



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**VARIACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS EN UNA CUENCA DEBIDO A EFECTOS
ANTROPOGÉNICOS Y CLIMÁTICOS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
OSCAR RAMÍREZ MOGUEL

TUTOR PRINCIPAL:
DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL (FACULTAD DE INGENIERÍA)

COMITÉ TUTOR:
M. I. VÍCTOR FRANCO (INSTITUTO DE INGENIERÍA)
DRA. LILIA REYES CHÁVEZ (FACULTAD DE INGENIERÍA)
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN (INSTITUTO DE INGENIERÍA)
M. I. MARCO TULIO MENDOZA ROSAS (FACULTAD DE INGENIERÍA)

Ciudad Universitaria, CD. MX.

noviembre 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. VÍCTOR FRANCO
Secretario: DRA. LILIA REYES CHÁVEZ
1 er. Vocal: DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL
2 do. Vocal: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN
3 er. Vocal: M. I. MARCO TULIO MENDOZA ROSAS

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL

FIRMA

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a mis padres, Juan Bernardo y Rocío, por su apoyo incondicional, consejos y motivación brindados en todo el tiempo de realización de este proyecto. A mis hermanas Angelica y Rocío, que han sido una gran compañía y soporte en las diferentes etapas de mi crecimiento personal y académico. También quiero agradecer a mi tío Rogelio, y a mis tías Silvia y Gregoria, que siempre me han demostrado su apoyo.

Este trabajo también es en memoria de mis abuelas, Altagracia y Candelaria, a las cuales quiero agradecerles el aliento que me brindaron al iniciar este proyecto y hasta los últimos momentos de sus vidas, siempre fueron un ejemplo para mí, sus enseñanzas y consejos siempre los tendré presentes.

Igualmente agradezco a las amistades formadas durante la maestría, ya que se han convertido en personas de gran importancia en mi vida e hicieron que los días fueran amenos, incluso en los días que se tenía gran carga de trabajo. De igual forma le brindo un agradecimiento al equipo universitario de Taekwondo que me hizo pasar grandes alegrías.

Agradezco a mi tutor, el doctor Carlos A. Escalante Sandoval, por todo su tiempo brindado, así como su guía durante todo el desarrollo del proyecto, sin la cual este trabajo no hubiera sido posible. Asimismo, mi mayor agradecimiento a los integrantes del comité tutor por su tiempo dedicado para la revisión de este trabajo.

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por todas las oportunidades brindadas y por siempre hacerme sentir en casa.

Finalmente, mi mayor agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico otorgado, sin el cual no habría podido realizar este posgrado.

Resumen

Hoy en día se tiene conocimiento que las condiciones climáticas en el mundo han comenzado a presentar cambios, lo cual afecta directamente a la sociedad. En México se espera una disminución en la precipitación, lo cual tendría grandes consecuencias, ya que el país depende en gran medida del agua superficial, además de que se vería afectada la agricultura de temporal.

En el presente trabajo se analiza las variaciones de los escurrimientos de tres subcuencas en el estado de Veracruz, para lo cual se analizaron las series anuales, periódicas y mensuales de escurrimiento de seis estaciones hidrométricas, en las cuales se pudo observar que los escurrimientos han mostrado variación en las estaciones 28108 y 28111, presentando tendencia positiva estadísticamente significativa, en todas las variables analizadas (escurrimientos medios y escurrimientos máximos y mínimos instantáneos); en las estaciones 28003, 28040 y 28069, se identificaron algunas series con tendencia negativa en los escurrimientos medios y mínimos instantáneos.

Se llevó a cabo el análisis de los registros de las variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), y a partir de ellos también se obtuvieron los índices de cambio climático, propuestos por la Organización Meteorológica Mundial y el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices; se pudo observar que prácticamente la precipitación no ha sufrido alteraciones en su régimen, pero en contra parte, en la mayoría de las estaciones se notó algún tipo de tendencia en las temperaturas, el comportamiento de estas alteraciones no fue homogéneo, ya que se identificaron zonas con una clara evidencia de tendencia positiva en su temperatura, y por otra parte se encontró evidencia de tendencia negativa en la temperatura de algunas estaciones.

En las subcuencas analizadas se identificó un aumento generalizado de la superficie con asentamientos humanos, y se pudo observar una marcada pérdida de la cobertura vegetal natural del área, lo que podría implicar un cambio en la dinámica de las cuencas.

El comportamiento de la interacción de las variables hidroclimáticas y el estado físico de las subcuencas han presentado alteraciones en su comportamiento, en las estaciones 28003, 28040 y 28069 se pueden explicar por alteraciones en las variables climáticas y cambios de tipo antropogénico; mientras que en las estaciones 28108 y 28111 los cambios de tipo antropogénico parecieran ser la principal causa de las alteraciones en el régimen de escurrimiento.

Índice de contenido

1	Introducción.....	15
1.1	Planteamiento del problema.....	17
1.2	Objetivo general.....	18
1.3	Objetivos particulares	18
1.4	Justificación	18
2	Estado del arte	20
3	Revisión de literatura.....	21
3.1	Calidad de la información.....	21
3.2	Técnicas de regionalización.....	22
3.2.1	Coeficiente de variación.....	22
3.2.2	Coeficiente de variación de los momentos-L.....	22
3.2.3	Parámetro β de la distribución general de valores extremos (GVE).....	24
3.2.4	Trazos multidimensionales (curvas de Andrews)	26
3.2.5	Región de influencia (distancia euclidiana)	27
3.3	Técnicas de interpolación	28
3.3.1	Método de Thiessen	29
3.3.2	Método de la interpolación polinomial	29
3.3.3	Método de la interpolación inversa (IDW)	31
3.3.4	Método de la interpolación multicuadrática.....	31
3.3.5	Método de la interpolación óptima	32
3.3.6	Método de la interpolación Kriging	33
3.4	Prueba de independencia de eventos	36
3.5	Pruebas de homogeneidad	37

3.5.1 Prueba de Pettitt	37
3.5.2 Prueba Normal estándar	38
3.5.3 Prueba de Buishand.....	38
3.5.4 Prueba de Von Neumann	40
3.5.5 Prueba de Fisher	40
3.5.6 Prueba de Helmert.....	41
3.5.7 Prueba t de student	41
3.5.8 Prueba de Cramer	42
3.6 Prueba de tendencia	43
3.6.1 Prueba Mann Kendall.....	43
3.7 Índices del cambio climático (ICC) del ETCCDI.....	44
3.7.1 Procedimiento “Bootstrap”	51
4 Materiales y métodos.....	52
4.1 Materiales	52
4.2 Métodos	52
4.2.1 Pre-proceso de la información	52
4.2.2 Análisis estadístico de las series hidroclimáticas.....	56
4.2.3 Uso de suelo y vegetación.....	57
5 Resultados y discusión	59
5.1 Zona de estudio.....	59
5.2 Delimitación de regiones homogéneas	60
5.3 Complementado de información.....	62
5.4 Aplicación de la prueba de independencia a las series de escurrimiento	65
5.5 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad	68

5.5.1 Series de escurrimiento medio, escurrimientos máximos y mínimos instantáneos	68
5.5.2 Series de las variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima)	73
5.6 Resultados de la prueba de tendencia (Mann Kendall)	82
5.6.1 Series de escurrimiento medio, escurrimientos máximos y mínimos instantáneos	82
5.6.2 Series de las variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima)	86
5.7 Tendencia de los índices del cambio climático del ETCCDI	95
5.8 Cambio de uso de suelo y vegetación	112
5.9 Análisis de resultados	118
5.9.1 Subcuenca de la estación 28003	119
5.9.2 Subcuenca de la estación 28040	125
5.9.3 Subcuenca de la estación 28069	134
5.9.4 Subcuencas de las estaciones 28108 y 28111	142
6 Conclusiones	155
7 Bibliografía	157

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Clasificación de la distribución general de valores extremos (GVE).	25
Tabla 3.2 Monomios algebraicos en términos de las coordenadas X y Y para una función polinomial, hasta el grado 6 (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).....	30
Tabla 3.3 Valores críticos para la prueba de Pettit, para el nivel de significancia de 1 y 5%.....	37
Tabla 3.4 Valores críticos para la prueba Normal estándar, para el nivel de significancia de 1 y 5%.	38
Tabla 3.5 Valores críticos para la prueba de Buishand, para el nivel de significancia de 1 y 5%. 40	
Tabla 3.6 Valores críticos para la prueba de Von Neumann, para el nivel de significancia de 1 y 5%.....	40
Tabla 3.7 Lista de los índices climáticos de ETCCDMI (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).....	45
Tabla 5.1 Regiones homogéneas de las estaciones hidrométricas.	60
Tabla 5.2 Regiones homogéneas de las estaciones climatológicas con una altura entre 0 y 1,000 msnm.	61
Tabla 5.3 Regiones homogéneas de las estaciones climatológicas con una altura entre 1,000 y 2,000 msnm.	61
Tabla 5.4 Variación porcentual de los estadísticos, en el complementado de las variables hidrométricas.....	63
Tabla 5.5 Periodo y longitud de los registros de las estaciones hidrométricas.	63

Tabla 5.6 Variación porcentual de los estadísticos, en el complementado de las variables climatológicas.....	64
Tabla 5.7 Periodo y longitud de los registros de las estaciones climatológicas.....	65
Tabla 5.8 Dictamen de la prueba de independencia de Anderson para los escurrimientos anuales medios.	66
Tabla 5.9 Dictamen de la prueba de independencia de Anderson para los escurrimientos anuales máximos instantáneos.	67
Tabla 5.10 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para los escurrimientos máximos instantáneos (series anuales).....	70
Tabla 5.11 Dictamen de las pruebas de homogeneidad para los escurrimientos máximos instantáneos (series periódicas y mensuales).	71
Tabla 5.12 Dictamen de las pruebas de homogeneidad para el escurrimiento medio (series anuales, periódicas y mensuales).	71
Tabla 5.13 Dictamen de las pruebas de homogeneidad para los escurrimientos mínimos instantáneos (series anuales, periódicas y mensuales).	73
Tabla 5.14 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la precipitación acumulada (series anuales, periódicas y mensuales).	75
Tabla 5.15 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la precipitación máxima (series anuales, periódicas y mensuales).	76
Tabla 5.16 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la temperatura máxima promedio (series anuales, periódicas y mensuales).....	80

Tabla 5.17 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la temperatura mínima promedio (series anuales, periódicas y mensuales).....	81
Tabla 5.18 Tendencia del escurrimiento máximo instantáneo (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.	84
Tabla 5.19 Tendencia del escurrimiento medio (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.	85
Tabla 5.20 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.	86
Tabla 5.21 Tendencia de la precipitación acumulada (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.	88
Tabla 5.22 Tendencia de la precipitación máxima (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.	89
Tabla 5.23 Tendencia de la T_{\max} promedio (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.	92
Tabla 5.24 Tendencia de la T_{\min} promedio (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.	93
Tabla 5.25 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30003.....	97
Tabla 5.26 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30032.....	98

Tabla 5.27 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30048.....	99
Tabla 5.28 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30056.....	100
Tabla 5.29 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30066.....	101
Tabla 5.30 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30093.....	102
Tabla 5.31 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30094.....	104
Tabla 5.32 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30114.....	105
Tabla 5.33 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30136.....	106
Tabla 5.34 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30141.....	108
Tabla 5.35 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30158.....	109
Tabla 5.36 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30179.....	110

Tabla 5.37 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30193..... 111

Tabla 5.38 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28003. 115

Tabla 5.39 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28030. 115

Tabla 5.40 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28040. 116

Tabla 5.41 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28069. 117

Tabla 5.42 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28108. 117

Tabla 5.43 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28111. 118

Lista de figuras

Figura 3.1 Gráfica tipo de la regionalización por el coeficiente de variación	22
Figura 3.2 Gráfica tipo de la regionalización por momentos-L.	24
Figura 3.3 Gráfica tipo de la regionalización por el parámetro β de la GVE.....	25
Figura 3.4 Gráfica tipo de la regionalización por los trazos multidimensionales	27
Figura 5.1 Área de estudio, localización de las cuencas.	59
Figura 5.2 Distribución de las estaciones hidrométricas.	60
Figura 5.3 Distribución de las estaciones climatológicas.	62
Figura 5.4 Gráficas de la prueba de independencia de Anderson para el escurrimiento medio. ...	66
Figura 5.5 Gráficas de la prueba de independencia de Anderson para el escurrimiento máximo instantáneo.....	67
Figura 5.6 Resumen de la prueba de Mann Kendall para los escurrimientos.	83
Figura 5.7 Resumen de la prueba de Mann Kendall para la precipitación.....	87
Figura 5.8 Resumen de la prueba de Mann Kendall para la temperatura.	91
Figura 5.9 Resumen de la prueba de Mann Kendall para los índices de cambio climático (temperatura).	95
Figura 5.10 Resumen de la prueba de Mann Kendall para los índices de cambio climático (precipitación).	95
Figura 5.11 Cambios de uso de suelo (de 1985 al 2014) de las subcuencas medidas por las estaciones hidrométricas en análisis.....	114

Figura 5.12 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en la subcuenca 28003.	119
Figura 5.13 Tendencia del escurrimiento medio (m ³ /s). Estación 28003.....	120
Figura 5.14 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m ³ /s). Estación 28003.	120
Figura 5.15 Tendencia del índice R20 (días). Estación 30179.....	121
Figura 5.16 Tendencia del índice R10 (días). Estación 30193.....	121
Figura 5.17 Tendencia de la temperatura mínima promedio (°C). Estaciones 30179 y 30193. ..	122
Figura 5.18 Tendencia del índice SU25 (días). Estación 30179.	122
Figura 5.19 Tendencias del índice TR20 (días). Estaciones 30179 y 30193.	123
Figura 5.20 Tendencia del índice Tn10p (días). Estaciones 30179 y 30193.	123
Figura 5.21 Tendencia del índice Tn90p (días). Estación 30179.....	124
Figura 5.22 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en la subcuenca 28040.	125
Figura 5.23 Tendencia del escurrimiento medio (m ³ /s). Estación 28040.....	126
Figura 5.24 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m ³ /s). Estación 28040.	126
Figura 5.25 Tendencia de la precipitación acumulada (mm). Estación 30066.	127
Figura 5.26 Tendencias del índice Rx5day (mm). Estación 30066.	128
Figura 5.27 Tendencias del índice SDII (mm/día). Estación 30066.	128
Figura 5.28 Tendencias del índice R20 (días). Estación 30066.	129
Figura 5.29 Tendencia de la temperatura máxima promedio (°C). Estaciones 30056 y 30066...	130

Figura 5.30 Tendencias del índice SU25 (días). Estaciones 30056 y 30066.	131
Figura 5.31 Tendencias del índice TNx (°C). Estación 30066.....	132
Figura 5.32 Tendencias del índice Tx10p (días). Estación 30056.	133
Figura 5.33 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en la subcuenca 28069.	134
Figura 5.34 Tendencia del escurrimiento máximo instantáneo (m3/s). Estación 28069.	135
Figura 5.35 Tendencia del escurrimiento medio (m3/s). Estación 28069.....	135
Figura 5.36 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m3/s). Estación 28069.	135
Figura 5.37 Tendencias del índice SDII (mm/días). Estación 30032.....	136
Figura 5.38 Tendencia de la precipitación acumulada (mm). Estación 30094	137
Figura 5.39 Tendencias del índice Rx5day (mm). Estación 30094.	137
Figura 5.40 Tendencias del índice R20 (días). Estación 30094.	138
Figura 5.41 Tendencias del índice CWD (días). Estación 30094.	139
Figura 5.42 Tendencias de la temperatura máxima promedio (°C). Estación 30032.....	139
Figura 5.43 Tendencias de la temperatura mínima promedio (°C). Estaciones 30032 y 30094. .	140
Figura 5.44 Tendencias del índice SU25 (días). Estación 30032.....	141
Figura 5.45 Tendencias del índice TR20 (días). Estación 30094.....	142
Figura 5.46 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en las subcuencas 28108 y 28111.....	143

Figura 5.47 Tendencia del escurrimiento máximo instantáneo (m ³ /s). Estaciones 28108 y 28111.	143
Figura 5.48 Tendencia del escurrimiento medio (m ³ /s). Estaciones 28108 y 28111.	144
Figura 5.49 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m ³ /s). Estaciones 28108 y 28111.	145
Figura 5.50 Tendencias del índice CDD (días). Estaciones 30003 y 30114.	146
Figura 5.51 Tendencias de la temperatura máxima promedio (°C). Estaciones 30003 y 30114.	148
Figura 5.52 Tendencias de la temperatura mínima promedio (°C). Estaciones 30003 y 30114.	149
Figura 5.53 Tendencias del índice SU25 (días). Estaciones 30114.	149
Figura 5.54 Tendencias del índice TR20 (días). Estaciones 30158.	150
Figura 5.55 Tendencias del índice TXx (°C). Estaciones 30114 y 30158.	151
Figura 5.56 Tendencias del índice TNx (°C). Estaciones 30003 y 30158.	153
Figura 5.57 Tendencias del índice TNn (°C). Estaciones 30114 y 30158.	154

1 Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida y por lo tanto es indispensable para todas las actividades diarias de la sociedad, es por ello que es necesario conocer la cantidad de agua disponible para la población, para así realizar una planeación adecuada. El uso del agua en las actividades del ser humano se divide en sectores, y la distribución en ellos depende del grado de desarrollo del país, pero en promedio a nivel mundial el 12% del agua se usa en el sector municipal, el 19% es para el sector industrial y el 69% es para la agricultura; en México se sabe que el 77% del agua se usa en la agricultura, el 14% es de uso municipal y solamente el 9% es para uso industrial (FAO, 2016), lo que muestra la importancia del recurso hídrico en la producción agroalimentaria del país. No solamente es importante saber la cantidad de agua que se usa, sino que es necesario conocer la fuente de la misma, para tener así un mejor panorama del recurso; de acuerdo a la CONAGUA (2011) citado por FAO (2016) el agua utilizada en México, proviene principalmente de las fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos) y representan el 60.19%, mientras que el 37.34% del agua utilizada en el país proviene de fuentes subterráneas (acuíferos), por lo que es importante el estudio del estado de los escurrimientos en el país para el uso eficiente de los mismos, ya que dependemos en gran medida de ellos.

Con base en las estadísticas dadas por la FAO (2016) México tiene 3, 687 m³/hab/año de agua renovable per cápita, lo que se considera un volumen de baja disponibilidad, aunque esto depende en gran medida de la región del país que se analice, ya que el altiplano tiene una mayor presión sobre el recurso hídrico, debido a que concentra el 70% de la población y es la región con mayor desarrollo industrial y agrícola, pero solamente cuenta con la tercera parte del escurrimiento medio anual, esta presión sobre el recurso toma en cuenta el efecto del crecimiento demográfico, la creciente concentración urbana, la contaminación de cuerpos de agua y la sobreexplotación de los recursos hídricos, si a esta tendencia se le añaden los efectos del cambio climático, que en México serán mayormente de reducción de la disponibilidad de agua, agravará el escenario futuro (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012).

Actualmente, se atribuye a las alteraciones del uso y cobertura de suelo como los factores que determinan los cambios ambientales a nivel global (García Nieto, García Daguer, Moreno

Sánchez, & Gonzáles Ramos, 2002); estas alteraciones afectan principalmente a la evapotranspiración, la precipitación y la temperatura; aunque también, la pérdida de la vegetación natural y los cambios de uso de suelo, influyen directamente en la pérdida de hábitat y de especies, la pérdida de valores culturales y estéticos, la reducción de los recursos forestales, el incremento en la erosión, la pérdida de la fertilidad del suelo (Galicia, García-Romero, Gómex-Mendoza, & Ramírez, 2007), el transporte de sedimentos y, posteriormente, la sedimentación; así como la alteración del ciclo hidrológico lo cual implica disminución de la calidad del agua, mayor riesgo de inundaciones en áreas urbanas, entre otros efectos (García Nieto, García Daguer, Moreno Sánchez, & Gonzáles Ramos, 2002).

Hoy en día muchas de las cuencas en México se encuentran alteradas, debido a la expansión agrícola, ganadera y urbana, lo cual provoca que la reacción de la cuenca ante los diversos fenómenos meteorológicos se vea modificada. Un ejemplo de la alteración en la dinámica de las cuencas se observa cuando se remueve la vegetación natural de las áreas forestales, lo que genera que ante lluvias intensas no exista intercepción por parte de la vegetación, lo cual provoca un sellamiento en el suelo, esto reduce la capacidad de infiltración y por lo tanto altera los escurrimientos, estas alteraciones propician que el escurrimiento puede llegar a constituir hasta el 30% de la precipitación total (Galicia, 2014). En general, en las cuencas donde se ha alterado la zona forestal por cultivos o pastizales, se han registrado aumentos en los escurrimientos anuales, pero se tiene registro de una disminución de los escurrimientos en la estación seca (Bruijnzeel, 2004 citado por Muñoz-Villers, y otros, 2015), esto es debido, en gran medida, a que el cambio de uso de suelo puede llegar a reducir la retención de agua en el suelo entre 5 y 25% (Galicia, 2014); además, estos cambios de uso de suelo llegan a incrementar la erosión y con ello la carga de sedimentos en la escorrentía, modificando así la calidad del agua. Con el arrastre de sedimentos se puede llegar a favorecer la pérdida de nutrientes en el suelo hasta un 15% (Galicia, 2014).

Es importante señalar que las alteraciones al medio que nos rodea tienen consecuencias directas en nuestra forma de vida, estas consecuencias no solamente se presentan como desastres naturales, sino que implican cambios en el estilo de vida que se pueden presentar de manera gradual, esto es debido a la interacción que existe entre clima y sociedad. La respuesta de la sociedad ante estos cambios en el medio, depende en gran medida del sector social en el que se encuentre, lamentablemente los sectores poblacionales más vulnerables, como los pequeños

agricultores, tienen una mínima capacidad de sobrellevar estos riesgos como son la degradación del suelo, cambios en la temperatura y la incertidumbre en la disponibilidad de agua, los cuales impactan directamente en su estándar de vida (Sánchez-Cohen, y otros, 2008). También, las variaciones climáticas en el país pueden alterar la dinámica poblacional, como la emigración del medio rural, que se puede explicar tomando en cuenta variables climáticas y socioeconómicas, las cuales muestran una correlación cuantificable entre el clima de los estados de la república que mayoritariamente “expulsan” productores al extranjero, y el número de personas que emigran, como lo explica Sánchez-Cohen, y otros (2008).

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente, el entorno en el que habitamos está sufriendo alteraciones en los patrones del clima, lo que afecta directamente el estilo de vida de la sociedad, estas alteraciones podrían verse reflejadas en la disponibilidad del recurso hídrico, en cantidad y calidad, para satisfacer nuestros requerimientos diarios, por lo cual se hace evidente la necesidad de conocer si existen variaciones en la disponibilidad del mismo. Si llegasen a haber alteraciones en la disponibilidad de agua, es importante conocer la magnitud y temporalidad de los cambios, que es el punto de partida para realizar un plan de manejo de los recursos hídricos acorde a las nuevas condiciones; de igual manera es de vital importancia conocer los factores que provocan dichas alteraciones, ya que con ello se deben de realizar acciones para mitigarlas.

La pregunta de investigación que motivo el siguiente trabajo es:

¿Se ha visto modificado el comportamiento de los escurrimientos en la cuenca y cuales han sido los factores que lo han propiciado?

1.2 Objetivo general

A partir de la información disponible en México, plantear la metodología para identificar el estado de conservación de una cuenca, específicamente analizar si existen variaciones en los regímenes de escurrimiento de la cuenca, así como identificar si dichas variaciones son debidas a variaciones climáticas o por efecto de cambio de uso y cobertura de suelo.

1.3 Objetivos particulares

- Obtener las series de registros adecuadas, para analizar el comportamiento de la cuenca, en cantidad (período mayor a 50 años de registro) y calidad (realizar un control de calidad de los datos).
- A partir de los registros de las estaciones hidrométricas y climatológicas, analizar si existe tendencia en el escurrimiento de las series anuales, mensuales y las series de los períodos otoño-invierno y primavera-verano.
- A partir de las series climatológicas, temperatura y precipitación, obtener los 27 índices del cambio climático elaborados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI), para las series anuales, mensuales y las series de los períodos otoño-invierno y primavera-verano.
- Analizar la evolución del uso y cobertura de suelo, a partir de los datos vectoriales de uso de suelo y vegetación de INEGI.

1.4 Justificación

Teniendo en consideración que el agua es un recurso finito y vulnerable en la disponibilidad en una cuenca, analizar la variación de los escurrimientos es indispensable para tener un mejor conocimiento del estado de conservación de la cuenca, lo cual brinda información sobre la disponibilidad del recurso hídrico, si esta disponibilidad se ha mantenido constante o si ya ha sufrido algún cambio en su régimen, lo que es fundamental en la toma de decisiones al realizar un

plan de manejo de los recursos hídricos o elaborar planes de mitigación de riesgos, ya que cambios en la tendencia de los flujos pueden aumentar o disminuir la probabilidad de que se presenten eventos de inundación y sequía.

2 Estado del arte

En México se han realizado estudios sobre la variación de los escurrimientos debido al cambio de uso de suelo, como el llevado a cabo en Veracruz, México, donde se analizaron tres cuencas (con diferente grado de conservación) y se observó que para un evento máximo la cuenca alterada por pastizales, registró aproximadamente siete veces más flujos superficiales que las cuencas boscosas; además de que se observaron escurrimientos hasta 70% más bajos en la cuenca alterada por pastizales, al final de la época de estiaje (Muñoz-Villers, y otros, 2015). Otro estudio sobre la misma línea fue realizado por Salas-Aguilar, y otros (2014) donde analizaron la respuesta del flujo hídrico a los cambios en el clima y cobertura forestal en una subcuenca en el estado de Chiapas, México, donde reportan que el flujo anual descendió 34 mm del período base al período de cambio, aunque la cobertura forestal tuvo un aumento, la precipitación presentó una disminución, lo que provocó la disminución en los flujos.

En México se han llevado a cabo estudios de variabilidad climática, donde los resultados han variado de acuerdo a la región donde fueron realizados, ejemplo de estos estudios fue el hecho en el estado de Jalisco donde se llegó a la conclusión de que se espera una disminución de la precipitación en el mediano y largo plazo (Núñez-González & García-Suárez, 2018); por otro lado en el estado de Guerrero se encontraron señales significativas de incremento en los extremos climáticos, sobre todo los relacionados con la humedad del estado (Mendoza-Uribe & Vázquez-Zavaleta, 2017); y finalmente, estudios en Chiapas han encontrado variaciones en las series climatológicas, ejemplo de estos son los resultados dados por Figueroa-Gallegos (2016) en el río Sabinal, donde se identificó que existe tendencia ascendente significativa en la temperatura mínima y máxima, mientras que un estudio más extenso llevado a cabo en la costa de Chiapas, realizado por Escalante-Sandoval & Amores-Rovelo (2014), encontró que la precipitación de lluvia, temperatura máxima, temperatura mínima, evapotranspiración y escurrimiento, presentan zonas con tendencia temporal en las series de acumulados y promedios en los períodos de años agrícolas, primavera-verano y otoño-invierno.

3 Revisión de literatura

3.1 Calidad de la información

En el análisis del comportamiento de las variables hidroclimáticas es importante verificar la calidad de la información con la que se trabaja, ya que de ello depende, en gran medida, las conclusiones a las que se llegue. Analizar la información para evitar inconsistencia en el registro disminuye la incertidumbre de los resultados de cualquier análisis, por lo cual se recurrió a las verificaciones descritas por Brunet-India (2010) y Mendoza-Uribe & Vázquez-Zavaleta (2017):

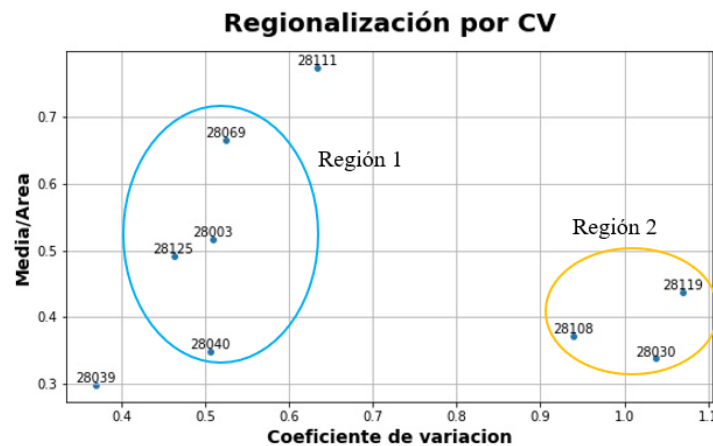
- Verificación de grandes errores: Valores aberrantes (precipitación negativa, temperaturas imposibles y escurrimientos negativos), consistencia con las fechas del calendario, derivas en comas y cadenas de datos consecutivos idénticos, entre otros.
- Pruebas de tolerancia: se realiza la identificación de valores considerados como valores extremos, que queden fuera del rango de variabilidad esperable para cada tipo de clima y que exceden unos límites inferiores y superiores, de las variables hidroclimáticas, previamente establecidos.
- Pruebas de consistencia interna: se lleva a cabo la inspección de la coherencia entre los valores que adquiere el dato examinado y los valores que tiene otras variables relacionadas. Se analiza que la temperatura mínima sea menor o igual que la temperatura máxima; los registros de precipitación deben de ser mayores o iguales a cero.
- Pruebas de coherencia temporal: se examina la consistencia entre valores consecutivos observados en cualquier intervalo que superen la cantidad de cambio esperable entre una observación y la siguiente. La prueba se realiza para los datos diarios de la temperatura mínima y máxima, para lo cual se establece una diferencia máxima de 15°C entre una observación y la siguiente.

3.2 Técnicas de regionalización

3.2.1 Coeficiente de variación

La técnica de regionalización del coeficiente de variación consiste en realizar una comparación gráfica del atributo estadístico del coeficiente de variación con respecto a la media de los registros, de cada estación, entre el área de la cuenca. Este método no establece límites para la determinación de las regiones, sino que es puramente gráfico, las estaciones con comportamiento más cercano son las mismas que pertenecen a una región, el número de regiones son tal como el número de grupos en que se agrupan las estaciones en la gráfica (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2008).

Figura 3.1 Gráfica tipo de la regionalización por el coeficiente de variación



3.2.2 Coeficiente de variación de los momentos-L

Los momentos-L son análogos a los momentos convencionales, sin embargo, tienen cierta ventaja sobre ellos, ya que son capaces de caracterizar a un mayor número de distribuciones, además de estar virtualmente libre de sesgo aún para muestras pequeñas (Hosking, 1990). De los 4 primeros momentos de probabilidad pesada:

$$M(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad (3.1)$$

$$M(1) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=0}^{n-1} x_i(n-i) \quad (3.2)$$

$$M(2) = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=0}^{n-2} x_i(n-i)(n-i-1) \quad (3.3)$$

$$M(3) = \frac{1}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=0}^{n-3} x_i(n-i)(n-i-1)(n-i-2) \quad (3.4)$$

Donde: x_i , es la variable analizada; n , es el tamaño de la muestra.

Los momentos-L son:

$$\lambda_1 = M(0) \quad (3.5)$$

$$\lambda_2 = 2M(1) - M(0) \quad (3.6)$$

$$\lambda_3 = 6M(2) - 6M(1) + M(0) \quad (3.7)$$

$$\lambda_4 = 20M(3) - 30M(2) + 12M(1) - M(0) \quad (3.8)$$

y los coeficientes L se definen como:

$$\text{Coeficiente de variación} - L; \zeta_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (3.9)$$

$$\text{Coeficiente de sesgo} - L; \zeta_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (3.10)$$

$$\text{Coeficiente de curtosis} - L; \zeta_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (3.11)$$

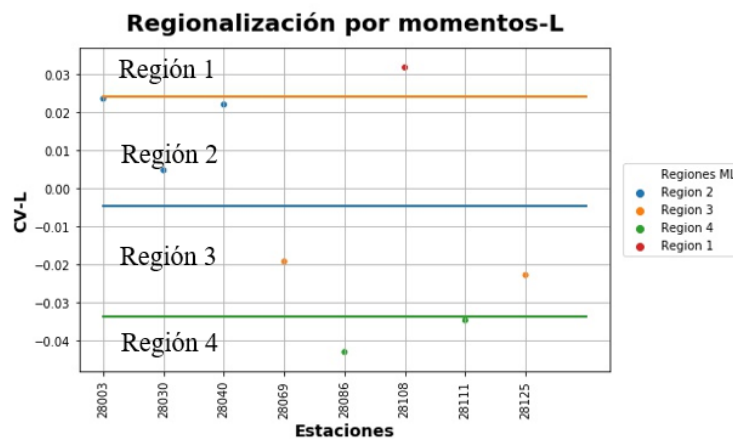
El método del coeficiente de variación de los momentos L (CV-L) se basa en la obtención del coeficiente de variación L (3.9). Para cada registro de las estaciones se obtienen los CV-L, a partir de los cuales se obtienen el promedio y la desviación estándar con lo que se definió el límite superior (3.12) y el límite inferior (3.13), por lo cual con esta técnica se tiene cuatro potenciales regiones para las estaciones analizadas, la región 1 para aquellos valores superiores al límite superior; la región 2 para los valores que se encuentran entre la media y el límite superior; la región 3 se define a los valores que se localizan arriba del límite inferior y por debajo de la media; y finalmente, los valores menores a el límite inferior son considerados como parte de la región 4.

$$\text{límite superior} = \bar{X}_{T_2} + S_{T_2} \quad (3.12)$$

$$\text{límite inferior} = \bar{X}_{T_2} - S_{T_2} \quad (3.13)$$

Donde \bar{X}_{T_2} es el promedio y S_{T_2} hace referencia a la desviación estándar de los coeficientes de variación de los momentos-L.

Figura 3.2 Gráfica tipo de la regionalización por momentos-L.



3.2.3 Parámetro β de la distribución general de valores extremos (GVE)

El parámetro de forma de la distribución general de valores extremos se obtiene por la técnica de los momentos-L como quedó establecido en las ecuaciones (3.14) y (3.15).

$$\hat{\beta} = 7.859E + 2.9554E^2 \quad (3.14)$$

$$E = \left[\frac{2M(1) - M(0)}{3M(2) - M(0)} \right] - \left[\frac{\ln(2)}{\ln(3)} \right] \quad (3.15)$$

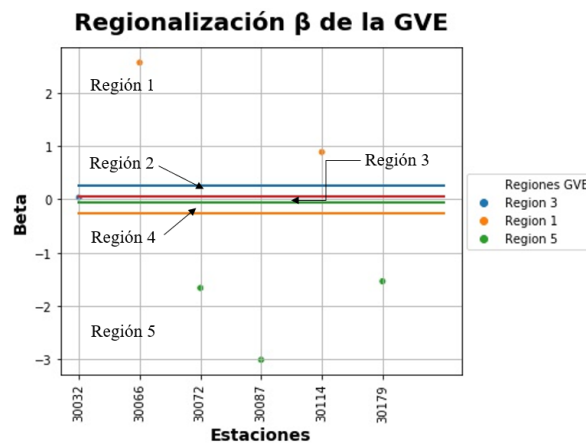
Donde: $M(0)$, $M(1)$, $M(2)$, son los primeros momentos de probabilidad pesada.

Tabla 3.1 Clasificación de la distribución general de valores extremos (GVE).

Parámetro de forma	Tipo	Nombre
$\beta = 0$	I	Gumbel
$\beta < 0$	II	Fréchet
$\beta > 0$	III	Weibull

La técnica consiste en agrupar las estaciones de acuerdo al valor del parámetro de forma (3.14), el cual hace referencia al tipo de distribución GVE a la cual se ajusta mejor los registros (tabla 3.1). Este método genera 5 regiones potenciales; la región 1, es aquella en la que los valores del parámetro de forma de las estaciones es mayor a 0.25; la región 2, hace referencia a los valores que se encuentran entre 0.25 y 0.05; la región 3, la forman aquellos valores que se encuentran alrededor de 0, entre 0.05 y -0.05; los valores entre -0.05 y -0.25 se definen como pertenecientes a la región 4; y finalmente para los valores menores que -0.25 se clasifican dentro de la región 5.

Figura 3.3 Gráfica tipo de la regionalización por el parámetro β de la GVE.



3.2.4 Trazos multidimensionales (*curvas de Andrews*)

La técnica de los trazos multidimensionales parte de las características fisiográficas de la cuenca, y aplica la técnica de regresión lineal múltiple para seleccionar las características más relevantes en una cuenca, lo cual implica una mejor definición de las regiones homogéneas (Nathan & McMahon, 1990 citado por Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2008), la ecuación (3.16) define la regresión lineal que determina el orden de las características más relevantes.

De acuerdo a Escalante Sandoval & Reyes Chávez (2008), esta técnica genera agrupamientos de las curvas, lo cual lo hace ideal para la comparación visual, debido a que las variables se evalúan mediante una técnica de posicionamiento, definida en la ecuación (3.17) la cual representa una curva en dos dimensiones (Andrews, 1972).

$$Q_T = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.16)$$

$$f(t) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t) + \dots \quad (3.17)$$

Donde, Q_T es el escurrimiento estimado para un período de retorno T ; x_1, x_2, \dots, x_n son las características fisiográficas; la función $f(t)$ se evalúa en el rango de $-\pi \leq t \leq \pi$.

Las curvas generadas dependen en gran medida del posicionamiento de las características (x_1, x_2, \dots).

El procedimiento para la obtención de las curvas propuestas por Andrews (1972) es el siguiente:

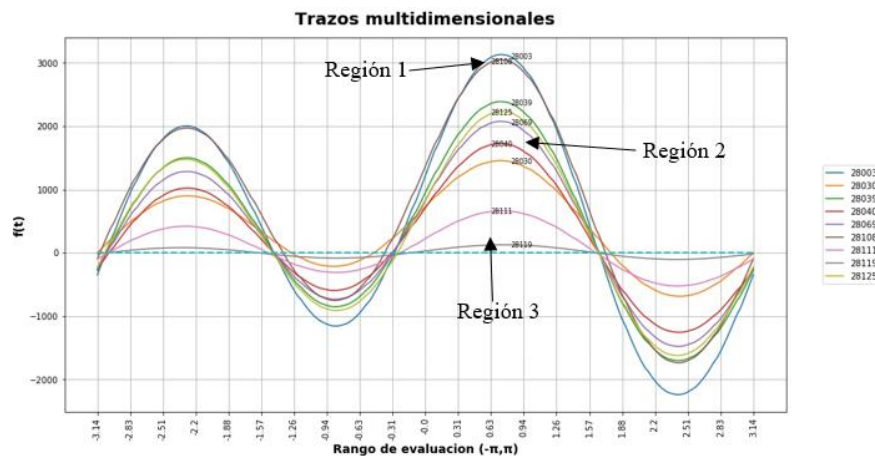
- A partir del registro con período en común de las estaciones hidrométricas en análisis, se obtiene la distribución de probabilidades con mejor ajuste para cada una de las series; a partir de esta distribución se estiman los escurrimientos para diferente período de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años).
- Teniendo las características fisiográficas de la cuenca, así como los gastos estimados, se procede a definir las características más relevantes, para lo cual se obtiene la correlación entre los escurrimientos y las características a partir de la ecuación (3.16), al obtener los valores absolutos de la correlación se ordenan de manera descendente, debido a que por cada período de retorno se tiene diferente orden de relevancia de las características; se

verifica la frecuencia de la posición en que aparecen ordenadas, así se obtiene un orden general de las características más relevantes (solamente se toman en cuenta aquellas características con un valor de correlación mayor a 0.5) lo que marca el fin de la primera iteración. En la segunda iteración se repite el procedimiento de la primera, solamente que en esta iteración se seleccionan las características más relevantes.

- Con las características fisiográficas más relevantes de las cuencas se procede a aplicar la ecuación (3.17), para lo cual se evalúa y grafica de $-\pi \leq t \leq \pi$. Las curvas que representan el comportamiento de las estaciones deben de estar bien definidas. El número de regiones definidas es variable y si en algún punto se tiene incertidumbre de a qué región pertenece alguna curva se aplica la ecuación (3.18), y así definir su pertenencia.

$$SS = \sum_{t=-\pi}^{\pi} \{ [f^j(t)] - [\bar{f}(t)]_k \}^2 \quad (3.18)$$

Figura 3.4 Gráfica tipo de la regionalización por los trazos multidimensionales



3.2.5 Región de influencia (distancia euclidiana)

La técnica de regionalización de la región de influencia o también conocida como distancia euclidiana, se basa en la medición de la distancia en un espacio de atributos multidimensionales, ecuación (3.19), dichos atributos pueden ser las características fisiográficas o climatológicas de la cuenca. A los atributos utilizados se les aplica un proceso de estandarización, debido a que con ello

se eliminan las unidades en las cuales se encuentra cada uno de los atributos, lo cual permite que sean comparables. Teniendo los atributos estandarizados se determina la distancia euclidiana entre una estación “j” y la estación base “e”, a partir de la ecuación (3.19) (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2008).

