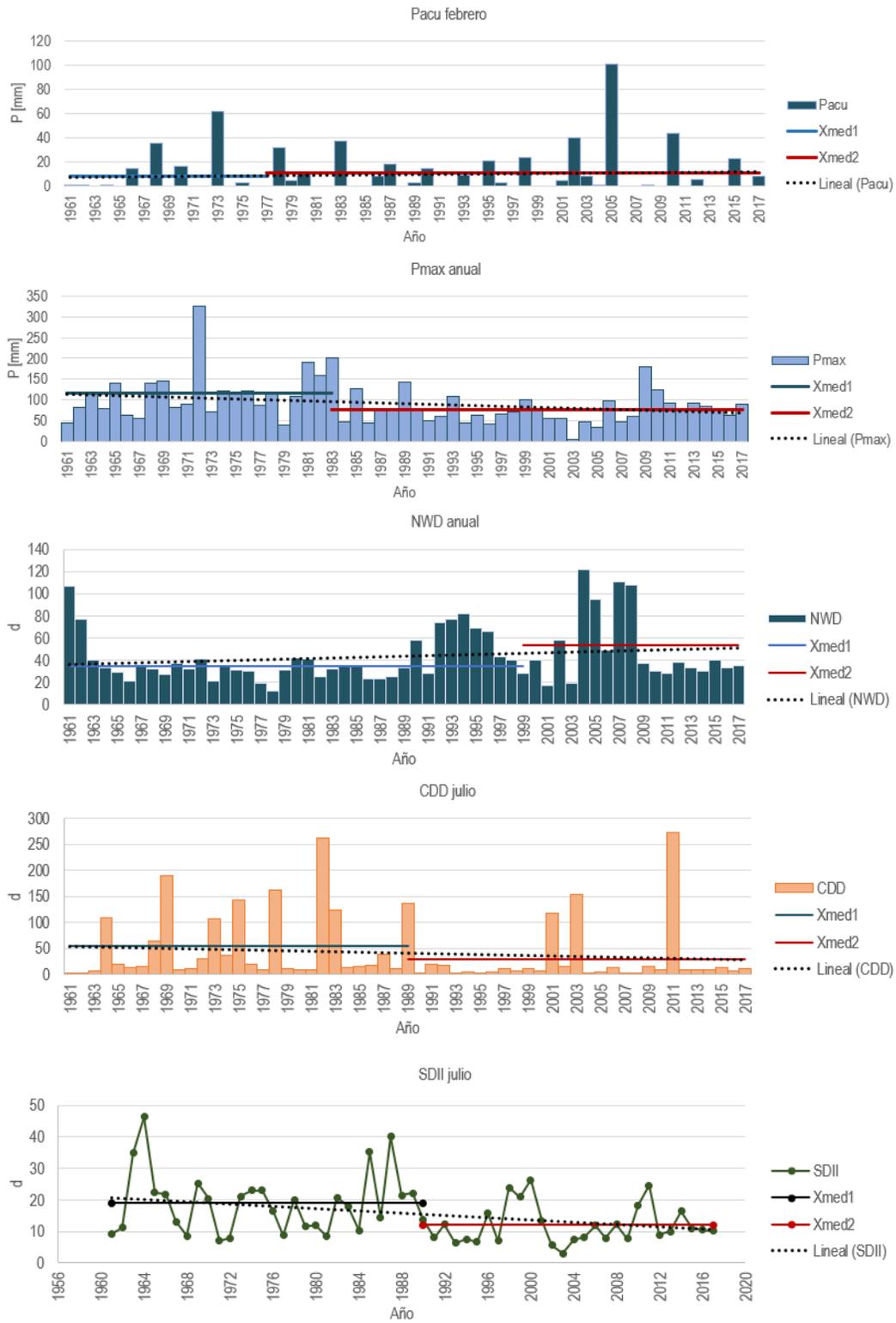


Figura 71. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25021.

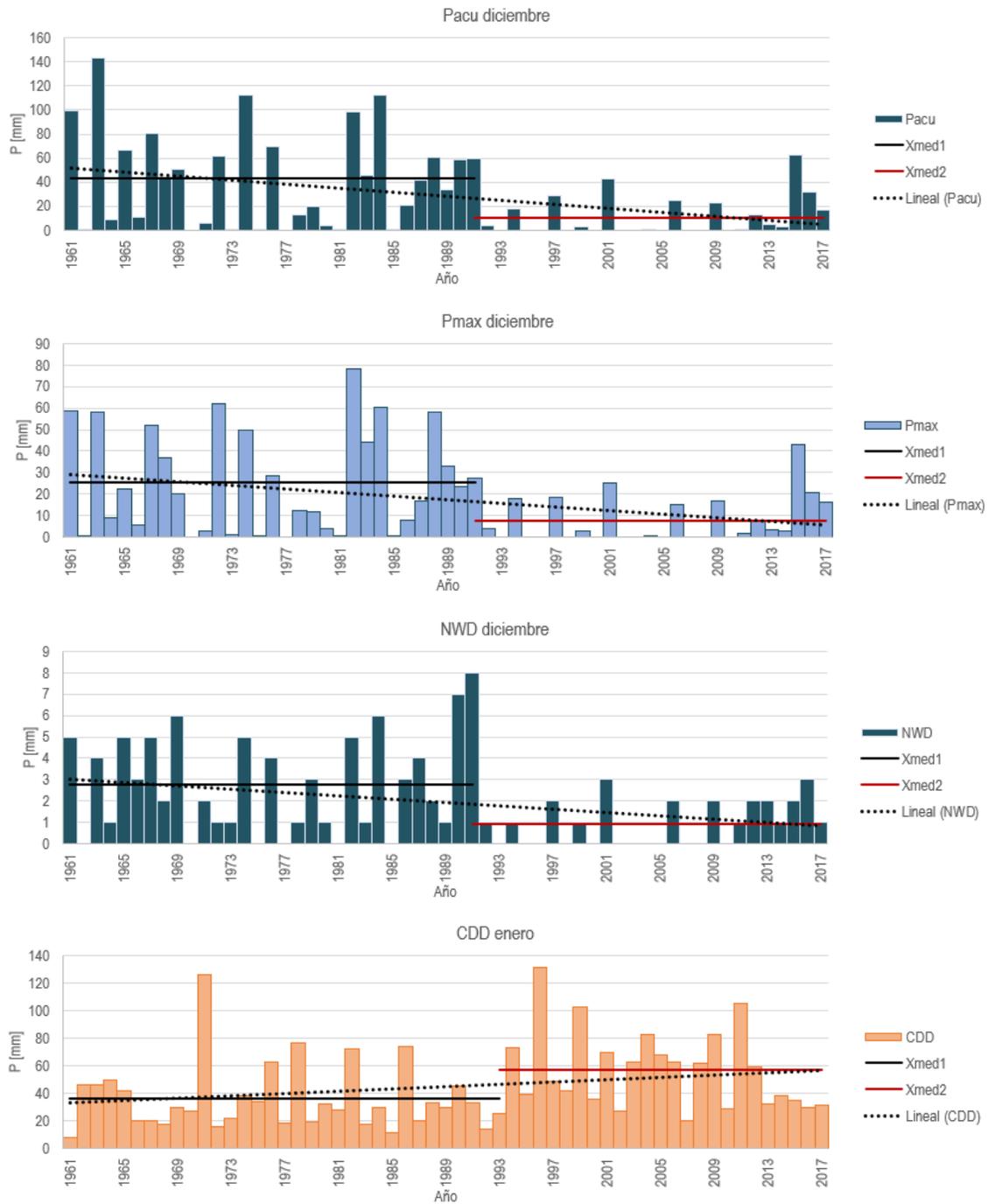


Figura 72. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25045.

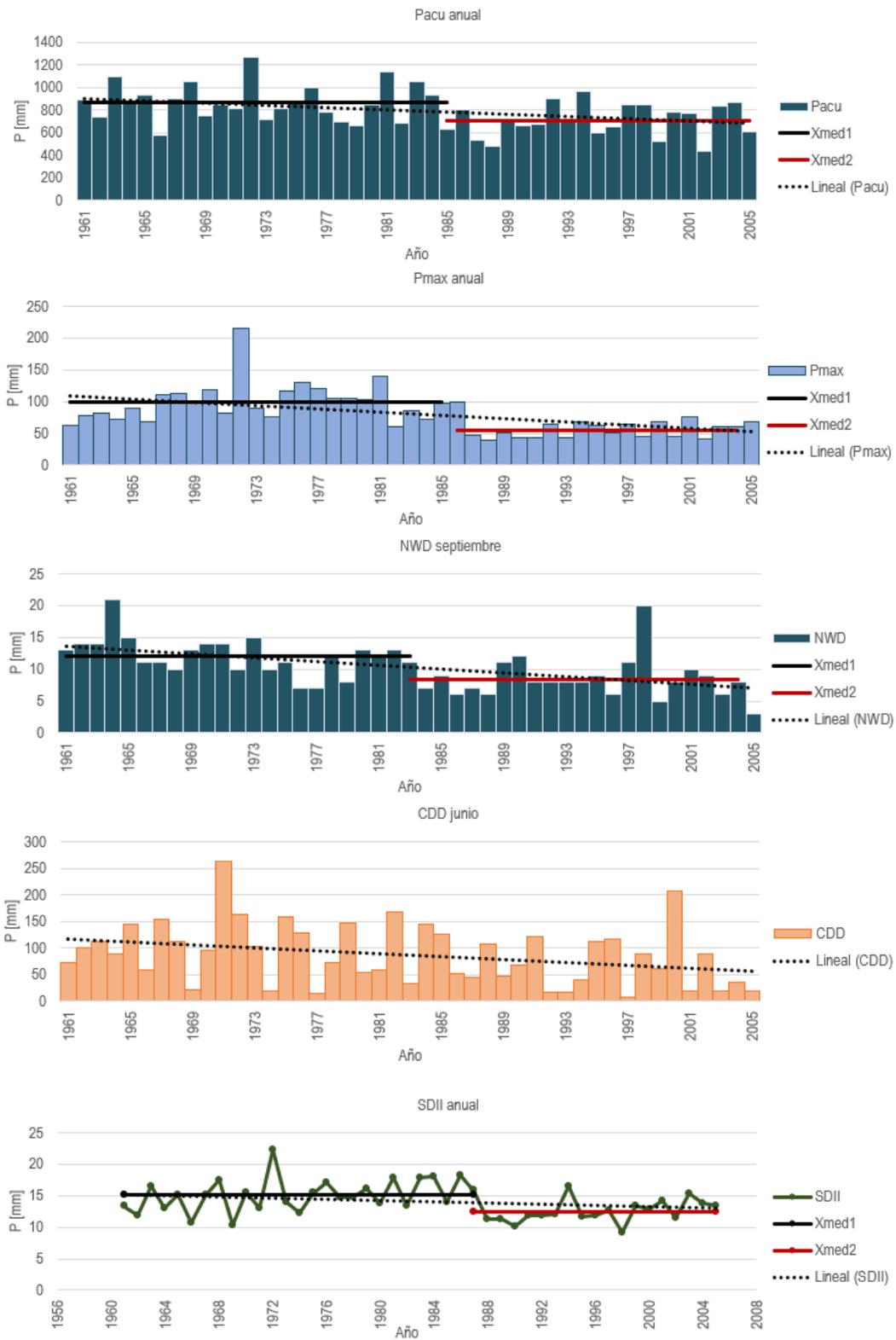


Figura 73. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25084.

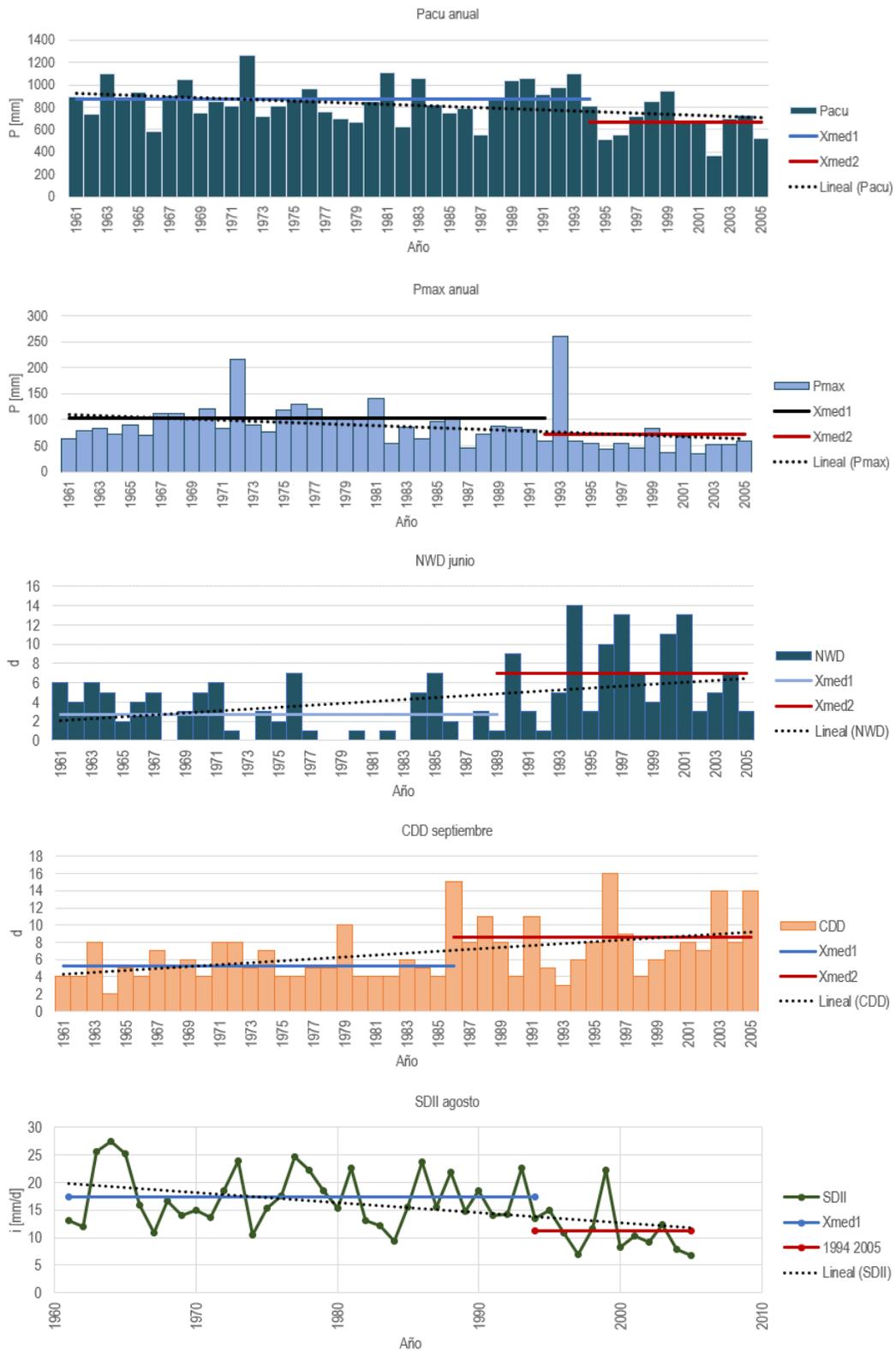


Figura 74. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la E.C. 25118.

3.5.1.3. Caudal

En la última estación hidrométrica, 10111 *Piaxtla CFE* no existe evidencia de cambio más que en el caudal acumulado del mes de enero (Figura 75), pero sólo según la prueba de Mann-Kendall. La Tabla 39 resume los resultados de las dos pruebas.

Tabla 39. Resumen de resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.H. 10111 (caudal).

Serie	Qacu				Qmax				QAA			
	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [hm ³]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [hm ³]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año
ene	-2.08	TSD			-1.92	TNSD			-0.92	TNSD		
feb	-0.95	TNSD			-1.25	TNSD			-0.23	TNSD		
mar	-1.18	TNSD			-1.09	TNSD			-0.64	TNSD		
abr	-1.40	TNSD			-1.70	TNSD			0.21	TNSC		
may	-1.10	TNSD			-1.18	TNSD			0.00	ST		
jun	0.06	TNSC			0.33	TNSC			0.09	TNSC		
jul	-0.54	TNSD			-0.18	TNSD			-0.46	TNSD		
ago	-0.47	TNSD			-0.29	TNSD			-0.85	TNSD		
sep	-1.10	TNSD			-1.32	TNSD			-0.84	TNSD		
oct	-1.51	TNSD			-1.68	TNSD			-1.92	TNSD		
nov	0.62	TNSC			1.15	TNSC			0.51	TNSC		
dic	-1.65	TNSD			-1.70	TNSD			-1.63	TNSD		
Anual	-1.11	TNSD			-0.69	TNSD			-1.24	TNSD		

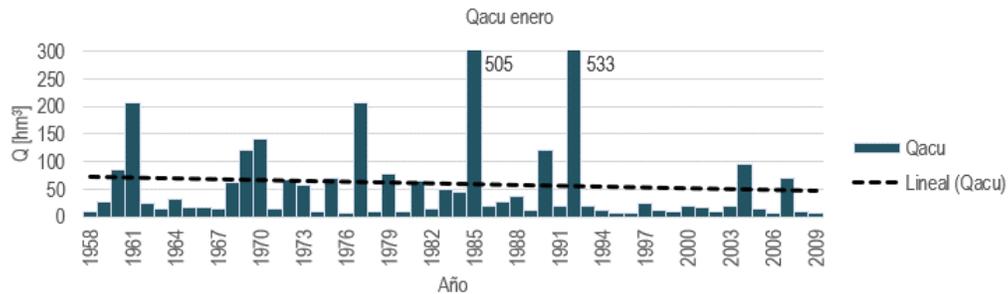


Figura 75. Qacu del mes de enero de la E.H. 10111.

En contraste con la estación anterior, existe evidencia de un aumento del caudal acumulado para el periodo abril-junio y el mes de noviembre en la E.H. 1006. El mayor de todos estos se observa en el mes de noviembre. En la serie de tiempo de Q_{max} existen valores muy grandes respecto a la gran mayoría de los datos, por ejemplo, en el año de 1972 se registró un caudal promedio diario de 2,476 [m³/s] mientras que el promedio para el mismo mes es de 67.69 [m³/s] (Tabla 40 y Figura 76).

Tabla 40. Resumen de resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt: E.H. 10065 (caudal).

Serie	Qacu				Qmax				QAA			
	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [hm ³]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [hm ³]	Año	Z _{MK}	Sig.	$X_{m1}-X_{m2}$ [d]	Año
ene	-0.61	TNSD			-0.86	TNSD			-0.76	TNSD		
feb	0.71	TNSC			0.32	TNSC			-0.23	TNSD		
mar	1.27	TNSC			0.07	TNSC			-0.36	TNSD		
abr	3.32	TSC	7.1-15.7	1982	1.94	TNSC			0.28	TNSC		
may	4.74	TSC	4.4-10.2	1982	3.28	TSC	2.8-8.1	1982	0.00	ST		
jun	1.98	TSC	19.5-36.3	1983	1.12	TNSC			0.32	TNSC		
jul	0.81	TNSC			0.23	TNSC			0.42	TNSC		
ago	0.23	TNSC			-0.15	TNSD			0.38	TNSC		
sep	-0.12	TNSD			-0.85	TNSD			0.47	TNSC		
oct	0.28	TNSC			-0.86	TNSD			-1.55	TNSD		
nov	2.95	TSC	30.3-81.9	1967	2.83	TSC	40.2-172.6	1970	1.34	TNSC		
dic	0.40	TNSC			-0.23	TNSD			-0.72	TNSD		
Anual	1.07	TNSC			-0.34	TNSD			0.56	TNSC		

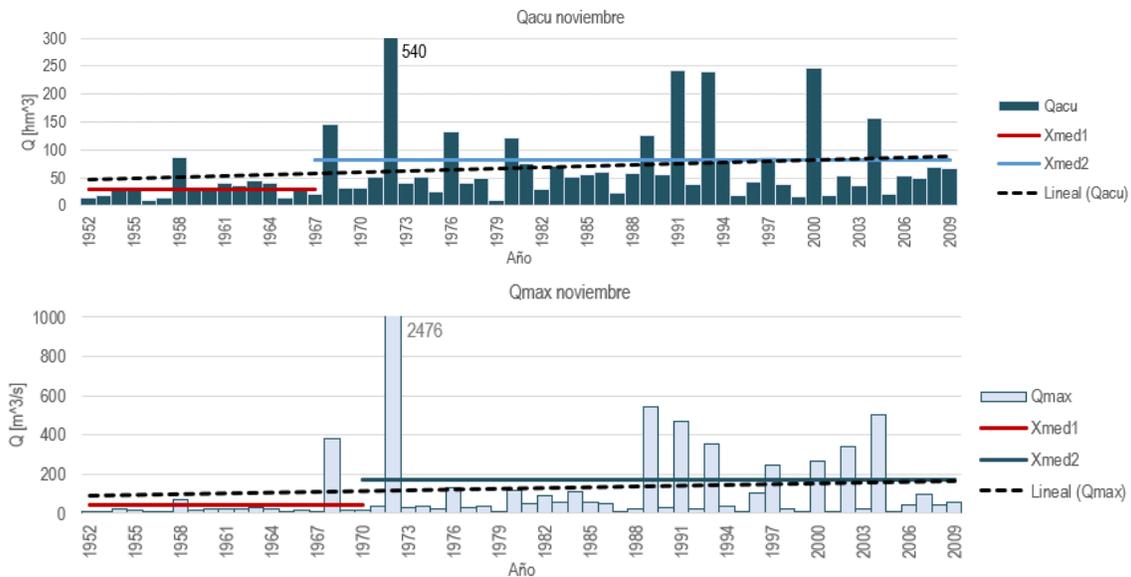


Figura 76. Series de tiempo de Qacu y Qmax de noviembre de la E.H. 10065.

La diferencia más significativa entre estaciones es el periodo de registro, siendo mayor para la E.H. 10065 (1953-2009) y apenas 5 años menor el de la E.H. 10111 (1958-2009). Estos 5 años son suficientes para implicar una diferencia en los resultados de ambas estaciones. En primer lugar, las series de caudal durante el periodo 1958-2009 se mantuvieron sin cambio según los resultados tanto de la prueba de Pettitt como de Mann-Kendall. Sin embargo, considerando los cambios no significativos, en este periodo la tendencia era de hecho decreciente en todos los meses del año menos junio y noviembre. Considerando el periodo 1953-2009 el caudal presenta tendencias crecientes que ya son significativas en 4 meses del año.

3.5.2. Análisis de valores medios. Variabilidad temporal.

Para realizar una comparación de las tendencias entre la precipitación y la temperatura respecto al caudal, se obtuvieron los valores medios ponderados con el área de influencia de cada estación (método de los polígonos

de Thiessen) para tres parteaguas de interés: área de aportación hasta las estaciones hidrométricas 10111, 10065 y cuenca completa (hasta su desembocadura el mar). Durante el análisis no se observó diferencia significativa entre los valores de la misma variable (Figura 77 y Figura 78) y los resultados de las pruebas de Mann-Kendall ($Z_{MK} = -0.12$, $Z_{MK} = -0.02$ y $Z_{MK} = -0.14$, respectivamente para la P_{acu}) y Pettitt son muy similares, a pesar que el área de las cuencas son distintas (5,355, 6,198 y 6,984 [km^2], respectivamente) y, que en la cuenca completa se agrega una E.C.

Por lo anterior, solamente se presentan los resultados correspondientes al área de aportación hasta la E.H. 10065, Piaxtla-Ixpalino.

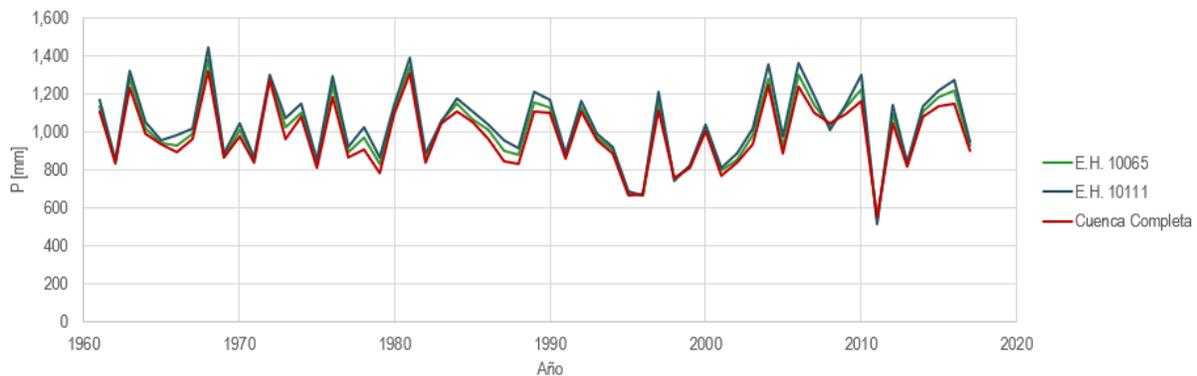


Figura 77. Pacu promedio por parteaguas.

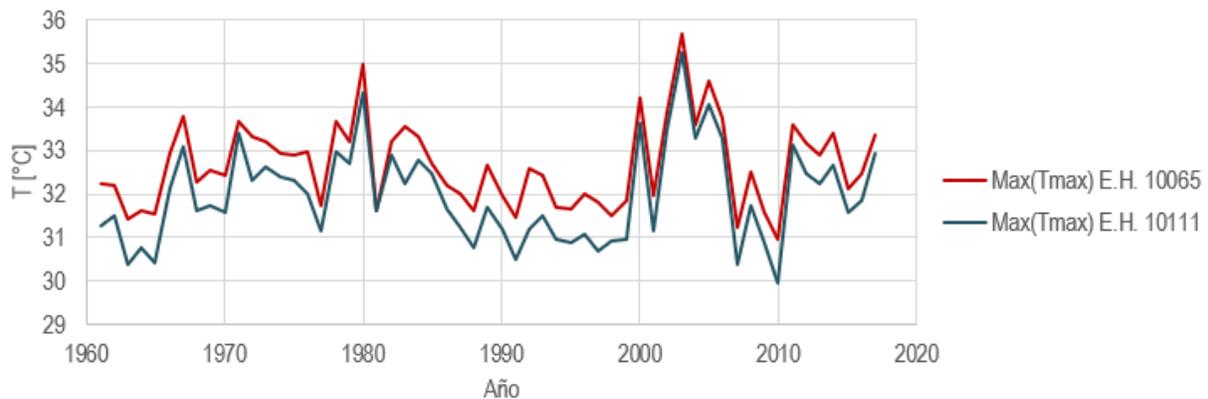


Figura 78. Max(Tmax) promedio por parteaguas.

Así, en la temperatura promedio de la cuenca *Piaxtla-Ixpalino*, se observa un cambio generalizado y variable a lo largo del año (Tabla 41). Las series que propiamente aumentan a todo lo largo del año son $\text{Min}(T_{\max})$ y $\text{Min}(T_{\min})$, en contraste de algunos meses de la temperatura mínima, donde no cambia o disminuye. Este cambio diverso a lo largo del año se ve reflejado en el cambio del DTR, el cual cambia en dos periodos del año: marzo-mayo (tendencia decreciente) y julio-septiembre (tendencia decreciente).

En el caso de la precipitación, los resultados indican que el mayor cambio se presenta en el mes de diciembre, con una tendencia decreciente (Tabla 42 y Figura 80). Se puede observar que la década de 1990 y la del 2000 fueron las más secas y, que a pesar de un leve aumento en los últimos años, esto no ha alcanzado los niveles

registrados antes de 1990. De forma similar a las estaciones en lo individual, existe poco cambio a lo largo del año y el indicador SDII prácticamente se ha mantenido igual.

Tabla 41. Resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt de la cuenca Piaxtla-Ixpalino (temperatura).

Serie	Max(Tmax)				Min(Tmax)				Max(Tmin)				Min(Tmin)				DTR			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[^\circ\text{C}]}$	Año
ene	1.45	TNSC			5.05	TSC	15-18.2	1985	-0.24	TNSD			2.20	TSC			0.38	TNSC		
feb	0.34	TNSC			4.12	TSC	16.5-19.4	1992	0.64	TNSC			3.72	TSC	-0.9 (1.2)	1986	-1.04	TNSD		
mar	-0.70	TNSD			1.12	TNSC			-0.12	TNSD			5.29	TSC	0 (2.4)	1990	-2.44	TSD		
abr	-2.04	TSD	30.7-28.6	2006	1.93	TNSC			0.13	TNSC			3.68	TSC	2.3 (5.7)	2001	-3.35	TSD	21.1 (19)	1989
may	-1.60	TNSD			0.89	TNSC			0.67	TNSC			3.99	TSC	5 (7.1)	1991	-4.08	TSD	20.2 (18.1)	1989
jun	0.96	TNSC			3.01	TSC	24.6-26.3	1973	-0.03	TNSD			4.51	TSC	8.9 (11.5)	1991	-0.83	TNSD		
jul	1.76	TNSC			4.36	TSC	23.3-25	1992	-0.79	TNSD			0.39	TNSC	12.4 (13.4)	2001	3.06	TSC	11.7 (12.8)	1982
ago	3.32	TSC	29-29.9	1980	5.16	TSC	23.8-25.5	1998	1.15	TNSC			1.52	TNSC	12.2 (13.6)	2000	2.71	TSC	11.6 (12.8)	1981
sep	2.66	TSC	28.4-29.7	1975	3.21	TSC	22.8-24.7	1998	-2.42	TSD	16.8-16.1	1983	1.14	TNSC	10.6 (12.2)	2000	2.13	TSC	11.6 (13.1)	1981
oct	1.87	TNSC	28.2-29.4	1973	3.72	TSC	23.4-20.8	1993	-0.72	TNSD			2.49	TSC	5.8 (7.6)	1997	0.23	TNSC		
nov	1.56	TNSC			3.45	TSC	18.4-20.5	1989	-0.09	TNSD			2.72	TSC	1.8 (4)	2003	-0.27	TNSD		
dic	0.19	TNSC			4.21	TSC	15.4-18	1986	-3.02	TSD	10-7.9	1991	2.79	TSC			1.34	TNSC		
Anual	0.23	TNSC			5.27	TSC	13.7-16.7	1986	0.76	TNSC			2.07	TSC			-0.65	TNSD		

Tabla 42. Resumen de resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt de la cuenca Piaxtla-Ixpalino (precipitación).

