

ANEXO 1. ANÁLISIS EXPLORATORIO Y ESTADÍSTICO MODELACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA RECARGA Y EL FLUJO EN EL ACUÍFERO DEL GOLFO DE URABÁ -COLOMBIA

1. Estaciones utilizadas

Para el análisis de las variables climáticas de la zona de estudio se utilizaron 41 estaciones de precipitación y 15 de temperatura del IDEAM, las estaciones utilizadas se muestran en la figura 1.

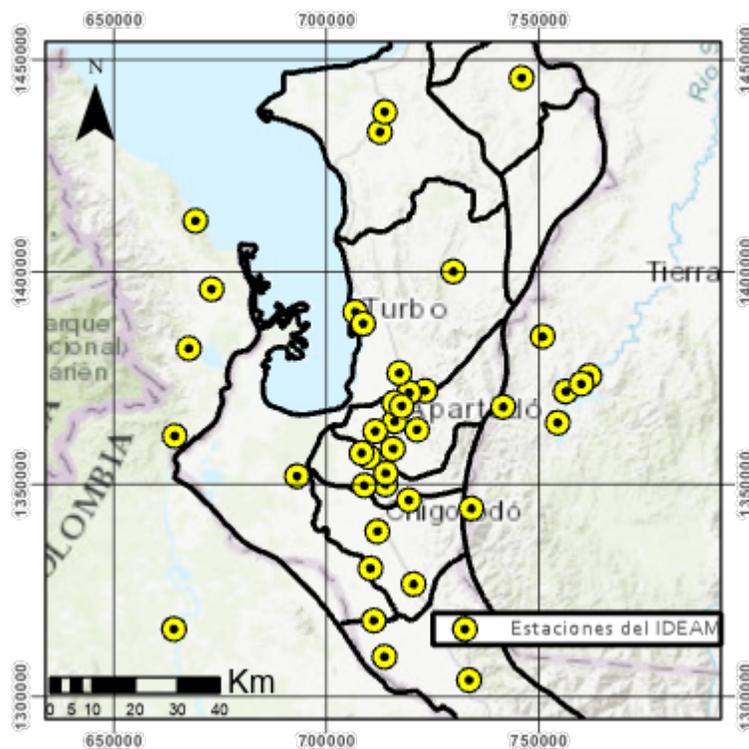


Figura 1: Estaciones de precipitación y temperatura del IDEAM

2. Análisis exploratorio de datos.

Con el fin de describir el comportamiento de las variables, encontrar valores extremos o outliers, se realizó un análisis exploratorio de datos. en la tabla 1 se tiene algunos estadísticos para las estaciones de precipitación, para la zona se tiene una precipitación mensual promedio de 224 mm y una precipitación histórica máxima registrada de 1266 mm en un mes. De la tabla 2 podemos obtener un rango de temperatura diaria promedio entre 13.6 y

32.2 °C con una temperatura promedio de 26.9 °C. En la tabla 4 encontramos una temperatura mínima de 15.2, esta es mayor que la registrada en la serie de temperatura diaria, por lo cual estos datos deben ser analizados con cuidado, por posibles errores en la medición, por otro lado, en la tabla 3 encontramos un valor máximo histórico de temperatura de 41.2 °C.

Estación	Cuenta	Promedio	std	min	25 %	50 %	75 %	max
11120040	432,0	207,8	133,4	0,0	103,5	210,0	295,2	607,0
11130010	474,0	176,9	138,2	0,0	79,2	165,0	247,8	837,0
11135010	215,0	165,9	125,1	0,0	48,0	168,0	258,8	522,7
11145010	67,0	335,9	223,4	0,0	182,6	321,3	486,4	852,4
11150010	482,0	250,5	179,2	0,0	108,2	247,0	366,0	1049,1
11150020	467,0	225,7	175,4	0,0	84,0	213,0	313,5	1266,0
12010010	492,0	343,7	196,0	0,0	198,0	342,0	482,0	913,0
12010020	221,0	340,6	232,3	0,0	128,0	347,0	512,0	935,0
12010030	486,0	305,6	194,9	0,0	149,2	301,0	440,0	964,0
12010050	341,0	222,5	147,8	0,0	103,0	214,0	312,5	784,0
12010060	408,0	212,1	142,3	0,0	98,8	202,0	299,6	812,9
12010070	446,0	214,0	129,0	0,0	124,8	209,4	293,9	597,8
12010080	162,0	244,6	162,5	1,7	117,4	246,3	337,8	711,0
12010090	453,0	255,6	161,3	0,0	142,0	245,0	359,0	860,0
12010100	420,0	223,1	134,7	0,0	124,8	226,0	304,2	717,0
12010110	447,0	187,5	115,5	0,0	91,5	196,0	263,5	622,0
12010120	461,0	223,3	131,0	0,0	122,0	225,0	314,0	578,0
12010160	144,0	215,5	138,1	0,0	102,6	211,6	302,4	605,4
12010170	199,0	325,8	198,0	0,0	174,0	321,0	457,0	1013,7
12010180	134,0	217,1	136,7	3,0	121,4	214,7	281,2	733,0
12015010	313,0	446,3	256,0	0,7	251,0	452,0	635,4	1153,4
12015020	415,0	227,9	134,6	0,0	128,5	226,9	308,1	705,1
12015030	79,0	293,1	181,0	0,2	160,6	294,8	414,5	696,1
12015050	124,0	206,5	141,3	0,0	102,3	204,9	265,2	630,0
12015060	252,0	242,1	153,3	0,0	130,3	239,2	342,1	701,0
12015070	381,0	276,4	153,9	1,1	178,4	267,6	381,3	773,3
12015080	54,0	259,5	173,2	3,6	135,3	251,2	354,8	720,0
12020010	524,0	128,0	92,0	0,0	59,0	119,0	179,0	480,0
12025010	159,0	204,3	119,1	0,0	116,8	213,0	286,0	491,8
12025020	53,0	131,6	93,1	1,3	45,3	131,1	191,6	405,8
12025030	303,0	160,6	102,3	0,0	87,6	157,0	224,9	631,7
12025040	197,0	187,5	124,2	0,0	87,7	178,0	277,0	592,0
12030020	506,0	118,6	92,4	0,0	40,0	117,8	178,1	586,0
13015020	111,0	182,7	132,3	0,0	87,3	185,0	259,0	852,0
13015030	74,0	223,3	135,8	15,0	123,2	204,4	333,0	496,0
13020020	258,0	157,3	107,2	0,0	58,0	149,0	231,5	519,0
13020040	100,0	166,2	115,5	0,0	72,9	147,6	261,9	461,0
13025030	297,0	180,8	119,7	0,0	79,0	179,0	264,0	669,0
13030030	105,0	174,8	122,7	0,0	73,6	152,5	280,0	547,0
13035010	156,0	173,2	111,9	0,0	77,3	177,5	234,2	493,3
13040010	298,0	166,5	114,2	0,0	66,0	155,0	249,8	503,0

Tabla 1: Estadísticos mensuales para todas las estaciones de precipitación

Estación	Cuenta	Promedio	std	min	25 %	50 %	75 %	max
11135010	6318,0	27,0	1,1	21,0	26,4	27,1	27,8	32,2
11145010	2224,0	27,0	1,2	23,1	26,2	26,9	27,8	30,7
12015010	7596,0	26,0	0,9	14,4	25,5	26,1	26,6	30,0
12015020	12331,0	26,7	1,0	13,6	26,0	26,7	27,3	31,2
12015050	2439,0	26,7	1,0	22,7	26,0	26,8	27,4	30,0
12015070	11469,0	27,4	1,0	23,1	26,8	27,4	28,0	30,7
12015080	1618,0	26,1	1,1	20,3	25,5	26,2	26,8	29,0
12025010	1770,0	27,1	0,8	23,8	26,6	27,2	27,7	30,3
12025020	475,0	27,4	0,8	24,7	27,0	27,5	27,9	31,1
12025030	9497,0	27,1	1,0	22,9	26,4	27,1	27,8	30,1
12025040	7106,0	27,4	1,0	17,7	26,8	27,5	28,1	31,0
13015020	1180,0	26,7	1,0	22,5	26,1	26,7	27,3	29,5
13015030	2563,0	27,2	1,4	22,1	26,4	27,3	28,1	32,0
13025030	785,0	26,8	1,2	23,1	26,0	26,9	27,5	32,5
13035010	2181,0	26,6	1,1	21,9	25,9	26,6	27,4	31,2

Tabla 2: Estadísticos para todas las estaciones de temperatura diaria

Estación	cuenta	promedio	std	min	25 %	50 %	75 %	max
11135010	5493,0	31,8	1,6	23,4	31,0	32,0	32,8	38,8
11145010	1081,0	31,5	1,4	25,8	30,6	31,6	32,6	34,9
12015010	4731,0	30,1	1,4	23,0	29,2	30,1	31,0	39,2
12015020	12311,0	31,4	1,4	25,0	30,5	31,4	32,2	37,4
12015050	2647,0	30,9	1,3	24,7	30,2	31,0	31,8	35,0
12015070	11900,0	31,4	1,4	24,9	30,5	31,5	32,4	36,5
12025010	1682,0	31,0	1,4	24,8	30,2	31,0	32,0	36,4
12025030	8050,0	31,2	1,2	26,0	30,4	31,2	32,0	41,2
12025040	5151,0	31,5	1,2	26,4	30,8	31,6	32,4	36,0
13015030	1561,0	32,4	1,5	27,0	31,4	32,4	33,2	37,6
13035010	2542,0	31,5	1,5	23,0	30,8	31,6	32,4	36,7

Tabla 3: Estadísticos para todas las estaciones de temperatura máxima

Estación	cuenta	promedio	std	min	25 %	50 %	75 %	max
11135010	1856,0	22,7	1,8	15,2	22,2	23,2	24,0	26,4
11145010	1856,0	22,7	1,8	15,2	22,2	23,2	24,0	26,4
12015010	5513,0	22,3	1,5	16,0	21,8	22,6	23,2	26,0
12015020	11427,0	23,3	1,3	17,0	22,6	23,5	24,1	27,0
12015050	2774,0	23,2	1,1	16,2	22,6	23,2	23,9	27,2
12015070	11877,0	23,5	1,1	19,0	22,8	23,5	24,2	27,4
12025010	1487,0	23,6	1,5	18,0	22,8	23,8	24,6	27,4
12025030	9057,0	23,7	1,2	16,8	23,0	23,8	24,4	27,6
12025040	5085,0	23,8	1,1	17,0	23,2	23,8	24,6	27,8
13015030	734,0	23,3	1,4	19,0	22,4	23,4	24,2	26,6
13035010	2346,0	22,8	1,1	16,5	22,2	22,8	23,4	26,0

Tabla 4: Estadísticos para todas las estaciones de temperatura mínima

Se realizaron figuras tales como la figura 1 en la que se graficaron todas las series de precipitación y temperatura, de esta manera se pudo obtener el periodo para el cual se tiene mayor cantidad de datos, este fue de 1979 a 2005 para precipitación y de 1984 a 2005 para los datos de temperatura, las series para la evaluación de los modelos climáticos globales del CMIP5 tienen valores históricos hasta 2005, esto explica la selección de este

periodo. Además, para seguir describiendo los datos se realizaron, histogramas, diagramas de cajas, etc, para los datos mencionados, estas gráficas se encuentran en los anexos.

Para realizar la evaluación de los modelos se toman solo las series para el periodo seleccionado con menos del 10% de datos faltantes, de esta forma se conservan 13 estaciones de precipitación (figura 2) y sólo una de temperatura (figura 3). Para llenar los datos de las series faltantes se utilizó el método IDW.

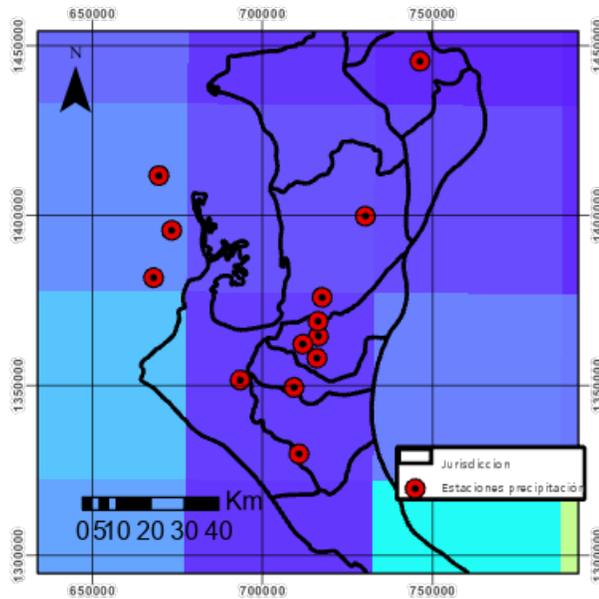


Figura 2: Estaciones de precipitación utilizadas para la evaluación de los GCM.

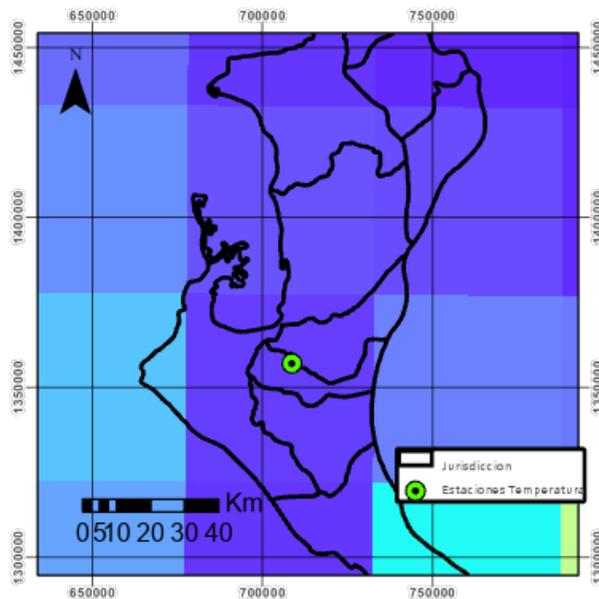


Figura 3: Estacion de temperatura utilizadas para la evaluación de los GCM.

3. Análisis de consistencia y calidad de las estaciones

La precipitación en Colombia presenta alta variabilidad constituyéndose en un fenómeno complejo debido a su ocurrencia en diferentes escalas espacio - temporales y cambios antropogénicos que han provocado el calentamiento global, lo que ha aumentado la dificultad de explicar dicha variabilidad.

La variabilidad climática a escala interanual está fuertemente controlada por la ocurrencia del evento El Niño/Oscilación del sur (ENSO por sus siglas en inglés). El ENSO presenta una variabilidad estacional, la cual está asociada con su enfasamiento con el ciclo anual, ya que comienza durante la primavera del hemisferio Norte (marzo-mayo) y alcanza su máximo desarrollo durante el tiempo de Navidad, y de allí el nombre de El Niño. También tiene una componente cuasi-bienal con un tiempo de recurrencia entre 2 a 2,5 años, así como una baja frecuencia, con una recurrencia entre 4-5 años. El Niño es la fase cálida del ENSO, en la cual se presenta un aumento de las temperaturas superficiales del mar, en particular sobre el centro y el oriente del pacífico tropical, lo cual conlleva a alteraciones en los patrones de circulación de vientos, de presiones atmosféricas superficiales y de precipitación sobre todo el océano pacífico. La Niña es la fase fría del ENSO. Durante El Niño se presenta un déficit hidrológico en Colombia [Poveda et al., 2001].

A continuación, se presentan las bases teóricas para analizar la calidad de las mediciones de las estaciones de precipitación y con ello identificar si las series presentan tendencia y cambios en la media.

3.1. Análisis de tendencia

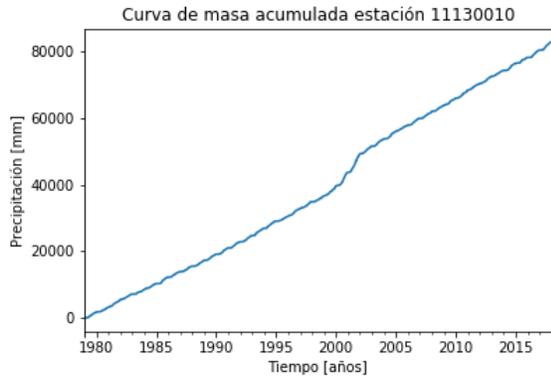
Las pruebas de tendencias son herramientas ampliamente utilizadas en la detección de cambios en las series hidrológicas. Existen pruebas no paramétricas como es la prueba de Mann Kendall, la cual se aplica bajo las hipótesis de independencia y orden aleatorio de los datos [Hamed and Rao, 1998] [Pérez Rendón et al., 2016]. Un hecho que a menudo es ignorado es la existencia de autocorrelaciones lo que conlleva a detectar falsas tendencias. Por tal motivo Hamed y Ramachandra (1998) proponen una modificación a la prueba Mann Kendall de la cual surge la prueba Mann Kendall para datos autocorrelacionados, la cual tiene mayor precisión en términos de significancia respecto a la versión original. Se rechaza la hipótesis de no tendencia si z excede un percentil especificado de la distribución normal en este caso se utilizó $\alpha = 0,05$ para un 95 % de confianza.

3.2. Curva de masa acumulada

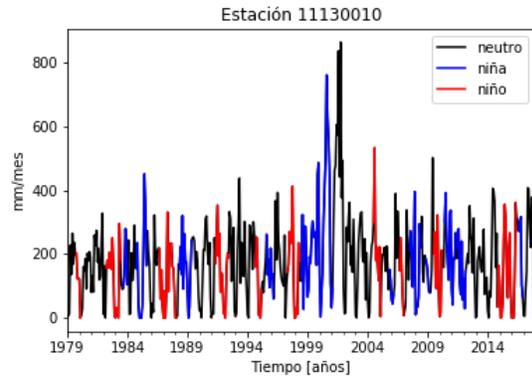
La curva de masa es un gráfico de la lámina de agua acumulada contra el tiempo en orden cronológico. A través de esta representación gráfica se pueden identificar anomalías en las mediciones, las cuales se representan por los cambios abruptos en la pendiente de la curva. Una serie sin un cambio en la media tendrá una gráfica de Masa Simple similar a una línea recta, ya que una serie con un cambio en la media causará un cambio en la pendiente de la línea recta y una serie con una tendencia tendrá una gráfica de masa simple no lineal o curvilínea.

3.3. Resultados

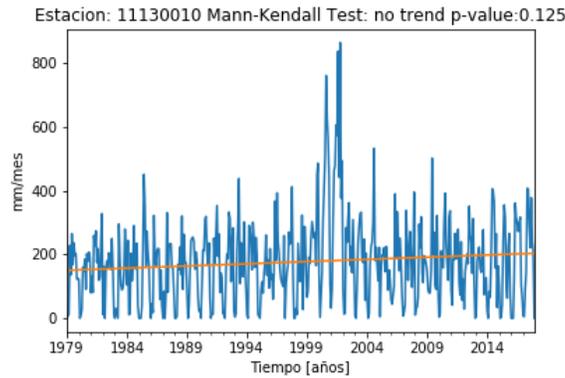
En los anexos se muestran las curvas de masa acumulada, las series con la línea de tendencia indicando si presentan tendencia según la prueba de Mann-Kendall y las series con distintos colores para las fases del ENSO. se realizó un análisis visual para todas las estaciones, acompañado de los diagramas de cajas, los histogramas y las series con el ENSO para caracterizar el comportamiento de las series. Por ejemplo, para la estación 11130010 (figura 4) la curva de masa acumulada muestra un cambio en la tendencia en el año 2000 este cambio en la tendencia se nota en la serie del ENSO donde se aprecia un aumento en las precipitaciones durante y después del evento la niña, esto podría indicar efectos del ENSO con periodos de rezago en la precipitación, para hallar los periodos de rezago se necesita de un análisis más detallado y con mayor información.



(a) Curva de masa acumulada



(b) ENSO



(c) ENSO

Figura 4: Análisis de consistencia y de tendencia para la estación de precipitación 11130010

La prueba de Mann kendall indica tendencia decreciente para la estación 11120040 y 11150010 (figura 5, y tendencia creciente para la estación de temperatura 12015070 (Figura 6) está presenta un aumento de temperatura de 0.5°C en el periodo de 1984 a 2018, estos resultados pueden deberse a cambios antropogénicos que han provocado el calentamiento global o a errores en la medición o calibración de los equipos.

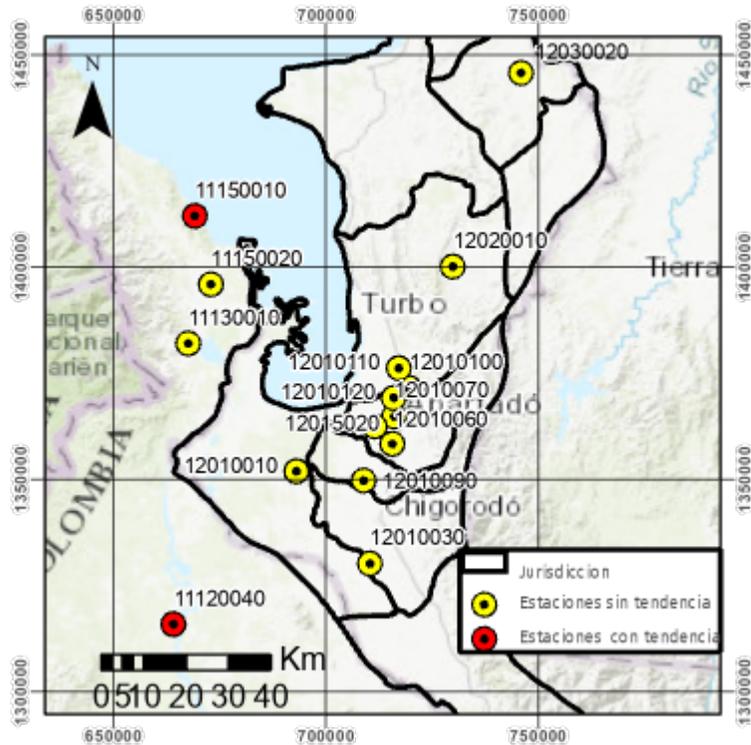


Figura 5: Estaciones de precipitación con tendencia.

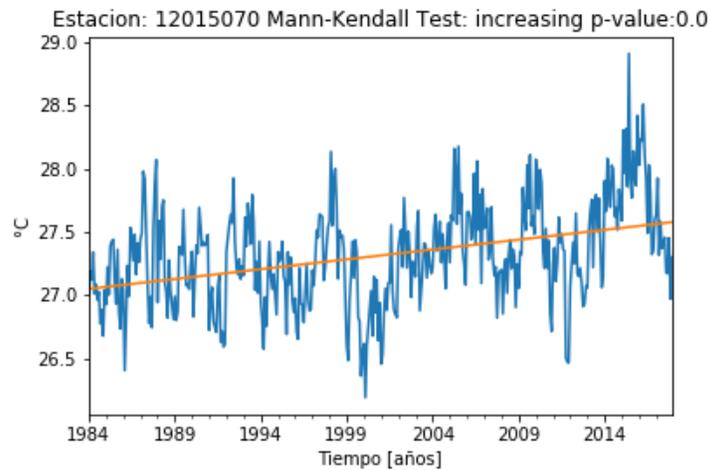


Figura 6: Estaciones de precipitación con tendencia.

4. Cálculo de índices climáticos con RClimdex y Climact2

RClimDex es un software libre que permite para calcular los 27 índices básicos de cambio climático definidos por ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) [Karl et al., 1999]. El cálculo de estos índices permite monitorear eventos extremos y cambio climático. Los índices se dividen en subconjuntos: Asociados al comportamiento de la precipitación y de eventos extremos de lluvia (tabla 5, Asociados al comportamiento de la temperatura mínima (temperatura en la noche) (tabla 6, Asociados al comportamiento de la temperatura máxima (temperatura en el día) (tabla 7). También se realizó un análisis con el software Climact2 desarrollado por *The University of New South Wales* [Alexander et al., 2013], este software permite usar *Batch* para automatizar el

calculo de índices para varias estaciones y realizar el calculo mensual de los, permitiendo hallar tendencias espaciales y temporales en los índices climáticos, se realizó el calculo de todos los índices disponibles para este software y se hizo un especial énfasis en índices mensuales trimestrales para el R10mm, R20mm, CDD, CDW y PRCTOT, se seleccionaron estos índices basados en el trabajo de [Shiferaw et al., 2018].

INDICADOR / (UNIDAD)	DETALLE
CDD (Días)	Mayor número de días secos consecutivos en un año
CWD (Días)	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año
PRCTOT (mm)	Precipitación total al año
R10mm (Días)	Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm
R20mm (Días)	Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm
R40mm (Días)	Numero de días en un año con lluvia mayor a 40mm
R95P (mm)	Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm)
R99P (mm)	Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm)
RX1day (mm)	Máximo anual de precip. en 1 día
RX5day (mm)	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos
SDII (mm/día)	Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. >1,0mm)

Tabla 5: Índices asociados al comportamiento de la precipitación y de eventos extremos de lluvia

INDICADOR / (UNIDAD)	DETALLE
FD (Días)	Número de días al año cuando la temperatura mínima es menor al rango bajo de la Temp. Min. (Equivalente al percentil 33)
ID (Días)	Número de días al año cuando la temper. mínima es mayor al rango alto de la Temp. mínima (Equivalente al percentil 66)
TN10P (Días)	Noches frías: % de días con Temp. Mín. menor al Percentil 10
TN90P (Días)	Noches calientes: % de días con Temp. Mín. mayor al Percentil 90
TR20 (Días)	Noches calientes (2): Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20°C
TNN (°C)	Temperatura nocturna mínima: Valor mensual mínimo de la temperatura mínima diaria
TNX (°C)	Temperatura nocturna máxima: Valor mensual máximo de la temperatura mínima diaria
CSDI (Días)	Conteo anual de días (por lo menos 6 días consecutivos) en que la temperatura mínima (TN) <percentil 10 (duración de periodos fríos)

Tabla 6: Índices asociados al comportamiento de la temperatura mínima (temperatura en la noche)

INDICADOR / (UNIDAD)	DETALLE
SU25 (Días)	Días al año con Temperaturas máximas mayor a 25°C
TR (Días)	Número de días al año cuando la temperatura máxima es menor al rango bajo de la Temp. Max.. (Equivalente al percentil 33)
SU (Días)	Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor al rango alto de la Temp. Max. (Equivalente al percentil 66)
TX10P (Días)	Días fríos: % de días con Temp. Máx. menor al Percentil 10
TX90P (Días)	Días calientes: % de días con Temp. Máx. mayor al Percentil 90
TXN (°C)	Temperatura diaria mínima: Valor mensual mínimo de la temperatura máxima diaria
TXX (°C)	Temperatura diaria máxima: Valor mensual máximo de la temperatura máxima diaria
WSDI (Días)	Conteo anual de días (por lo menos 6 días consecutivos) en que la temperatura máxima (TX) >percentil 90 (duración de periodos calientes)

Tabla 7: Asociados al comportamiento de la temperatura máxima (temperatura en el día)

Para el calculo de los índices con Rclimdex se utilizaron los datos de precipitación de 15 estaciones de precipitación con un porcentaje de faltantes menor al 10% y una temperatura máxima y mínima. Para el caso de la precipitación uno de los índices que presento tendencias para varias estaciones con un intervalo de confianza del 95% fue el SDII (Precipitación total anual /días con lluvia al año con precipitación mayor a 1,0mm)), en la figura 7 se tiene un mapa con la distribución del índices y el p-value en la etiqueta, los resultados muestran una distribución espacial similar a la mostrada por el analisis de tendencia con el prueba de Mann Kendall. En los anexos se muestran las gráficas con los índices para todas las estaciones seleccionadas.