Cada estación analizada presenta una distancia euclidiana con el resto de las estaciones, por lo cual se considera a todas las estaciones cuya distancia es menor a la media como pertenecientes a una misma región. Es importante señalar que cada estación presenta su propia región homogénea.

$$D_{ei} = \left[\sum_{i=1}^p (C_j^e - C_j^i)^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

$$C_j^e = \frac{x_j^e}{s(x^e)} \quad (3.20)$$

$$C_j^i = \frac{x_j^i}{s(x^i)} \quad (3.21)$$

Donde: p , es el número de atributos considerados; e , es el indicador de la estación base; i , es el indicador de las estaciones vecinas; C_j^e y C_j^i , son los valores estandarizados del atributo i para los sitios j y la estación base e ; x_j^e , valores del atributo i del sitio e ; x_j^i , valores del atributo i del sitio j ; $s(x^i)$, desviación estándar del atributo i considerando todos los sitios j y la estación e .

3.3 Técnicas de interpolación

En muchas ocasiones los registros de las variables climáticas presentan períodos con falta de información, lo cual puede implicar que se descarte la serie completa, o que se vea dividida de acuerdo a la cantidad de información faltante, sin embargo, si se opta por complementar la información faltante existen técnicas para calcular el dato faltante con la menor incertidumbre, algunas técnicas se basan únicamente en la interpolación espacial, otras toman en cuenta el comportamiento de las variables en las estaciones vecinas.

Sean X_j y Y_j las coordenadas de un punto j en un espacio bidimensional, y P_j una función de esas coordenadas que denota el proceso observado en n estaciones de medición, j es el subíndice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido, $j = 1, 2, \dots, n$. P_e es una estimación del proceso en un punto de coordenadas X_e y Y_e la estimación puntual se tiene a partir de los datos medidos en las n estaciones y se puede representar por la ecuación (3.22), que es una forma general de la función de interpolación llamada Condición de linealidad (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad (3.22)$$

3.3.1 Método de Thiessen

La estimación del proceso P_e en el sitio de interés “ e ” es igual al valor observado de la estación más cercana en el área. Esta estimación puede representarse como $P_e = P_j$. La distancia se determinará desde el sitio de interés “ e ” a cualquier sitio j , para $j = 1, 2, \dots, n$ sitios (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

$$d_{ej} = \sqrt{(X_e - X_j)^2 + (Y_e - Y_j)^2} \quad (3.23)$$

$$d_{ej} = \min(d_{e1}, d_{e2}, \dots, d_{en}) \quad (3.24)$$

Donde: d_{ej} , es la distancia entre el sitio de interés y la estación j ; X_e y Y_e , son las coordenadas del sitio de interés; X_j y Y_j , son las coordenadas de la estación j .

3.3.2 Método de la interpolación polinomial

Este método consiste en ajustar una ecuación global para el área de estudio, que está en función de las coordenadas del sitio a interpolar, empleando una función polinomial (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

$$P_e = \sum_{k=1}^m \theta_k \varphi_k(X_e, Y_e) \quad (3.25)$$

Donde: P_e , es el valor interpolado en el punto “e”; θ_k , es el K-esimo coeficiente polinomial; $\varphi_k(X_e, Y_e)$, es el K-esimo monomio en término de las coordenadas (X_e, Y_e) ; m , es el número total de monomios, determinándose del grado de la función polinomial ajustada.

Tabla 3.2 Monomios algebraicos en términos de las coordenadas X y Y para una función polinomial, hasta el grado 6 (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

Grado	K	$\varphi_k(X, Y)$	m
0	1	1	1
1	2-3	x y	3
2	4-6	$x^2 xy y^2$	6
3	7-10	$x^3 x^2 y xy^2 y^3$	10
4	11-15	$x^4 x^3 y x^2 y^2 xy^3 y^4$	15
5	16-21	$x^5 x^4 y x^3 y^2 x^2 y^3 xy^4 y^5$	21
6	22-28	$x^6 x^5 y x^4 y^2 x^3 y^3 x^2 y^4 xy^5 y^6$	28

$$[W_j] = [\alpha k_j]^T [\varphi_k(X_e, Y_e)] \quad (3.26)$$

$$[\alpha k_j] = [Y k_i] [\varphi_{ij}] \quad (3.27)$$

$$[Y k_i] = [\theta_{ki}]^{-1} \quad (3.28)$$

$$[\theta_{ki}] = [\varphi_{ij}] [\varphi_{ij}]^{-1} \quad (3.29)$$

$$[\varphi_{ij}] = \text{matriz de monomios} \quad (3.30)$$

$$\sum_{j=1}^n W_i = 1 \quad (3.31)$$

Para llegar a la estimación de la interpolación se dispone de dos aproximaciones: la de mínimos cuadrados que es cuando $m < n$ y la aproximación de Lagrange cuando $m = n$, siendo n

el número de estaciones tomadas en cuenta para el método. Para obtener la estimación se aplica la ecuación (3.22), solamente si se cumple la ecuación (3.31).

3.3.3 Método de la interpolación inversa (IDW)

La técnica de la interpolación inversa pertenece a una familia de métodos de distancia pesada (Tabios & Salas, 1985). La influencia de la lluvia en una estación para el cálculo de la misma en cualquier punto es inversamente proporcional a la distancia de los puntos. El método da mayor peso a la estación más cercana, y se reduce conforme la distancia sea mayor, dependiendo del exponente “ β ” (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014). Para obtener la estimación se aplica la ecuación (3.22).

$$W_j = \frac{\left[1/d_{ej}\right]^\beta}{\sum_{i=1}^{mp} \left[1/d_{ej}\right]^\beta} \quad (3.32)$$

Donde: d_{ej} , distancia entre la estación “e” y la “j”; para $\beta = 1$ Interpolación de la distancia mínima y $\beta = 2$ Interpolación de la distancia inversa al cuadrado.

3.3.4 Método de la interpolación multicuadrática

En la interpolación multicuadrática la influencia de cada estación de medición es representada por superficies cuadradas de conos como función de sus coordenadas (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014). La aplicación del método requiere de obtener las siguientes matrices. Para obtener la estimación se aplica la ecuación (3.22).

$$[d_{ij}] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & & & \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$[d_{ej}] = \begin{bmatrix} d_{e1} \\ d_{e2} \\ \vdots \\ d_{emp} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\delta_{ij} = [d_{ij}]^{-1} \quad (3.35)$$

$$W_j = [\delta_{ij}][d_{ej}] \quad (3.36)$$

Donde: $[d_{ij}]$, representa la matriz de distancia entre estaciones “i” y “j”; $[d_{ej}]$, representa el vector de las distancias entre la estación “e” y las estaciones “j”.

3.3.5 Método de la interpolación óptima

Este método consiste en minimizar la varianza del error medio de interpolación, para determinar los factores de peso de cada estación. La varianza del error medio está expresada en término de los pesos W_j y de la correlación espacial (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014). Esta técnica requiere de las magnitudes de los eventos registrados en cada estación.

$$[W_j] = [\hat{\rho}(d_{ij})]^{-1}[\hat{\rho}(d_{ej})] \quad (3.37)$$

Donde: $\hat{\rho}(d_{ij})$, son los estimadores de correlación espacial.

Se requiere obtener los valores de la estructura de correlación espacial.

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{(n-1)} \frac{\sum_{t=1}^{mp} (P_i^t - m_i)(P_j^t - m_j)}{S_i S_j} \quad (3.38)$$

Donde: P_i^t , son las observaciones de las series de tiempo del proceso P en el sitio i ; P_j^t , son las observaciones de las series de tiempo del proceso P en el sitio j ; m_i y m_j , son las medias de las observaciones en las estaciones i y j ; S_i y S_j , son las desviaciones estándar insesgadas de las observaciones en las estaciones i y j ; mp , es el número de estaciones en común entre pares.

Debido a que la correlación espacial, ecuación (3.38), se obtiene de la distancia entre pares de estaciones, y asumiendo que en el área de estudio el comportamiento de la variable aleatoria P

es homogénea e isotrópica, la función se puede representar por los siguientes modelos propuestos por Yevjevich y Karplus en 1973 (Tabios & Salas, 1985).

- Modelo inverso:

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{1 + d_{ij}/c} \quad (3.39)$$

- Modelo de la potencia inversa

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{(1 + d_{ij}/c)^a} \quad (3.40)$$

- Modelo exponencial

$$\rho(d_{ij}) = e^{-d_{ij}/c} \quad (3.41)$$

Donde: d_{ij} , es la distancia entre las estaciones i y j ; a y c , son constantes a estimarse.

Si $\sum W_i \neq 1$ se debe recalcular utilizando el multiplicador de Lagrange.

$$(d_{ij}) = \begin{bmatrix} \rho(d_{11}) & \rho(d_{1n}) & \dots & 1 \\ \rho(d_{n1}) & \rho(d_{nn}) & \dots & 1 \\ \vdots & & & \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\rho(d_{ij}) = \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \rho(d_{e1}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

3.3.6 Método de la interpolación Kriging

Esta técnica es conceptualmente similar al método óptimo, con la diferencia que las matrices de correlación son remplazadas por un semivariograma $\hat{\gamma}d_{ij}$. La interpolación Kriging requiere que el proceso observado sea estacionario de segundo orden, la técnica supone la

homogeneidad en las medias, varianzas y covarianzas, como consecuencia se asume una estructura de covarianza espacial isotrópica (Tabios & Salas, 1985).

- Kriging ordinario

Los factores de peso quedan expresados como se muestra en la ecuación (3.44).

$$[W_j] = [\hat{\gamma}(d_{ij})]^{-1} [\hat{\gamma}(d_{ej})] \quad (3.44)$$

El semivariograma supone que la variable analizada tiene un comportamiento homogéneo e isotrópico y su representación se ve en la ecuación (3.45), además la ecuación (3.46) hace referencia a la matriz para el Kriging ordinario.

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2N} \sum_{t=1}^N [(P_i^t - m_i)(P_j^t - m_j)]^2 \quad (3.45)$$

$$\gamma(d_{ij}) = \begin{bmatrix} \gamma(d_{11}) & \gamma(d_{1n}) & \dots & 1 \\ \gamma(d_{n1}) & \gamma(d_{nn}) & \dots & 1 \\ \vdots & & & \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$W_j = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$[\hat{\gamma}(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \hat{\gamma}_{e1} \\ \hat{\gamma}_{e2} \\ \vdots \\ \hat{\gamma}_{em} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Donde: P_i^t y P_j^t , son la variable analizada de los sitios i y j para los tiempos $t=1,2,\dots,N$; m_i y m_j , son las medias de las observaciones en los sitios i y j ; N , es el número total de observaciones entre pares de observaciones; m , es el número de sitios.

- Kriging Universal:

El llamado Kriging Universal es otro esquema de interpolación que intenta incluir la no homogeneidad en la media del proceso, donde las medias pueden ser representadas por una tendencia polinomial que se resumen en el cálculo de los factores de peso (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014), como se ve en la ecuación (3.49).

$$\begin{array}{cccccccccc}
 0 & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \dots & \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{22} & \varphi_{32} & \dots & \varphi_{m1} \\
 \varphi_{21} & 0 & \varphi_{23} & \dots & \varphi_{21} & \varphi_{13} & \varphi_{23} & \varphi_{33} & \dots & \varphi_{m2} \\
 \varphi_{31} & \varphi_{32} & 0 & \dots & \varphi_{31} & \varphi_{14} & \varphi_{24} & \varphi_{34} & \dots & \varphi_{m3} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \varphi_{m1} & \varphi_{m2} & \varphi_{m3} & \dots & 0 & \varphi_{1m} & \varphi_{2m} & \varphi_{3m} & \dots & \varphi_{mm} \\
 \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \dots & \varphi_{1m} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} & \dots & \varphi_{2m} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} & \dots & \varphi_{3m} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \varphi_{m1} & \varphi_{m2} & \varphi_{m3} & \dots & \varphi_{mm} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0
 \end{array}
 \quad = \quad
 \begin{array}{c}
 W_1 \\
 W_2 \\
 W_3 \\
 \dots \\
 W_m \\
 \lambda_1 \\
 \lambda_2 \\
 \lambda_3 \\
 \dots \\
 \lambda_m
 \end{array}
 \quad = \quad
 \begin{array}{c}
 \varphi_{e1} \\
 \varphi_{e2} \\
 \varphi_{e3} \\
 \dots \\
 \varphi_{em} \\
 \varphi_{e1} \\
 \varphi_{e2} \\
 \varphi_{e3} \\
 \dots \\
 \varphi_{em}
 \end{array}
 \quad (3.49)$$

Donde: $\hat{\gamma}_{ij}$, es el semivariograma estimado con el mejor modelo; φ_{ij} , son los monomios entre estaciones i y j .

Los modelos de variograma, también llamados semivariogramas espaciales son los siguientes:

- Modelo lineal:

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = ad_{ij} \quad (3.50)$$

- Modelo monómico. Estos modelos se usan para representar fenómenos no estacionarios:

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = ad_{ij}^b; \text{ para } 0 < b < 2 \quad (3.51)$$

- Modelo exponencial:

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = a[1 - e^{-cd_{ij}}] \text{ para } c > 0 \quad (3.52)$$

- Modelo gaussiano:

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = a \left[1 - e^{-cd_{ij}^2} \right] \text{ para } c > 0 \quad (3.53)$$

- Modelo esférico:

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = a/2 \left[3d_{ij}/c - \left(d_{ij}/c \right)^3 \right] \text{ para } c > 0 \text{ y } d_{ij} < c \quad (3.54)$$

3.4 Prueba de independencia de eventos

Para que se pueda llevar a cabo análisis de frecuencias o pruebas de tendencia, se requiere que la muestra Q_i^j de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, esté compuesta por variables aleatorias, lo cual identifica que la serie es independiente, en el caso de las estaciones hidrométricas asegura que la estación hidrométrica no esté aguas abajo de una obra de control. Para probar la independencia de los eventos se aplica la prueba de independencia de Anderson (Salas, Delleur, Yevjevich, & Lane, 1998), la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso k . Si se analiza un solo registro, entonces $j=1$ (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2}; \text{ para } r_0^j = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3} \quad (3.55)$$

Donde:

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \quad (3.56)$$

Además, los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden obtener como:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \quad (3.57)$$

Si menos del 10% de los valores de r_k^j sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie Q_i^j es independiente, y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

3.5 Pruebas de homogeneidad

3.5.1 Prueba de Pettitt

Es una prueba no paramétrica que se basa en rangos y es usada para identificar un punto de cambio en la media de una serie de tiempo (Pettitt, 1979).

Los rangos r_1, r_2, \dots, r_n de v_1, v_2, \dots, v_n (variables) son usados para calcular x_k .

$$x_k = 2\left[\sum_{i=1}^k r_i - k(n+1)\right]; \text{ para } k = 1, 2, \dots, n \quad (3.58)$$

Donde: r_i , son los rangos obtenidos de la muestra ordenada de menor a mayor.

Si ocurre un punto de cambio en la media en el año el valor absoluto de x_k alcanza su valor máximo:

$$x_k = \max|x_k| \quad (3.59)$$

Tabla 3.3 Valores críticos para la prueba de Pettit, para el nivel de significancia de 1 y 5%.

n	20	30	40	50	70	100
1%	71	133	208	293	488	841
5%	57	107	167	235	393	677

3.5.2 Prueba Normal estándar

Es una prueba paramétrica que asume una hipótesis nula donde los valores de la variable examinada son independientes e idénticamente distribuidos, la hipótesis asume que hay una fecha en la que existe un cambio en la media de los datos, descrita por Alexandersson & Moeberg (1997).

La prueba estadística $T(k)$ es definida como:

$$T(k) = k\bar{z}_1^2 + (n - k)\bar{z}_2^2 \quad (3.60)$$

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(p_i - \bar{P})}{s} \quad (3.61)$$

$$\bar{z}_2 = \frac{1}{n - k} \sum_{i=k+1}^n \frac{(p_i - \bar{P})}{s} \quad (3.62)$$

Donde: \bar{P} , es la media de la serie; p_i , son los valores de la serie para $i = 1, 2, \dots, n$; s , es la desviación estándar de la serie; k , es la numeración de los valores de la serie de 1 a n .

El estadístico de la prueba T_0 es:

$$T_0 = \max T(k) \quad 1 \leq k \leq n \quad (3.63)$$

Si T_0 es superior al valor crítico, la hipótesis nula será rechazada. Los valores críticos dependen del tamaño de muestra. Esta prueba es más sensible al inicio y al final de la serie de tiempo.

Tabla 3.4 Valores críticos para la prueba Normal estándar, para el nivel de significancia de 1 y 5%.

n	20	30	40	50	70	100
1%	9.56	10.45	11.01	11.38	11.89	12.32
5%	6.95	7.65	8.1	8.45	8.8	9.15

3.5.3 Prueba de Buishand

Esta prueba es de origen Bayesiano y hace referencia a un modelo simple que propone detectar un cambio en la media. La prueba se basa en las desviaciones acumuladas de la media descrita por Buishand (1982):

$$S_0^* = 0 \quad (3.64)$$

$$S_k^* = \sum_{i=1}^k (P_i - \bar{P}) \quad (3.65)$$

Donde: \bar{P} , es la media de la serie; P_i , son los valores de la serie para $i = 1, 2, \dots, n$

Para un registro homogéneo se puede considerar que los valores S de S_k^* fluctúan cerca de cero, ya que no existe un patrón sistemático en las desviaciones de los P_i de su valor medio (\bar{P}), cuando la tendencia de la serie es negativa, la mayoría de los valores de S_k^* son positivos porque los valores de P_i son más grandes que \bar{P} . Para una tendencia positiva de la serie, los valores de S_k^* tienden a ser negativos.

La escala modificada de las sumas parciales se obtiene dividiendo los valores de S_k^* entre la desviación estándar de la muestra.

$$Q = \max |S_k^{**}|; \text{ para } 0 \leq k \leq n \quad (3.66)$$

$$R = \frac{(\max S_k^* - \min S_k^*)}{D_p} \quad (3.67)$$

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{D_p}; k = 0, 1, \dots, n \quad (3.68)$$

$$Q_0 = Q / \sqrt{n} \quad (3.69)$$

Donde: D_p , Es la desviación estándar de la muestra.

Si el valor de Q crítico, obtenido de la tabla 3.5, es mayor que Q_0 indica que el punto de cambio en la media no es estadísticamente significativo, por lo que indica que la serie es homogénea.

Tabla 3.5 Valores críticos para la prueba de Buishand, para el nivel de significancia de 1 y 5%.

n	10	20	30	40	50	100
10%	1.05	1.1	1.12	1.13	1.14	1.17
5%	1.14	1.22	1.24	1.26	1.27	1.29
1%	1.29	1.42	1.46	1.5	1.52	1.55

3.5.4 Prueba de Von Neumann

La relación de Von Neumann (1941) se define como:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - Q_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3.70)$$

Donde: \bar{Q} , es la media de las observaciones; Q_i , son las observaciones.

Si la serie es homogénea el valor esperado de Von Neumann es 2. Si la muestra tiene un salto, entonces el valor de N tiende a ser menor que el valor esperado. Si la muestra tiene variaciones rápidas alrededor de la media, entonces $N > 2$. La serie se considera homogénea si el valor de N es mayor al valor crítico obtenido de la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores críticos para la prueba de Von Neumann, para el nivel de significancia de 1 y 5%.

n	20	30	40	50	70	100
1%	1.04	1.2	1.29	1.36	1.45	1.54
5%	1.3	1.42	1.49	1.54	1.61	1.67

3.5.5 Prueba de Fisher

La prueba de Fisher es una prueba no paramétrica que relaciona la varianza de los subconjuntos, de longitud similar y sin presentar traslape (u_1 y u_2), de la serie completa. La prueba mide la estabilidad de la varianza a pesar de que los datos no se apeguen a la distribución normal. La hipótesis nula es “las varianzas de los subconjuntos son iguales”. La prueba de Fisher requiere de un coeficiente F_t que relaciona las varianzas de las submuestras descrita por Snedecor & Cochran (1989) (Castro & Carvajal Escobar, 2010).

$$F_t = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (3.71)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.72)$$

Donde: x_i , son las observaciones; n , es el número total de datos; \bar{x} , es la media de las observaciones.

F_t se compara con la distribución F de Fisher para $u_1 = n_1 - 2$ y $u_2 = n_2 - 2$ grados de libertad. Si F es mayor que F_t indica que la serie es homogénea.

3.5.6 Prueba de Helmert

La prueba de Helmert consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento en estudio (x_i) con respecto al valor de su media (\bar{x}). Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo se dice que se forma una secuencia “s”, de lo contrario se considera un cambio “c” (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014). Si se cumple la ecuación (3.73) la serie se considera homogénea.

$$-\sqrt{n-1} \leq (s - c) \leq \sqrt{n-1} \quad (3.73)$$

Donde: n , indica el tamaño de la muestra.

3.5.7 Prueba t de student

Si se considera una serie de tamaño n , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = n/2$, t_d estará definida por la ecuación (3.74).

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (3.74)$$

Donde: \bar{x}_1, s_1^2 , son la media y varianza de la primera parte del registro n_1 ; \bar{x}_2, s_2^2 , son la media y varianza de la segunda parte del registro n_2 .

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de student de dos colas, y con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Si el valor absoluto de t_d es mayor que t, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie es no homogénea (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

3.5.8 Prueba de Cramer

Esta prueba se utiliza con el propósito de verificar la homogeneidad en el registro en estudio, y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un período de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques, el primero de tamaño n , el segundo de tamaño $n_{60\%}$ (60% de los últimos valores de la muestra n), y el tercero de tamaño $n_{30\%}$ (30% de los últimos valores de la muestra n) (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

La prueba compara el valor de \bar{x} con cada una de las medias de los bloques $\bar{x}_{60\%}$ y $\bar{x}_{30\%}$. Para que la serie se considere estacionaria en la media, no deberá existir una diferencia significativa entre las medias de los bloques (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n \quad (3.75)$$

$$\bar{x}_w = \sum_{k=1}^{n_w} l_k/n_w \quad (3.76)$$

$$S_w = \left[1/(n-1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (3.77)$$

$$\tau_w = \frac{\bar{x}_w - \bar{x}}{S_w} \quad (3.78)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n-2)}{n-n_w[1+\tau_w^2]} \right\}^{1/2} |\tau_w| \quad w = 60 \text{ y } 30 \quad (3.79)$$

Donde: x_i , son las observaciones; n , es el número total de datos; \bar{x} , es la media de las observaciones; w , indica el bloque del 60 y 30 % de los últimos valores de la muestra n .

El estadístico t_w tiene distribución t de student de dos colas con $v = n_{60\%} + n_{30\%} - 2$ grados de libertad y para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Si y solo si el valor absoluto de t_w para $w = 60\%$ y 30% es mayor que la distribución t de student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia, y por lo tanto la serie $x_{60\%}$ o $x_{30\%}$ se considera no homogénea, no necesariamente ambas son homogéneas y ambos resultados tienen el mismo peso para identificar la homogeneidad de la serie (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

3.6 Prueba de tendencia

3.6.1 Prueba Mann Kendall

La prueba para detectar tendencia, Mann Kendall (Kendall, 1975), es una prueba no paramétrica que se basa en rangos, para llevarla a cabo se siguen los siguientes pasos:

- Se enlistan los valores (x_1, x_2, \dots, x_n) .
- Se obtiene el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes $(x_j - x_k)$ con $j > k$.

$$\text{signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3.80)$$

- Se obtiene el estadístico δ de Mann Kendall a partir de la ecuación (3.81).

$$\delta = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k) \quad (3.81)$$

Si δ es positiva se infiere de forma subjetiva que la tendencia es creciente, cuando δ es negativa, se infiere que hay tendencia decreciente.

- Para obtener la $var[\delta]$ se aplica la ecuación (3.82).

$$var[\delta] = \frac{[n(n-1)(2n+5)]}{18} \quad (3.82)$$

- Finalmente, se calcula del estadístico Z_{mk} .

$$Z_{mk} = \begin{cases} \delta - 1 / \sqrt{var[\delta]} & si \delta > 0 \\ 0 & si S = 0 \\ \delta + 1 / \sqrt{var[\delta]} & si \delta < 0 \end{cases} \quad (3.83)$$

A partir de Z_{mk} se evalua la hipótesis de interés.

H_0 : No hay tendencia.

H_1 : Hay tendencia decreciente/creciente.

H_0 es rechazada si Z_{mk} es mayor que $Z_{\alpha/2}$ o menor que $-Z_{\alpha/2}$.

Z: Distribución normal estándar para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

3.7 Índices del cambio climático (ICC) del ETCCDI

El Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) formado conjuntamente por la Organización Mundial de Meteorología (OMM), el proyecto de variabilidad climática (CLIVAR) y la comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), han propuesto un conjunto de 27 índices de cambio climático (ICC) que son útiles en la detección y el monitoreo de cambio en los extremos, los cuales se pueden comparar con las diversas regiones del planeta. Los índices son calculados a partir de las series de datos observados (diarios) de la precipitación y la temperatura máxima y mínima (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

La tabla 3.7 enlista los índices climáticos, donde TN es la temperatura mínima, TX la temperatura máxima, TG la temperatura media y PRCP la precipitación máxima en 24 horas.

Tabla 3.7 Lista de los índices climáticos de ETCCDMI (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

ID	Nombre del Indicador	Definición	Unidad
FD0	Frost days (Días de heladas)	Número de días en un año cuando TN(mínimo diario) $<0^{\circ}\text{C}$	Días
SU25	Summer days (Días de verano)	Número de días en un año cuando TX(máximo diario) $>25^{\circ}\text{C}$	Días
ID0	Ice days (Días de hielo)	Número de días en un año cuando TX(máximo diario) $<0^{\circ}\text{C}$	Días
TR20	Tropical nights (Noches tropicales)	Número de días en un año cuando TN(mínimo diario) $>20^{\circ}\text{C}$	Días
GSL	Growing season Length (Duración de la estación de cultivo)	Anual (1st Ene a 31st Dic en HN, 1st Julio a 30th Junio en HS) cuenta entre el primer período de por lo menos 6 días con TG $>5^{\circ}\text{C}$ y primer período después de Julio 1 (Enero 1 en HS) de 6 días con TG $<5^{\circ}\text{C}$	Días
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TXn	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TN10p	Cool nights (Noches frías)	Porcentaje de días cuando TN $<10^{\text{th}}$ percentil	Días
TX10p	Cool days (Días fríos)	Porcentaje de días cuando TX $<10^{\text{th}}$ percentil	Días
TN90p	Warm nights (Noches calientes)	Porcentaje de días cuando TN $>90^{\text{th}}$ percentil	Días
TX90p	Warm days (Días calientes)	Porcentaje de días cuando TX $>90^{\text{th}}$ percentil	Días
WSDI	Warm spell duration indicador (Indicador de la duración de períodos calientes)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX $>90^{\text{th}}$ percentil	Días
CSDI	Cold spell duration indicator (indicador de la duración de períodos fríos)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN $<10^{\text{th}}$ percentil	Días
DTR	Diurnal temperature range (rango diurno de temperatura)	Diferencia media mensual entre TX y TN	$^{\circ}\text{C}$
RX1day	Max 1-day precipitation amount (Cantidad Máxima de precipitación en un día)	Máximo mensual de precipitación en 1 día	Mm
Rx5day	Max 5-day precipitation amount (Cantidad Máxima de precipitación en 5 días)	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	Mm
SDII	Simple daily intensity index (Índice simple de intensidad diaria)	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por PRCP $\geq 1.0\text{mm}$) en un año	Mm/día
R10	Number of heavy precipitation days (Número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que PRCP $\geq 10\text{mm}$	Días
R20	Number of very heavy precipitation days (Número de días con precipitación muy intensa)	Número de días en un año en que PRCP $\geq 20\text{mm}$	Días

Tabla 3.7 Lista de los índices climáticos de ETCCDMI (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2014).

ID	Nombre del Indicador	Definición	Unidad
Rnn	Number of days above nmm (Número de días sobre nn mm)	Número de días en un año en que PRCP>=nn mm, nn es un parámetro definido por el usuario	Días
CDD	Consecutive dry days (Días secos consecutivos)	Número máximo de días consecutivos con RR<1mm	Días
CWD	Consecutive wet days (Días húmedos consecutivos)	Número máximo de días consecutivos con RR>=1mm	Días
R95p	Very wet days (Días muy húmedos)	Precipitación anual total en que RR>95 percentil	Mm
R99p	Extremely wet days (Días extremadamente secos)	Precipitación anual total en que RR>99 percentil	mm
PRCPTOT	Annual total wet-day precipitation (Precipitación total anual en los días húmedos)	Precipitación anual total en los días húmedos (RR>=1mm)	mm

A continuación, se incluyen las definiciones de los 27 índices del ETCCDI, para los indicadores de duración de temporada se marcaron con un * (ETCCDI, 2009).

1. FD0, días con helada. Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el período j .

Cuenta el número de días cuando:

$$Tn_{ij} < 0^{\circ}\text{C} \quad (3.84)$$

2. SU25, días de verano. Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el período j .

Cuenta el número de días cuando:

$$Tx_{ij} > 25^{\circ}\text{C} \quad (3.85)$$

3. ID0, días con hielo. Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el período j .

Cuenta el número de días cuando:

$$Tx_{ij} < 0^{\circ}\text{C} \quad (3.86)$$

4. TR20, noches tropicales. Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el período j .

Cuenta el número de días cuando:

$$Tn_{ij} > 20^{\circ}C \quad (3.87)$$

5. GSL, estación de crecimiento. Sea T_{ij} la temperatura media en el día i en el período j . Cuente el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} > 5^{\circ}C \quad (3.88)$$

Y la primera ocurrencia después de 1st Julio (1st enero en HS) de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} < 5^{\circ}C \quad (3.89)$$

6. TXx, temperatura máxima extrema. Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , período j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXx_{kj} = \max(Tx_{kj}) \quad (3.90)$$

7. TNx, temperatura mínima más alta. Sea Tn_{kj} la temperatura mínima diaria en el mes k , período j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:

$$TNx_{kj} = \max(Tn_{kj}) \quad (3.91)$$

8. TXn, temperatura máxima más baja. Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , período j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXn_{kj} = \min(Tx_{kj}) \quad (3.92)$$

9. TNn, temperatura mínima extrema. Sea Tn_{kj} la temperatura mínima diaria en el mes k , período j . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es entonces:

$$TNn_{kj} = \min(Tn_{kj}) \quad (3.93)$$

10. Tn_{10p} , frecuencia de noches frías. Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el período j y sea Tn_{10p} el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5 días (procedimiento “Bootstrap”). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tn_{ij} < Tn_{10p} \quad (3.94)$$

11. Tx_{10p} , frecuencia de días frescos. Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el período j y sea Tx_{10p} el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5 días (procedimiento “Bootstrap”). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tx_{ij} < Tx_{10p} \quad (3.95)$$

12. Tn_{90p} , frecuencia de noches cálidas. Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el período j y sea Tn_{90p} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5 días (procedimiento “Bootstrap”). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tn_{ij} > Tn_{90p} \quad (3.96)$$

13. Tx_{90p} , frecuencia de días calurosos. Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el período j y sea Tx_{90p} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5 días (procedimiento “Bootstrap”). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tx_{ij} > Tx_{90p} \quad (3.97)$$

14. $WSDI^*$, duración de los períodos cálidos. Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el período j y sea Tx_{90p} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5 días (procedimiento “Bootstrap”). Entonces el número de días por período es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tx_{ij} > Tx_{90p} \quad (3.98)$$

15. $CSDI^*$, duración de los períodos fríos. Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el período j y sea Tn_{10p} el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5

días (procedimiento “Bootstrap”). Entonces el número de días por período es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tn_{ij} > Tn10p \quad (3.99)$$

16. DTR, rango diurno de temperatura. Sean Tx_{ij} y Tn_{ij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el período j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I} \quad (3.100)$$

17. RX1day, precipitación máxima en un día. Sea RR_{ij} el total diario de precipitación en el día i en el período j . Entonces los valores máximos de 1 día para el período j son:

$$Rx1day_j = \max (RR_{ij}) \quad (3.101)$$

18. Rx5day, precipitación máxima en cinco días. Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en k , período j . Entonces los valores máximos de 5 días para el período j son:

$$Rx5day_j = \max (RR_{kj}) \quad (3.102)$$

19. SDII, índice simple de intensidad diaria. Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en días húmedos, en el período j . Si W representa el número de días húmedos en j , entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad (3.103)$$

20. R10, días con lluvia mayor a 10mm. Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el período j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 10mm \quad (3.104)$$

21. R20, días con lluvia mayor a 20mm. Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el período j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 20mm \quad (3.105)$$

22. Rnn, días con lluvia mayor a nn mm. Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el período j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq nn \text{ mm} \quad (3.106)$$

23. CDD*, días secos consecutivos. Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el período j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} < 1 \text{ mm} \quad (3.107)$$

24. CWD*, días húmedos consecutivos. Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el período j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm} \quad (3.108)$$

25. R95pTOT, días muy húmedos. Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo w ($RR \geq 1mm$) en el período j y sea $RR_{wn}95$ el percentil 95th de precipitación en los días húmedos en el período 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el período, entonces:

$$R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn}95 \quad (3.109)$$

26. R99p, días extremadamente húmedos. Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo w ($RR \geq 1mm$) en el período j y sea $RR_{wn}99$ el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el período 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el período, entonces:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn}99 \quad (3.110)$$

27. PRCPTOT, precipitación total. Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el período j . Si I representa el número de días en j , entonces

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (3.111)$$

3.7.1 Procedimiento “Bootstrap”

El procedimiento “Bootstrap” se utiliza para poder hacer estimados consistentes temporalmente a lo largo de un período base y fuera del período base, el período base fue determinado empíricamente y va de 1961 a 1990 (Klein Tank, Zhang, & Zwiers, 2009), el procedimiento descrito a continuación fue propuesto por Zhang, et al. (2005).

- El período base de 30 años se divide en un año “fuera de base”, el año para el cual la excedencia se va a estimar, y un “período base” que consiste en los restantes 29 años a partir de los cuales se estimarán los umbrales.
- Se construye un bloque de datos de 30 años usando el set de datos del “período base” de 29 años y añadiendo un año adicional de datos a partir del “período base” (i.e., uno de los años en el “período base” es repetido). Este bloque de 30 años construido es usado para estimar los umbrales.
- El año “fuera de base” es entonces comparado con los umbrales y se obtiene la tasa de excedencia para el año “fuera de base”.
- Los puntos 2 y 3 se repiten 28 veces, repitiendo cada uno de los 28 años en base para así construir el bloque de 30 años.
- El índice final para el año “fuera de base” es obtenido promediando los 29 estimados obtenidos de los puntos 2, 3 y 4.

4 Materiales y métodos

4.1 Materiales

Las bases de datos requeridas para el desarrollo del proyecto, fueron las series de medición de escurrimiento, precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima; así como las cartas de uso de suelo y vegetación. Solamente se tuvieron en consideración, para el análisis de las series, los registros de las estaciones climáticas e hidrométricas que tuvieran al menos 50 años de información continua.

Las series de escurrimiento fueron obtenidas del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Para las series de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima se recurrió al Servicio Meteorológico Nacional (SMN); de igual forma fue necesario la descarga de los resúmenes de los mínimos y máximos presentados en las estaciones climáticas, los cuales fueron obtenidos del SMN. Finalmente, las cartas de uso de suelo y vegetación se obtuvieron del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

4.2 Métodos

4.2.1 *Pre-proceso de la información*

Calidad de información

Una vez recabada la información requerida para el desarrollo del proyecto se llevó a cabo la revisión de la calidad de información, lo que fue necesario para disminuir la incertidumbre de los resultados del análisis. El proceso inicio verificando el tamaño de registro de las estaciones climatológicas e hidrométricas, con lo cual se crearon dos grupos de estaciones, las primeras debían de cumplir una longitud mínima de 50 años, este grupo fue el preliminar de las estaciones utilizadas en el desarrollo del proyecto; y el segundo grupo tomaba en cuenta a todas las estaciones que tuvieran un registro de al menos 20 años, este grupo fue necesario para el complementado de

información de las estaciones del primer grupo. A partir del segundo grupo, ya que incluía al primero, se verificó la calidad de los registros de acuerdo a los puntos descritos en el capítulo 3.1.

Regionalización

Debido a que en el presente proyecto se analizó la existencia de variación estadística de las variables hidroclimáticas, fue necesario contar con registros completos de al menos 50 años, para poder considerar como validos los resultados obtenidos del análisis.

La base de datos que se utilizó presentaba datos faltantes, por lo que en primer lugar se descartó aquellas series que tuvieran más del 15% de información faltante. Las series seleccionadas se analizaron individualmente y se buscó el período más conveniente para llevar a cabo el complementado de información, tanto de las series climáticas como de las hidrométricas. Para disminuir la incertidumbre en el complementado de información, primero se obtuvieron las regiones homogéneas, como se describió en el capítulo 3.2, ya que las estaciones pertenecientes a una misma región comparten un comportamiento estadístico semejante entre las diversas variables hidroclimáticas.

Se llevaron a cabo dos procesos de regionalización, uno para las estaciones hidrométricas y otro para las estaciones climatológicas.

La regionalización de las estaciones hidrométricas, se realizó con la información de los escurrimientos medios y los escurrimientos máximos instantáneos; a partir de las regiones resultantes para ambas variables, se llegó a la regionalización general de las estaciones hidrométricas. Para la obtención de las regiones homogéneas se aplicaron los cinco métodos descritos el capítulo 3.2 que no son excluyentes entre sí, sino que se complementan. Se llevó a cabo la regionalización tomando todos los métodos en consideración.

Es importante destacar que para los métodos de los trazos multidimensionales y la región de influencia se utilizaron las siguientes características fisiográficas: las coordenadas del centroide, el área de la cuenca, el perímetro de la cuenca, la elevación media de la cuenca, la pendiente media de la cuenca, el coeficiente de compacidad, el factor de forma, el tiempo de concentración, la longitud del cauce principal, la pendiente media del cauce principal, el orden máximo, el número

de corrientes, la longitud total de corrientes, la densidad de drenaje, el coeficiente de desarrollo, el parámetro de forma, la densidad de corrientes y el tiempo de concentración.

En el caso de la regionalización de las estaciones climatológicas, primero se tomó en cuenta la altitud sobre el nivel del mar de las estaciones para generar grupos previos, la agrupación se realizó a cada 1000 msnm, no se tomó en cuenta una división menor ya que muchas estaciones quedaban fuera de consideración, debido a que se generaban pequeños grupos, lo cual no permitía aplicar las técnicas de regionalización. Para definir las regiones homogéneas, de las estaciones climatológicas, se tomó en consideración únicamente a la precipitación (acumulada anual y la precipitación máxima), se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 3.2, aunque para este caso solamente se aplicaron tres métodos de regionalización: el coeficiente de variación de los momentos L, el parámetro de forma de la distribución general de valores extremos y la distancia euclidiana. El método de la distancia euclidiana, para la regionalización de las estaciones climatológicas, utilizó 33 atributos: lluvia (apreciable, ligera, moderada, fuerte, intensa y torrencial), precipitación máxima diaria (anual), precipitación acumulada anual, precipitación máxima diaria (mensual) y precipitación acumulada mensual.

Complementado de información

El complementado de información es de gran utilidad ya que permite trabajar con series completas, tanto hidrométricas como climatológicas; ya que, puntualmente se trabaja con la información registrada y los datos faltantes o sospechosos se pueden estimar por las estaciones que pertenecen a su región estadísticamente homogénea. Para el proyecto, en general, se realizó el complementado de información para los años que presentaron no más de 15% de información faltante, lo que evitó una posible alteración del comportamiento estadístico de las series complementadas; aunque es importante señalar que en algunas estaciones con registros de gran tamaño, se encontró que el mismo era dividido en dos debido a que en un año se tuvo bajo registro de información, que pudo ser de más del 15% de datos faltantes, para estos pocos casos se tomó la decisión de complementar ese año siempre y cuando este no alterara estadísticamente el comportamiento de la serie.

Se tuvieron dos procesos para el complementado de información, debido a que las variables de los dos tipos de estaciones, tienen un comportamiento diferente.

Para los datos de las estaciones hidrométricas (escurrimiento medio, máximo y mínimo instantáneo) se requirieron las coordenadas de las estaciones, el procedimiento para el complementado de información se llevó a cabo por región homogénea y a partir de las series diarias. Se comenzó con la obtención de la correlación de los valores de escurrimiento de las estaciones, la cual se realizó mensualmente, ya que la respuesta de las cuencas varía entre la época seca y la época húmeda. Posteriormente se identificaron los valores faltantes de la serie de la estación “b” (estación base), y para cada día faltante se identificaba el mes al que pertenecía, con lo cual se obtenía la estación que tuviera mayor correlación (con la estación “b”) en el mes identificado y se verificaba que para ese día tuviese la información del escurrimiento, si también fuese un día faltante se iba a la segunda estación con mayor correlación y así sucesivamente hasta que se encontrase una estación con información para el día.

Con la información recabada se procedía a ajustar el comportamiento de los escurrimientos a seis modelos matemáticos el lineal (4.1), el logarítmico (4.2), exponencial (4.3), potencial (4.4) y polinómico de grado 2 y 3, ecuaciones (4.5) y (4.6) respectivamente; el valor del día faltante se estimaba a partir del modelo matemático con mayor ajuste (r^2 mayor). Además, en el proceso se eliminaron los días 29 de febrero para que todos los años coincidieran en tamaño y no crearan inconsistencias en los resultados.

$$y = a * x + b \quad (4.1)$$

$$y = a * \ln(x) + b \quad (4.2)$$

$$y = a * e^{b*x} \quad (4.3)$$

$$y = a * x^b \quad (4.4)$$

$$y = a * x^2 + b * x + c \quad (4.5)$$

$$y = a * x^3 + b * x^2 + c * x + d \quad (4.6)$$

Donde: a, b, c y d son variables a estimar; x, representa un valor constante; y, representa el valor a estimar.