Serie	Pacu				Pmax				NWD				CDD				SDII			
	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[\text{mm}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[\text{mm}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[\text{d}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[\text{d}]}$	Año	Z _{MK}	Sig.	$\frac{X_{m1}-X_{m2}}{[\text{mm/d}]}$	Año
ene	-1.20	TNSD			-1.49	TNSD	22.6-10.9	1985	-1.44	TNSD			2.61	TSC	23.2-40	1994	-0.95	TNSD		
feb	-0.14	TNSD			-0.76	TNSD			0.14	TNSC			1.21	TNSC			-0.64	TNSD		
mar	0.01	TNSC	13.5-9.6	1992	-0.29	TNSD			-0.14	TNSD			0.63	TNSC			-0.77	TNSD		
abr	-1.05	TNSD			-0.96	TNSD			-1.09	TNSD			0.87	TNSC			-0.89	TNSD		
may	-0.58	TNSD			-0.21	TNSD			-1.16	TNSD			0.76	TNSC			-0.50	TNSD		
jun	0.61	TNSC			-2.54	TSD	25.6-16.4	1985	1.49	TNSC			0.81	TNSC			-1.31	TNSD		
jul	1.34	TNSC			-1.40	TNSD			1.85	TNSC	26.6-28.9	2000	-0.47	TNSD			0.65	TNSC		
ago	1.74	TNSC			-2.04	TSD	29.3-23.1	1981	2.67	TSC	25.8-29.1	2002	-1.93	TNSD			0.89	TNSC		
sep	-1.09	TNSD			-1.49	TNSD			0.49	TNSC			-0.92	TNSD			-1.30	TNSD		
oct	-1.05	TNSD			-1.11	TNSD			0.30	TNSC			0.15	TNSC			-1.60	TNSD		
nov	0.03	TNSC			-0.03	TNSD			0.91	TNSC			0.35	TNSC			-0.26	TNSD		
dic	-2.65	TSD	76.2-27	1992	-2.53	TSD	30.1-12.9	1992	-2.14	TSD	6.4-3.3	1994	1.55	TNSC			-2.42	TSD	11.6-5.4	1991
Anual	-0.02	TNSD			-2.66	TSD	58-38.5	1986	0.82	TNSC			1.38	TNSC			-1.40	TNSD		

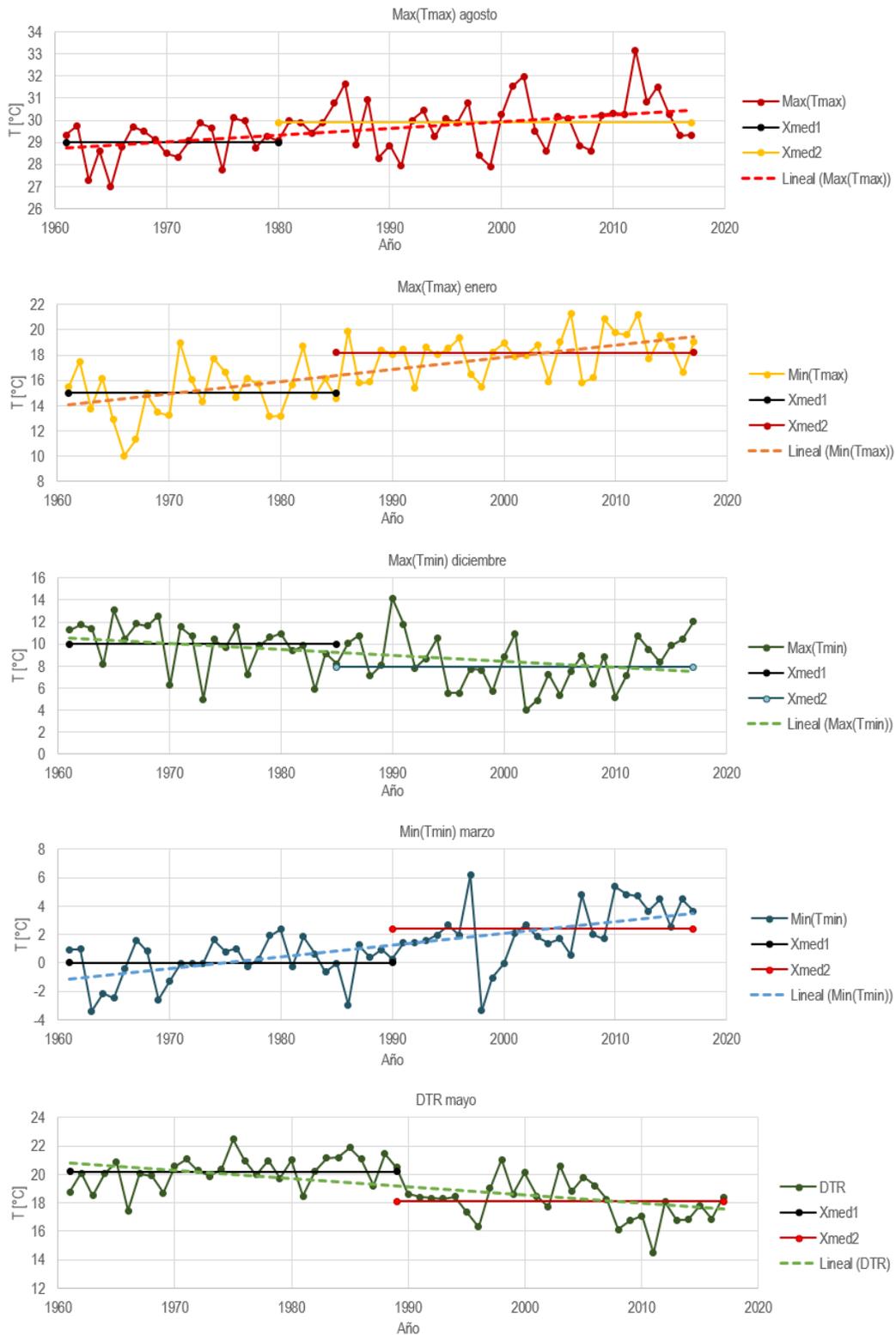


Figura 79. Indicadores de temperatura con mayor cambio anual de la cuenca *Piaxtla-Ixpalino*.

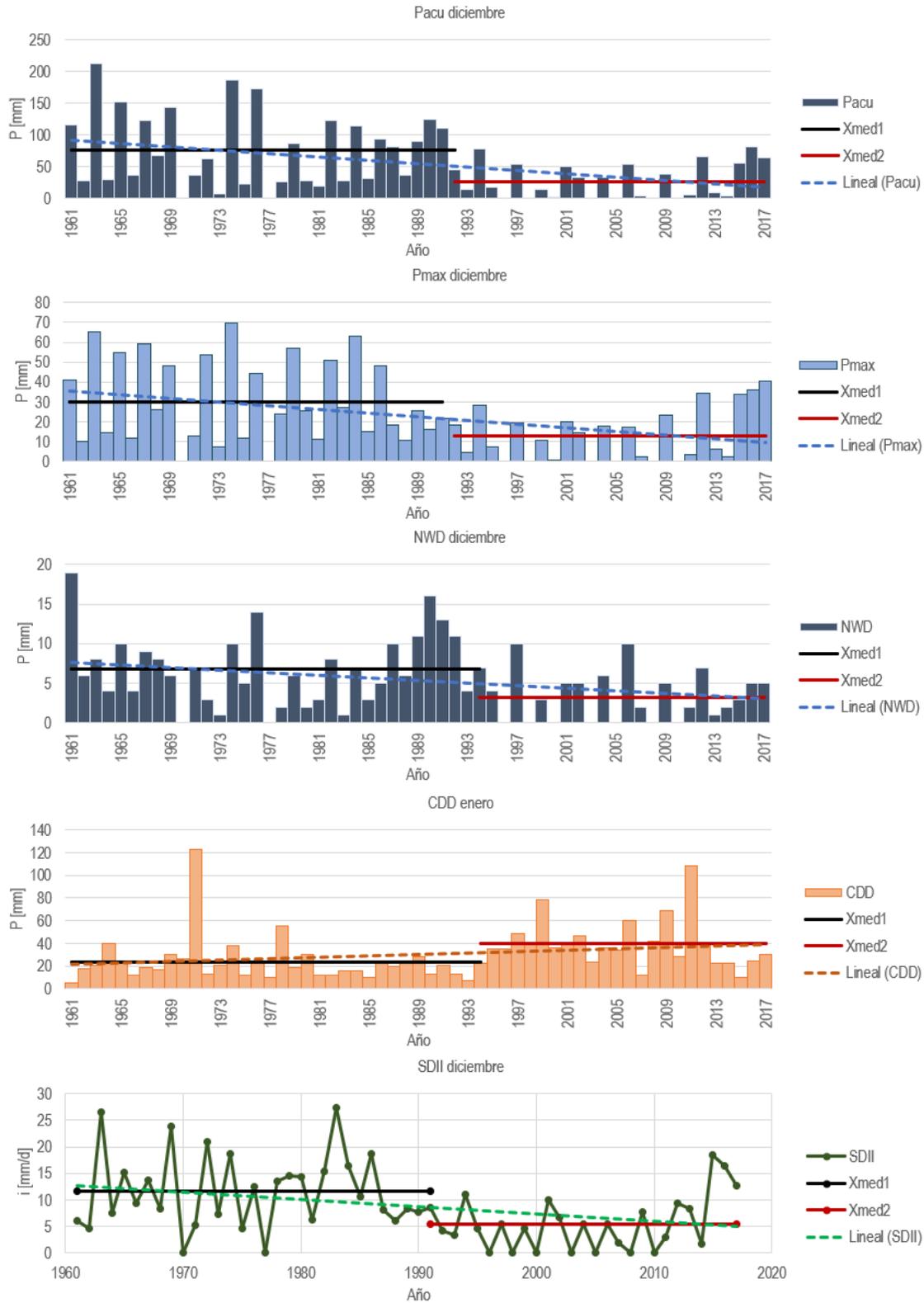


Figura 80. Indicadores de precipitación con mayor cambio anual de la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

3.5.3. Distribución espacial. Valores medios.

El análisis espacial se realizó para los valores medios anuales de P_{acu} , T_{max} y T_{min} . Para ello, se utilizó un SIG y el método de interpolación de IDW o Kriging, según el que mejor se ajustó a los datos medidos. El procedimiento consiste en realizar lo siguiente:

- 1) Indicar la ubicación de las estaciones y el valor correspondiente de \bar{P}_a , \bar{T}_{max} y \bar{T}_{min} .
- 2) Ingresar el parteaguas de la cuenca.
- 3) Seleccionar el método de interpolación (IDW: $b = 2$ o Kriging: variograma lineal).

El resultado es un archivo en formato ráster, con resolución de 30x30 [m] con el valor de la variable en cada celda de la cuenca. La aplicación del procedimiento anterior resultó en un mapa de la distribución espacial de la precipitación acumulada promedio (Figura 81), la temperatura máxima promedio (Figura 82) y la temperatura mínima promedio (Figura 83). Se observa que los máximos valores de precipitación se encuentran hacia la zona montañosa de la cuenca. En la temperatura ocurre lo contrario, indistintamente de la máxima o la mínima, los mayores valores de la temperatura se encuentran hacia la costa. Este método también se aplicó a los valores de cambio promedio anual de las series de tiempo (Figura 81 a Figura 83).

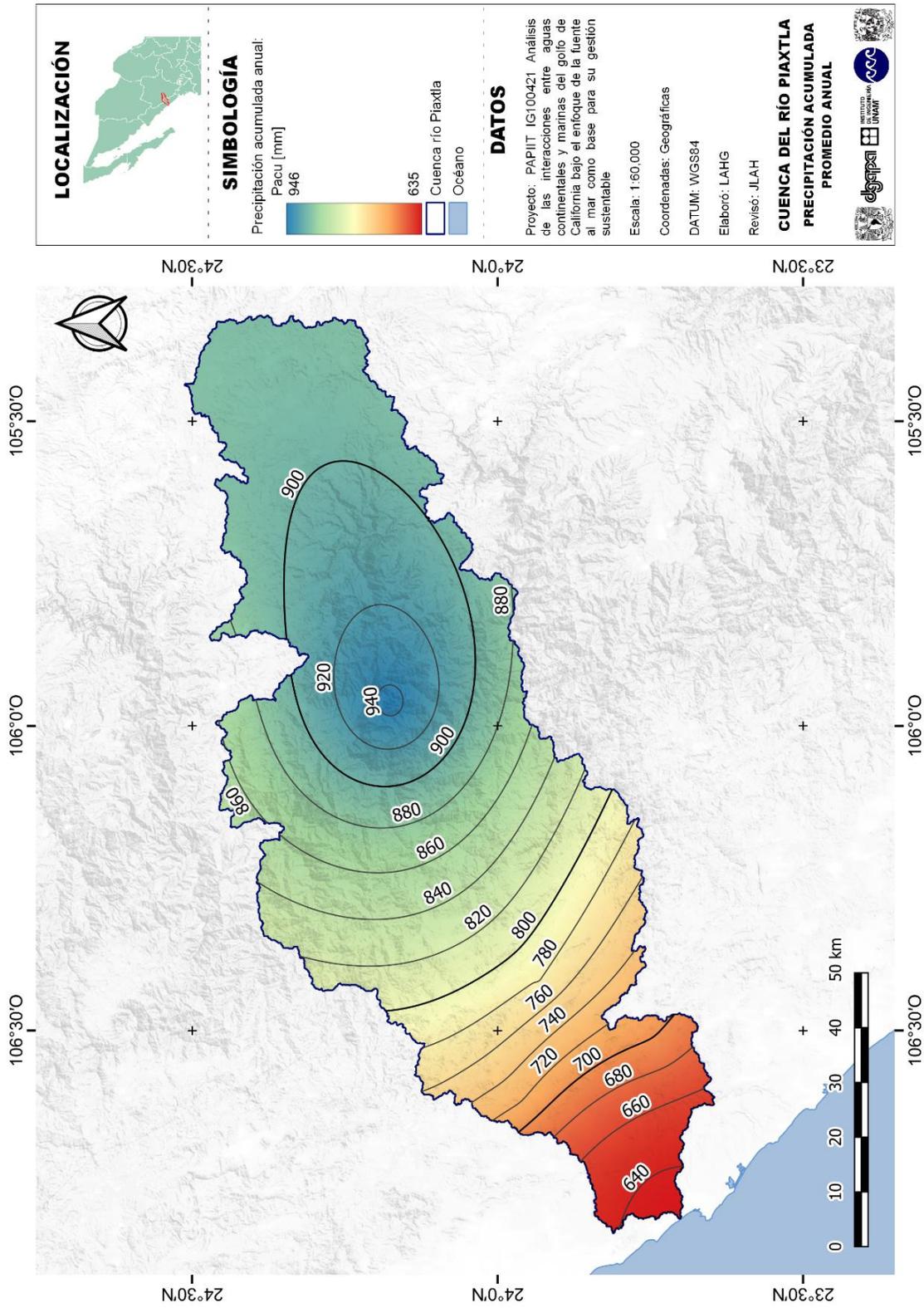


Figura 81. Distribución espacial: precipitación acumulada promedio anual.

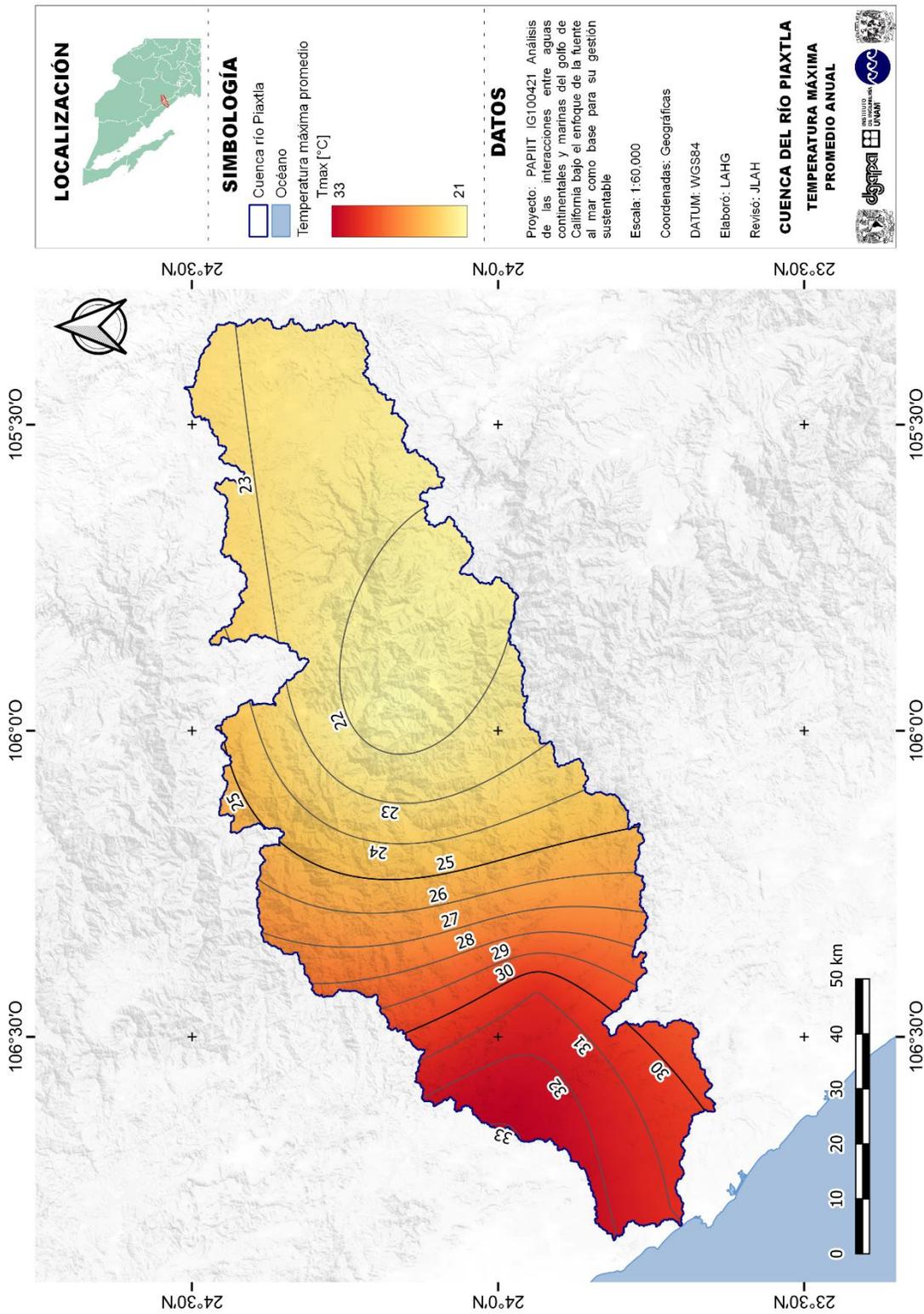


Figura 82. Distribución espacial: temperatura máxima promedio anual.

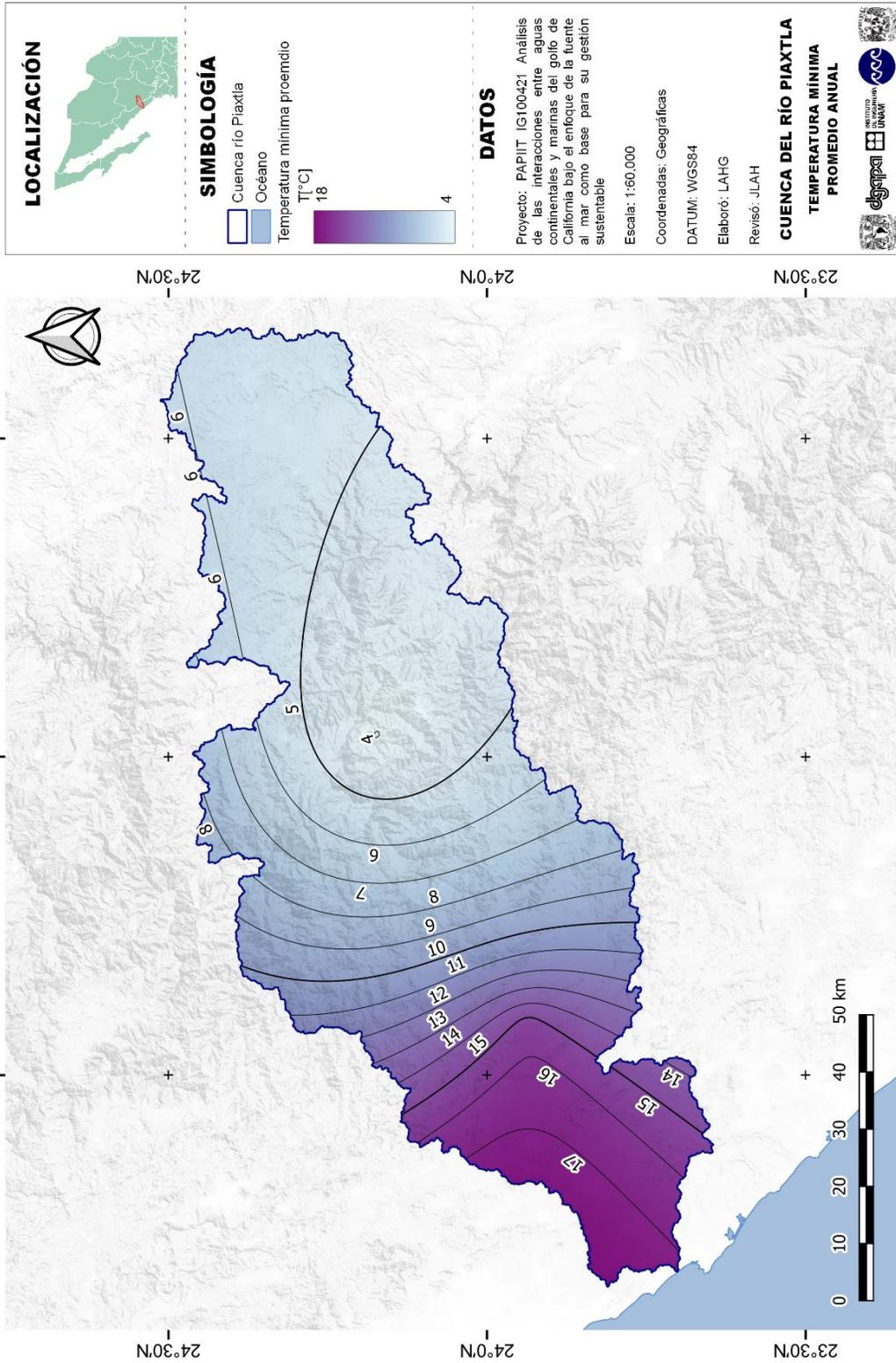


Figura 83. Distribución espacial: temperatura mínima promedio anual.

3.5.4. Disponibilidad de agua

El cálculo de la disponibilidad de agua se basó en el balance hídrico (ecuación 24) y en los valores promedio anual de las variables climatológicas. Para ello, además de los valores de P y Q ya calculados, se consideraron los valores de los usos del agua; otras variables involucradas se describen en este apartado. En la ecuación 24 se puede escribir cada una de las variables como un volumen o como lámina.

3.5.4.1. Esguerrimiento anual

El volumen de esguerrimiento anual se obtuvo a partir del caudal medio diario de la E.H. 10065 *Ixpalino*, el cual corresponde a 1,461.89 [hm^3] (equivalente a 46.2 [m^3/s]) (Tabla 55). Dividiendo entre el área de la cuenca *Piaxtla-Ixpalino* de 6,197.8 [km^2], se obtiene una lámina de 235.9 [mm]. Para una comparación más directa con la precipitación y la temperatura, se puede considerar el promedio en el periodo en común 1961-2009, el cual es de 1,528 [hm^3] (246.5 [mm]).

3.5.4.2. Precipitación anual

De forma similar al caudal, el volumen de precipitación también se obtiene del registro de las estaciones climatológicas, en este caso se aplicó el método de los polígonos de Thiessen para obtener el promedio de toda la cuenca *Piaxtla-Ixpalino*, considerando las estaciones con influencia 10031, 10042, 25001, 25024, 25045, 25084 y 25118. El promedio de la precipitación acumulada en un año es de 1,011.24 [mm] (2.77 [mm/d]). Para el área de aportación de 6,197.8 [km^2], el volumen de precipitación anual es de 6,267.44 [hm^3] (Tabla 50). Considerando sólo el periodo 1961-2009, el promedio resulta de 6,263 [hm^3] (1,010.55 [mm]). En el caso de la cuenca completa (6,984.4 [km^2]) la precipitación resulta de 6,854.8 [km^2] (981.5 [mm]).

3.5.4.3. Evapotranspiración anual

El volumen de la evapotranspiración anual, a diferencia de la precipitación y caudal, no se obtuvo directamente del registro de las estaciones de medición, sino a partir del método de Turc (ecuación 4). Para ello se obtuvo la precipitación y temperatura media de la cuenca *Piaxtla-Ixpalino* con el método de los polígonos de Thiessen para cada año del periodo de registro 1961-2017 y, posteriormente se obtuvo el promedio anual de ETR. Por ejemplo, en el año 1961 la temperatura y precipitación media en la cuenca fueron 17.87 [$^{\circ}C$] y 1,135.1 [mm] respectivamente, resultando la evapotranspiración de 781.45 [mm] (4,843.3 [hm^3]). En todo el registro, la evapotranspiración promedio es de 719.34 [mm] (4,458.35 [hm^3]). Considerando el periodo en común con el caudal (1961-2009), la lámina de ETR resulta de 716 [mm] (4,439 [hm^3]). En ambos casos, la evapotranspiración calculada representa el 71 % de la precipitación, valor similar al que se presenta a nivel nacional (72 %) (CONAGUA, 2018). Para la cuenca completa, con una temperatura promedio de 18.22 [$^{\circ}C$], el volumen de evapotranspiración resulta de 5,127.9 [hm^3] (731.7 [mm]).

3.5.4.1. Usos del agua: agricultura, consumo humano, industria

El cálculo de los usos del agua en la cuenca no es posible realizarlos diferenciando el volumen correspondiente a cada uso, pues la información disponible sólo hace distinción entre fuentes subterráneas y superficiales. El método utilizado es el mismo que en el título 3.2.4. *Usos del agua*. Se encontró que del total

de agua concesionada en la cuenca *Piaxtla-Ixpalino* (27.3 [hm³]), 16.2 [hm³] se obtienen de forma superficial y 11.1 [hm³] de forma subterránea (Tabla 43).

Tabla 43. Volumen de agua concesionado.

Municipio	Por municipio				<i>Piaxtla-Ixpalino</i>				<i>Piaxtla</i>			
	A [km ²]	V _{sub} [hm ³]	V _{sup} [hm ³]	V _T [hm ³]	A [km ²]	V _{sub} [hm ³]	V _{sup} [hm ³]	V _T [hm ³]	A [km ²]	V _{sub} [hm ³]	V _{sup} [hm ³]	V _T [hm ³]
Canatlán	3,505	23	41	64	139	0.9	1.6	2.5	139	0.9	1.6	2.5
Durango	9,326	126	132	258	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
San Dimas	5,483	5	0.2	5	2,852	2.7	0.1	2.8	2,852	2.7	0.1	2.8
Tamazula	5,801	2	0.1	2	76	0.0	0.0	0.0	76	0.0	0.0	0.0
Mazatlán	2,533	93	80	173	22	0.8	0.7	1.5	27	1.0	0.8	1.8
San Ignacio	5,070	11	22	33	3,111	6.6	13.8	20.4	3,837	8.2	17.0	25.2
Elota	1,643	9	250	259	0	0.0	0.0	0.0	39	0.2	5.9	6.2
Total:		269.3	525.5	794.8		11.1	16.2	27.3		13.1	25.5	38.6

Es posible realizar una estimación de los usos del agua en la cuenca en función de los porcentajes de usos del agua en los municipios de San Ignacio y San Dimas, suponiendo que son representativos de la misma al tener mayor área, población y abarcar casi toda la actividad económica. Así, multiplicando estos porcentajes por el volumen total concesionado calculado se obtuvieron los resultados de la Tabla 44.

Tabla 44. Porcentaje de usos del agua en la cuenca del río *Piaxtla*. Suma de los municipios de San Dimas y San Ignacio (CONAGUA, 2020) y calculado para *Piaxtla-Ixpalino*.

Uso	San Ignacio-San Dimas		<i>Piaxtla-Ixpalino</i>	<i>Piaxtla</i>
	V _{REPDA} [hm ³ /año]	V _{REPDA} [%]	V _{calculado} [hm ³ /año]	V _{calculado} [hm ³ /año]
Agrícola	26.20	75%	20.48	28.95
Diferentes usos	3.50	10%	2.74	3.87
Público urbano	4.22	12%	3.30	4.28
Pecuario	0.02	0.04%	0.01	0.02
Acuicultura	0.31	1%	0.24	0.34
Servicios	0.06	0.17%	0.05	0.07
Industrial	0.62	2%	0.49	0.69
Generación de energía eléctrica	25.55		25.55	
Total:	60.48		52.85	38.21
Total consuntivos:	34.93		27.30	38.21

3.5.4.2. Infiltración anual

La infiltración de la cuenca, en primer lugar, se calculó con método del SCS (ecuación 1), a partir de la precipitación disponible, esto es:

$$P_d = P_T - ETR$$

El método calcula la precipitación efectiva P_e , es decir, no se obtiene la lámina de infiltración directamente, por lo tanto, a partir de la ecuación de continuidad la infiltración resulta:

$$I = P_d - (P_e + ETR + \Delta S)$$

Si bien el método se desarrolló para tormentas aisladas, se utilizó para valores anuales. Por ejemplo, para el año 1961 con una $P_d = 354$ [mm] y el NC de 60.4 (multiplicado por un factor de ajuste f), se obtiene una precipitación efectiva $P_e = 246.9$ [mm]. Tal lámina generaría un escurrimiento superficial potencial de 1,524.9 [hm^3], menor que el medido en ese año de 2,208 [hm^3]. Despejando de la ecuación de continuidad la infiltración resulta de 81.1 [mm] (502 [hm^3]). La calibración mencionada del NC se realizó a partir de comparar el resultado de la P_e con el escurrimiento medido real, mediante iteraciones obteniendo un $f = 1.14$, pues los primeros resultados eran incongruentes con los datos medidos.

De tal forma que, la precipitación efectiva promedio para el periodo 1961-2017 es de 192.2 [mm] (1,191.2 [hm^3]) y, de 194 [mm] (1,202.1 [hm^3]) para el periodo 1961-2009. Se calculó también la infiltración a través del método del coeficiente de escurrimiento C_e (ecuación 2), pues se conocen el volumen de precipitación y caudal promedio anuales. Así, considerando un $C_e = 0.244$ la precipitación efectiva real P_e , para el periodo 1961-2009, es igual a 246.5 [mm] (1,527.6 [hm^3]).

De la ecuación de continuidad, la lámina de infiltración promedio I resulta de 72.4 [mm] (448.7 [hm^3]) para el periodo 1961-2009 y, un valor de $I = 73.1$ [mm] (453.2 [hm^3]) en todo el registro. Para la cuenca completa, el valor de la infiltración disminuye a 67.34 [mm] (470.3 [hm^3]).

3.5.4.3. Balance hídrico en la cuenca del río Piaxtla

Es importante mencionar que para el cálculo del balance hídrico se hicieron varias consideraciones. Por ejemplo, la ETR e I (método NC) calculadas representan valores potenciales, es decir, son mayores a los reales. El método de Turc empleado es una simplificación de la ecuación original y la infiltración se calculó con un NC constante para todos los años, cuyo valor sólo aplica propiamente para el año 2010 y tormentas aisladas. En el caso de la cuenca completa el caudal se calculó en función de las áreas de los parteaguas de la E.H. 10065 y la cuenca Piaxtla, obteniendo un volumen de 1,647.4 [hm^3] para todo el registro.

Los cálculos anteriores corresponden a un balance hídrico superficial y sólo se consideran los usos del agua, es decir, no se cuantificó el volumen de agua en almacenamientos, agua subterránea, ni retorno de los usos del agua, especialmente agricultura y uso urbano. Por otra parte, los retornos o pérdidas del agua empleada en la agricultura (debidas a evapotranspiración e infiltración) son de hasta el 50% y del uso urbano del 30% (Carabias *et al* 2005) y tampoco fueron tomados en cuenta en la ecuación de continuidad. En la Figura 84 se presenta un esquema del balance hídrico de la subcuenca Piaxtla-Ixpalino con la infiltración calculada a partir de C_e y, en la Figura 85 en la cuenca completa, con la infiltración calculada a partir de P_e .

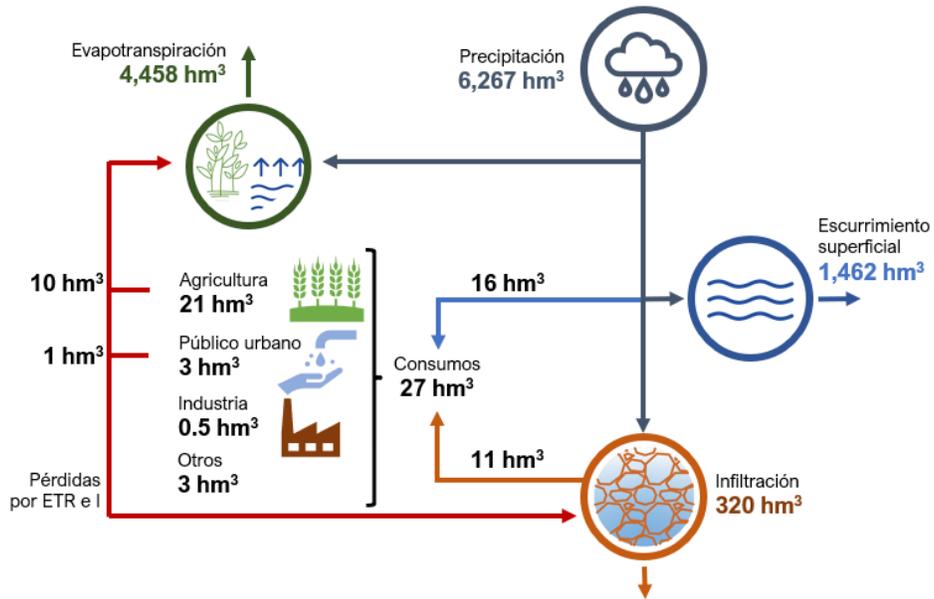


Figura 84. Balance hídrico en la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

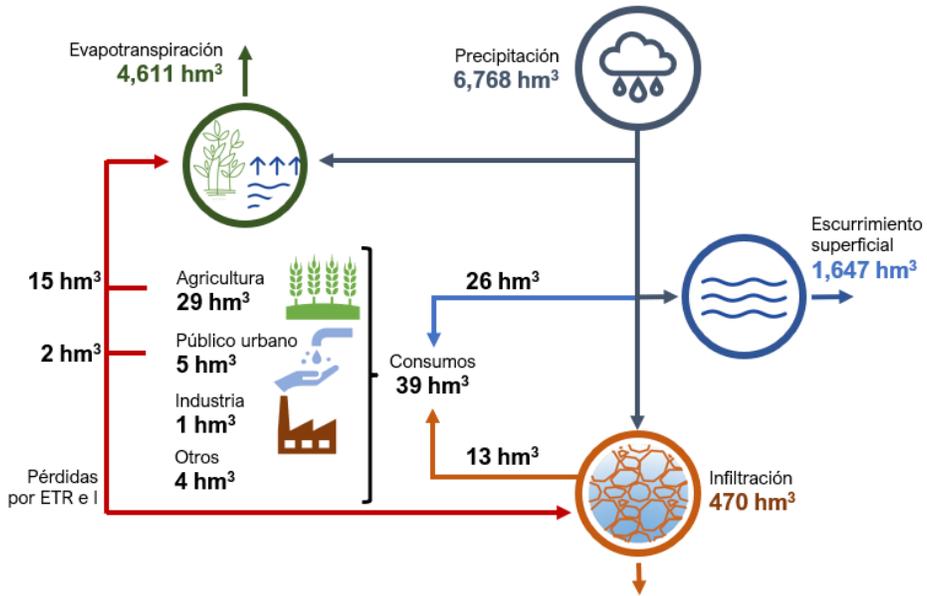


Figura 85. Balance hídrico en la cuenca del río Piaxtla.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los antecedentes se mencionó que el cambio climático causado por el calentamiento global es un fenómeno muy complejo y cuyos efectos ocurren y ocurrirán de forma muy heterogénea. De forma general, los resultados obtenidos en la cuenca del río Piaxtla concuerdan con ello, pues no existe una forma clara de establecer cómo ocurre el cambio observado y sus consecuencias, especialmente para el caudal. Por ejemplo, no se puede hablar de un cambio propio de una estación del año o de una zona de la cuenca. Lo que se pudo comprobar es la “deformación” de la variación diaria de la temperatura, tal como se ha identificado en otros estudios climáticos en el país.