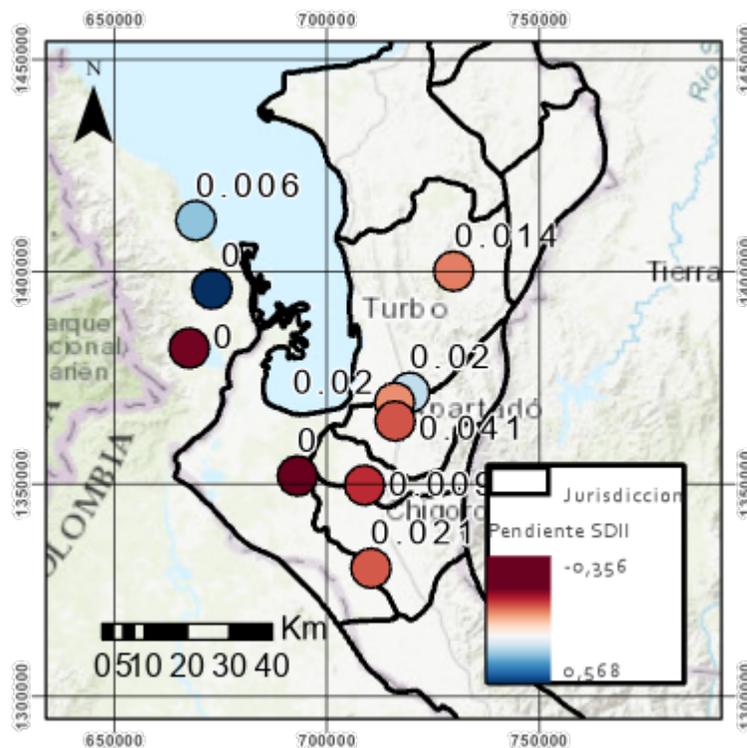


Figura 7: Mapa con la distribución espacial del índice SDII.

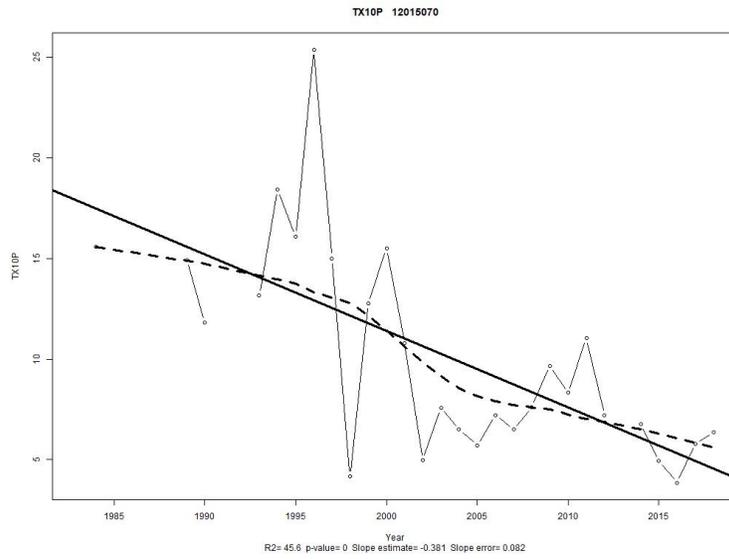


Figura 8: Índice TX10P para la estación 12015070.

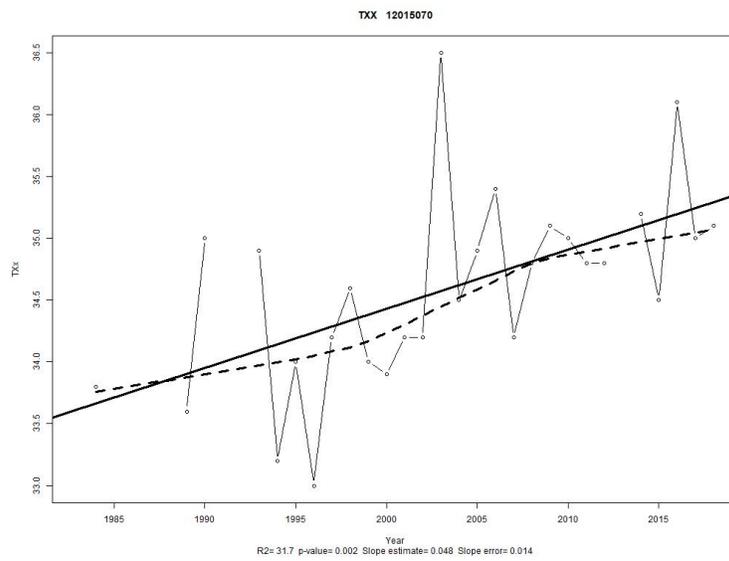


Figura 9: Índice TXX para la estación 12015070.

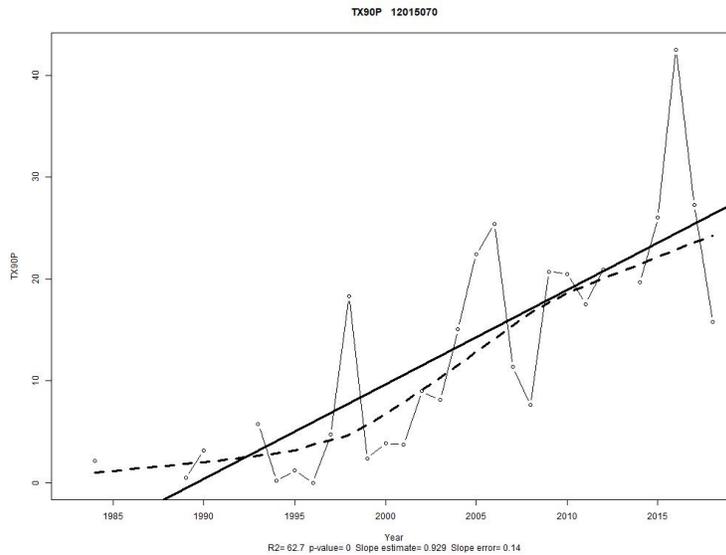


Figura 10: Índice T90P para la estación 12015070.

El calculo de los índices para la estación de temperatura, muestra una disminución en el índices de Días fríos (TX10P) (figura 8), y un aumento de la temperatura diaria máxima (índice TXX, figura 9) y un aumento en el porcentaje de días calientes (Índice TX90P, figura 10), mostrando coherencia con la prueba de Mann Kendall y los resultados obtenidos por [Hurtado, 2016a] [Hurtado, 2016b]

4.1. Mapas de tendencia

Como se mencionó anteriormente se realizaron los mapas trimestrales y mensuales para ciertos índices, en la figura 11 se presenta la leyenda para todos los mapas, esta representa en amarillas los índices con pendientes negativas, es decir disminución, y en rojo los índices con pendiente positiva es decir, es decir aumento, el p-value se encuentra representado con la forma del punto.

En las figuras 12 y 13 se muestra un aumento en las precipitaciones mayores a 20 y 10 mm para los trimestres MAM y DEF. En la figura 14 se muestra un aumento de los días húmedos consecutivos para el trimestre DEF en varias estaciones y en la figura 15 se muestra una disminución de los días secos consecutivos. Estos resultados concuerdan con la figura 16 el cual muestra un aumento de la precipitación en MAM y DEF, estos resultado son coherentes con los presentados por [Pabón, 2003] [Pabón Caicedo, 2012] [Pérez et al., 1998] [Quintana-Gomez, 1999] [Aristizábal, 2009] [Mayorga, 2011]

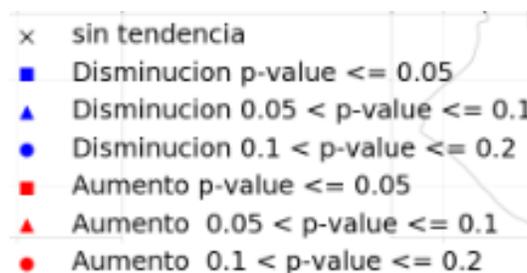


Figura 11: Leyenda de los mapas con tendencias.

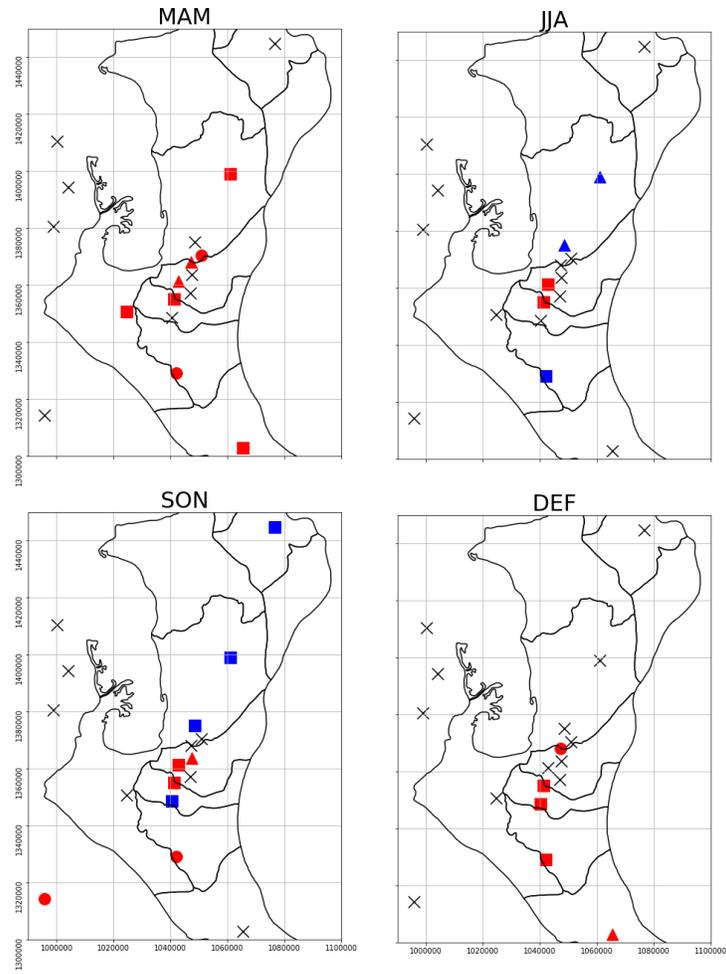


Figura 12: Mapa de tendencias índice R10mm.

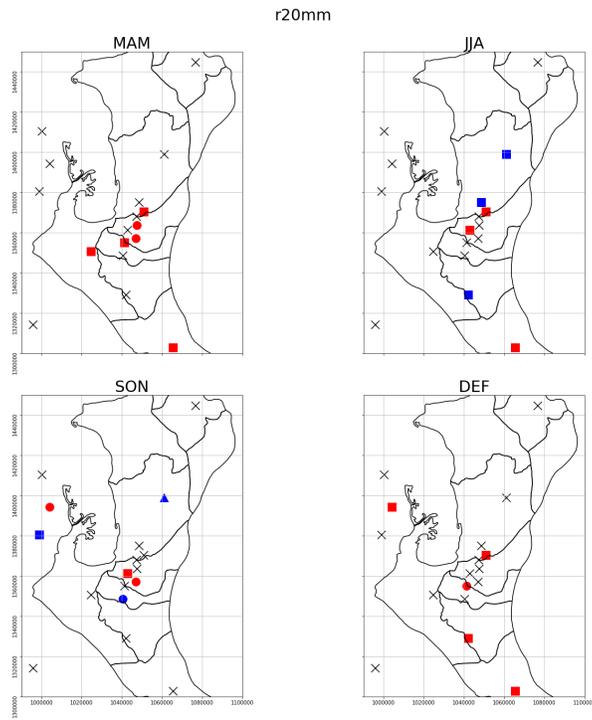


Figura 13: Mapa de tendencias índice R20mm.

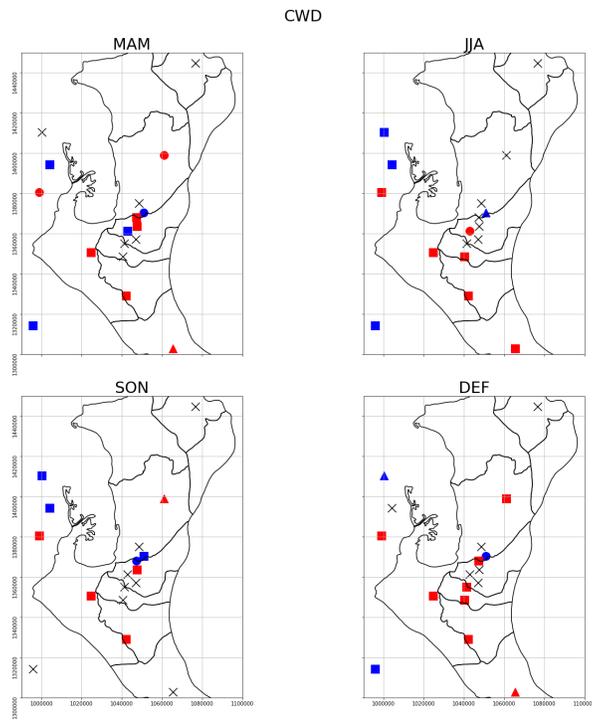


Figura 14: Mapa de tendencias índice CWD.

CDD

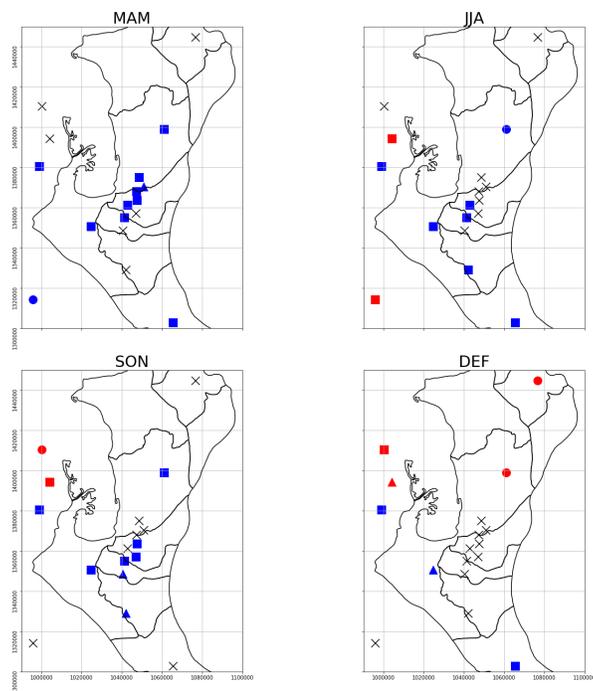


Figura 15: Mapa de tendencias índice CDD.

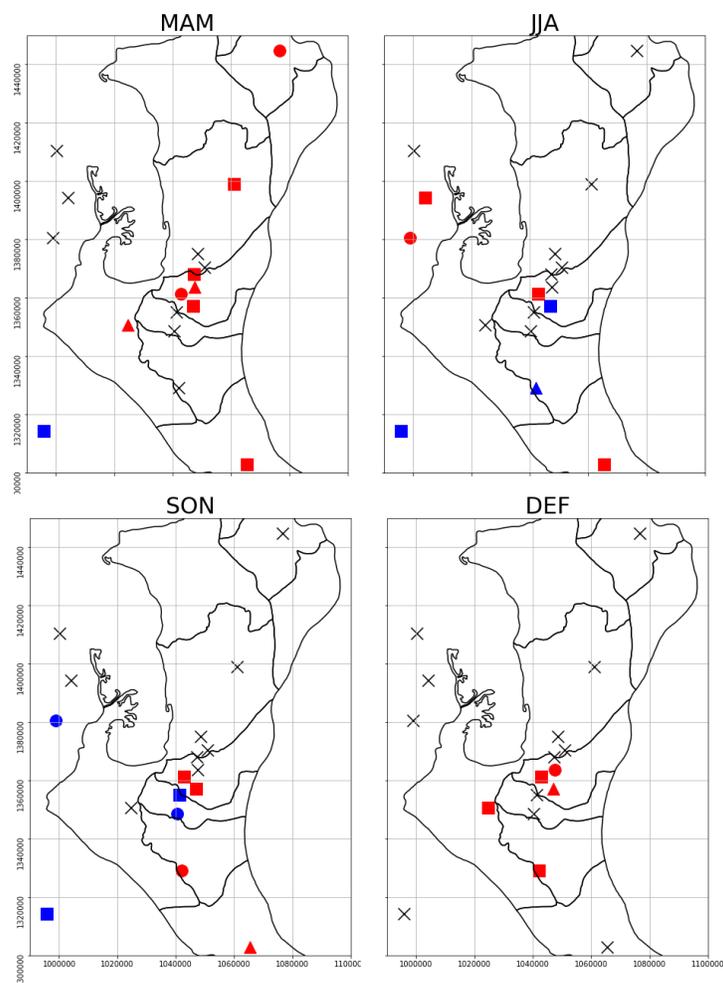


Figura 16: Mapa de tendencias índice PRCTOT.

5. Modelos de Circulación General

Estos modelos fueron desarrollados partiendo de las ambiciones investigativas acerca del entendimiento de la circulación global, los procesos físicos involucrados y su variabilidad a largo plazo, en el presente, pasado y futuro bajo forzadores de diferente naturaleza. Con esta motivación fueron concebidos los modelos de circulación general atmosférica (AGCMs) como algoritmos matemáticos acoplados a escala sinóptica que resuelven las ecuaciones gobernantes de los procesos físicos que a nivel atmosférico y oceánico obedecen a la física de los mismos y reconociéndolos como la representación más compleja actualmente disponible [Cadavid Valencia et al.,].

A mediados de la década de 1990 el comité World Climate Research Programme (WCRP) organizó el primer ejercicio de intercomparación de modelos globales acoplados con recolección y almacenamiento de datos por parte del Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI), y puesto a disposición [Meehl et al., 2007]. Estos programas han tenido varias fases, con mejoras e implementación de estrategias para hacer una mejor representación de la física de circulación global con respecto a fases previas. Los resultados recopilados por la PCMDI durante el 2005 y 2006 se consideran como la fase 3 del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3) y fue insumo del Fourth Assessment Report (AR4) de la IPCC [Gregory et al., 2007]. Análogamente para el 2014 se publicó el Fifth Assessment Report (AR5) de la IPCC como producto de la quinta fase del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) [Stocker et al., 2013]. [Cadavid Valencia et al.,]. Actualmente se está realizando el sixth assessment Report (AR6) con el cual se presentan los resultados de la quinta fase del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) [Eyring et al., 2016].

En el presente trabajo además de evaluar los modelos del CMIP5 y del CMIP6 se evalúan los modelos del pro-

yecto Cordex (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), este proyecto tiene como objetivo desarrollar y proporcionar información climática regional detallada necesaria para estudios de vulnerabilidad, impacto y adaptación a nivel local y regional, es importante evaluar su capacidad para describir la variabilidad de las variables climáticas en la zona de estudio. La evaluación de los modelos se hace a partir de datos de estaciones en tierra de precipitación y la temperatura, las métricas evaluadas fueron el coeficiente de correlación de pearsons, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), y el sesgo (BIAS). estas métricas han sido utilizadas para evaluar modelos con éxito en diversos estudios [Sreelatha and Anand Raj, 2019], [Bonilla-Ovallos and Sánchez, 2017].

la descarga de los modelos climaticos se realizo de la pagina del ESGF, los criterio de búsqueda tanto de los modelos del CMIP5, Cordex, como del CMIP6 fueron:

- **Tipo y temporalidad de la variable: Amon**, Campos atmosféricos medios mensuales y algunos campos de superficie
- **Escenario: historical**, Campos atmosféricos medios mensuales y algunos campos de superficie
- **Ensamble y parametrización utilizada en la simulación: r1i1p1**, en donde **r** representa las condiciones iniciales, **i** periodo de inicialización y estabilización, **p** esquemas de parametrización

Con el fin de cuantificar la capacidad de los modelos climáticos de representar el clima presente utilizamos diagramas de Taylor [Taylor, 2001]. Estos diagramas se basan en diferentes métricas estadísticas como el error cuadrático medio, el coeficiente de correlación espacial y la relación de la varianza espacial entre modelos y observaciones. Los diagramas de Taylor son ampliamente utilizados por resumir información acerca de diferentes aspectos de la representación de campos modelados como el patrón espacial, la magnitud del campo y su variabilidad [Sierra et al., 2016].

La evaluación muestra una pobre capacidad de los modelos para representar la precipitación en la zona de estudio y aún más debilidad para representar la temperatura. Lo modelos del CMIP5 que mejor correlacionan con la precipitación de la zona son el CMCC-CMS, MIROC5 y MPI-ESM-P con una correlación de 0,51, y el modelo con el menor RMSE es el MIROC-ESM-CHEM, el diagrama Taylor muestra que de los mejores modelos para representar la precipitación se encuentra el CMCC-CMS, resaltando que su capacidad de representar la precipitación la zona de estudio no es muy superior a la de los demás modelos. En general lo modelos del CMIP5 tienen un pobre capacidad para representar la temperatura de la zona, siendo el modelo CMCC-CMS el que mejor la representar, aclarando que su representación sigue siendo muy limitada.

Lo modelos del Cordex tienen la característica que en general presentan una menor desviación estándar que la de los datos observado, siendo muy evidente en los diagramas Taylor, para este conjunto de modelos el MIROC5 y CMCC-CMS son los que mejor representan la precipitación, el MIROC5 es el que mejor correlaciona la temperatura, resaltando que el valor de correlación sigue siendo bajo. El MIRC6 es el modelos del CMIP6 que mejor correlaciona con la precipitación y en general todos los modelos de este conjunto se ajustan mal a la temperatura.

Modelo	correlacion	BIAS	RMSE	Modelo	correlacion	BIAS	RMSE
ACCESS1-3	0,50	134,92	236,39	HadCM3	0,49	-4,69	167,02
CMCC-CESM	0,40	-26,96	157,55	HadGEM2-AO	0,48	77,42	198,96
CMCC-CM	0,46	16,14	150,42	IPSL-CM5A-LR	0,46	-63,19	184,88
CMCC-CMS	0,51	-24,47	148,37	IPSL-CM5B-LR	0,37	-83,93	221,87
CNRM-CM5	0,48	54,66	170,67	MIROC-ESM	0,46	-35,33	129,62
CNRM-CM5-2	0,45	41,26	160,58	MIROC-ESM-CHEM	0,48	-40,13	127,24
CSIRO-Mk3-6-0	0,48	90,19	264,74	MIROC4h	0,45	27,03	178,68
CanCM4	0,44	22,31	214,21	MIROC5	0,51	65,46	181,45
FGOALS-s2	0,37	-149,49	201,06	MPI-ESM-LR	0,50	67,74	191,10
GFDL-CM2-1	0,36	-61,98	179,60	MPI-ESM-MR	0,45	29,36	178,95
GFDL-CM3	0,48	-50,14	151,83	MPI-ESM-P	0,51	64,70	191,40
GFDL-ESM2G	0,39	-44,95	187,59	MRI-CGCM3	0,44	-48,85	183,68
GFDL-ESM2M	0,40	-41,18	189,04	MRI-ESM1	0,41	-50,76	191,86
GISS-E2-H	0,41	14,64	169,74	NorESM1-ME	0,48	-79,07	179,99
GISS-E2-H-CC	0,42	39,19	180,45	inmcm4	0,49	-20,02	146,27

Tabla 8: Métricas para la evaluación de precipitación los modelos del CMIP5

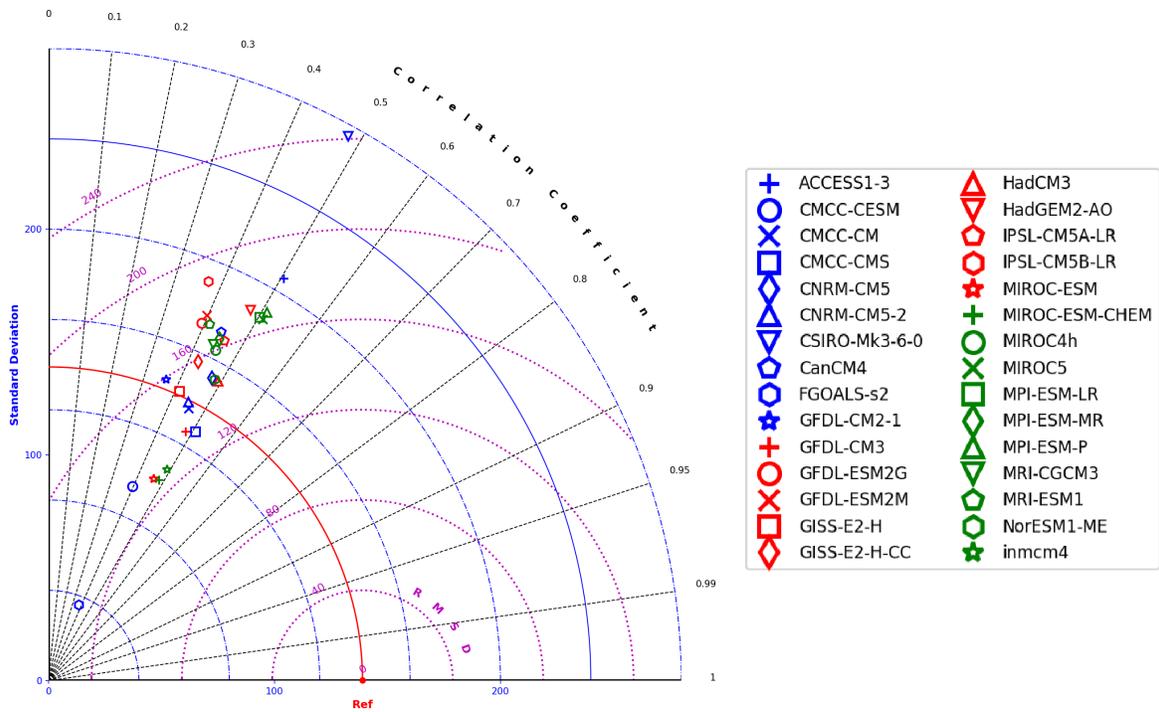


Figura 17: Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP5.