Para el complementado de información de las estaciones climatológicas se aplicaron las seis técnicas de interpolación descritas en el capítulo 3.3. El proceso se repitió para cada una de las regiones homogéneas definidas, así como para las tres variables climáticas con las que se trabajó (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima). El proceso de complementado se llevó a cabo con los datos diarios de las estaciones, el primer paso fue identificar la información faltante en el registro, en seguida se verificaba que existiera al menos dos estaciones dentro de la región homogénea que contara con información para la misma fecha; si se cumplía con esta condición se identificaba el mes al que pertenecía el día faltante y se extraía toda la información de los registros del mes identificado. A partir de las coordenadas y la información extraída del mes, se procedía a aplicar las seis técnicas de interpolación; de los valores estimados se eliminaba el mayor y el menor, y el resto se promediaba, el resultado de ello se asignaba como valor del día faltante. Además, en el proceso se eliminaron los días 29 de febrero para que todos los años coincidieran en tamaño y no crearan inconsistencias en los resultados.

Finalmente, se seleccionaron aquellas series que cumplieran con una longitud mínima de 50 años, en el caso de las estaciones climatológicas se tienen dos variables diferentes, la precipitación y la temperatura, por lo que se seleccionaron aquellas estaciones en las cuales se tuviera la longitud mínima para ambas variables.

4.2.2 Análisis estadístico de las series hidroclimáticas

Para determinar si existían alteraciones en los regímenes de escurrimiento, precipitación y temperatura, se realizó un análisis estadístico de las series. El primer análisis fue la prueba de independencia de Anderson (descrita en el capítulo 3.4) que se aplicó a las series de escurrimiento, ya que debe presentarse aleatoriedad entre los eventos, lo que indicará que un evento de un año determinado no dependa del año anterior. Es indispensable la independencia de las series, ya que, de no presentarse, indicaría que la estación hidrométrica, es controlada por alguna obra hidráulica aguas arriba y el análisis de tendencias no representaría la dinámica real de la cuenca. La prueba fue aplicada para las series anuales de escurrimientos máximos instantáneos y a las series anuales

de escurrimientos medios, con lo cual se identificó la independencia de dichas series. Únicamente se tomó en consideración, para el desarrollo del proyecto, aquellas estaciones que sus registros fueran independientes.

El análisis de homogeneidad y tendencia de las variables hidroclimáticas se realizó para la serie anual; para la serie del período otoño-invierno (21 de septiembre al 20 de marzo) y la serie de primavera-verano (21 de marzo al 20 de septiembre); y también se realizó el análisis mensualmente.

La determinación de la homogeneidad de las series se realizó aplicando las pruebas descritas en el capítulo 3.5, se determinaba que una serie era homogénea cuando al menos cinco pruebas lo indicaban; es importante señalar que se consideró que todas las pruebas aplicadas tenían el mismo peso en su resultado. Se tuvieron nueve resultados, ya que la prueba de Cramer genera dos, uno para el 60% de la información y otro para el 30% de la información.

La prueba de tendencia utilizada, para el desarrollo del proyecto, fue la prueba de Mann Kendall (descrita en el capítulo 3.6.1), la cual identifica si existe tendencia en la serie analizada, ya sea positiva o negativa, o si la serie no presente tendencia, para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Para las variables climatológicas se calcularon los 27 índices del cambio climático descritos en el capítulo 3.7, el cálculo de los índices se realizó para las 15 series (anual, periódicas y mensuales), excepto por tres índices, el índice de estación de crecimiento (GSL) únicamente fue calculado para la serie anual, el índice de la duración de los períodos cálidos (WSDI) y el índice de los períodos fríos (CSDI) fueron calculados solamente para las series periódicas y anuales. A los resultados de los ICC se le aplicó la prueba de Mann Kendall para identificar si existía cambios en el comportamiento de los mismos.

4.2.3 Uso de suelo y vegetación

Para el análisis del cambio de uso de suelo y vegetación se utilizaron las seis series de cartas elaboradas por INEGI, la serie I (1985), la serie II (1993), la serie III (2002), la serie IV (2007), la serie V (2011) y la serie VI (2014). Debido a que la clasificación de las cartas a tenido ligeros cambios a través de los años, se realizó una reclasificación de las cartas para que fueran

comparables, se llegó a nueve clasificaciones: agricultura, bosque alterado, bosque inalterado, pastizal, pradera de alta montaña, selva alterada, selva inalterada, sin vegetación y zona urbana.

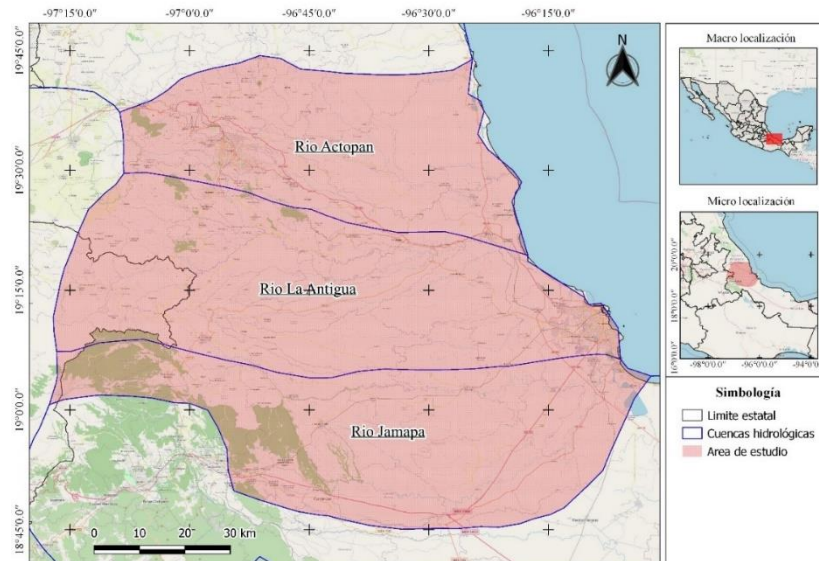
El análisis se realizó para cada subcuenca generada hasta el punto de salida de las estaciones hidrométricas en estudio.

5 Resultados y discusión

5.1 Zona de estudio

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en tres cuencas, de las que gran parte de su superficie se encuentra en el estado de Veracruz, pertenecientes a la región hidrológica 28, Papaloapan. La cuenca del río Actopan, se encuentra situada entre los $19^{\circ}20'$ y $19^{\circ}46'$ latitud norte, y entre los $96^{\circ}20'$ y $97^{\circ}08'$ latitud oeste, cuenta con una superficie de aproximadamente $2,000 \text{ km}^2$, el río Actopan nace a $3,000 \text{ m.s.n.m.}$ en las faldas del Cofre de Perote y desemboca en el Golfo de México (Pereyra Díaz, Pérez Sesma, & Salas Ortega, 2010).

Figura 5.1 Área de estudio, localización de las cuencas.



La cuenca del río La Antigua, se encuentra situada entre los $19^{\circ}05'$ y $19^{\circ}34'$ latitud norte, y entre los $96^{\circ}06'$ y $97^{\circ}16'$ latitud oeste, cuenta con una superficie de aproximadamente $2,827 \text{ km}^2$, el río que le da nombre a la cuenca nace en la Sierra Madre Oriental a una altitud de $3,350 \text{ m.s.n.m.}$ (Pereyra Díaz, Pérez Sesma, & Salas Ortega, 2010). Finalmente, la cuenca del río Jamapa se encuentra ubicada entre los $18^{\circ}45'$ y $19^{\circ}14'$ latitud norte y entre los $95^{\circ}56'$ y $97^{\circ}17'$ longitud oeste, tiene un área aproximadamente de $3,912 \text{ km}^2$ (Pereyra Díaz, Pérez Sesma, & Salas Ortega, 2010). La distribución de las cuencas analizadas se observa en la figura 5.1.

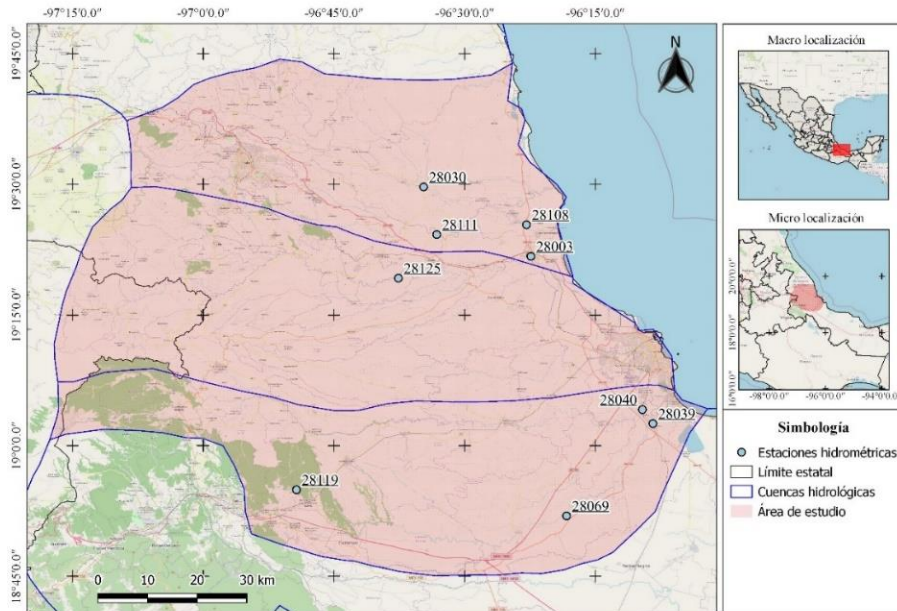
5.2 Delimitación de regiones homogéneas

La regionalización de las estaciones hidrométricas se llevó a cabo con la información de los escurrimientos medios y los escurrimientos máximos instantáneos, con lo cual se llegó a la delimitación de dos regiones homogéneas (tabla 5.1).

Tabla 5.1 Regiones homogéneas de las estaciones hidrométricas.

Estación (clave)	Nombre de la estación	Región 1	Región 2
28003	Cardel		x
28030	Actopan II	x	
28039	Paso del Toro	x	
28040	El Tejar		x
28069	Capulines	x	
28108	El Naranjillo	x	
28111	Ídolos		x
28119	Santa Anita		x
28125	Carrizal	x	

Figura 5.2 Distribución de las estaciones hidrométricas.



Las regiones homogéneas de las estaciones climatológicas se delimitaron con la precipitación acumulada anual, así como con la precipitación máxima diaria, a partir de dicha información se delimitaron tres regiones homogéneas para las estaciones entre 0 y 1,000 msnm; y dos regiones homogéneas para las estaciones entre 1,000 y 2,000 msnm (tabla 5.2 y tabla 5.3).

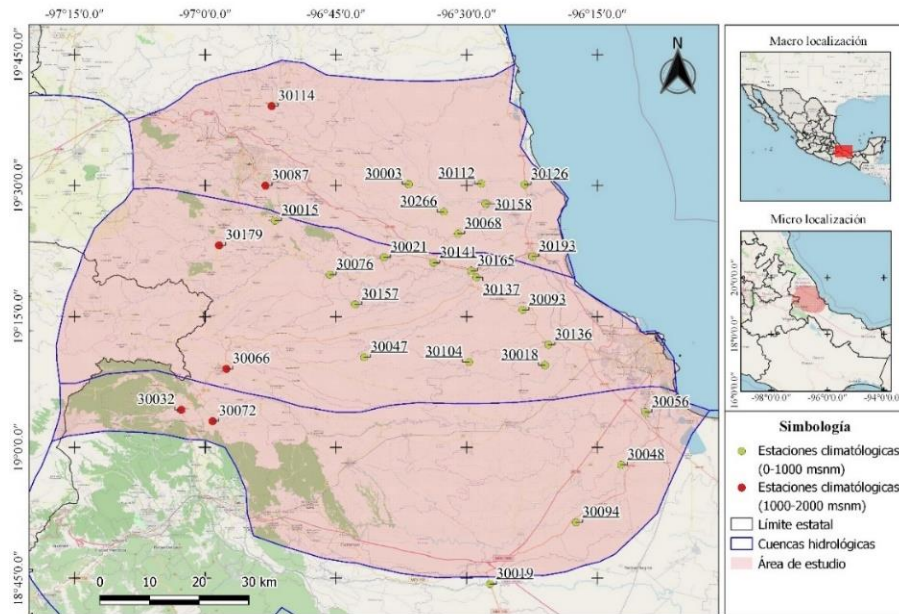
Tabla 5.2 Regiones homogéneas de las estaciones climatológicas con una altura entre 0 y 1,000 msnm.

Estación (clave)	Nombre de la estación	Región 1	Región 2	Región 3
30003	Actopan		x	
30015	Bella Esperanza (CFE)	x		
30018	El Buzón		x	
30019	Camelpo	x		
30021	El Carrizal			x
30047	El Coyol (CFE)	x		
30048	El Copital	x		
30056	El Tejar		x	
30068	Los Ídolos	x		
30076	Jalcomulco (CFE)	x		
30093	Loma Fina		x	
30094	Los Capulines		x	
30104	Mata Anona (CFE)		x	
30112	Mozonada	x		
30126	Paso del Cedro			x
30136	Puente Julia		x	
30137	Puente Nacional (CFE)			x
30141	Rinconada	x		
30157	Santa María Tatetla (CFE)			x
30158	Santa Rosa		x	
30165	Tamarindo		x	
30193	José Cardel	x		
30266	El Diamante		x	

Tabla 5.3 Regiones homogéneas de las estaciones climatológicas con una altura entre 1,000 y 2,000 msnm.

Estación (clave)	Nombre de la estación	Región 1	Región 2
30032	Coscomatepec (SMN)		x
30066	Huatusco de Chicuellar	x	
30072	Ixhuatlán del Café	x	
30087	Las Animas	x	
30114	Naolinco de Victoria		x
30179	Teocelo		x

Figura 5.3 Distribución de las estaciones climatológicas.



5.3 Complementado de información

Para el complementado de información se valió de las regiones homogéneas, y se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 4.2.1.

Para verificar que el complementado de información no hubiese alterado el comportamiento estadístico de las series, se obtuvieron la media, la desviación estándar y la varianza; antes y después del complementado y se compararon para cerciorarse que no existieran cambios significativos. Se verificó el escurrimiento medio diario, el máximo instantáneo diario y el mínimo instantáneo diario; para las estaciones hidrométricas.

Como se puede observar en la tabla 5.4; las variables estadísticas no tuvieron una variación significativa entre los datos originales y los complementados, por lo que los registros complementados fueron correctos y se tomaron para el desarrollo del proyecto. El período y longitud de los registros de la estación hidrométricas se resumen en la tabla 5.5.

Tabla 5.4 Variación porcentual de los estadísticos, en el complementado de las variables hidrométricas

Estación	Estadístico	Escorrentamiento máximo			Escorrentamiento medio			Escorrentamiento mínimo		
		Orig.	Comp.	Var. (%)	Orig.	Comp.	Var. (%)	Orig.	Comp.	Var. (%)
28003	Media	71.98	70.58	-1.94	56.37	56.37	0.00	48.40	47.59	-1.67
	Desviación estándar	136.48	134.90	-1.16	76.62	76.62	0.00	52.50	52.06	-0.84
	Varianza	18626.80	18197.36	-2.31	5870.98	5870.98	0.00	2756.73	2710.70	-1.67
28030	Media	19.46	19.15	-1.62	17.24	17.23	-0.06	16.83	16.66	-0.97
	Desviación estándar	21.41	20.53	-4.12	13.06	13.06	-0.03	7.24	7.02	-3.16
	Varianza	458.34	421.32	-8.08	170.68	170.57	-0.07	52.47	49.21	-6.21
28040	Media	22.63	22.06	-2.52	18.28	18.21	-0.37	15.59	15.22	-2.33
	Desviación estándar	48.71	48.06	-1.34	35.44	35.40	-0.10	26.82	26.48	-1.25
	Varianza	2373.08	2310.12	-2.65	1255.73	1253.17	-0.20	719.29	701.38	-2.49
28069	Media	54.39	52.68	-3.14	44.58	44.20	-0.85	38.53	37.42	-2.90
	Desviación estándar	103.30	100.52	-2.69	76.58	75.66	-1.20	60.00	58.31	-2.82
	Varianza	10671.46	10104.47	-5.31	5865.11	5724.62	-2.40	3600.57	3400.43	-5.56
28108	Media	21.61	20.61	-4.65	16.40	16.39	-0.05	14.39	13.92	-3.25
	Desviación estándar	63.74	61.04	-4.23	33.91	33.88	-0.06	20.24	19.53	-3.52
	Varianza	4062.57	3726.44	-8.27	1149.61	1148.14	-0.13	409.77	381.45	-6.91
28111	Media	8.36	8.22	-1.68	5.03	5.03	0.00	3.47	3.43	-1.13
	Desviación estándar	59.45	58.81	-1.09	18.79	18.79	0.00	7.33	7.25	-1.02
	Varianza	3534.86	3458.27	-2.17	353.15	353.15	0.00	53.68	52.60	-2.02

Orig. es la serie original, Comp. es la serie complementada, Var. es la variación entre las dos series

Tabla 5.5 Periodo y longitud de los registros de las estaciones hidrométricas.

Estación	Nombre de la estación	Escorrentamiento medio		Escorrentamiento máximo y mínimo instantáneo	
		Periodo	Longitud (años)	Periodo	Longitud (años)
28003	Cardel	1951-2013	63	1952-2013	62
28030	Actopan II	1951-2014	64	1980-2014	35
28040	El Tejar	1952-2011	60	1952-2011	60
28069	Capulines	1955-2006	52	1955-2006	51
28108	El Naranjillo	1961-2012	52	1961-2012	52
28111	Ídolos	1964-2014	51	1964-2014	51

En el complementado de información, de las estaciones climatológicas, se verificó las series de la precipitación diaria, la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima diaria. De acuerdo a la tabla 5.6, el complementado de información se realizó correctamente. El período y longitud de los registros de las estaciones climatológicas se resumen en la tabla 5.7.

Tabla 5.6 Variación porcentual de los estadísticos, en el complementado de las variables climatológicas

Estación	Estadístico	Precipitación			Temperatura máxima			Temperatura mínima		
		Orig.	Comp.	Var. (%)	Orig.	Comp.	Var. (%)	Orig.	Comp.	Var. (%)
30003	Media	2.41	2.42	0.36	30.96	30.96	-0.01	18.72	18.73	0.01
	Desviación estándar	9.39	9.43	0.43	3.59	3.61	0.32	2.91	2.92	0.37
	Varianza	88.13	88.90	0.87	12.92	13.00	0.65	8.45	8.51	0.74
30032	Media	5.75	5.76	0.02	25.01	24.99	-0.10	11.93	11.93	0.02
	Desviación estándar	11.18	11.19	0.11	4.18	4.20	0.44	2.63	2.63	0.13
	Varianza	124.93	125.20	0.21	17.47	17.62	0.88	6.92	6.94	0.27
30048	Media	3.72	3.72	-0.05	31.06	31.12	0.20	19.14	19.20	0.31
	Desviación estándar	12.11	12.09	-0.15	3.78	3.86	2.32	3.57	3.60	0.83
	Varianza	146.61	146.17	-0.30	14.25	14.92	4.70	12.73	12.95	1.67
30056	Media	4.61	4.61	0.05	29.94	29.94	-0.01	19.74	19.74	-0.03
	Desviación estándar	14.36	14.36	0.02	3.96	3.97	0.34	3.22	3.22	-0.01
	Varianza	206.12	206.20	0.04	15.67	15.78	0.67	10.36	10.35	-0.02
30066	Media	5.04	5.02	-0.38	25.75	25.75	-0.01	12.84	12.84	0.00
	Desviación estándar	12.32	12.29	-0.28	4.57	4.58	0.10	3.11	3.10	-0.11
	Varianza	151.79	150.94	-0.56	20.90	20.94	0.19	9.66	9.64	-0.22
30093	Media	2.60	2.59	-0.45	30.78	30.78	-0.01	19.80	19.76	-0.19
	Desviación estándar	9.58	9.57	-0.09	3.67	3.70	0.74	3.47	3.47	0.13
	Varianza	91.79	91.63	-0.18	13.47	13.67	1.49	12.03	12.06	0.27
30094	Media	2.90	2.88	-0.76	31.69	31.65	-0.12	19.06	19.05	-0.03
	Desviación estándar	10.40	10.34	-0.59	3.83	3.83	0.10	3.64	3.62	-0.75
	Varianza	108.18	106.92	-1.17	14.65	14.68	0.20	13.27	13.07	-1.49
30114	Media	4.64	4.64	0.15	22.20	22.28	0.32	12.01	11.99	-0.18
	Desviación estándar	12.12	12.12	0.01	4.36	4.35	-0.29	2.89	2.87	-0.66
	Varianza	146.85	146.89	0.03	19.04	18.93	-0.58	8.36	8.25	-1.31
30136	Media	4.44	4.37	-1.41	31.38	31.34	-0.13	19.55	19.51	-0.20
	Desviación estándar	16.80	16.63	-0.99	3.80	3.82	0.51	3.30	3.31	0.05
	Varianza	282.25	276.69	-1.97	14.44	14.59	1.02	10.92	10.93	0.10
30141	Media	2.51	2.53	0.74	30.56	30.53	-0.11	19.78	19.73	-0.26
	Desviación estándar	9.66	9.65	-0.11	4.28	4.31	0.75	3.52	3.56	1.09
	Varianza	93.37	93.17	-0.22	18.33	18.61	1.51	12.41	12.68	2.20
30158	Media	2.79	2.78	-0.51	31.54	31.54	-0.01	17.18	17.23	0.28
	Desviación estándar	10.77	10.73	-0.32	3.63	3.64	0.14	3.75	3.74	-0.19
	Varianza	115.95	115.22	-0.64	13.19	13.22	0.28	14.06	14.01	-0.38

Tabla 5.6 Variación porcentual de los estadísticos, en el complementado de las variables climatológicas

Estación	Estadístico	Precipitación			Temperatura máxima			Temperatura mínima		
		Orig.	Comp.	Var. (%)	Orig.	Comp.	Var. (%)	Orig.	Comp.	Var. (%)
30179	Media	5.74	5.74	0.03	24.82	24.81	-0.06	14.30	14.27	-0.22
	Desviación estándar	13.09	13.06	-0.23	4.24	4.24	0.11	2.75	2.76	0.49
	Varianza	171.36	170.58	-0.46	17.96	18.00	0.22	7.54	7.61	0.98
30193	Media	3.38	3.39	0.11	30.40	30.41	0.01	20.59	20.58	-0.06
	Desviación estándar	11.95	11.95	0.00	3.31	3.34	0.69	3.10	3.11	0.20
	Varianza	142.87	142.88	0.01	10.98	11.13	1.38	9.64	9.67	0.39

Orig. es la serie original, Comp. es la serie complementada, Var. es la variación entre las dos series

Tabla 5.7 Periodo y longitud de los registros de las estaciones climatológicas.

Estación	Nombre de la estación	Precipitación		Temperatura máxima y mínima	
		Periodo	Longitud (años)	Periodo	Longitud (años)
30003	Actopan	1953-2013	61	1953-2013	61
30032	Coscomatepec (SMN)	1948-2002	55	1954-2002	49
30048	El Copital	1961-2013	53	1961-2013	53
30056	El Tejar	1961-2013	53	1961-2013	53
30066	Huatusco de Chicuellar	1943-1999	57	1943-2000	58
30093	Loma Fina	1952-2013	62	1953-2013	61
30094	Los Capulines	1955-2006	52	1955-2006	52
30114	Naolinco de Victoria	1956-2013	58	1956-2002	47
30136	Puente Jula	1952-2001	50	1952-2005	54
30141	Rinconada	1963-2013	51	1963-2013	51
30158	Santa Rosa	1959-2013	55	1959-2013	55
30179	Teocelo	1945-1998	54	1946-1998	53
30193	José Cardel	1951-2013	63	1951-2013	63

5.4 Aplicación de la prueba de independencia a las series de escurrimiento

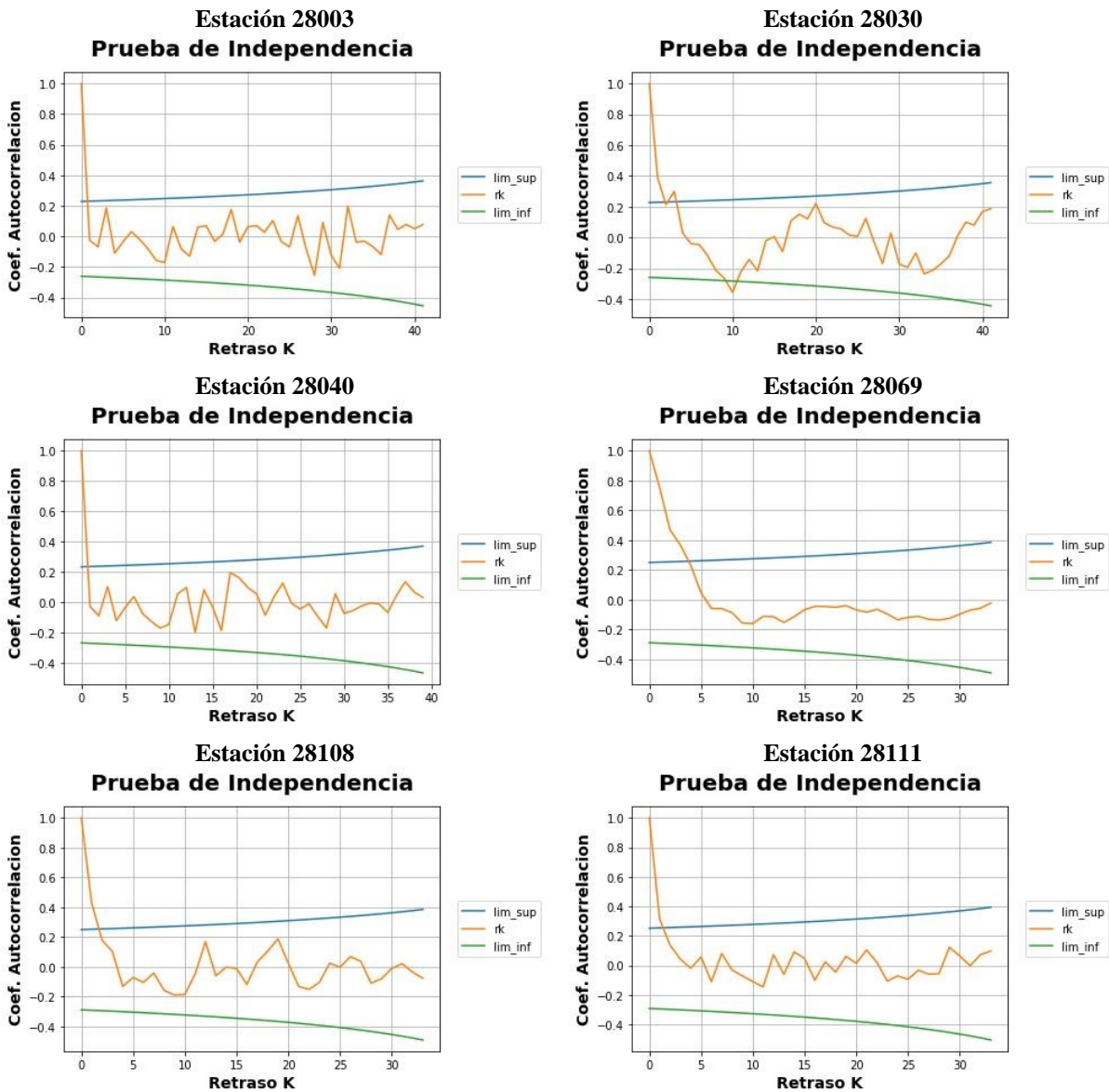
La prueba de independencia de Anderson, fue aplicada para las series anuales de escurrimiento medio y máximo instantáneo.

El análisis de las series de los escurrimientos medios mostró que las seis estaciones hidrométricas, que cumplen el tamaño mínimo de registro, muestran aleatoriedad en la información, lo que se resume en la tabla 5.8 y se puede observar gráficamente en la figura 5.4.

Tabla 5.8 Dictamen de la prueba de independencia de Anderson para los escurrimientos anuales medios.

Estación	Dictamen	Tamaño
28003	Independiente	63
28030	Independiente	64
28040	Independiente	60
28069	Independiente	52
28108	Independiente	52
28111	Independiente	51

Figura 5.4 Gráficas de la prueba de independencia de Anderson para el escurrimiento medio.



Los escurrimientos máximos instantáneos de las seis estaciones hidrométricas (28003, 28030, 28040, 28069, 28108 y 28111) mostraron independencia, por lo que todas las series serán consideradas para el desarrollo del proyecto. El dictamen final para cada estación hidrométrica se resume en la tabla 5.9, y las gráficas de la prueba de Anderson (para cada una de las estaciones) se muestran en la figura 5.5.

A partir de las pruebas de independencia aplicadas a las seis estaciones se observó aleatoriedad en la información, lo que implica que las mediciones de las estaciones hidrométricas no son controladas por alguna obra hidráulica aguas arriba, por lo cual la información proporcionada por dichas estaciones será considerada en el proyecto.

Tabla 5.9 Dictamen de la prueba de independencia de Anderson para los escurrimientos anuales máximos instantáneos.

Estación	Dictamen	Tamaño
28003	Independiente	62
28030	Independiente	35
28040	Independiente	60
28069	Independiente	52
28108	Independiente	52
28111	Independiente	51

Figura 5.5 Gráficas de la prueba de independencia de Anderson para el escurrimiento máximo instantáneo.

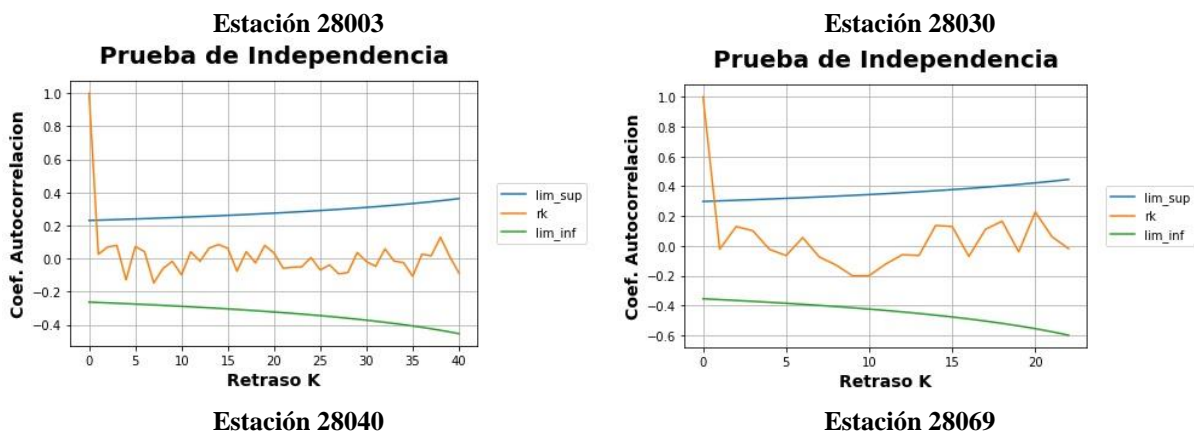
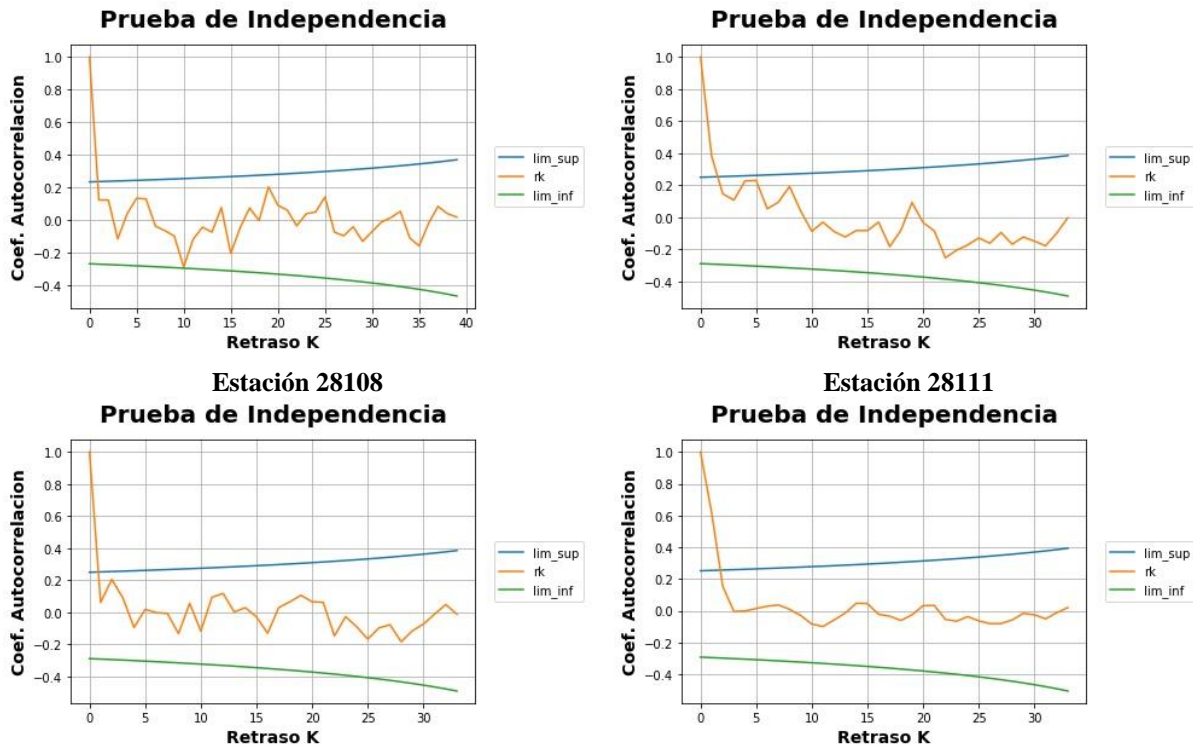


Figura 5.5 Gráficas de la prueba de independencia de Anderson para el escurrimiento máximo instantáneo.



5.5 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad

Para las series de las variables hidroclimáticas se obtuvieron los resultados de las pruebas de homogeneidad como se observa en la tabla 5.10, donde se tiene los nueve resultados y el dictamen final, que resume el comportamiento de la serie. Debido a que el dictamen final de homogeneidad toma en cuenta las pruebas aplicadas, a partir de la tabla 5.11 solamente se muestra el dictamen final de las pruebas de homogeneidad.

5.5.1 Series de escurrimiento medio, escurrimientos máximos y mínimos instantáneos

Para los escurrimientos máximos instantáneos (tabla 5.10) se observó que las series anuales fueron homogéneas, a pesar de que algunas pruebas mostraron no homogeneidad, como fue el caso de la estación 28111, en la cual cuatro pruebas indicaron no homogeneidad, pero debido a que

cinco indicaban lo contrario, se dictaminó a la serie como homogénea. Es importante señalar que la prueba de Cramer puede mostrar un resultado para la extensión del 60% de información y otro para el 30% como se observó en las estaciones 28040 y 28108.

En la tabla 5.11 se observa los resultados finales de las pruebas de homogeneidad para las series periódicas y mensuales, se pudo percatar que para la mayor parte de las estaciones se ha conservado la homogeneidad de las series, aunque existen ciertas alteraciones a nivel mensual en algunas de ellas. La estación 28030 tuvo dos series no homogéneas, el mes de enero y diciembre, teniendo un cambio en la serie en el año 2001, en ambos casos. Para la estación 28108 se identificó un cambio al final de la serie de febrero, entre 2010 y 2012, de igual forma se determinó que la serie de octubre era no homogénea. Finalmente, se observó que la estación 28111 únicamente presenta no homogeneidad en el mes de octubre, sin que las pruebas Pettit, normal estándar y Buishand, identificaran un punto evidente del cambio.

Para el caso del escurrimiento medio los resultados de homogeneidad se resumieron en la tabla 5.12, donde se observa una mayor cantidad de series no homogéneas que en el caso de los escurrimientos máximos instantáneos.

La estación 28003 presentó dos series no homogéneas, el mes de febrero con un muy probable cambio al final de la serie (en 2010), de igual forma el mes de julio presentó un cambio en la serie. Las pruebas indicaron como no homogéneas las series de los meses de marzo (con un cambio evidente en 1982) y abril, para el caso de la estación 28040. La estación 28069 no presentó homogeneidad en las series de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, lo cual se vio reflejado en la falta de homogeneidad en la serie de otoño-invierno, fue la única estación en que la serie anual fue no homogénea, el punto de cambio de la estación es probable que se encuentre entre 1996 y 1999. Para el caso de la estación 28108 se identificó un cambio al final de las series, entre el 2009 y 2012, para las series de los meses de febrero, marzo y abril. Finalmente, la estación 28111 no presentó homogeneidad en la mitad de las series mensuales (enero, febrero, marzo, abril, octubre y noviembre), se identificó un probable cambio al final de las series entre el 2012 y 2014, excepto para el mes de octubre, para el cual no fue claro el año del cambio en la serie.

Tabla 5.10 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para los escurrimientos máximos instantáneos (series anuales).

Pruebas	28003	28030	28040	28069	28108	28111
Pettit	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea, Año de cambio: 2000	Homogénea	Homogénea
Normal estándar	No Homogénea, Año de cambio: 2009	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea, Año de cambio: 2011
Buishand	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea, Año de cambio: 2014
Von Neumann	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea
Fisher	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea
Helmert	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
t de student	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Cramer 60	Homogénea n60	Homogénea n60	Homogénea n60	Homogénea n60	No Homogénea n60	Homogénea n60
Cramer 30	Homogénea n30	Homogénea n30	No Homogénea n30	Homogénea n30	Homogénea n30	Homogénea n30
Dictamen	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea

Tabla 5.11 Dictamen de las pruebas de homogeneidad para los escurrimientos máximos instantáneos (series periódicas y mensuales).

Estaciones	Dictamen				
	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero	marzo
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28030	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
28040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28069	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28108	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea
28111	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Estaciones	abril	mayo	junio	julio	agosto
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28030	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28069	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28108	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28111	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Estaciones	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
28030	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	
28040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
28069	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
28108	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
28111	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	

Tabla 5.12 Dictamen de las pruebas de homogeneidad para el escurrimiento medio (series anuales, periódicas y mensuales).

Estaciones	Dictamen				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28030	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28069	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28108	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28111	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28030	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28040	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28069	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28108	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28111	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea

Tabla 5.12 Dictamen de las pruebas de homogeneidad para el escurrimiento medio (series anuales, periódicas y mensuales).

Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28030	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28069	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea
28108	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
28111	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea

Los escurrimientos mínimos instantáneos (tabla 5.13) fueron los que presentaron menor cantidad de series homogéneas, observándose cambios en la mayoría de las series anuales y periódicas. La estación 28003 fue la que mostró mayor homogeneidad en sus series, únicamente el mes de septiembre se identificó como no homogéneo (con un probable cambio en 1960). La estación 28030 presentó un probable cambio en el 2004, en la serie anual y en la serie de primavera-verano, mientras que para las series de mayo y diciembre se identificó un probable punto de cambio en el año 2005. La estación 28040 fue la que presentó mayor cantidad de series no homogéneas entre las que estuvieron la serie anual, otoño-invierno, primavera-verano, enero, febrero, mayo y junio, con un probable cambio en las series entre 1981 y 1982; el mes de marzo y abril de igual forma fueron series no homogéneas con un probable punto de cambio en la serie en 1988 y 1994, respectivamente; mientras que la serie de diciembre mostró un claro cambio en 1981. Siete de las quince series, de la estación 28069, fueron no homogéneas en tres de ellas se observó un cambio probable en la serie en 1981 (serie anual, primavera-verano y el mes de abril), la serie de otoño-invierno presentó un cambio probable en 1994, mientras que los meses de enero y marzo presentaron un cambio probable en 1996 y 1995, respectivamente; la serie del mes de octubre se identificó como no homogénea, aunque el punto de cambio no es claro. La estación 28108 presentó cinco series no homogéneas, las cuales tuvieron un probable año de cambio al final de la serie (2010-2012), las series fueron: otoño-invierno, primavera-verano, febrero y mayo, aunque la serie de diciembre fue no homogénea, no se identificó un año de cambio probable. Finalmente, la serie anual, otoño-invierno, enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre, fueron no homogéneas, con un punto probable de cambio al final de la serie, entre el 2012 y 2014.

Tabla 5.13 Dictamen de las pruebas de homogeneidad para los escurrimientos mínimos instantáneos (series anuales, periódicas y mensuales).

Estaciones	Dictamen				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28030	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
28040	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
28069	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea
28108	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28111	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28030	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
28040	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea
28069	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
28108	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
28111	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
28003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea
28030	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28040	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28069	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
28108	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
28111	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea

En general, para la información recabada de las estaciones hidrométricas, se pudo inferir que los escurrimientos mínimos instantáneos fueron los que presentaron mayor variación en la homogeneidad de las series, mientras que los escurrimientos máximos instantáneos fueron los que presentaron una mayor homogeneidad de sus series. A partir de la prueba de tendencia, que se desarrolla en el siguiente capítulo, se identifica si la alteración en las series fue estadísticamente relevante para marcar una tendencia en las mismas.