Por lo que para tener una mejor interpretación, entendimiento y representación de los resultados, primero se determina la tasa de cambio anual de las series de tiempo, enseguida se analizan dichos resultados y finalmente se representan espacialmente aquellos con mayor cambio en toda la cuenca.

4.1. Tasa de cambio de los indicadores hidrológicos

Ya se mencionó que a las series de tiempo (mensual y/o anual) donde se obtuvo evidencia de cambio (Mann-Kendall y/o Pettitt) se les realizó un ajuste lineal para obtener el promedio de cambio anual (Δ_i), calculado como la pendiente de la recta. Los valores obtenidos se muestran a partir de la Tabla 50 y hasta la Tabla 55, tanto para cada estación como la cuenca *Piaxtla-Ixpalino*, así como el promedio mensual o anual correspondiente. Para ello, se presenta una escala de colores no específica en las columnas de valores Δ_i , donde el color rojo en general indica disminución de precipitación y aumento de la temperatura y; el azul representa un aumento en la precipitación y disminución de la temperatura. El caso de DTR es distinto al tratarse de la diferencia entre temperaturas. Un color rojo indica un aumento en la diferencia y un color verde, una disminución.

Tabla 45. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: Max(Tmax).

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca <i>Piaxtla-Ixpalino</i>	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[°C/año]	[°C]	[°C/año]	[°C]												
Enero		29.9	0.101	21.3		35.6		30.8	0.074	34.9	-0.172	31.9	-0.075	33.4		25.6
Febrero		31.8	0.044	21.9		36.5		31.0	0.060	35.9	-0.123	34.1	-0.066	34.9		26.7
Marzo		34.2		23.5	-0.033	38.1		31.8	0.032	37.4	-0.066	36.7	-0.063	37.0		28.7
Abril		36.0	-0.023	25.0	-0.060	39.6		33.6	0.025	38.5		39.8	-0.061	39.2	-0.029	30.3
Mayo		38.0		26.8	-0.053	40.4	0.014	34.8	0.025	39.4	0.072	41.4		40.4		31.8
Junio	0.040	38.3		27.4	-0.023	40.6		36.0	0.050	39.9	0.091	41.8		40.8		32.2
Julio		35.5	0.057	25.1	-0.036	39.4	0.017	36.2	0.055	39.0	0.054	39.5		39.0		30.3
Agosto		35.0	0.057	24.8		38.3	0.032	36.0	0.057	37.9	0.057	37.5		37.5	0.030	29.6
Septiembre	0.048	34.4	0.053	24.5		38.0	0.009	35.9	0.052	37.2	0.103	37.9	0.054	37.5	0.028	29.3
Octubre	0.026	34.2	0.027	24.3		38.4		35.6	0.045	37.7	0.057	37.5		37.3	0.018	29.1
Noviembre		32.4	0.047	23.2		37.3		33.9	0.072	36.8		35.2		35.8		27.9
Diciembre	-0.045	29.7	0.045	21.4	-0.033	35.3		31.2	0.056	35.1	-0.159	32.6	-0.062	34.0		25.7
Anual	0.039	39.0	0.028	28.3	-0.049	41.5		37.8	0.044	40.5	0.086	42.5	-0.022	41.5		32.7

Tabla 46. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: min(Tmax).

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[°C/año]	[°C]	[°C/año]	[°C]												
Enero	0.043	18.0	0.119	11.0	0.070	24.1	0.078	21.7	0.089	23.6	-0.088	19.6	0.102	22.3	0.096	16.8
Febrero		19.7	0.119	11.2		25.7	0.076	22.9	0.062	25.7	-0.104	22.1		24.3	0.085	17.8
Marzo		22.2	0.061	13.1		27.9	0.056	23.7	0.054	27.7	-0.143	25.3		27.2		20.2
Abril		25.2		15.3		30.9	0.063	25.4	0.056	30.3	-0.105	28.5		29.7		22.6
Mayo	0.046	28.4	0.060	17.6		33.0	0.075	27.9	0.040	32.3		32.7		33.0		25.3
Junio		28.2	0.031	18.6		32.5	0.067	29.7	0.068	32.4	0.094	33.0	0.094	32.9	0.036	25.9
Julio		25.1	0.052	17.5		31.2	0.036	30.2	0.033	30.8		30.3	0.045	31.1	0.051	24.0
Agosto		25.8	0.081	18.2		30.9	0.035	30.0	0.038	30.6		29.8	0.075	31.0	0.049	24.4
Septiembre		24.8	0.064	17.5		29.8		29.1		29.1		28.8	0.106	29.7	0.062	23.4
Octubre	0.057	23.9	0.069	15.7		29.1	0.076	28.0	0.095	29.1		26.8		28.2	0.078	21.9
Noviembre		21.1	0.084	12.7		27.6	0.069	25.5		27.4	-0.165	23.9	-0.008	26.1	0.067	19.4
Diciembre		17.1	0.086	10.7		23.4	0.073	22.7	0.063	23.9	-0.092	20.4	0.085	23.2	0.083	16.8
Anual		15.1	0.107	8.5		21.7	0.058	20.2	0.063	21.6	-0.116	18.2	0.093	20.9	0.085	15.4

Tabla 47. Tasa de cambio y promedio por estación y por cuenca: Max(Tmin).

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[°C/año]	[°C]	[°C/año]	[°C]												
Enero		10.6		4.8		16.6		16.1		15.7	-0.053	15.3	-0.054	15.3		8.3
Febrero		10.7		3.8		16.3		15.6		15.6		15.9		15.8		7.7
Marzo		11.6		5.1		17.2		16.7	-0.040	16.5		17.7		17.3		8.9
Abril	0.038	14.8		6.6		19.1		18.6		18.7	0.081	20.1		19.5		10.7
Mayo	0.047	17.7	0.044	8.5		22.2		21.8		22.4	0.102	23.9	0.069	23.3		13.7
Junio	0.042	20.7	-0.028	11.7		26.0		25.7		26.3	0.088	27.1	0.063	26.4		17.0
Julio	0.035	20.0		11.9		26.6		26.2	-0.025	26.2	0.058	26.3		26.0		16.9
Agosto	0.017	19.3		11.9		26.5		26.2		25.9		25.6		25.4		16.6
Septiembre		19.3	-0.015	11.6		26.2		25.9		25.8	0.029	25.4		25.1	-0.015	16.4
Octubre		17.3		9.9		24.8		24.6		24.6		24.0		23.9		14.8
Noviembre		13.7		6.4		21.1		20.9		20.5		19.8	-0.041	19.7		11.0
Diciembre	-0.039	11.6		5.2		18.3		17.8	-0.047	17.4	-0.084	16.7	-0.099	16.7	-0.054	9.0
Anual	0.052	21.2		12.9		27.4		27.2	-0.013	26.9	0.090	27.5	0.064	27.0		17.5

Tabla 48. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: Min(Tmin).

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[°C/año]	[°C]	[°C/año]	[°C]												
Enero		1.8	0.103	-6.1		7.7		7.5		6.6	-0.081	6.3	-0.089	6.2	0.034	-0.1
Febrero	0.031	2.8	0.115	-5.9		8.0		7.8		7.1		7.1		6.8	0.061	0.2
Marzo	0.043	3.8	0.122	-5.4	0.037	8.3	0.035	8.2	0.035	7.8		7.9		7.6	0.082	1.2
Abril	0.066	6.3	0.098	-3.6		10.0		9.9		10.1	0.045	10.9		10.5	0.068	3.3
Mayo	0.062	9.6	0.100	-1.5		12.3		12.5		12.9	0.059	14.4		13.8	0.054	6.0
Junio	0.059	13.0	0.101	2.2	0.018	16.3		16.7	0.047	18.6	0.104	18.9	0.091	18.4	0.075	10.1
Julio	0.047	13.8	-0.010	5.8		20.3		20.6		21.7		21.0		20.8	0.004	12.7
Agosto	0.041	13.6	0.030	5.8		19.8		20.4		21.4	0.021	20.9	0.014	20.8	0.016	12.6
Septiembre	0.024	12.4	0.038	3.7		19.3		19.7	0.022	21.0		20.0		19.9	0.017	11.1
Octubre	0.027	8.5	0.067	-1.1		16.1		16.3		16.4		14.7		14.9	0.042	6.4
Noviembre		4.4	0.075	-4.5		11.5		11.6		10.9	-0.070	9.7	-0.075	9.7	0.043	2.3
Diciembre		2.4	0.092	-6.2		8.5		8.5		7.6	-0.071	6.6	-0.063	7.0	0.044	0.2
Anual		1.1	0.059	-8.1		6.0		5.8		5.3	-0.053	4.6	-0.059	4.5	0.028	-1.3

Tabla 49. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: DTR.

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[°C/año]	[°C]	[°C/año]	[°C]												
Enero		18.8		18.2		19.1	0.08	15.29	0.09	19.5	-0.10	16.3		18.3		18.2
Febrero		20.3		18.9		20.2		15.50	0.06	20.6	-0.15	17.7		19.2		19.2
Marzo		21.4	-0.06	19.9	-0.04	21.5		15.90	0.05	21.4	-0.15	19.2	-0.07	20.4	-0.04	20.3
Abril	-0.03	21.3	-0.09	19.7	-0.05	21.6		15.47	0.05	21.0	-0.11	19.7	-0.08	20.3	-0.05	20.1
Mayo	-0.02	20.4	-0.09	19.3	-0.06	20.2	0.05	14.48	0.05	19.1	-0.07	18.5	-0.09	18.6	-0.06	19.2
Junio	-0.03	16.9		16.2	-0.04	15.7		10.92	0.04	13.9		14.5		14.3		15.6
Julio	-0.04	13.5	0.06	12.4	-0.02	12.7	0.04	10.09	0.06	11.8		11.6		11.9	0.03	12.4
Agosto	-0.03	14.0	0.04	12.6	-0.01	12.0	0.03	10.00	0.07	11.2		10.8	0.04	11.4	0.03	12.4
Septiembre		14.2	0.04	13.1		11.8	0.04	9.83	0.05	10.7	0.04	10.8	0.06	11.3	0.03	12.6
Octubre		17.3		16.1		14.3		11.43	0.05	13.7		13.5		13.8		15.5
Noviembre		18.7		18.6		17.2		13.82	0.05	17.6	-0.10	16.0		17.3		18.0
Diciembre		17.8		17.9		17.4	0.08	14.44	0.09	18.1	-0.08	15.9		17.5		17.6
Anual	-0.02	17.9		16.9	-0.02	16.9	0.04	13.09	0.06	16.5	-0.06	15.4		16.2		16.7

Tabla 50. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: P_{acu}.

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[mm/año]	[mm]	[mm/año]	[mm]												
Enero		33.77		55.69		20.24		18.09	-0.272	18.09		22.84		21.78		40.53
Febrero		18.17		29.66	0.076	13.10	0.087	9.51		10.93		19.02		13.35		22.80
Marzo		11.27		15.91		3.28		4.15		4.76		7.31		5.55	-0.047	11.80
Abril		7.18	-0.082	10.79		2.15		1.81		2.35		3.96		3.26		7.64
Mayo		15.79		24.52		1.58		1.08		1.17		4.97		2.96		16.18
Junio		93.59		133.15		42.89		28.32		38.38		56.56		54.78		101.28
Julio		204.56	1.778	291.16		200.86		139.92		185.85		207.87		216.50		251.92
Agosto		195.78	1.420	265.04		215.68		175.57	0.180	214.07		214.12		223.68		242.19
Septiembre	-1.000	143.79		178.59		173.63		141.31		169.60	-3.138	137.95	-2.597	150.86		168.79
Octubre		49.31		62.12		69.76		70.45		80.67		58.12		61.22		60.30
Noviembre		27.43		39.26		28.42		23.15		27.83		24.01		28.16		33.15
Diciembre	-0.806	46.62	-1.953	71.49	-0.705	29.20		24.91	-0.833	28.16		38.04		33.38	-1.326	54.64
Anual		847.26		1177.37		800.78		638.28		781.86	-5.047	794.77	-4.878	815.49		1011.24

Tabla 51. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: P_{max}.

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[mm/año]	[mm]	[mm/año]	[mm]												
Enero		15.34		23.12		11.01		6.99	-0.180	8.89		11.68		10.81	-0.197	16.00
Febrero		9.28		13.16		8.50	-0.006	5.60		7.78		12.22		8.70		9.55
Marzo		6.66		8.99		2.31		3.09		3.46		5.18		4.13		6.32
Abril		4.46		6.11		1.73		1.44		1.76		2.71		2.15		4.36
Mayo		8.21		11.73		1.15		0.66		0.84		4.06		2.43		7.58
Junio		23.33	-0.215	28.59		20.38		14.07		19.85		25.37		24.60	-0.193	19.51
Julio		32.02		31.54		49.87		43.66		51.10	-0.369	50.59	-0.632	53.44		26.00
Agosto		30.08		30.93		52.39		48.92		56.81	-0.667	53.90		56.87	-0.113	25.41
Septiembre		28.16		31.06		55.20		49.41		53.88	-0.711	43.01		49.22		26.83
Octubre		20.84		21.66		39.40		42.85		47.76		31.80		33.48		21.61
Noviembre		16.53		20.23		17.36		14.90		18.36		14.93		16.38		16.87
Diciembre		21.13	-0.541	29.85	-0.349	16.47		16.55	-0.426	17.19		21.79		19.98	-0.456	22.54
Anual		49.80	-0.413	59.94		88.89	-0.803	91.83		93.08	-1.259	81.04	-1.038	87.03	-0.453	47.39

Tabla 52. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: NWD.

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[d/año]	[d]	[d/año]	[d]												
Enero		3		4	-0.021	2		1	-0.025	2		2		2		4
Febrero		2		3		1		1		1		2		1		3
Marzo		1		1		0		1		0		1		1		2
Abril		1	-0.019	1		0		0		0		1		0		1
Mayo		2	-0.033	2		0		0		0		0		0		3
Junio		10		12		4		3		3		4	0.098	4		14
Julio		21		25		14		10		13	-0.050	15		15	0.037	27
Agosto	-0.088	20		24		14		12		13		14		14	0.059	27
Septiembre		15		17	-0.002	11	0.058	9		10	-0.152	10	-0.086	11		21
Octubre		5		6		3		3		3	-0.023	3		3		7
Noviembre		2		3		2		1		2		2		2		3
Diciembre		4	-0.109	5	-0.042	2		2	-0.039	2		3		2	-0.083	5
Anual		86		103		54	0.269	44		50		57		57		117

Tabla 53. Tasa de cambio y promedio por estación y cuenca: CDD.

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[d/año]	[d]	[d/año]	[d]												
Enero		34	0.521	29	0.363	43		49	0.409	45		39		38	0.315	30
Febrero		37	0.426	33		45		53		50		41		43		32
Marzo		54		45		60		67		62		56		57		45
Abril		65	0.733	54	0.107	79		83		77		67		73		54
Mayo		75	0.855	59		103		110		102	-1.043	83		92		58
Junio		42	0.899	41		107		118		113	-1.396	87		100		38
Julio		4		2		13	-0.463	41		19		13		11		2
Agosto		4		3		5		9		5		5	0.017	5		2
Septiembre		6		6		7		10		7	0.147	7	0.113	7		4
Octubre		18	0.112	16		21		25	0.010	22		23		21		15
Noviembre		32	0.173	27		36		39		38		34		35		27
Diciembre		35	0.315	28		43	0.009	47		42		35		38		28
Anual		90	0.865	73		123		133		123	-0.976	106		113		74

Tabla 54. Tasa de cambio y promedio por estación y por cuenca: SDII.

Serie:	E.C. 10031		E.C. 10042		E.C. 25001		E.C. 25021		E.C. 25045		E.C. 25084		E.C. 25118		Cuenca Piaxtla-Ixpalino	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}												
	[mm/d/año]	[mm/d]	[mm/d/año]	[mm/d]												
Enero		8.14		11.21		6.17		4.52		5.30		6.68		5.69		7.50
Febrero		5.08		7.34		5.94		4.01		5.20		6.99		4.82		4.90
Marzo	0.002	4.39		6.13		1.86		2.67		2.49		2.93		2.29		3.97
Abril		3.40		4.21		1.26		1.04		1.11		1.93		1.50		2.90
Mayo		5.28		6.61		0.98		0.51		0.64		2.34		1.86		4.19
Junio		9.70		10.83		8.81	-0.082	7.67		10.02		11.17		10.69		7.27
Julio		9.65		11.68		14.32	-0.180	15.57		14.60		14.12	-0.047	14.60		9.21
Agosto	0.041	9.67		11.24		15.39		16.28		16.26		14.92	-0.181	15.74		9.06
Septiembre		9.70		10.76		16.23		18.52		16.60		13.33	-0.169	13.98		8.04
Octubre		9.95	-0.097	9.10		15.97		20.81		23.14		13.27		13.60		7.52
Noviembre		8.85		9.54		8.53		8.75		10.61		9.31		9.52		7.46
Diciembre		10.15	-0.162	12.67		8.53		10.17		10.32		10.96		10.42	-0.138	8.78
Anual		9.98		11.41		14.99	-0.158	16.59		15.96	-0.107	14.05	-0.126	14.52		8.62

Tabla 55. Tasa de cambio y promedio para ambas E.E.H.H: Qacu, Qmax y QAA.

Serie:	Qacu				Qmax				QAA			
	E.H. 10065		E.H. 10111		E.H. 10065		E.H. 10111		E.H. 10065		E.H. 10111	
	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}	Δ	X_{med}
	[hm ³ /año]	[hm ³]	[hm ³ /año]	[hm ³]	[m ³ /s/año]	[m ³ /s]	[m ³ /s/año]	[m ³ /s]	[d]/año	[d]	[°C/año]	[°C]
Enero		81.94	-0.46	59.55		162.3		121.6		2		2
Febrero		34.60		24.28		46.1		31.2		1		1
Marzo		25.61		18.51		36.6		22.5		0		0
Abril	-0.08	11.35		8.06		12.5		9.5		0		0
Mayo	0.24	7.26		4.92	0.06	4.2		2.9		0		0
Junio	0.17	27.57		20.37		45.6		33.3		0		0
Julio		204.98		138.28		206.0		133.9		8		7
Agosto		369.99		238.22		355.3		222.1		17		14
Septiembre		393.40		269.31		541.8		455.4		17		15
Octubre		161.32		108.41		338.6		227.0		4		3
Noviembre	0.74	67.69		47.86	1.23	126.6		96.1		1		1
Diciembre		71.85		54.74		153.8		138.3		1		1
Anual		1461.89		992.49		881.5		747.9		50		45

4.2. Distribución espacio-temporal de variables climatológicas

A continuación se analiza en detalle la variación espacio-temporal para cada variable o sus indicadores, así como la interpretación correspondiente de las pruebas estadísticas. Es importante mencionar que el resultado de la prueba de Mann-Kendall puede ser H_0 (sin cambio) o H_1 (con cambio), los cuales se interpretan como “no significativo estadísticamente” y “significativo estadísticamente”; y en conjunto con la prueba de Pettitt, se puede concluir que existe una tendencia o no en la serie.

Por otra parte, analizar cada serie individualmente o a nivel cuenca, ya sea mensual o anual, permite explicar el resultado de cada prueba, pues en algunas series se identificó que la tendencia de cambio lleva ocurriendo desde el inicio del registro (usualmente en temperatura) y, en otras los cambios se dieron de forma más reciente (el caso del caudal). Para ello, se interpretan, analizan y representan espacialmente las series de tiempo (mensual o anual) de los indicadores con mayor cambio determinados en el apartado anterior. La representación espacial se realizó mediante la interpolación del método de Kriging ordinario e IDW, según el que mejor se adaptó a los datos medidos.

4.2.1. Temperatura

De la Figura 86 a la Figura 89 se encuentran los mapas de cambio promedio anual de la temperatura de mayor cambio. Por ejemplo, en la E.C. 25045 es clara una tendencia creciente significativa en todos los meses del año de $\max(T_{max})$ y de $\min(T_{max})$. La temperatura no presenta evidencia de cambio significativo más que en 3 meses del año para ambos indicadores de T_{min} . De tal forma que, DTR presenta evidencia de cambio significativo creciente en todos los meses del año. Los mayores valores del promedio de cambio anual se encuentran en los meses de enero y diciembre para T_{max} y DTR . Por otro lado, el cambio observado en la E.C. 10031 se concentra más en la temperatura mínima. El periodo de cambio de $\min(T_{min})$ abarca desde febrero hasta octubre pero no existe evidencia de cambio en la serie anual. Ocurre una coincidencia de periodos de cambio entre $\max(T_{min})$ y DTR , siendo abril-agosto.

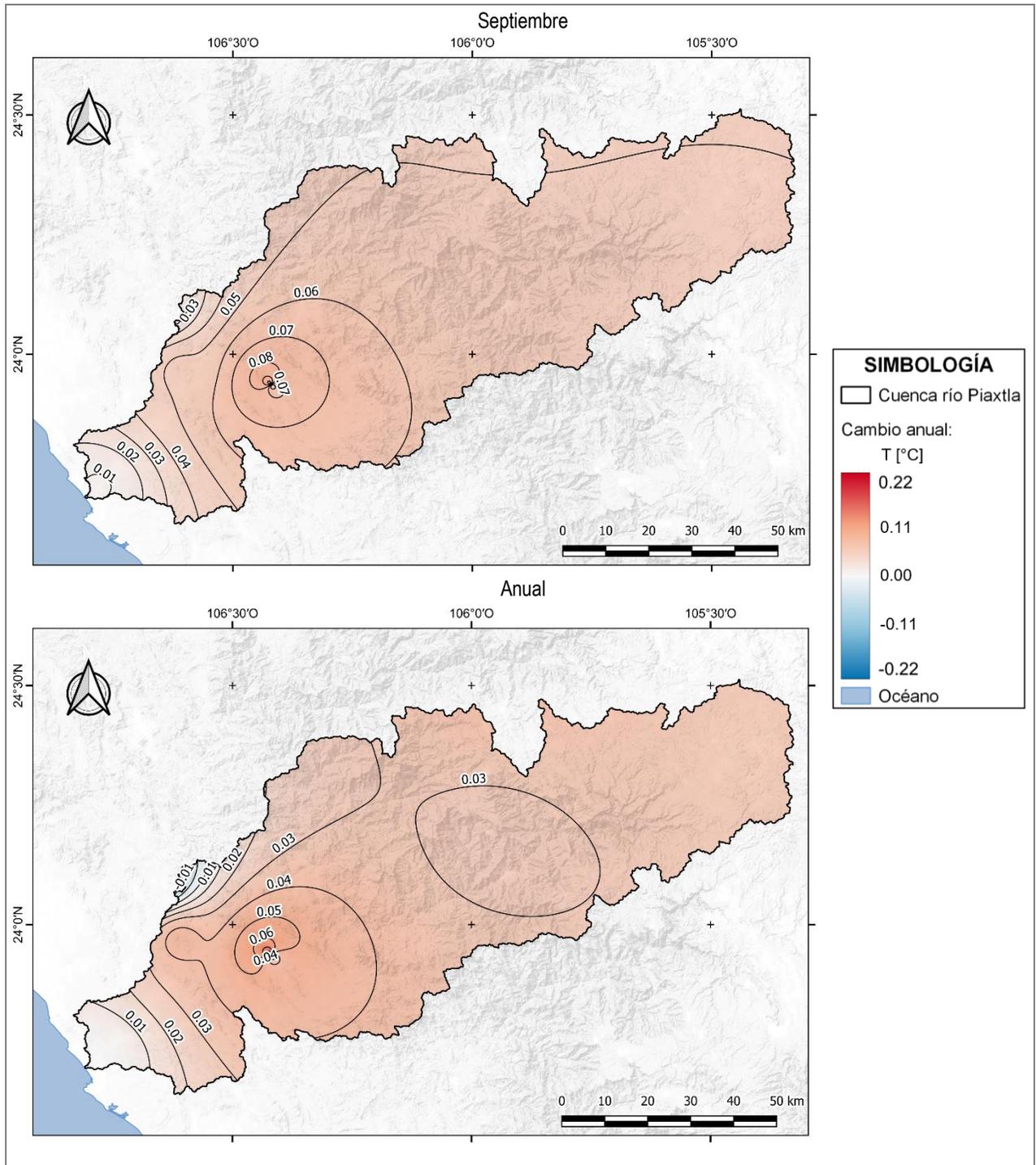


Figura 86. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: $\text{Max}(T_{\text{max}})$ (septiembre y anual).

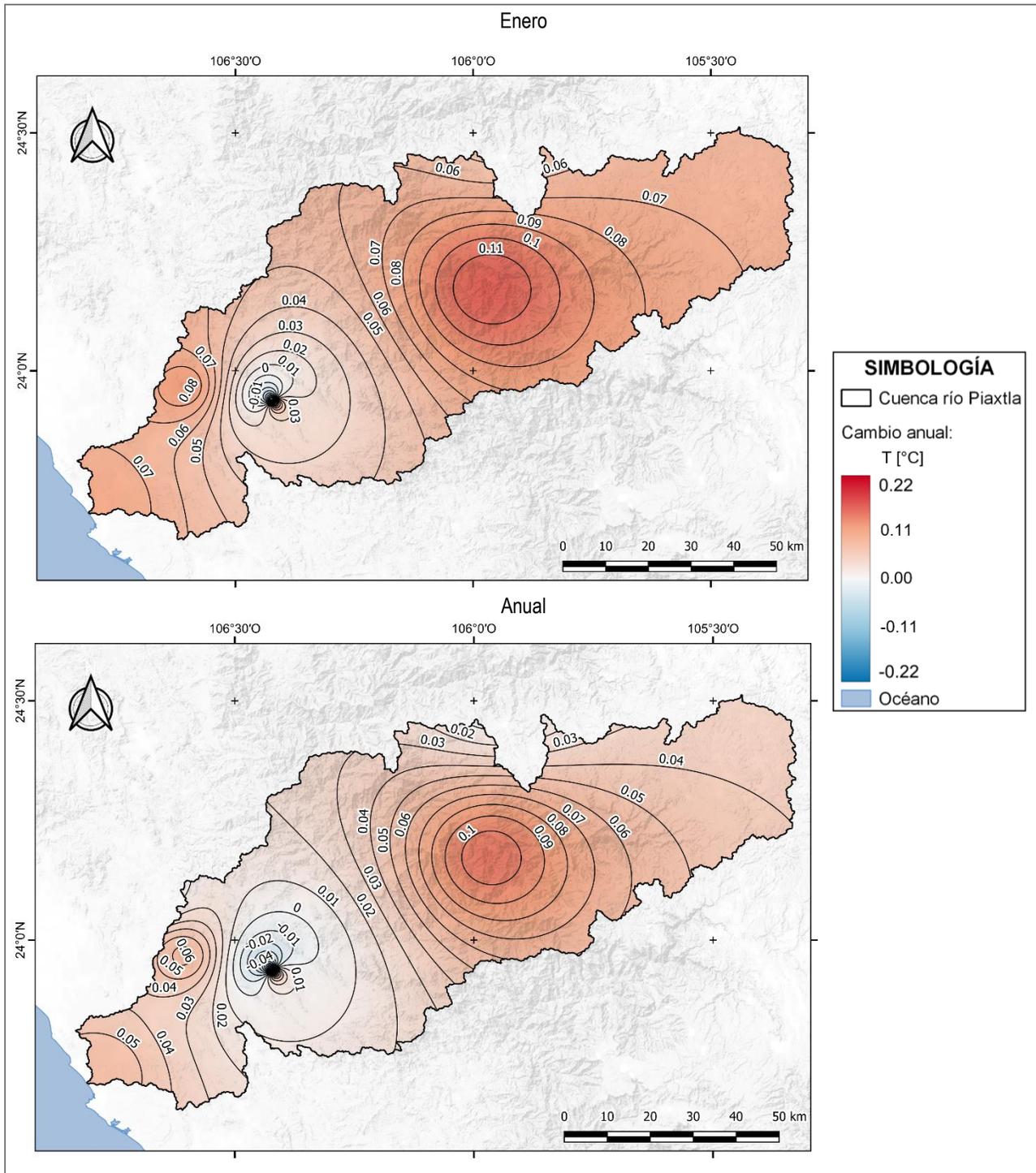


Figura 87. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: $\text{Min}(T_{max})$ (enero y anual).

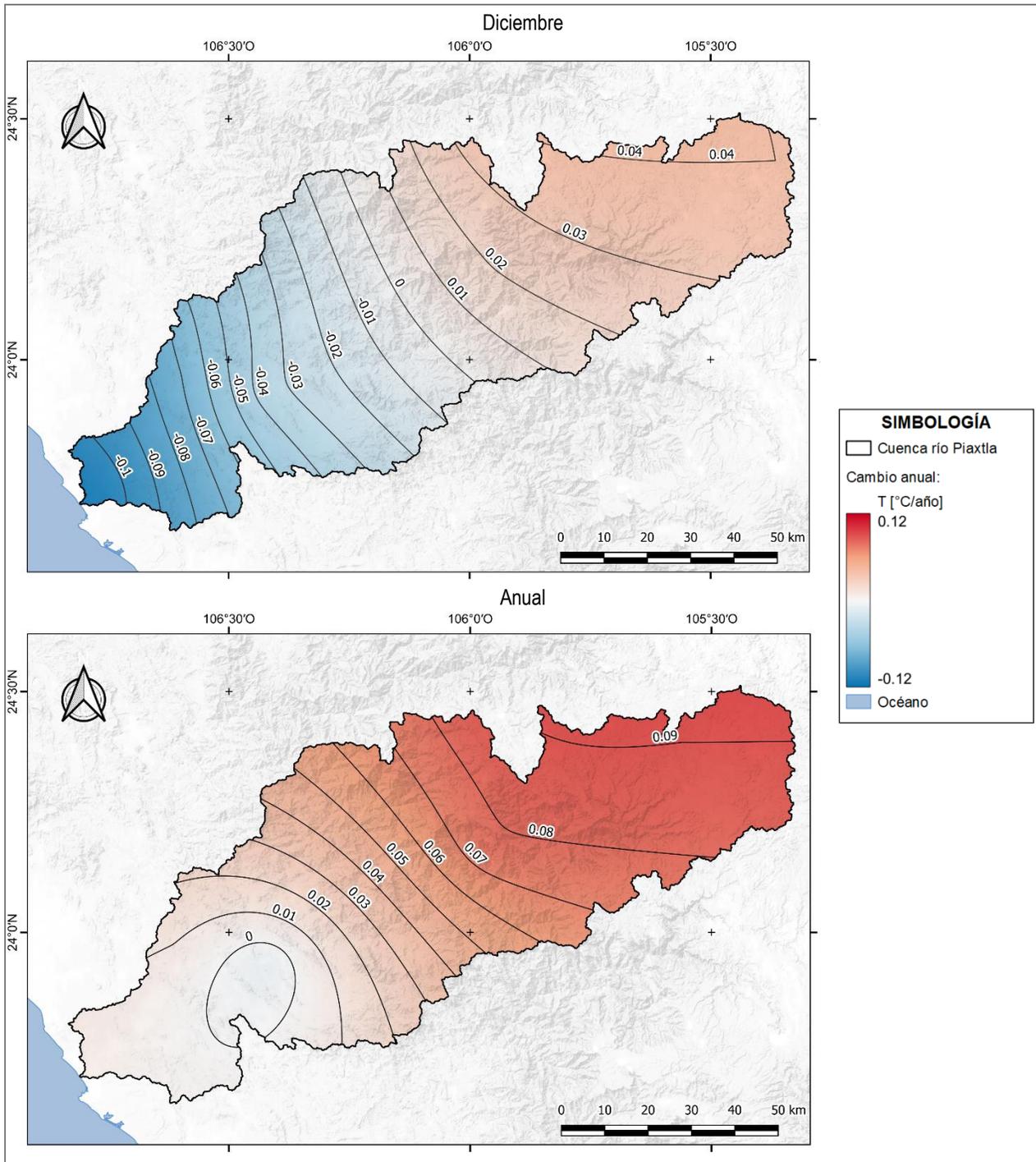


Figura 88. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: Max(Tmin) (diciembre y anual).