Modelo	correlacion	BIAS	RMSE
CNRM-CM5	0,48	-110,68	190,58
CSIRO-Mk3-6-0	0,40	-137,72	197,72
CanESM2	0,37	-166,16	212,78
GFDL-ESM2M	0,40	-113,01	191,90
HadGEM2-ES	0,44	-64,97	188,83
IPSL-CM5A-MR	0,41	-139,82	199,59
MIROC5	0,49	-113,12	182,93
MPI-ESM-LR	0,40	-85,14	183,50
NorESM1-M	0,37	-163,85	211,09

Tabla 9: Métricas para la evaluación de precipitación los modelos de Cordex

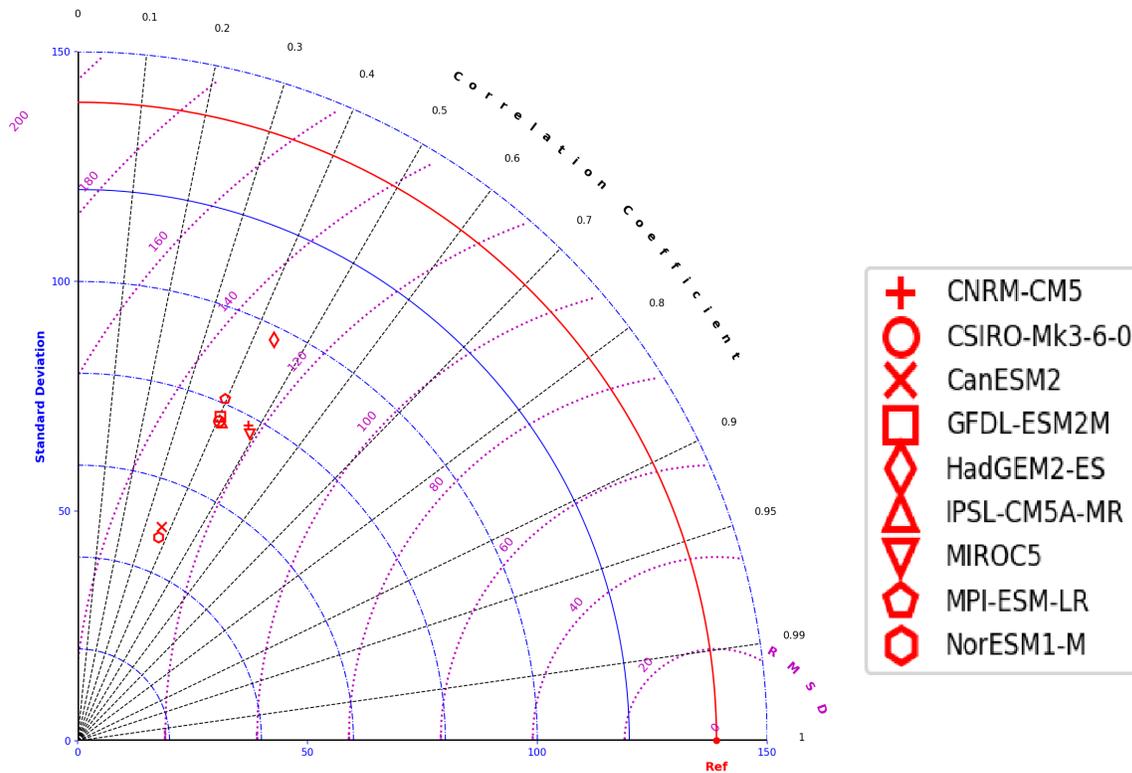


Figura 18: Diagramas Taylor de precipitación para los modelos Cordex.

Modelo	correlacion	BIAS	RMSE
BCC-CSM2-MR	0,37	86,11	292,26
BCC-ESM1	0,44	95,74	246,80
CESM2	0,45	136,05	290,75
CESM2-WACCM	0,49	160,68	307,11
CanESM5	0,40	134,19	316,79
E3SM-1-0	0,43	43,32	213,77
FGOALS-g3	0,41	44,88	239,93
GFDL-ESM4	0,46	-23,31	169,35
IPSL-CM6A-LR	0,42	-53,11	157,15
MIROC6	0,51	75,46	191,22
MRI-ESM2-0	0,50	64,40	230,45
NESM3	0,40	-123,68	186,09
NorCPM1	0,47	-121,25	196,28
NorESM2-LM	0,51	33,23	230,18

Tabla 10: Métricas para la evaluación de precipitación de los modelos CMIP6

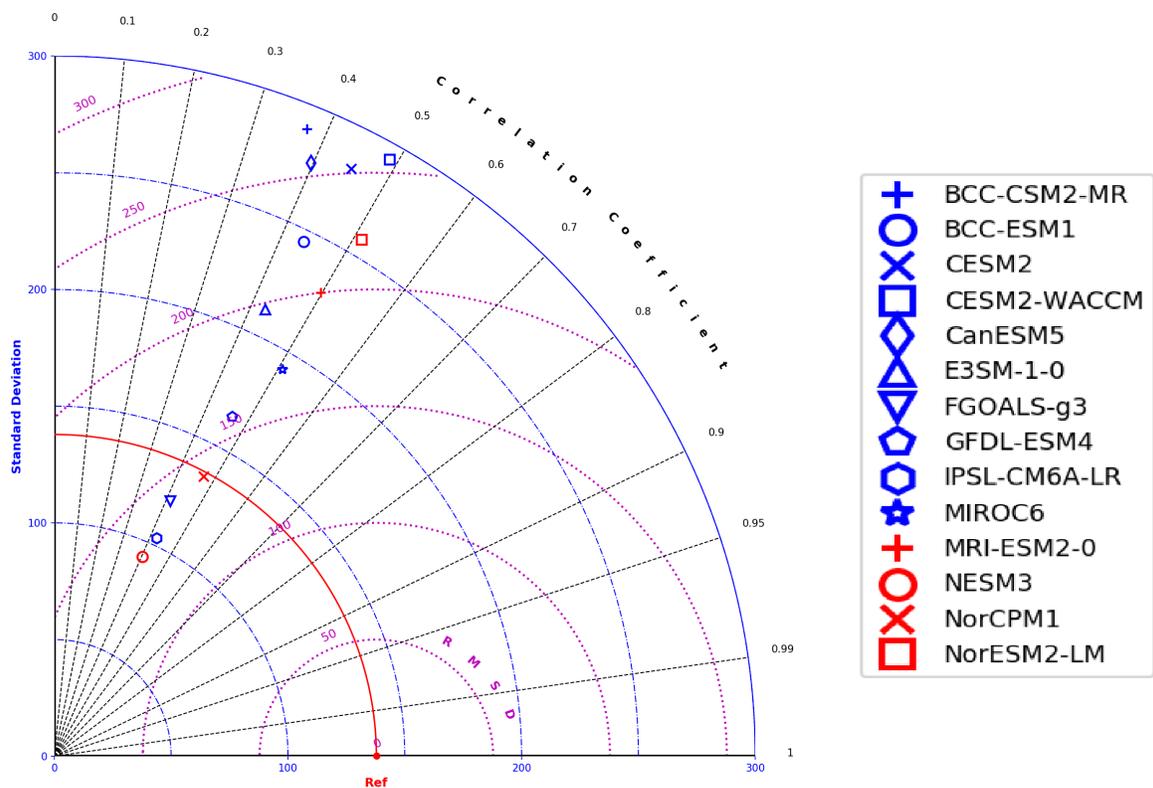


Figura 19: Diagramas Taylor de precipitación para los modelos CMIP6.

Modelo	correlacion	BIAS	RMSE	Modelo	correlacion	BIAS	RMSE
ACCESS1-0	0,24	-2,51	2,58	HadCM3	0,05	-3,09	3,33
ACCESS1-3	0,11	-1,66	1,77	HadGEM2-AO	0,38	-2,05	2,11
CMCC-CESM	0,04	1,24	1,7	inmcm4	0,1	-4,05	4,14
CMCC-CM	0,12	-1,59	1,85	IPSL-CM5A-LR	0,23	-0,64	1,26
CMCC-CMS	0,19	0,14	1,03	IPSL-CM5A-MR	0,15	-0,8	1,04
CNRM-CM5	0,34	-2,29	2,42	IPSL-CM5B-LR	0,2	-0,89	1,33
CNRM-CM5-2	0,28	-2,45	2,61	MIROC-ESM	0,01	-2,52	2,73
CSIRO-Mk3-6-0	-0,03	-0,22	1	MIROC-ESM-CHEM	0,08	-3,19	3,31
CanCM4	0,07	-5,14	5,22	MIROC4h	0,2	-4,11	4,18
FGOALS-s2	-0,12	-1,08	1,58	MIROC5	0,36	-2,34	2,43
GFDL-CM2-1	0,06	-1,37	2,63	MPI-ESM-LR	0,21	-0,49	0,88
GFDL-CM3	0,1	-3,73	3,88	MPI-ESM-MR	0,04	-0,66	1,24
GFDL-ESM2G	0	-1,65	2,66	MPI-ESM-P	0,25	-0,54	0,85
GFDL-ESM2M	0,05	-1,24	2,53	MRI-CGCM3	-0,12	-3,57	3,77
GISS-E2-H-CC	0,07	-4,53	4,67	MRI-ESM1	-0,03	-3,19	3,42

Tabla 11: Métricas para la evaluación de temperatura de los modelos CMIP5

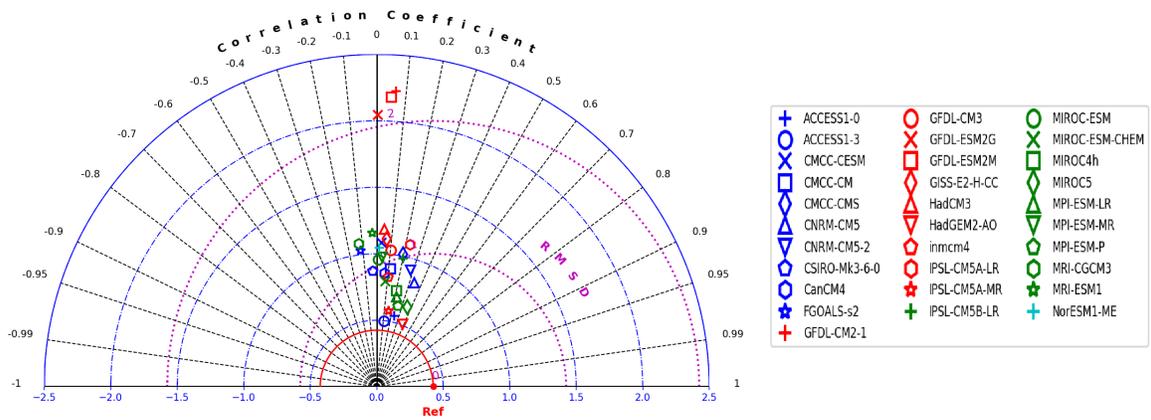


Figura 20: Diagramas Taylor de temperatura para los modelos CMIP5.

Modelo	correlacion	BIAS	RMSE
CanESM2	0,17	-0,38	1,10
CNRM-CM5	0,24	-1,29	1,74
CSIRO-Mk3-6-0	0,04	-0,74	1,22
GFDL-ESM2M	0,10	-1,24	1,86
HadGEM2-ES	0,16	-1,59	2,01
IPSL-CM5A-MR	0,27	0,15	0,98
MIROC5	0,34	-1,33	1,82
MPI-ESM-LR	0,26	-2,04	2,40
NorESM1-M	0,23	-0,36	0,99
MIROC5	0,34	-1,33	1,82
MPI-ESM-LR	0,26	-2,04	2,40
NorESM1-M	0,23	-0,36	0,99

Tabla 12: Métricas para la evaluación de temperatura de los modelos Cordex

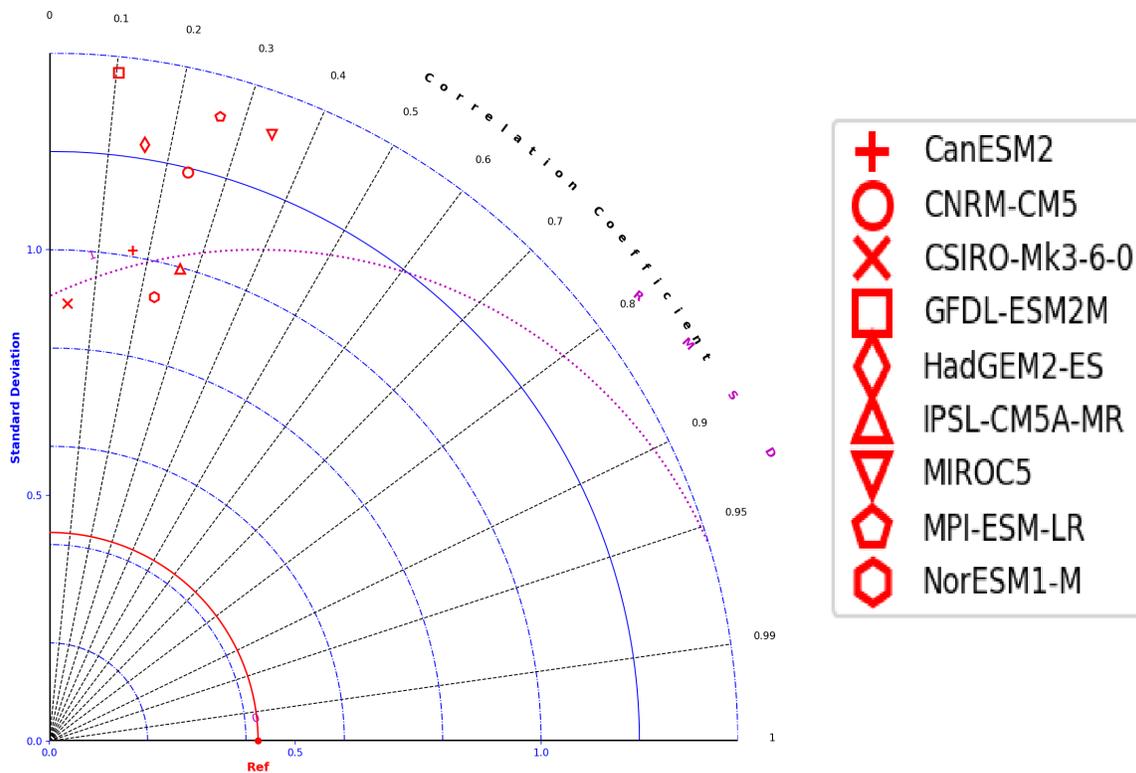


Figura 21: Diagramas Taylor de temperatura para los modelos Cordex.

Modelo	correlacion	BIAS	RMSE
BCC-CSM2-MR	0,22	-2,69	2,79
BCC-ESM1	0,13	-3,16	3,24
CanESM5	-0,02	-4,76	4,90
CESM2	0,10	-1,06	1,61
CESM2-WACCM	-0,12	-1,40	1,93
E3SM-1-0	0,04	-2,89	3,07
FGOALS-g3	0,00	-5,38	5,47
GFDL-ESM4	0,08	-2,73	2,99
IPSL-CM6A-LR	0,04	-1,20	1,45
MCM-UA-1-0	-0,13	-0,23	1,66
MIROC6	0,00	-2,48	2,65
MRI-ESM2-0	0,03	-3,13	3,27
NESM3	0,26	-1,21	1,42

Tabla 13: Métricas para la evaluación de temperatura de los modelos del CMIP6

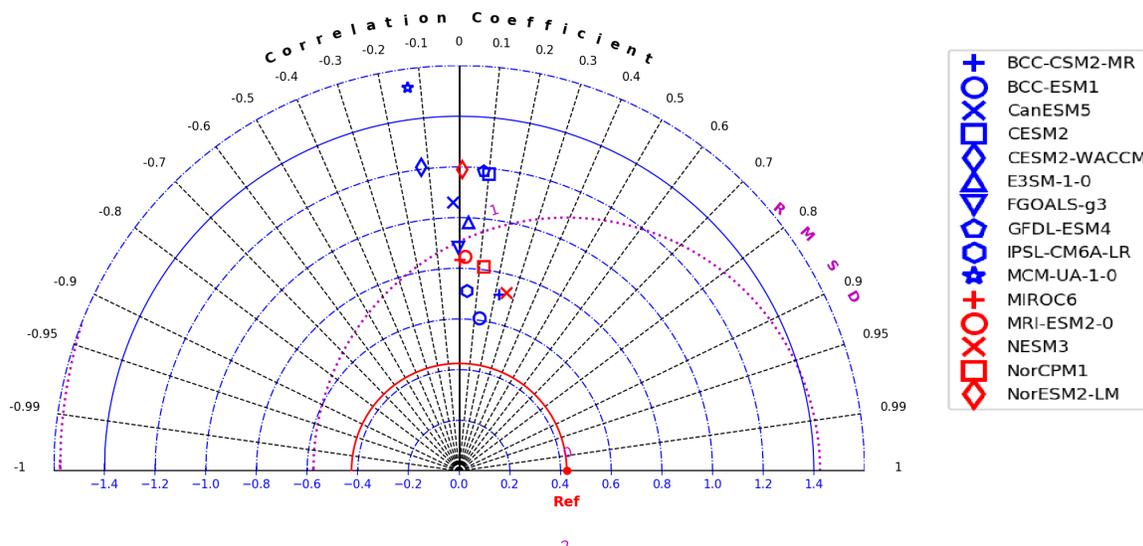


Figura 22: Diagramas Taylor de temperatura para los modelos del CMIP6.

6. Downscaling

Las estimaciones regionales y locales de cambio climático se realizan mediante un procedimiento denominado DOWNSCALING, el cual consiste en pasar modelos globales (de grande escala) a modelos regionales (de pequeña escala) [JAIMES BORDA, 2016]. Las técnicas de reducción de escala se agrupan en dos tipos principales: (1) modelado dinámico del clima y (2) reducción estadística empírica. La generación de escenarios, regionales y locales, se puede hacer utilizando modelos dinámicos que simulen el comportamiento de la atmósfera a través de las ecuaciones de la física o modelos estadísticos que se basan en registros reales de las variables meteorológicas expresando en funciones de distribución de probabilidad del comportamiento histórico de las variables [JAIMES BORDA, 2016].

6.1. Modelos Dinámicos:

Consisten en la aplicación de modelos numéricos en una malla más densa, este método se utiliza para obtener información de alta resolución. Los modelos dinámicos más utilizados para mejorar la resolución espacial de los resultados de los modelos globales del clima son: Weather Research and Forecasting model – WRF- y Providing Regional Climates for Impacts Studies- PRECIS-, [IDEAM, 2010] [JAIMES BORDA, 2016].

6.2. Modelos Estadísticos

consisten en establecer relaciones entre las variables climáticas generales y climas específicos [Maraun et al., 2010]. Esta técnica es muy útil cuando se requiere una evaluación rápida y de bajo costo de escenarios climáticos locales, los modelos estadísticos requieren series completas de variables climatológicas que pueden ser tomadas de observaciones reales o de bases de datos interpoladas a partir de observaciones reales como lo son: E-OBS (EUFP6 project ENSEMBLES), NCEP/NCAR reanalysis (National Oceanic and Atmospheric Administration), ERA40 reanalysis (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), CRU (University of East Anglia) [IDEAM, 2010].

Para el presente trabajo se decidió realizar un downscaling estadístico ya que los recursos técnicos y humanos necesarios para reducir dinámicamente el conjunto completo de CMIP5 son significativos y no son necesarios si el objetivo es desarrollar escenarios que cubran un rango representativo de condiciones climáticas futuras relevantes para una evaluación de riesgos de cambio climático [McSweeney et al., 2015]. Para realizar el downscaling estadístico se seleccionó la técnica de BCSD (*BIAS Correction and Spatial Dissagregation*) la técnica de corrección de sesgo seleccionada fue la de *nonparametric quantile mapping* [Lee and Singh, 2018], ya que puede reducir los sesgos en todo el rango de la distribución, además, tienen la ventaja de que se pueden aplicar sin

suposiciones específicas sobre la distribución de los datos y se recomiendan para la mayoría de las aplicaciones de corrección de sesgo estadístico [Gudmundsson et al., 2012].

Para la desagregación espacial se automatizó la interpolación de varios métodos mediante el uso de Arcpy, los métodos de interpolación fueron: interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (IDW), Spline de Placa Delgada (SPD) y kriging bayesiana empírica (en inglés, Empirical Bayesian Kriging-EBK). Mediante validación cruzada se pudo identificar el EBK como el método de interpolación que menor RMSE presenta, por lo que se selecciona este método para la desagregación espacial.

6.3. Corrección de sesgo:

Los resultados de los modelos climáticos globales (MCG) y los modelos climáticos regionales (MCR) muestran sesgos sistemáticos en relación con las observaciones de diferentes fuentes, como errores en la parametrización de convección y orografía a gran escala, variabilidad irreal a gran escala y variabilidad interna impredecible diferente a la de las observaciones [Cannon et al., 2015][Lee and Singh, 2018]. Para realizar una reducción de escala estadística, este sesgo debe corregirse. Se han desarrollado varios métodos de corrección de sesgo para ajustar la media, la varianza, así como todos los cuantiles. Para ajustar los momentos de los resultados del modelo a los de las observaciones, se ha aplicado el método delta, mientras que el mapeo de cuantiles (QM) se ha utilizado para todos los cuantiles [Lee and Singh, 2018]. Varios autores han tenido buenos resultados con la correcciones de sesgo mediante el mapeo de cuantiles, especialmente el no paramétrico [Bong et al., 2018] [Ngai et al., 2017] [Yang et al., 2018] [Themeßl et al., 2012][Wuthiwongyothin et al., 2019].

Es importante resaltar que antes de la aplicación de las transformaciones estadísticas y los métodos de procesamiento de correos relacionados, es importante recordar que estas técnicas están diseñadas con un alcance limitado: para ajustar la variable climática simulada de modo que su distribución (o algunos aspectos de la misma) coincida con la distribución de los valores observados. Aplicado en la evaluación del impacto climático, se supone posteriormente que la diferencia entre el resultado del modelo y las observaciones es estacionaria, es decir, que las mismas correcciones son aplicables en climas futuros. La validez de este supuesto no puede evaluarse completamente, ya que la variable de interés puede exceder el rango observado en un clima cambiante [Gudmundsson et al., 2012]. [Jakob Themeßl et al., 2011].

6.3.1. Quantile mapping

El QM permite que la distribución de probabilidad de los resultados del modelo de GCM y RCM (x) se ajuste a la distribución de probabilidad de los datos observados (y) haciendo coincidir la función de distribución de probabilidad acumulada ($CDF, F(x; \theta)$, donde θ representa el conjunto de parámetros). A través de QM, el CDF de los datos de salida RCM se transfiere a los datos observados [Lee and Singh, 2018]. El QM tradicional se puede definir por

$$\hat{y} = F_0^{-1}(F_{m,base}(x)) \quad (1)$$

Donde F_0^{-1} representa una función inversa de CDF para los datos observados y $F_{m,base}$ es la CDF de la salida del modelo de RCM o GCM ajustado a las salidas de GCM para el período base. La función de distribución empírica (ECDF por sus siglas en inglés) es estimada con la ecuación 2, donde $X_{(i)}$ es i -ésimo valor ordenado de forma creciente y N el número de datos. El mapeo no paramétrico puede ser realizado con la ecuación 2 sin ninguna suposición sobre los datos observados o modelados [Lee and Singh, 2018]. Si los nuevos valores del modelo (por ejemplo, de las proyecciones climáticas) son mayores que los valores de entrenamiento utilizados para estimar el CDF empírica se utiliza la corrección encontrada para el cuantil más alto del período de entrenamiento [Themeßl et al., 2012].

$$\hat{F}(X_{(i)}) = \frac{i}{N+1} \quad (2)$$

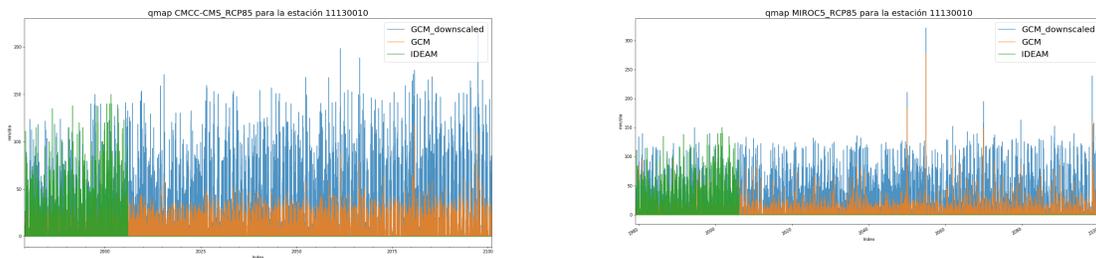
6.4. Downscaling en el área de estudio.

El downscaling se realizó para los modelos CMCC-CMS del CMIP5 y el MIROC5 del proyecto Cordex, el downscaling se realizó tanto para valores diarios como para mensuales, se realizó corrección de sesgo por Non-paramétric Quantile Mapping para la temperatura media y precipitación de ambos modelos, y para la temperatura

máxima y mínima del modelo MIROC5, la corrección de sesgo se realizó para las mismas estaciones de la evaluación. La desagregación espacial de la precipitación se realizó con el método de interpolación EBK, para la temperatura se usó la ecuación de regionalización de Cenicafé para la región atlántica que se relaciona directamente con la topografía del terreno [CHAVES and JARAMILLO, 1998].

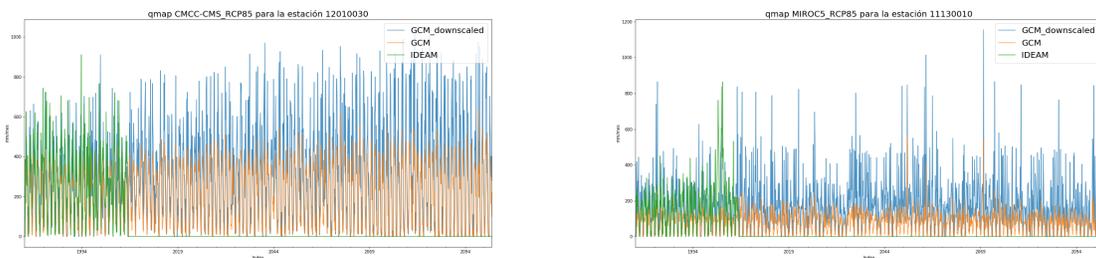
6.4.1. Corrección de sesgo estaciones de precipitación.

En la figura 23 se presentan las series diarias para la estación 11130010 con la corrección de sesgo, la serie de datos observados del IDEAM y los datos modelados del CMCC-CMS y MIROC5, de igual forma en la figura 24 se presentan las series mensuales para la misma estación. Las funciones de distribución empíricas para las series diarias para la estación 1130010 con la corrección de sesgo, la serie de datos observados del IDEAM y los datos modelados del CMCC-CMS y MIROC5, en esta se observa que aproximadamente el 60% de los días no presentan lluvia, el modelo de quantile mapping permite realizar una corrección por días húmedos y en la figura 25 se puede observar la correlación, la figura 26 muestra las funciones de distribución empíricas para los datos mensuales, mostrando un buen ajuste entre la serie corregida y la observada.