5.5.2 Series de las variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima)

De la tabla 5.14 a la tabla 5.17 se resumen los resultados de las pruebas de homogeneidad para las series de las variables climáticas. Se analizó las series de precipitación acumulada, precipitación máxima en 24 horas y la temperatura máxima y mínima promedio.

En general, se pudo observar que la series de la precipitación acumulada (tabla 5.14) y la precipitación máxima en 24 horas (tabla 5.15) fueron homogéneas la mayor parte de ellas.

Para la precipitación acumulada se identificó que todas las series analizadas de las estaciones 30003, 30114, 30158 y 30179 fueron homogéneas. Las estaciones 30032, 30048, 30093 y 30141 presentaron únicamente una serie no homogénea, las series fueron la de agosto, junio (cambio probable en 1981), la anual (cambio probable en 1952) y la de octubre (cambio probable en 2013), respectivamente. En las estaciones 30056 y 30193 se presentaron dos series no homogéneas para cada estación; marzo (cambio probable en 1972) y octubre (cambio probable en 2013); primavera-verano (cambio probable en 1993) y febrero (cambio probable en 1963), respectivamente. Con respecto a la estación 30066 se observó una mayor cantidad de series no homogéneas, en la serie anual, primavera-verano, enero, abril y octubre se notó un cambio probable en ellas entre 1997 y 1998; las series de otoño y octubre presentaron un posible año de cambio en 1944, mientras que para agosto se observó en 1946; para junio se tuvo un punto de cambio probable en la serie en 1987. Para la estación 30094 se identificó en 1988 un cambio claro en la serie anual, otoño-invierno, primavera-verano y enero; en 1989 se observó un cambio para la serie de febrero y agosto; y las series de marzo y junio presentaron un cambio en 1972 y 1986, respectivamente. Por último, la estación 30136 presentó seis series no homogéneas (anual, otoño-invierno, primavera-verano, marzo, agosto y octubre) de las cuales no se identificó un punto de cambio de las series.

Las series de la precipitación máxima mostraron una mayor homogeneidad. Únicamente cinco estaciones presentaron series no homogéneas; la estación 30003, en su serie de enero, fue no homogénea. En el caso de la estación 30066, las series anual, otoño-invierno, agosto y septiembre, fueron no homogéneas, con un punto de cambio probable en el año 2000, mientras que las series de primavera-verano y junio lo tuvieron en 1995, para la serie de enero y la serie de octubre se observó un posible cambio de comportamiento en 1999 y 1998, respectivamente. La serie de otoño-invierno fue no homogénea en la estación 30093. Existe un probable cambio en 1989 en las series anual, primavera-verano y agosto, mientras que en la serie de marzo y la de junio lo presentaron en 1972 y 1985, respectivamente, esto para la estación 30094. Finalmente, las series anual, otoño-invierno, primavera-verano, marzo, mayo, agosto, octubre y noviembre, de la estación 30136, fueron no homogéneas sin mostrar un cambio claro en las series.

Tabla 5.14 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la precipitación acumulada (series anuales, periódicas y mensuales).

Estaciones	Dictamen							
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero	marzo	abril	mayo
30003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30032	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30048	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30056	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
30066	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea
30093	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30094	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
30114	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30136	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
30141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30158	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30179	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30193	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Estaciones	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
30003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30032	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30048	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30056	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30066	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30093	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30094	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30114	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30136	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30158	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30179	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30193	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	

Tabla 5.15 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la precipitación máxima (series anuales, periódicas y mensuales).

Estaciones	Dictamen							
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero	marzo	abril	mayo
30003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30032	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30048	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30056	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30066	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30093	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30094	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
30114	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30136	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea
30141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30158	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30179	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30193	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Estaciones	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
30003	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30032	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30048	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30056	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30066	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30093	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30094	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30114	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30136	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	
30141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30158	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30179	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30193	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	

En el caso del análisis de la homogeneidad del promedio de la temperatura máxima (tabla 5.16), así como de la mínima (tabla 5.17), se notó que la gran mayoría de las estaciones fueron no homogéneas, por lo que implica que hubo cambios en el comportamiento de las series, en el capítulo siguiente se determina si estos cambios fueron estadísticamente relevantes para presentar una tendencia.

En la tabla 5.16 se resumen los resultados de las pruebas de homogeneidad del promedio de la temperatura máxima. Únicamente la estación 30193 presentó homogeneidad en todas sus series analizadas, en cambio el resto de estaciones tuvieron al menos tres series no homogéneas. La estación 30003 tuvo diez series que presentaron algún cambio (no homogéneas), ocho de las series presentaron ese cambio al final de las mismas, entre 2007-2009, también se observó un cambio a inicio de la serie de febrero (en 1962) y junio (en 1958). Todas las series de la estación 30032 fueron no homogéneas, con un cambio claro en su régimen entre 1979-1980. Tres series de la estación 30048 fueron no homogéneas, la serie otoño-invierno presentó un cambio en 1998, mientras que las series de noviembre y diciembre lo presentaron en 1988. En la mayor parte de las series no homogéneas de la estación 30056, se observó un cambio en ellas entre 1993-1996, excepto por las series de febrero y diciembre, que se vislumbró un posible cambio a inicio del registro, y la serie de junio al final del mismo. Nueve series de la estación 30066 fueron no homogéneas, en las cuales se pudo identificar un cambio entre 1998 y el año 2000, aunque para la serie de primavera-verano las pruebas no determinaron un punto claro de cambio. Nueve de las diez series no homogéneas de la estación 30093 presentaron un cambio al final de la serie (2013), mientras que la serie primavera-verano lo presentó al inicio (1953). Las pruebas de homogeneidad concluyeron que hubo un cambio en 1991 en seis series de la estación 30094. Entre 1958 y 1962 se presentó un cambio en el comportamiento de algunas series de la estación 30114. Al final del registro (2005), de 14 series de la estación 30136, se observó un cambio en el régimen que determinó su no homogeneidad. En todas las series no homogéneas de la estación 30141 no se observó un claro cambio, aunque los resultados de las pruebas indicaron que podría encontrarse entre 1979 y 1986. En la estación 30158 no se observó un punto claro de cambio en sus series, pero para doce de ellas este cambio podría encontrarse entre 1981-1983, para la serie de septiembre en 1973, mientras que en las de febrero y junio en 1963. Por último, se analizó la estación 30179, donde las series de primavera-verano, agosto y septiembre no presentaron un punto claro de

cambio, mientras que las series anual, junio y octubre se pudo identificar un probable punto de cambio en 1957, 1958 y 1947, respectivamente.

Para el promedio de la temperatura mínima se resume el análisis en la tabla 5.17, se observaron una gran cantidad de series no homogéneas, lo que indica probables cambios en la dinámica de la temperatura mínima. En el análisis de esta variable se percató que todas las estaciones presentaron al menos una serie no homogénea, la estación 30003 presentó cuatro estaciones no homogéneas, dos de las cuales (la serie anual y la de junio) tuvieron un probable punto de cambio en 1973, mientras que en 1979 se observó un posible cambio en la serie de abril, en la serie de marzo no se identificó un punto claro de cambio. Para la estación 30032 se observó un probable cambio en el comportamiento de las series entre 1980 y 1986. Todos los registros de la estación 30048 fueron no homogéneos, en diez de ellos se identificó un posible año de cambio entre 1996 y 1997, mientras que, en los de mayo, junio, julio agosto y septiembre se observó en 1987. Con respecto a la estación 30056 se percató de probables cambios de comportamiento en las series entre 1964 y 1969. En la estación 30066 se identificaron trece series no homogéneas, once de las cuales presentaron un claro año de cambio en 1978, mientras que en la serie de enero se notó el cambio en la serie en 1980, y en 1981 en la de octubre. Únicamente el registro del mes de septiembre de la estación 30093, fue no homogéneo teniendo un probable punto cambio en 1980. La estación 30094 tuvo nueve series no homogéneas, en su mayoría se observó un cambio claro en su régimen entre 1981 y 1982, la serie de noviembre mostró un probable punto de cambio en 1973. Trece series, de la estación 30114, fueron no homogéneas, la serie del mes de febrero mostró un probable cambio en el registro en 1959, mientras que el resto mostraron un posible cambio al final del registro (entre 1998 y 2001). En la estación 30136, al inicio de la serie de marzo (en 1954) y noviembre (en 1952), se observó un cambio en el comportamiento de la serie, mientras que para el resto se notó ese cambio al final del registro (2005). En la estación 30141 se coincidió que todos los registros analizados fueron no homogéneos, y en todos ellos se notó un cambio al final de los mismos (2013). En todas las series de la estación 30158 se identificó no homogeneidad, en diez de ellas es probable que el punto de cambio se encuentre entre 1976 y 1979, mientras que para las series de primavera-verano, mayo, junio, julio y agosto se identificó que el posible cambio en el comportamiento fuese en 1983. En la estación 30179 se identificaron 13 series no homogéneas, en la mayoría se observó un probable punto de cambio al final de la serie, entre 1996 y 1998, mientras

que la serie de noviembre mostró un cambio al inicio del registro (1948). Por último, se analizó la estación 30193, en la cual trece series fueron no homogéneas con un posible cambio en su comportamiento al final del registro, entre el 2007 y el 2013.

Tabla 5.16 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la temperatura máxima promedio (series anuales, periódicas y mensuales).

Estaciones	Dictamen							
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero	marzo	abril	mayo
30003	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
30032	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30048	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30056	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30066	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30093	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30094	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30114	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30136	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30141	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30158	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30179	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30193	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Estaciones	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
30003	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30032	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30048	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30056	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	
30066	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30093	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	
30094	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30114	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30136	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30141	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	
30158	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30179	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30193	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	

Tabla 5.17 Resultados y dictamen de las pruebas de homogeneidad para la temperatura mínima promedio (series anuales, periódicas y mensuales).

Estaciones	Dictamen							
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero	marzo	abril	mayo
30003	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea
30032	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30048	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30056	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
30066	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30093	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30094	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
30114	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea
30136	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea
30141	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30158	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30179	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea
30193	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea
Estaciones	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
30003	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30032	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30048	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30056	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30066	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	
30093	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	
30094	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	
30114	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30136	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30141	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30158	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30179	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	
30193	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	

5.6 Resultados de la prueba de tendencia (Mann Kendall)

En esta capítulo se desglosan los resultados de la prueba de tendencia de Mann Kendall, se resumen de la tabla 5.18 a la tabla 5.24, en las cuales se puede ver el dictamen de la prueba, si la serie analizada no presentó un cambio estadísticamente relevante se identifica como “Sin tendencia”, por otro lado si existe variación en el comportamiento de la serie y marca un cambio estadísticamente significativo (nivel de significancia $\alpha=0.05$) para observar una tendencia en ella se identificó como “T. positiva” si el cambio es ascendente, mientras que si el cambio es descendente se identificó como “T. negativa”.

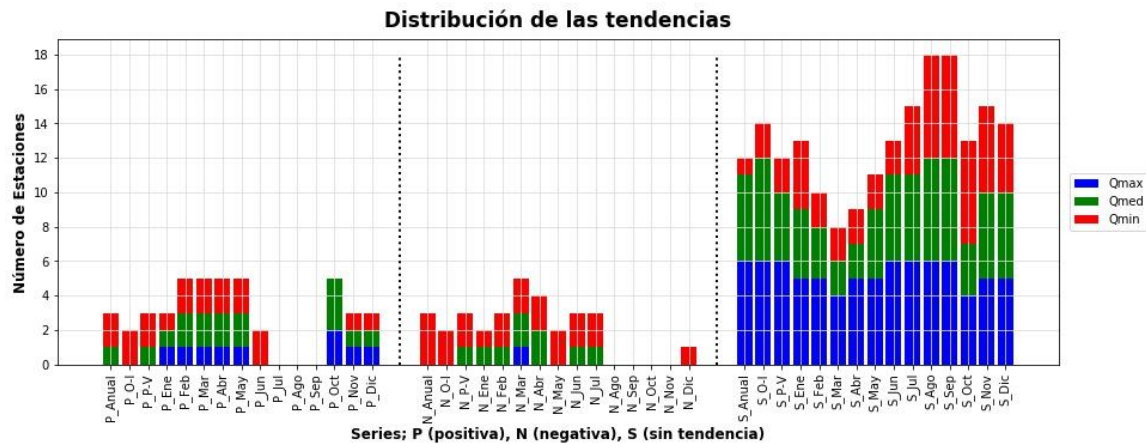
5.6.1 Series de escurrimiento medio, escurrimientos máximos y mínimos instantáneos

El análisis de la prueba de Mann Kendall de las tres variables del escurrimiento mostró que fueron pocas las series que presentaron algún tipo de tendencia, el mayor número de las estaciones con tendencia fueron las series del escurrimiento medio y el escurrimiento mínimo instantáneo. La figura 5.6 muestra un panorama general del comportamiento de las series, de las variables del escurrimiento, la parte izquierda de la gráfica muestra el número de series por estación con tendencia positiva, se puede identificar que fueron pocas las series de Qmax con tendencia positiva, la mayor parte de las series que presentaron esta tendencia fueron los Qmed y Qmin, además se puede observar que las series de julio, agosto y septiembre no presentaron variación alguna; la parte central de la figura 5.6 identifica el número de series con tendencia negativa, se puede observar que el Qmed y Qmin son las variables que en su mayoría presentaron esta tendencia, además se identifica que entre agosto y noviembre no se han presentado variación en el régimen de los escurrimientos. Por otro lado, en la parte derecha de la figura 5.6 se observa la mayor parte de las series de los escurrimientos (Qmax, Qmed y Qmin), las cuales no presentaron tendencia estadísticamente significativa, lo que implica, de forma general, que es poca la variación en los registros de los escurrimientos, especialmente en los escurrimientos máximos instantáneos, que son los registros que presentaron mayor consistencia en su comportamiento.

Ahora, en un análisis más específico en el comportamiento de las estaciones hidrométricas, identificó que solamente dos estaciones mostraron una tendencia creciente en más de una serie analizada, que fueron la estación 28108 y la estación 28111, lo cual es probable que indique un

cambio en la interacción hidroclicmática de las subcuencas que miden. Por otro parte, se identificaron dos estaciones, 28040 y 28069, que presentaron tendencia decreciente en varias de sus series, en particular en los escurrimientos mínimos instantáneos, y en algunas de sus series de escurrimiento medio.

Figura 5.6 Resumen de la prueba de Mann Kendall para los escurrimientos.



Por otra parte, describiendo los resultados obtenidos, para cada estación hidrométrica, la estación 28003 es una de las estaciones que presentó menos alteraciones en el régimen de los escurrimientos, únicamente se identificó que los meses de junio y julio tuvieron una tendencia negativa, tanto para los escurrimientos medios como para los mínimos instantáneos, lo que podría implicar que los patrones de las variables climáticas están sufriendo alteraciones en esos dos meses en particular.

La estación 28030 fue la estación que presentó menos alteraciones en las series analizadas, ya que únicamente la serie anual, de los escurrimientos mínimos instantáneos, presentó un cambio estadísticamente significativo, el cual mostró una tendencia negativa.

La estación 28040 fue una de las dos estaciones que presentaron una mayor cantidad de series con tendencia decreciente en su régimen de escurrimientos, en particular, esta estación presentó una clara tendencia a disminuir los escurrimientos mínimos, ya que once de las series analizadas mostraron esta tendencia. En el caso de los escurrimientos medios se observó una tendencia negativa en el primer tercio del año, mientras que octubre mostró una tendencia positiva, esto podría indicar diferentes cambios de comportamiento de las variables climáticas.

La estación 28069, fue otra estación que presentó clara evidencia de que los escurrimientos tienen una tendencia a disminuir, lo cual es más evidente en los escurrimientos mínimos instantáneos, donde seis de sus series mostraron esta tendencia; mientras que los escurrimientos medios mostraron que los meses de marzo y abril tuvieron tendencia negativa; en el mes de octubre se identificó una tendencia positiva en su régimen.

Tabla 5.18 Tendencia del escurrimiento máximo instantáneo (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28069	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28111	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28069	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28111	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28069	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
28111	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva

Adentrándose en los resultados observados en la estación 28108 se identificó que únicamente la serie de octubre, de los escurrimientos máximos, presentó tendencia creciente. Los resultados indicaron que la estación ha tenido una sostenida tendencia creciente en sus series de los escurrimientos medios y mínimos instantáneos, las series que no presentaron ninguna tendencia, para las variables mencionadas, fueron los meses de enero, julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre. Lo cual plantea que solamente la mitad del año está teniendo cambios en el comportamiento de los escurrimientos de la cuenca.

En la estación 28111 los resultados indicaron la existencia de cierta tendencia creciente en el comportamiento de las series, lo cual se observó en todas las variables de escurrimiento analizadas, se identificó que solamente las series de los meses que van de julio a octubre fueron las que no mostraron tendencia alguna; es importante señalar este comportamiento de las series, ya que indican que más de la mitad del año ha tenido cambios en el comportamiento del escurrimiento de la cuenca, lo cual también se vio reflejado en la serie anual y las series de los períodos, lo que muestra una marcada variación en el régimen de escurrimientos de la cuenca, que podría deberse a cambios en el comportamiento de las variables climáticas o incluso una modificación en la reacción de la cuenca ante diferentes eventos meteorológicos.

Tabla 5.19 Tendencia del escurrimiento medio (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
28069	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
28111	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28069	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
28111	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
28069	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
28111	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva

Tabla 5.20 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28030	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
28069	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
28108	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
28111	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
28069	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
28111	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
28003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28030	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28040	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
28069	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28108	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
28111	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva

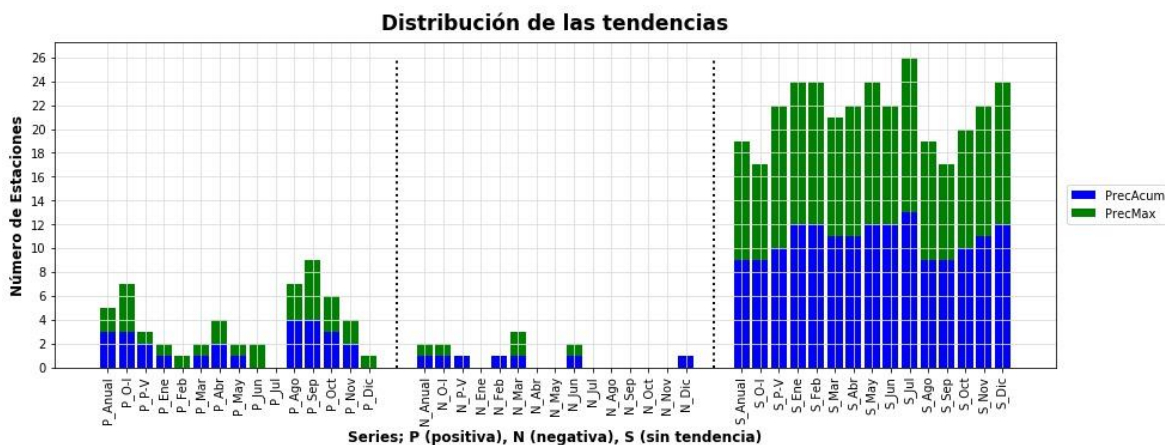
5.6.2 Series de las variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima)

Las diferentes variables climáticas son el impulso que se ve reflejado en los escurrimientos de una cuenca, es por ello que se debe analizar a detalle su comportamiento a través de los años.

En primer lugar, se realizó el análisis de las tendencias de la precipitación, se analizó la precipitación en dos tipos de series, las series de la precipitación acumulada, que indica el total de agua disponible en los diversos lapsos de tiempo en que fueron organizadas las series; y por otro lado la precipitación máxima en 24 horas, que hace referencia a eventos de alta precipitación en corto tiempo, lo cual podría ser el impulso de los escurrimientos máximos debido a la poca oportunidad de infiltración la figura 5.7 muestra un panorama general de los resultados de la prueba de Mann Kendall para la variable de la precipitación, en una primera observación se identifica que la variable ha presentado pocas series con algún tipo de tendencia, en general la precipitación ha mantenido su comportamiento a través del tiempo. En la parte izquierda de la gráfica se observa la cantidad de series con tendencia positiva, que es la tendencia que mayormente se presentó en las

estaciones analizadas. En la parte central de la gráfica se observa un número muy reducido de series con tendencia negativa. Finalmente, la parte derecha de la gráfica muestra el mayor número de series identificadas como sin tendencia, con lo cual se puede inferir que en el área de estudio la precipitación ha mantenido su régimen. Es importante señalar que de todas las variables hidroclimáticas analizadas, la precipitación es la que presentó menos cambios en su comportamiento.

Figura 5.7 Resumen de la prueba de Mann Kendall para la precipitación.



En la tabla 5.21 se resumen los resultados de la tendencia de las series de la precipitación acumulada, mientras que en la tabla 5.22 se resumen los de la precipitación máxima en 24 horas. Es importante señalar que se identificaron dos estaciones (30114 y 30179) que no presentaron tendencia en ninguna de las dos variables analizadas de la precipitación. Por otro parte, de acuerdo a los resultados de la prueba de tendencia Mann Kendall, se pudieron agrupar a cinco estaciones con un comportamiento semejante; las estaciones 30003, 30048, 30056, 30158 y 30193 no presentaron tendencia para las series anuales, ni periódicas, lo que indicaría que la precipitación, en general, ha cambiado su régimen a nivel mensual; en la mayoría de estas estaciones se observó una tendencia positiva en algunas de las series de los meses de agosto, septiembre y octubre; mientras que la estación 30193 únicamente presentó una tendencia decreciente en la serie del mes de marzo, para la precipitación máxima. Las estaciones 30066, 30093, 30136 y 30141, también compartieron un comportamiento semejante en la tendencia de sus series, se pudo observar que los cambios en el comportamiento de la precipitación fue tal que se vio reflejada en algunas de las series periódicas, e incluso esta tendencia positiva se identificó en varias series anuales de ambas

variables analizadas (precipitación acumulada y máxima); aunque la tendencia creciente se observó en algunas series de los meses de la primera mitad del año, se hizo más notoria la tendencia positiva en la segunda mitad del año, donde aumentó la cantidad de series con una modificación en su régimen. Por otro lado, se identificaron las estaciones 30032 y 30094, la primera únicamente mostró tendencia negativa para la serie anual, de la precipitación máxima; pero en la estación 30094 se identificó una mayor cantidad de series con una tendencia negativa, para la precipitación acumulada y la máxima en 24 horas, lo cual se podría ver reflejado en los escurrimientos de la cuenca en la que se encuentra ubicada dicha estación.

Tabla 5.21 Tendencia de la precipitación acumulada (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
30093	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30094	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
30114	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30136	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30093	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30094	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
30114	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30136	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.21 Tendencia de la precipitación acumulada (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
30093	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30094	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
30114	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30136	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.22 Tendencia de la precipitación máxima (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

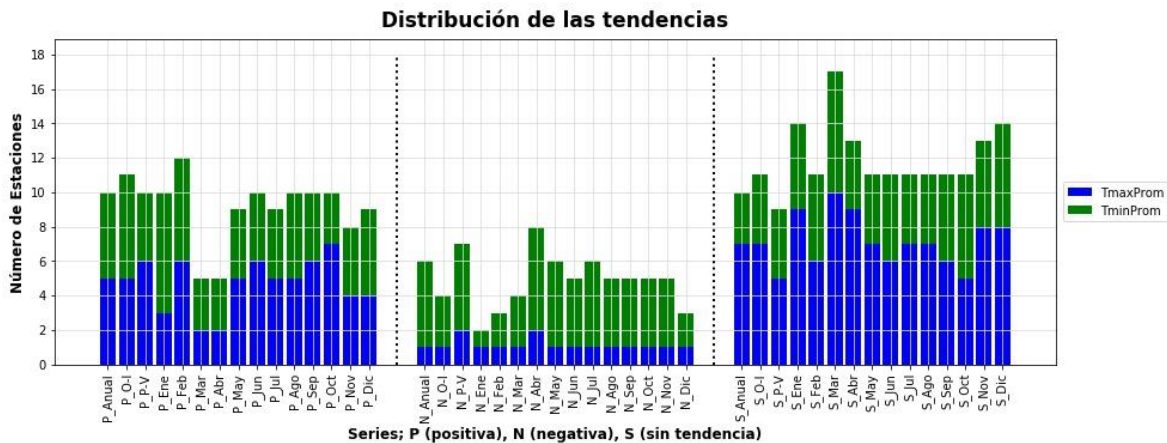
Estaciones	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30093	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30094	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30114	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30136	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30141	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
30093	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
30094	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
30114	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30136	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.22 Tendencia de la precipitación máxima (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
30158	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
30003	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30093	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30094	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30114	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30136	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Otra variable climatológica analizada fue la temperatura, las estaciones climatológicas realizan la medición de la temperatura máxima y la temperatura mínima, por lo que el análisis de los resultados de las tendencias se hizo individualmente, debido a que el comportamiento de ambas variables puede ser diferente. De forma general se pudo observar que una importante cantidad de series, de la temperatura máxima y mínima promedio, presentaron algún tipo de tendencia de acuerdo a la prueba de Mann Kendall, lo cual se observa gráficamente en la figura 5.8. Se observa en la parte izquierda de la gráfica que la tendencia positiva en las series fue la que más se presentó, también se puede identificar que esta tendencia se tuvo por igual para la temperatura máxima como mínima promedio. La parte central de la gráfica identifica la cantidad de series con tendencia negativa, que se observa una disminución en el número con respecto a la tendencia positiva, pero se identificó que la temperatura mínima promedio es la variable que presentó mayor número de series con esta tendencia. Finalmente, la parte derecha de la gráfica muestra el número de series sin tendencia.

Figura 5.8 Resumen de la prueba de Mann Kendall para la temperatura.



La tabla 5.23 resume los resultados de las tendencias de las series de temperatura máxima promedio, donde se observan una gran cantidad de series con tendencia creciente en esta variable analizada, es importante señalar que se identificaron cinco estaciones (30048, 30094, 30141, 30158 y 30193) que han mantenido el mismo comportamiento estadístico de sus series, es decir no han presentado tendencia alguna. También se observó que para la estación 30179, únicamente la serie del mes de octubre presentó tendencia creciente. Otra estación que presentó una reducida alteración en el comportamiento de sus series, fue la 30056, en la cual se notó tendencia positiva en la serie primavera-verano, al igual que en las series de los meses que pertenecen a este período (de mayo a septiembre), así como las series de los meses de octubre y febrero. Ahora, centrándose en cinco estaciones analizadas (30003, 30066, 30093, 30114 y 30136) se observó tendencia creciente generalizada en sus series, lo cual se notó desde las series anuales hasta las mensuales, lo que indica un gradual aumento de la temperatura máxima promedio para estas estaciones. En contra parte, la estación 30032 es la única que presentó tendencia negativa en sus series, lo cual mostró una evidencia clara de que la temperatura máxima promedio tiende a ser menor, ya que todas las series analizadas presentaron este tipo de tendencia.

Tabla 5.23 Tendencia de la T_{\max} promedio (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
30003	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
30032	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
30066	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30093	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
30094	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30114	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30136	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30032	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30066	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
30093	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
30094	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30114	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30136	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
30003	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30048	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30093	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30094	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30114	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30136	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30141	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30158	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30179	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

La última variable analizada en este capítulo fue la temperatura mínima promedio, los resultados de este análisis se resumen en la tabla 5.24. En primera instancia se identificó que la estación 30003 fue la única que no se presentó algún tipo de tendencia. También se observó que en la estación 30093 se ha mantenido prácticamente sin cambios el promedio de la temperatura mínima, únicamente la serie del mes de enero presenta tendencia creciente. En el resto de las estaciones se observó una constante tendencia, ya sea creciente o decreciente, en la mayoría de sus series. Se identificaron a seis de las trece estaciones analizadas (30056, 30114, 30136, 30141, 30179 y 30193) en las que la dinámica de temperatura mantuvo una constante tendencia positiva, lo que podría implicar que en dichas estaciones se ha tenido un calentamiento, mientras que en otras cinco estaciones (30032, 30048, 30066, 30094 y 30158) presentaron una clara tendencia negativa en la mayoría de las series analizadas, lo que implica que la temperatura mínima tiende a ser menor, esto conjuntado con la tendencias de la temperatura máxima promedio, podría indicar que los días en dichos puntos tienda a ser más extremosos.

Al completar el análisis de las dos variables de temperatura se identificaron dos estaciones, la estación 30114 y la 30136, con un comportamiento particular, ya que se observó una marcada tendencia creciente, tanto para el promedio de la temperatura máxima como para el promedio de la temperatura mínima, por lo que fue un claro indicativo que la dinámica climática ha presentado variación en esos dos sitios. En sentido contrario, se pudo identificar que la estación 30032 presentó una marcada tendencia negativa, en ambas variables analizadas, por lo cual, la dinámica de la temperatura, en dicho punto, está tendiendo a ser más fría. Este análisis previo del comportamiento de las temperaturas se ve reforzado con el análisis de los índices de cambio climático, con los que se notará con mayor detalle el comportamiento de las variables climáticas.

Tabla 5.24 Tendencia de la T_{\min} promedio (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
30048	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
30066	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
30093	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
30094	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.24 Tendencia de la T_{\min} promedio (anual, por períodos y mensual), prueba Mann Kendall.

Estaciones	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
30114	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30136	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
30141	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30158	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30179	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30193	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Estaciones	marzo	abril	mayo	junio	julio
30003	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30048	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30056	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
30093	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30094	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30114	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30136	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30141	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30158	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30179	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30193	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Estaciones	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
30003	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30032	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30048	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
30056	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30066	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia
30093	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
30094	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
30114	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
30136	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
30141	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30158	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
30179	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
30193	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva

5.7 Tendencia de los índices del cambio climático del ETCCDI

Los índices de cambio climático se basan en el análisis del comportamiento de tres variables, que se miden en todas las estaciones climatológicas nacionales, que son la precipitación, temperatura máxima y la temperatura mínima, a partir del análisis de estos índices se conoce mejor la dinámica climática del sitio de medición.

Figura 5.9 Resumen de la prueba de Mann Kendall para los índices de cambio climático (temperatura).

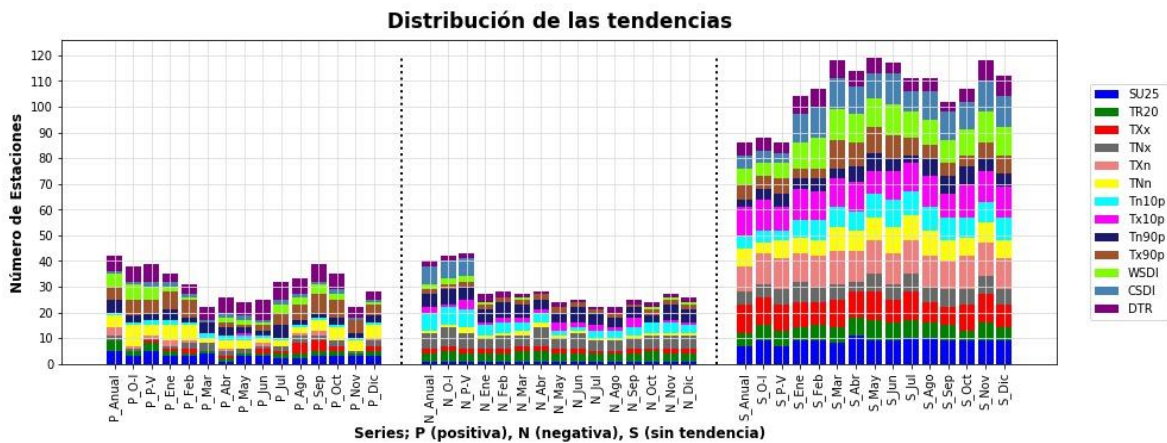
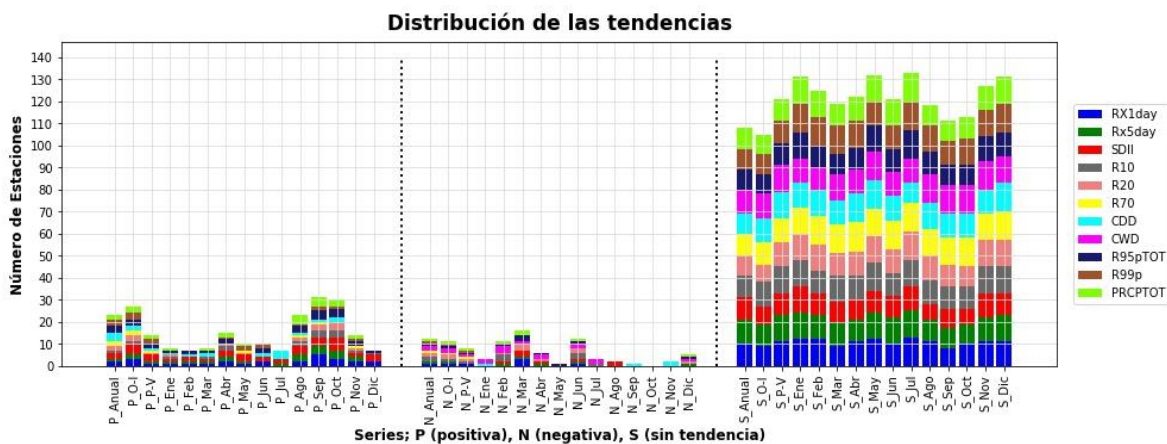


Figura 5.10 Resumen de la prueba de Mann Kendall para los índices de cambio climático (precipitación).



En general se pudo observar que los ICC que caracterizan la precipitación presentaron menor cantidad de series con tendencia (figura 5.10) que los ICC que caracterizan la temperatura

(figura 5.9), lo cual concuerda con la sección 5.6.2, por lo que se puede aseverar que la precipitación ha mantenido su comportamiento en la mayor parte de las estaciones climatológicas analizadas, mientras que las temperaturas han presentado cambios considerables lo cual se ve reflejado en los diferentes ICC analizados. Del análisis de las variables climáticas se puede decir que a pesar de que la dinámica de la lluvia se ha mantenido prácticamente estable, no significa necesariamente que las cuencas mantengan el mismo balance del recurso hídrico, ya que, como se puede observar, se tienen cambios de tendencia en las temperaturas y esta puede aumentar o disminuir la cantidad de evaporación y evapotranspiración de la cuenca, lo cual modificaría el balance hídrico. A partir del análisis, hasta este punto, se puede inferir que los cambios de tendencia en los escurrimientos, debido a variaciones climáticas, se le pueden atribuir en mayor medida a los cambios de comportamiento de la temperatura.

Los 27 índices de cambio climático fueron calculados para todas las estaciones, y para las 15 series de tiempo en que se dividieron las variables, a las series resultantes de los índices se les aplicó la prueba de tendencia de Mann Kendall; la tendencia de los índices se resume por estación, de la tabla 5.25 a la tabla 5.37, es importante señalar que en las tablas solamente fueron incorporados aquellos índices que presentaron al menos una serie con algún tipo de tendencia, por lo que el resto de los índices no incluidos son aquellos que se identificaron como “Sin tendencia”.

La estación 30003 mostró un marcado aumento en la temperatura, en particular en la segunda mitad del año, lo cual se pudo observar en cuatro índices, TXx, Tx90p, WSDI y DTR, estos índices no solamente indican que la temperatura va en aumento, sino que también se han aumentado los tiempos de los períodos cálidos; el índice DTR es importante, ya que indica que la diferencia entre temperatura máxima y mínima tuvo una tendencia a distanciarse, lo que hace que los días sean más extremosos; por otra parte, se observó una disminución en la temperatura en el período primavera-verano, lo cual se reflejó en los índices Tn10p y CSDI. En los índices TR20, TNx y Tn10p la tendencia negativa fue más dispersa. Para la precipitación se identificó únicamente tendencia positiva en el RX1day de septiembre, en contra parte, en algunas series se observó tendencia positiva en el índice CDD, lo que implica que ha aumentado los días sin presencia de lluvia en el sitio.

Tabla 5.25 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30003.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
TR20	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CSDI	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
R10	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
TR20	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TXx	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
TNx	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Tn10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
TXx	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia

De acuerdo a las tendencias mostradas en la tabla 5.26, la estación 30032 presentó una evidente tendencia a disminuir su temperatura, en especial seis de los índices que caracterizan a la temperatura máxima, esto se observó de manera generalizada en las series analizadas; también se notó un aumento en la temperatura mínima (TNn) en tres series; en consecuencia el índice DTR tiende a disminuir. En general la precipitación no mostró una alteración contundente en su comportamiento, únicamente en el mes de agosto de identificó una marcada tendencia positiva de la precipitación, tanto en intensidad como en el acumulado; mientras que la serie anual y la serie de primavera-verano mostraron una disminución en las precipitaciones intensas, así como en los períodos de humedad, por otro parte, el mes de julio mostró una tendencia a aumentar los días sin lluvia (CDD).

Tabla 5.26 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30032.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
SU25	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TXx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNn	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
WSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia
DTR	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
RX1day	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R70	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
CWD	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
R99p	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SU25	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TXx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
Tx90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
WSDI	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
SDII	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R10	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
SU25	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TXx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
Tx90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
WSDI	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa
DTR	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
SDII	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
R10	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

En la estación 30048 (tabla 5.27) se identificó una marcada tendencia a disminuir las temperaturas a lo largo del año, se pudo observar una tendencia a incrementarse los días fríos, de acuerdo a los índices Tn10p y CSDI, y la disminución de las temperaturas mínimas (TNx y TNn);

por otra parte, se detectó una disminución de las temperaturas máximas, ya que se identificó tendencia negativa en los índices TR20 y Tn90p. Lo anterior se vio reflejado en una tendencia a ser más extremas las temperaturas, ya que se presentó una tendencia a aumentar la diferencia entre la temperatura mínima y máxima de todas las series. En la estación se han observado pocos cambios en el comportamiento de la precipitación, únicamente se detectó una clara tendencia positiva para el mes de octubre, tanto para la intensidad como para el total precipitado.

Tabla 5.27 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30048.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNn	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
CSDI	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNn	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn10p	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
CSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
R20	T. negativa	Sin tendencia	T. positiva	T. negativa	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
CSDI	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
RX1day	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	T. negativa	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R99p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 5.28, se identificó que la temperatura, tanto máxima como mínima, mostraron tendencia positiva, en diversas series evaluadas; la

tendencia no solamente se observó en el aumento de temperaturas, sino que también en la tendencia al aumento de los días con temperaturas más altas. La precipitación únicamente mostró una marcada tendencia positiva en el mes de octubre.

Tabla 5.28 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30056.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
SU25	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
TR20	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
TXn	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TNn	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
Tn90p	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Tx90p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
SDII	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SU25	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
TXx	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Tx10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Tx90p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
DTR	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
CWD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
SU25	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TR20	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TXx	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TXn	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx10p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia

En la estación 30066 se observó tendencia a incrementarse los días con temperaturas altas, lo que se vio reflejado en los índices SU25 y Tx90p, y tendencia a disminuirse los días y noches frías al igual que las noches cálidas; también se notó que la máxima temperatura mínima, tiende a reducir su valor. Por otra parte, se identificó una evidente tendencia a aumentar los días extremos,

que se refleja en la diferencia entre la temperatura mínima y máxima (DTR). En esta estación se evidenció una clara modificación en el patrón de la precipitación, esta tiende a incrementarse tanto en la cantidad de lluvia como en su intensidad en todo el año.

Tabla 5.29 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30066.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
SU25	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TNx	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. positiva	Sin tendencia
Tx10p	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx90p	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
WSDI	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
RX1day	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Rx5day	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
SDII	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
R10	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
R20	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
R70	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
R95pTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
R99p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SU25	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
TNx	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Tn10p	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
Tx10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
RX1day	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Rx5day	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
SDII	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
R10	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
PRCPTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
SU25	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TNx	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn10p	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx10p	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.29 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30066.

Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Tn90p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx90p	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
RX1day	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Rx5day	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
SDII	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
R10	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
R20	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
R95pTOT	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
PRCPTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia

En la estación 30093 (tabla 5.30) se observó cierta tendencia positiva de las temperaturas (índices SU25, TXx y TNn) sobre todo en las series mensuales, también se notó un marcado aumento de los días calurosos, así como los períodos cálidos. Por otro lado, en varias series se observó una tendencia a disminuir el máximo de las temperaturas mínimas (TNx). En general, la precipitación presentó una tendencia a aumentar, se observó claramente en la serie anual y las series por períodos, y particularmente se identificó una tendencia creciente en el mes de septiembre.

Tabla 5.30 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30093.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
SU25	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
TNn	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia
Tx10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R10	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R99p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.30 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30093.

Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SU25	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
TNx	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TNn	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx10p	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Tx90p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
RX1day	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
SDII	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
CWD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
R95pTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
R99p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
TXx	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TNn	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
Tn10p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
WSDI	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Rx5day	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
R10	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
R95pTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
R99p	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

La estación 30094 presentó evidencia de que la temperatura máxima más baja tuvo tendencia a aumentar en la serie anual, también se notó una cierta tendencia a aumentar la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas de algunos meses; por otro lado, se identificó una clara evidencia de tendencia en la disminución del índice TNx, así como los días con temperaturas altas, representadas por los índices TR20 y Tn90p. La precipitación presentó una clara evidencia de tendencia negativa, tanto en cantidad como en intensidad, también se identificó que hay una tendencia a aumentar los días secos y disminuir los días húmedos, por lo que la distribución en el patrón de lluvias ha tenido cambios claros.