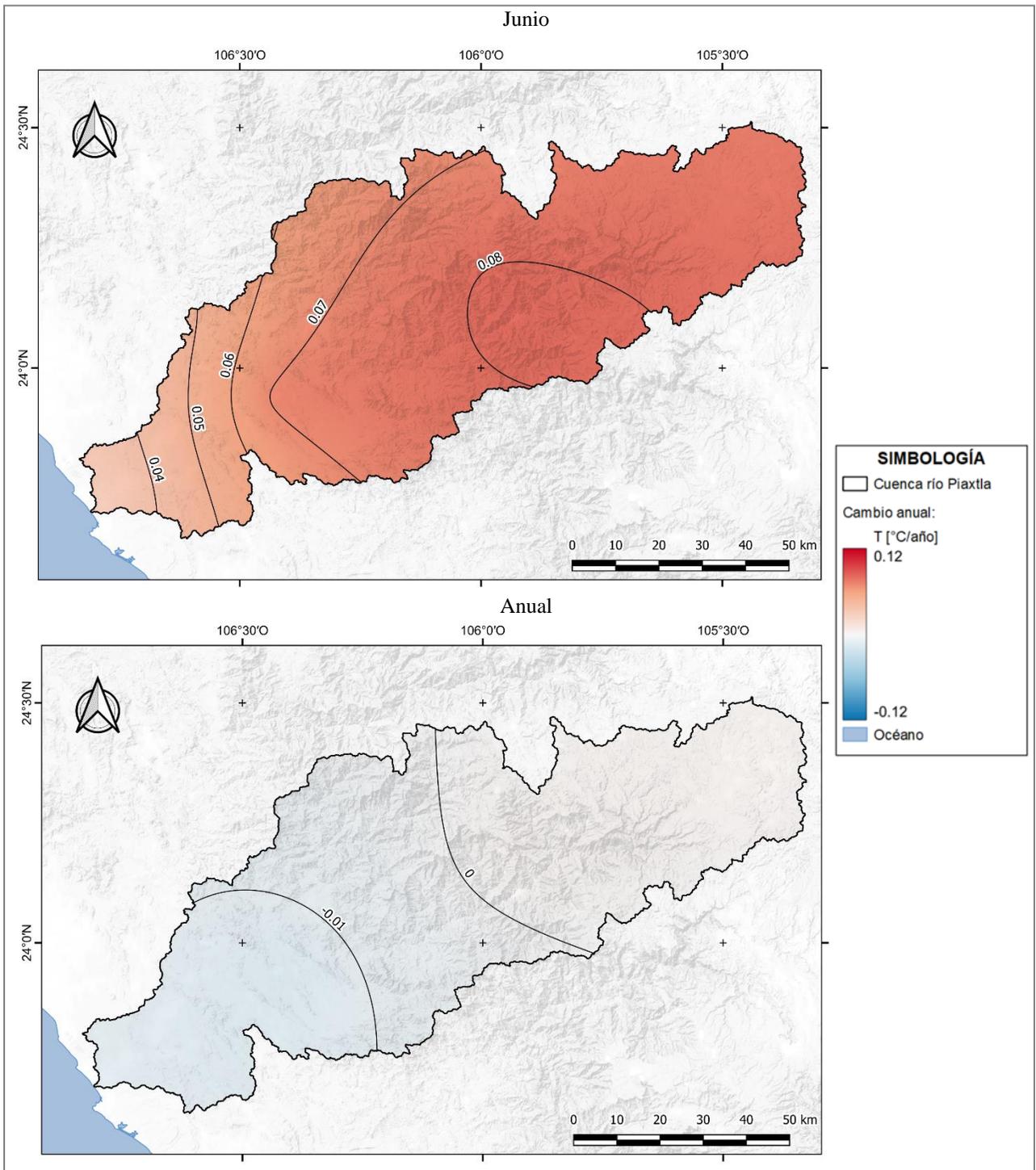


Figura 89. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: Min(T_{min}) (junio y anual).

De las figuras anteriores se observa que el mayor cambio de todos ocurre en la temperatura máxima; también se desprende que si la serie anual muestra poco cambio ($\min(T_{min})$), (Figura 89) ello no implica que no pueda ocurrir un cambio significativo en algún mes del año. Además, se aprecia que el mayor cambio creciente se presenta en la zona de la sierra.

Este comportamiento debe tener en cuenta que en la zona montañosa se registran los menores valores de temperatura (menor a $0 [^{\circ}C]$). De seguir estas tendencias, la zona montañosa de la cuenca podría pasar de presentar climas fríos a climas templados según la clasificación climática de Köppen-Modificado por García (2005) y, según los valores de Pettitt de \bar{X}_2 , todavía se presentan temperaturas mínimas frías a finales de 2017.

En el análisis de dos estaciones climatológicas (25084 y 25118) cercanas entre sí (a poco más de $1 [km]$), se encontró que las tendencias no coinciden: la diferencia más clara entre ambas es que la E.C. 25084 se encuentra dentro de la zona urbana del pueblo de *San Ignacio* y la E.C. 25118 en las cercanías del bosque y algunos terrenos deforestados (Figura 90).

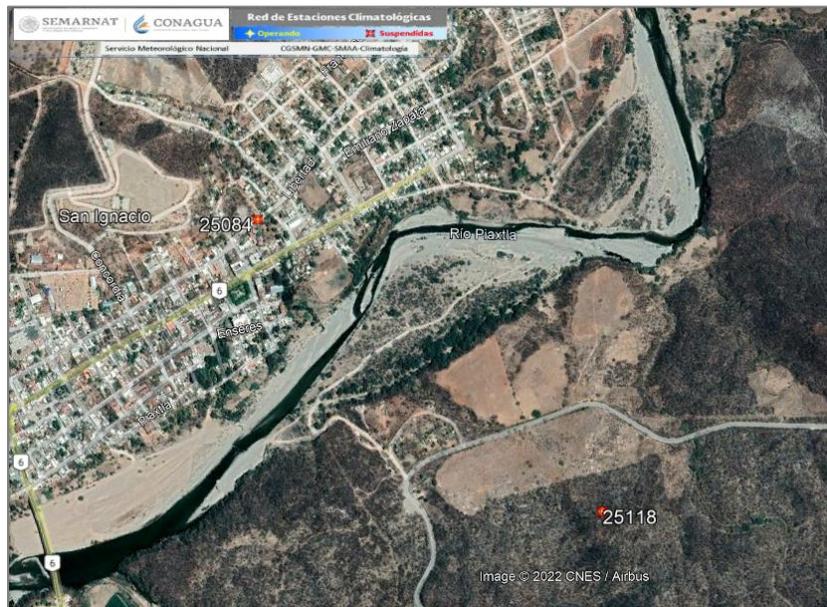


Figura 90. Localización de las EE.CC. 25084 y 25118.

El pueblo de San Ignacio no es muy grande ni presenta el nivel de urbanización de las grandes ciudades, pero el microclima “isla de calor” relacionado con las zonas urbanas puede ocurrir incluso a partir de la deforestación. La exploración de la zona con Google Earth muestra infraestructura urbana compuesta por caminos de concreto justo en la calle donde está ubicada la E.C. 25084, así como casas de mampostería. Los resultados indican que la E.C. 25084 presenta más series de tiempo con evidencia de cambio creciente significativo, especialmente de T_{max} . En la E.C. 25118, las mismas series de tiempo no presentan evidencia de cambio. El periodo donde hay mayor coincidencia es el de noviembre-marzo, con tendencias generalmente decrecientes. Esto contrasta con la variable de precipitación, donde no existe esta diferencia.

Se observó que el método de Kriging es menos sensible a microclimas que el método IDW. Este fenómeno se aprecia principalmente en la Figura 87, donde los resultados se obtuvieron a partir del método IDW y las curvas de cambio de temperatura forman un anillo alrededor de la E.C. 25084 y rápidamente cambian conforme se acercan a la E.C. 25118. Se considera que, el método de Kriging describe mejor el comportamiento de cambio a lo largo de la cuenca, pero que en las zonas rurales deben ocurrir fenómenos de microclima como los observados entre las estaciones 25084 y 25118.

De forma general, la cuenca está experimentando un aumento de la temperatura, de mayor magnitud en la zona montañosa y en los valores mínimos tanto de T_{max} como de T_{min} . Por su parte, la T_{min} suele no presentar cambio significativo, con excepción de la zona montañosa (E.C. 10042). A su vez, se han presentado tendencias decrecientes significativas de T_{max} en la zona costera y en el periodo noviembre-marzo para la zona centro-sur (EE.CC. 25084 y 25118). De tal forma que, es posible que en el futuro no se registren nuevos “récords” de temperatura, pues el cambio no está sucediendo tan marcadamente en los máximos valores T_{max} , así como también podrían dejar de presentarse en T_{min} . Se puede también describir lo anterior con el concepto “deformación”, pues la forma en la que se distribuye la temperatura está cambiando espaciotemporalmente.

4.2.2. Precipitación

La precipitación presenta poca variabilidad lo cual se refleja con valores pequeños de los estadísticos de la prueba de Mann-Kendall (S, Z_{MK}). Sin embargo, se reconoce un patrón que se repite en más de una estación; se agrupan los valores negativos menores de $S, y Z_{MK}$ en los meses de diciembre y enero. Similarmente, se observa un aumento en el número de días secos consecutivos (CDD) que, en ocasiones se corresponde con una disminución del número de días húmedos (NWD). Existe una disminución en la precipitación acumulada, acompañada con una disminución en la precipitación máxima. En general, no se observa mayor cambio en el índice simple de intensidad diaria (SDII).

Los cambios observados no pueden relacionarse con una estación del año en particular o con una zona de la cuenca. Esto es evidencia de cómo los efectos del cambio climático se distribuyen de forma heterogénea. De esta forma, en la Figura 91 se muestran espacialmente los resultados del cambio promedio anual de los meses de septiembre y diciembre, los cuales presentan el mayor cambio en toda la cuenca. Posteriormente en la Figura 92 se muestran los resultados correspondientes a las series anuales, donde se aprecia en la zona centro-sur (EE.CC. 25084 y 25118) el mayor cambio observado en los meses de septiembre y diciembre.

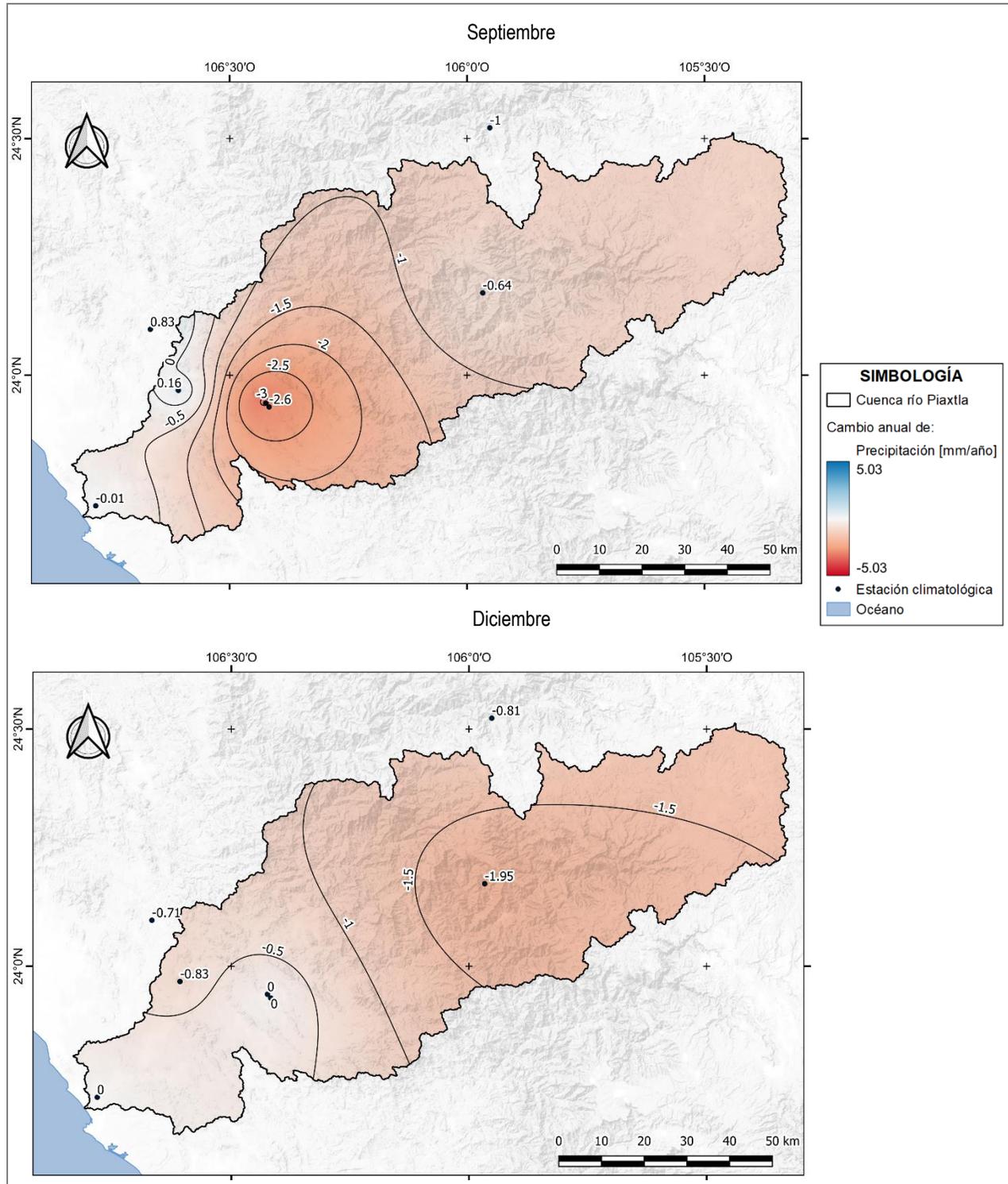


Figura 91. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: Pacu (septiembre y diciembre).

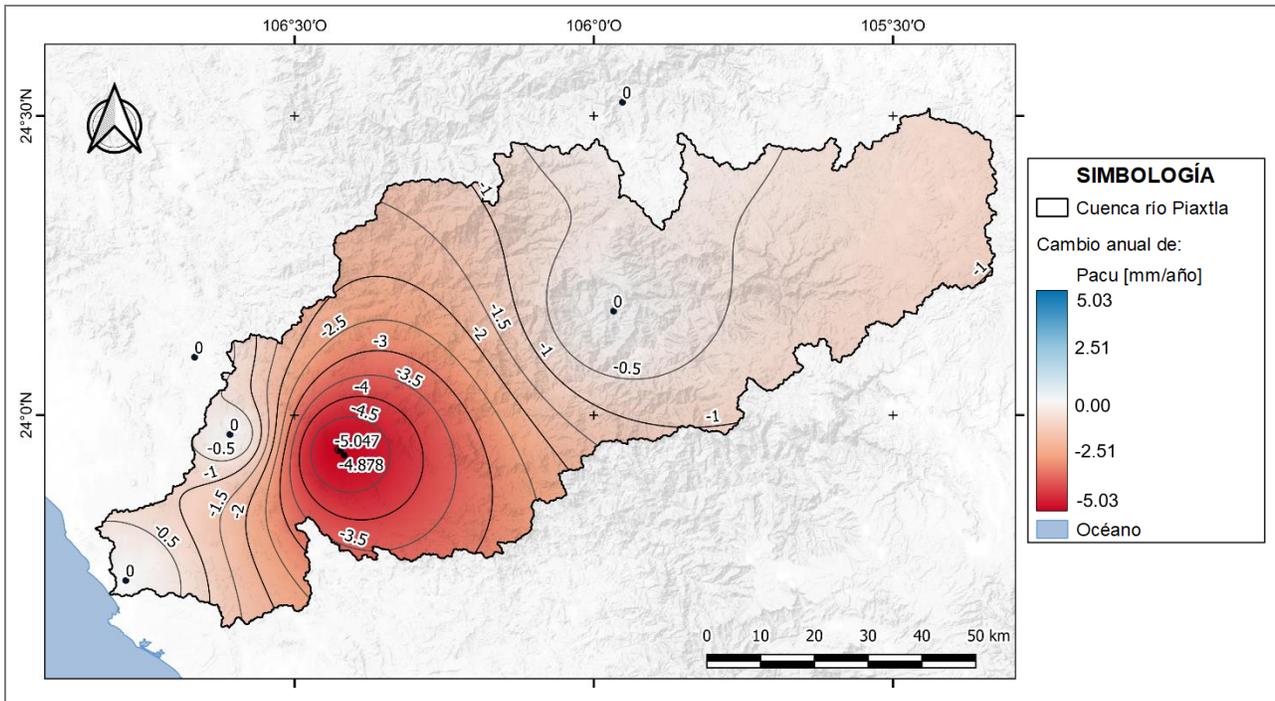


Figura 92. Cambio promedio anual en la cuenca del río Piaxtla: Pacu.

También se puede observar que no es suficiente un cambio significativo, en un mes del año de una estación, para obtener un resultado también significativo en el promedio anual o en el promedio de toda la cuenca. Por ejemplo, en el mes de febrero se ha reducido la precipitación acumulada 4.84 [mm] en la E.C. 25021 en todo el registro, pero la precipitación acumulada anual no presenta evidencia de cambio significativo. De igual forma existe una reducción de la precipitación en la E.C. 25001, pero la precipitación acumulada promedio de la cuenca para el mes de febrero no presenta evidencia de cambio.

En dicho comportamiento, pueden entrar en juego diversas situaciones. La primera, es que las series de valores promedio (anuales y subcuenca Piaxtla-Ixpalino) serán más sensibles a cambios en aquellas estaciones o meses donde la precipitación sea máxima, por ejemplo, en el periodo julio-septiembre. Por ello es importante realizar análisis de series de tiempo mensuales, si bien el valor anual de un indicador no cambia, la forma en la que llueve en la cuenca en el espacio y en el tiempo sí lo hace.

También es esperable que las estaciones con mayor área de influencia tengan un mayor impacto que aquellas que no. Esto sucede pero no directamente, con las estaciones climatológicas 10042 (45.5 %), 25084 (9.8 %) y 25118 (13.4 %), especialmente de la zona centro, este y sureste. Existe cambio significativo en la P_{acu} del mes de septiembre en las EE.CC. 25084 y 25118, sin embargo, en los valores medios de septiembre de la cuenca Piaxtla-Ixpalino no. De tal forma que una mayor área de aportación no necesariamente impacta más en los valores promedio de la cuenca completa.

Finalmente, es posible que cambios crecientes y decrecientes se cancelen entre sí, toda vez que se realiza un promedio, sin embargo, este efecto no se observó de forma tan evidente. En la E.C. 10042 existe un decrecimiento de P_{acu} en los meses de abril y diciembre y, una tendencia creciente en los meses de julio y agosto. Numéricamente no son comparables, el aumento en los meses de julio-agosto es mucho mayor al

observado en los otros, principalmente por tratarse de los dos meses más lluviosos del año. Sin embargo, al momento de realizar el indicador anual, no existe evidencia de cambio significativo.

Considerando todo lo anterior se puede afirmar que el cambio de la precipitación en la cuenca es, en general, decreciente pero ocurre de forma heterogénea. Aunque también, se puede definir el periodo de tendencia decreciente de la precipitación en los meses de diciembre-enero. El cambio es más heterogéneo en P_{acu} , P_{max} , NWD y $SDII$ que en CDD , donde el cambio ocurre muy claramente en la zona de la E.C. 10042 y en dos periodos: octubre-febrero y abril-junio.

4.2.3. Caudal

El caudal es la variable que menos evidencia de cambio presenta. Con el análisis del registro de la E.H. 10111 se pudo haber concluido que no existe evidencia de cambio, sin embargo, con 5 años adicionales a partir del registro de la estación hidrométrica 10065 ubicada aguas abajo, se pudo determinar que sí existe un cambio en el caudal en 4 meses del año: periodo abril-junio y en el mes de noviembre, presentando evidencia de tendencia creciente significativa, con excepción del mes de abril donde la tendencia es decreciente y también, se puede incluir el mes de enero, con tendencia decreciente, considerando los datos de la E.H. 10111. El único indicador en no presentar evidencia de cambio alguna, en los 12 meses del año, en el valor anual y para ambas estaciones fue el número de días que el caudal supera el valor promedio Q_{AA} . El gasto máximo Q_{max} sólo presenta evidencia de cambio creciente en el mes de mayo y noviembre.

Lo anterior contrasta con los resultados de precipitación, pues en el mes de noviembre, la lluvia se ha mantenido prácticamente sin cambio en todas las estaciones. Lo mismo ocurre con el periodo abril-mayo, donde el poco cambio que ocurre es en realidad decreciente. Es importante considerar que el periodo de análisis de la precipitación corresponde a 1961-2017 y el de caudal 1953-2009, es decir, no es una comparación directa. Adicionalmente, debería considerarse la variación del tipo y uso de suelo y la vegetación a lo largo del tiempo, a pesar de que según el INEGI (2010), estos factores también se han mantenido casi invariantes en el tiempo.

Por otra parte, el registro de caudales anuales de la E.H. 10065, 18 años se pueden clasificar como húmedos, 23 como secos y 16 como años normales (Figura 93); los límites superior e inferior corresponden a: $\bar{X} \pm 0.5\sigma$. En este lapso se reconocen 7 periodos secos de al menos dos años: destacan los periodos 1953-1957, y 1994-1999; en esta última, de no ser por los años 1997 (normal) y 2000 (húmedo), la sequía hubiera durado 9 años. La CONAGUA identifica también un periodo seco en la década de 1970 entre 1973 y 1979, periodo en el cual el caudal presentaba una tendencia decreciente hasta terminar en dos años secos. En la década de 1980 la frecuencia de años húmedos aumenta intercalándose con años secos y normales.

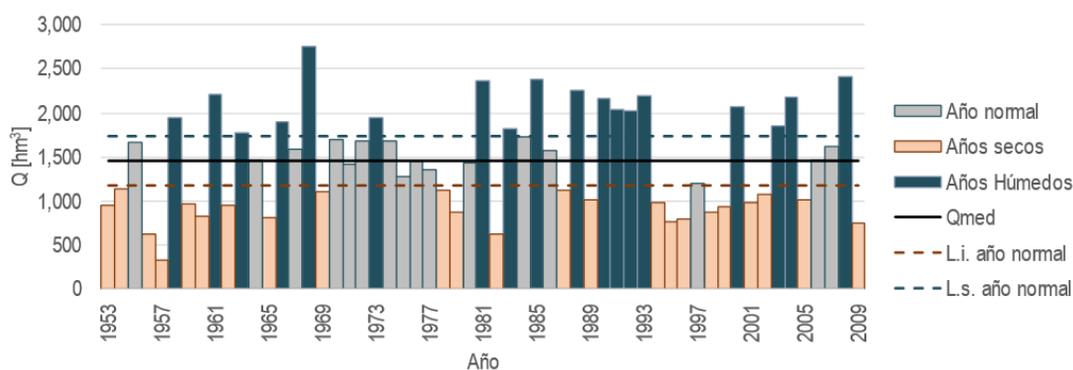


Figura 93. Años secos y húmedos según el caudal acumulado anual E.H. 10065.

Debido a que las estaciones hidrométricas no se encuentran lo suficientemente alejadas entre sí, no se puede interpretar el caudal como el correspondiente a una zona en particular (ej. zona alta, zona baja).

Tanto los resultados de las pruebas de Pettitt, Mann-Kendall y la tasa de cambio anual, coinciden en que existe una tendencia creciente del caudal del río en la E.H. 10065. Contrasta con lo observado aguas arriba en la E.H. 10111, donde no se identificó tendencia significativa. Al ser ésta última una serie de tiempo más reciente (1958-2009) es posible que, cualquier tendencia creciente que existiese en el periodo original de registro de la E.H. 10065: 1953-1999 se haya contrarrestado.

4.2.4. Escenarios RCP

Una forma más apropiada de hacer la estimación de tendencias es comparar el cambio promedio anual que se encontró en la cuenca con lo que se deriva de las estimaciones del IMTA (2015) según cada escenario de cambio climático (Anexo 1- 9 al Anexo 1- 13). El IMTA (2015) realizó escenarios para dos periodos del año: primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI). La lluvia en el país se debe principalmente a huracanes y a frentes fríos y no coinciden con las estaciones del año. Sin embargo, para realizar la comparación (Tabla 56 y Tabla 57) se determinaron los valores medios de los periodos PV y OI de la tasa de cambio de precipitación y temperatura (Tabla 50 hasta la Tabla 49). El periodo PV se consideró como abril-septiembre y, OI como octubre-marzo.

Tabla 56. Resultados de cambio: Pacu anual y escenarios de cambio climático según el IMTA (2015).

Periodo	RCP6.0**	RCP 8.5**	Piaxtla-Ixpalino*	E.C. 10031*	E.C. 10042*
	P [%/año]	P [%/año]	P [%/año]	P [%/año]	P [%/año]
PV	-0.44	-0.38	0.00	-0.15	0.35
OI	-0.42	-0.42	-0.62	-0.43	-0.71
Periodo	E.C. 25001*	E.C. 25021*	E.C. 25045*	E.C. 25084***	E.C. 25118***
	P [%/año]	P [%/año]	P [%/año]	P [%/año]	P [%/año]
PV	0.00	0.00	0.03	-0.50	-0.40
OI	-0.38	0.06	-0.65	0.00	0.00

Tabla 57. Resultados de cambio: Tmax y Tmin anual y escenarios de cambio climático según el IMTA (2015).

Periodo	RCP6.0**	RCP 8.5**	Piaxtla-Ixpalino*	E.C. 10031*	E.C. 10042*
	T _{max} [°C/año]				
PV	0.06	0.07	0.02	0.01	0.04
OI	0.05	0.07	0.04	0.01	0.07
Periodo	E.C. 25001*	E.C. 25021*	E.C. 25045*	E.C. 25084***	E.C. 25118***
	T _{max} [°C/año]				
PV	-0.01	0.03	0.04	0.03	0.03
OI	0.00	0.04	0.06	-0.09	-0.01
Periodo	RCP6.0**	RCP 8.5**	Piaxtla-Ixpalino*	E.C. 10031*	E.C. 10042*
	T _{min} [°C/año]				
PV	0.05	0.05	0.02	0.04	0.03
OI	0.04	0.04	0.02	0.01	0.05
Periodo	E.C. 25001*	E.C. 25021*	E.C. 25045*	E.C. 25084***	E.C. 25118***
	T _{min} [°C/año]				
PV	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02
OI	0.00	0.00	0.00	-0.03	-0.04

*1961-2017 **2015-2039 ***1961-2005

En la cuenca del río Piaxtla se encuentran variaciones anuales de la precipitación acumulada desde -0.62 [%/año] y hasta 0.35 [%/año], respecto a su media. En contraste, en los dos escenarios de cambio climático del IMTA RCP6.0 y RCP8.5 la precipitación decrece en un rango entre -0.38 y -0.44 [%/año]. Con excepción del valor promedio de la cuenca y, de las EE.CC. 10031, 10042 y 25045, el cambio anual de la precipitación es menor al esperado en ambos escenarios RCP en el periodo OI. En el caso del periodo PV, sólo la E.C. 25084 supera el cambio según el IMTA y, en contraste, las EE.CC. 10042 y 25045 presentan una tendencia creciente de la precipitación, contrario a los escenarios RCP. De tal forma que, existen zonas donde el cambio es mayor al estimado en los escenarios de cambio climático para el país, siendo el RCP 8.5 el más desfavorable. Esto ocurre en la temporada OI y en la zona montañosa.

En la temperatura, también son más las estaciones donde el cambio observado tanto en PV como en OI es menor al estimado en los escenarios RCP. Nuevamente se superan estos en la E.C. 10042 y contrasta la E.C. 25084 con una tendencia contraria a la esperada (decreciente).

La E.C. 10042 tiende a superar o estar más cerca del escenario de cambio climático más desfavorable (RCP8.5). Las otras estaciones, incluido el promedio para toda la cuenca, presentan valores menores al RCP6.0. Se observan algunas tendencias en la temperatura que no corresponden con lo esperado según los escenarios RCP, es decir, la tendencia que se ha observado es contraria. Por ejemplo, las tendencias decrecientes de la temperatura en las estaciones 25084 y 25118. También, se identificó que la zona de costa está experimentando un calentamiento no sólo menor al de la zona montañosa, sino menor al esperado en los escenarios de cambio climático. Esto contrastando con las zonas más altas, donde el cambio observado es mayor, especialmente en la precipitación. Por último, se debe reconocer que para algunos meses, el cambio promedio anual de cada variable es mayor. Es así que, tomando en cuenta todo lo anterior, se podrían esperar

valores de cambio mayores a los estimados en el RCP8.5 en la zona montañosa y, la zona costera (Sinaloa) experimentará un cambio anual menor al escenario RCP6.0 en los periodos PV y OI. Pero más contrastante aún, a nivel mensual el cambio en cada variable climatológica supera bastante a los datos del escenario RCP8.5

4.2.5. Precipitación-temperatura-caudal

La relación observada entre la precipitación-temperatura-caudal no fue tan directa, aunque sí se logró comprobar que es crucial para determinar si el caudal es alto, normal o bajo, especialmente para los periodos de sequía, bajo las siguientes dos combinaciones posibles de precipitación y temperatura:

- En un año seco-año muy cálido se presentará un caudal bajo.
- En un año muy cálido, se presentará un caudal bajo.
- En un año húmedo-año poco cálido, se presentará un caudal alto.

Lo anterior debido al impacto que puede tener la temperatura en la evaporación del agua. Se sabe también, que la evapotranspiración en la cuenca es “alta” y se debe a los altos valores de temperatura que se presentan en el día según CONAGUA (2015).

En la Tabla 58 y la Figura 94 se presentan los valores medios de las 3 variables y los valores máximos de temperatura para ilustrar dicha relación. Para ello se utiliza una escala de colores rojo-azul donde: rojo corresponde a la precipitación menor al promedio (año seco) y en azul aquellos años donde es mayor al promedio (año húmedo); similarmente ocurre para el caudal; en el caso de la temperatura el color rojo indica aquellos años muy cálidos (por arriba del promedio); azul en caso contrario.

En general, si la precipitación es superior a su promedio (\bar{P}), también el caudal lo es, similarmente para los años con valores menores al promedio. También, se observa más frecuentemente años de caudal menor al promedio si el valor de $\min(T_{max})$ es mayor a su promedio, lo cual no ocurre si $\max(T_{max})$ supera su valor promedio. Se observa que en las sequías más importantes (décadas de 1970 y 1990) se combinan años con baja precipitación y temperaturas altas y, que desde inicios del siglo XXI, casi todos los años presentan la combinación más desfavorable de temperatura.