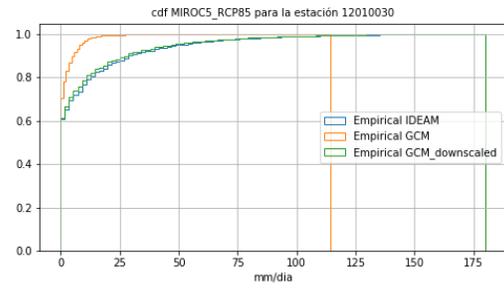
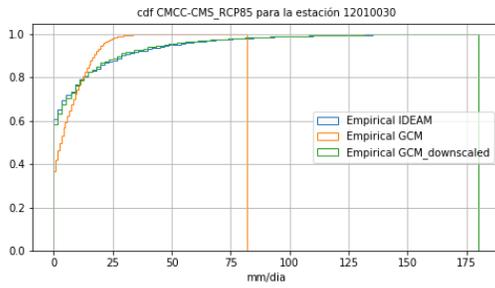
(a) QM serie diaria de precipitación modelo CMCC-CMS (b) QM serie diaria de precipitación modelo MIROC5

Figura 23: Quantile mapping para la serie diaria de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5



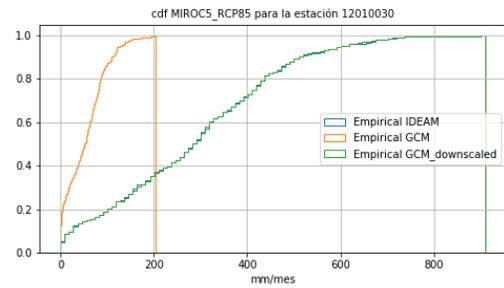
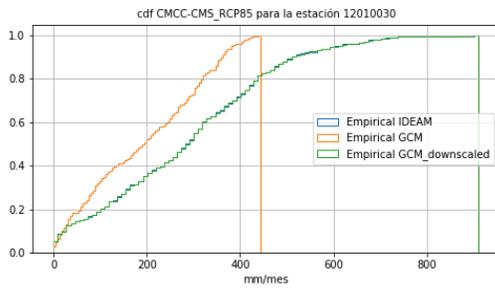
(a) QM serie diaria de precipitación modelo CMCC-CMS (b) QM serie diaria de precipitación modelo MIROC5

Figura 24: Quantile mapping para la serie mensual de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5



(a) Función de distribución empírica para el modelo CMCC- (b) Función de distribución empírica para el modelo MIROC5 CMS

Figura 25: Función de distribución empírica para las series diarias de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5, de los modelos GCM antes y después del Downscaling



(a) Función de distribución empírica para el modelo CMCC- (b) Función de distribución empírica para el modelo MIROC5 CMS

Figura 26: Función de distribución empírica para las series mensuales de precipitación de la estación 11130010, para el escenario RCP 8.5, de los modelos GCM antes y después del Downscaling

6.4.2. BCSD para la precipitación

Como se expuso anteriormente la desagregación espacial de los datos después de realizar la corrección de sesgo se realizó con el método de EBK, los resultados muestran en general para los dos modelos aumento de la precipitación en toda el área de estudio, teniendo coherencia con los resultados obtenidos con el análisis estadístico de las estaciones del IDEAM y los resultados obtenidos por el tercer comunicado de cambio climático del IDEAM [Armenta et al., 2014]. El modelo CMCC-CMS muestra mayores aumentos en la precipitación comparado con el MIROC5, en las tablas 14 y 15 se muestran los resúmenes de estos escenarios. Se aclara que el periodo base para precipitación es de 1979 a 2018 y los resultados se presentan para un promedio de la precipitación anual para los distintos periodos. Porcentualmente se muestra un mayor aumento de la precipitación para la zona norte del área de estudio, obteniendo disminución de la precipitación para el periodo 2070 2100 en el escenario RCP 8.5 del modelo MIROC5.

Escenarios RCP 4.5 precipitación modelo CMCC-CMS

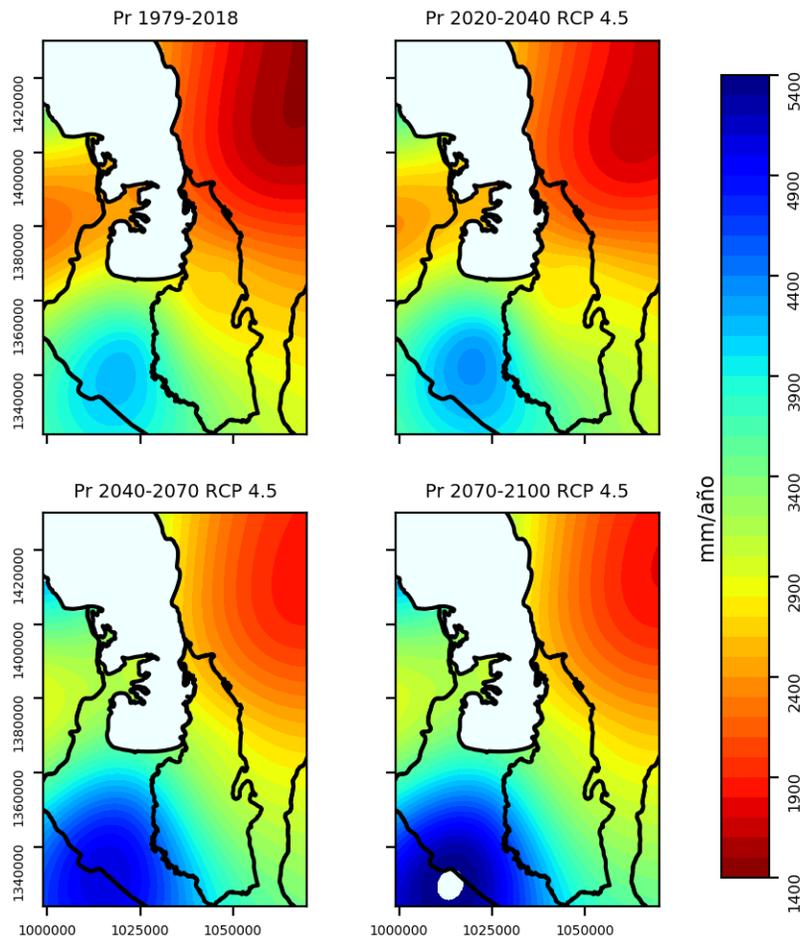


Figura 27: Escenarios RCP 4.5 para la precipitación modelo CMCC-CMS

Escenarios RCP 8.5 precipitación modelo CMCC-CMS

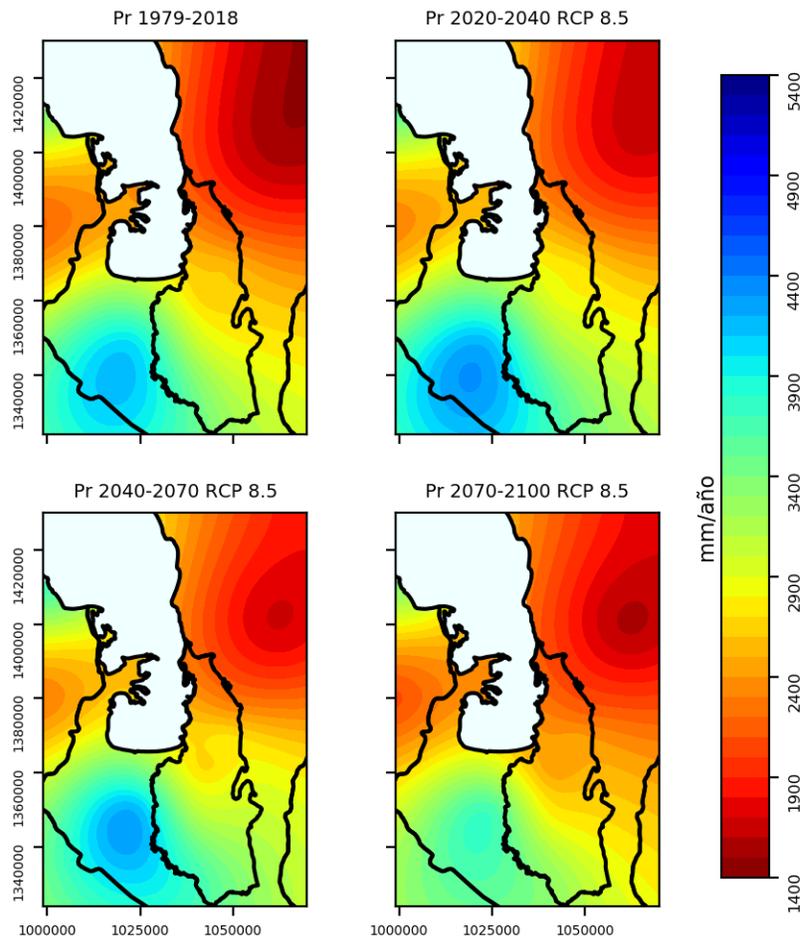


Figura 28: Escenarios RCP 8.5 para la precipitación modelo CMCC-CMS

Escenarios RCP 2.6 precipitación modelo MIROC5 proyecto Cordex

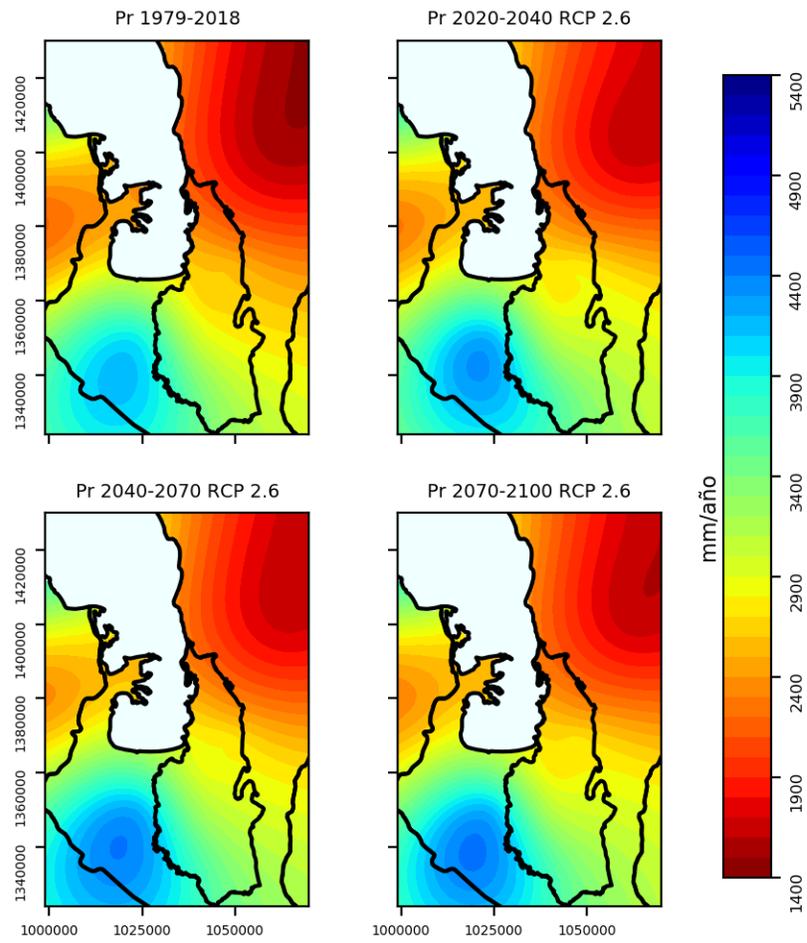


Figura 29: Escenarios RCP 2.6 para la precipitación modelo MIROC5

Escenarios RCP 8.5 precipitación modelo MIROC5 proyecto Cordex

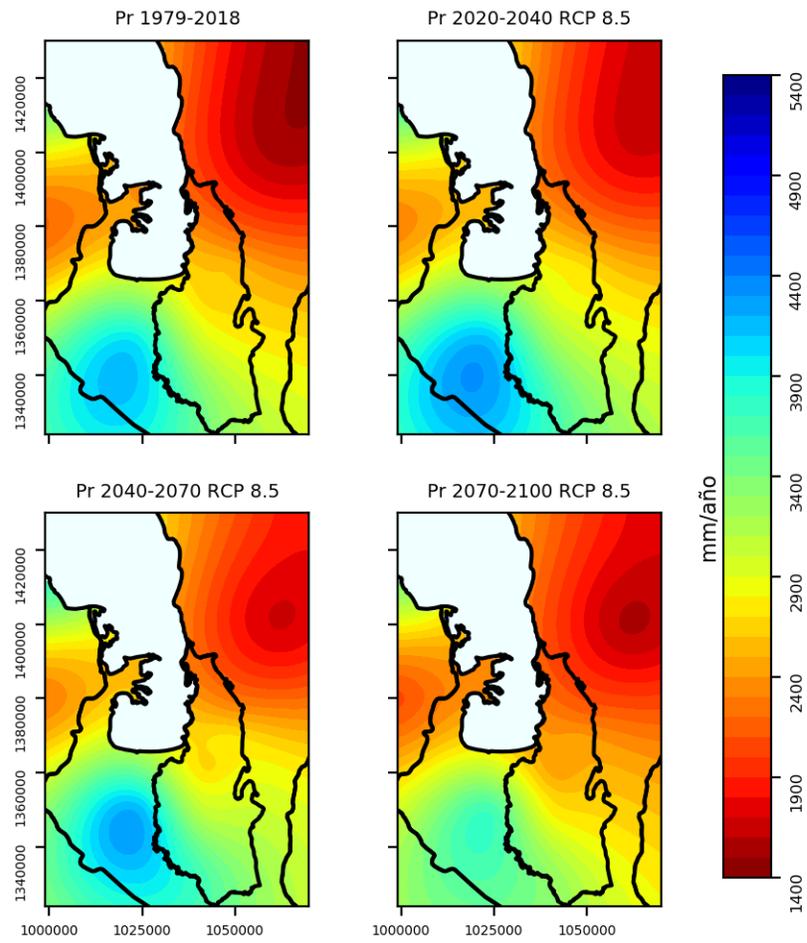


Figura 30: Escenarios RCP 8.5 para la precipitación modelo MIROC5

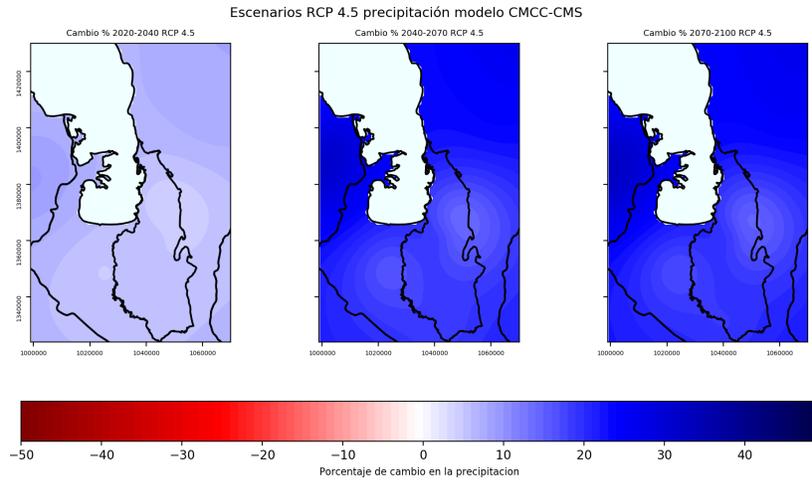


Figura 31: Escenarios RCP 4.5 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo CMCC-CMS

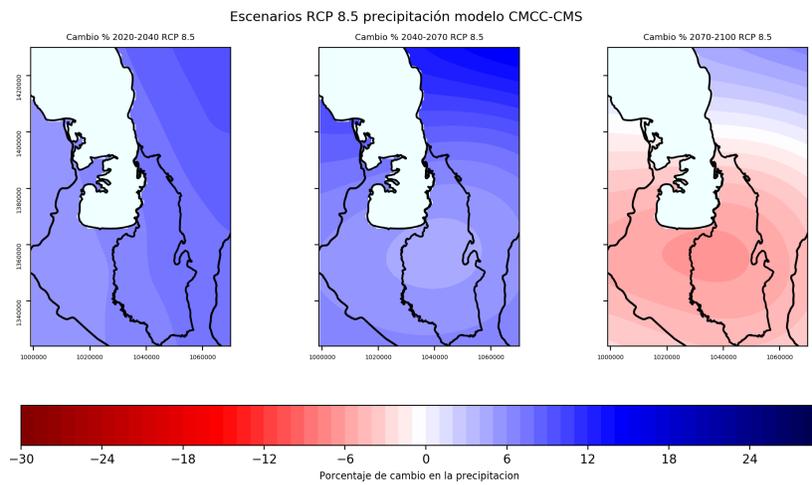


Figura 32: Escenarios RCP 8.5 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo CMCC-CMS

Modelo	Escenario	2020-2040	2040-2070	2070-2100
CMCC-CMS	RCP 4.5	156.76	528.34	550.24
	RCP 8.5	450.75	605.01	551.26
MIROC5	RCP 2.6	169.67	195.35	158.71
	RCP 8.5	178.63	175.02	-98.60

Tabla 14: Resumen de los cambios en la precipitación en mm/año con respecto al periodo base.

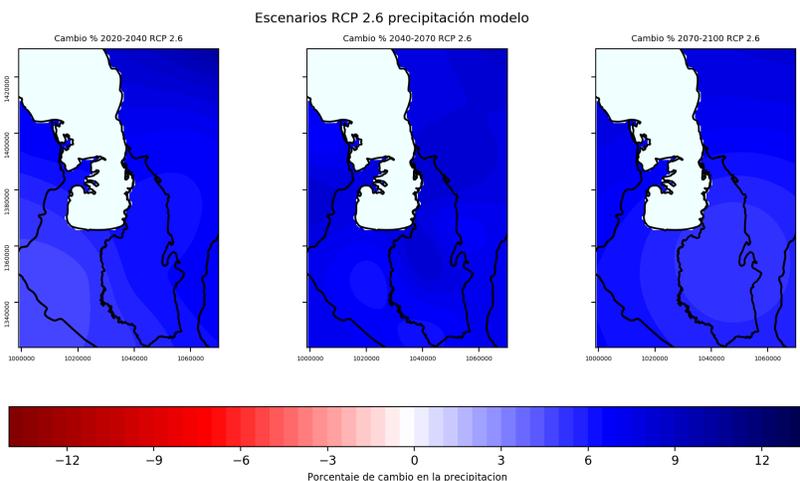


Figura 33: Escenarios RCP 2.6 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo MIROC5

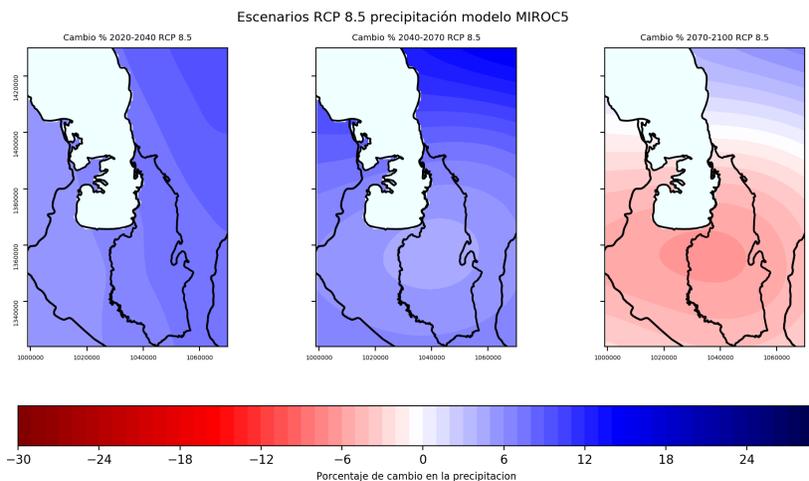


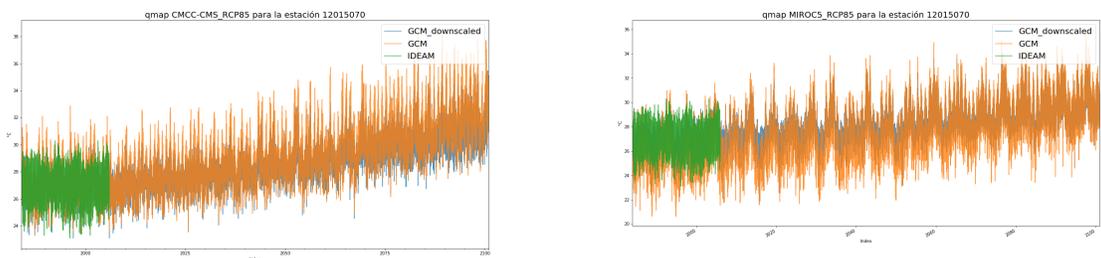
Figura 34: Escenarios RCP 8.5 cambio porcentual de la precipitación respecto al periodo base para la precipitación modelo MIROC5

Modelo	Escenario	2020-2040	2040-2070	2070-2100
CMCC-CMS	RCP 4.5	6.23 %	21.02 %	21.83 %
	RCP 8.5	17.78 %	24.04 %	22.24 %
MIROC5	RCP 2.6	6.72 %	7.62 %	6.13 %
	RCP 8.5	7.06 %	7.14 %	-3.20 %

Tabla 15: Resumen de los cambios porcentuales en la precipitación anual con respecto al periodo base.

6.4.3. BCSD para la Temperatura

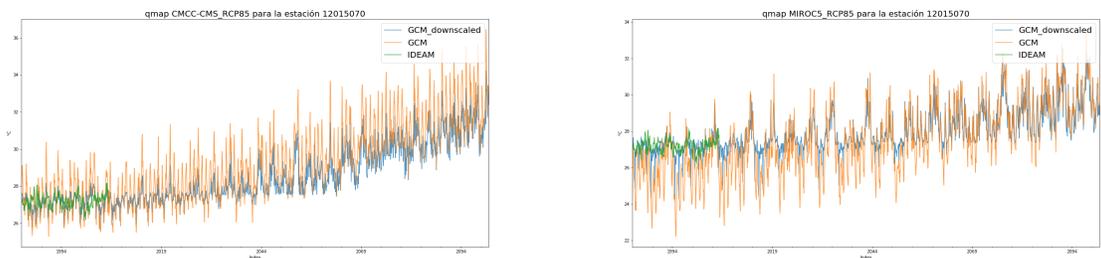
La corrección de sesgo para la temperatura se realizó para la estación 12015070 ya que es la única que tiene menos de 10% de datos faltantes, para la desagregación espacial se utilizó la ecuación de Genicafe como se mencionó anteriormente, los resultados muestran aumentos de temperatura media máxima y mínima para todos los escenarios, el modelo CMCC-CMS muestra un aumento de temperatura de 8.23% para el periodo 2070-2100 en el escenario RCP 8.5, por su parte el modelo MIROC5 muestra un aumento de 4.55% para el mismo escenario y el mismo RCP.



(a) QM serie diaria de temperatura modelo CMCC-CMS

(b) QM serie diaria de temperatura modelo MIROC5

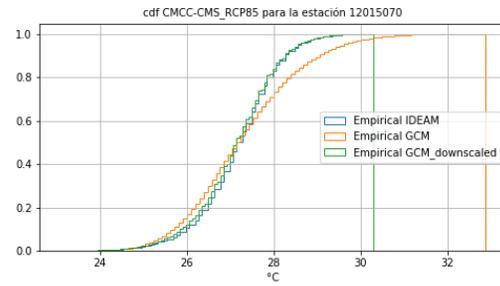
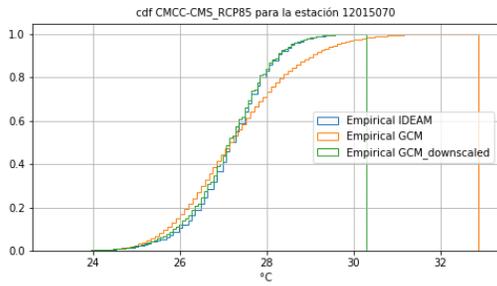
Figura 35: Quantile mapping para la serie diaria de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5



(a) QM serie mensual de temperatura modelo CMCC-CMS

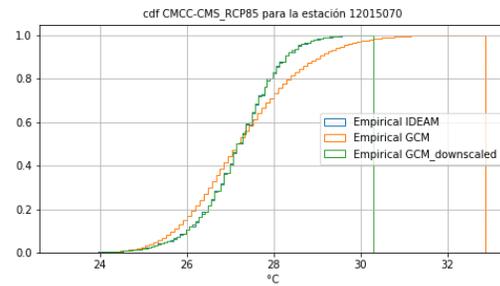
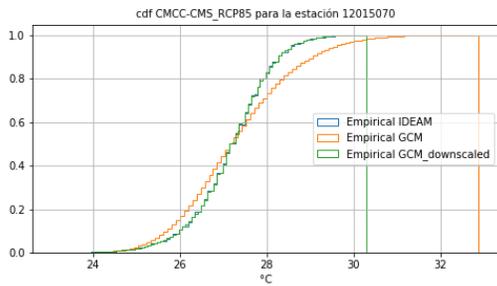
(b) QM serie diaria de temperatura modelo MIROC5

Figura 36: Quantile mapping para la serie mensual de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5



(a) Función de distribución empírica para el modelo CMCC- (b) Función de distribución empírica para el modelo MIROC5 CMS

Figura 37: Función de distribución empírica para las series diarias de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5, de los modelos GCM antes y después del Downscaling



(a) Función de distribución empírica para el modelo CMCC- (b) Función de distribución empírica para el modelo MIROC5 CMS

Figura 38: Función de distribución empírica para las series mensuales de temperatura de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5, de los modelos GCM antes y después del Downscaling

Escenarios RCP 4.5 temperatura modelo CMCC-CMS proyecto CMIP5

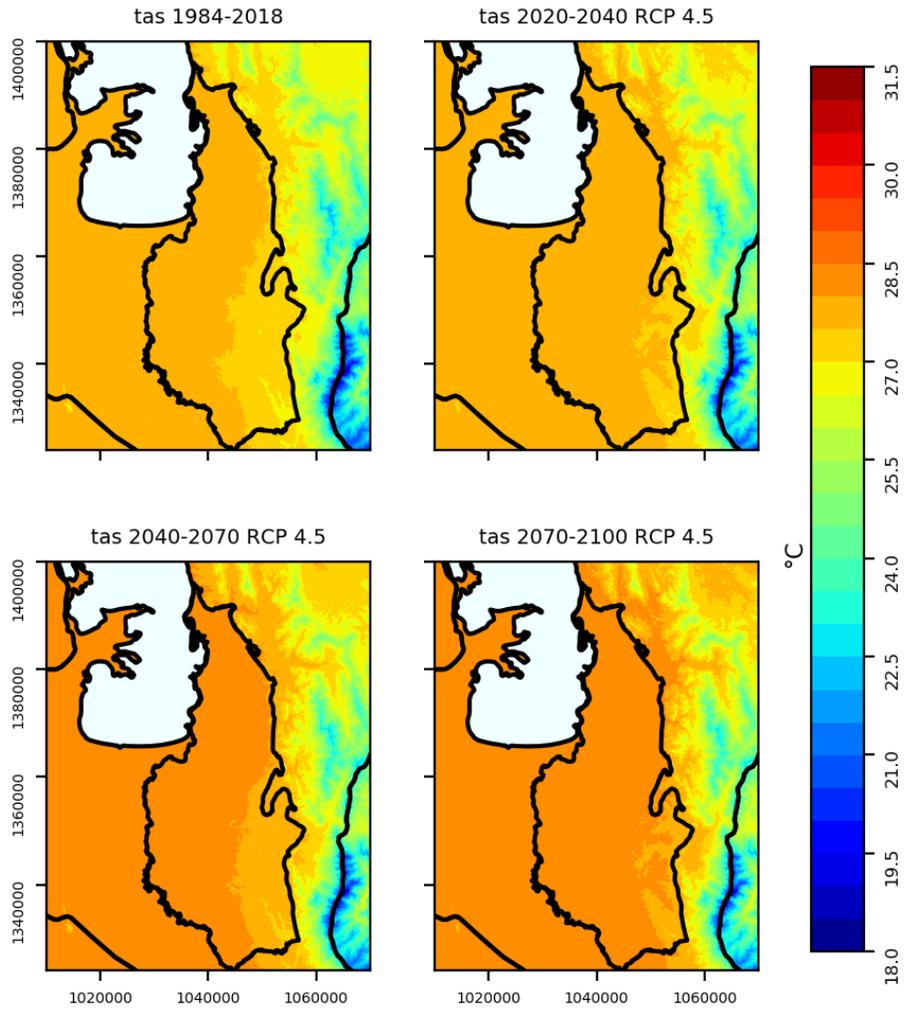


Figura 39: Escenarios RCP 4.5 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo CMCC-CMS