Tabla 5.31 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30094.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TXn	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx10p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
DTR	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Rx5day	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R10	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
R20	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R70	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
CWD	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
R95pTOT	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R99p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
DTR	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
RX1day	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Rx5day	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
SDII	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
R20	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
CDD	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
CWD	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
R95pTOT	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
PRCPTOT	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
DTR	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
R20	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CWD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
R95pTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
PRCPTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa

En la estación 30114 se identificó una marcada tendencia al aumento de las temperaturas, en la cantidad de días y el tamaño de sus períodos en las que se presentan mayores temperaturas. También se observó que el índice GSL tiende a disminuir, el cual es de suma importancia para la agricultura, ya que la duración de la estación de cultivo tiende a acortarse. En el caso de la precipitación se identificó tendencia creciente en los días secos a nivel anual y en el período otoño-invierno, únicamente el mes de mayo presentó una tendencia a aumentar la intensidad de la precipitación.

Tabla 5.32 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30114.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
SU25	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
GSL	T. negativa				
TXx	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
Tn90p	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
CSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SU25	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TNx	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TNn	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn10p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
Tn90p	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Tx90p	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
SDII	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R99p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
SU25	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TXx	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
TNn	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
Tx10p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva

En la estación 30136 se presentó una marcada tendencia en el aumento de temperatura en gran parte de las series, para los índices TXx, TXn y TNn, así como una tendencia a aumentar los días con mayores temperaturas, como lo reflejaron los índices SU25, Tn10p, Tx10p, Tx90p, CSDI y WSDI; por lo que es probable que la región de influencia de la estación ha tendido a calentarse. Por otro lado, se notó una tendencia negativa en el Tn90p y TR20. Respecto a la precipitación se observó un marcado cambio en su comportamiento, se identificó un aumento en la cantidad y la intensidad de la precipitación, aunque para la serie anual, y las series de julio y septiembre, se notó una tendencia a incrementarse los días secos, así como a disminuir los días húmedos de la serie otoño-invierno y la serie de enero.

Tabla 5.33 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30136.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
SU25	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
TXx	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TXn	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx10p	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia
Tn90p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
CSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
R20	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R70	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CWD	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
R95pTOT	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
R99p	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SU25	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TXx	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TXn	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx90p	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva

Tabla 5.33 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30136.

Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
WSDI	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
DTR	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
RX1day	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
R10	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R70	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
R95pTOT	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R99p	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
PRCPTOT	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
SU25	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TR20	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
TXx	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TXn	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx10p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
Tn90p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
Rx5day	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
SDII	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
R70	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
R99p	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
PRCPTOT	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia

En la estación 30141 se observó, en la mayoría de sus series, tendencia a aumentar las temperaturas, tendencia creciente en los períodos cálidos (WSDI) y disminución de los períodos fríos (CSDI), que se identificó sobre todo de abril a julio; cabe resaltar que se notó una marcada tendencia a aumentar las noches cálidas. Con respecto a la precipitación, únicamente mostró tendencia positiva el mes de octubre, tanto en intensidad como en precipitación total, mientras que en julio y agosto se notó un cambio en la distribución de la precipitación, ya que tuvieron una

tendencia a aumentar los días secos (CDD), y abril tuvo tendencia negativa en los períodos húmedos (CWD).

Tabla 5.34 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30141.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
TR20	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TNx	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva
TXn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx10p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
Tn90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia
CSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
TR20	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TNx	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tx90p	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
WSDI	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
CWD	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
SU25	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TR20	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TNx	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
TXn	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
Rx5day	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia

La estación 30158 mostró una marcada tendencia en la disminución de las temperaturas, de acuerdo a los diversos índices que las evalúan, también se observó una clara tendencia a que los días presenten una mayor diferencia entre su temperatura mínima y máxima (DTR). La precipitación se ha mantenido constante en la mayoría de las series analizadas, excepto por el mes de septiembre, donde se identificó una clara tendencia positiva, tanto en la intensidad como en la precipitación acumulada; y el mes de junio presentó una tendencia negativa en el índice R10.

Tabla 5.35 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30158.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TXx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNn	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn10p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
WSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
CSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TXx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNn	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn10p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia
CSDI	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
TR20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TXx	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa
TNx	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
TNn	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn10p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn90p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tx90p	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	T. negativa	T. negativa
CSDI	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
DTR	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
RX1day	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.35 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30158.

Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
R10	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

La estación 30179 presentó, en los diversos índices que evalúan la temperatura, una clara tendencia a aumentar las temperaturas (máxima y mínima), así como en el aumento de días con altas temperaturas (SU25, TR20, Tn90p, Tx90p) y la duración de los períodos cálidos. Por otro lado, se observó una clara alteración en el patrón de la precipitación, ya que se identificó una disminución en la cantidad e intensidad de la lluvia, sobre todo en la primera mitad del año.

Tabla 5.36 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30179.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
SU25	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TR20	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
TXx	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
TNx	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
TNn	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
WSDI	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
SDII	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
R20	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
CWD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
R95pTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
PRCPTOT	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SU25	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TNx	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
RX1day	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Rx5day	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Tabla 5.36 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30179.

Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
SDII	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R20	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
PRCPTOT	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
SU25	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
TXx	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
TNx	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
Tn90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
Tx90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
WSDI	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Finalmente, la estación 30193 presentó únicamente tendencia positiva en los índices que evalúan el comportamiento de la temperatura, sobre todo los de la temperatura mínima. De acuerdo a los índices TR20, TNx, TNn y Tn90p, se identificó una tendencia clara en el aumento de la temperatura mínima y la disminución de los días con bajas temperaturas, de acuerdo a Tn10p y CSDI. Por otro lado, la precipitación presentó evidencia de un cambio en su patrón, debido a que se observó una disminución de la precipitación en diversas series evaluadas.

Tabla 5.37 Resultados de la prueba Mann Kendall para los índices del cambio climático, estación 30193.

Índice	Tendencia				
	anual	otoño-invierno	primavera-verano	enero	febrero
TR20	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
TNx	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
TNn	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
Tn90p	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia
CSDI	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa	T. negativa
R10	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa
CWD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa
Índice	marzo	abril	mayo	junio	julio
TR20	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
Tn90p	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva
DTR	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
RX1day	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
R95pTOT	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia

Índice	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
TR20	T. positiva	T. positiva	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
TNx	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	T. positiva
TNn	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tn10p	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia
Tn90p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	T. positiva	T. positiva
Tx90p	Sin tendencia	Sin tendencia	T. positiva	Sin tendencia	Sin tendencia
DTR	T. negativa	T. negativa	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia
SDII	T. negativa	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia
CDD	Sin tendencia	Sin tendencia	Sin tendencia	T. negativa	Sin tendencia

5.8 Cambio de uso de suelo y vegetación

Los usos de suelo y la cobertura vegetal están en constante cambio, debido a la dinámica de las poblaciones, las principales acciones que incitan el cambio de uso de suelo es la extensión agrícola y ganadera, así como la extensión de los asentamientos humanos, estos cambios afectan la dinámica de la cuenca en diferente medida, por lo cual es fundamental tener claro que cambios han ocurrido a lo largo del tiempo.

En la figura 5.11 se observa la evolución de los usos de suelo y vegetación desde la década de los ochenta hasta el 2014, que es la carta más actualizada. En general se puede observar que la agricultura es el uso de suelo que ha dominado la superficie a lo largo de los años, también se observa grandes superficies de pastizal, las zonas altas de las subcuencas han mantenido una superficie importante de bosque inalterado.

En el área drenada por la estación 28003 se observó que el uso agrícola ha mantenido el mayor porcentaje de la superficie, incluso aumentó su superficie en 7.33% desde 1985 hasta el 2014, es importante señalar que se ha reducido las zonas de vegetación inalterada, tanto de bosques como de selvas, en un 38 %, mientras que la zona urbana es la que ha mostrado un mayor incremento en su superficie pasando de 4.35 km² a 38.17 km² en 2014, lo que representó un aumento del 777.45%.

La subcuenca perteneciente a la estación hidrométrica 28030 presentó importantes cambios en la vegetación, se perdieron superficies inalteradas de vegetación, sobre todo de bosque inalterado del cual se identificó una pérdida del 60.74% de la superficie en 1985. La agricultura también representa la mayor proporción de la superficie de la cuenca y se vio un ligero aumento

en los últimos años, mientras que la zona urbana representó el incremento más notorio en superficie, ya que aumento en un 2244.72% con respecto a 1985.

El área drenada hasta la estación 28040, se ha mantenido dominada por el uso agrícola que hasta el 2014 representaba el 52.31% de la superficie total de la cuenca, pero ha visto grandes pérdidas en la superficie selvática, ya que se perdió el total de su área inalterada y se redujo en un 75.79 % del área alterada. En la década de los ochenta los asentamientos no eran representativos en la zona, pero tuvieron un gran incremento y ahora ocupan 13.57 km² de la superficie de la subcuenca.

Figura 5.11 Cambios de uso de suelo (de 1985 al 2014) de las subcuencas medidas por las estaciones hidrométricas en análisis.

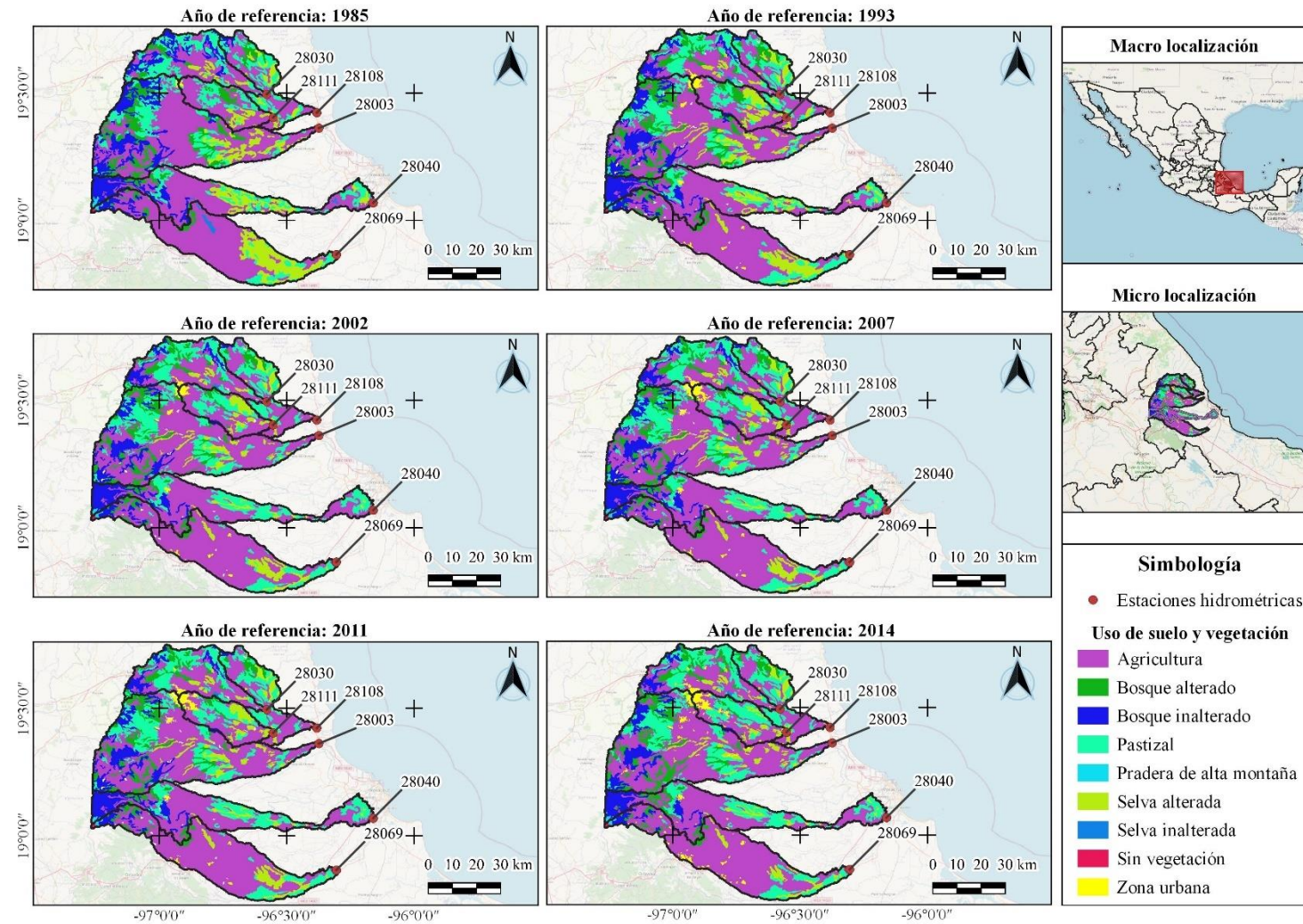


Tabla 5.38 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28003.

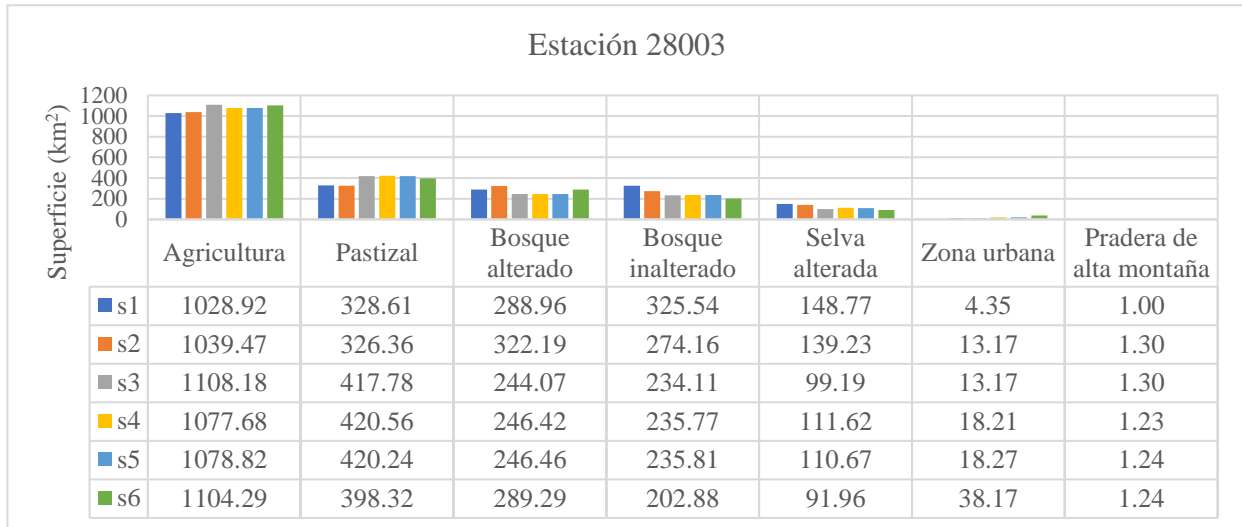


Tabla 5.39 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28030.



Tabla 5.40 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28040.



La subcuenca perteneciente a la estación 28069, también ha perdido la mayoría de su superficie selvática, que hasta el 2014 únicamente representaba el 5.53% de la subcuenca, se observaron grandes incrementos en el área de pastizal, aumento 45.9% respecto a 1985, mientras que la zona urbana es la que representó el mayor aumento en su superficie incrementándose en 3324.65% con respecto a 1985. Es importante señalar que es la subcuenca con mayor superficie agrícola, con prácticamente tres cuartas partes de su superficie, hasta el año 2014.

Como en la mayor parte de las subcuencas analizadas, la superficie de la subcuenca de la estación 28108 está dominada por la agricultura y representa el 43% de la superficie total, la agricultura ha tenido ligeras variaciones a través de los años, pero prácticamente se ha mantenido la misma área, en cambio el bosque inalterado es el que ha tenido las mayores pérdidas de terreno, reduciéndose en un 62.47% hasta el año 2014. También la subcuenca tuvo grandes variaciones en la zona urbana, pasando de solo 5.20 km², en 1985, hasta 74.23 km² en el 2014, es la subcuenca con mayor superficie urbana, mucho se debe a que la capital veracruzana queda dentro del área de la subcuenca.

Tabla 5.41 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28069.

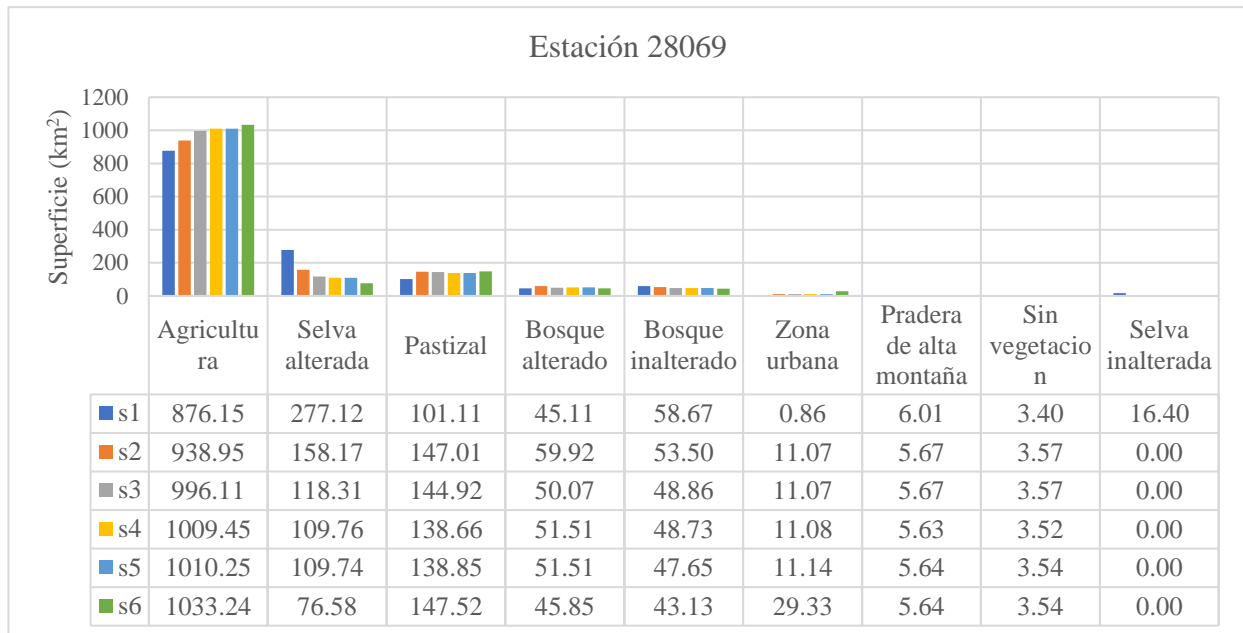
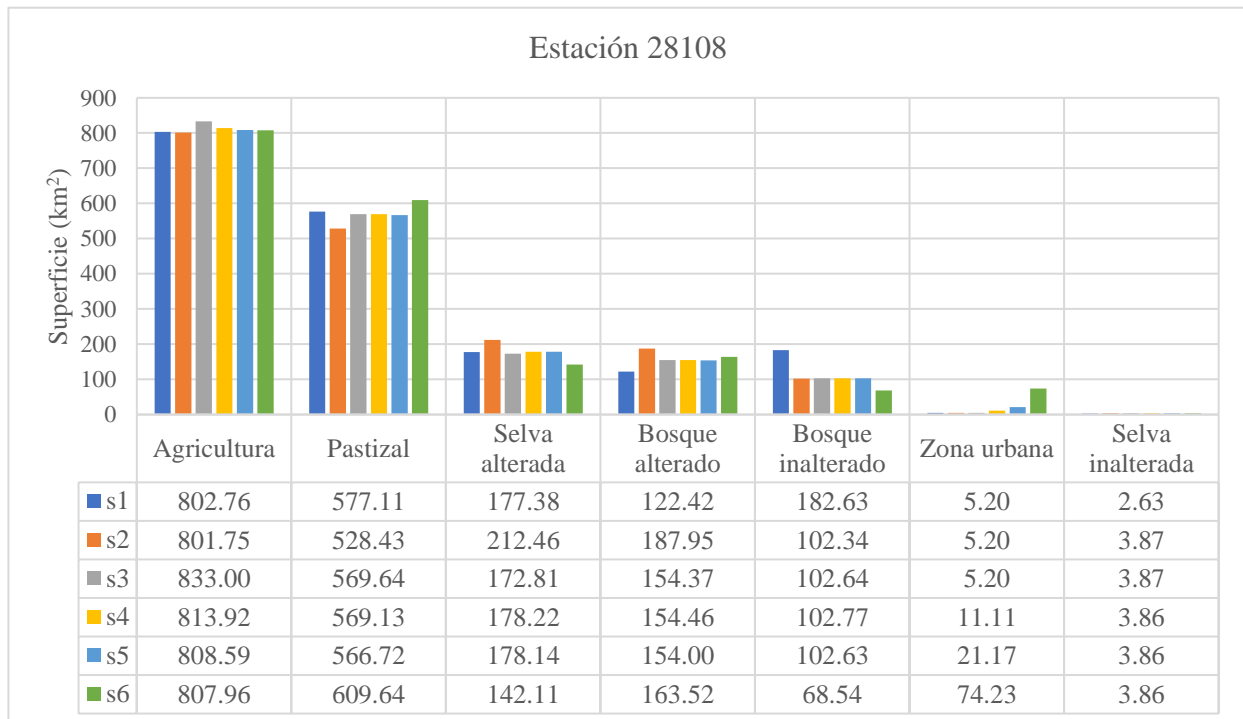
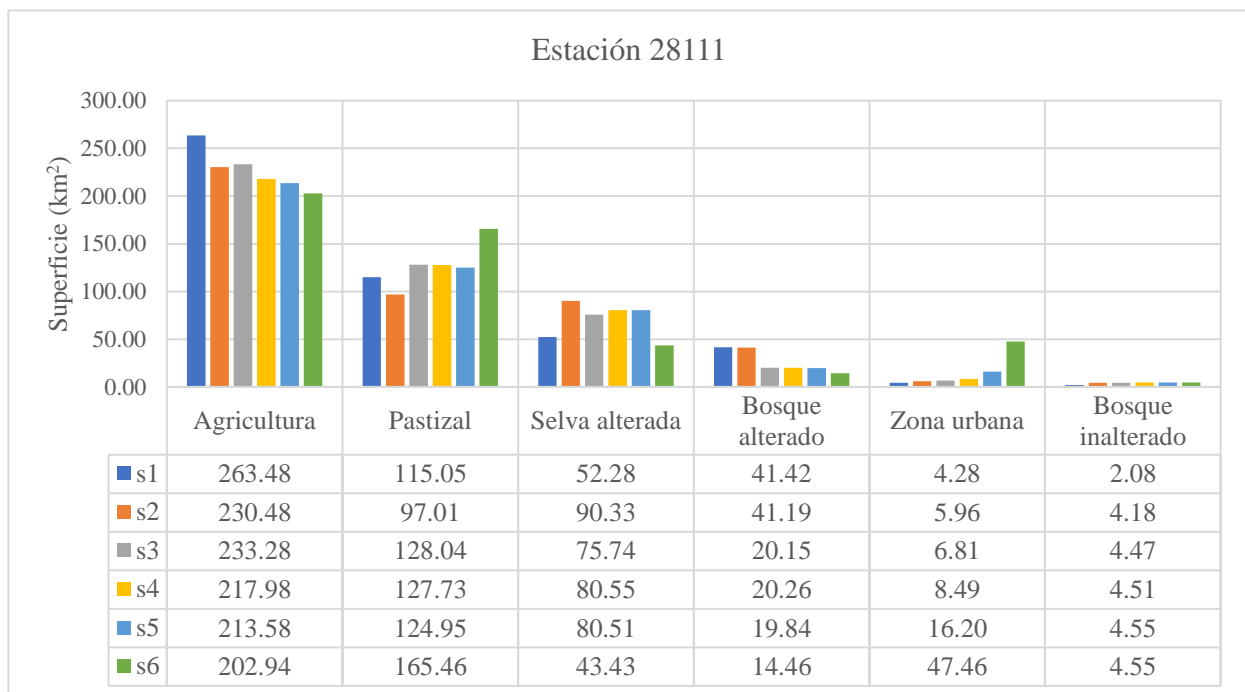


Tabla 5.42 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28108.



Finalmente, la subcuenca perteneciente a la estación 28111 es la única que presentó disminución en la superficie agrícola, se ha reducido en 23% con respecto a 1985, aunque hasta el año 2014 seguía representando el uso de suelo dominante (42.43% del área total), también se observaron disminuciones en la superficie del bosque inalterado y la selva alterada. Es importante señalar el aumento del área urbana, que pasó de 4.28 km² en 1985, a 47.46 km² en el 2014, convirtiéndola en la subcuenca con mayor superficie urbana con respecto a la superficie total de la subcuenca.

Tabla 5.43 Cambio de uso de suelo y vegetación de la subcuenca drenada hasta la estación 28111.



5.9 Análisis de resultados

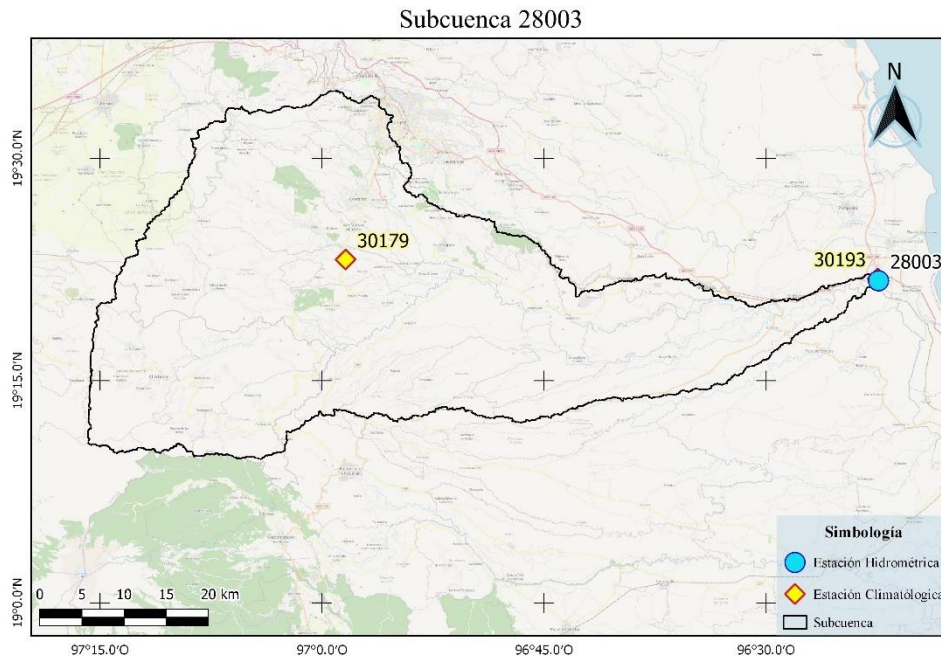
De acuerdo a los resultados observados en el capítulo 5.6.1, se pueden identificar tendencias, en los registros de las estaciones hidrométricas analizadas, ya que existe variación estadísticamente significativa. Cinco de las seis estaciones hidrométricas analizadas mostraron una consistente variación en el régimen de sus escurrimientos, por lo que se analizaron más a fondo en

su comportamiento, para identificar cualitativamente los factores que podrían estar implicados en estos cambios observados.

5.9.1 Subcuenca de la estación 28003

En el análisis de las series de los escurrimientos de la estación 28003, se observó que los escurrimientos máximos instantáneos han mantenido su régimen. En los escurrimientos medios se observó tendencia negativa en las series de primavera-verano, junio y julio; al igual que las series de junio y julio de los escurrimientos mínimos instantáneos. Como se observa en la figura 5.13 y figura 5.14 la tendencia en las series no es muy evidente gráficamente, aunque es estadísticamente relevante para que la prueba de Mann Kendall detectara el cambio, se puede observar que los primeros años del registro son los que presentan mayores escurrimientos en ambas variables analizadas y que se ha visto una disminución paulatina en los mismos.

Figura 5.12 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en la subcuenca 28003.



Debido a que el escurrimiento es la respuesta de la interacción de los usos de suelo, la vegetación y las variables climáticas, se analizó el comportamiento de los mismos. Dentro del área

de la subcuenca se encuentran dos estaciones climatológicas, la estación 30179 en la subcuenca alta, y la estación 30193 en la subcuenca baja.

Figura 5.13 Tendencia del escurrimiento medio (m³/s). Estación 28003.

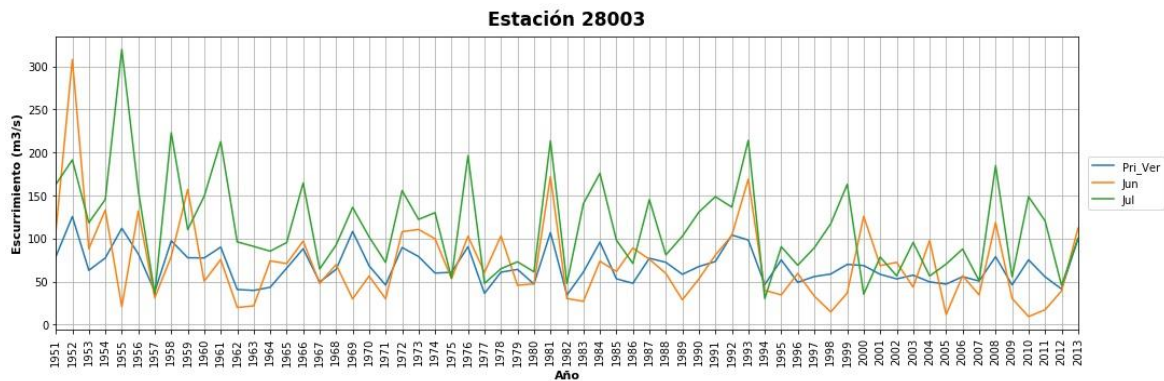
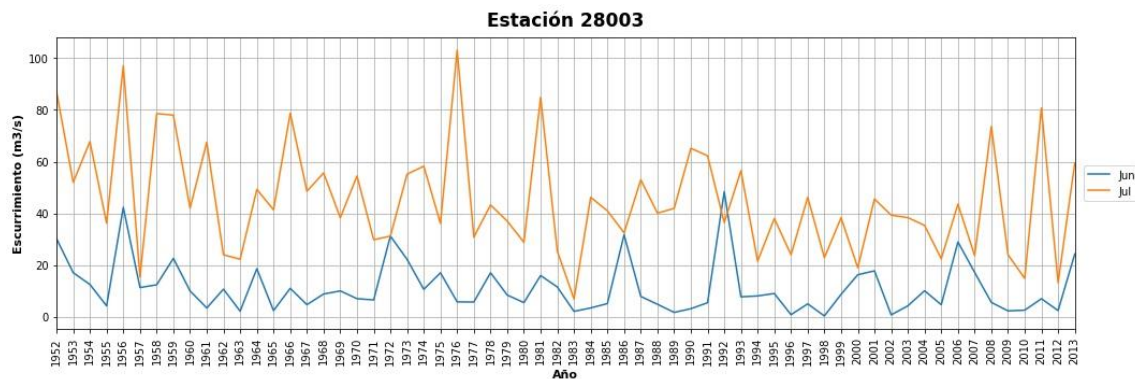


Figura 5.14 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m³/s). Estación 28003.



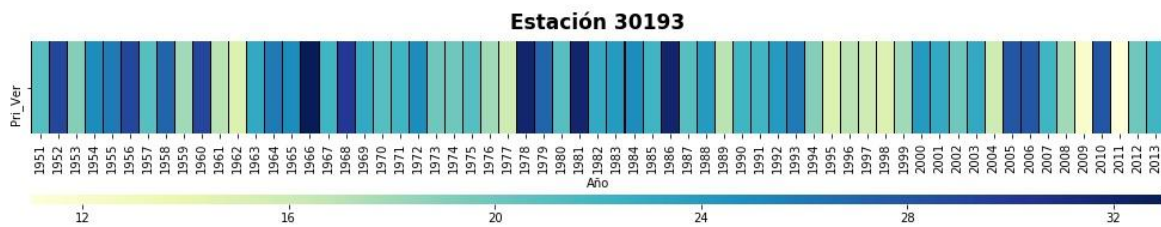
En primer lugar, se debe hacer notar que la precipitación en la subcuenca presentó cambios en su comportamiento, esto de acuerdo a los resultados de los índices de cambio climático (capítulo 5.7), las variaciones en las series indicaron tendencia negativa en la precipitación en ambas estaciones, pero este patrón se identificó entre febrero y abril. Ahora, para las series en las que el escurrimiento presentó alteraciones en su régimen (primavera-verano, junio y julio), se notó que en general la precipitación (para esas series) no mostró alteración suficiente para considerar que hubo tendencia. En el análisis de los ICC se observó que para las series de estos meses analizados, son pocos los índices que mostraron algún cambio en su comportamiento, únicamente el índice R20 (estación 30179) que hace referencia al número de días con precipitación muy intensa, mostró una clara tendencia negativa (figura 5.15) pasando de presentarse hasta 32 días a menos de 16 días,

en el período de primavera-verano; en la estación 30193 se observó una tendencia negativa en el índice R10 (figura 5.16), que hace referencia al número de días con precipitación intensa, aunque gráficamente no es tan evidente, se pudo observar que han disminuido el número de días para el R10 en la serie primavera-verano. Esta podría ser una variable importante para la disminución del escurrimiento medio, para esta serie, ya que la precipitaciones intensas o muy intensas, propician el escurrimiento, debido a que disminuye el margen de infiltración, aunque para las series de junio y julio no se pudo identificar que la precipitación sea el papel fundamental en la reducción del escurrimiento.

Figura 5.15 Tendencia del índice R20 (días). Estación 30179.

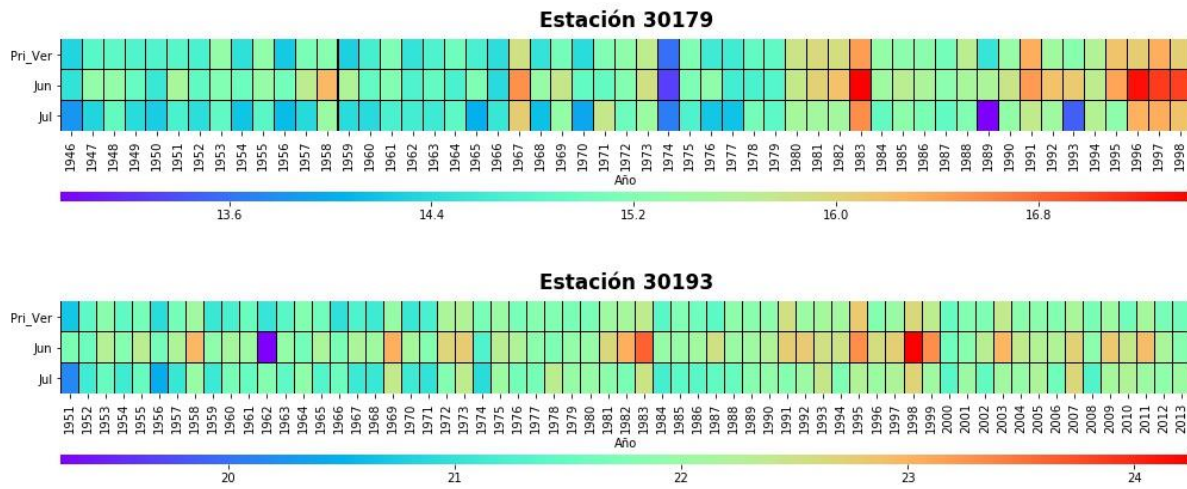


Figura 5.16 Tendencia del índice R10 (días). Estación 30193.



Las otras variables analizadas son la temperatura mínima y la máxima, ya que de ellas dependen la evaporación y la evapotranspiración, en general los registros de ambas estaciones climatológicas presentaron una clara tendencia a aumentar la temperatura de ambas variables. En específico, para las series de primavera-verano, junio y julio se observó tendencia positiva de la temperatura mínima promedio, esta tendencia se hizo más evidente en la parte alta de la subcuenca como se observa en la figura 5.17.

Figura 5.17 Tendencia de la temperatura mínima promedio (°C). Estaciones 30179 y 30193.



Siguiendo con el análisis de las temperaturas, se identificó que hasta diez ICC presentaron cambios en su comportamiento, todos estos cambios confluyeron en una tendencia positiva de la temperatura. De la figura 5.18 a la figura 5.21 se observan las gráficas de las tendencias de los ICC (referentes a la temperatura) que fueron más representativos para este análisis. Se puede observar que para unos ICC esta tendencia positiva en la temperatura es más evidente, como el índice SU25, que presentó un marcado aumento en los últimos años analizados, llegando a presentarse hasta 28 días en el mes con temperaturas mayores a 25°C, lo cual es un fuerte indicador que la evaporación y evapotranspiración está tendiendo a incrementarse, ya que están íntimamente relacionadas con la temperatura; el resto de índices graficados muestran una tendencia positiva paulatina, pero aun así implica que la dinámica de la temperatura ha tenido una tendencia a incrementarse.

Figura 5.18 Tendencia del índice SU25 (días). Estación 30179.



Figura 5.19 Tendencias del índice TR20 (días). Estaciones 30179 y 30193.

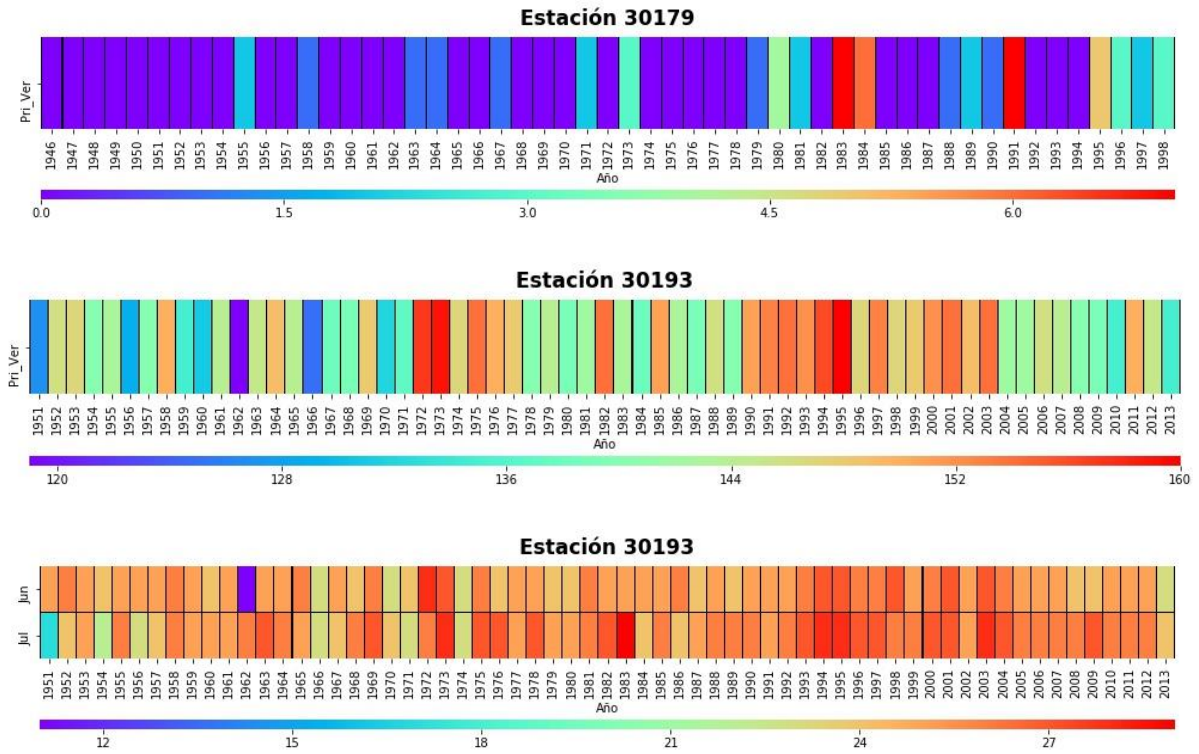


Figura 5.20 Tendencia del índice Tn10p (días). Estaciones 30179 y 30193.