Tabla 58. Precipitación-temperatura y caudal promedio anuales de la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

Año	V _{Pacu}	T _{max} (med)	Max(T _{max})	Min(T _{max})	Q _{acu}	Año	V _{Pacu}	T _{max} (med)	Max(T _{max})	Min(T _{max})	Q _{acu}
	[hm ³]	[°C]	[°C]	[°C]	[hm ³]		[hm ³]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1953					951	1991	5,453	24.5	31.4	16.9	2,034
1954					1,146	1992	7,004	24.8	32.6	14.4	2,018
1955					1,669	1993	6,012	26.0	32.4	18.2	2,200
1956					632	1994	5,607	26.3	31.7	18.0	987
1957					331	1995	4,186	26.7	31.7	18.4	772
1958					1,943	1996	4,132	26.9	32.0	18.3	802
1959					975	1997	7,209	24.5	31.8	13.9	1,202
1960					827	1998	4,687	25.0	31.5	15.5	876
1961	7,035	26.2	32.2	15.5	2,208	1999	5,046	25.3	31.9	17.4	936
1962	5,170	25.6	32.2	14.2	949	2000	6,299	25.5	34.2	16.3	2,066
1963	7,920	24.9	31.4	13.4	1,783	2001	4,944	25.4	32.0	17.9	992
1964	6,308	24.4	31.6	15.8	1,472	2002	5,284	26.4	33.8	16.6	1,079
1965	5,829	25.0	31.5	12.9	816	2003	6,112	26.4	35.7	18.3	1,849
1966	5,764	25.0	32.9	10.0	1,907	2004	7,953	25.3	33.6	15.4	2,177
1967	6,151	25.4	33.8	11.3	1,598	2005	5,703	26.8	34.6	17.6	1,021
1968	8,594	24.4	32.3	13.1	2,754	2006	8,067	26.7	33.8	16.3	1,473
1969	5,376	25.1	32.6	12.5	1,102	2007	7,065	25.7	31.2	15.8	1,624
1970	6,248	25.5	32.4	13.2	1,699	2008	6,377	26.2	32.5	16.2	2,410
1971	5,308	26.0	33.7	13.8	1,414	2009	6,982	26.2	31.6	14.0	747
1972	7,992	25.9	33.3	16.0	1,678	2010	7,610	25.9	30.9	17.8	
1973	6,347	25.6	33.2	14.3	1,954	2011	3,314	25.6	33.6	17.3	
1974	6,834	25.9	32.9	13.0	1,684	2012	6,759	26.8	33.2	17.7	
1975	5,202	25.9	32.9	15.4	1,287	2013	5,158	26.1	32.9	17.7	
1976	7,707	25.4	33.0	14.6	1,454	2014	6,862	26.4	33.4	19.5	
1977	5,549	26.0	31.7	16.1	1,361	2015	7,336	26.4	32.1	16.9	
1978	6,026	25.8	33.7	14.4	1,120	2016	7,545	26.4	32.5	15.8	
1979	5,134	26.1	33.2	10.7	871	2017	5,764	26.8	33.4	17.4	
1980	6,891	25.0	35.0	13.2	1,429	Med:	6,267	26	33	15	1,462
1981	8,330	25.0	31.6	15.7	2,362						
1982	5,296	26.7	33.2	12.5	624						
1983	6,554	25.7	33.5	12.4	1,828						
1984	7,123	25.5	33.3	15.4	1,723						
1985	6,619	25.5	32.7	13.7	2,380						
1986	6,274	26.5	32.2	13.8	1,570						
1987	5,572	25.6	32.0	15.8	1,131						
1988	5,448	25.9	31.6	15.9	2,255						
1989	7,158	25.8	32.6	16.1	1,009						
1990	7,010	25.6	32.0	16.1	2,166						

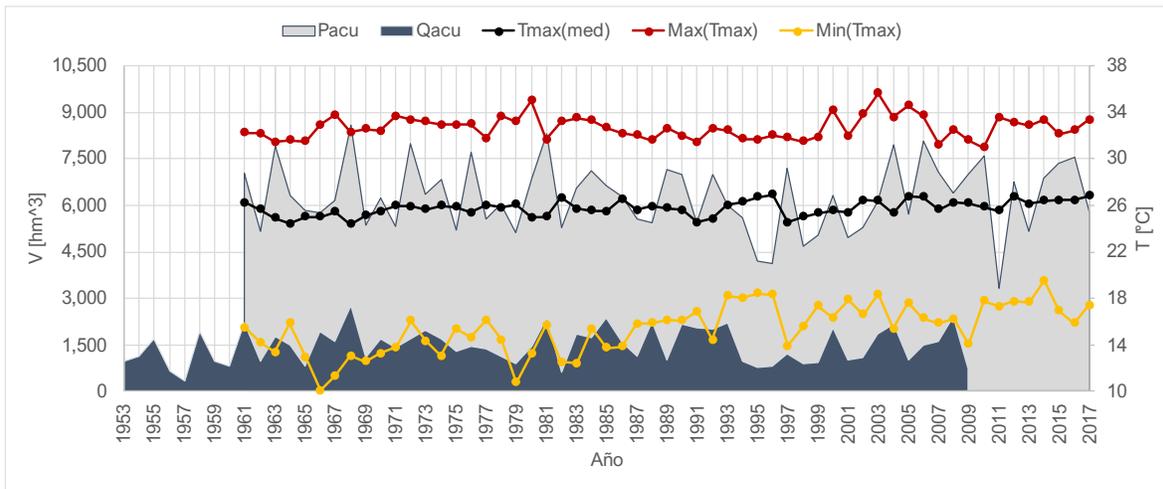


Figura 94. P, T y Q promedios anuales de la cuenca Piaxtla-Ixpalino (1961-2009).

Basándose en esto, es posible describir cómo serían los valores de temperatura y precipitación entre 1953 y 1961 y los de caudal entre 2010 y 2017, es decir, fuera de su periodo de registro. Esto es: en función de los valores bajos del caudal en los primeros años del registro, es esperable que los valores de $\min(T_{max})$ sean mayores al promedio y posiblemente también los de la precipitación, entre 1953 y 1961. Por su parte, dados los valores altos de $\min(T_{max})$ a partir de 2009, se esperarían valores de caudal en el río menores al promedio, aunque no a nivel de la sequía de la década de 1990, pues la precipitación no es tan baja.

4.2.6. Usos del agua-caudal

Con el análisis de la información se determinó que el uso y consumo de agua en la cuenca es bajo, en comparación con el escurrimiento ($27.3 [hm^3]$ en la subcuenca *Piaxtla-Ixpalino* y $38.6 [hm^3]$ en la cuenca hasta el mar). El agua se destina principalmente a la agricultura (76%), seguido del consumo urbano (11%) e industrial (2%) (Figura 95). Estas proporciones, son similares a las que estima CONAGUA a nivel nacional. Se identificó también que el municipio que más volumen de agua tiene concesionado es San Ignacio, con $25.2 [hm^3]$ del total, en contraste de los municipios de Durango y Tamazula, los cuales apenas suman $0.03 [hm^3]$ en conjunto.

Tales valores fueron calculados a partir de la información del REPDA por municipios (método de áreas) y por usos (REPDA en San Dimas y San Ignacio). El volumen calculado para la cuenca por municipios resultó de $38.6 [hm^3]$ y, en función del REPDA de los municipios con mayor actividad económica $38.2 [hm^3]$. Al ser similares se considera válida la aplicación de ambos métodos para estimar los usos del agua en la subcuenca y la cuenca completa. Por lo que los volúmenes que se calcularon de extracción de agua de fuentes subterráneas y superficiales también se consideran correctos. Del total del volumen concesionado en la cuenca, $25.5 [hm^3]$ se extraen de fuentes superficiales (río Piaxtla), equivalentes a un 66%. En la subcuenca *Piaxtla-Ixpalino* este volumen asciende a $16.2 [hm^3]$, es decir un 1.06 % del volumen de escurrimiento ($1,527.6 [hm^3]$). Por lo que se considera que no existe un impacto de los usos del agua en el escurrimiento.

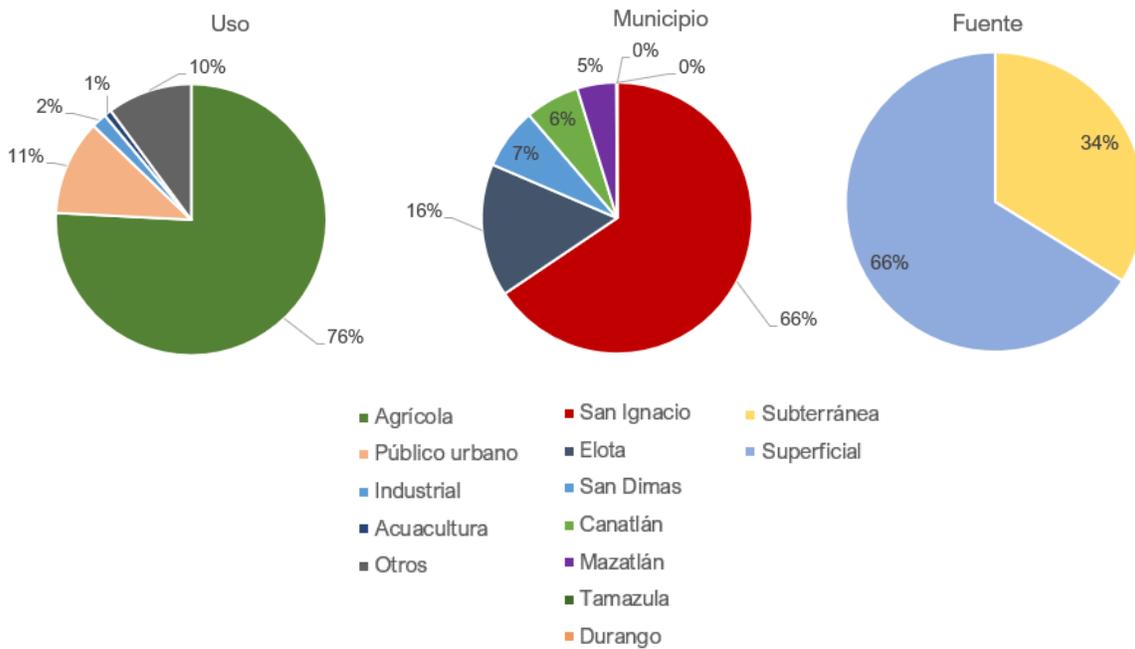


Figura 95. Usos del agua en la cuenca del río Piaxtla por tipo de uso, municipio y fuente.

Un punto a tomar en consideración es la información disponible del REPDA (Tabla 17) para los municipios de San Dimas y San Ignacio, es que se excluyó de la clasificación de usos el de generación de energía eléctrica de *Primero Empresa Minera SA de CV*, pues los volúmenes calculados son similares suponiendo que tal uso no es consuntivo. Cabe mencionar que el análisis del REPDA puede mejorar si se añade la ubicación del titular. Esto permitiría delimitar los usuarios así como identificar las potenciales fuentes de abastecimiento, las cuales tampoco vienen especificadas en el REPDA más allá de las etiquetas “subterráneo” y “superficial”.

Es importante mencionar que, no se puede hacer una comparación tan directa entre el uso de agua agrícola con la serie de tiempo de caudal, pues la gran mayoría del uso de suelo agrícola se encuentra aguas abajo de la E.H. 10065. Sin embargo, es posible que exista un impacto de la agricultura pues la *agricultura de riego* se encuentra prácticamente en las márgenes del río y la agricultura de temporal en el origen de los tributarios (Figura 96). Y por último, si bien la capa de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI es congruente con las imágenes satelitales, esto no es tan cierto para las capas de Distritos y Unidades de Riego, es decir, esta área resulta menor a la que el INEGI identifica como uso agrícola.

La superficie de agricultura de riego y temporal según el USV de INEGI es de 97 y 432 [km^2], respectivamente. En contraste la agricultura de riego (distritos y unidades de riego) del SINA, suman 51.16 [km^2] (Tabla 59).

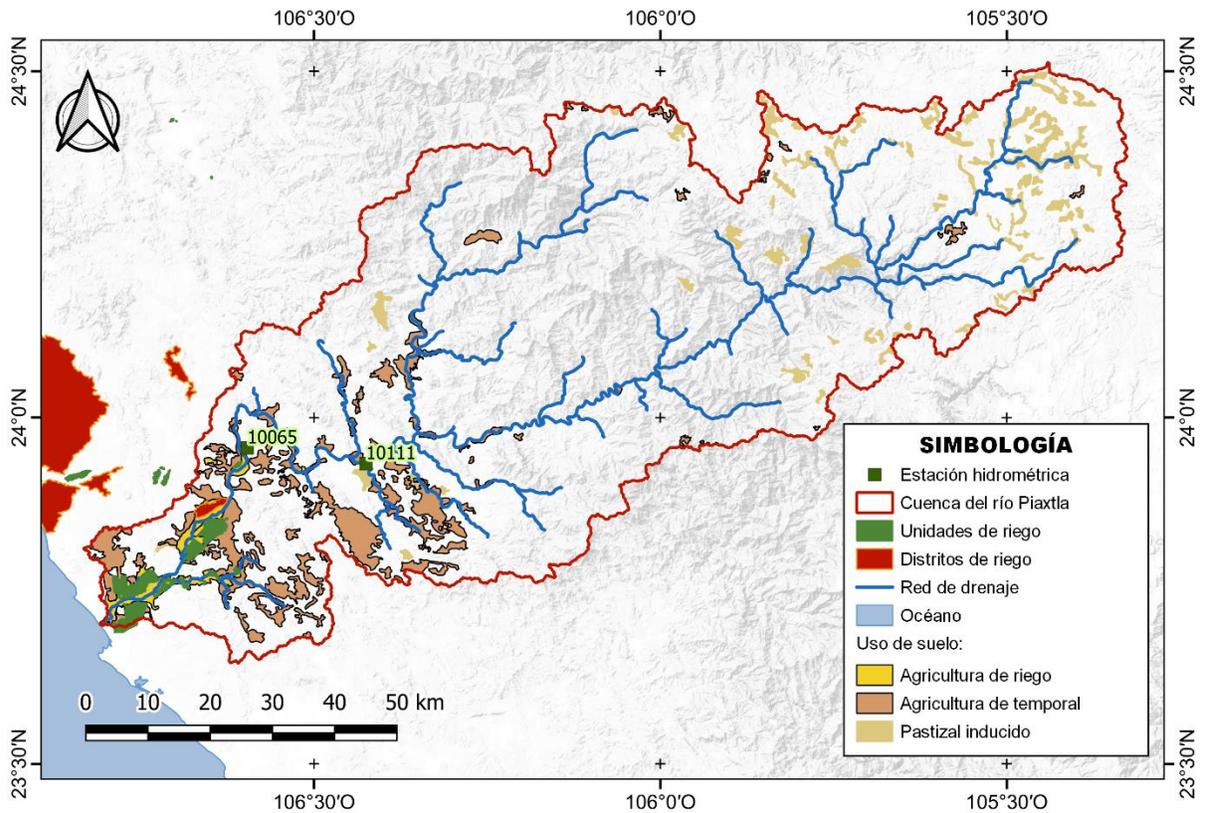


Figura 96. Uso de suelo agrícola en la cuenca.

Tabla 59. Área destinada a la agricultura dentro de la cuenca.

Tipo	A [km ²]
Unidad de riego	44.716
Distrito de riego	6.44
Agricultura de temporal	432
Agricultura de riego	97

Por lo tanto, se puede afirmar que no existe un impacto en las series de tiempo del caudal del río analizadas por parte de la agricultura de temporal, debido a su dependencia del agua de lluvia y, que la agricultura de riego que sí usa el agua del río Piaxtla, se encuentra aguas abajo de ambas estaciones hidrométricas. Sin embargo, no se puede decir lo mismo del caudal que llega al mar, justo por el punto anterior.

Del mismo modo, tampoco existe gran impacto de los otros usos del agua, sean consuntivos o no consuntivos, debido a que la gran parte de las comunidades se encuentran alejadas de los caminos más importantes y seguramente también dependen de la precipitación que reciban directamente.

4.2.7. Elevación-precipitación, temperatura

La relación que puede existir entre la elevación con la temperatura y la precipitación se puede analizar a través de cortes en perfil de la cuenca (Figura 97). Se analizaron 6 cortes distintos, de los cuales 3 tienen como origen el punto de salida de la cuenca y terminan en los puntos más alejados y de mayor cota de la cuenca. Los cortes A-1 (salida-punto más alejado, recorriendo casi todo el cauce principal), A-2 (salida-punto más alto) y A-3 (recorre casi todo el río Verde). Los 3 restantes, se trazan de forma perpendicular a los primeros cortes se identifican como B-B (zona de mayor variación del relieve), C-C y D-D (zona más llana).

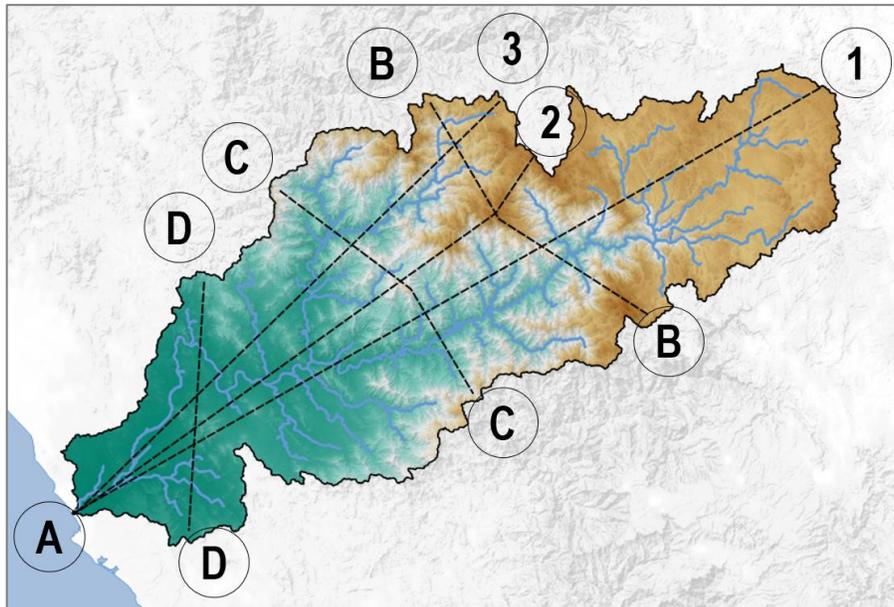


Figura 97. Cortes en perfil para análisis.

Los cortes en perfil de elevación-precipitación-temperatura se obtuvieron de los mapas de elevación, precipitación y temperatura medias calculados con el método de interpolación de Kriging ordinario (Figura 98-Figura 100). De forma general, los perfiles de elevación, precipitación y temperatura indican que la precipitación es menor en la zona costera y aumenta conforme aumenta la elevación del relieve, aunque al alcanzar un valor máximo en las cotas más altas de la cuenca (norte y sur de la parte central), esta disminuye.

Así como el perfil de la precipitación es similar al de la elevación, pero más suave, la temperatura tiene otro comportamiento. La temperatura máxima y mínima presenta la misma variación de la pendiente y ambas, presentan mayores valores en las zonas bajas y próximas a la costa; en las zonas más planas, la temperatura casi no presenta variación. Existe también poca variación de la temperatura en los perfiles perpendiculares al cauce principal (B-B, C-C y D-D), contrastando con la precipitación, pues se puede observar cómo es mayor en las zonas más altas, independientemente de la magnitud de la elevación del relieve.

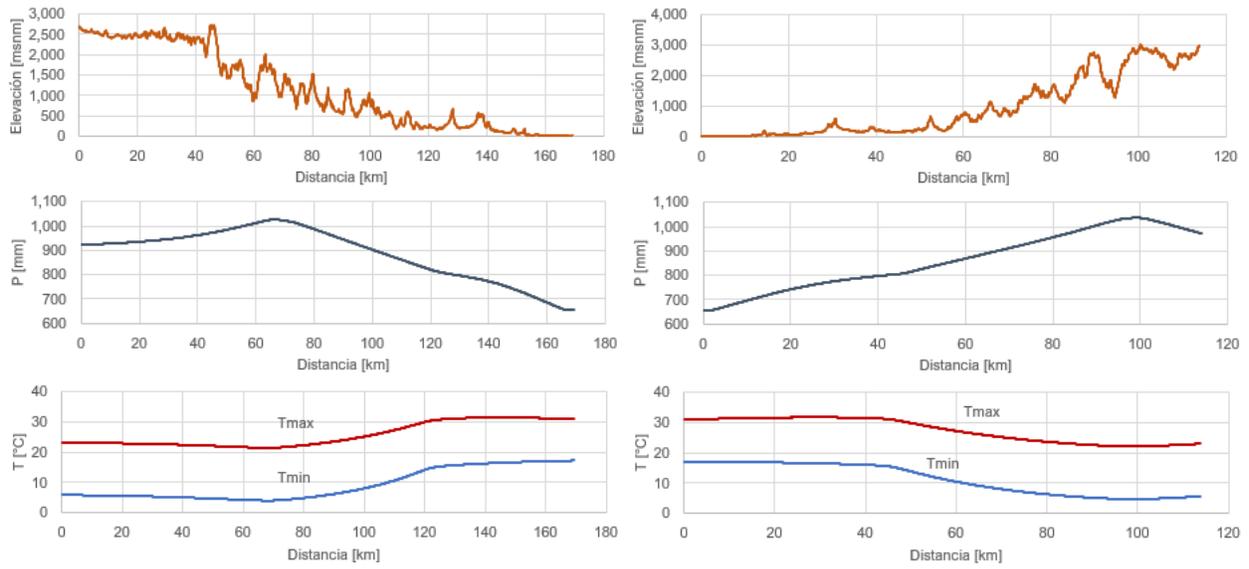


Figura 98. Elevación-precipitación-temperatura: corte A-1 y A-2.

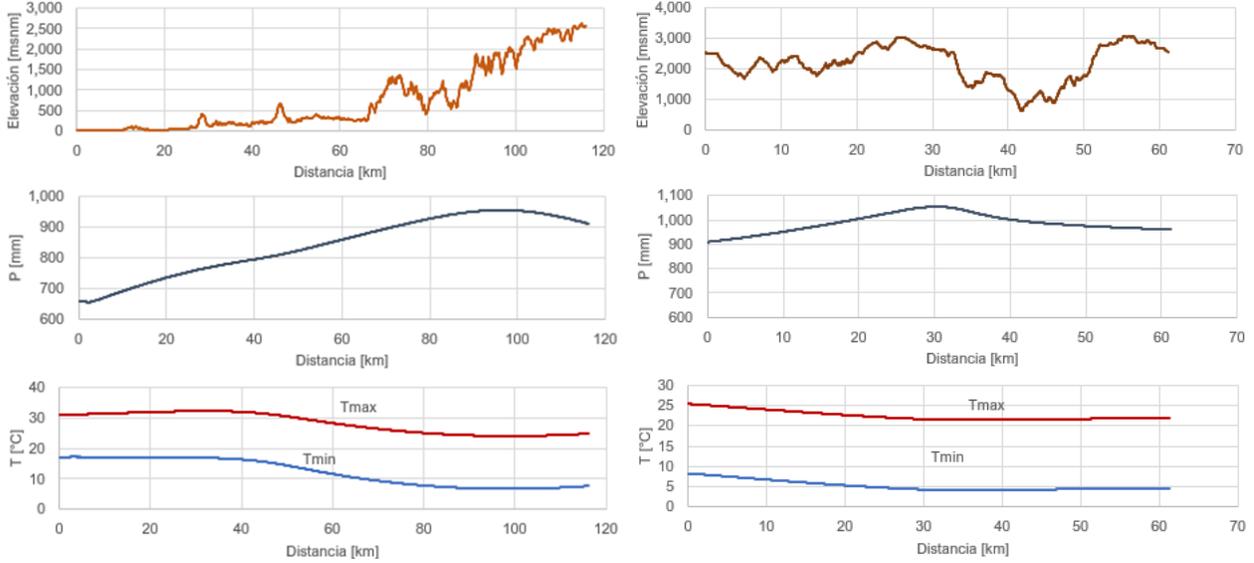


Figura 99. Elevación-precipitación-temperatura: corte A-3 y B-B.

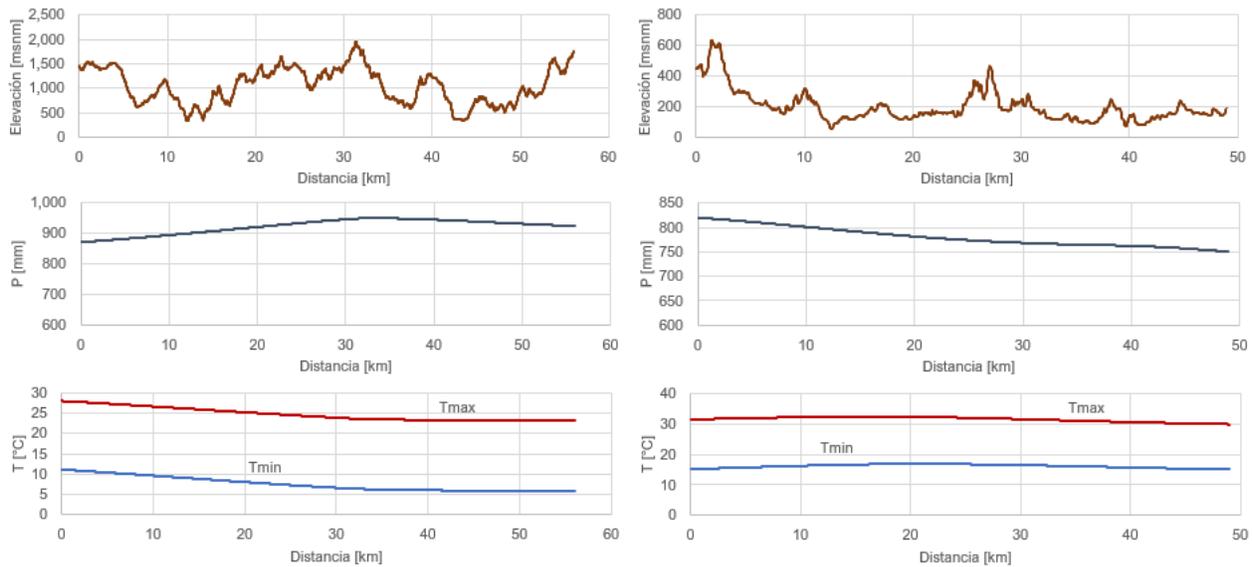


Figura 100. Elevación-precipitación-temperatura: corte C-C y D-D.

Según lo anterior, se confirma una relación directamente proporcional entre la elevación y la precipitación, donde, entre mayor sea la elevación también lo será la precipitación. Respecto a la temperatura, esta relación es inversamente proporcional, es decir, entre mayor sea la elevación menor será la temperatura, ya sea máxima o mínima. Tanto la temperatura como la precipitación (especialmente esta última) disminuyen ligeramente pasando los puntos más altos de la cuenca en dirección al altiplano de Durango.

4.2.8. Uso de suelo y cobertura vegetal

Otro factor importante al analizar la variación del caudal es el uso de suelo y vegetación que, en conjunto con el tipo de suelo, definen la infiltración y el escurrimiento, por lo tanto pueden ser un indicador del uso del agua en la cuenca. Por ejemplo, la superficie de la cuenca correspondiente a la agricultura, o de uso urbano se puede relacionar directamente con un consumo.

El INEGI dispone de información de uso de suelo y vegetación del país desde 1992 hasta 2016, en seis publicaciones. En la Tabla 60 se muestra una clasificación modificada a partir de la información original de la serie I (1992) y la serie VI (2016 y la más reciente), englobando en un mismo concepto distintas clasificaciones que, para fines hidrológicos son similares. Por ejemplo, bosque de pino-encino y bosque de encino-pino.

Tabla 60. Áreas del uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Piaxtla. INEGI (1992, 2015)

Descripción	Área [km ²]	
	USV SI	USV SVI
Bosque (pino, encino, ayarín)	4,220	4,201
Selva (baja, mediana)	2,148	2,034
Pastizal (inducido)	157	185
Agricultura de riego	34	97
Agricultura de temporal	357	432
Urbano		4
Vegetación en galería, halófila y tular	29	
Sin especificar	6	
Sin vegetación		1
Suma:	6,952	6,955

Se observa una disminución de zonas de bosque o matorral en 166 [km²], las cuales se transformaron en pastizal inducido, agricultura de temporal, ganadería intensiva e incendios forestales. Las superficies correspondientes a pastizal inducido, agricultura y urbano, dedicadas a actividades económicas y de vivienda aumentó, pasando de un total de 548 [km²] a 714 [km²].

4.3. Comparación con investigaciones en México

En el apartado 1.6.4. *Estudios en México*, se mencionaron los hallazgos de algunas investigaciones de cambio climático en el país. Algunas encuentran evidencia de cambio climático en el registro de la temperatura y precipitación como en este trabajo. Otras, hacen proyecciones o escenarios, generalmente para fines del siglo XXI y, las más completas, toman en cuenta factores económicos y sociales. Todas las publicaciones coinciden en que el país registra y experimentará en las próximas décadas un aumento de la temperatura (especialmente de la máxima) que puede superar al promedio global. La precipitación tenderá a disminuir, pero no es claro el impacto que puedan tener la ENSO y las tormentas tropicales, las cuales si bien se espera que aumenten en su intensidad, podrían cambiar su trayectoria y disminuir su paso por el país. También, se ha identificado que la zona comprendida entre las cadenas montañosas del país (el Altiplano, la cuenca de México, etc.) será la que experimente el mayor aumento de la temperatura y la mayor disminución de la precipitación.

Es por ello que los resultados obtenidos se comparan con los resultados en la península de Baja California (Martínez y Jano, 2011), la cual además de ser la más cercana a la cuenca del río Piaxtla, se encuentra también dentro de la zona de estudio, el golfo de California, a pesar de que la diferencia de temperatura de las aguas del golfo con el océano hace que la península sea más seca y cálida que la zona continental. Después, se hace una comparación con los hallazgos en el Nevado de Toluca (Soto *et al*, 2019) zona que se clasifica como de alta montaña. Finalmente se comparan con las proyecciones de cambio climático para el país (IMTA, 2015).

4.3.1. Península de Baja California

En la cuenca del río Piaxtla, al igual que los resultados en la península de Baja California, el cambio significativo de la temperatura es de mayor magnitud en la temperatura máxima. Adicionalmente, se encontró que los valores mínimos de la temperatura máxima suelen presentar una tendencia creciente significativa mayor que las correspondientes para el mismo periodo y estación de los valores máximos. Resulta interesante

el encontrar meses del año donde la tendencia es decreciente y significativa, lo cual no se encontró en la península (Martínez y Jano, 2021).

Martínez y Jano (2021) concluyeron que si sólo se analiza la temperatura promedio se puede obtener una perspectiva incorrecta del calentamiento. En este trabajo, esto se observa en las series de tiempo de la cuenca *Piaxtla-Ixpalino*, las cuales presentan tendencia significativa menor con respecto a las series de cada estación.

En la cuenca del río Piaxtla como en los resultados de Martínez y Jano (2021) se ha encontrado que el calentamiento observado es consistente con el escenario RCP8.5, esto basado en la magnitud del cambio anual o por década. Sin embargo, en ambos trabajos se encuentran valores mensuales que superan de forma importante los valores promedio por temporada del RCP8.5.

Adicionalmente, en la cuenca del río Piaxtla no se puede identificar propiamente una zona donde no exista cambio significativo de la temperatura máxima o mínima. Suele ser mayor en la zona montañosa pero propiamente todas las estaciones muestran evidencia de cambio significativo en algún indicador y, durante gran parte del año. Tampoco se encontró un cambio tan importante en la precipitación como sí sucede en la temperatura, sin embargo, el cómo interactúen en el futuro estas dos variables será determinante para el uso y aprovechamiento del agua en la región.

4.3.2. Nevado de Toluca

A diferencia de la zona del golfo de California, el Nevado de Toluca tiene diferencias más claras con la cuenca del río Piaxtla. La primera, es que se trata de un clima de alta montaña (Soto *et al*, 2020), sin embargo, al igual que la cuenca del río Piaxtla presenta temperaturas mínimas inferiores a 0 [°C]. En el país, la variación de la temperatura a lo largo del día y del año puede ser bastante grande. Las características del relieve y/o la falta de humedad generan estas variaciones, a pesar de que por latitud, al país le correspondería un clima más parecido a la zona costera del río Piaxtla.

Soto *et al* (2020) analizaron tendencias de cambio de la precipitación, temperatura máxima y mínima en la estación climatológica del Nevado de Toluca así como también la influencia del ENSO. En la cuenca del río Piaxtla como en el Nevado de Toluca, se encuentran tendencias de cambio, pero no todas son significativas. En la cuenca del río Piaxtla existe un calentamiento en la zona pero ello no implicará en el futuro el registro de récords de temperatura máxima.

4.4. Escenarios Futuros

La tendencia que presentan las variables climatológicas también se puede estimar a partir de curvas de ajuste. De esta forma se encontró que a nivel cuenca o anual no hay cambio significativo en alguna variable, pero sí lo hay mensualmente y/o para una estación en particular.

4.4.1. Ajuste lineal

Inicialmente se ajustó una recta a las series de tiempo anuales (P_{acu} , $\max(T_{max})$, $\min(T_{max})$, $\max(T_{min})$, $\min(T_{min})$ y Q_{acu}) a nivel de cuenca Figura 101 y Figura 102, posteriormente se obtuvo el valor de cada variable para los años 2035 (corto plazo), 2050 (mediano plazo) y 2099 (largo plazo) (Tabla 61).

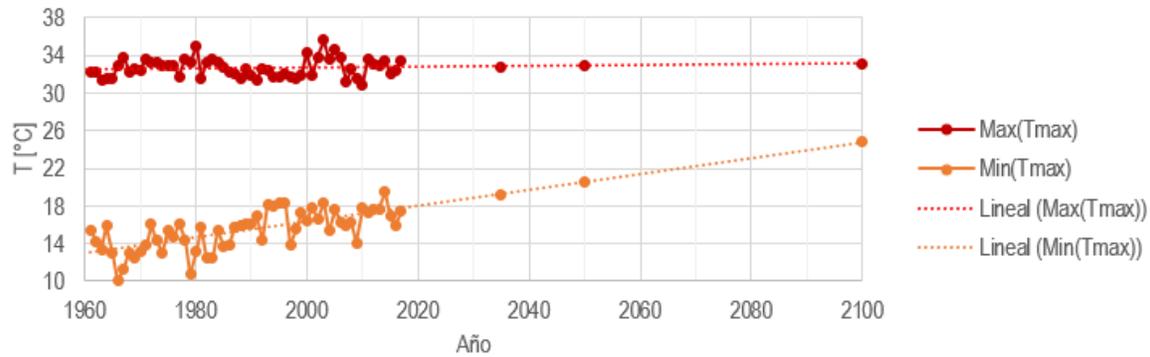


Figura 101. Pronóstico de Tmax en la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

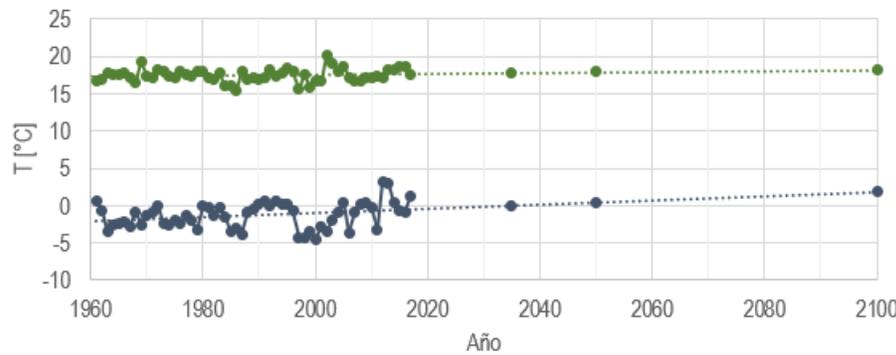


Figura 102. Pronóstico de Tmin en la cuenca Piaxtla-Ixpalino.