Escenarios RCP 8.5 temperatura modelo CMCC-CMS proyecto CMIP5

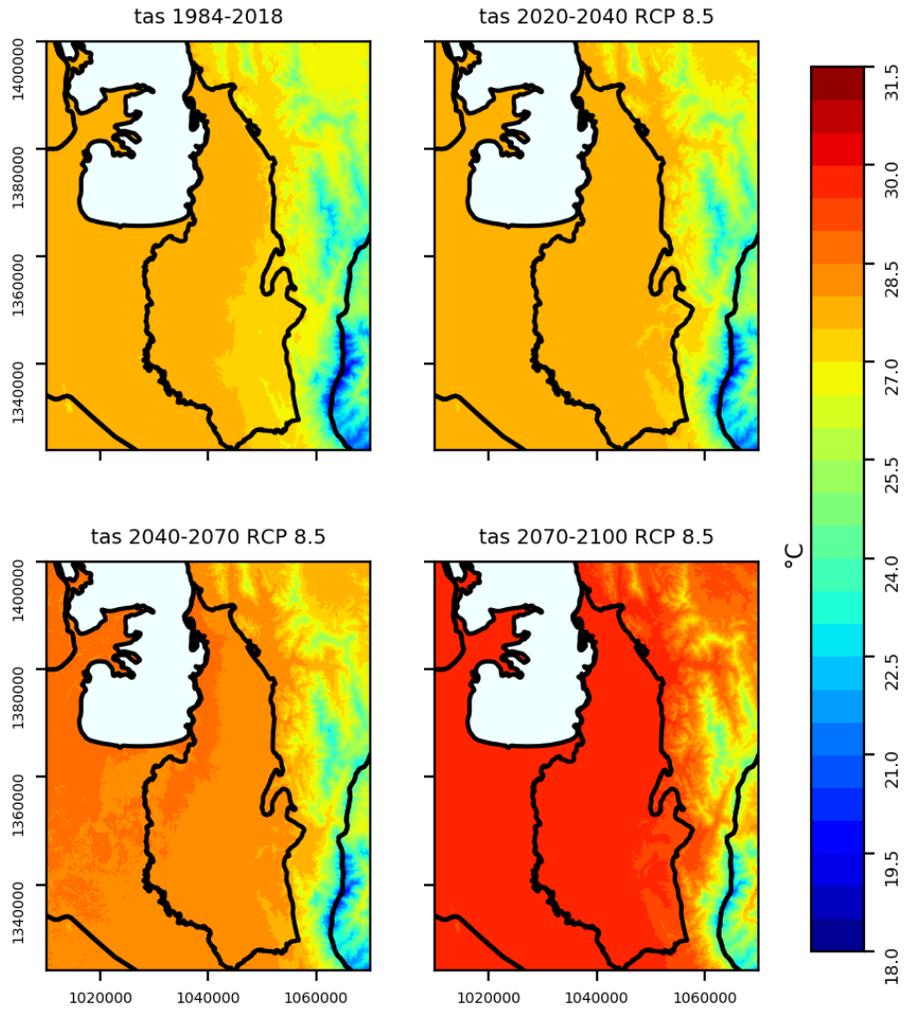


Figura 40: Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo CMCC-CMS

Escenarios RCP 2.6 temperatura modelo MIROC5 proyecto Cordex

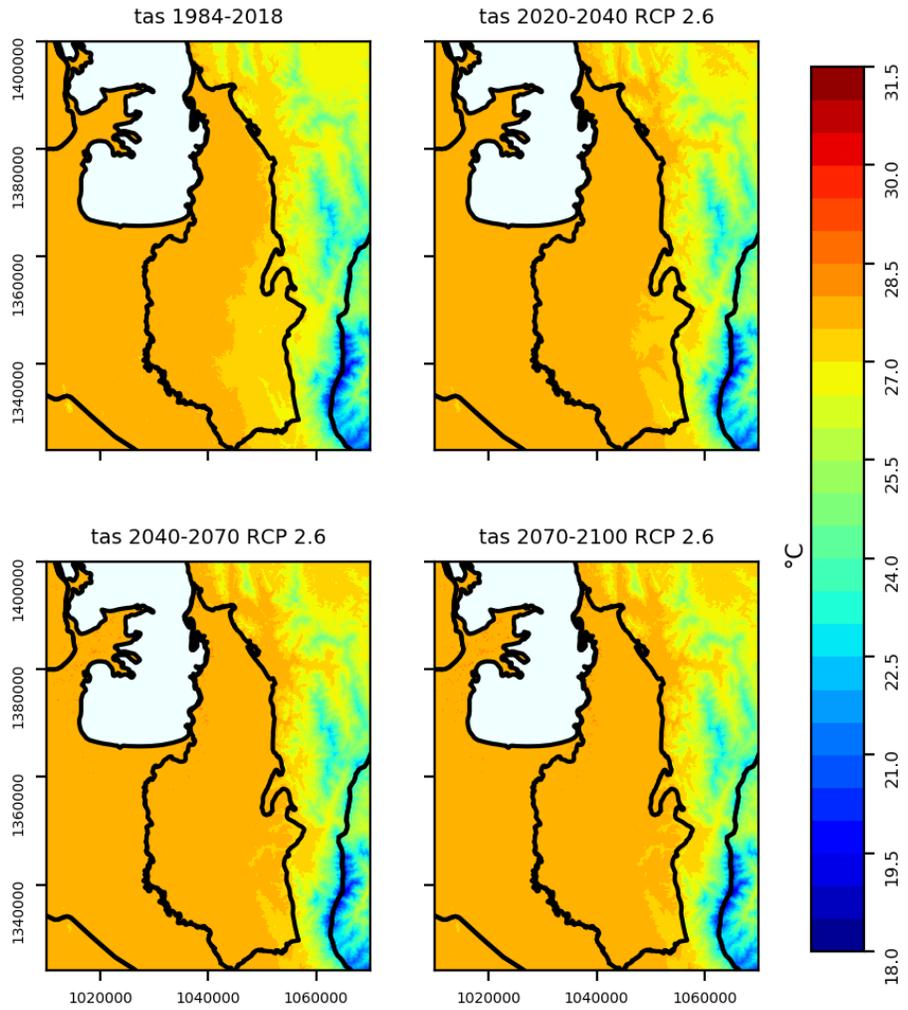


Figura 41: Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo MIROC5

Escenarios RCP 8.5 temperatura modelo MIROC5 proyecto Cordex

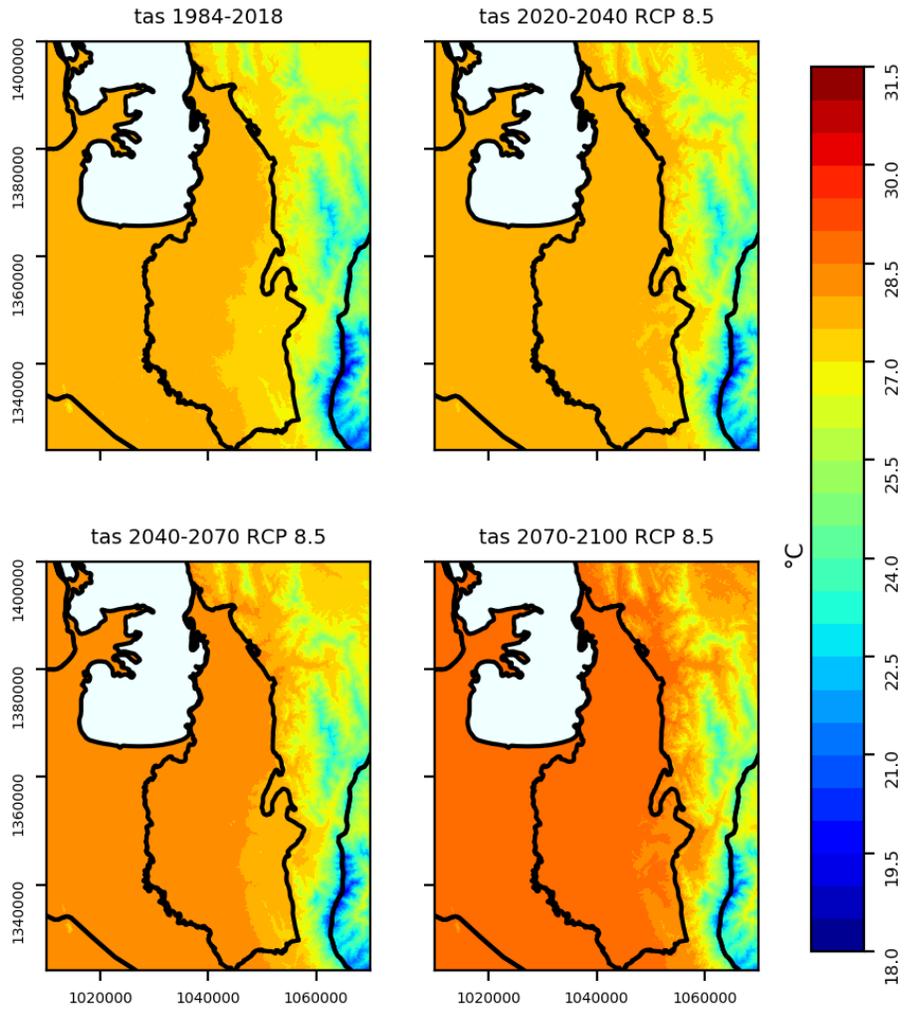


Figura 42: Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura respecto al periodo base para la temperatura modelo MIROC5

Modelo	Escenario	2020-2040	2040-2070	2070-2100
CMCC-CMS	RCP 4,5	0.25	0.53	0.76
	RCP 8,5	0.32	0.88	2.24
MIROC5	RCP 2,6	0.19	0.33	0.33
	RCP 8,5	0.26	0.57	1.24

Tabla 16: Resumen de los cambios en °C de la temperatura con respecto al periodo base.

Modelo	Escenario	2020-2040	2040-2070	2070-2100
CMCC-CMS	RCP 4,5	0.92 %	1.95 %	2.78 %
	RCP 8,5	1.18 %	3.22 %	8.23 %
MIROC5	RCP 2,6	0.69 %	1.22 %	1,23 %
	RCP 8,5	1.08 %	2.11 %	4.55 %

Tabla 17: Resumen de los cambios porcentuales en la temperatura con respecto al periodo base.

6.4.4. BCSD para la Temperatura máxima

Los escenarios de temperatura máxima se realizaron de la misma forma que los de temperatura media, para esta variable se espera un aumento de 1.25 % para el periodo 2070-2100 en un escenario RCP2.6, esto corresponde a un aumento de 0.39°C, para el escenario RCP 8.5 se espera un aumento de 3.98 % correspondiente a 1.24°C para el mismo periodo, tabla 18.

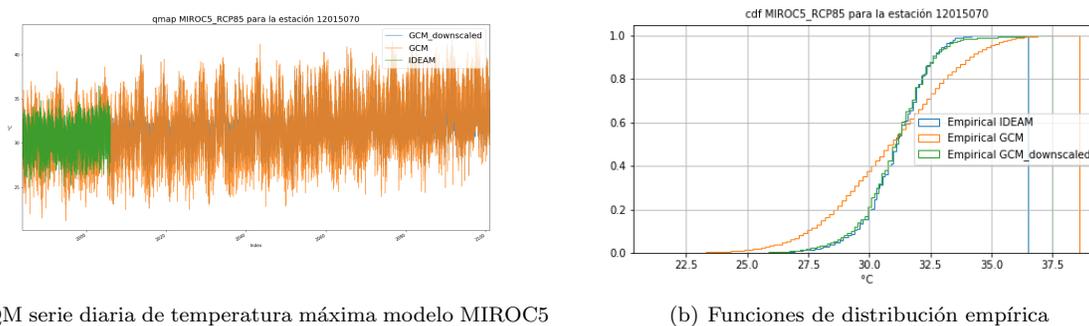


Figura 43: Quantile mapping para la serie diaria de temperatura máxima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5

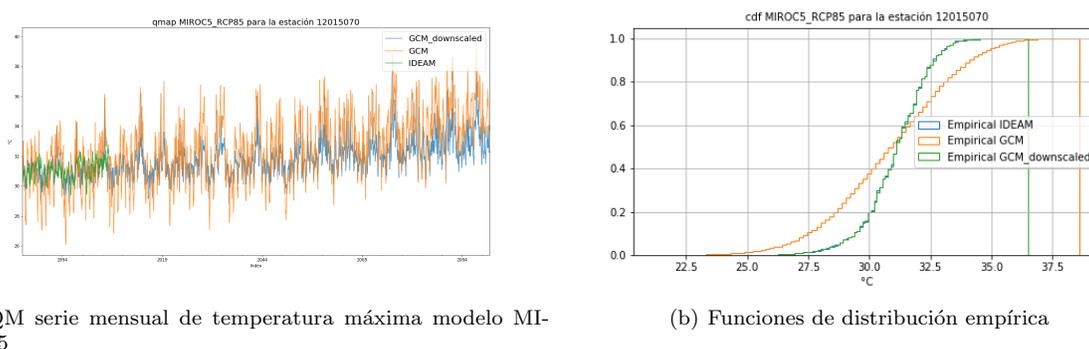


Figura 44: Quantile mapping para la serie mensual de temperatura máxima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5

Escenarios RCP 2.6 temperatura máxima modelo MIROC5 proyecto CMIP5

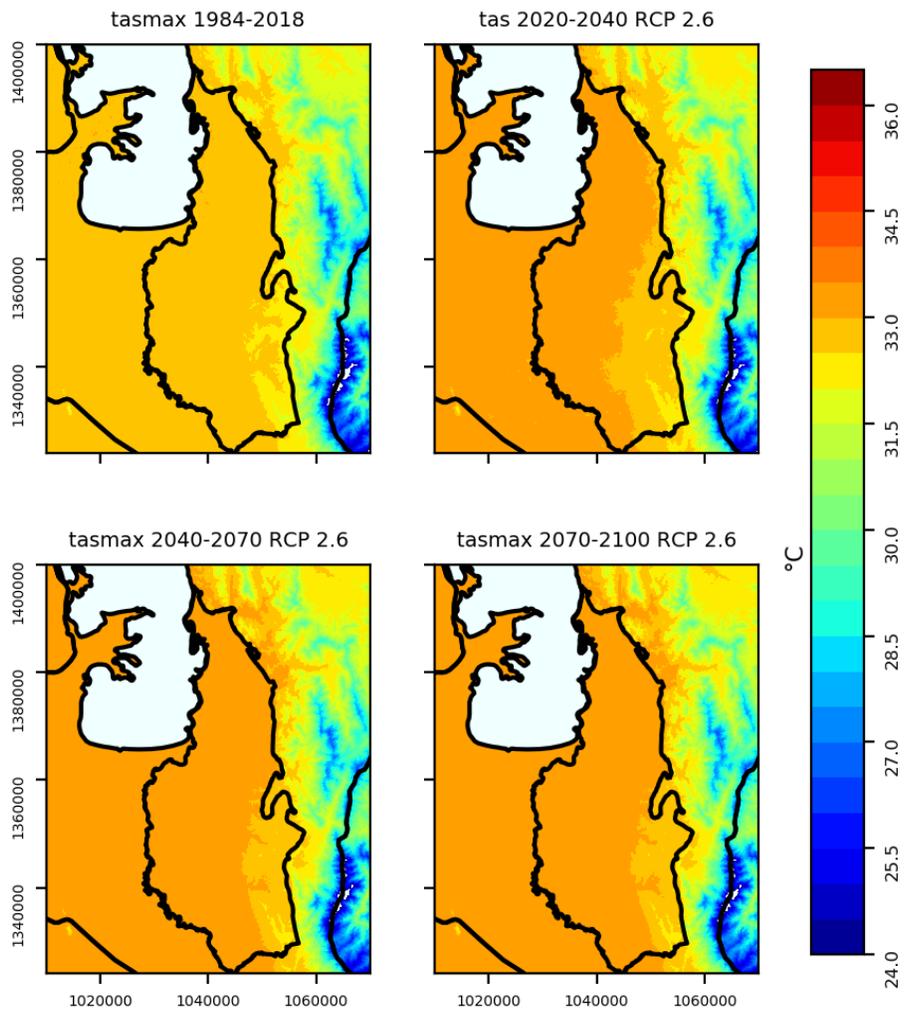


Figura 45: Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura máxima de los periodos analizados modelo MIROC5

Escenarios RCP 8.5 temperatura máxima modelo MIROC5 proyecto CMIP5

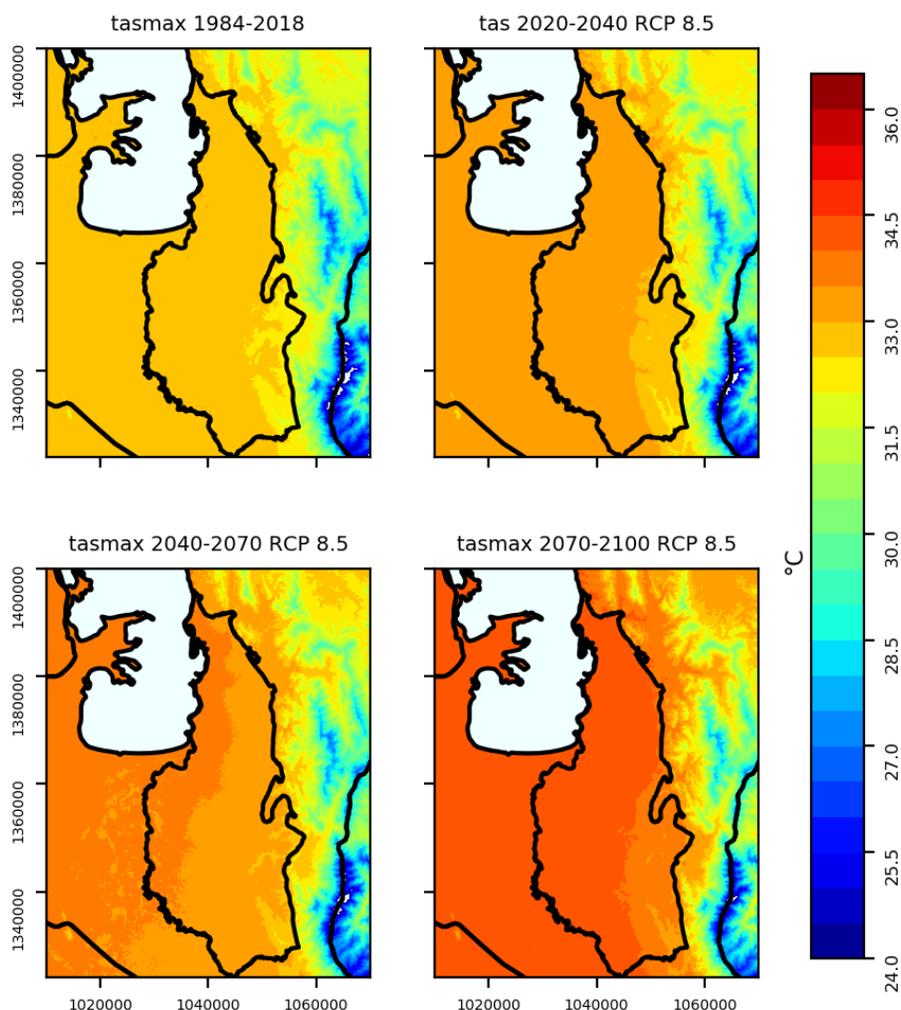


Figura 46: Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura máxima de los periodos analizados modelo MIROC5

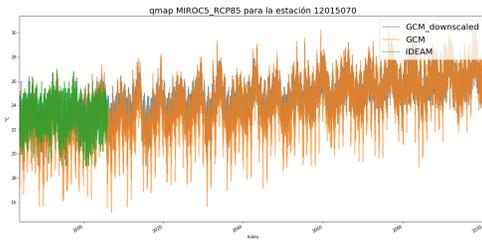
Modelo	Escenario	2020-2040	2040-2070	2070-2100
MIROC5	RCP 2,6	0,20 °C	0,37 °C	0,39 °C
	RCP 8,5	0,32 °C	0,59 °C	1,24 °C
	RCP 2,6	0,65 %	1,19 %	1,25 %
	RCP 8,5	1,02 %	1,9 %	3,98 %

Tabla 18: Resumen de los cambios en la temperatura máxima con respecto al periodo base.

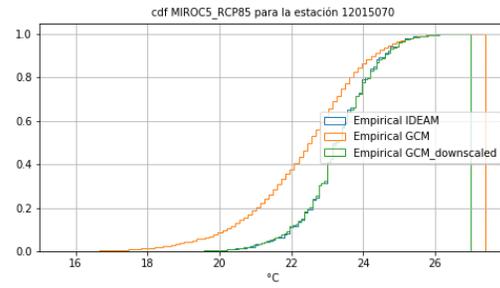
6.4.5. BCSD para la Temperatura mínima

Para la temperatura mínima se espera un mayor aumento que para la temperatura máxima y media según el modelo MIROC5. para el escenario RCP 2.6 y el periodo 2070-2100 se prevé un aumento de 3.04 % correspondiente a 0.71 °C y para el escenario RCP 8.5 se muestra aumento un 10.20 % y 2.38 °C para el mismo periodo,

tabla 19.

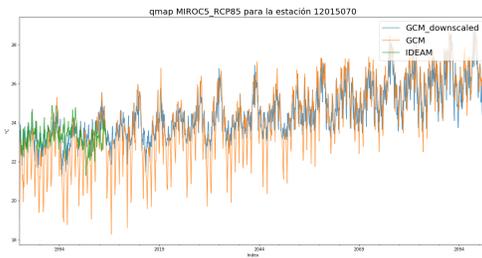


(a) QM serie diaria de temperatura mínima modelo MIROC5

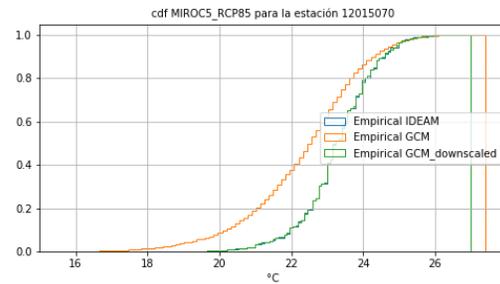


(b) Funciones de distribución empírica

Figura 47: Quantile mapping para la serie diaria de temperatura mínima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5



(a) QM serie mensual de temperatura mínima modelo MI-ROC5



(b) Funciones de distribución empírica

Figura 48: Quantile mapping para la serie mensual de temperatura mínima de la estación 12015070, para el escenario RCP 8.5 y el modelo MIROC5

Escenarios RCP 2.6 temperatura mínima modelo MIROC5 proyecto CMIP5

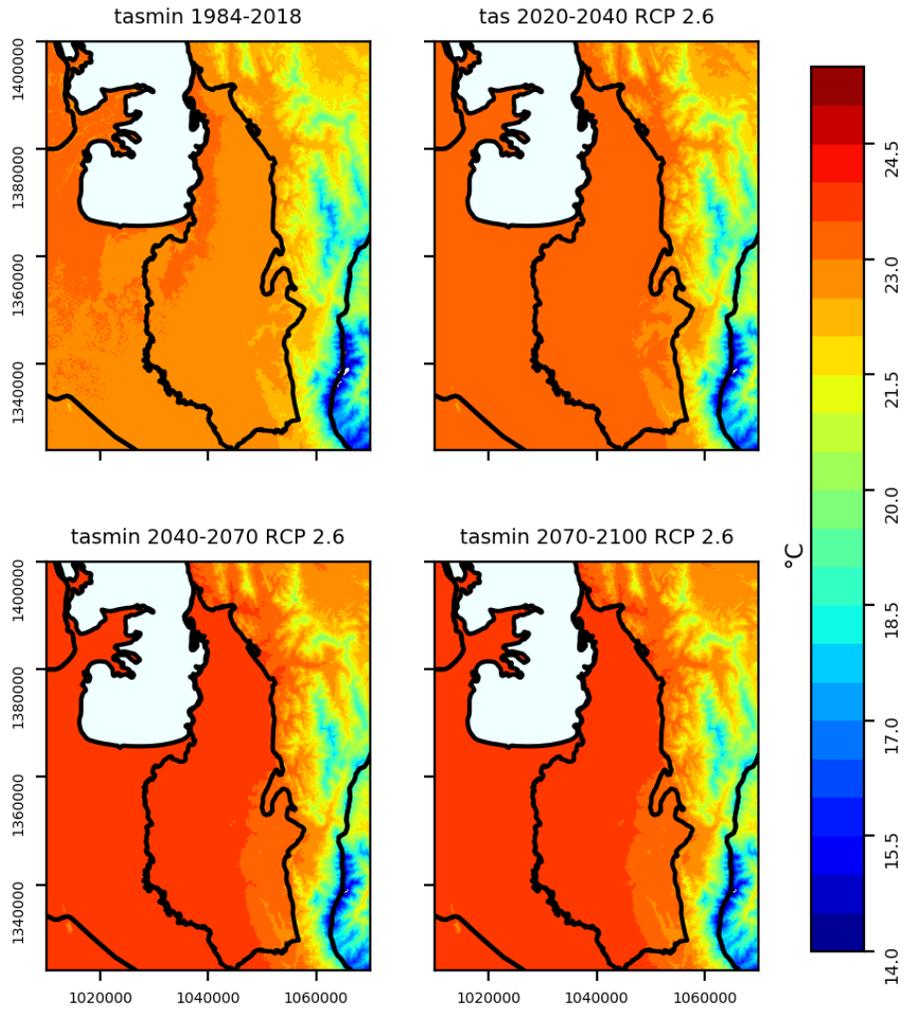


Figura 49: Escenarios RCP 2.6 cambio de la temperatura mínima de los periodos analizados modelo MIROC5

Escenarios RCP 8.5 temperatura mínima modelo MIROC5 proyecto CMIP5

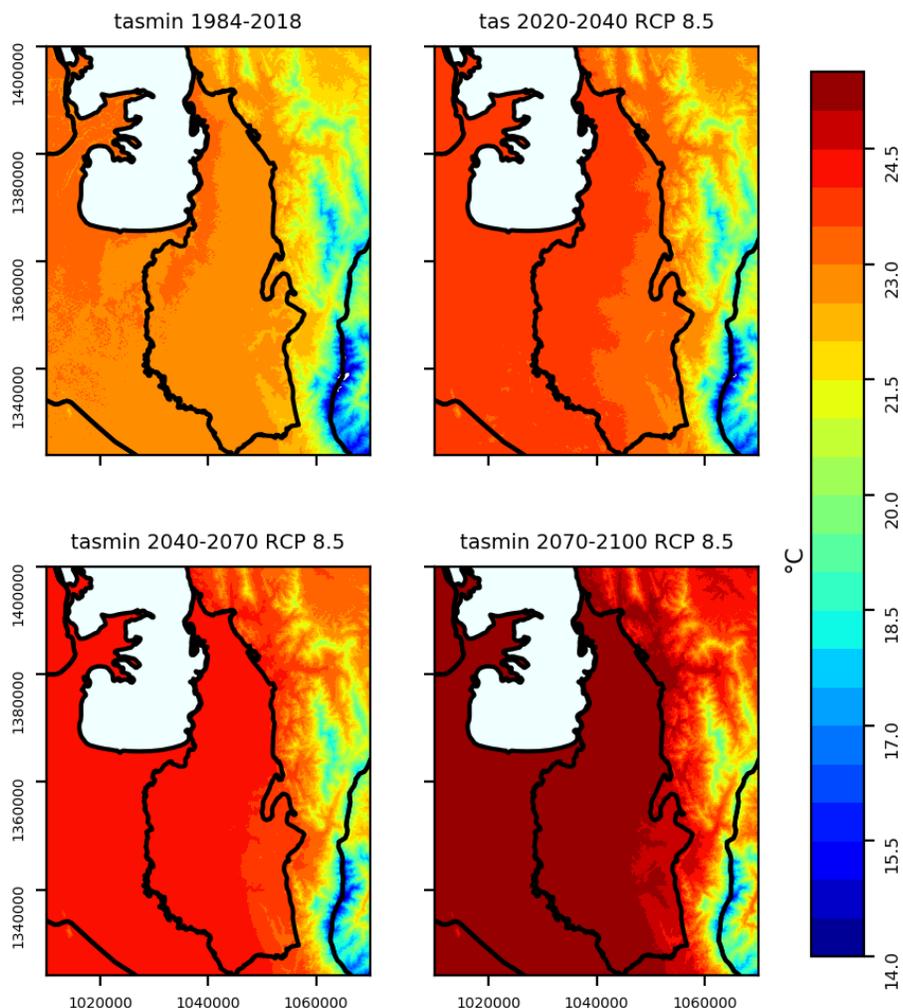


Figura 50: Escenarios RCP 8.5 cambio de la temperatura mínima de los periodos analizados modelo MIROC5

Modelo	Escenario	2020-2040	2040-2070	2070-2100
MIROC5	RCP 2,6	0,42 °C	0,73 °C	0,71 °C
	RCP 8,5	0,61 °C	1,26 °C	2,38 °C
	RCP 2,6	1,80 %	3,13 %	3,04 %
	RCP 8,5	2,62 %	5,39 %	10,20 %

Tabla 19: Resumen de los cambios en la temperatura mínima con respecto al periodo base.