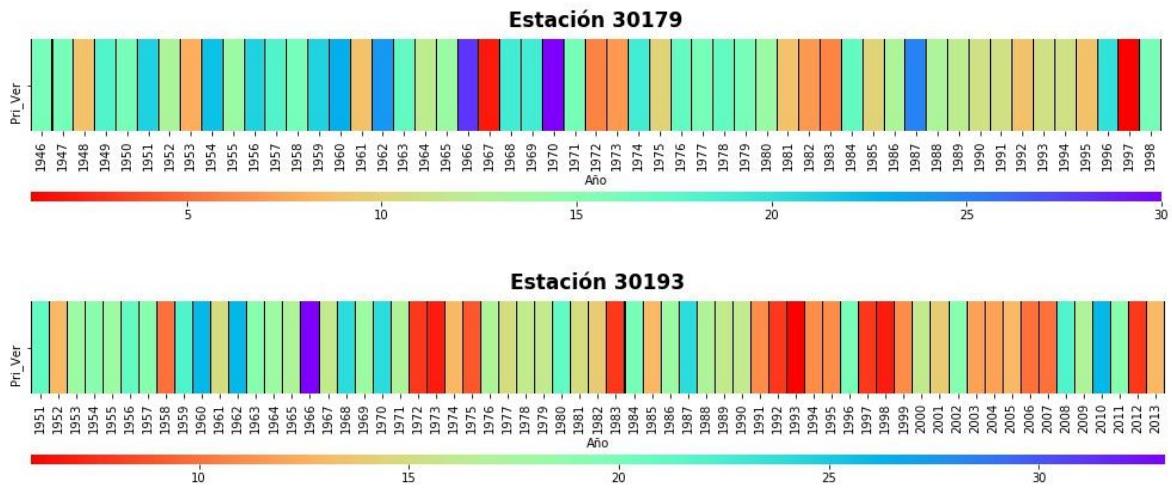
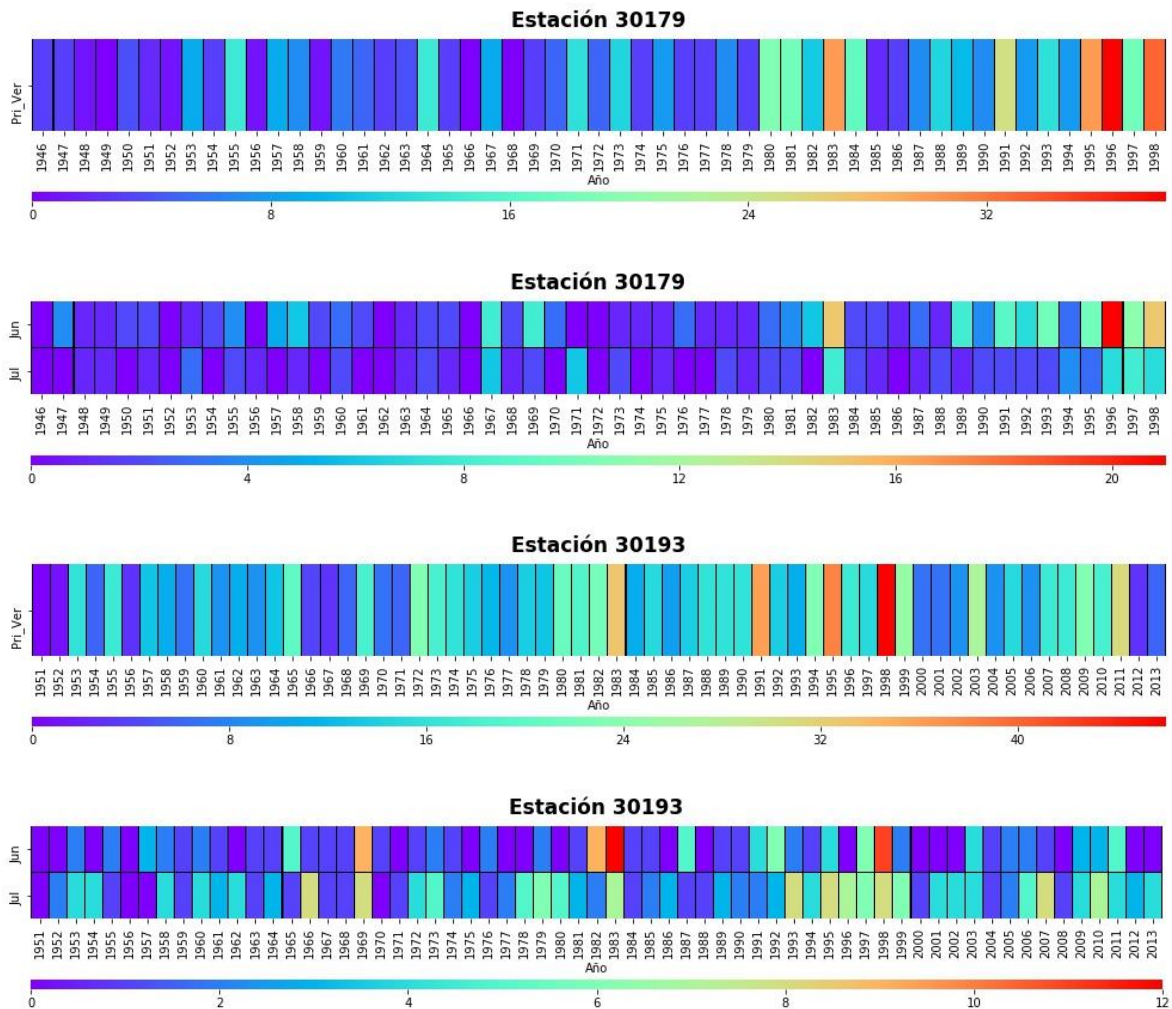


Figura 5.21 Tendencia del índice Tn90p (días). Estación 30179.



Finalmente, se identificó que las variables hidroclimáticas de la subcuenca tuvieron un cambio estadísticamente significativo, lo cual se vio reflejado en una tendencia negativa en los escurrimientos medios (tres series) y mínimos instantáneos (dos series), aunque se identificó cierta tendencia negativa en el régimen de precipitación, el mayor cambio en las variables climáticas está ligado a la tendencia positiva en las temperaturas, tanto de la subcuenca baja como en la alta, dichos cambios afectan directamente la dinámica de la cuenca, ya que al aumentar la temperatura, la evaporación y evapotranspiración de la zona también se incrementan, aunado a estos cambios en las variables climatológicas se identificaron cambios en los usos de suelo de la cuenca, que ya siendo una cuenca mayormente agrícola, se incrementó su superficie, así como el área de pastizal y zona urbana, que no favorecen a una retención de la humedad, lo cual puede disminuir las

aportaciones al flujo subsuperficial y subterráneo, los cuales tienen gran relevancia en los caudales que fluyen en el cauce. Por lo que se puede aseverar que los cambios identificados en los escurrimientos están ligados en mayor medida a las variaciones en la temperatura y los cambios de usos de suelo.

5.9.2 Subcuenca de la estación 28040

Se analizaron tres variables del escurrimiento de la subcuenca drenada hasta la estación 28040, se identificó que los escurrimientos máximos instantáneos no presentaron modificaciones, estadísticamente significativas, en su comportamiento; por otro lado, los escurrimientos medios presentaron cuatro series con tendencia negativa (de enero a abril), mientras que la serie de octubre mostró una tendencia positiva (figura 5.23); en el caso de los escurrimientos mínimos instantáneos se identificaron once series con tendencia negativa lo que implica una clara disminución del caudal en la época de estiaje, únicamente las series de los meses que van de agosto a noviembre, no presentaron alteración en su régimen (figura 5.24).

Figura 5.22 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en la subcuenca 28040.

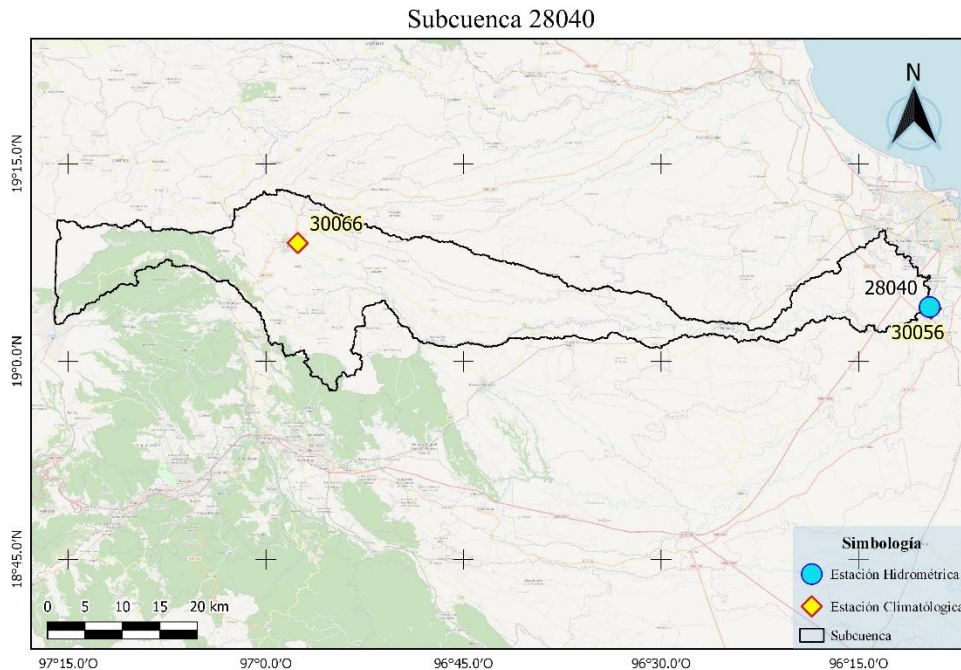
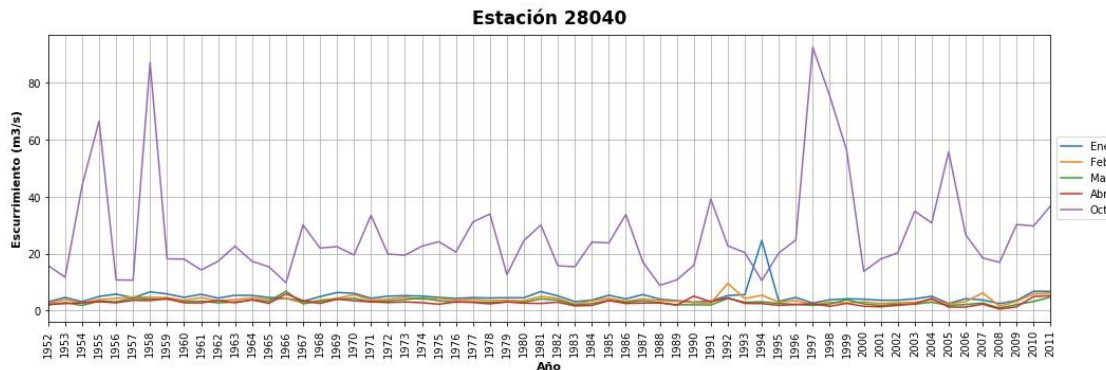
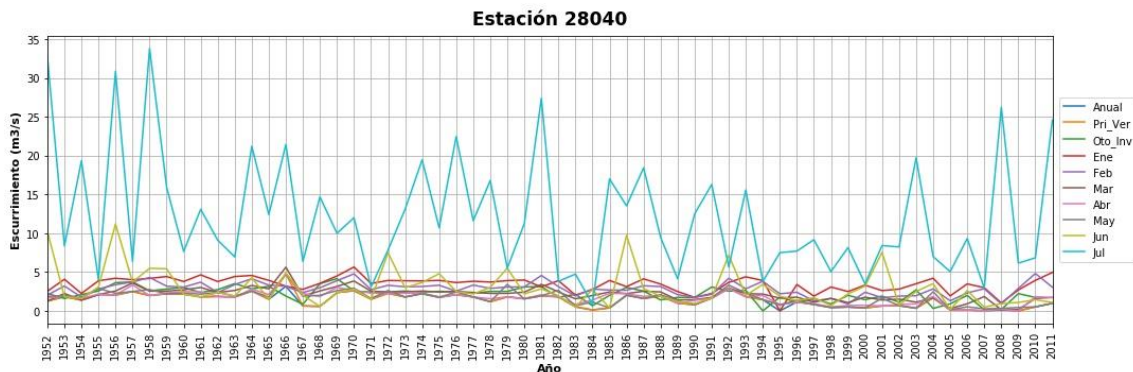


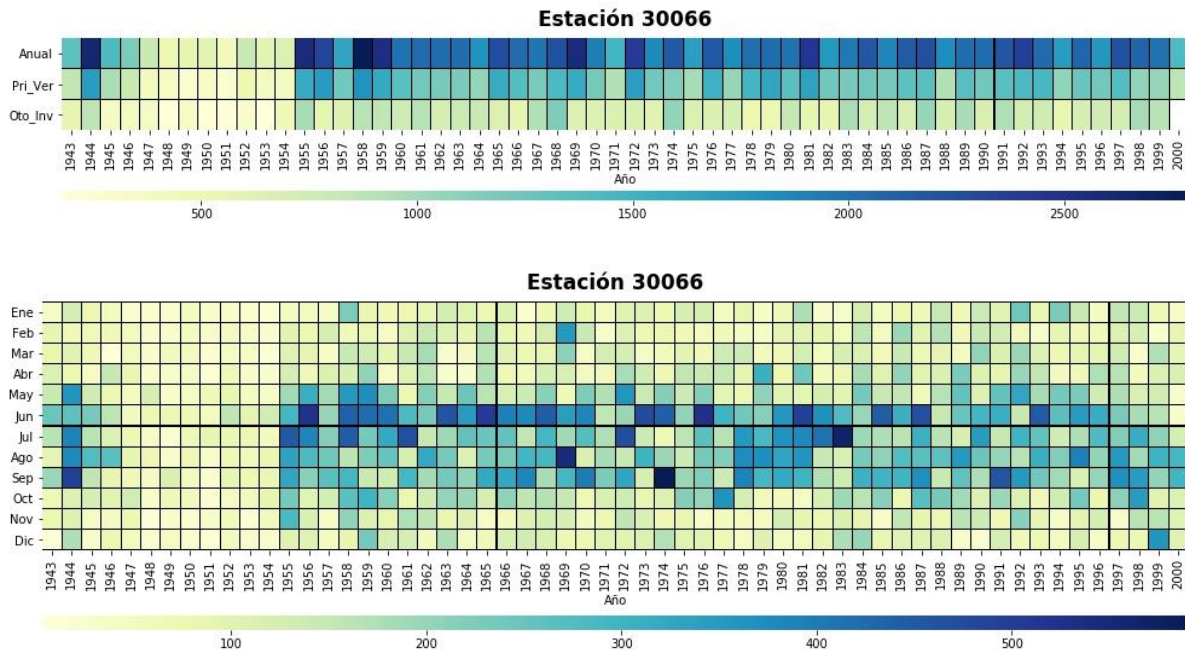
Figura 5.23 Tendencia del escurrimiento medio (m³/s). Estación 28040.Figura 5.24 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m³/s). Estación 28040.

Dentro del área de la subcuenca, que domina la estación 28040, se encuentran ubicadas dos estaciones climatológicas, la estación 30056 que se encuentra en la salida de la subcuenca, y la estación 30066 que está ubicada en la parte alta de la subcuenca. A partir de dichas estaciones se realizó el análisis del comportamiento de las variables climatológicas, para la subcuenca.

La primera variable analizada fue la precipitación, es de resaltar que es una subcuenca que presenta altas precipitaciones, tanto en la parte baja como la parte alta, llegando a presentarse hasta 2,500 mm anuales, en ambas estaciones. Se observó que la zona baja de la subcuenca, en general, no mostró alteraciones en su régimen de lluvias, únicamente la serie de octubre presentó un aumento en diversos indicadores de la precipitación, como se puede observar en el capítulo 5.7. Por otra parte, la zona alta de la subcuenca mostró una tendencia positiva en el régimen de precipitación. Los registros mostraron un claro período de baja precipitación en la cuenca, de 1945

a 1954, donde se tuvo una lluvia acumulada anual de alrededor de 500 mm, que es hasta una tercera parte de la precipitación acumulada que se presentó en los otros años de la serie.

Figura 5.25 Tendencia de la precipitación acumulada (mm). Estación 30066.



La tendencia positiva encontrada en la estación se debe en gran medida a ese período seco, esta tendencia también se pudo observar en las precipitaciones máximas ocurridas en 24 horas o los trenes de lluvia de cinco días, como lo muestra la gráfica de la figura 5.26, y se observó con mayor claridad la tendencia positiva, en la intensidad de la precipitación, a partir del índice SDII. También el número de días con lluvias intensas y muy intensas tiene una tendencia ascendente llegando a presentarse hasta 50 días con lluvias muy intensas al año, como se observa en la figura 5.28.

Figura 5.26 Tendencias del índice Rx5day (mm). Estación 30066.

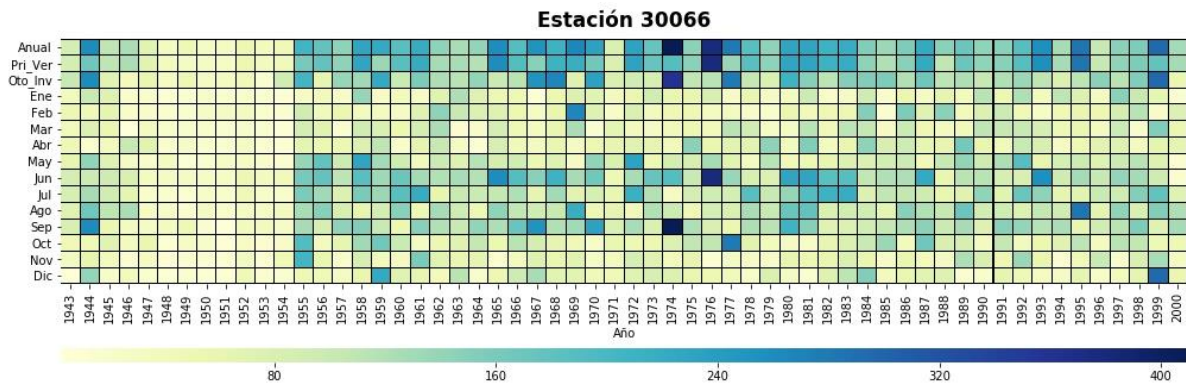
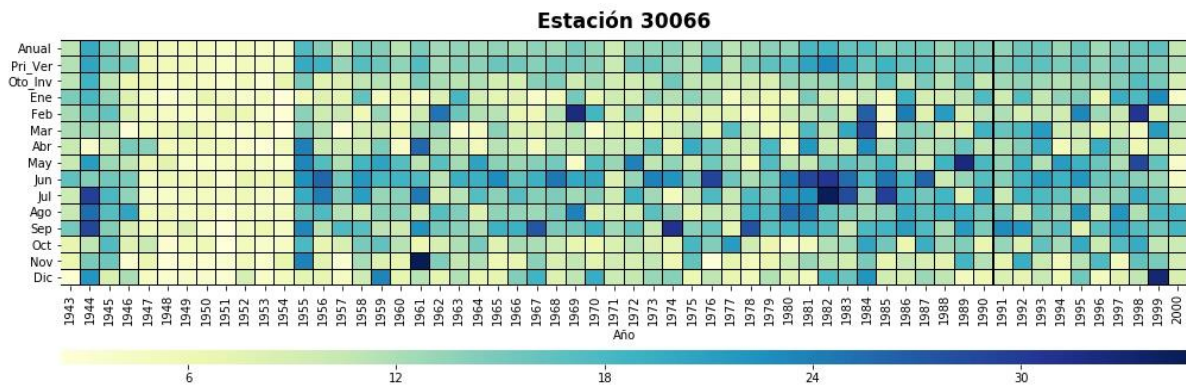
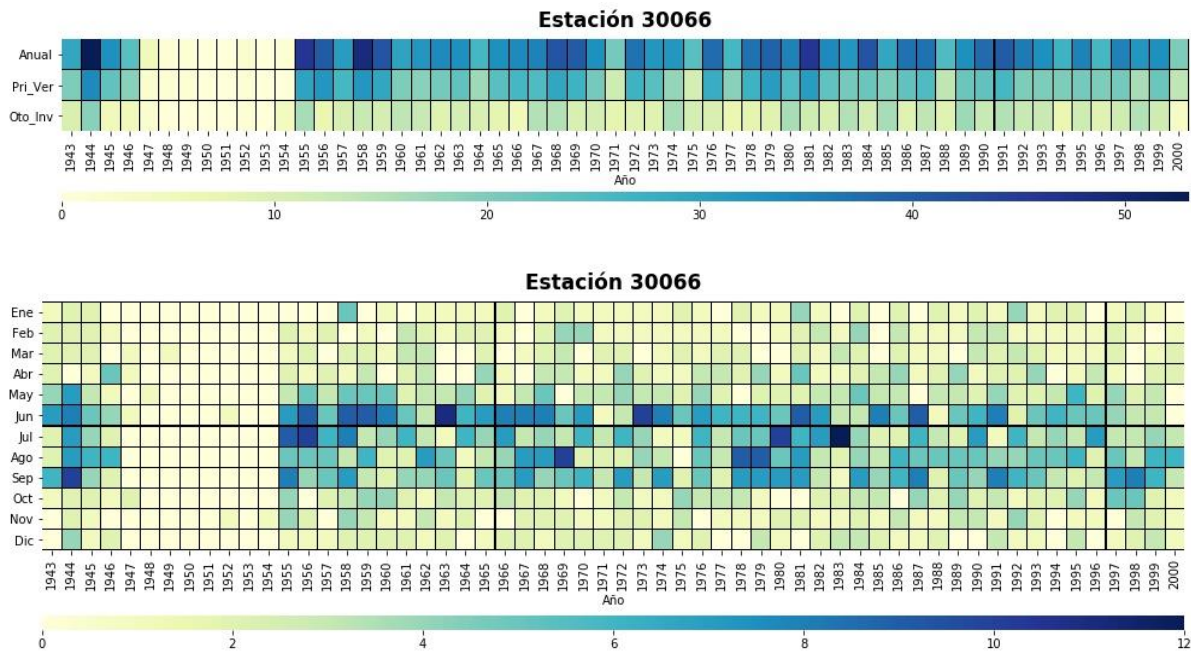


Figura 5.27 Tendencias del índice SDII (mm/día). Estación 30066.



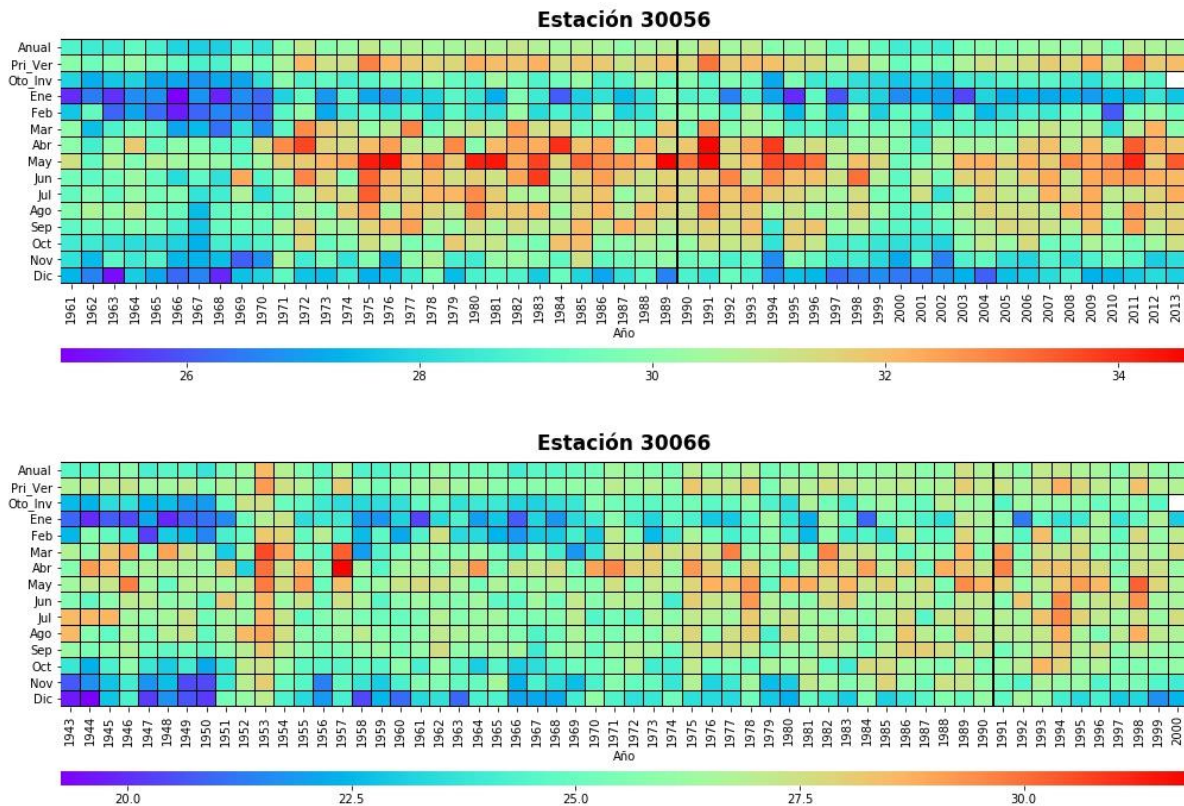
Con los diversos ICC con los que fue evaluada la precipitación, quedó claro que existe tendencia positiva en la precipitación, al menos en los 58 años de medición de la estación, ahora, en una visión más cercana al patrón de lluvias, esta tendencia positiva en las series, es en gran medida a los nueve años de sequía que se tuvieron en la zona, los cuales no quedaron representados en las mediciones de los escurrimientos de la subcuenca, ya que las mediciones comenzaron a partir de 1952, a partir de los años de medición de la hidrométrica la precipitación en la subcuenca no ha presentado cambios bruscos en su comportamiento, aunque como se mencionó existe una clara evidencia en el aumento de la precipitación del mes de octubre, esto para ambas estaciones climatológicas, lo cual puede ser el factor principal en la tendencia positiva del escurrimiento medio, para la serie de ese mes.

Figura 5.28 Tendencias del índice R20 (días). Estación 30066.



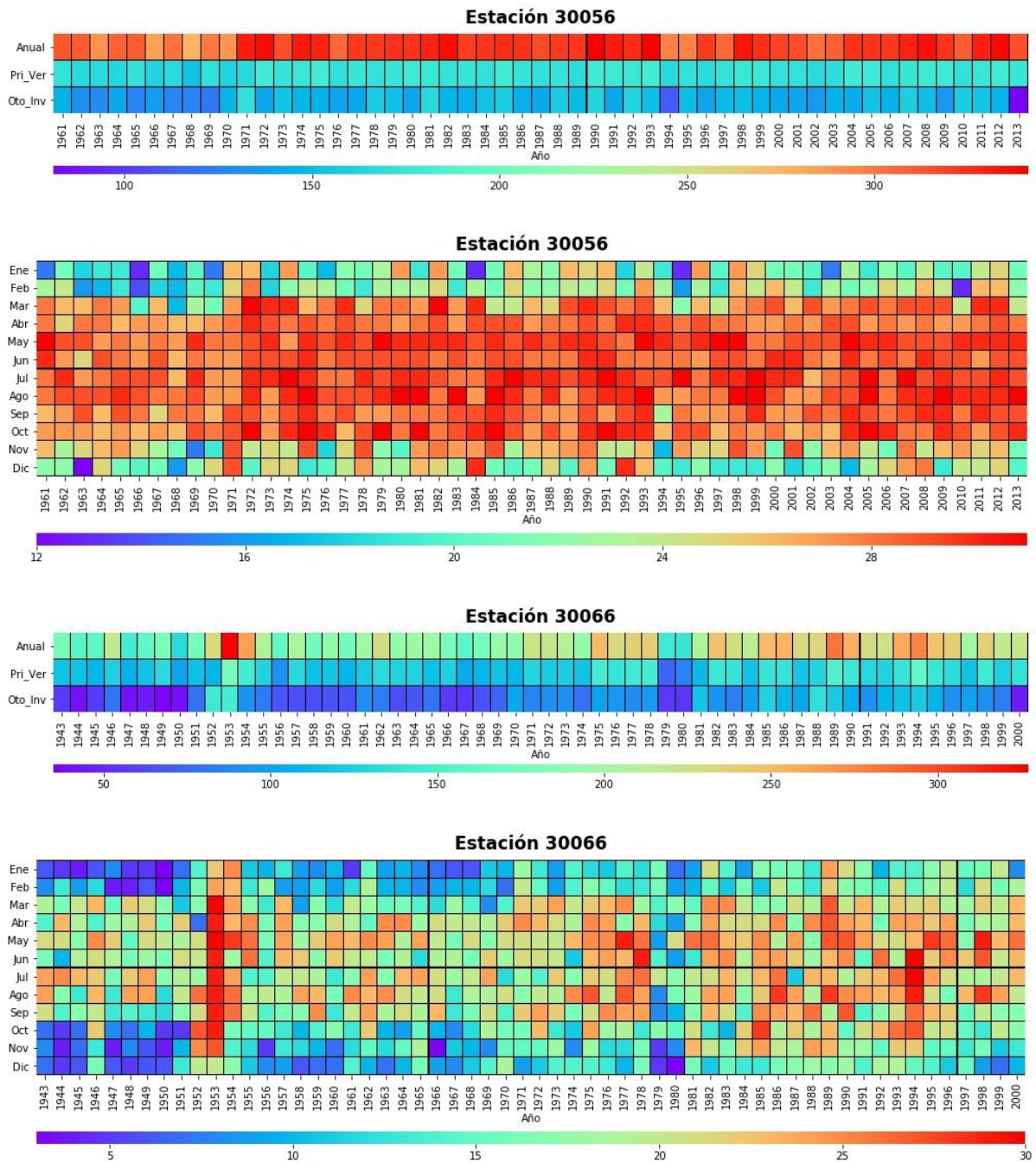
Respecto a la temperatura, se evidenció tendencia positiva en la temperatura máxima, ejemplo de ello es el análisis de la temperatura promedio, que muestra una clara tendencia ascendente para ambas estaciones, por lo que la parte alta y baja de la subcuenca tienden a tener temperaturas máximas más altas (figura 5.29), lo cual incide directamente en la evaporación y evapotranspiración de la zona. Más evidencia sobre la tendencia positiva de la temperatura máxima se observó en el índice SU25, que mostró una tendencia positiva en la mayor parte de sus series, lo que implica que se están teniendo un mayor número de días con temperaturas de más de 25°C. También se pudo identificar que el número de días fríos (Tx10p) tiende a ser cada vez menor (figura 5.32), lo que confirma la tendencia positiva de la temperatura máxima.

Figura 5.29 Tendencia de la temperatura máxima promedio (°C). Estaciones 30056 y 30066.



Las series de temperatura mínima tuvieron cierta evidencia de alteraciones, para la parte baja de la cuenca se pudo observar una tendencia positiva en la misma, lo que implicaría un aumento en los valores registrados en las series de la temperatura mínima, aunque no es tan contundente como en la temperatura máxima. En el caso de la parte alta de la cuenca, se observó una mayor evidencia de cambios en el comportamiento en esta variable, se identificó tendencia negativa en los valores máximos que llega a alcanzar la temperatura mínima (TNx), lo que implicaría que se está reduciendo los valores de la temperatura mínima en esta zona, la tendencia en la gráfica de la figura 5.31, es muy clara, y queda sustentado con la prueba de tendencia de Mann Kendall, que se mostraron en el capítulo 5.7. Estos resultados implican que la parte alta de la subcuenca se están volviendo más extremas sus temperaturas.

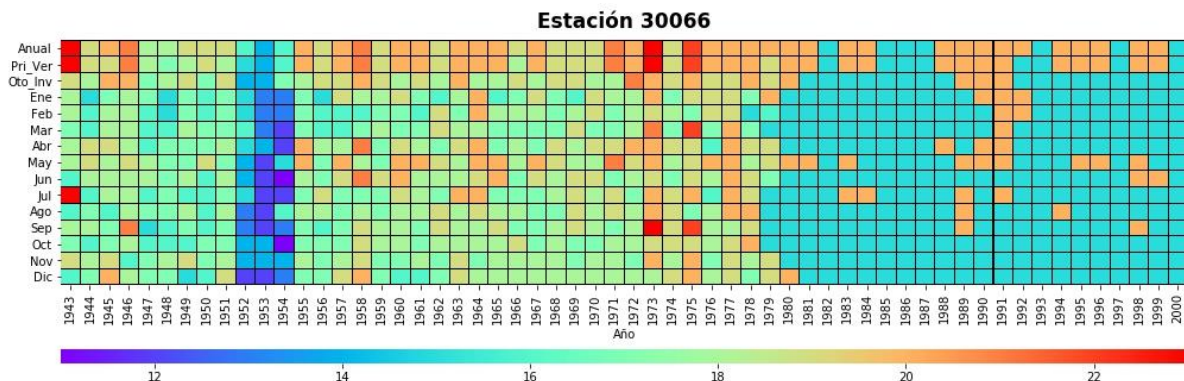
Figura 5.30 Tendencias del índice SU25 (días). Estaciones 30056 y 30066.



La agricultura y los pastizales han representado históricamente la mayor superficie de la subcuenca drenada hasta la estación hidrométrica 28040, estos dos usos de suelo han mantenido un sostenido aumento en su superficie, mientras que las áreas con vegetación natural tienden a perder terreno, lo cual implica diferencias en la interacción de la superficie de la subcuenca con las

variables climáticas, uno de los principales cambios es la reacción ante la precipitación, las zonas boscosas y selváticas tienden a disminuir la intensidad con la que las gotas de agua llegan al suelo, debido a sus diversas capas de vegetación, lo cual permite una mayor infiltración y conserva mejor la humedad en el suelo, mientras que las zonas agrícolas y de pastizales tienden a aportar mayor cantidad del agua precipitada al flujo superficial, y disminuye la capacidad de retención de humedad en la época de estiaje; esto es importante señalarlo, ya que en el período en que fueron tomados los datos hidrométricos la precipitación en general no presentó algún tipo de alteración en su distribución, pero los escurrimientos medios y mínimos instantáneos mostraron tendencia negativa, estadísticamente significativa, lo cual se puede atribuir en parte a los cambios de uso de suelo que ha mantenido la subcuenca; además de los cambios de uso de suelo, se tiene una tendencia a aumentar las temperaturas máximas, y como se observó, la tendencia está presente en la parte alta y baja de la subcuenca, lo que implica un aumento en la evaporación y sobre todo, aumento en la evapotranspiración a lo largo de la subcuenca, lo que conlleva a un mayor uso del recurso hídrico existente, por la vegetación.

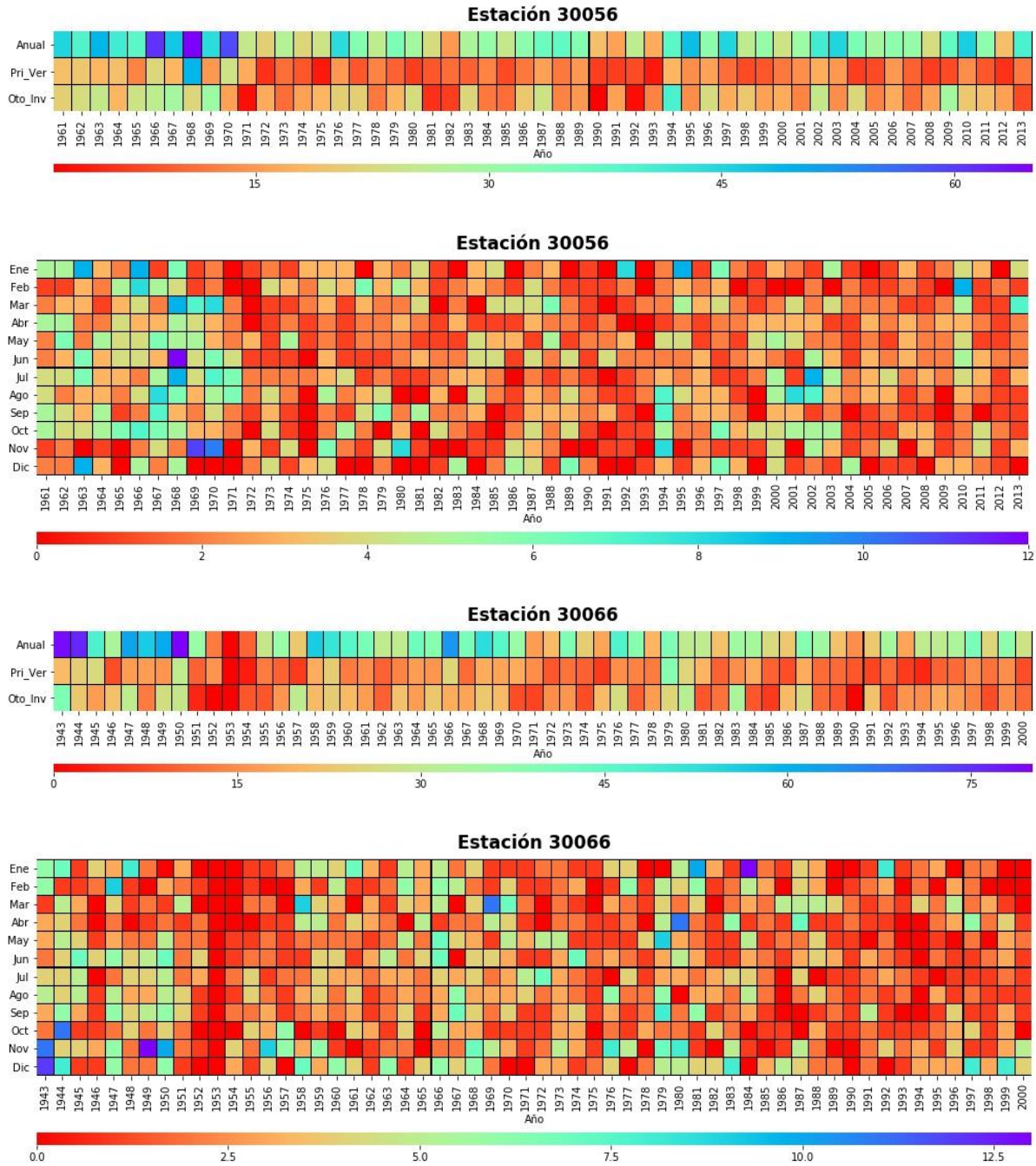
Figura 5.31 Tendencias del índice TNx (°C). Estación 30066.



El mes de octubre presentó una contundente evidencia de cambio en el régimen de la precipitación, ya que se identificó, en ambas estaciones climatológicas, tendencia positiva en diversos indicadores que se utilizaron en el análisis de la precipitación, este cambio en el comportamiento de la lluvia se vio reflejado en la tendencia positiva del escurrimiento medio, en la serie de octubre. La precipitación es el impulso del escurrimiento, por lo que un aumento en ella podría implicar un incremento en el escurrimiento, más aún por el cambio de uso de suelo, ya que

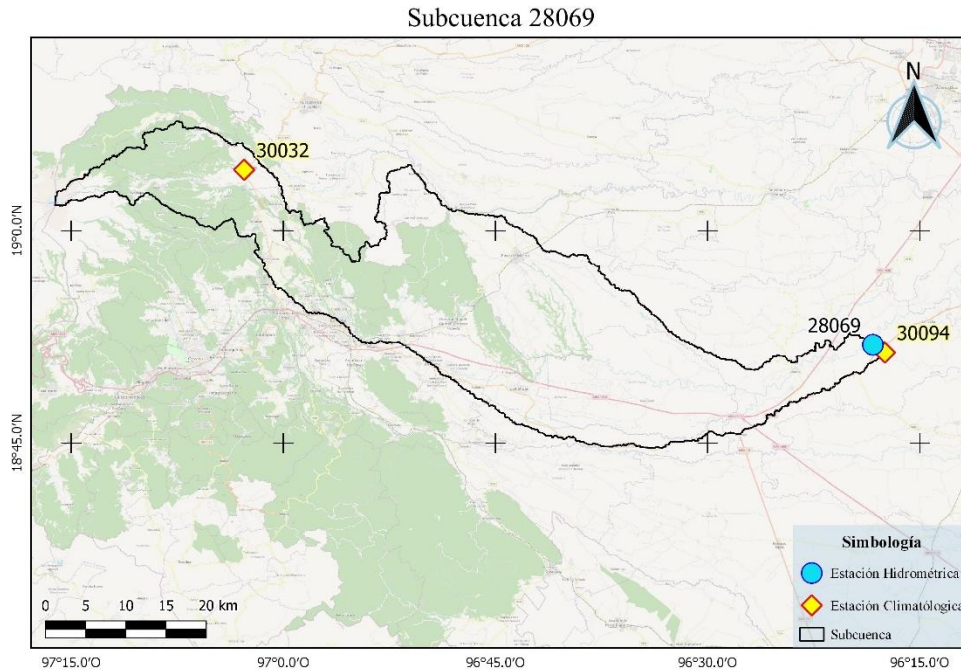
como se habló en párrafos anteriores, la superficie agrícola y de pastizal aumenta el porcentaje de precipitación que es aportada al escurrimiento superficial.

Figura 5.32 Tendencias del índice Tx10p (días). Estación 30056.