En la Figura 101 se nota una gran diferencia de la pendiente de la curva de ajuste entre ambos indicadores de $\min(T_{max})$ es decir, $\min(T_{max})$ crece a un ritmo mucho mayor que $\max(T_{max})$. Algo similar sucede con la temperatura mínima (Figura 102), donde $\min(T_{min})$ presenta un crecimiento mayor que el que presenta $\max(T_{min})$. De tal forma que, a partir de los datos analizados, si se hubiera realizado un análisis de tendencias de los valores medios de T_{max} y T_{min} , seguramente se hubiera encontrado evidencia de cambio significativo, sin embargo, no se estaría identificando este comportamiento entre valores máximos y mínimos.

Tabla 61. Estimación a largo plazo de las variables climatológicas.

Año	Q_{acu}	P_{acu}	$\text{Max}(T_{max})$	$\text{Min}(T_{max})$	$\text{Max}(T_{min})$	$\text{Min}(T_{min})$
	[hm^3]	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
2035	1643	984	32.8	19.2	17.8	0.1
2050	1693	975	32.9	20.5	17.9	0.5
2100	1861	945	33.1	24.8	18.2	1.9

A partir de los resultados obtenidos (Tabla 61), la temperatura en la cuenca presentará menos variación (DTR) conforme pase el tiempo (diferencia entre valores máximos y mínimos). No se esperan nuevos valores máximos de la temperatura máxima mayores a los registrados como sí se espera de sus valores mínimos. Es decir, el comportamiento de la temperatura máxima a lo largo del año tendrá menor variación: es esperable que la diferencia entre máximos y mínimos se reduzca a 8.3 [°C] para fines de siglo (en el 2017 la diferencia fue de 14.9 [°C]). En el caso de la temperatura mínima, esta diferencia es menor, pasando de 18.1 [°C] en 2017 a 16.3 [°C] en 2100. En ambos casos, el cambio está dado por una tendencia creciente de los valores

mínimos anuales y mensuales y, que los valores máximos correspondientes no presentarán tendencia. El cambio descrito ocurre prácticamente en toda la cuenca, pero es más marcado en las estaciones de la zona montañosa. Por lo que esta seguirá presentando un clima frío pero para fines de siglo ya no se esperan temperaturas menores a 0 [°C] y, en el caso de la temperatura máxima ya no se registrarán con tanta frecuencia valores menores que 22 [°C]. Por su parte, el caudal presenta una tendencia creciente a pesar de no presentar evidencia de cambio significativo y, que en los últimos años de registro son más frecuentes los años secos que los años húmedos.

4.5. Balance hídrico

Del cálculo del balance hídrico se logró apreciar que no existe variación importante respecto a los dos periodos de tiempo analizados: 1961-2009 y registro completo (Tabla 62). Por lo que con fines de análisis es correcto usar cualquiera de estos.

La evapotranspiración se realizó mediante una simplificación del método de Turc, que está en función de la precipitación y la temperatura. Sin embargo, la expresión original considera la humedad relativa y radiación incidente, variables que no se encuentran dentro del registro de las estaciones climatológicas de análisis y, cuya obtención sale del alcance de este trabajo. Por su parte, para el cálculo de la infiltración se consideró correcto sólo utilizar el calculado por el método del coeficiente de escurrimiento (con datos medidos), pues permite obtener valores congruentes en el balance hídrico.

Respecto a los valores de la cuenca completa, destaca cómo no aumentan de manera proporcional al área, principalmente la precipitación y la infiltración y, es la evapotranspiración la variable que más aumenta. Esto puede explicarse debido a que en las zonas bajas de la cuenca la temperatura es mayor y la precipitación menor, por lo tanto, ETR aumentará de forma importante mientras la precipitación no (y con ello la infiltración).

Tabla 62. Balance hídrico de la cuenca Piaxtla-Ixpalino (valores calculados y medidos).

Cuenca	Periodo	Medidos		Calculados			
		P	Q	Pe	ETR	I	ΔS
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Piaxtla-Ixpalino	1961-2009	1,010.5	243.9	194.0	716.2	73.1	4.4
	Registro completo	1,011.2	233.3	192.2	719.3	72.4	4.4
Piaxtla*	Registro completo	981.5	237.3	235.9	660.3	67.3	5.5

*Q_{Piaxtla} es valor calculado.

De tal forma que, hasta el año 2009, se puede decir que existe disponibilidad de agua suficiente para las actividades económicas en la cuenca y, seguramente también para el año 2017. Sin embargo, no es posible garantizar lo mismo para el futuro. En los años 2035, 2050 y 2100, existe disponibilidad de agua en la cuenca, sin embargo, el volumen total disminuye de forma importante, más por el aumento de la evapotranspiración que por una disminución de la precipitación. (Tabla 63). A su vez, se reconoce que es posible realizar un análisis mediante las pruebas de Pettitt y Mann-Kendall a la evapotranspiración anual para confirmar esta tendencia y se recomienda bajo la aplicación de un modelo más detallado.

La tendencia creciente del caudal calculada a partir de un ajuste lineal debe considerarse con reservas, pues ante las tendencias identificadas de las variables anteriores y, que los años de caudal menor al promedio se relacionan con años donde $minT_{max}$ es mayor al promedio, debería observarse una tendencia decreciente del caudal del río. Por esto mismo se decidió calcular la precipitación efectiva en los años 2035, 2050 y 2100 a partir de NC.

No se descarta que, si se tuviese información del caudal hasta el año 2017 se podría encontrar evidencia de tendencia decreciente, no necesariamente significativa. A su vez, al tratarse de un río de corriente perenne deben existir aportaciones subterráneas importantes, no consideradas hasta el momento y pueden ser responsables de mitigar, hasta cierto punto, algunos de los años secos.

En la cuenca del río Piaxtla se identificó que la población ha disminuido en los últimos 20 años, por lo que es posible que en las próximas décadas no exista un aumento en la demanda de agua tan significativo. Es decir, el cambio climático es suficiente para disminuir la disponibilidad de agua de las fuentes subterráneas y superficiales pero, el desarrollo económico de la región también es determinante, pues es esperable que en zonas con más desarrollo, la demanda de agua altere completamente el volumen de escurrimiento e infiltración.

Tabla 63. Estimación del balance hídrico para los años 2035, 2050 y 2100.

Año	P [mm]	Pe [mm]	ETR [mm]	ΔS [mm]	I [mm]
2035	983.9	161.6	721.6	4.4	96
2050	975.1	146.0	730.3	4.4	94
2100	945.4	98.9	755.1	4.4	87

Se recomienda que el cálculo de las pérdidas de precipitación se mejore, para obtener valores de evapotranspiración e infiltración más congruentes con el volumen de precipitación. También se puede estimar la tendencia de los usos del agua en función de los datos del REPDA y los censos de población y vivienda. Es importante mencionar que, dado que el calentamiento global no se detendrá por los próximos siglos, la tendencia creciente de las pérdidas por evapotranspiración son un fenómeno inevitable y, por tanto, el país experimentará una disminución de la disponibilidad del agua de importancia e irreversible y, es posible que los valores de disponibilidad que se tenían antes de los años pre-industriales no se volverán a presentar hasta que el cambio climático se revierta naturalmente.

Por lo tanto, para garantizar el desarrollo económico en la región, es necesario tomar en cuenta que el volumen de agua disponible puede disminuir hacia finales de siglo, pero esto puede ser especialmente más necesario en municipios del norte del país donde las actividades económicas o la población son mayores, como en Nuevo León. También se puede decir que, al coincidir las tendencias en la zona de estudio con las que se presentan en otras regiones del país, se confirma que el país experimenta variaciones climáticas congruentes con los escenarios radiativos del IMTA, con mayor impacto en la zona norte pues, se presenta la combinación de precipitación-temperatura más desfavorable, originando una evapotranspiración alta.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron las tendencias espacio-temporales de la precipitación, temperatura y caudal de la cuenca del río Piaxtla, desde 1953 hasta 2017, así como algunos indicadores hidrológicos adicionales. Se encontró evidencia de cambio climático, basándose en las tendencias que presentan las 3 variables, así como que el cambio sucede de forma muy heterogénea.

En primer lugar, existe evidencia de un aumento significativo de los valores mínimos de la temperatura máxima. Esto implica un calentamiento en la cuenca pero que no se relacionará con el registro de nuevos valores máximos de la temperatura máxima, pues estos no presentan una tendencia creciente en los valores máximos. Sin embargo, los valores mínimos sí presentan una tendencia creciente más importante. En contraste, la temperatura mínima no presenta tendencia de cambio significativa tan marcada, aunque existen meses del año de ciertas regiones de la cuenca donde sí existe un cambio, ya sea creciente o decreciente, pero de magnitud menor al que sucede en la temperatura máxima. El aumento ocurre en toda la cuenca pero es mayor en la zona alta y montañosa de la cuenca, que en las zonas más bajas y próximas a la costa. Esto también se manifiesta en la variación diaria de la temperatura, pues cada vez existe más diferencia entre la temperatura máxima y mínima diarias.

En cuanto a la precipitación, existe evidencia de una disminución en el volumen anual en la temporada otoño-invierno, especialmente en el mes de diciembre, así como en la zona montañosa. Este cambio se asocia más a una disminución del volumen de precipitación que la disminución de días húmedos o aumento de la temporada de estiaje. Sin embargo, en la zona montañosa sí existe un aumento de los periodos secos. También existe evidencia de un aumento de la precipitación en esta zona, para los meses de julio y agosto.

El caudal del río Piaxtla presenta una tendencia significativa creciente en el periodo mayo-junio y en el mes de noviembre, así como una tendencia significativa decreciente en los meses de enero y abril. El caudal acumulado anual no presenta evidencia de cambio, sin embargo, se observan con mayor frecuencia en los últimos meses la ocurrencia de años (y periodos) secos. La agricultura, consumo urbano e industrial no presentan un impacto en el caudal de las series de tiempo de las dos estaciones hidrométricas de la cuenca, sin embargo, se considera que seguramente exista un impacto en el caudal que llega al mar, debido a que la mayor parte del área de uso de suelo agrícola (especialmente del de riego) se encuentran aguas abajo de las EE.HH.

Se encontró que los años cuando el caudal registra valores menores al promedio, se registran valores de la temperatura mayores al promedio, especialmente de los mínimos de la temperatura máxima. La magnitud de la precipitación en tales años no es tan determinante, sin embargo, la condición más desfavorable de esta combinación: año seco y cálido, se presenta con más frecuencia en los últimos años. Esto puede tener un impacto negativo en el desarrollo económico de la zona, pues la agricultura, actividad económica más importante de la región, depende del escurrimiento superficial y la precipitación.

Derivado de los resultados del análisis del caudal, es necesaria mayor investigación, retomando las mediciones de caudal en el río, así como la elaboración de un modelo hidrológico de la cuenca para reconstruir el caudal desde el año 2010. Esto permitiría identificar adicionalmente efectos en el caudal

derivado de la precipitación-temperatura, los cuales no se han identificado hasta el año 2000 (en el cual termina el análisis de caudal).

Respecto a la variación espacial de las variables, se encontró que su comportamiento es congruente con su variación en el país. Esto es, la temperatura presenta mayores valores en las zonas cercanas a la costa con poca precipitación. Conforme aumenta la elevación del continente, la temperatura disminuye y la precipitación aumenta, cuyo máximo valor coincide también con la máxima elevación. A partir de este punto, la precipitación disminuye y la temperatura aumenta. Este fenómeno origina climas cálidos y tropicales del lado de las sierras montañosas que dan hacia el océano, climas templados y húmedos en la zona montañosa y; climas cálidos y secos en el altiplano.

Con la evidencia de cambio climático encontrada, es posible que los climas del altiplano registren mayor temperatura y disminuyan su precipitación. Adicionalmente al aumento de la temperatura por calentamiento global, una tendencia decreciente en la precipitación también impactaría en los climas desérticos del país, que se encuentran en la zona del altiplano, volviéndolos más extremosos todavía.

Con esto en consideración, es importante hacer un cambio en los planes de desarrollo de la región del golfo de California y norte del país, pues al ser las de mayor importancia agrícola, las hace especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático. Las ciudades más importantes de la región si bien no son las más grandes del país, es posible que se vea afectado el acceso al agua. Como se vio en este trabajo, el balance hídrico estimado a fines de siglo apenas se cumple ignorando los cambios por actividades humanas. Dado que la agricultura es la actividad que más consume agua en el país, es importante aumentar la eficiencia de los métodos de irrigación e implementación de estos en zonas de riego que no dependen de la precipitación. También, se recomienda que los tipos de cultivo en esta región, no dependan de un volumen de precipitación dado a lo largo del año, sino que sean adaptables al clima de la región y no se deba así alterar el cauce de otras cuencas. Programas de consumo responsable de agua a la población general, así como constante mantenimiento a las redes de distribución de agua potable, permitirán disminuir el consumo urbano. Todas las recomendaciones anteriores, tienen como objetivo disminuir la demanda de agua y pérdidas en los sistemas de distribución e irrigación.

Los futuros planes de desarrollo nacionales y regionales deben considerar que no es posible que en el norte del país se mantengan tendencias de crecimiento económico incongruentes con la falta de acceso al agua en la región. Es decir, que eventualmente deberá limitarse el desarrollo, principalmente el agrícola, pues incluso en los próximos siglos no podrá aprovecharse el volumen de precipitación de agua en su totalidad gracias a las pérdidas por evapotranspiración.

Finalmente, se recomienda que los planes de desarrollo, así como los proyectos de infraestructura (que deben estar incluidos en estos), consideren las tendencias en la variación espacio-temporal de la precipitación. Esto requerirá que el análisis hidrológico tradicional para la planeación y el diseño de obras hidráulicas incorpore pruebas estadísticas de tendencias con la finalidad de incorporar las consecuencias del cambio climático, así como su adaptación y resiliencia ante el futuro.

Referencias

- Alencar, K. y Silva, R. (2017). Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó-Pernamcuco-Brasil. *Revista Geográfica de América Central*. Universidad Nacional Costa Rica. Vol. 1, núm. 58. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15359/rgac.58-1.12>
- Aparicio, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. 1ra edición. Editorial Limusa. México. 302 p.
- Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y la Tecnología (DICYT) (2015). En México se pierde el 40 por ciento del agua potable por fugas en redes. Disponible en: <https://bit.ly/37gsQIX> (Acceso el día 4/04/2022).
- Aragón, J., Aguilar, G., Velázquez, U., Jiménez, M. y Maya, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. XX, núm. 2. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Barradas, V. (2022). Caracterización y evaluación de los escurrimientos que desembocan al Golfo de California. [Tesis de licenciatura] Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- Benavides, O. y León, G. (2007). *Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático*. Nota Técnica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Disponible en línea: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf> (acceso el día 26/09/2021)
- Beniston, M., Díaz, H.F. y Bradley R.S. (1997). Climatic change at high elevations sites: an overview. *Climatic Change* 36:233-251.
- Blasing, T.J. (2008) Recent Greenhouse Gas Concentrations. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. DOI: 10.3334/CDIAC/atg.032
- Bozhinova, D., van der Molen, M.K., van der Velde, I.R., Krol, M.C., van der Laan, S., Meijer, H.A.J. y Peters, W. (2014). Simulating the integrated summertime Delta (CO₂)-C-14 signature from anthropogenic emissions over Western Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 7273–7290, 2014 doi:10.5194/acp-14-7273-2014.
- Calor y Temperatura (s.f.). Khan Academy. Disponible en línea: <https://bit.ly/3E1OKGt> (acceso el día 15/09/2021).
- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Tercera Reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. México.
- Carabias, J. y Landa, R. (2005). *Agua, Medio Ambiente y Sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. UNAM. Colegio de México. Fundación Gonzalo Río Arronte, México. 221 p.

Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1994). Hidrología Aplicada. 1ra Edición. Editorial. McGraw-Hill. Bogotá Colombia. 584 p.

Climate Watch (2020). Global Historical Emissions. Sitio didáctico de consulta. Disponible en línea: <https://bit.ly/3jx76vp> (acceso el día 23/10/2021).

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2011). Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del área natural protegida Reserva de la Biosfera Zona Marina Profunda Golfo de California. México. Consultado el 18 de julio, 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3iseUgP>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (1998). *Cuencas Hidrológicas (CNA)*. Shapefile. Disponible en línea: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=cue250kcw> (acceso el día 31/08/2021).

CONAGUA (2013). Estaciones Climatológicas. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/estaciones-climatologicas> (acceso el día 15/09/2021)

CONAGUA (2014). Consejo de Cuenca de los ríos Mocorito al Quelite. *Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía*. México. Disponible en: <https://bit.ly/3pJtZ> (acceso el día 27/10/2021).

CONAGUA (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Rio Piaxtla (2507), Estado de Sinaloa. Diario Oficial de la Federación. Disponible en línea: <https://bit.ly/3tnz5BE> (acceso el día 08/09/2021).

CONAGUA (2017). ¿Sabes qué es una #EstaciónHidrométrica[sic]?. Blog. Disponible en línea: <https://bit.ly/3Cxsyrg> (acceso el día 22/09/2021)

CONAGUA (2018). Atlas del Agua en México. Edición 2018. Disponible en línea: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/AAM_2018.pdf (acceso el día 22/09/2021)

CONAGUA (2018). Estadísticas del agua en México. Edición 2018. Sistema Nacional de Información del Agua. Disponible en línea: <https://bit.ly/3EjQXSj> (acceso el día 21/10/2021).

CONAGUA. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2018). Estadísticas del Agua en México. Edición 2018. Disponible en línea: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (acceso el 26/08/2021)

CONAGUA (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Rio Piaxtla (2507), Estado de Sinaloa. Diario Oficial de la Federación. Disponible en línea: <https://bit.ly/3BTOKFw> (acceso el día 08/09/2021).

CONAGUA (2021). Información Estadística Climatológica. *Información Climatológica*. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en línea: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica> (acceso el día 31/08/2021)

CONAGUA (2021). Monitor de Sequía en México. Disponible en línea: <https://bit.ly/32wISvP> (acceso el día 24/11/2021).

CONAGUA (2021). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Índice general del sitio. Subdirección General de Administración del Agua. Disponible en línea: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?Todos=todos> (acceso el día 07/09/2021)

CONAGUA, SINA (2021). Cuencas (nacional). Sitio de mapa interactivo. Subdirección General Técnica. Disponible en línea: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas> (acceso el día 01/09/2021)

CONAGUA, SINA (2021). Distritos y unidades de riego (nacional). Sitio de mapa interactivo. Subdirección General Técnica. Disponible en línea: <https://bit.ly/3kpdkOa> (acceso el día 30/04/2021).

CONAGUA (2022). Consulta a la base de datos del REPDA. Sitio de consulta. Disponible en línea: <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx> (acceso el día 30/04/2022).

CONAGUA (s.f.) Bases de datos hidrométricas. *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Disponible en línea: ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas (acceso el día 21/09/2021)

Comisión Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2002). Estaciones hidrométricas. Shapefile. Disponible en línea en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=esthidgw> (acceso el día 31/08/2021).

CONABIO (2010). Distribución de la población en México por municipio. Shapefile. Disponible en línea: <https://bit.ly/3KKjkMh> (acceso el día 30/04/2022)

CONABIO (2010). Localidades de la República Mexicana. Shapefile. Disponible en línea: <https://bit.ly/3LCjUNa> (acceso el día 30/04/2022).

CONABIO (2021). Geoportal de la CONABIO. Disponible en línea en: <https://bit.ly/3mVl8Jj> (acceso el día 08/11/2021).

CONABIO (2021). Portal de Geoinformación 2021. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Disponible en línea: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (acceso el 31/08/2021).

Corpoboyacá (2018). Estaciones hidrológicas y de calidad de agua, herramientas fundamentales para el cuidado y monitoreo de nuestros entornos. Noticias. Colombia. Disponible en línea: <https://bit.ly/3z3rAoj> (acceso el día 09/05/2022).

Custodio, E. y Llamas M. (2001). Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, 2da edición. España. 1224 pp.

Delgado, H. (1997). The glaciers of Popocateptl volcano (Mexico): changes and causes. *Quaternary International* 43/44: 53-60

Fernández, A., Zavala, J., Romero, R. y Conde, A., Trejo, R. (2013) Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. *Informe Final*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. CICESE, IMTA, CCA-UNAM.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. Van Dorland, 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, pp. 129-234.

Freund, J., Miller, I. y Miller, M. (2000). Estadística matemática con aplicaciones. Sexta edición. Prentice Hall. Pearson Educación. 603 p.

García, K. (2020). Número de curva. Estimación sistematizada y aplicaciones. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

Thomas, R., Karl, Jerry, M. y Melillo Thomas, C., (eds.). (2009) *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press.

Global Monitoring Laboratory (2021). Monthly Average Mauna Loa CO₂ Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Earth System Research Laboratories. Mauna Loa, Hawaii. Disponible en línea: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/> (acceso el día 24/09/2021)

Google (2021). Google Maps. Tayoltita, México. Disponible en línea: <https://bit.ly/3z8zYz5> (acceso el 13/09/2021)

Ibáñez, S., Moreno, H. y Gisbert, J. (sin fecha) Morfología de las cuencas hidrográficas. Escuela técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en línea: <https://bit.ly/3gSOXqL> (acceso el día 02/09/2021)

IDOM (2018). Cambios en las condiciones de inundabilidad en Gipuzkoa por el cambio climático. Informe Final. Gipuzkoako Foru Aldundia. España. Disponible en línea: <https://bit.ly/2ZlxxhO> (acceso el día 24/10/2021).

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2015). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Primera edición. México.

IMTA (2016). El IMTA desarrolla una Estación Hidrométrica Itinerante. Disponible en línea: <https://bit.ly/3wTZ1YU> (acceso el día 27/05/2022)

IMTA (2019) ¿Qué es una cuenca? Disponible en línea: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369> (acceso el día 02/09/2021)

IMTA (s.f.). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Portal del IMTA. Consultado el 18 de julio de 2021. Disponible en: <http://hidrosuperf.imta.mx/bandas/>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [@INAMEH]. (2020). *estacion hidrometrica mide sistematicamente el nivel del rio y en ella se realiza mediciones especiales a foros y caudal, para estimar la cantidad de agua que pasa por el ríos en un momento determinado*. [sic]. Imagen. [Tweet]. Twitter. Disponible en línea: <https://bit.ly/38XUBa7> (acceso el día 29/05/2022).

Instituto Nacional de Geografía (INEGI) (2005). Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica. México. Disponible en línea: <https://bit.ly/3nzIV2f> (acceso el día 15/09/2021).

INEGI (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1,000,000. Unidades climáticas. Desglose Nacional. México. Disponible en línea: <https://bit.ly/3tS2AvG> (acceso el día 15/09/2021)

INEGI (2012). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Versión 3.0. Subsistema de Nacional de Información Geográfica y del Medio Ambiente. Disponible en línea: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionemex/> (acceso el día 01/09/2021).

INEGI (2015). Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación. Escala 1:250,000. Serie V. Disponible en: <https://bit.ly/3C4jB8s> (acceso el día 08/11/2021)

INEGI (2019). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica Escala 1:250,000 Sinaloa Serie VI. Mapas. Topografía. Disponible en línea: <https://bit.ly/3k7f7If> (acceso de 13/09/2021)

INEGI (2019). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica Escala 1:250,000 Durango Serie VI. Mapas. Topografía. Disponible en línea: <https://bit.ly/3nuCIKG> (acceso de 13/09/2021)

INEGI (2020). Sistema de Consulta de Integración Territorial, SCITEL. Principales resultados por localidad. Disponible en línea: <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=9> (acceso el día 14/02/2022).

INEGI (2022). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Sitio de consulta. Disponible en línea: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/> (acceso el día 01/04/2022).

INEGI (2022). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Documento Metodológico. DENUE Interactivo. Disponible en línea: <https://bit.ly/3xPPuTu> (acceso el día 01/04/2022).

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2018); Resumen para responsables de políticas. Calentamiento global de 1.5°C. *Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza.* Disponible en línea: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf (acceso el día 23/09/2021)

IPCC (2021); Summary for Policymakers. *In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. Disponible en línea: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (acceso el día 23/09/2021)

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud,

Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. In Press.

Jouzel, Jean & Masson-Delmotte, Valerie & Cattani, O & Dreyfus, Gabrielle & Falourd, S & Hoffmann, Georg & Minster, B & Nouet, Julius & Barnola, J & Chappellaz, Jérôme & Fischer, Hubertus & Gallet, Jean-Charles & Johnsen, Sigfus & Leuenberger, Markus & Loulergue, Laetitia & Lüthi, Dieter & Oerter, Hans & Parrenin, Frederic & Raisbeck, G & Wolff, E. (2007). Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* (New York, N.Y.). 317. 793-6. 10.1126/science.1141038.

Keeling C., Bacastow R., Bainbridge A., Ekdahl C., Guenther P., Waterman L. y Chin J. (1976), Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Tellus*, vol. 28, 538-551

Keeling Curve Lessons. Lessons for long-term earth observations. Scripps CO2 Program. Disponible en línea: <https://bit.ly/2WGFTOG> (acceso el día 05/10/2021)

Lanza G., Salinas S. y Carbajal J. (2014). Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM. México. Núm. 87, pp. 25-39. dx.doi.org/10.14350/rig.35269

López M., Rodríguez J. y Cisneros M. (Compiladores) (2006). Catálogo de Mapas del Programa Golfo de California de WWF-México: ocho años de sistemas de información geográfica aplicados a la conservación. 222 p. Consultado el 18 de julio de 2021. Disponible en:

Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B. Blunier T., Barnola J.M., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K y Stocker T. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature* **453**, 379–382. <https://doi.org/10.1038/nature06949>

Maderey-R, L. y Torres, C. (1990). Hidrografía. Shapefile. Disponible en línea en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=hidro4mcw> (acceso el día 31/08/2021).

Mann, M., Bradley, R. y Hughes, M. (1999). Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophysical Research Letters*. Vol 26. No 6. Pages 759-762.

Martínez, B., Domínguez, C. y Arenas, I. (2021). Sequía 2020-2021: La segunda más severa del registro reciente. Boletín ICACC. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. UNAM. Disponible en línea: <https://www.atmosfera.unam.mx/sequia-2020-2021-la-segunda-mas-severa-del-registro-reciente/> (acceso el día 24/11/2021).

Martínez, J., Fernández, A. y Osnaya, P. (2004). Cambio climático: una visión desde México. Primera edición. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México.

Martínez, P. y Jano, J. (2021). Climate Change and Extreme Temperature Trends in the Baja California Peninsula, Mexico. *Air, Soil and Water Research*. 2021. Volume 14: 1-11. doi: 10.1177/11786221211010702.

- Falk, M., Marohn, F., Michel, R., Hofmann, D., Macke, M., Tewes, B., & Dinges, P., & Englert, S. (2005). A First Course on Time Series Analysis : Examples with SAS. <http://statistik.mathematik.uni-wuerzburg.de/timeseries/> (acceso el día 01/02/2022).
- Morejón M., Yilian M., Vega C., Marina Bz, Escarré E., Peralta J., Quintero A. y González J. (2015). Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 94-108. Disponible en línea: <https://bit.ly/3GtBHUP> (acceso el día 24/10/2021).
- Muñoz C. (2008). *Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del río Segura: Cuenca del río Mundo*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Disponible en línea: <https://core.ac.uk/download/pdf/60416059.pdf> (acceso el día 18/10/2021).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (sin fecha). Carbon cycle. Disponible en línea: <https://bit.ly/3pBQCWZ> (acceso el día 23/10/2021).
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, *Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Diario Oficial de la Federación (2015).
- Ordoñez J. (2011). *Balance Hídrico Superficial*. Cartilla Técnica. Edición Primavera. Sociedad Geográfica de Lima. Perú. Disponible en línea: <https://bit.ly/3bdzEp7> (acceso el día 24/10/2021).
- Pereyra, D., Cruz, G. y Pérez J. (2011). La evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones Geográficas*. Instituto de Geografía. UNAM. Num 75, pp 37-50.
- Petit J., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkiv, N., Barnola, J., Basile, I., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V., Legrand, M., Lipenkov V., Lorius, C., Pépin, L., Rits, C., Saltzman, E., y Stievenard, M., (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. Vol. 399, 429-436. Disponible en línea: <https://doi.org/10.1038/20859> (acceso el día 05/10/2021)
- Pettitt A.N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* Vol. 28, No. 2, pp. 126-135. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/2346729> (consultado el día 30/11/2021):
- Quay P.D., Tilbrook B. y Wong C.S. (1992). Oceanic Uptake of Fossil Fuel CO₂: Carbon-13 Evidence. *Science*. Vol. 256. New York. N.Y.
- Real Academia de la Lengua Española (2014). *Diccionario de la Lengua Española*. Vigésima tercera edición. Colección de Diccionarios Espasa. Espasa. Disponible en línea: <https://www.rae.es/> (acceso el día 15/12/2021).
- Remeneiras, G. (1974). Evaporación, transpiración y déficit de escurrimiento. Capítulo V. *Tratado de Hidrología Aplicada*. Editores Técnicos Asociados. 2da edición. España, pp. 205-300.

Rivera J., Alcántara G-, Blanco N. y Pascal E. (2017). ¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto. *Revista Posgrado y Sociedad*. Sistema de Estudios de Posgrado Universidad Estatal a Distancia. SEP. Volumen 15, Número 1, 57-67.

Sans C. (2018). El Golfo de California en su Totalidad como Aguas Interiores o Territoriales Mexicanas. *Revista del Centro de Estudios Superiores Navales*. Volumen 39, Número 1. CESNAV, México, pp. 95-126.

SEMARNAT (2015). Atlas Digital Geográfico. Agua. Disponible en línea: <http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua.html> (acceso el día 08/09/2021)

Servicio Geológico Mexicano (2005). Cartografía Geológica de la República Mexicana escala 1:250,000. Datos Abiertos. Publicado en 2017. Disponible en línea: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000> (acceso el día 08/09/2021)

Servicio Meteorológico Nacional, SMN (s.f.). Glosario Técnico. Disponible en línea: <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario> (acceso el día 13/10/2021).

SMN (s.f.) CLICOM-CICESE. Disponible en línea: <http://clicom-mex.cicese.mx/> (acceso el día 13/10/2021).

SMN. (s.f.) Información Estadística Climatológica. Información de Estaciones Climatológicas. Disponible en línea: <https://bit.ly/2YLqP3A> (acceso el día 13/10/2021)

SINA (2021). Cuencas (nacional). Disponibilidad de cuencas hidrológicas. Sitio de mapa interactivo. CONAGUA. Subdirección General Técnica. Disponible en línea: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas#&ui-state=dialog> (acceso el día 07/09/2021)

SINA (2021). División hidrológico-administrativa. Sitio de mapa interactivo. CONAGUA. Subdirección General Técnica. Disponible en línea: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=divisionHidrologicaAdministrativa> (acceso el día 07/09/2021)

SINA (2021). Principales presas (nacional). Sitio de mapa interactivo. CONAGUA. Subdirección General Técnica. Disponible en línea: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=presasPrincipales&ver=mapa> (acceso el día 01/09/2021)

SINA (2021). Regiones hidrológicas (nacional). Sitio de mapa interactivo. CONAGUA. Subdirección General Técnica. Disponible en línea: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas> (acceso el día 07/09/2021)

Sotelo G. (1997). Hidráulica General. Volumen 1 Fundamentos. Decimoctava reimpresión. Editorial Limusa. México. 651 p.