7. Conclusiones

Los escenarios locales de cambio climático muestran en general un aumento de la precipitación y la temperatura según el modelo MIROC5 del proyecto Cordex y el modelo CMCC-CMS del CMIP5. Estos resultados son

coherentes con el análisis estadístico y de tendencia realizado, estos muestran aumentos en la temperatura en los datos de las estaciones en tierra, y aumentos de la precipitación en el área de estudio, especialmente en los trimestres DEF y MAM, Los resultados concuerdan con los estudios realizados preliminarmente por el IDEAM el cual muestra un aumento de la precipitación para la zona de 18mm/año. Se recomienda utilizar los datos corregidos con la técnica de Quantile Mapping y la desagregación espacial con Kriging Bayesiano empírico, ya que mostro mejor desempeño que los otros métodos. Por ultimo se recomienda el uso del Modelo MIROC5 del proyecto Cordex, ya que este es un modelo climático regional y representa mejor el efecto de la topografía en la precipitación, además para este modelo se tienen los escenarios RCP 2.6 y 8.5 los cuales representan los dos casos extremos de la proyecciones de cambio climático, además, para el caso de la precipitación y el escenario RCP 8.5 se ve una disminución de la precipitación para el periodo 2070-2100, escenario que no muestra el modelo CMCC-CMS, se considera relevante evaluar este escenario con disminución de la precipitación para abarcar un mayor rango de posibilidades de escenarios de cambio climático.

Referencias

- [Alexander et al., 2013] Alexander, L., Yang, H., and Perkins, S. (2013). Clim-pact—indices and software. In *User Manual*. Available online: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace4/meetings/documents/ETCRSCI_software_documentation_v2a.doc (accessed on 20 February 2015).
- [Aristizábal, 2009] Aristizábal, L. A. (2009). Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en colombia. *Universidad Nacional de Colombia, Medellín*.
- [Armenta et al., 2014] Armenta, G., Dorado, J., Rodriguez, A., and Ruiz, J. (2014). Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia Bogota, Colombia. IDEAM, 274*.
- [Bong et al., 2018] Bong, T., Son, Y.-H., Yoo, S.-H., and Hwang, S.-W. (2018). Nonparametric quantile mapping using the response surface method—bias correction of daily precipitation. *Journal of Water and Climate Change*, 9(3):525–539.
- [Bonilla-Ovallos and Sánchez, 2017] Bonilla-Ovallos, C. A. and Sánchez, O. J. M. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación cmip5 en colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158):107–118.
- [Cadavid Valencia et al.,] Cadavid Valencia, S. et al. *Metodología para estimar caudales medios y extremos en escenarios de cambio climático*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- [Cannon et al., 2015] Cannon, A. J., Sobie, S. R., and Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of gcm precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17):6938–6959.
- [CHAVES and JARAMILLO, 1998] CHAVES, B. and JARAMILLO, A. (1998). Regionalización de la temperatura del aire en colombia.
- [Eyring et al., 2016] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (cmip6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development (Online)*, 9(LLNL-JRNL-736881).
- [Gregory et al., 2007] Gregory, J., Stouffer, R. J., Molina, M., Chidthaisong, A., Solomon, S., Raga, G., Friedlings-tein, P., Bindoff, N. L., Le Treut, H., Rusticucci, M., et al. (2007). Climate change 2007: the physical science basis.
- [Gudmundsson et al., 2012] Gudmundsson, L., Bremnes, J., Haugen, J., and Skaugen, T. E. (2012). Technical note: Downscaling rcm precipitation to the station scale using quantile mapping—a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 9(5):6185–6201.
- [Hamed and Rao, 1998] Hamed, K. H. and Rao, A. R. (1998). A modified mann-kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4):182–196.

- [Hurtado, 2016a] Hurtado, G. (2016a). Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia.
- [Hurtado, 2016b] Hurtado, G. (2016b). Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia.
- [IDEAM, 2010] IDEAM (2010). Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales.
- [JAIMES BORDA, 2016] JAIMES BORDA, M. (2016). Modelación avanzada de los efectos del cambio climático en el acuífero litoral de la plana de Oropesa–Torreblanca.
- [Jakob Themeßl et al., 2011] Jakob Themeßl, M., Gobiet, A., and Leuprecht, A. (2011). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10):1530–1544.
- [Karl et al., 1999] Karl, T. R., Nicholls, N., and Ghazi, A. (1999). Clivar/gcos/wmo workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary. In *Weather and Climate Extremes*, pages 3–7. Springer.
- [Lee and Singh, 2018] Lee, T. and Singh, V. P. (2018). *Statistical Downscaling for Hydrological and Environmental Applications*. CRC Press.
- [Maraun et al., 2010] Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A., Chandler, R., Kendon, E., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H., Sauter, T., Themeßl, M., et al. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3).
- [Mayorga, 2011] Mayorga, R., H. G. B. H. (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística.
- [McSweeney et al., 2015] McSweeney, C., Jones, R., Lee, R. W., and Rowell, D. (2015). Selecting cmip5 gcms for downscaling over multiple regions. *Climate Dynamics*, 44(11-12):3237–3260.
- [Meehl et al., 2007] Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2007). The wcrp cmip3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9):1383–1394.
- [Ngai et al., 2017] Ngai, S. T., Tangang, F., and Juneng, L. (2017). Bias correction of global and regional simulated daily precipitation and surface mean temperature over Southeast Asia using quantile mapping method. *Global and Planetary Change*, 149:79–90.
- [Pabón, 2003] Pabón, J. D. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, (12):111–119.
- [Pabón Caicedo, 2012] Pabón Caicedo, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139):261–278.
- [Pérez et al., 1998] Pérez, C., Poveda, G., Mesa, O., Carvajal, L. F., and Ochoa, A. (1998). Evidencias de cambio climático en Colombia: tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3).
- [Pérez Rendón et al., 2016] Pérez Rendón, E. P., Ramírez Builes, V. H., and Peña Quiñones, A. J. (2016). Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. *Investigaciones geográficas*, (89):23–40.
- [Poveda et al., 2001] Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., and Mantilla, R. I. (2001). Seasonally in-phase related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water resources research*, 37(8):2169–2178.
- [Quintana-Gomez, 1999] Quintana-Gomez, R. A. (1999). Trends of maximum and minimum temperatures in northern South America. *Journal of Climate*, 12(7):2104–2112.

- [Shiferaw et al., 2018] Shiferaw, A., Tadesse, T., Rowe, C., and Oglesby, R. (2018). Precipitation extremes in dynamically downscaled climate scenarios over the greater horn of africa. *Atmosphere*, 9(3):112.
- [Sierra et al., 2016] Sierra, J. P., Arias, A., and Vieira, S. (2016). Sobre la representación de la precipitación en el norte de suramérica por los modelos del cmip5.
- [Sreelatha and Anand Raj, 2019] Sreelatha, K. and Anand Raj, P. (2019). Ranking of cmip5-based global climate models using standard performance metrics for telangana region in the southern part of india. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pages 1–10.
- [Stocker et al., 2013] Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M., et al. (2013). Climate change 2013: The physical science basis.
- [Taylor, 2001] Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7):7183–7192.
- [Themeßl et al., 2012] Themeßl, M. J., Gobiet, A., and Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2):449–468.
- [Wuthiwongyothin et al., 2019] Wuthiwongyothin, S., Mili, S., and Phadungkarnlert, N. (2019). A study of correcting climate model daily rainfall product using quantile mapping in upper ping river basin, thailand. In *International Conference on Asian and Pacific Coasts*, pages 1213–1219. Springer.
- [Yang et al., 2018] Yang, X., Wood, E. F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M., and Wang, Y. (2018). Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for china from cmip5 models. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3):609–623.