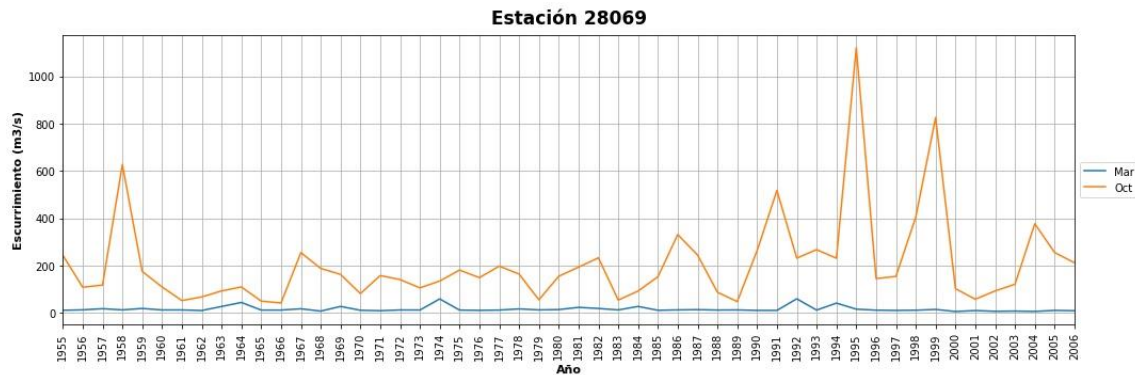
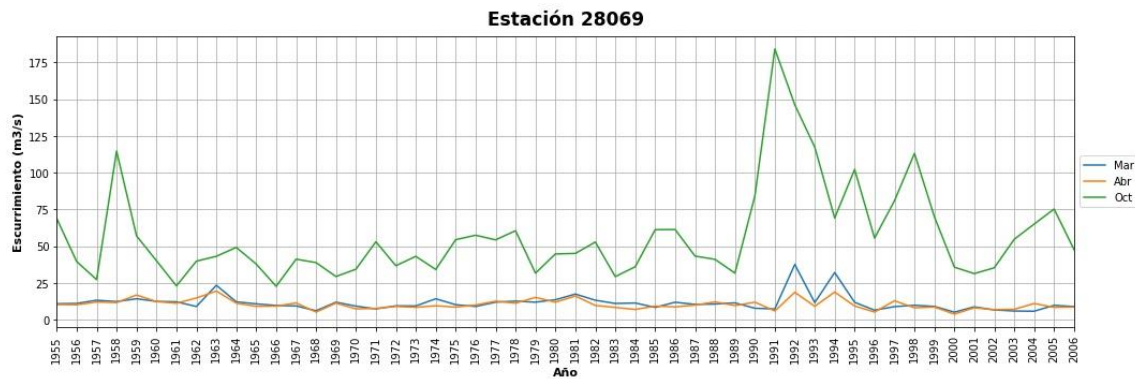
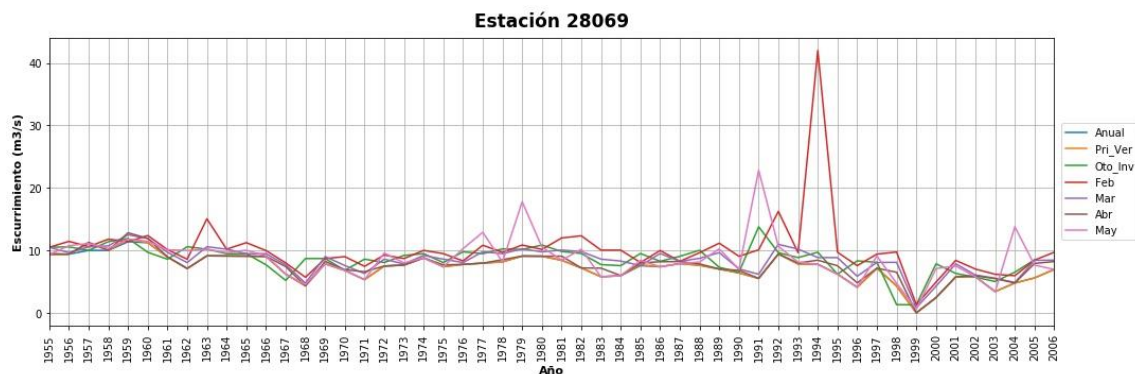


5.9.3 Subcuenca de la estación 28069

Figura 5.33 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en la subcuenca 28069.



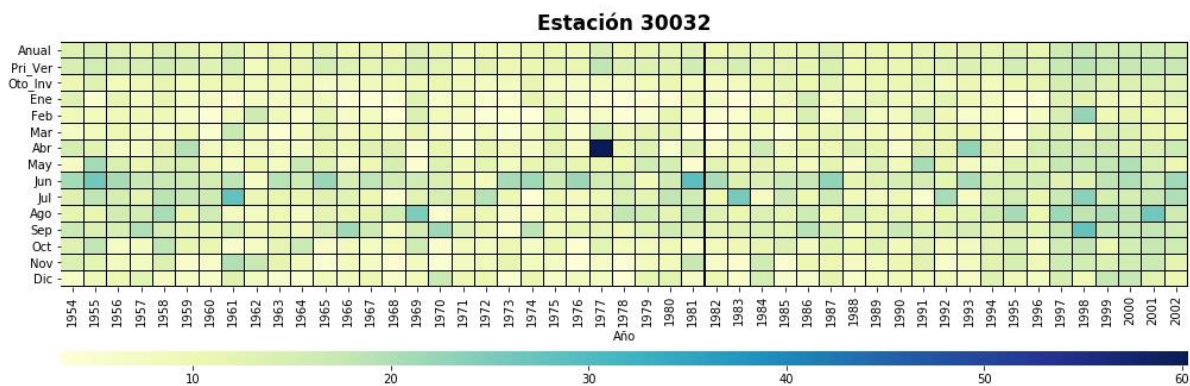
La estación hidrométrica 28069 presentó alteraciones en las tres variables analizadas; escurrimiento medio, y escurrimiento mínimo y máximo instantáneo. La prueba de Mann Kendall detectó tendencia positiva para las series de octubre, del escurrimiento máximo y medio, esta tendencia a aumentar el escurrimiento se observa claramente en la figura 5.34 y la figura 5.35, en las que se identificó un aumento al final de las series (alrededor de 1990), en ambas variables del escurrimiento. Por otra parte, en el resto de las series graficadas se observó tendencia negativa en los escurrimientos, la serie de marzo (escurrimiento máximo), y las series de marzo y abril (escurrimiento medio), aunque no es tan evidente gráficamente, los cambios en el comportamiento de las series fueron estadísticamente significativos para ser identificados por la prueba de Mann Kendall. En el caso del escurrimiento mínimo, se identificaron siete series con tendencia negativa, que están representadas en la figura 5.36, aunque los cambios en el escurrimiento se observan tenues gráficamente, fueron estadísticamente significativos para determinar la tendencia de los mismos, las pruebas de homogeneidad indicaron probables cambios en el comportamiento de las series a partir de 1987.

Figura 5.34 Tendencia del escurrimiento máximo instantáneo (m³/s). Estación 28069.Figura 5.35 Tendencia del escurrimiento medio (m³/s). Estación 28069.Figura 5.36 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m³/s). Estación 28069.

Dentro de la subcuenca drenada hasta la estación hidrométrica 28069, existen dos estaciones climatológicas que reunieron la longitud requerida para este análisis, la estación 30094 (subcuenca baja) y la estación 30032 (subcuenca alta). En este caso se contó con la ventaja de que

las tres estaciones, las dos climatológicas y la hidrométrica, comparten el mismo período de medición, por lo que la interacción del comportamiento observado de las variables hidroclimáticas se identificó mejor.

Figura 5.37 Tendencias del índice SDII (mm/días). Estación 30032



Se identificaron pocos cambios en el comportamiento de las series de precipitación de la estación 30032, se pudo observar cierta tendencia negativa en precipitaciones de gran magnitud, sobre todo en las serie anual y la de primavera-verano, aunque esta tendencia no se sostuvo en la mayoría de las series, por otro lado, el mes de agosto presentó cierta tendencia positiva en la precipitación, como se observó en el capítulo 5.7. Únicamente, el índice SDII mostró tendencia positiva en cinco series, lo cual se representa en la figura 5.37, en donde se notó un paulatino aumento en el índice al final de las series.

La estación 30094 mostró una sostenida tendencia negativa en el régimen de la precipitación, desde la cantidad total precipitada en la zona, representado por la precipitación acumulada (figura 5.38), donde varias de las series analizadas vislumbraron una tendencia negativa, que de acuerdo a las pruebas de homogeneidad, se comenzó a presentar cambios en el comportamiento de las lluvias desde 1985, aunque es aún más claro estos cambios a partir de 1989, donde se observó una drástica reducción de la precipitación, y finalmente una nula precipitación de 1990 a 1992. Los reducidos valores de la precipitación continuaron al final de las series analizadas, estos cambios en el patrón de la precipitación se confirmaron en el análisis de los ICC, que muestra de manera generalizada tendencia negativa en diversos índices que caracterizan el comportamiento de la precipitación. También se ha reducido la precipitación acumulada en trenes de lluvia de cinco días (figura 5.39), los cuales tienen relación directa con el escurrimiento

superficial, de igual manera se identificó una tendencia negativa en las lluvias intensas o muy intensas (figura 5.40), lo que reduce la posibilidad de que se produzca escorrentía.

Figura 5.38 Tendencia de la precipitación acumulada (mm). Estación 30094

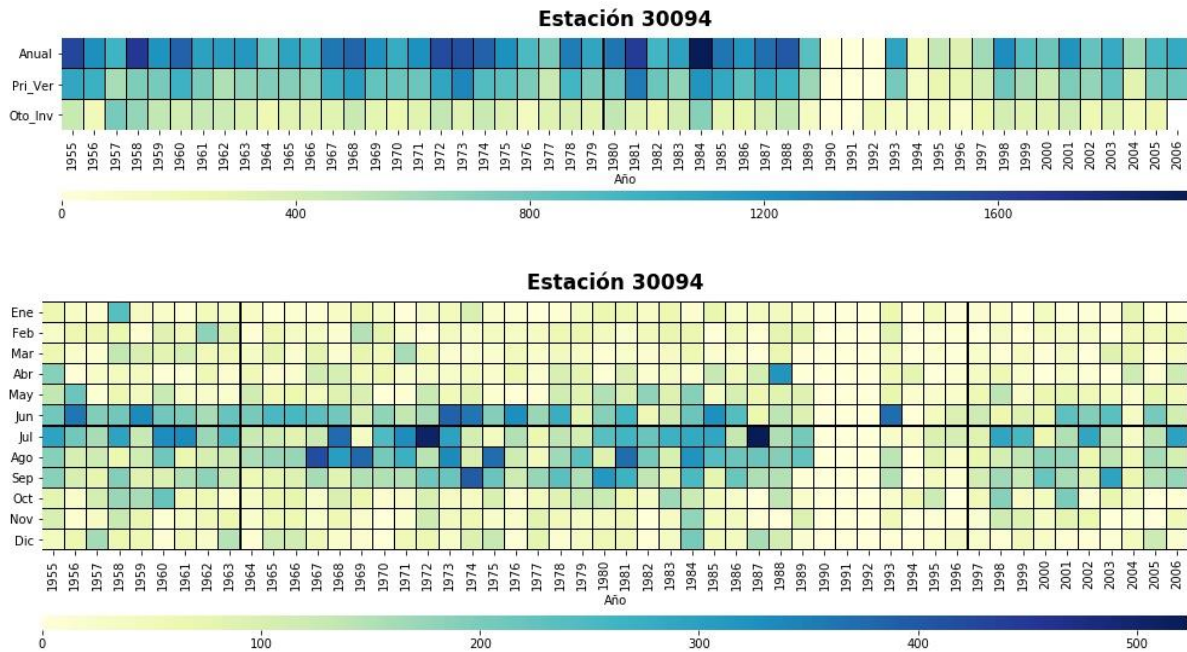


Figura 5.39 Tendencias del índice Rx5day (mm). Estación 30094.

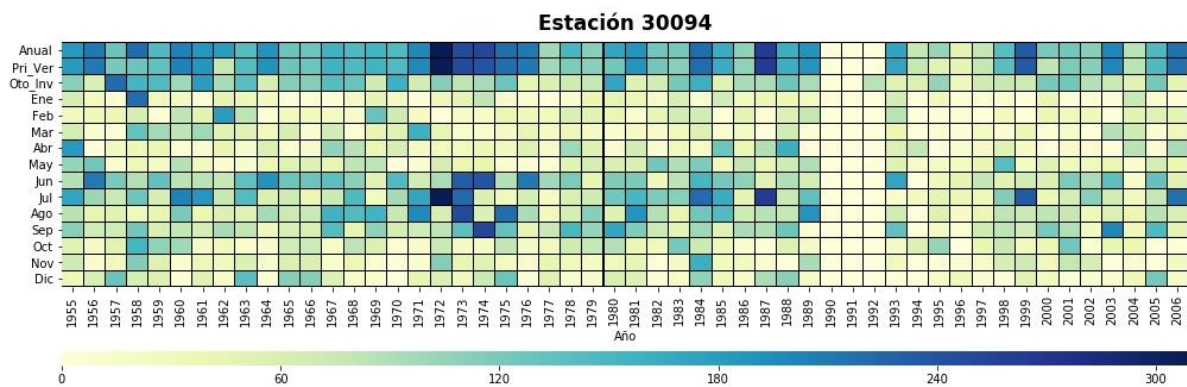
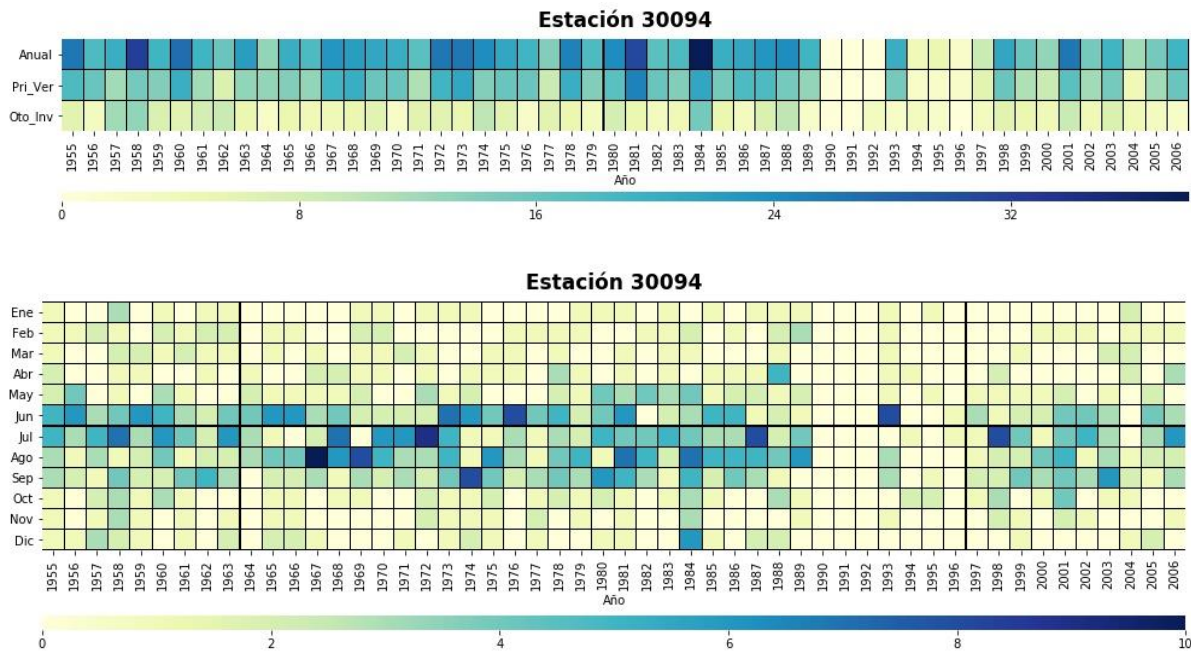


Figura 5.40 Tendencias del índice R20 (días). Estación 30094.



En el área dominada por la estación 30094 se identificó tendencia a aumentar el índice CDD, aunque en gran medida es debido a los tres años donde no se presentó precipitación, por otra parte, el índice CWD ha mostrado tendencia sostenida en disminuir los días húmedos consecutivos, como se identifica en la figura 5.41.

En el caso de las variables de la temperatura, se identificaron cambios en el comportamiento a lo largo de los años, mientras que la parte alta de la subcuenca (estación 30032) mostró cambios en las series de ambas temperaturas, la parte baja de la subcuenca (estación 30094) mostró únicamente alteraciones de las series de la temperatura mínima.

Las temperaturas máxima y mínima promedio mostraron una clara tendencia negativa, este cambio en el comportamiento de la temperatura fue detectado desde las pruebas de homogeneidad, ya que indicaron alteraciones alrededor de 1980, lo que se ve reflejado claramente en las gráficas de la figura 5.42 y figura 5.43, mientras que las pruebas de homogeneidad identificaron cambios en las series de temperatura mínima promedio entre 1980 y 1986, lo cual gráficamente también se logra identificar. Por lo que se puede aseverar que en los años ochenta es cuando la dinámica de la temperatura en la cuenca comenzó a modificarse, mostrando una tendencia a reducir su

temperatura. Los cambios de la temperatura no solamente se observaron en los promedios, sino que los extremos que alcanzaban las series, también percibieron tendencia negativa.

Figura 5.41 Tendencias del índice CWD (días). Estación 30094.

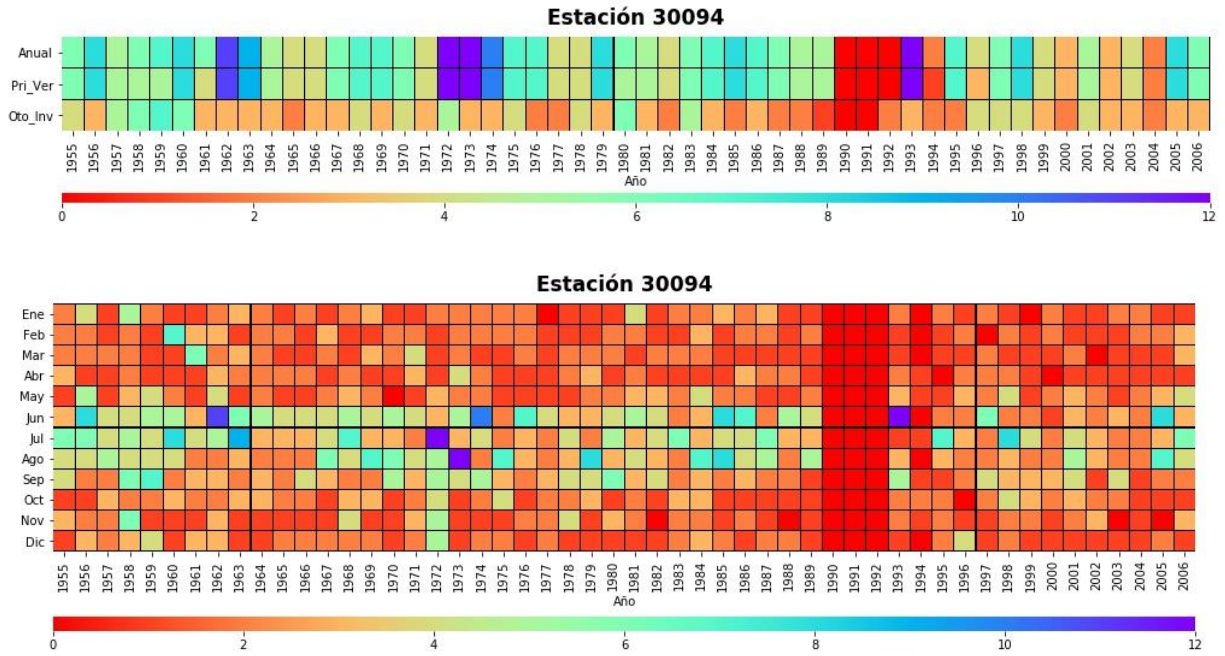


Figura 5.42 Tendencias de la temperatura máxima promedio (°C). Estación 30032.

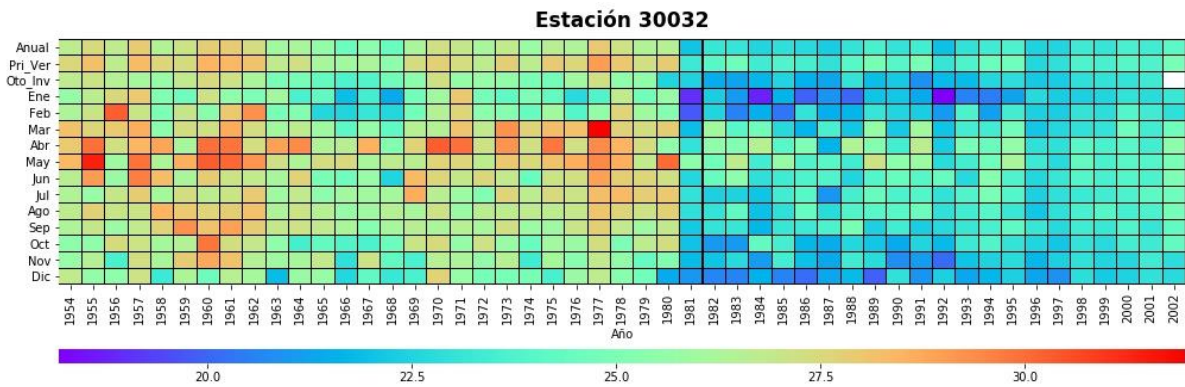
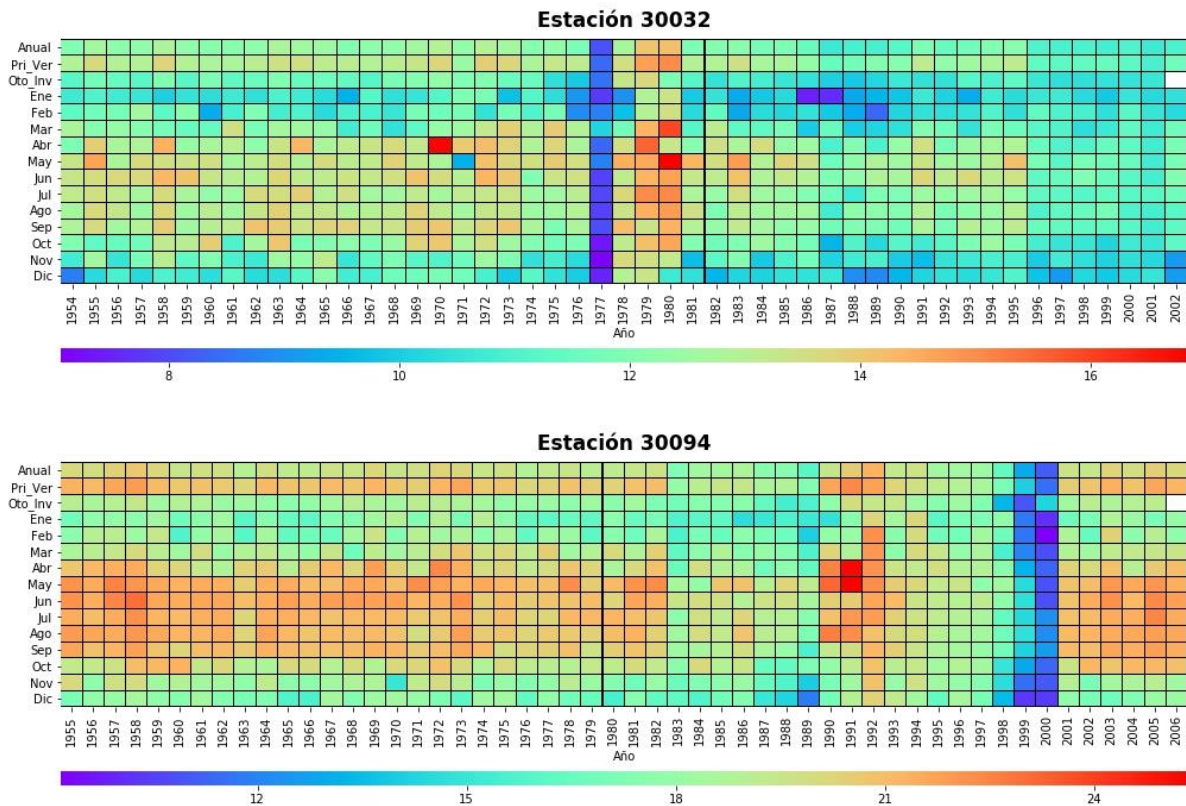
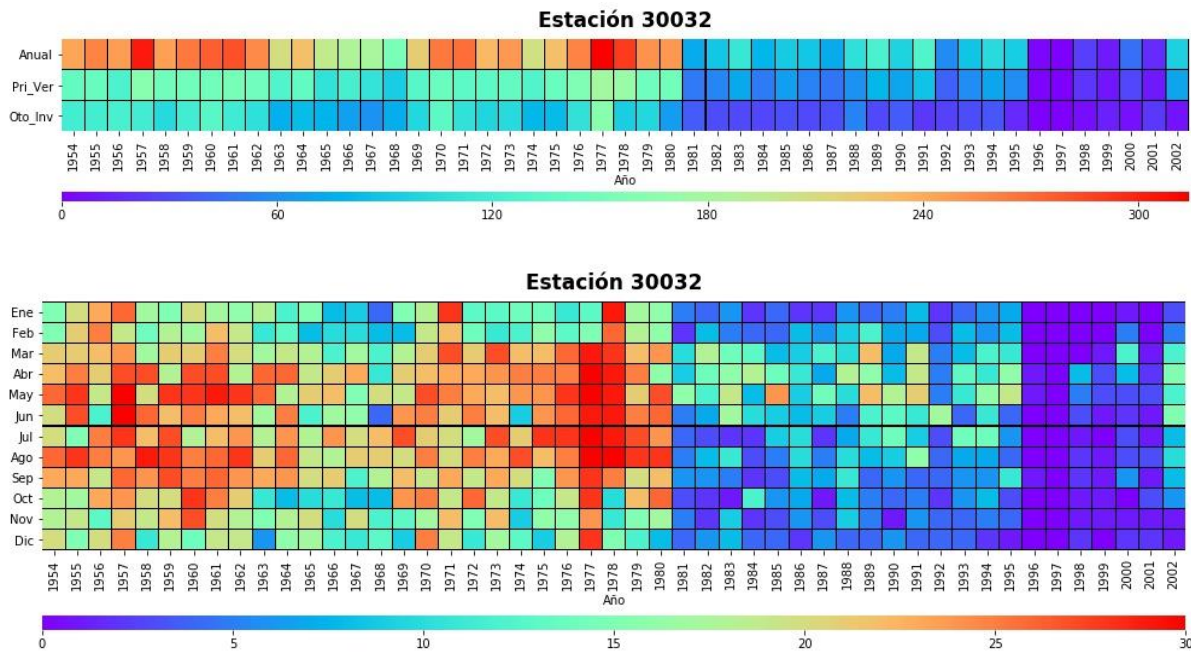


Figura 5.43 Tendencias de la temperatura mínima promedio (°C). Estaciones 30032 y 30094.



Los cambios observados en las series de la temperatura, se reforzaron con los resultados del análisis de los ICC, los cuales identificaron una tendencia negativa generalizada en la estación 30032, principalmente en los índices que caracterizan la temperatura mínima. Algunos de los índices más representativos de los cambios identificados, son mostrados en la figura 5.44 y la figura 5.45, aunque la mayoría mostraron el mismo patrón de cambio en los años ochenta. Los dos índices representados (SU25 y TR20), mostraron una clara reducción de los días con altas temperaturas, más de 25°C en la temperatura máxima, para el primer índice; y más de 20°C en la temperatura mínima, para el segundo índice, lo que es importante resaltar, ya que al reducirse estos dos índices indica una reducción en la evaporación y evapotranspiración de la subcuenca, debido a que cada vez se alcance menos temperaturas altas.

Figura 5.44 Tendencias del índice SU25 (días). Estación 30032.

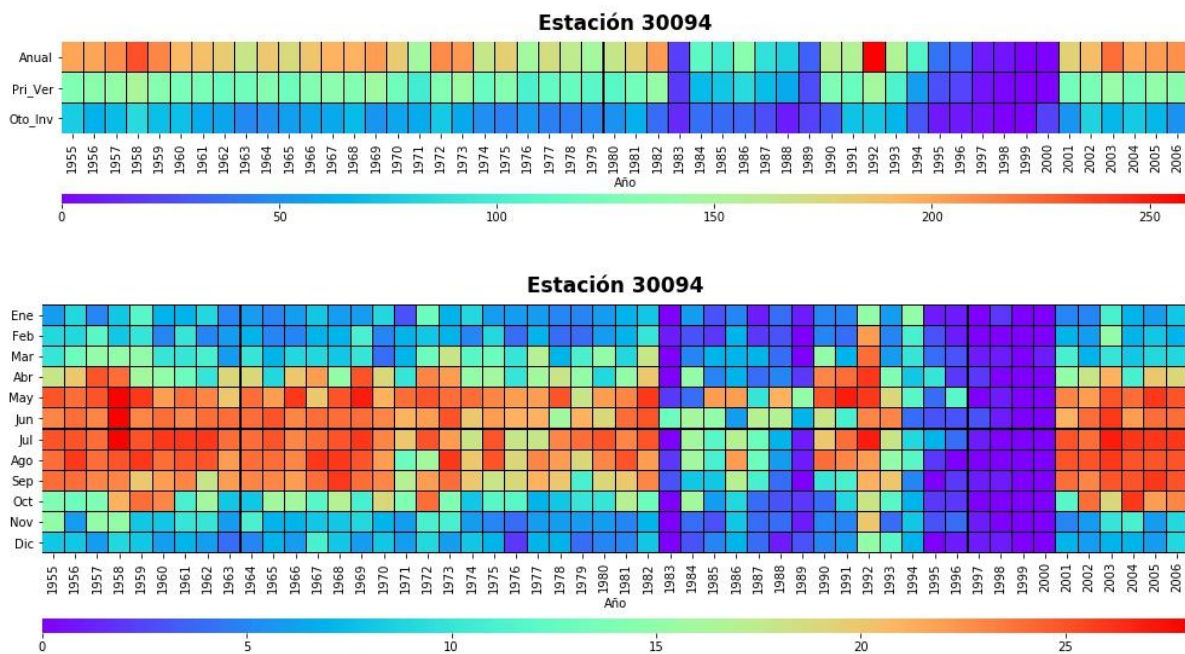


Ahora bien, los cambios de tendencia observados en las variables del escurrimiento analizadas no pueden ligarse directamente a los cambios observados en la temperatura, ya que la tendencia de disminución de la temperatura, que se ha presentado tanto en la cuenca alta como en la baja, indican una reducción en la evaporación y evapotranspiración de la vegetación presente. La cuenca analizada, es una cuenca domina por la agricultura, y de acuerdo a la última carta de uso de suelo y vegetación, la agricultura de riego representa una fracción muy reducida (en 2014 eran 1.7 km^2) por lo que no es posible atribuirle estos cambios en el régimen de escurrimiento a la demanda agrícola.

Para identificar mejor el comportamiento de las variables hidroclimáticas se tendría que trabajar con alguna estación que se encuentre en la subcuenca media, en donde existen cuatro estaciones, pero hasta la fecha de realización de este proyecto, no cumplen con las características necesarias para incluirlas. Otro punto que es importante tocar, es que la mayoría de las series con tendencia negativa se presentaron para el escurrimiento mínimo instantáneo, este tipo de escurrimiento está ligado a las aportaciones de los acuíferos subterráneos, por lo que otro camino a explorar sería identificar si ha existido variación en el comportamiento de estos, lo cual daría respuesta a la variación de los escurrimientos. Este sería un camino adecuado para explorar, ya que

la agricultura ha continuado aumentando su superficie, lo cual afecta directamente la capacidad de retención de humedad en la cuenca, lo que se ve reflejado en las aportaciones a los escurrimientos en la época de estiaje, que es cuando se ha visto tendencia negativa en las series.

Figura 5.45 Tendencias del índice TR20 (días). Estación 30094.



5.9.4 Subcuencas de las estaciones 28108 y 28111

El análisis de las subcuencas delimitadas hasta las estaciones 28108 y 28111, se llevaron en conjunto, ya que la subcuenca 28111 está dentro de los límites de la subcuenca de la estación 28108. Ambas subcuencas mostraron alteraciones en las diversas series de escurrimiento analizadas, pero en todos los casos se identificaron tendencia positiva.

En los escurrimientos máximos instantáneos, la prueba de Mann Kendall identificó tendencia positiva en las series de ambas subcuencas, aunque solamente se observó tendencia en las series mensuales, en el caso de la estación 28108 se puede identificar claramente un incremento en los eventos al final de la serie del mes de octubre; mientras que para la estación 28111 los cambios en los eventos (de siete meses) no es tan apreciable (figura 5.47), aunque suficiente para que la prueba de Mann Kendall identificará la tendencia.

Figura 5.46 Distribución de las estaciones climatológicas e hidrométrica en las subcuencas 28108 y 28111.

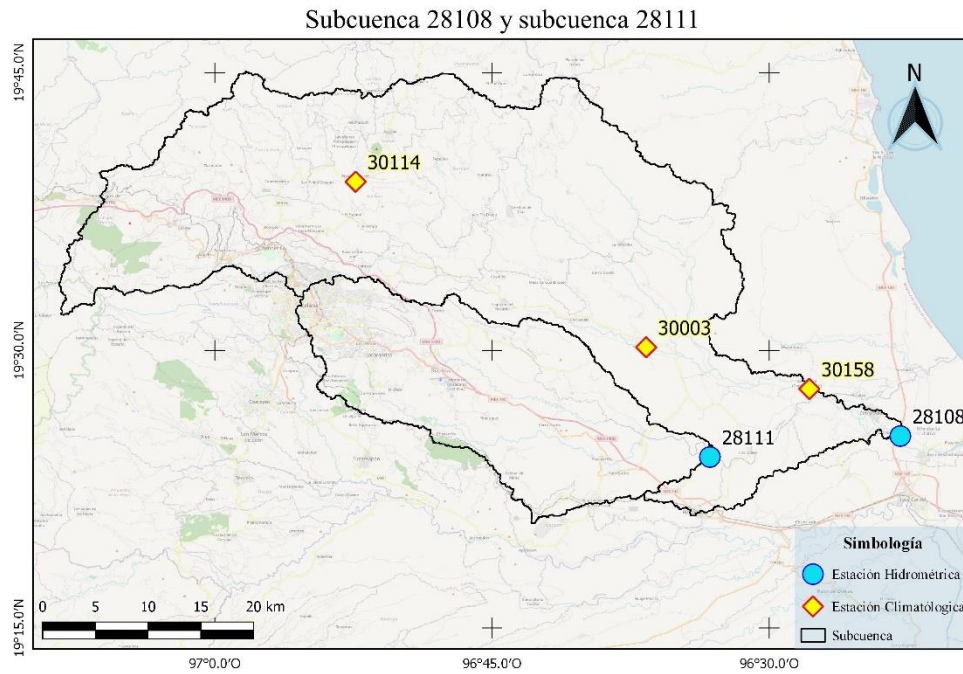
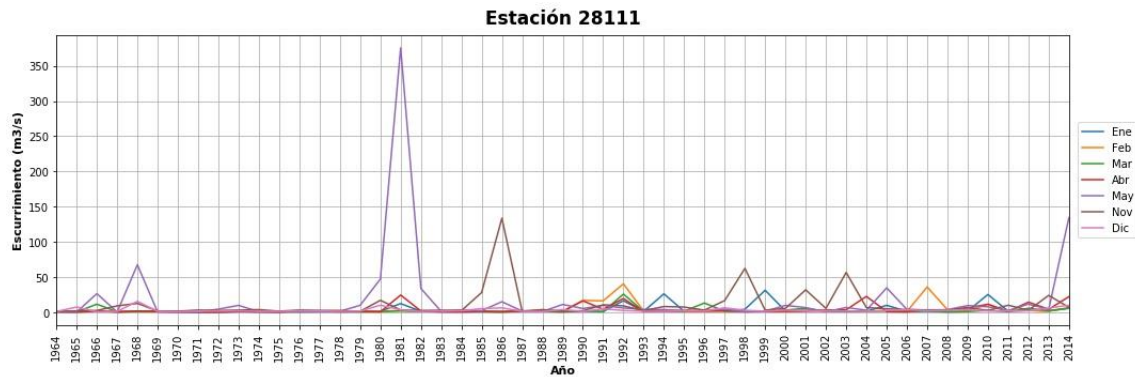


Figura 5.47 Tendencia del escurrimiento máximo instantáneo (m³/s). Estaciones 28108 y 28111.



Figura 5.47 Tendencia del escurrimiento máximo instantáneo (m³/s). Estaciones 28108 y 28111.

En el caso de los escurrimientos medios, se vio un aumento en el número de las series que presentaron tendencia positiva. En cinco series mensuales, en la subcuenca de la estación 28108, se observó tendencia ascendente, en la mayoría de los casos se identificó un incremento gradual de los escurrimientos, excepto por la serie del mes de octubre, en la cual los últimos años de registro mostraron aumentos importantes en el régimen de escurrimiento. Para la estación 28111, se identificó la presencia de tendencia positiva en diez series analizadas, en ocho mensuales, en la serie primavera-verano y en la serie anual; se observó que los cambios más abruptos se dieron en los últimos tres años de registro.

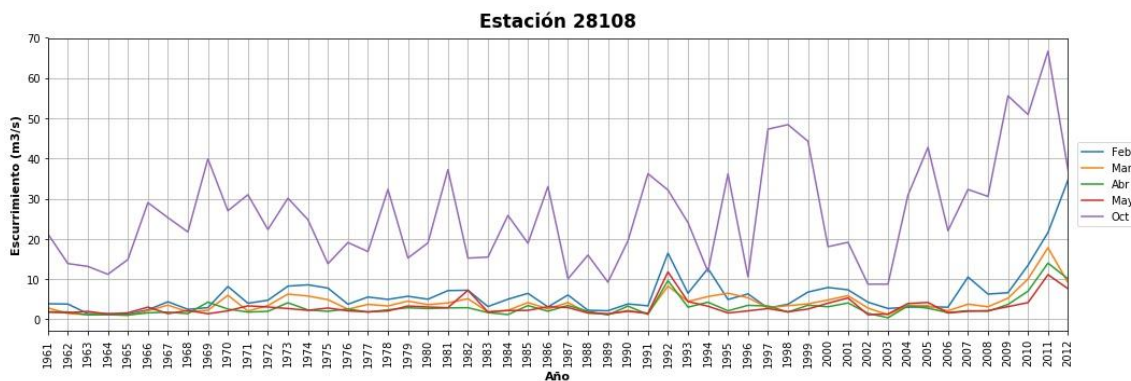
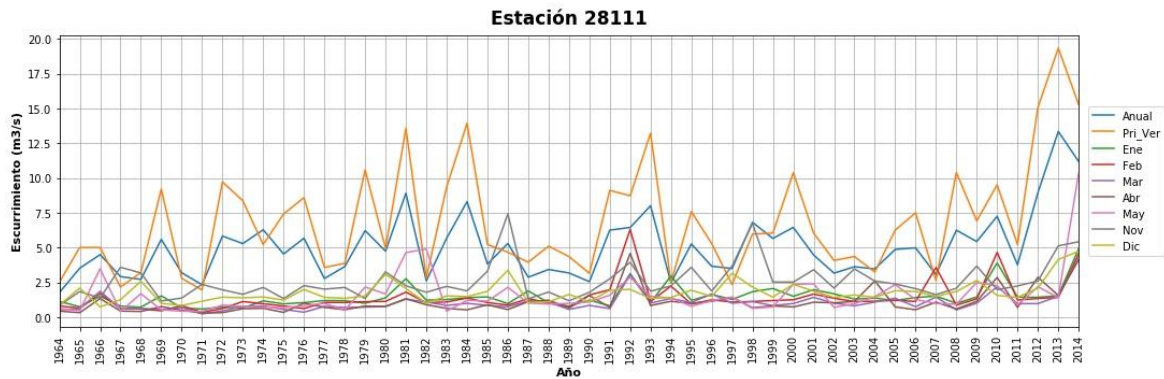
Figura 5.48 Tendencia del escurrimiento medio (m³/s). Estaciones 28108 y 28111.

Figura 5.48 Tendencia del escurrimiento medio (m³/s). Estaciones 28108 y 28111.

Finalmente, el análisis de los escurrimientos mínimos, fue la variable en la que se identificó el mayor número de series con tendencia positiva; ocho series tuvieron variación para los registros de la estación 28108, y once series para la estación 28111, cabe destacar que para ambas estaciones los cambios, que se ven en la figura 5.49, son en los últimos años de registro, 2010-2012 para el primer caso y 2012-2014 para el segundo caso.

Para el análisis de las variables climáticas, se contó con tres estaciones dentro de la subcuenca definida hasta la estación hidrométrica 28108, la estación 30158 que se encuentra localizada en la subcuenca baja; la estación 30003 que está localizada en la subcuenca media, y en la subcuenca alta se localiza la estación 30114.

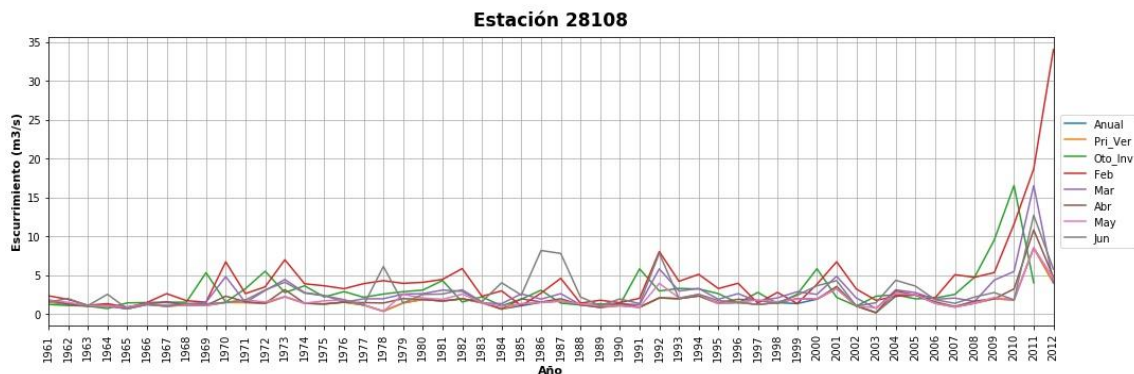
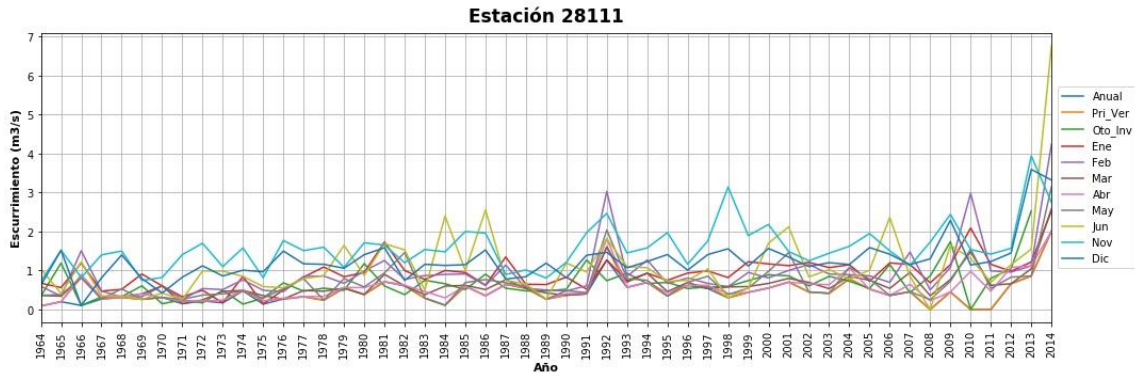
Figura 5.49 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m³/s). Estaciones 28108 y 28111.