Soto W., Yoshiwaka K. y Schörghofer N. (2020). Climatic variation in the high mountains of central Mexico: Temperature precipitation indices at Nevado de Toluca volcano. *Atmósfera*, 33 (4) 301-318. <https://doi.org/10.20937/ATM.52768> (acceso el día 09/12/2021)

- Steinhilber F., Beer J. y Fröhlich C. (2009). Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36. L19704. Disponible en línea: <https://bit.ly/3F4sX6T> (acceso el día 26/09/2021)
- Suess, H. (1986). Secular Variations of Cosmogenic ¹⁴C on Earth: Their Discovery and Interpretation. *Radiocarbon*, 28(2A), 259-265. doi:10.1017/S0033822200007359
- Toro del F., Kretschmar T. y Hinojosa A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Volumen 5. No. 6, pp. 69-81. Disponible en línea: <https://bit.ly/3b5U6Iu> (acceso el día 24/10/2021).
- Tu Región Informa (2018). Más de 5 mil agricultores beneficiados con estación hidrométrica. Región La Libertad. Perú. Disponible en línea: <https://bit.ly/3aj8YWS> (acceso el día 29/05/2022).
- Ochoa A. (2019). El escurrimiento su representación y medición. Universidad de Sonora. División de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Geología. Presentación. Disponible en línea: <https://slideplayer.es/slide/14368351/> (acceso el día 29/05/2022).
- Ochoa L., Ruiz J. (2017). Experiencias en la evaluación de fugas de agua potable de sectores hidrométricos de la Ciudad de México. Seminario Iberoamericano de Redes de Agua. XV Seminario Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje. Disponible en: <https://bit.ly/37fMG6W> (Acceso el día 4 de abril de 2022).
- United States Geological Survey (USGS) (s.f.). El Ciclo del Agua, The Water Cycle, Spanish. Disponible en línea: <https://on.doi.gov/3kwNXcC> (acceso del día 26/08/2021).
- USGS (sin fecha). El Ciclo del Agua [imagen]. Disponible en línea en: <https://bit.ly/3BkK1Tm> (acceso el día 27/08/2021)
- Universidad Nacional del Litoral (UNL) (2016). Modelos matemáticos para el pronóstico de las crecidas del río Salado. Noticias. Argentina. Disponible en línea: <https://bit.ly/3M5R87e> (acceso el día 29/05/2022):
- Wackerly D, Mendenhall W. y Scheaffer R. (2010). Estadística matemática con aplicaciones. Séptima Edición. Cengage Learning. 911p.

ANEXOS

Anexo 1

Antecedentes y aspectos generales

Anexo 1- 1. NC para usos de tierra agrícola, suburbana y urbana (Chow et al, 1994).

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote				
Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Anexo 1- 2. Clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad, Chow (1988).

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS TIPOS DE SUELOS SEGÚN SU PERMEABILIDAD

Clave de clasificación FAO	Suelos	Tipo hidrológico de suelo	Permeabilidad	Propiedades
T	Andosoles	A	Muy alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
Q	Arenosoles			
J	Fluvisoles			
O	Histosoles			
U	Ranker			
X, Y	Calcisoles (antes xerosol y yermosol)	B	Buena	Arenas finas y limos
I, E	Leptosoles (antes litosoles y rendizinas)			
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Regosoles			
H	Feozems			
K	Kastanozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
N	Nitsoles			
C	Chernozems			
-	Alisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)
A	Acrisoles			
B	Cambisoles			
G	Gleysoles			
L	Luvisoles			
V	Vertisoles			
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzoluvisoles			
-	Plintsoles			
-	Lixisoles			

Anexo 1- 3. NC según el grupo hidrológico según el uso de suelo y vegetación del INEGI, Chow (1988).

TABLA 2.2 NÚMERO DE CURVA SEGÚN LA COBERTURA DEL SUELO

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50 % ó más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50 % ó menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
	Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89	
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100

¹Chow, *Hidrología Aplicada*; Aparicio, M F J, *Fundamentos de Hidrología de Superficie*; Domínguez, M R, y Gracia J S, *Manual de Diseño de Obras Civiles*, Hidrotecnia, A. 1.4 Pérdidas.

Continuación

EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		100	100	100	100
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos acaules, crasicaule, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, inerme, subinerme, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, natural-huizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	72	79
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83
SELVA (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)		45	66	77	83
TULAR		68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA		68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA		68	79	86	89

Definición de condición hidrológica

Suelos agrícolas:

Mala: tiene menos del 25 % del terreno cubierto

Regular: tiene entre 25 y 50 % del terreno cubierto

Buena: tiene más del 50 % del terreno cubierto.

Uso forestal:

Mala: tiene menos del 30% del terreno cubierto

Regular: tiene entre 30 y 70% del terreno cubierto.

Buena: tiene más del 70% del terreno cubierto.

Anexo 1- 4. Valores de K en función del tipo y uso de suelo (CONAGUA, 2015).

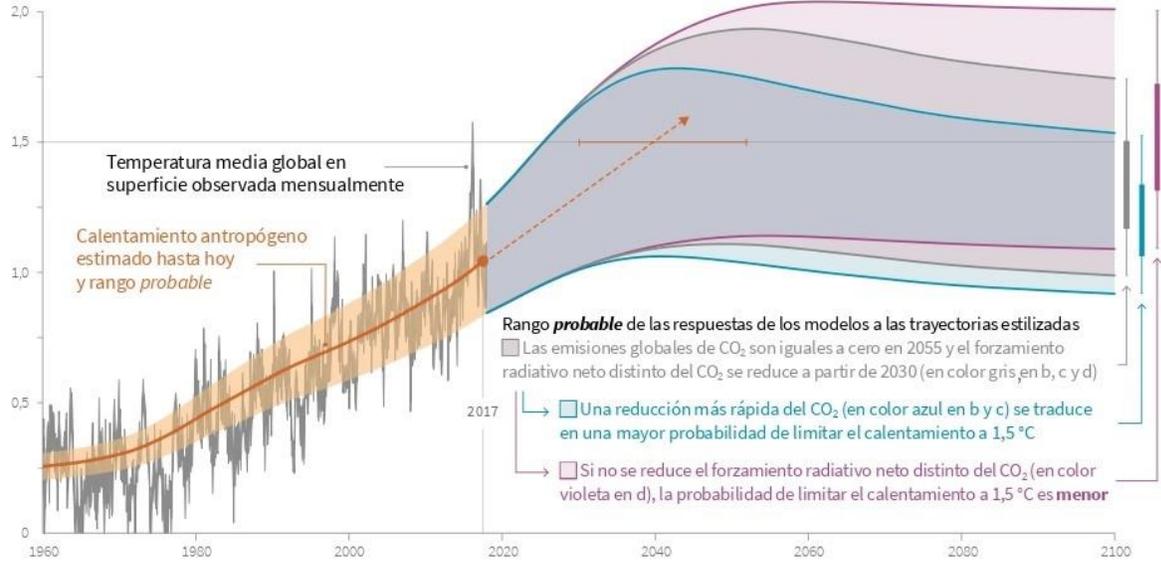
TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hilera	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular -	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

Anexo 1- 5. Tabla de decisión para determinar el grupo hidrológico del suelo correspondiente a la edafología de México (García, 2020).

Tipo de suelo (INEGI)	Grupos hidrológicos de suelo		
	Textura gruesa	Textura media	Textura fina
Gleysol Planosol Plintosol Solonchak Solonetz Acrisol Alisol Cambrisol Gipsisol Lixisol Luvisol Nitosol Vertisol	B	C	D
Andosol Arenosol Calcisol Cherozem Durisol Fluvisol Histosol Kastanozem Leptosol Litosol Phaeozems Regosol Umbrisol	A	B	C

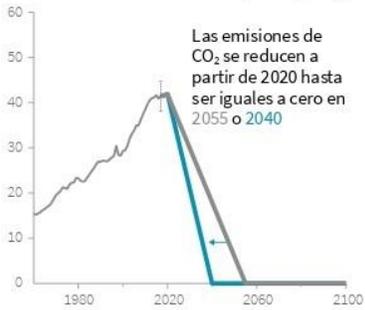
a) Cambio en la temperatura global observada y respuestas de los modelos a las trayectorias estilizadas de las emisiones antropógenas y del forzamiento

Calentamiento global con respecto a 1850-1900 (°C)



b) Trayectorias estilizadas de las emisiones globales netas de CO₂

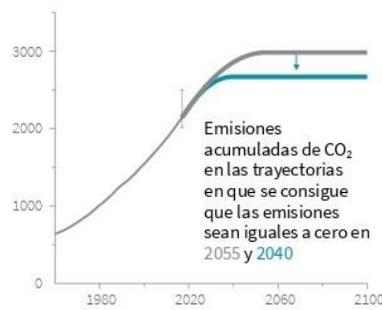
Miles de millones de toneladas de CO₂ al año (GtCO₂/año)



Una reducción más rápida e inmediata de las emisiones de CO₂ limita las emisiones acumuladas de CO₂ que aparecen en el gráfico c).

c) Emisiones netas acumuladas de CO₂

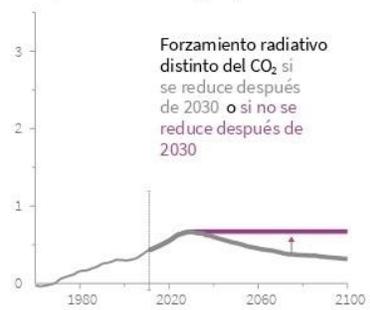
Miles de millones de toneladas de CO₂ al año (GtCO₂/año)



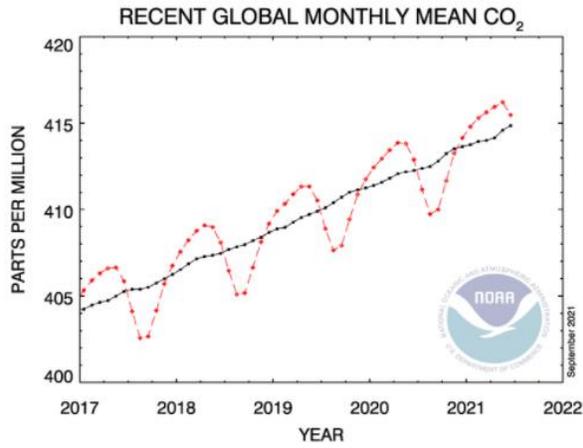
El aumento de la temperatura máxima se determina a partir de las emisiones netas acumuladas de CO₂ y del forzamiento radiativo distinto del CO₂ ocasionado por el metano, el óxido nítrico, los aerosoles y otros agentes de forzamiento antropógeno.

d) Trayectorias del forzamiento radiativo distinto del CO₂

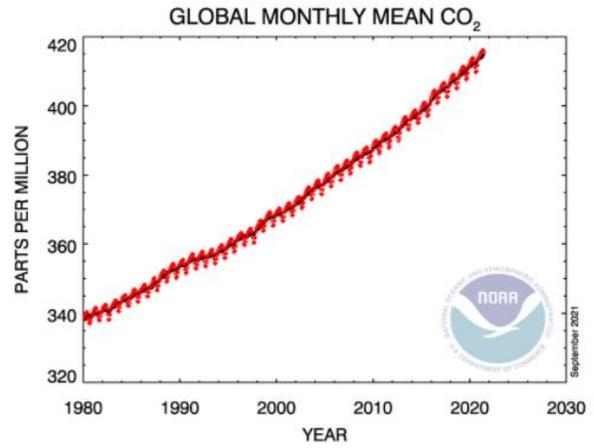
Vatios por metro cuadrado (W/m²)



Anexo 1- 6. Observaciones y modelos del cambio climático actual.



Recent global monthly means



Global monthly means since 1980

Anexo 1- 7. Concentración de CO₂ en la atmósfera en los últimos años.

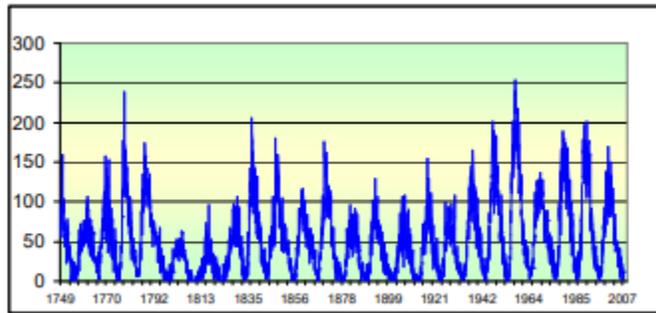
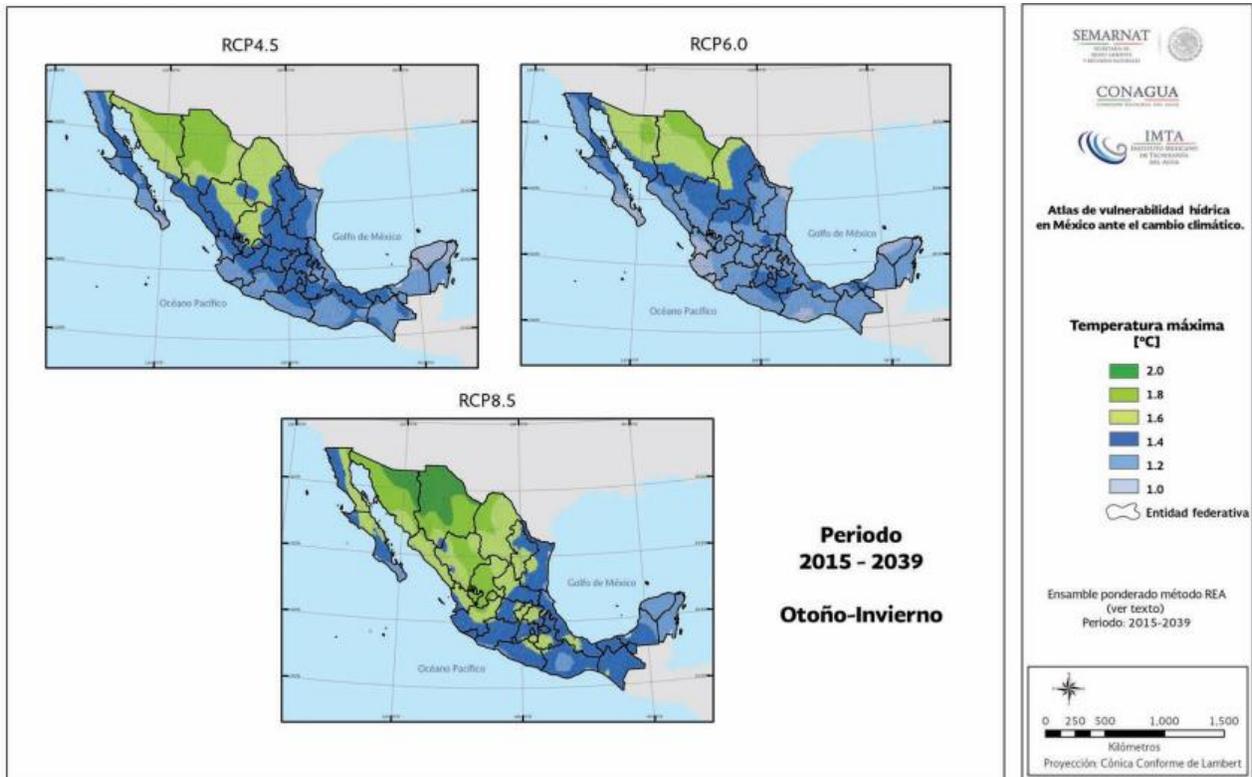
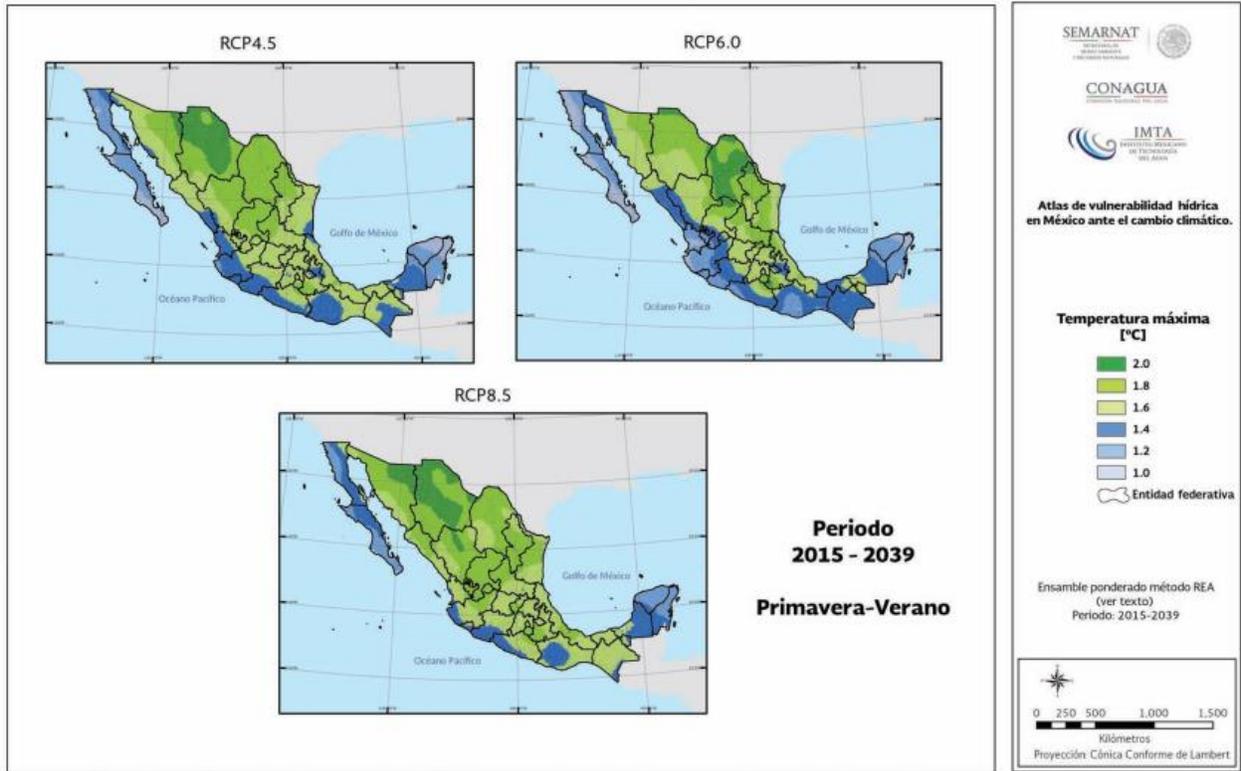
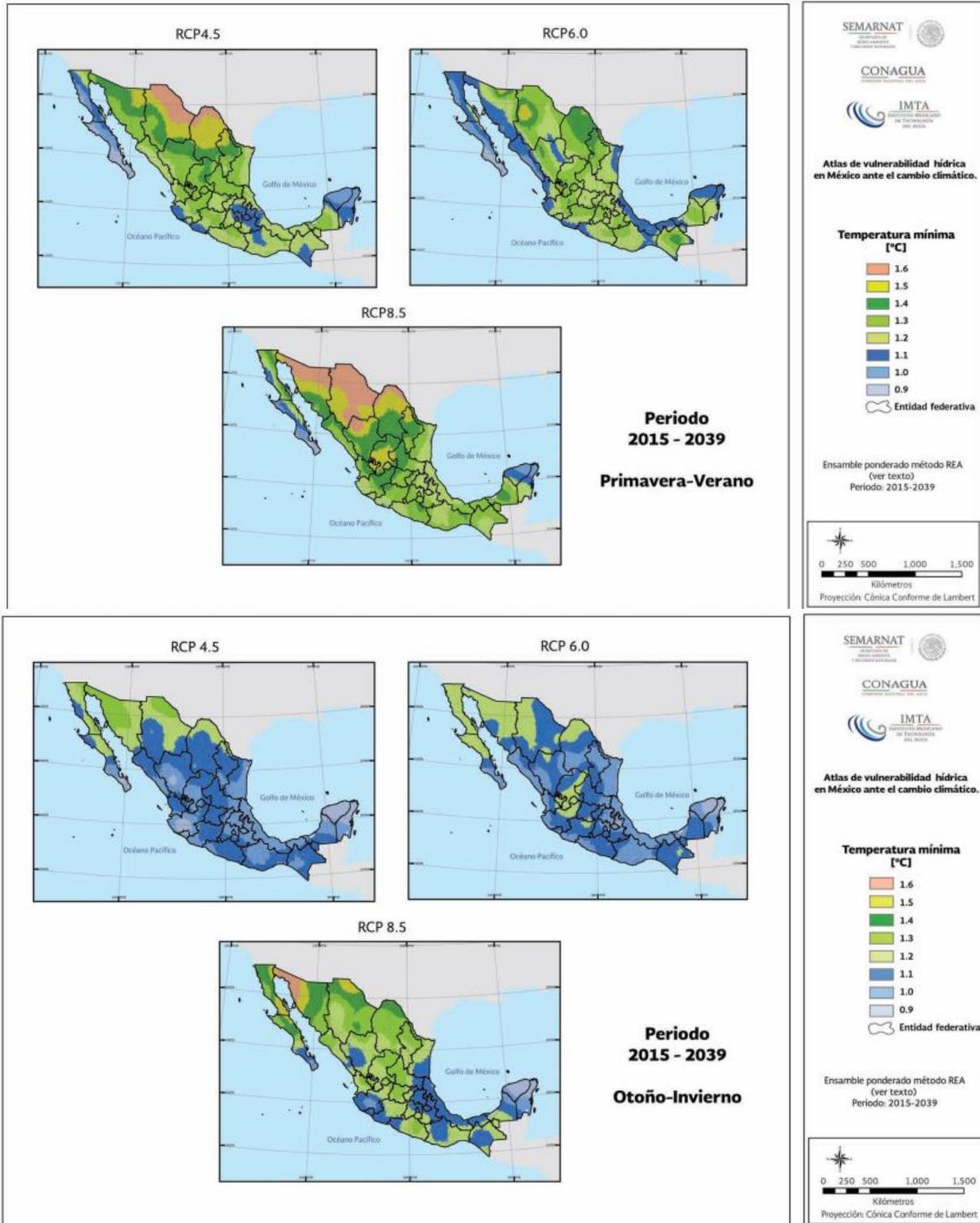


Figura 10. Número de manchas solares enero de 1749 y octubre de 2007.

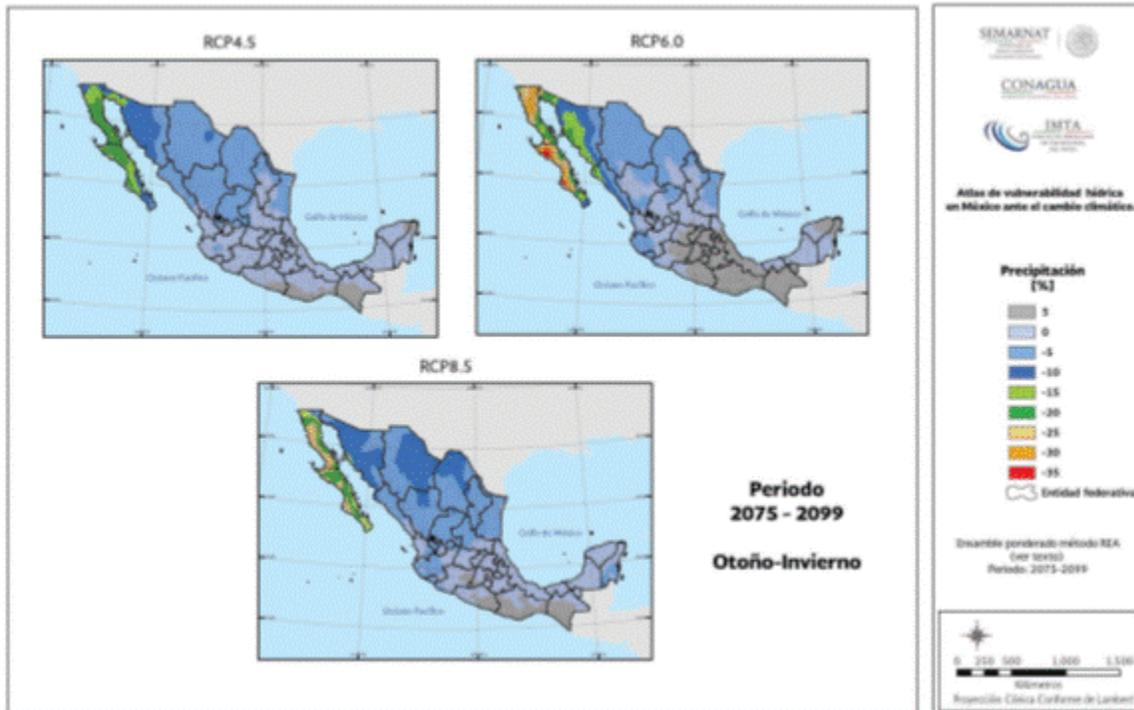
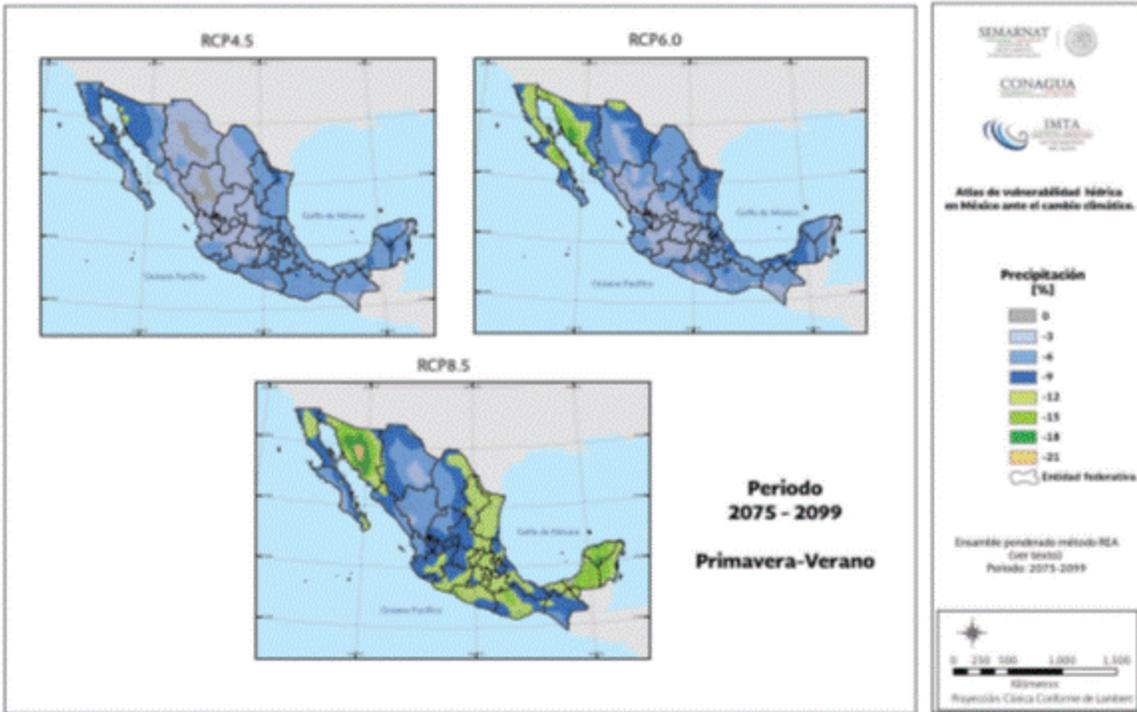
Anexo 1- 8. Manchas solares desde 1749 hasta 2007.



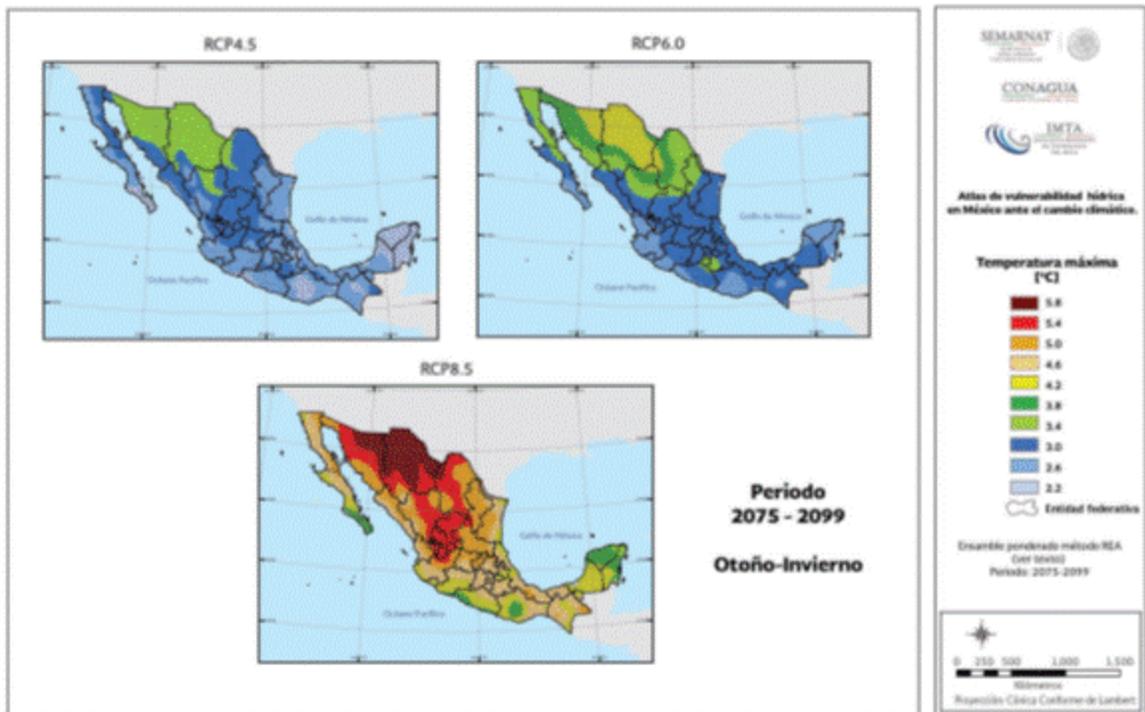
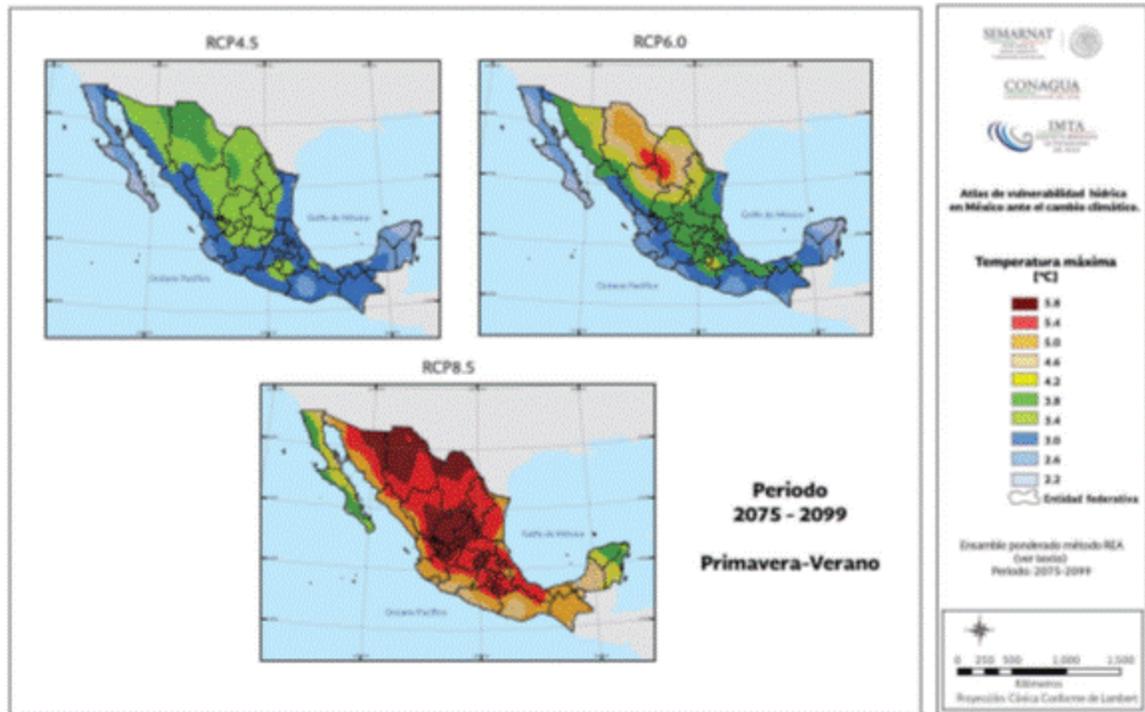
Anexo 1- 9. Cambio en la temperatura máxima por cambio climático para México (2015-2039).