8. Anexos

8.1. Análisis exploratorio de datos de precipitación



Figura 51: Series de precipitación con datos faltantes

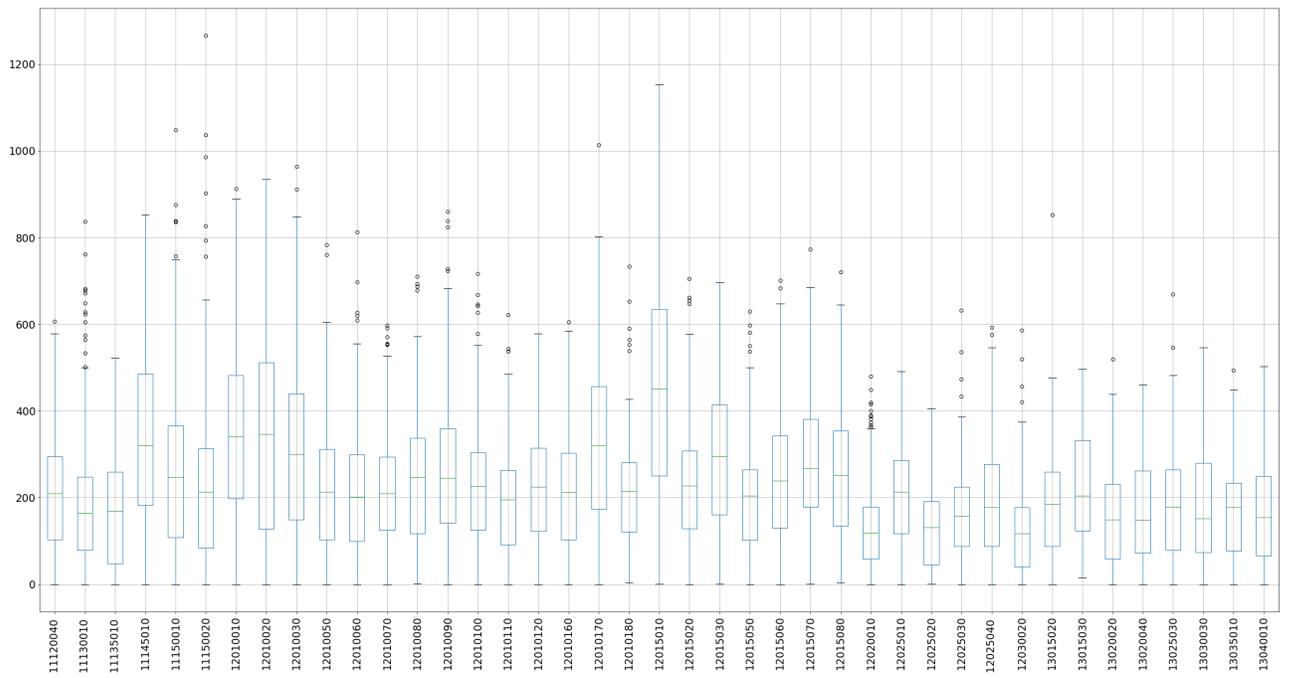


Figura 52: Diagramas de caja para datos mensuales de precipitación

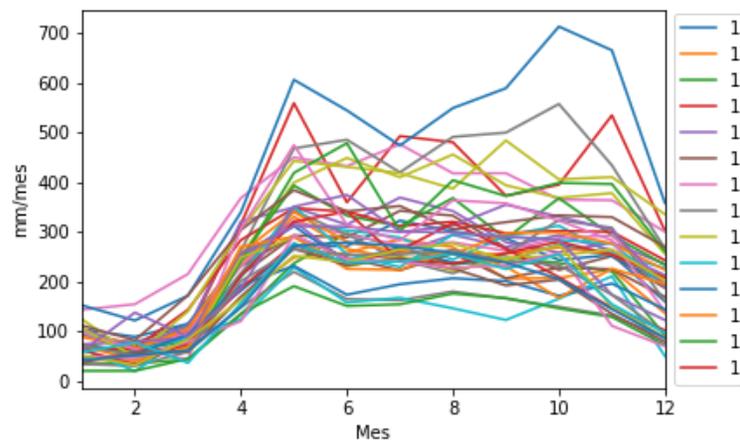


Figura 53: Ciclo anual de la precipitación



Figura 54: Histogramas para datos mensuales de precipitación

8.2. Analisis exploratio para los datos de temperatura

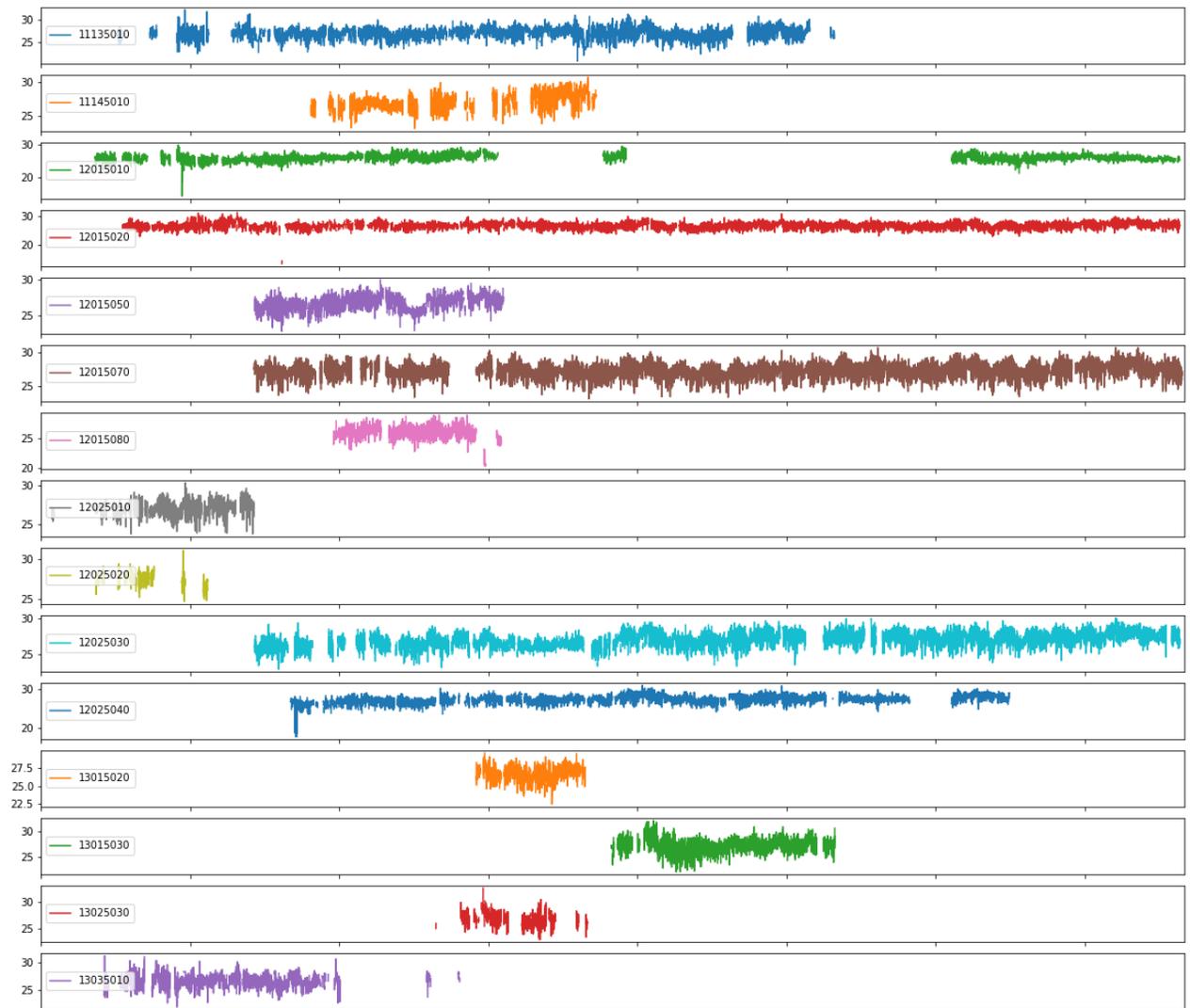


Figura 55: Series de temperatura con datos faltantes

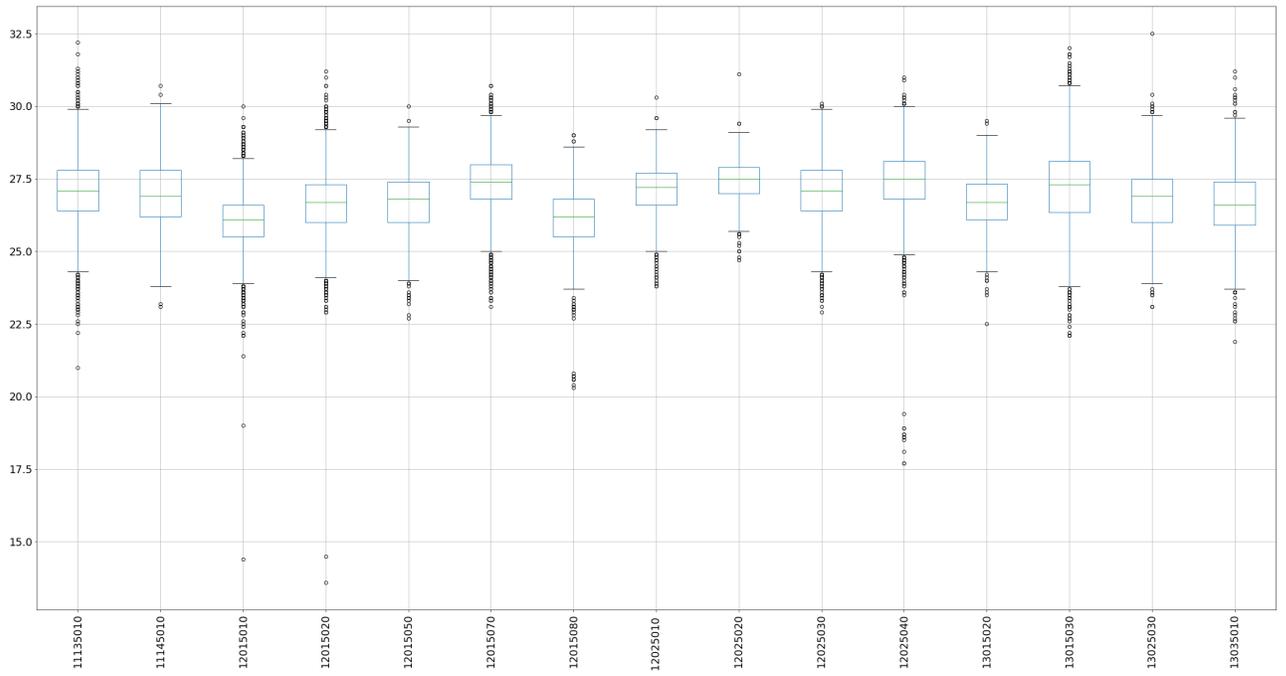


Figura 56: Diagramas de caja para datos diarios de temperatura

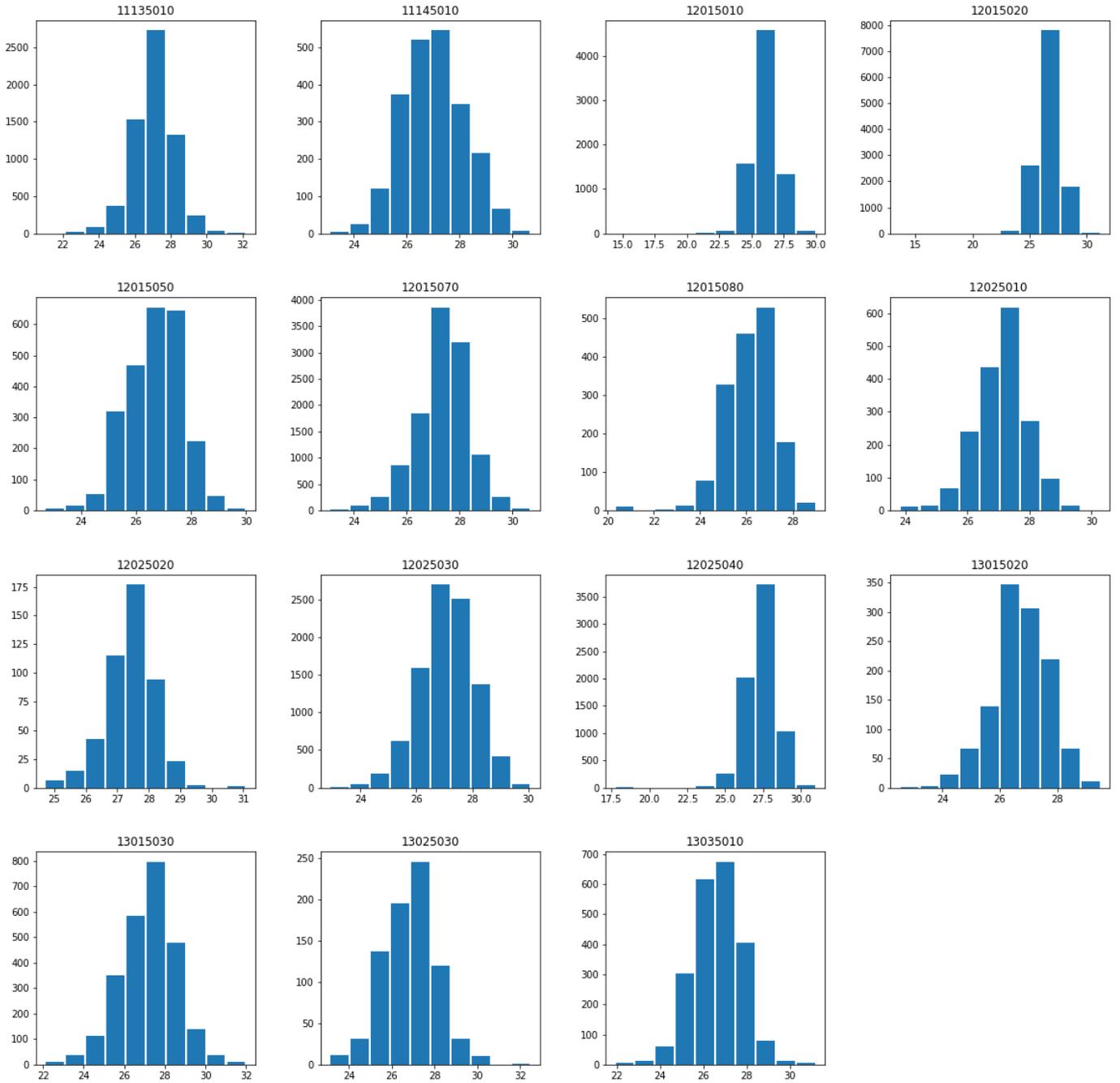


Figura 57: Histogramas para datos diarios de temperatura

8.3. Temperatura máxima

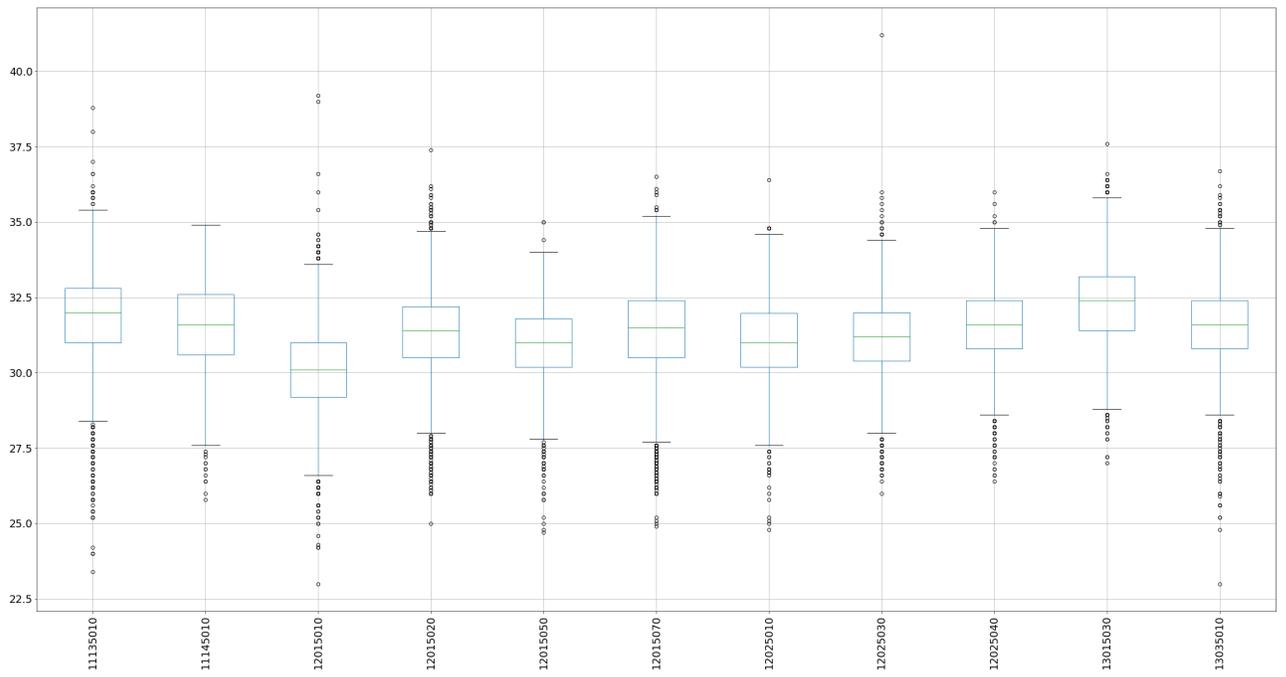


Figura 58: Diagramas de caja para datos diarios de temperatura maxima

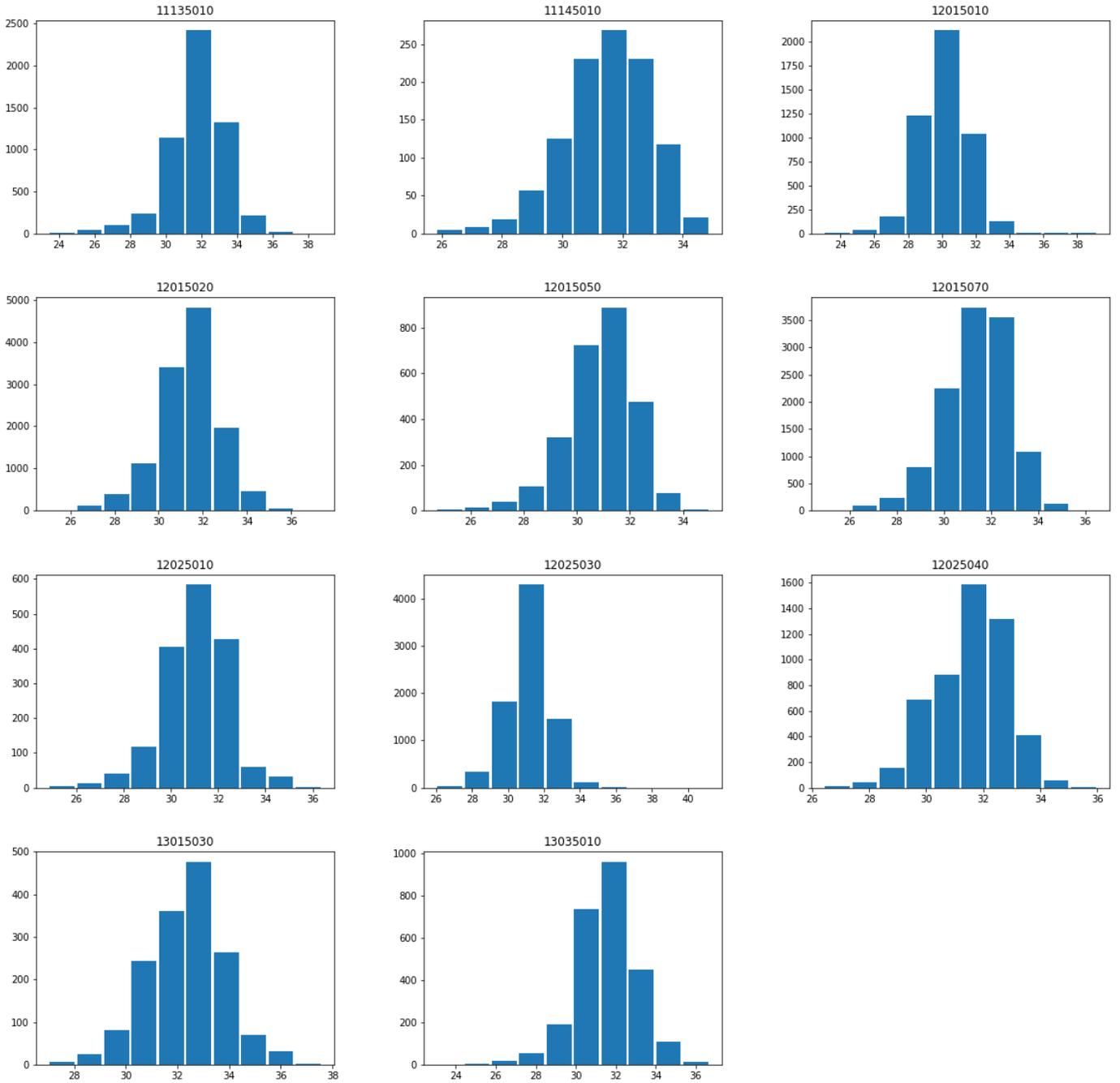


Figura 59: Histogramas para datos diarios de temperatura

8.4. Temperatura mínima

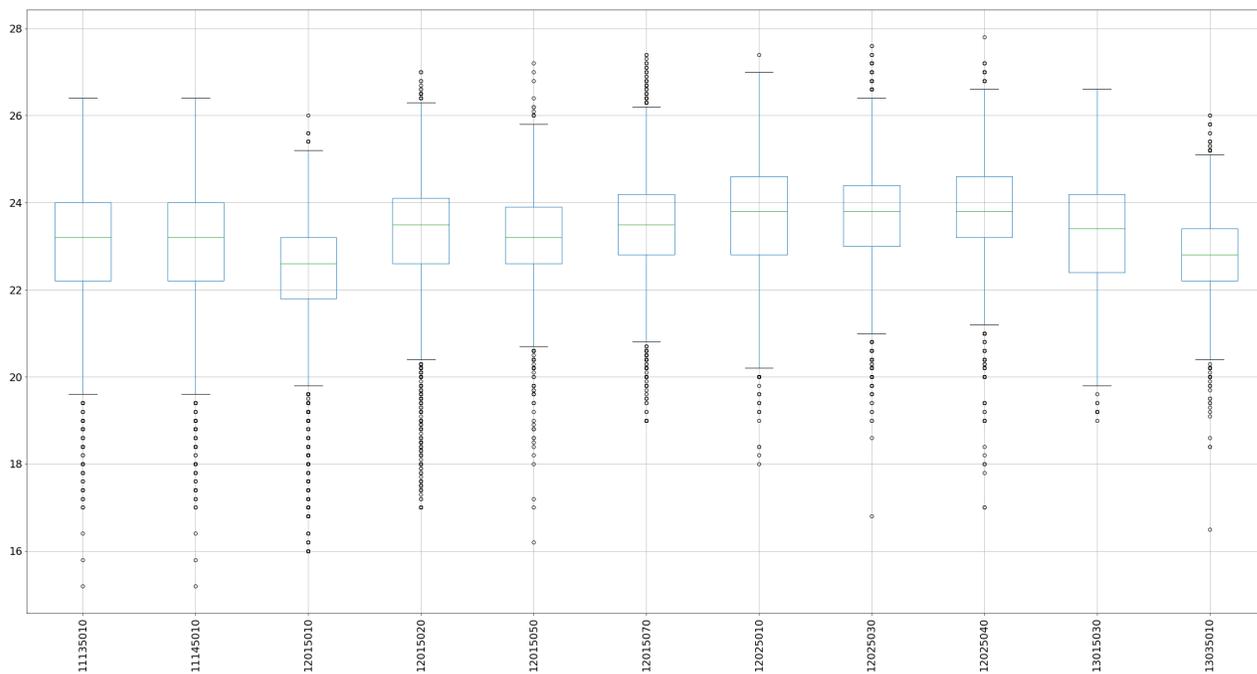


Figura 60: Diagramas de caja para datos diarios de temperatura maxima

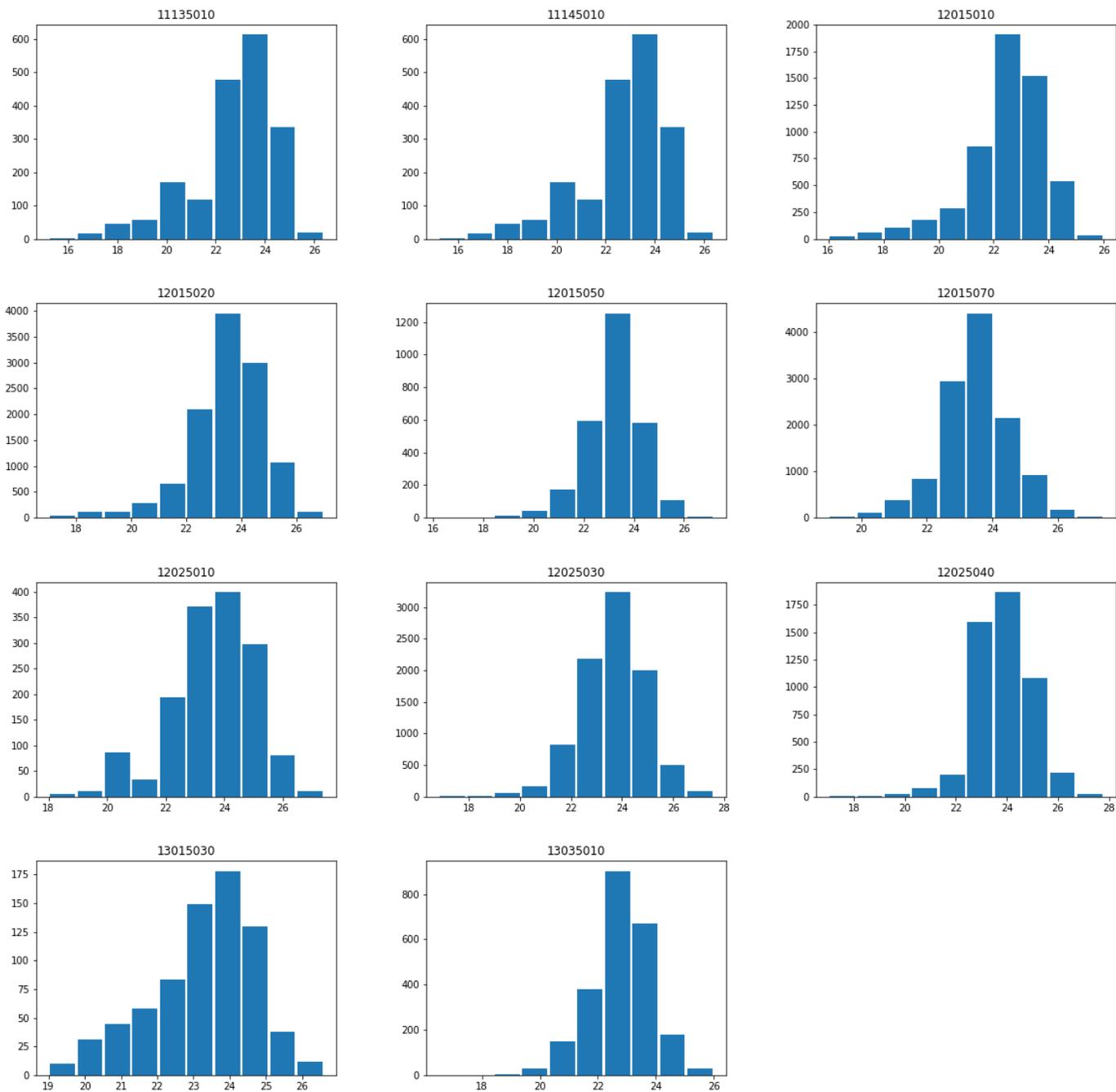


Figura 61: Histogramas para datos diarios de temperatura

8.5. Análisis de consistencia

8.5.1. Series de precipitación con los periodos ENSO

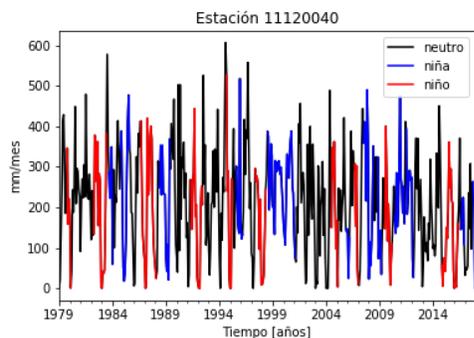


Figura 62: Serie de precipitación con ENSO estación 11120040

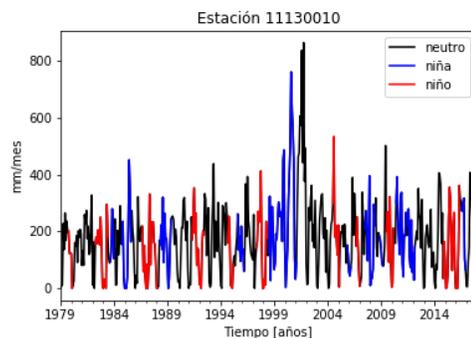


Figura 63: Serie de precipitación con ENSO estación 11130010

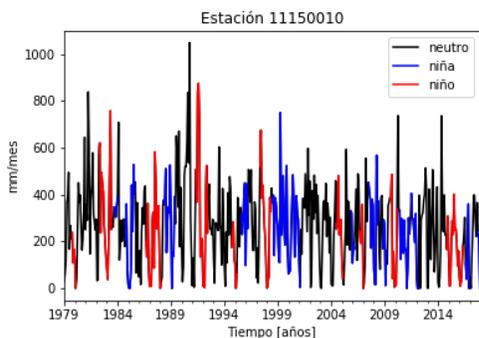


Figura 64: Serie de precipitación con ENSO estación 11150010

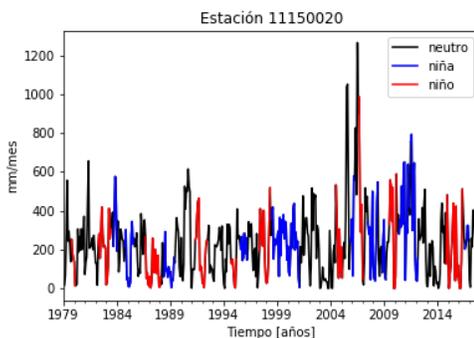


Figura 65: Serie de precipitación con ENSO estación 1150020

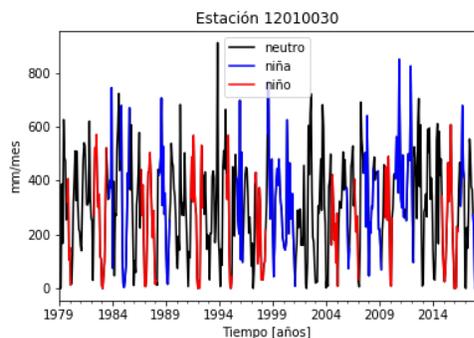


Figura 66: Serie de precipitación con ENSO estación 12010030

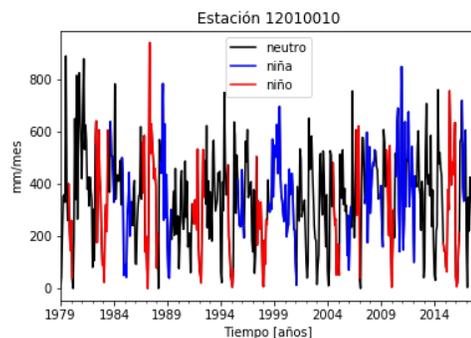


Figura 67: Serie de precipitación con ENSO estación 12010010

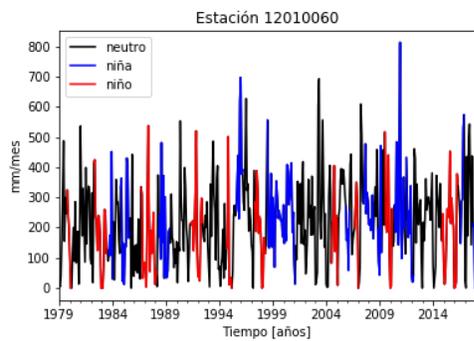


Figura 68: Serie de precipitación con ENSO estación 12010060

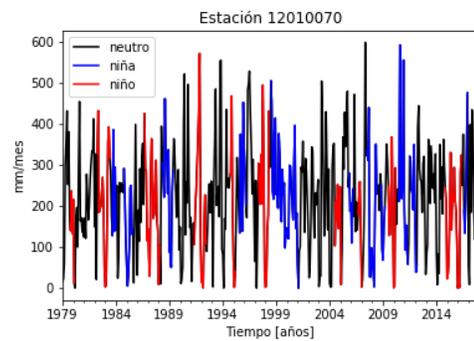


Figura 69: Serie de precipitación con ENSO estación 12010070

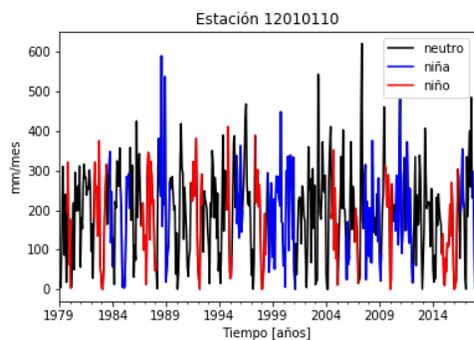


Figura 70: Serie de precipitación con ENSO estación 12010110

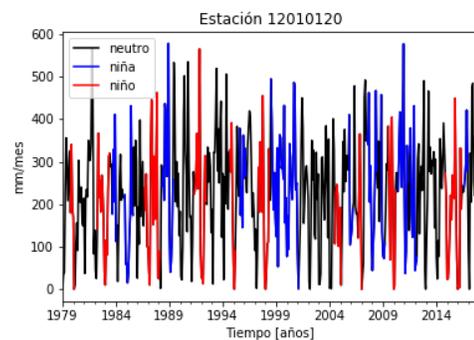


Figura 71: Serie de precipitación con ENSO estación 12010120

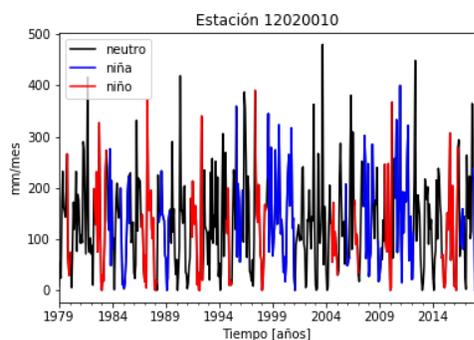


Figura 72: Serie de precipitación con ENSO estación 12020010

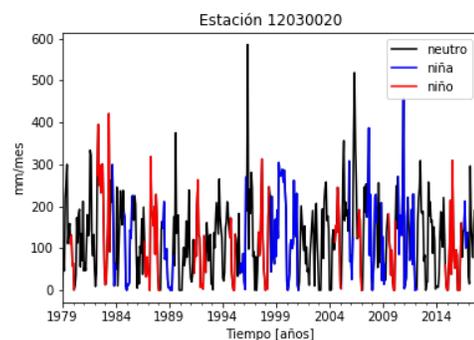


Figura 73: Serie de precipitación con ENSO estación 12030020

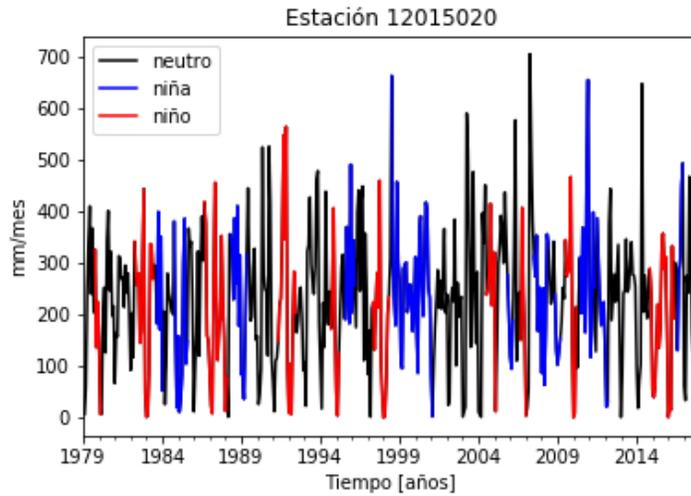


Figura 74: Serie de precipitación con ENSO estación 12015020

8.5.2. Curvas de masa acumulada:

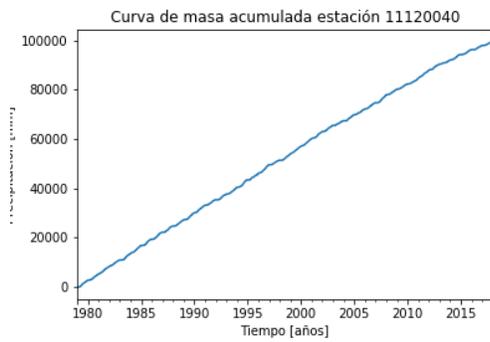


Figura 75: Curva de masa acumulada para la estación 11120040

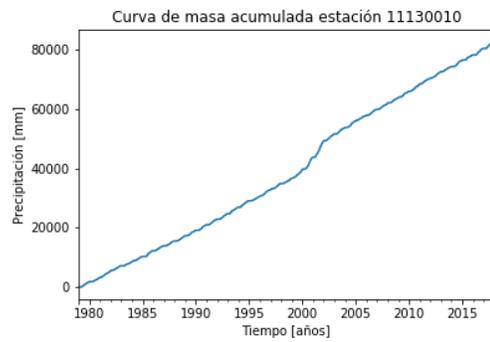


Figura 76: Curva de masa acumulada para la estación 11130010

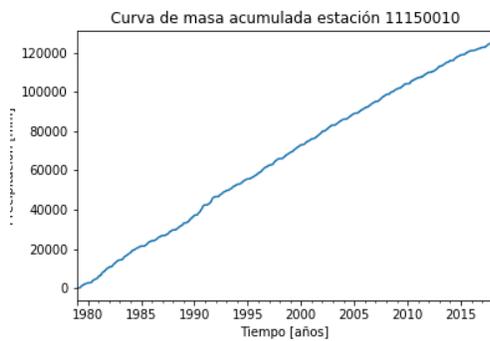


Figura 77: Curva de masa acumulada para la estación 11150010

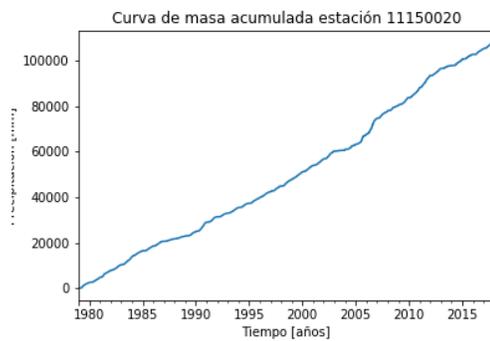


Figura 78: Curva de masa acumulada para la estación 11150020

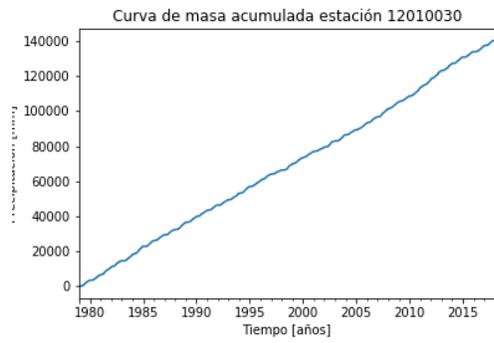


Figura 79: Curva de masa acumulada para la estación 12010030

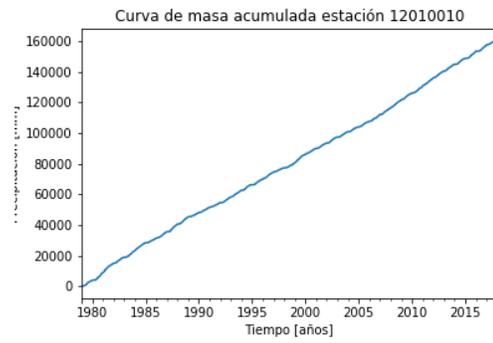


Figura 80: Curva de masa acumulada para la estación 12010010

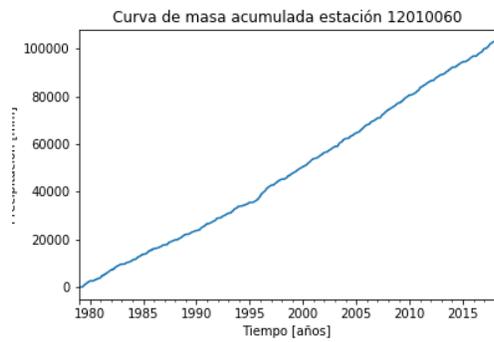


Figura 81: Curva de masa acumulada para la estación 12010060

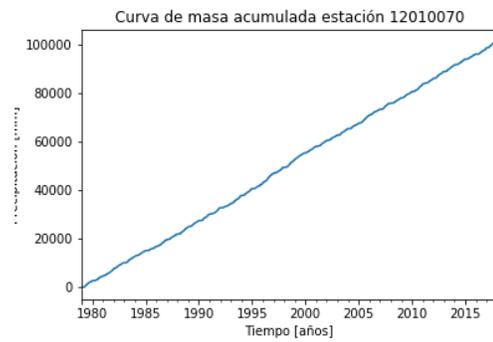


Figura 82: Curva de masa acumulada para la estación 12010070

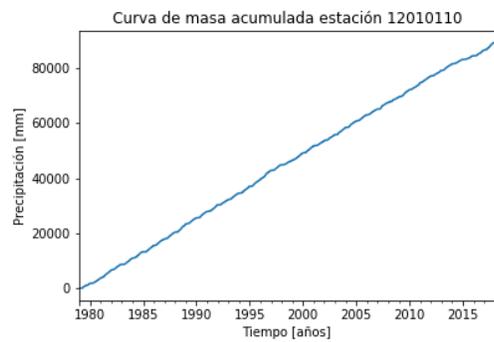


Figura 83: Curva de masa acumulada para la estación 12010110

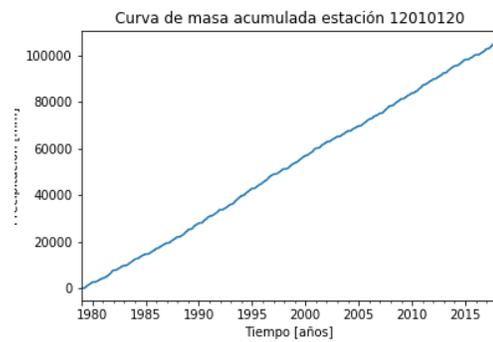


Figura 84: Curva de masa acumulada para la estación 12010120

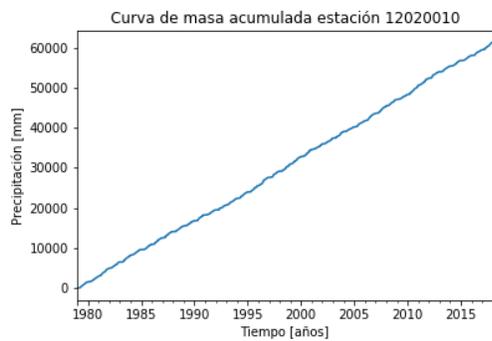


Figura 85: Curva de masa acumulada para la estación 12020010

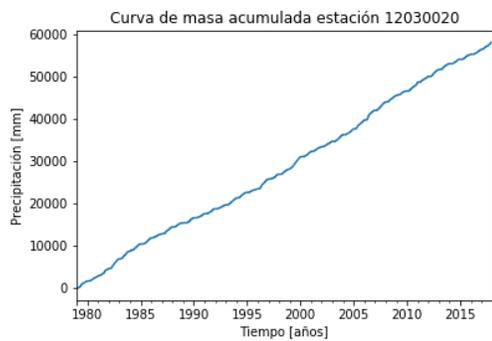


Figura 86: Curva de masa acumulada para la estación 12030020

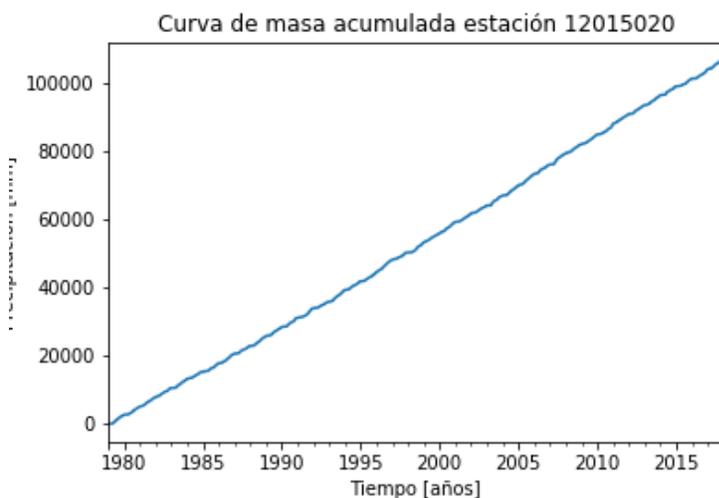


Figura 87: Curva de masa acumulada para la estación 12015020