Figura 5.49 Tendencia del escurrimiento mínimo instantáneo (m³/s). Estaciones 28108 y 28111.



La precipitación en ambas subcuencas no presentó cambios sostenidos en la mayoría de sus series, únicamente se observó tendencia positiva clara en el régimen de precipitación de la serie de septiembre en la estación 30158. También se observó tendencia creciente en el índice CDD en algunas series de las estaciones 30003 y 30114, como se puede observar en la figura 5.50. Por lo que se puede decir que no hay evidencia contundente para afirmar que la precipitación este cambiando su patrón, y por lo tanto que sea el agente de cambio en las alteraciones de los escurrimientos de las subcuencas analizadas.

Figura 5.50 Tendencias del índice CDD (días). Estaciones 30003 y 30114.

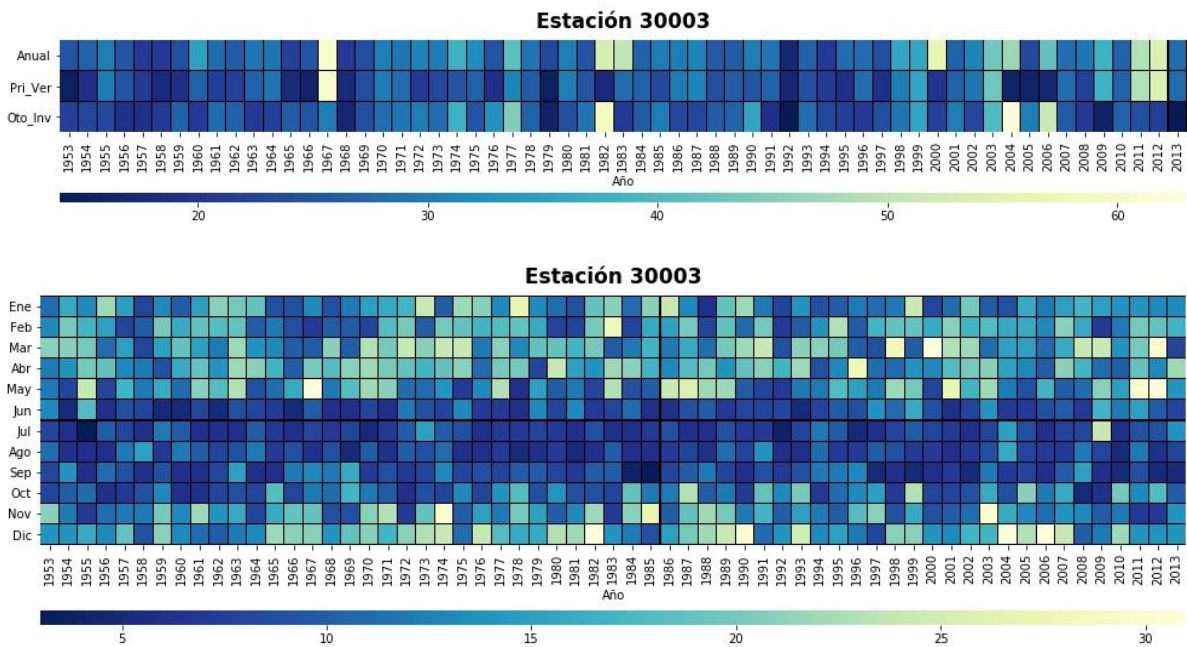
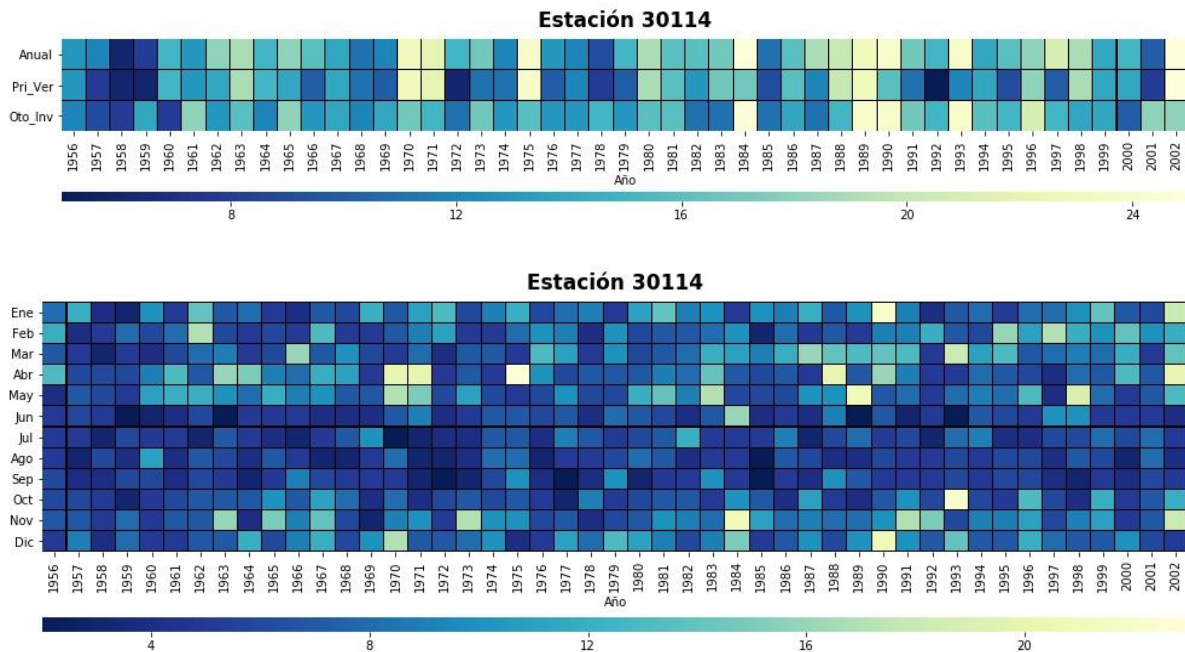


Figura 5.50 Tendencias del índice CDD (días). Estaciones 30003 y 30114.



La temperatura en las estaciones analizadas, muestran variaciones en la mayor parte de sus series, aunque de forma general se puede decir que la parte baja de la subcuenca tuvo tendencia negativa, mientras que la subcuenca alta tuvo tendencia positiva, y en la subcuenca media se observó una transición en el comportamiento de las temperaturas.

En primer lugar se analizó las temperaturas promedio de las estaciones, para las series de la temperatura máxima promedio se observó tendencia positiva en la mayor parte de las series analizadas de la estación 30003 y 30114 (figura 5.51), por otro lado en los registros de la temperatura mínima promedio se identificaron cambios en las series de la estación 30114 y 30158, en donde la primera estación mostró una tendencia positiva y la segunda una tendencia negativa, en las series analizadas (figura 5.52).

En el análisis de los ICC se confirmó lo observado en el análisis de las temperaturas promedio, la estación 30114 mostró una sostenida tendencia positiva en nueve índices; en la estación 30003 se identificó una tendencia positiva en algunos de los índices que caracterizan la temperatura máxima y una tendencia negativa en algunos de los índices que caracterizan la temperatura mínima, por lo que la subcuenca media tiende a presentar días con temperaturas más extremas; la estación 30158 mantuvo una clara tendencia negativa en sus series, sobre todo los

índices que caracterizan la temperatura mínima, aunque los índices TXx, Tx90p y WSDI mostraron tendencia negativa por lo que implica que se están reduciendo los extremos de la temperatura máxima.

Figura 5.51 Tendencias de la temperatura máxima promedio (°C). Estaciones 30003 y 30114.

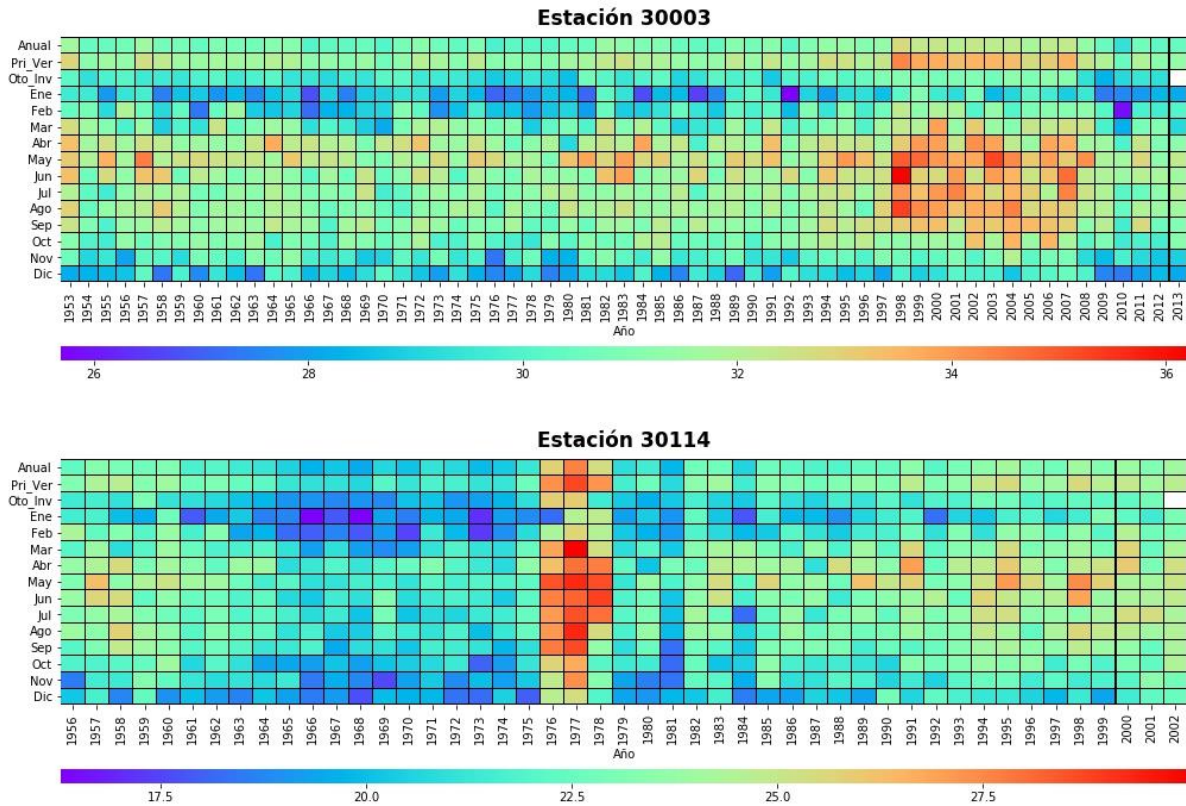
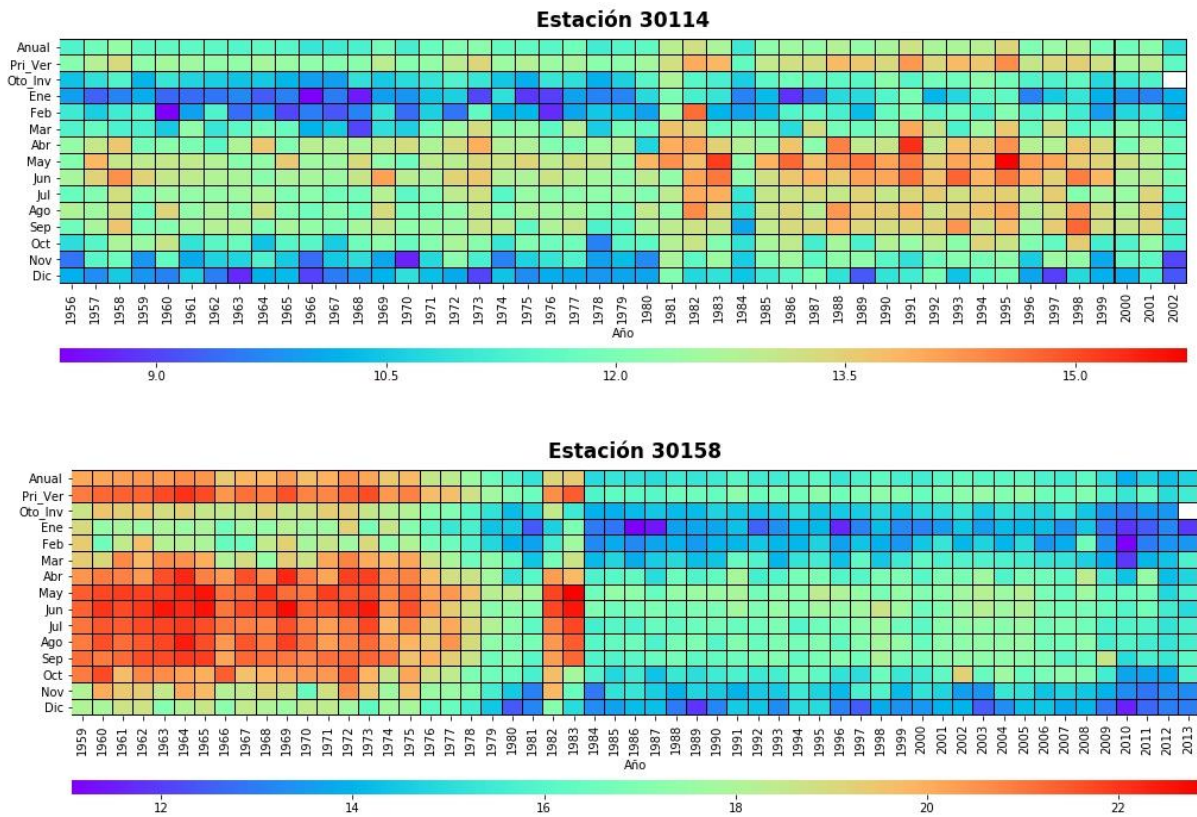
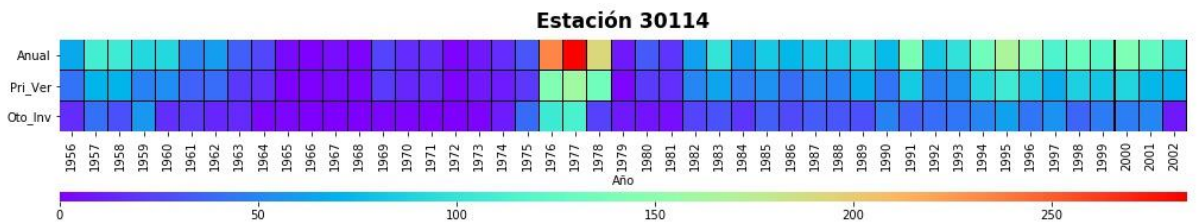


Figura 5.52 Tendencias de la temperatura mínima promedio (°C). Estaciones 30003 y 30114.



Dos índices que muestran a detalle el comportamiento de la dinámica de la temperatura es el SU25 y TR20 (figura 5.53 y figura 5.54), mientras mayores sean estos índices los requerimientos de agua por la vegetación serán mayores, al igual que la evaporación. Se identificó que la parte alta de la subcuenca tiene una tendencia positiva en el índice SU25, por lo que es probable que la evapotranspiración este aumentando en esa parte de la subcuenca, mientras que en la parte baja mostró una clara tendencia negativa del TR20.

Figura 5.53 Tendencias del índice SU25 (días). Estaciones 30114.



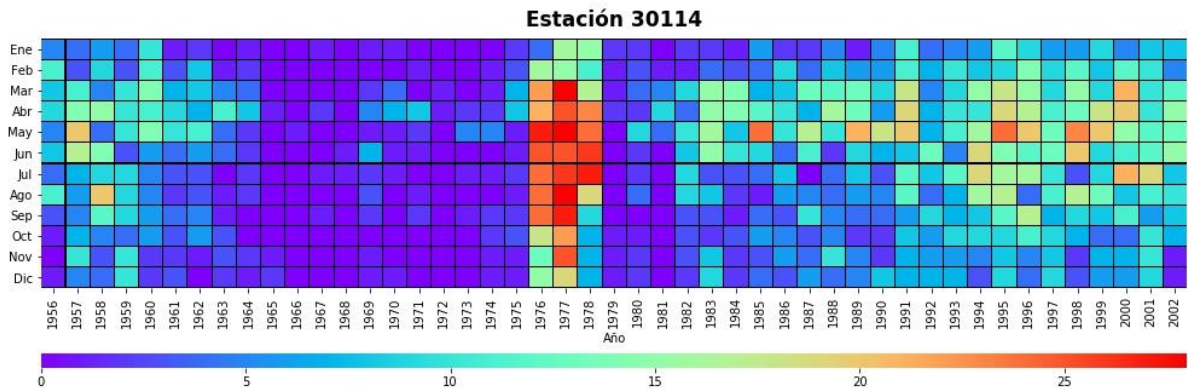


Figura 5.54 Tendencias del índice TR20 (días). Estaciones 30158.

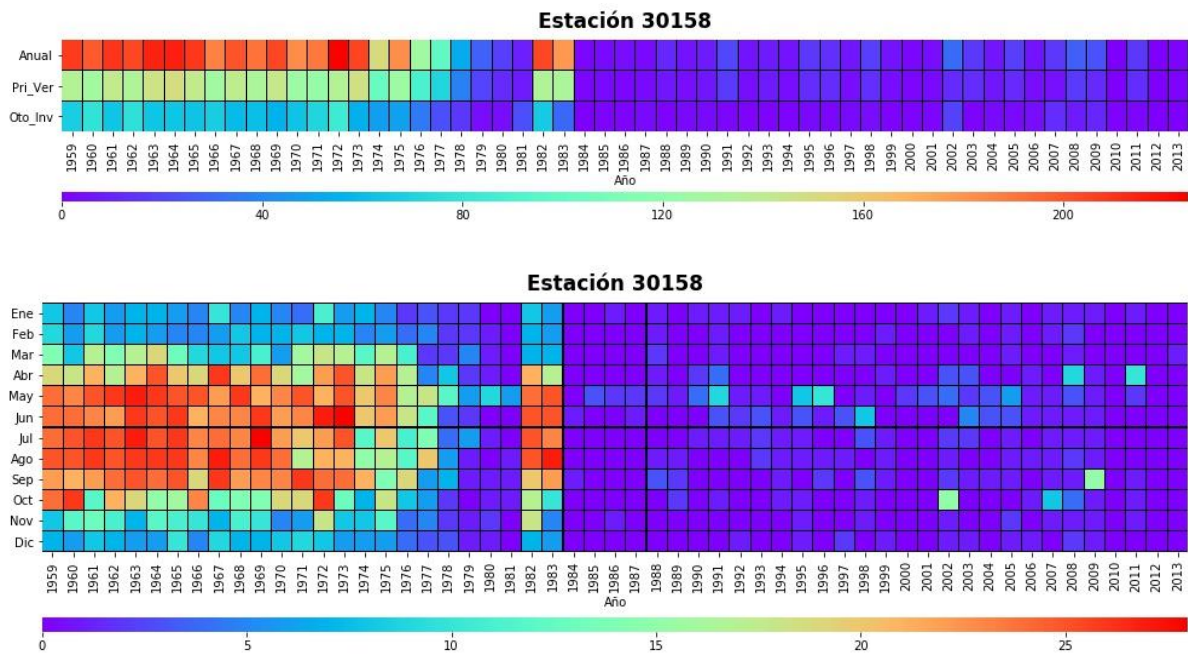
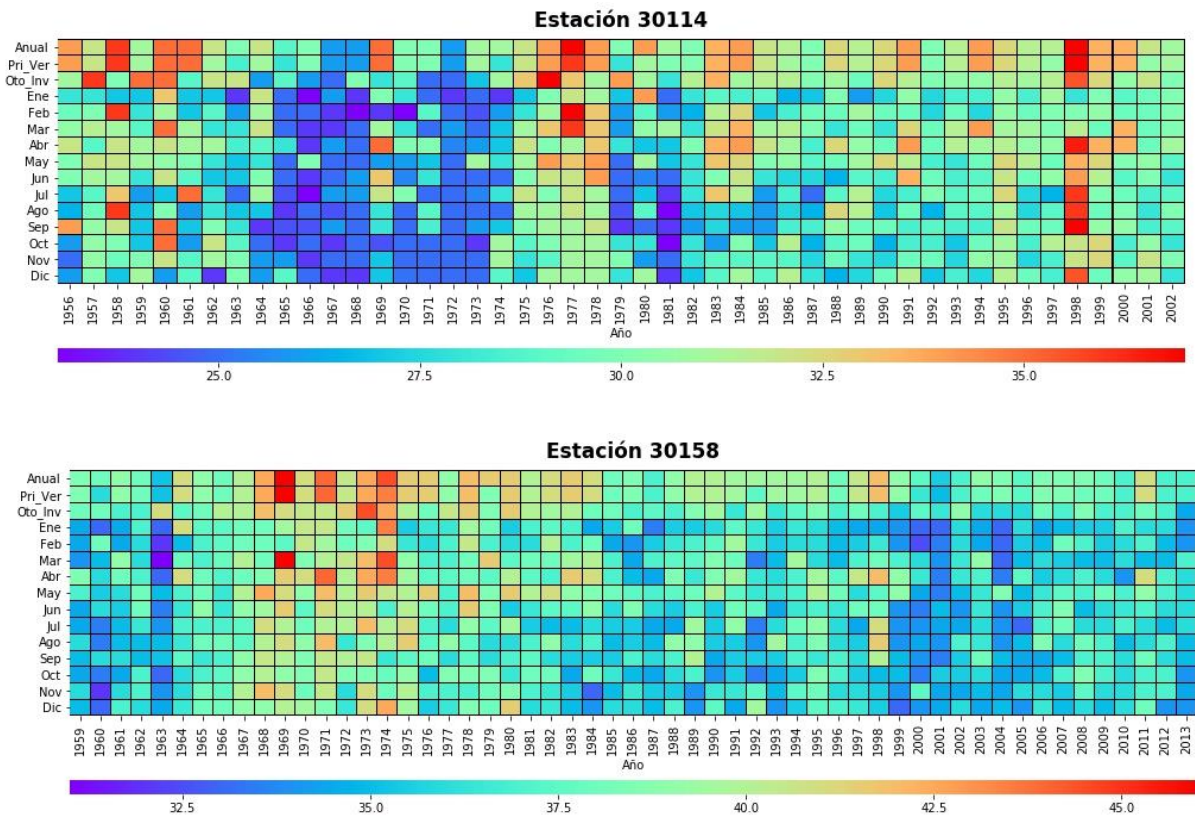


Figura 5.55 Tendencias del índice TXx (°C). Estaciones 30114 y 30158.



Los extremos en las temperaturas también han mostrado cambios muy marcados, mientras que en la parte alta de la cuenca tiende a ser mayor la máxima temperatura máxima, en la parte baja tiende a ser menor (figura 5.55). En las estaciones 30003 y 30158, se coincidió en la tendencia negativa de la máxima temperatura mínima alcanzada (figura 5.56). Finalmente, el índice TNn mostró otra vez el comportamiento antagónico entre la parte alta y baja de la subcuenca (figura 5.57).

Del análisis de las variables climáticas se tiene evidencia que la precipitación ha mantenido su régimen a través de los años, en toda el área de ambas subcuencas, por otro lado la temperatura es la variable que mayor modificación ha tenido, en general se puede decir que la parte alta de la subcuenca 20108 tiende a aumentar su temperatura y viceversa la parte baja, por lo que la evaporación y evapotranspiración tienden a aumentar en la parte alta y disminuir en la baja, ya que están íntimamente relacionadas con la temperatura. Ahora bien el comportamiento de las variables climáticas no se ve reflejado con los resultados de las tendencias de los escurrimientos, ya que las

series que mostraron alteración en su comportamiento, tuvieron tendencia positiva, lo cual no es posible explicarlo por el comportamiento de la precipitación ya que no ha tenido alteraciones estadísticamente significativas; y por la parte de la temperatura, solamente en la parte baja de la subcuenca se tuvo evidencia de tendencia a disminuir la evaporación y la evapotranspiración, pero no así en la parte media y alta, por lo que no se reflejaría en el aumento de los escurrimientos, debido a una reducción de requerimientos del recurso hídrico. Por otro lado, las dos subcuencas, 28108 y 28111, han presentado alteraciones en el uso de suelo y vegetación, disminuyendo las áreas con vegetación inalterada y aumentando en gran medida la zona urbana, es importante señalar que dentro de la superficie de estas subcuencas se tiene la mayor área de asentamientos humanos, ya que se encuentra la ciudad de Xalapa, Veracruz; por lo que las alteraciones en el régimen de los escurrimientos podrían deberse en gran medida a efectos de orden antropogénico. Un camino que se debería explorar, para explicar este aumento en los escurrimientos, es analizar el comportamiento de las aguas residuales de esta ciudad, ya que las aportaciones de las mismas podrían ser un factor importante en los cambios de los escurrimientos en la cuenca; aunque también es claro que al aumentarse la superficie urbana cambia el comportamiento en que responde la cuenca a diversos fenómenos meteorológicos, por lo que se podría aseverar que las alteraciones vistas en el régimen de escurrimientos se deben en mayor medida a cambios de tipo antropogénico.

Figura 5.56 Tendencias del índice TNx (°C). Estaciones 30003 y 30158.

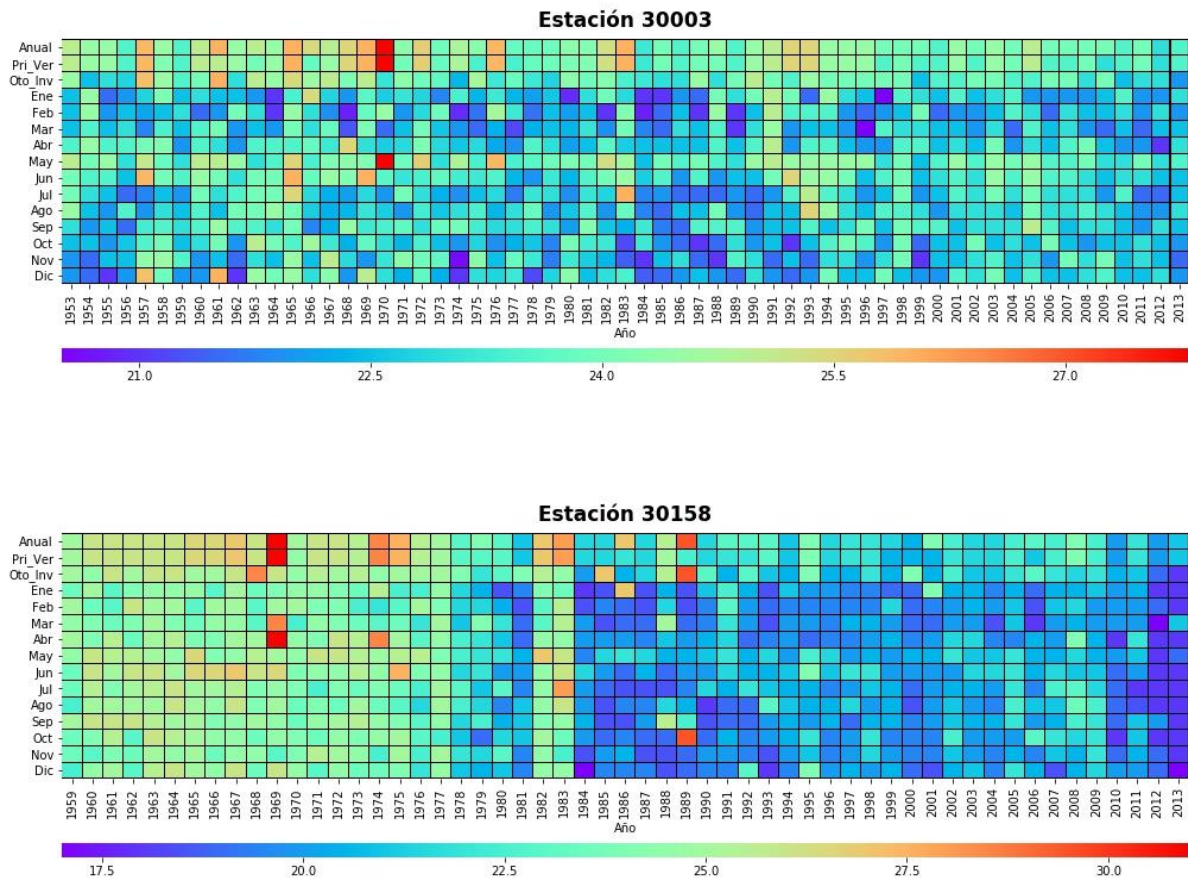
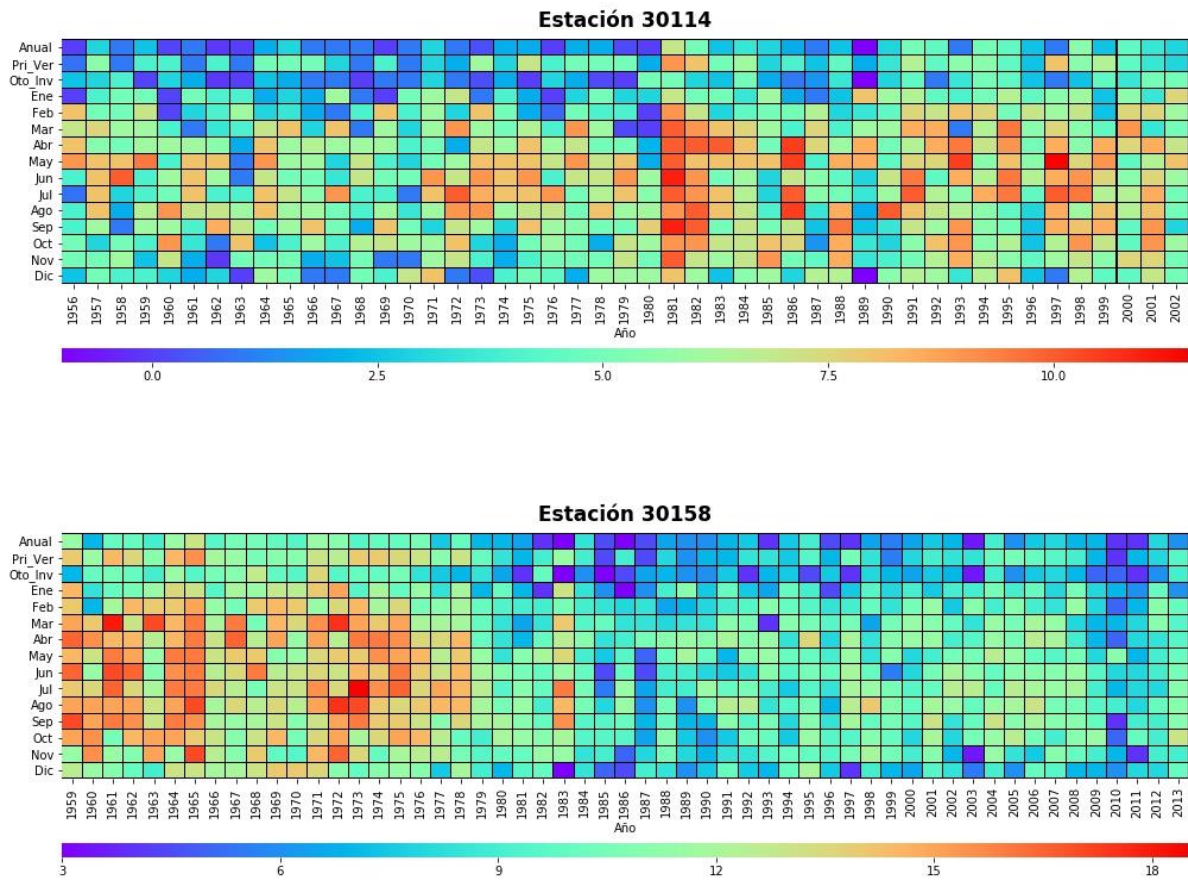


Figura 5.57 Tendencias del índice TNn (°C). Estaciones 30114 y 30158.



6 Conclusiones

Para el análisis de las series hidroclimáticas, en México, se identificó que existen, hasta la fecha de realización de esta tesis, un reducido número de series de mediciones con una longitud mayor a 50 años, también se observó que hay interrupciones en las mediciones, así como algunos datos dudosos, por lo que quedó de manifiesto la importancia de realizar un tratamiento de calidad de la información, y posterior a ello es necesario llevar a cabo la regionalización de las variables hidroclimáticas, para así poder hacer el complementado de información, con lo cual se tendrá un buen registro en calidad y cantidad de información, necesario para la realización de análisis estadísticos de este tipo.

Es importante conocer el comportamiento de los escurrimientos en una cuenca, debido a que es la variable que da respuesta a la interacción entre las variables climáticas y las condiciones físicas de la cuenca; para conocer si las mediciones del escurrimiento son representativas de la cuenca se debe asegurar que las series sean independientes. Las seis series analizadas mostraron independencia en sus registros.

En general, se pudo identificar que ha habido pocos cambios en los regímenes de escurrimiento, de las estaciones analizadas. El escurrimiento máximo instantáneo es el que presentó menos cambios en su comportamiento, mientras que el escurrimiento medio y el escurrimiento mínimo instantáneo fueron los que tuvieron mayor cantidad de series con cambios de tendencia, tanto positiva como negativa.

Para el caso de las variables climáticas se identificó que la temperatura máxima y mínima, fueron las variables que han presentado mayores cambios en el comportamiento de sus series, lo cual quedó evidenciado tanto con tendencia positiva como negativa, en los diferentes análisis hechos. La precipitación no ha mostrado cambios importantes en el comportamiento de las diferentes series analizadas, dentro del reducido número de series con alteraciones de su comportamiento, se identificó que las series con tendencia positiva fueron mayores que los de tendencia negativa; lo cual quedó apoyado con el análisis de los índices de cambio climático, por lo que la precipitación no es el principal factor en los cambios de comportamiento vistos en algunas series de escurrimiento.

Las cuencas analizadas fueron dominadas por la superficie agrícola, y a través de los años esta superficie se ha ido incrementando, al igual que las áreas de pastizales y zonas urbanas, desplazando las áreas de bosque y selva, lo cual puede jugar un papel importante en las variaciones de los escurrimientos (medios y mínimos instantáneos) que fueron observados, ya que al reducirse las áreas de bosque y selva natural se reduce la capacidad de retención de humedad de la cuenca, por lo que la cantidad de agua que se aporta a los mantos acuíferos es menor y esto se ve reflejado en dichos escurrimientos.

Las estaciones hidrométricas 28003, 28040 y 28069 son las que presentan series con tendencia negativa, lo cual es el resultado de cambios en el uso de suelo y vegetación, así como variaciones de la temperatura observada en las subcuencas, se pudo identificar una tendencia positiva en las variables de la temperatura lo cual implicaría aumento en la evaporación y evapotranspiración de la zona, lo que representaría pérdidas del recurso hídrico para las subcuencas.

En el caso de las estaciones hidrométricas 28108 y 28111 presentaron tendencia positiva en los escurrimientos, sobre todo en los escurrimientos medios y mínimos, lo cual no pudo relacionarse con las variables climáticas analizadas, ya que estas no presentaron cambios estadísticamente significativos en el comportamiento de la precipitación, y los cambios identificados en la tendencia de la temperatura no pueden relacionarse con el comportamiento de los escurrimientos; por lo que las variaciones observadas pueden deberse a cambios antropogénicos en la cuenca, entre ellos el cambio de uso de suelo y vegetación, ya que el área urbana ha crecido, y dentro del área de las subcuencas se encuentra la ciudad de Xalapa, Veracruz.

El comportamiento de la interacción de las variables hidroclimáticas y el estado físico de las subcuencas han presentado alteraciones en su comportamiento, en las estaciones 28003, 28040 y 28069 se pueden explicar estos cambios por alteraciones en las variables climáticas y cambios de tipo antropogénico, mientras que en las estaciones 28108 y 28111 las alteraciones en el régimen de escurrimientos se deben en gran medida a cambios de tipo antropogénico.

7 Bibliografía

- Alexandersson, H., & Moeberg, A. (1997). Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology*, 17, 25-34.
- Andrews, D. F. (1972). Plots of high-dimensional data. *Biometrics*, 28(1), 125-136.
- Brunet-India, M. (2010). Datos e indicadores para detectar y atribuir eventos al cambio climático: Los registros históricos del clima y su problemática. *Realidad, datos y espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1(1), 16-25.
- Buishand, T. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58, 11-27.
- Castro, L., & Carvajal Escobar, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*(9), 15-25.
- CONAGUA. (Febrero de 2011). *Manual para el control de inundaciones* (2011 ed.). Distrito Federal, México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 13 de Mayo de 2019, de <http://cenca.imta.mx/pdf/manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf>
- Escalante Sandoval, C., & Reyes Chávez, L. (2008). *Técnicas estadísticas en hidrología*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería (UNAM).
- Escalante Sandoval, C., & Reyes Chávez, L. (2014). *Hidrología Básica*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Escalante-Sandoval, C., & Amores-Rovelo, L. (2014). Análisis de tendencia de las variables hidroclimáticas de la costa de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 61-75.
- ETCCDI. (2009). *ETCCDI/CRD Climate Change Índices*. Recuperado el 04 de 05 de 2020, de http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_índices.shtml
- FAO. (2016). *Sitio web AQUASTAT*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 18 de Julio de 2019, de Food and Agriculture Organization of the United Nations: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat>

- Figueroa-Gallegos, J. A. (2016). Índices de cambio climático en la cuenca del río Sabina, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 8(2), 36-41.
- Galicia, L. (2014). El cambio de uso de suelo: consecuencias en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua. *AZ Revista de Educación y Cultura*, 82, 15-18.
- Galicia, L., García-Romero, A., Gómex-Mendoza, L., & Ramírez, I. M. (Enero de 2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Ciencia (Academia Mexicana de la Ciencia)*, 58(4), 50-59.
- García Nieto, H., García Daguer, R., Moreno Sánchez, R., & Gonzáles Ramos, A. (2002). Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso del suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(47), 92-112.
- Hosking, J. R. (1990). L-Moments: Analysis and Estimation of Distribution Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 52(1), 105-124.
- Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods* (4a ed ed.). London: Charles Griffin.
- Klein Tank, A., Zhang, X., & Zwiers, F. (2009). *Guidelines on Analysis of extremes in changing climate in support of informed decisions for adaptation*. Suiza: World Meteorological Organization.
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (Enero-Marzo de 2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, III(1), 5-20.
- Mendoza-Uribe, I., & Vázquez-Zavaleta, M. (2017). Detección de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el estado de Guerrero. *Ingeniería*, 21(1), 13-30.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Marís-Castro, B., Gómez-Tagle, A., . . . Bruijnzeel, L. A. (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), 395-407.
- Nathan, R., & McMahon, T. (1990). Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology*, 121, 217-238.

- Núñez-González, G., & García-Suárez, J. (mayo-agosto de 2018). Análisis de la calidad de los datos y la tendencia de algunos índices de precipitación en el estado de Jalisco. *Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(2), 14-27.
- Pereyra Díaz, D., Pérez Sesma, J., & Salas Ortega, M. (2010). Hidrología. En G. d. Veracruz (Ed.), *Atlas del Patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz* (págs. 85-122). Gobierno del Estado de Veracruz.
- Pettitt, A. (1979). A nonparametric approach to the change point detection. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
- Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V., & Lane, W. (1998). *Applied modeling of hydrological time series*. USA: Water Resources Publications.
- Salas-Aguilar, V., Paz-Pellat, F., Macedo-Cruz, A., Ortiz-Solorio, C., & Palacios-Vélez, E. (2015). Respuesta del flujo hídrico a la variabilidad climática y cambios de cobertura forestal a nivel de subcuenca en Chiapas. En F. Paz-Pellat, & J. Wong-González, *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2014* (págs. 180-185). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida y el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
- Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., Ojeda-Bustamante, W., Cehbhouni, G., Orona-Castillo, I., Villanueva-Díaz, J., . . . Gonzáles-Cervantes, G. (2008). Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. *Tecnología y ciencias del agua*, 23(4), 5-24.
- Snedecor, G., & Cochran, W. (1989). *Statistical Methods* (Eighth Edition ed.). Iowa: Iowa State University Press.
- Tabios, G., & Salas, J. (1985). A Comparative Analysis of Techniques for spatial interpolation of precipitation. *Journal of the American Water Resources Association JAWRA*, 21(3), 365-380.

Von Neumann, J. (1941). Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *Ann. Math. Stat.*, 12, 367-395.