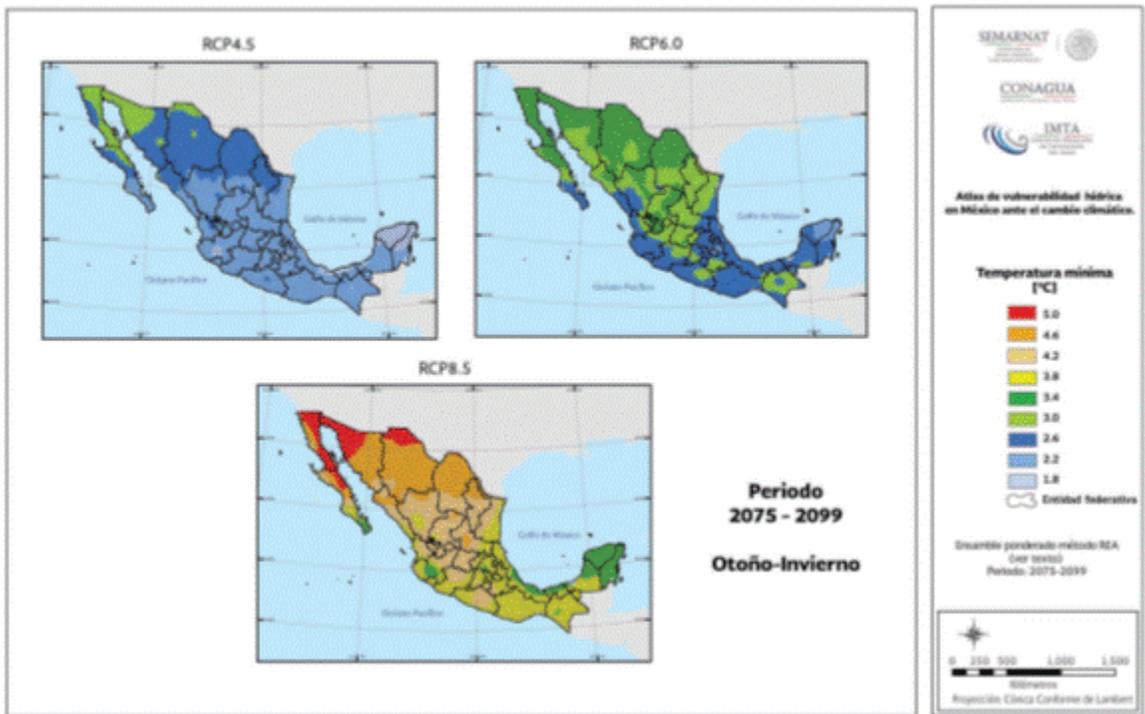
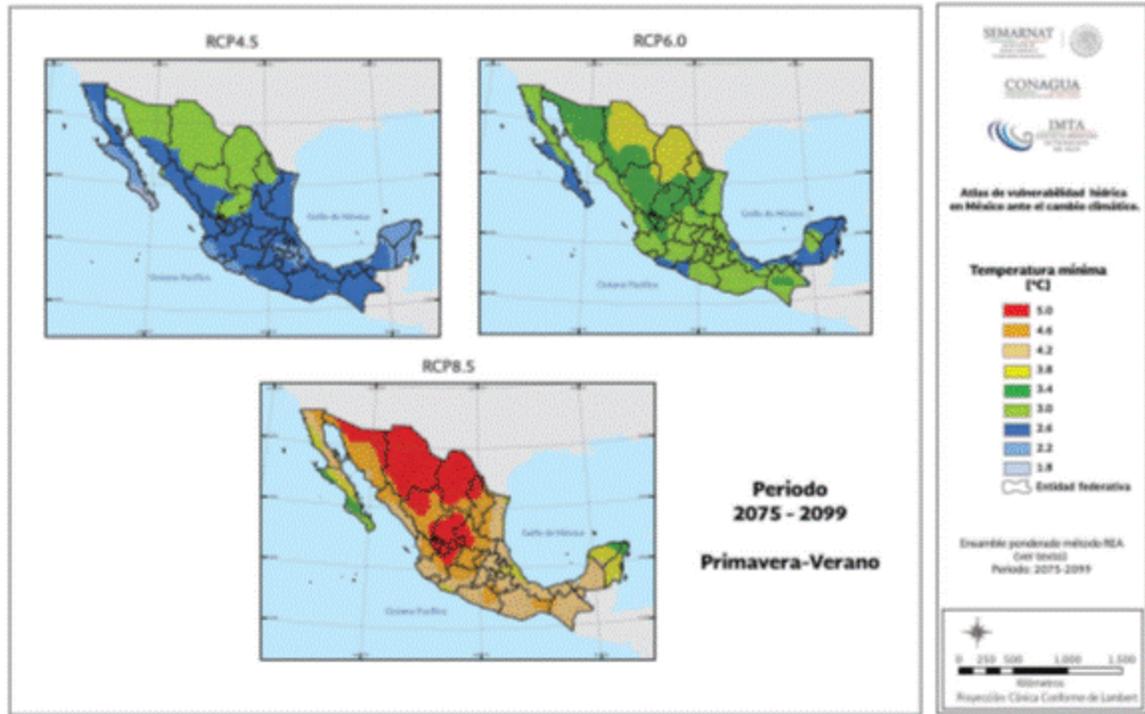
Anexo 1- 10. Cambio en la temperatura mínima por cambio climático en México (2015-2039).



Anexo 1- 11. Cambio de la precipitación por cambio climático en México (2075-2099).



Anexo 1- 12. Cambio en la temperatura máxima por cambio climático en México (2075-2099).



Anexo 1- 13. Cambio en la temperatura mínima por cambio climático en México (2075-2099).

Anexo 1- 14. Indicadores de cambio climático (Karl *et al* 1999)

1. FD, *Number of frost days*: Annual count of days when TN (daily minimum temperature) $< 0^{\circ}\text{C}$.

Let TN_{ij} be daily minimum temperature on day i in year j . Count the number of days where:

$$TN_{ij} < 0^{\circ}\text{C}.$$

2. SU, *Number of summer days*: Annual count of days when TX (daily maximum temperature) $> 25^{\circ}\text{C}$.

Let TX_{ij} be daily maximum temperature on day i in year j . Count the number of days where:

$$TX_{ij} > 25^{\circ}\text{C}.$$

3. ID, *Number of icing days*: Annual count of days when TX (daily maximum temperature) $< 0^{\circ}\text{C}$.

Let TX_{ij} be daily maximum temperature on day i in year j . Count the number of days where:

$$TX_{ij} < 0^{\circ}\text{C}.$$

4. TR, *Number of tropical nights*: Annual count of days when TN (daily minimum temperature) $> 20^{\circ}\text{C}$.

Let TN_{ij} be daily minimum temperature on day i in year j . Count the number of days where:

$$TN_{ij} > 20^{\circ}\text{C}.$$

5. GSL, *Growing season length*: Annual (1st Jan to 31st Dec in Northern Hemisphere (NH), 1st July to 30th June in Southern Hemisphere (SH)) count between first span of at least 6 days with daily mean temperature $TG > 5^{\circ}\text{C}$ and first span after July 1st (Jan 1st in SH) of 6 days with $TG < 5^{\circ}\text{C}$.

Let TG_{ij} be daily mean temperature on day i in year j . Count the number of days between the first occurrence of at least 6 consecutive days with:

$$TG_{ij} > 5^{\circ}\text{C}.$$

and the first occurrence after 1st July (1st Jan. in SH) of at least 6 consecutive days with:

$$TG_{ij} < 5^{\circ}\text{C}.$$

6. TX_x , *Monthly maximum value of daily maximum temperature*:

Let TX_x be the daily maximum temperatures in month k , period j . The maximum daily maximum temperature each month is then:

$$TX_{x,kj} = \max(TX_{x,kj})$$

(Continuación)

7. TN_x , Monthly maximum value of daily minimum temperature:

Let TN_x be the daily minimum temperatures in month k , period j . The maximum daily minimum temperature each month is then:

$$TN_{xkj} = \max(TN_{xkj})$$

8. TX_n , Monthly minimum value of daily maximum temperature:

Let TX_n be the daily maximum temperatures in month k , period j . The minimum daily maximum temperature each month is then:

$$TX_{nkj} = \min(TX_{nkj})$$

9. TN_n , Monthly minimum value of daily minimum temperature:

Let TN_n be the daily minimum temperatures in month k , period j . The minimum daily minimum temperature each month is then:

$$TN_{nkj} = \min(TN_{nkj})$$

10. $TN10p$, Percentage of days when $TN < 10^{th}$ percentile:

Let TN_{ij} be the daily minimum temperature on day i in period j and let TN_{in10} be the calendar day 10th percentile centred on a 5-day window for the base period 1961-1990. The percentage of time for the base period is determined where:

$$TN_{ij} < TN_{in10}$$

11. $TX10p$, Percentage of days when $TX < 10^{th}$ percentile:

Let TX_{ij} be the daily maximum temperature on day i in period j and let TX_{in10} be the calendar day 10th percentile centred on a 5-day window for the base period 1961-1990. The percentage of time for the base period is determined where:

$$TX_{ij} < TX_{in10}$$

12. $TN90p$, Percentage of days when $TN > 90^{th}$ percentile:

Let TN_{ij} be the daily minimum temperature on day i in period j and let TN_{in90} be the calendar day 90th percentile centred on a 5-day window for the base period 1961-1990. The percentage of time for the base period is determined where:

$$TN_{ij} > TN_{in90}$$

13. $TX90p$, Percentage of days when $TX > 90^{th}$ percentile:

Let TX_{ij} be the daily maximum temperature on day i in period j and let TX_{in90} be the calendar day 90th percentile centred on a 5-day window for the base period 1961-1990. The percentage of time for the base period is determined where:

$$TX_{ij} > TX_{in90}$$

(Continuación)

14. WSDI, *Warm speel duration index*: Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX > 90th percentile

Let TX_{ij} be the daily maximum temperature on day i in period j and let TX_{in90} be the calendar day 90th percentile centred on a 5-day window for the base period 1961-1990. Then the number of days per period is summed where, in intervals of at least 6 consecutive days:

$$TX_{ij} > TX_{in90}$$

15. CSDI, *Cold speel duration index*: Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10th percentile

Let TN_{ij} be the daily minimum temperature on day i in period j and let TN_{in10} be the calendar day 10th percentile centred on a 5-day window for the base period 1961-1990. Then the number of days per period is summed where, in intervals of at least 6 consecutive days:

$$TN_{ij} < TN_{in10}$$

16. DTR, *Daily temperature range*: Monthly mean difference between TX and TN

Let TX_{ij} and TN_{ij} be the daily maximum and minimum temperature respectively on day i in period j . If I represents the number of days in j , then:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$$

17. Rx1day, *Monthly maximum 1-day precipitation*:

Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j . The maximum 1-day value for period j are:

$$Rx1day_j = \max (RR_{ij})$$

18. Rx5day, *Monthly maximum consecutive 5-day precipitation*:

Let RR_{kj} be the precipitation amount for the 5-day interval ending k , period j . Then maximum 5-day values for period j are:

$$Rx5day_j = \max (RR_{kj})$$

19. SDII *Simple pricipitation intensity index*: Let RR_{wj} be the daily precipitation amount on wet days, w ($RR \geq 1mm$) in period j . If W represents number of wet days in j , then:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W}$$

20. R10mm Annual count of days when PRCP $\geq 10mm$: Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j . Count the number of days where:

$$RR_{ij} \geq 10mm$$

21. R20mm Annual count of days when PRCP $\geq 20mm$: Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j . Count the number of days where:

$$RR_{ij} \geq 20mm$$

22. Rnnmm Annual count of days when PRCP $\geq nnmm$, nn is a user defined threshold: Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j . Count the number of days where:

$$RR_{ij} \geq nnmm$$

23. CDD. Maximum length of dry spell, maximum number of consecutive days with $RR < 1mm$: Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j . Count the largest number of consecutive days where:

$$RR_{ij} < 1mm$$

24. CWD. Maximum length of wet spell, maximum number of consecutive days with $RR \geq 1mm$: Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j . Count the largest number of consecutive days where:

$$RR_{ij} \geq 1mm$$

25. R95pTOT. Annual total PRCP when $RR > 95p$. Let RR_{wj} be the daily precipitation amount on a wet day w ($RR \geq 1.0mm$) in period i and let $RR_{wn}95$ be the 95th percentile of precipitation on wet days in the 1961-1990 period. If W represents the number of wet days in the period, then:

$$R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn}95$$

26. R99pTOT. Annual total PRCP when $RR > 99p$: Let RR_{wj} be the daily precipitation amount on a wet day w ($RR \geq 1.0mm$) in period i and let $RR_{wn}99$ be the 99th percentile of precipitation on wet days in the 1961-1990 period. If W represents the number of wet days in the period, then:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn}99$$

27. PRCPTOT. Annual total precipitation in wet days: Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day i in period j . If l represents the number of days in j , then

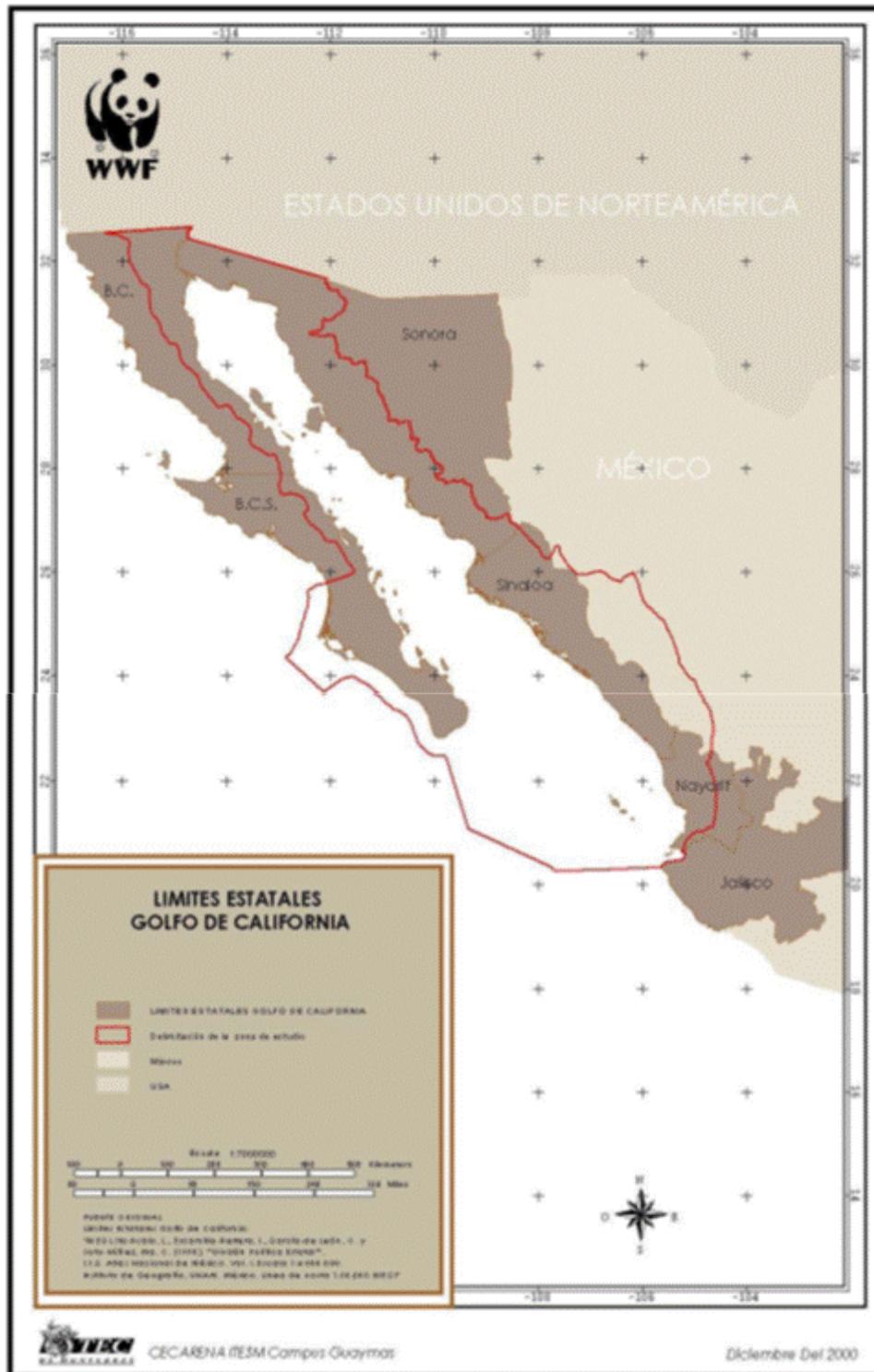
$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^l RR_{ij}$$

Anexo 2

Generalidades de la cuenca del río Piaxtla



Anexo 2- 1. Golfo de California según SEMAR (2018).



Anexo 2- 2. Golfo de California (Moreno y Polanco, 2000).

Anexo 2- 3. Tabla de grupos climáticos según Köppen, 1936 (INEGI, 2005).

Grupo	Características
A	Climas cálidos húmedos
B	Climas secos
C	Climas templados húmedos
D	Clima frío boreal, de inviernos intensos
E	Climas muy fríos o polares, o de grandes alturas

Clasificación climática de Wladimir Köppen, propuesta en 1936 basada principalmente en temperatura y precipitación, la cual considera los 5 grupos climáticos fundamentales en la tabla siguiente.

Anexo 2- 4. Condiciones de temperatura y precipitación para cada grupo climático de Köppen (INEGI, 2005).

Grupo	Condiciones de temperatura	Condiciones de humedad
A Cálidos húmedos y subhúmedos	Temperatura media del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación anual igual o superior al valor calculado por las siguientes fórmulas:
C Templados húmedos y subhúmedos	Temperatura media del mes más frío entre -3° y 18°C.	$P=2T + 28$ (lluvias de verano) $P=2T + 14$ (lluvias todo el año) $P=2T$ (lluvias de invierno), donde: P= Precipitación total anual en cm T= Temperatura media anual en °C
B Secos	Temperaturas diversas. Hay climas secos muy cálidos, hasta secos con temperaturas semifrías.	Precipitación anual inferior al valor calculado mediante las fórmulas arriba indicadas
E Muy fríos	Temperatura media del mes más cálido menor de 6.5°C.	

Anexo 2- 5. Subdivisiones climáticas propuestas por E. García (1964) (INEGI, 2005).

Grupo de Köppen	Subdivisiones E. García	
	A	Cálido (Temperatura media anual mayor de 22°C)
A (Cálido húmedo)	A (C)	Semicálido (Temperatura media anual entre 18° y 22°C)
	(A) C	Semicálido (Temperatura media anual mayor de 18°C)
C (Templado húmedo)	C	Templado (Temperatura media anual entre 12° y 18°C)
	C (E)	Semifrio* (Temperatura media anual entre 5° y 12°C)

Anexo 3

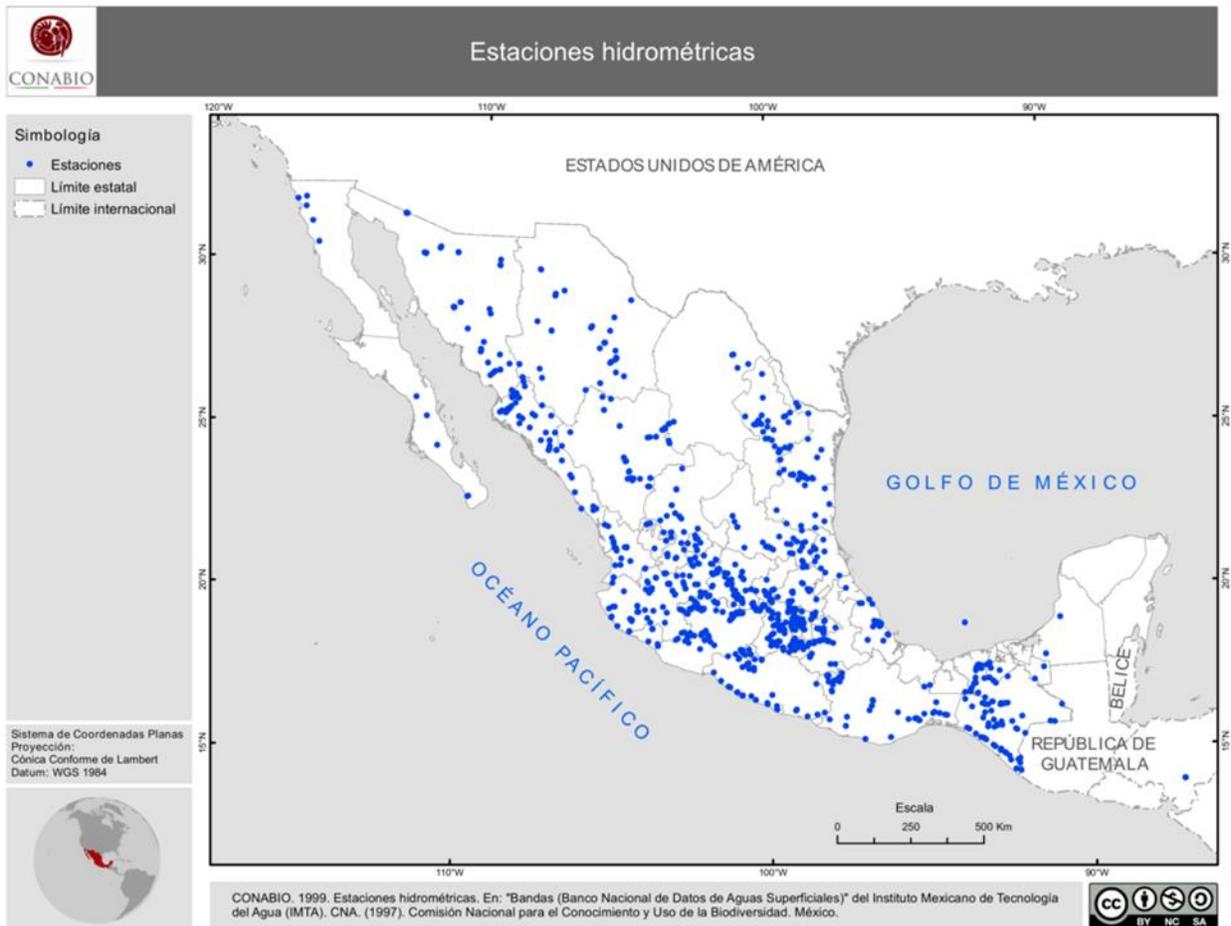
Aplicación de la metodología



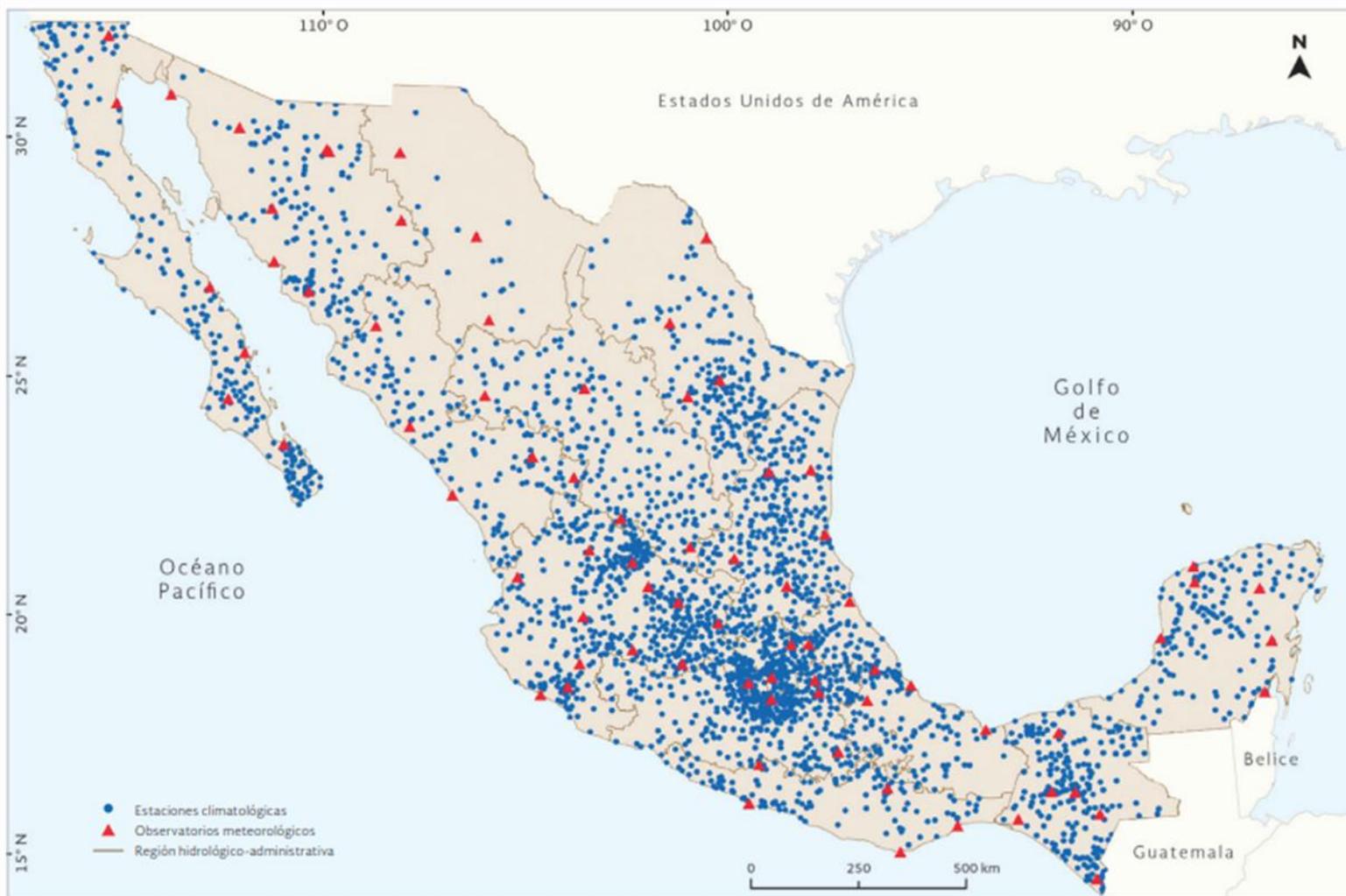
Anexo 3- 1. Cuenca del río Colorado y sus subcuencas en Estados Unidos y México (Hinojosa y Carrillo, 2010).



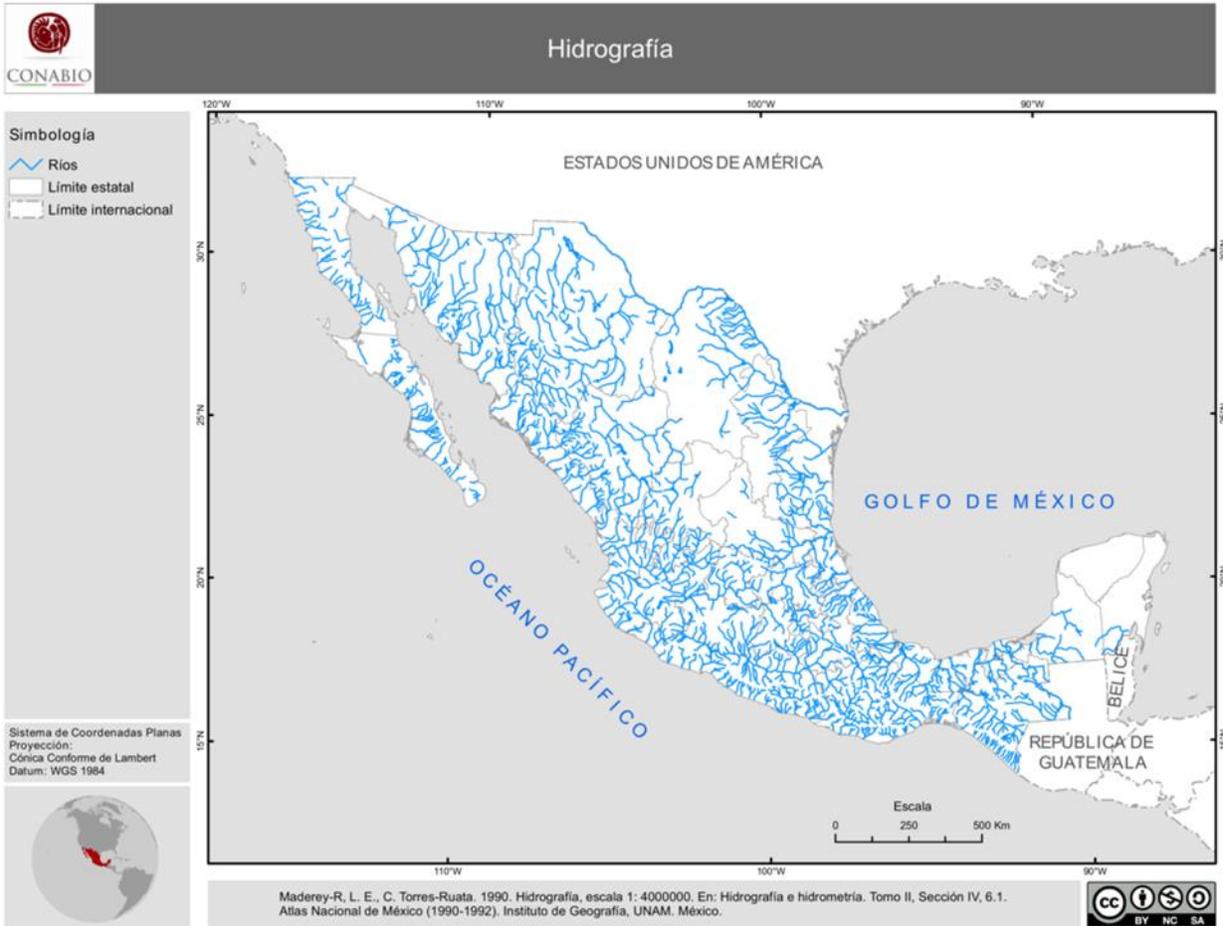
Anexo 3- 2. Cuencas del país según la CONAGUA (1998). Cuencas de un tamaño mayor a 250 km² en general.



Anexo 3- 3. Estaciones hidrométricas del país según la CONABIO (1999).



Anexo 3- 4. Estaciones climatológicas del país (CONAGUA 2020).



Anexo 3- 5. Hidrografía nacional (Maderey y Torres, 1990).

Anexo 3- 6. Reporte de las unidades de riego del portal del SINA (CONAGUA, 2020).

Superficie cosechada, producción y rendimiento de unidades de riego (2018-2019)

Región hidrológico-administrativa	Superficie cosechada (ha)	Producción (miles de ton)	Rendimiento (ton/ha)
I Península de Baja California	51,470.80	1,042.89	20.26
II Noroeste	259,304.69	3,179.60	12.26
III Pacífico Norte	202,638.63	3,090.57	15.25
IV Balsas	333,692.24	9,466.36	28.37
V Pacífico Sur	112,782.36	1,677.40	14.87
VI Río Bravo	625,982.85	7,458.56	11.91
VII Cuencas Centrales del Norte	296,556.22	10,270.09	34.63
VIII Lerma Santiago Pacífico	903,611.83	24,779.63	27.42
IX Golfo Norte	239,187.51	8,434.17	35.26
X Golfo Centro	112,751.77	5,007.52	44.41
XI Frontera Sur	38,101.58	1,807.76	47.45
XII Península de Yucatán	110,870.69	2,062.86	18.61
XIII Aguas del Valle de México	72,410.02	2,571.62	35.51
Total	3,359,361.19	80,849.04	24.07

FUENTE: CONAGUA, 2020. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Gerencia de Unidades de Riego, año agrícola 2018-2019.

Anexo 3- 7. Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante (INEGI, 2019).

Clima	Consumo l/hab/d			Subtotal por Clima
	Bajo	Medio	Alto	
Cálido Húmedo	198	206	243	201
Cálido Subhúmedo	175	203	217	191
Seco o Muy Seco	184	191	202	190
Templado o Frío	140	142	145	142

Anexo 3- 8. Tabla de periodo de operación de las estaciones climatológicas en la cuenca de Piaxtla.

Estación	Inicio de registro	Fin de registro	Registro en años	Días nulos y/o sin registro	Registro útil en años
10031	04/05/1966	31/10/2017	51.2	3,704	41.4
10042	17/04/1962	31/05/2018	56.1	4,688	43.3
10043	01/01/1969	31/12/1983	15.0	7	15.0
10064	08/12/1961	31/05/2018	56.5	6,844	37.8
10123	01/01/1969	31/12/1983	15.0	7	15.0
10152	01/05/1981	30/11/1983	2.6	0	2.6
10160	01/04/1981	31/05/2018	37.2	5,463	22.2
10176	01/01/2007	31/07/2018	11.6	9	11.6
25001	01/01/1961	31/07/2018	57.5	1,537	53.4
25021	24/11/1962	30/04/2018	55.2	96	55.2
25024	01/01/1961	30/09/1999	38.8	2,593	31.7
25028	01/01/1961	31/03/2001	40.2	39	40.2
25036	01/01/1961	30/11/2018	57.9	8,636	34.3
25045	01/01/1961	31/03/2019	58.2	673	56.4
25047	09/03/1972	31/07/1988	16.2	62	16.2
25072	01/01/1971	31/03/2001	30.3	3,759	20.0
25084	01/01/1976	30/11/2005	29.9	126	29.6
25095	01/05/1955	31/12/1968	13.7	2	13.7
25118	01/01/1961	31/12/1999	39.0	2,476	32.2

Con datos nulos correspondientes a la variable de precipitación.