8.6. Análisis de tendencias

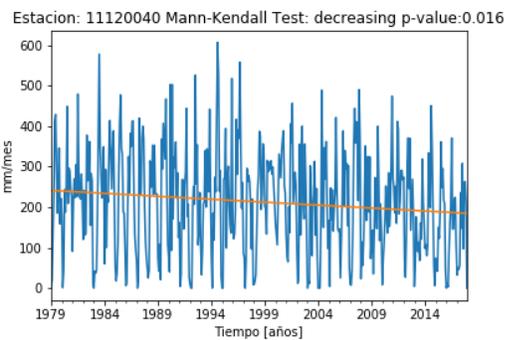


Figura 88: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 11120040

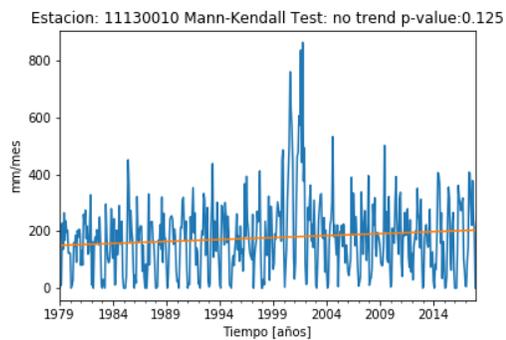


Figura 89: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 11130010

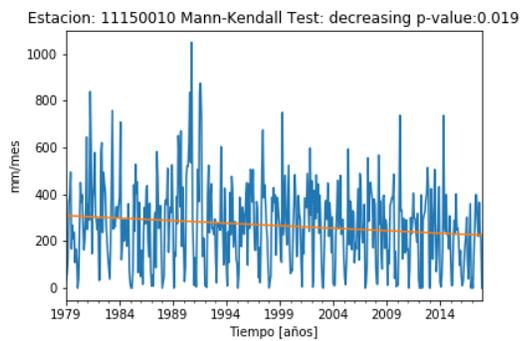


Figura 90: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 11150010

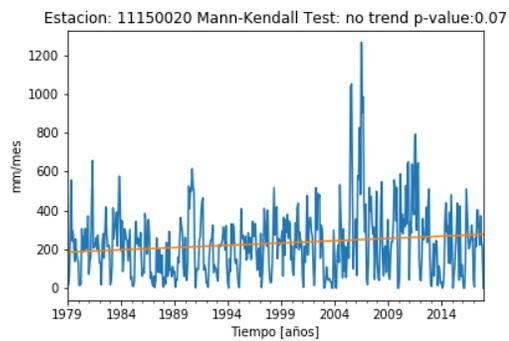


Figura 91: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 1150020

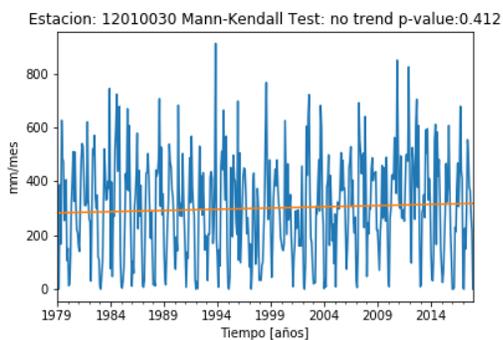


Figura 92: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12010030

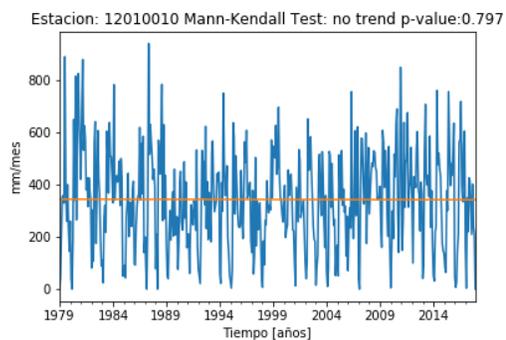


Figura 93: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12010010

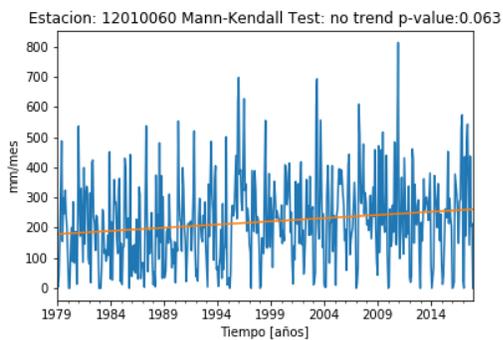


Figura 94: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12010060

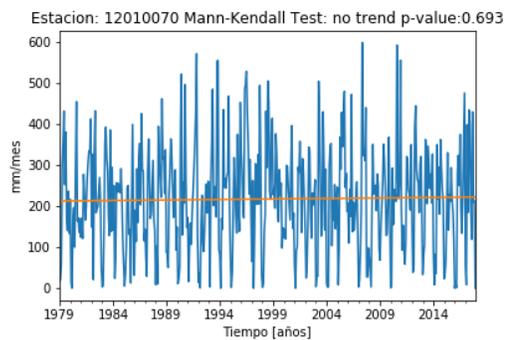


Figura 95: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12010070

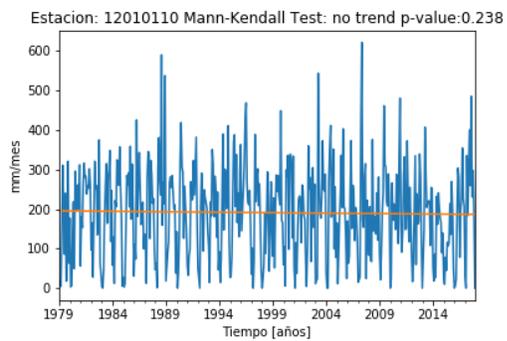


Figura 96: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12010110

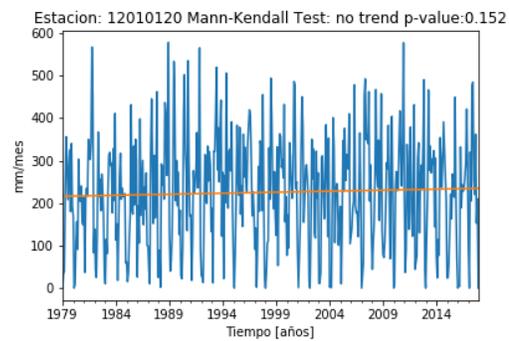


Figura 97: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12010120

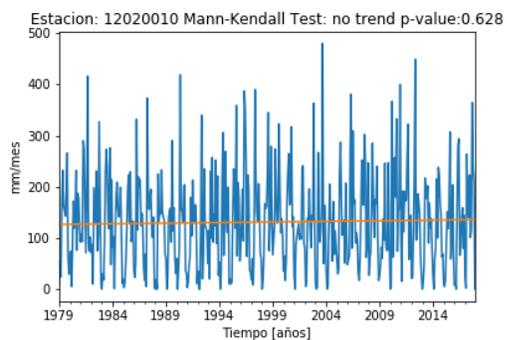


Figura 98: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12020010

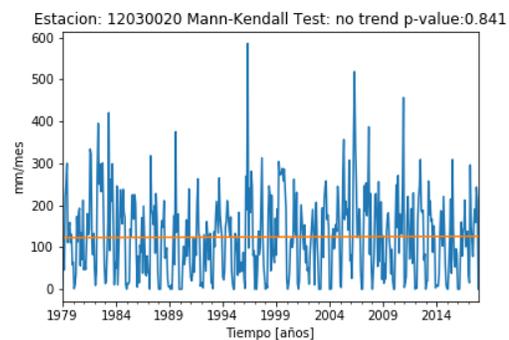


Figura 99: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12030020

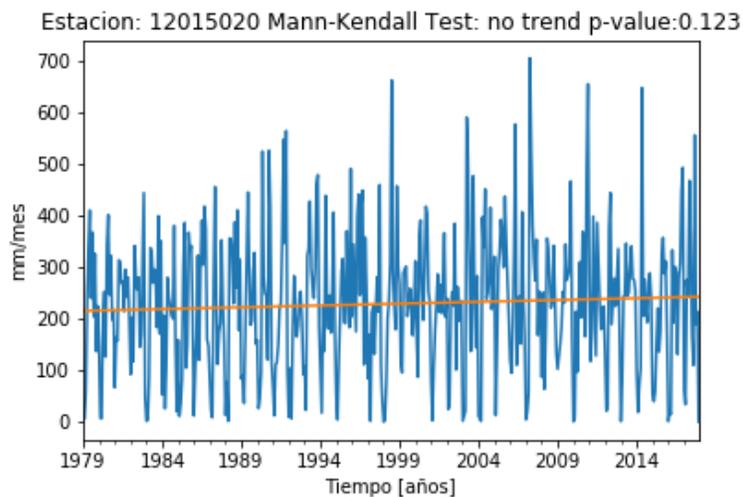


Figura 100: Serie de precipitación con línea de tendencia para la estación 12015020

8.7. Análisis de consistencias y de tendencia para la estación de temperatura

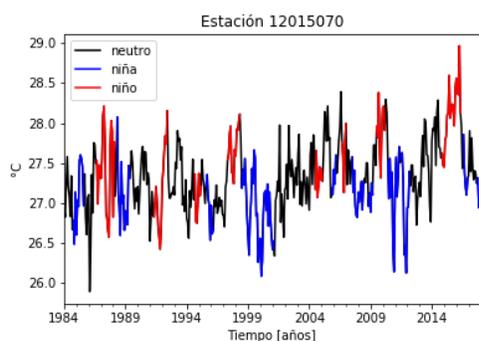


Figura 101: Serie de temperatura con ENSO para la estación 12015070

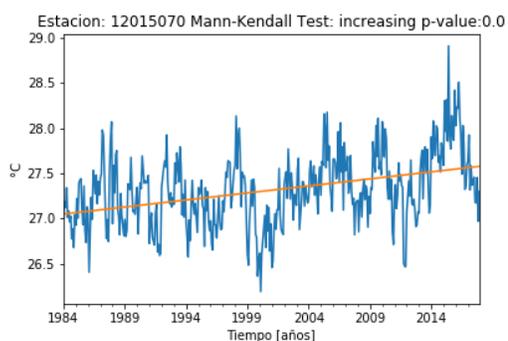


Figura 102: Serie de temperatura con línea de tendencia para la estación 12015070

8.8. Índices de cambio climático:

8.8.1. Estación 11120040

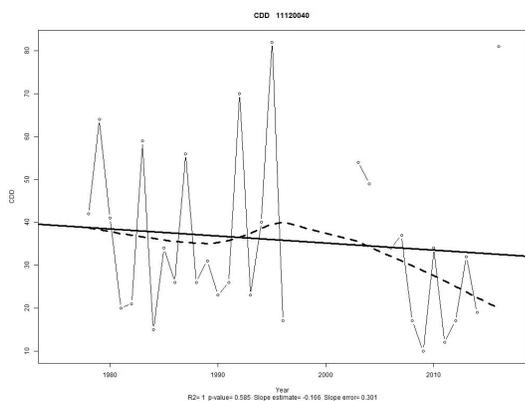


Figura 103: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 1120040

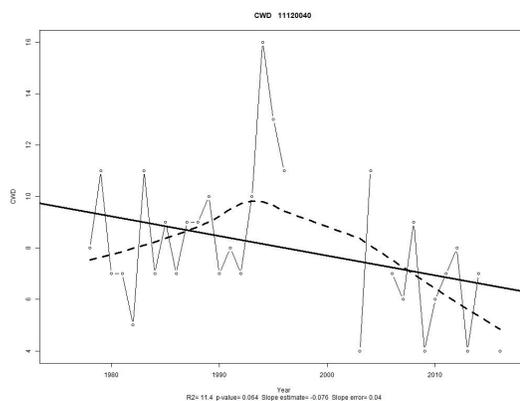


Figura 104: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 1120040

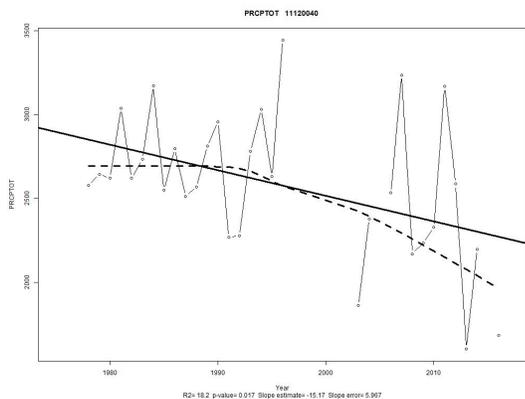


Figura 105: Precipitación total al año (mm) para la estación 1120040

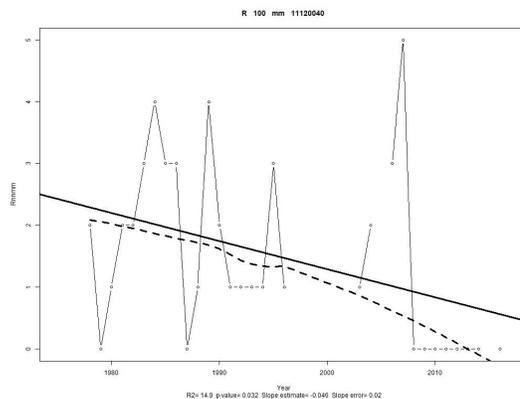


Figura 106: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 1120040

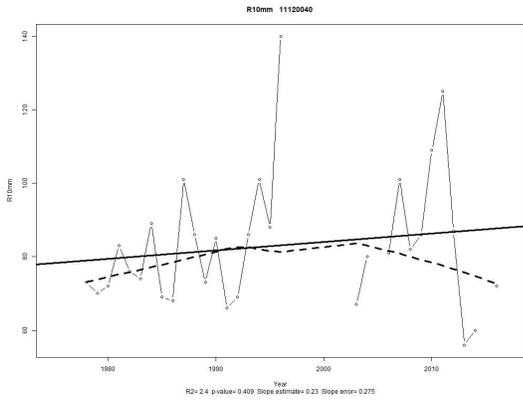


Figura 107: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 1120040

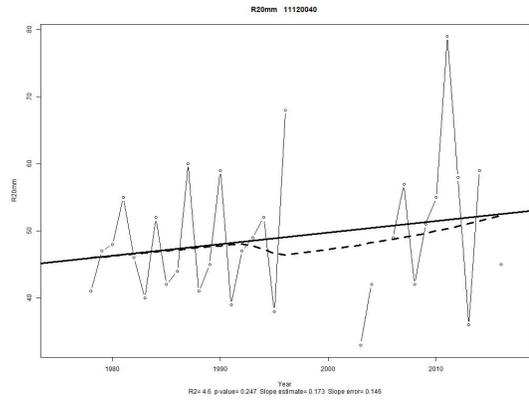


Figura 108: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 1120040

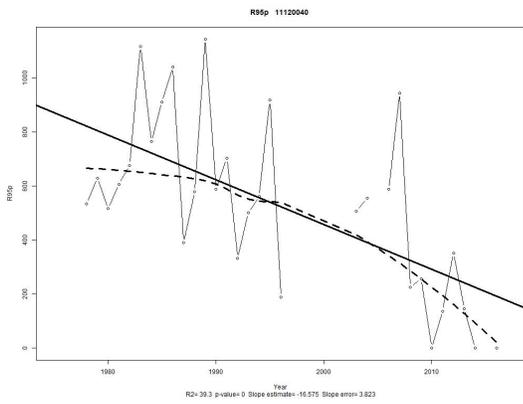


Figura 109: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 1120040

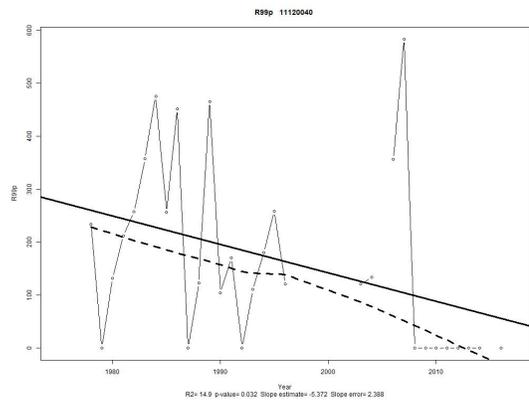


Figura 110: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 1120040

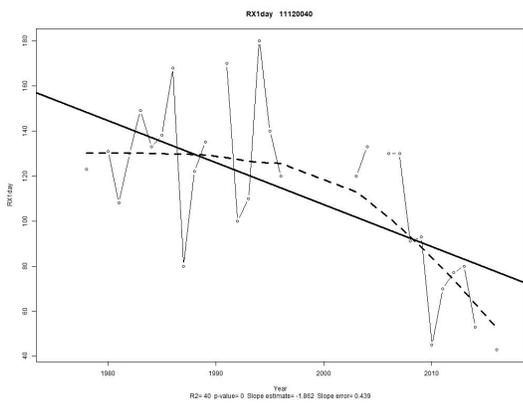


Figura 111: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 1120040

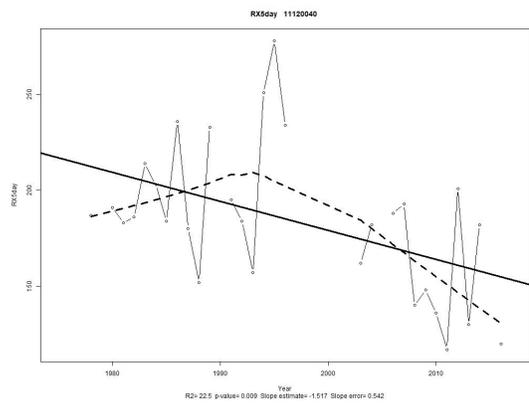


Figura 112: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 1120040

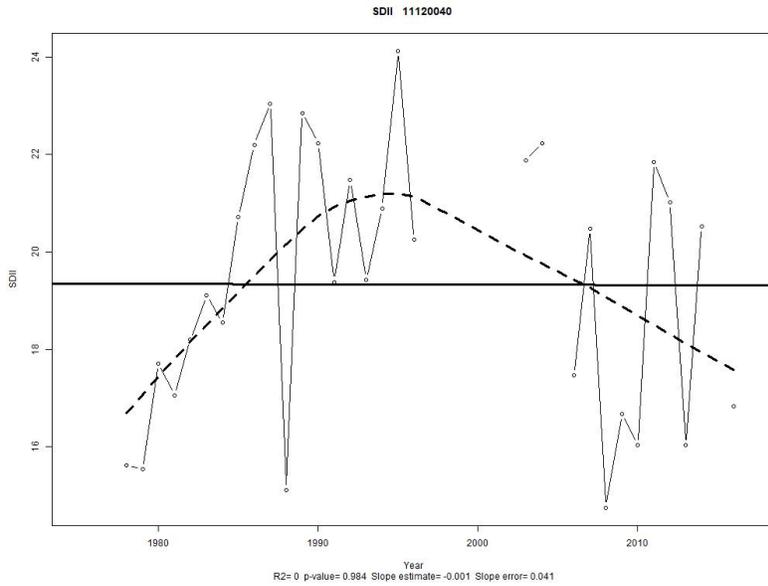


Figura 113: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 1120040

8.8.2. Estación 11130010

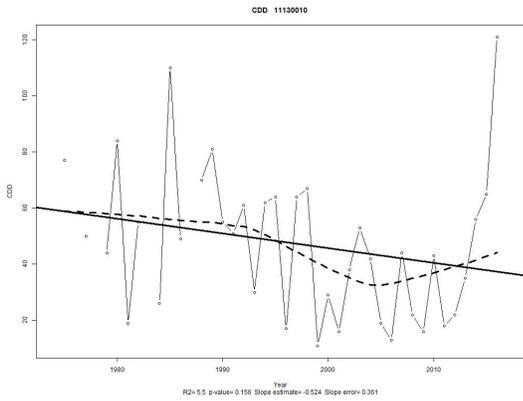


Figura 114: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 11130010

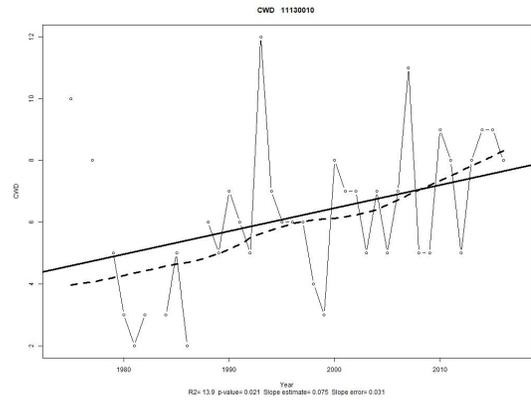


Figura 115: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 11130010

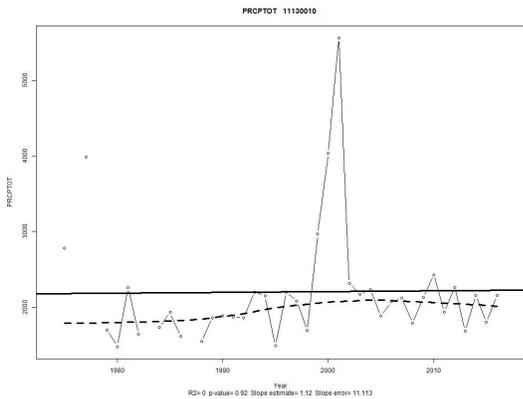


Figura 116: Precipitación total al año (mm) para la estación 11130010

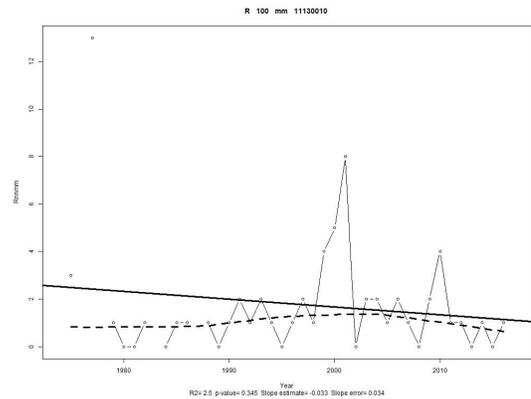


Figura 117: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 11130010

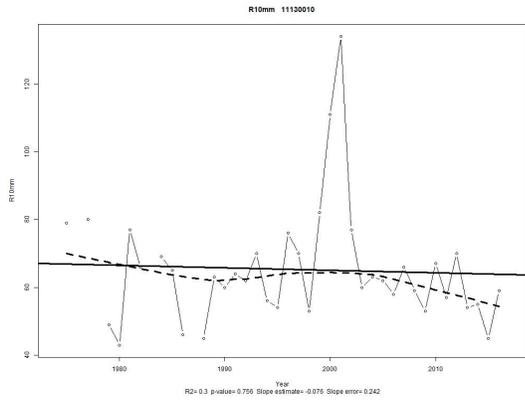


Figura 118: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 11130010

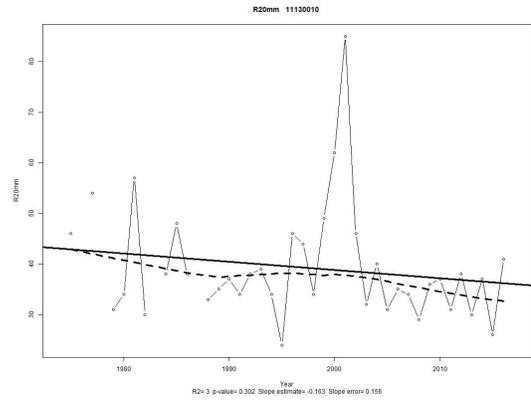


Figura 119: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 11130010

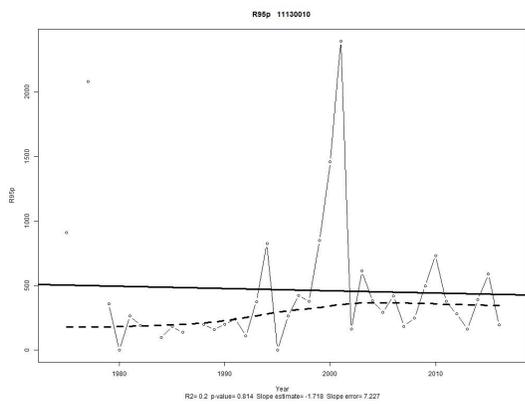


Figura 120: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 11130010

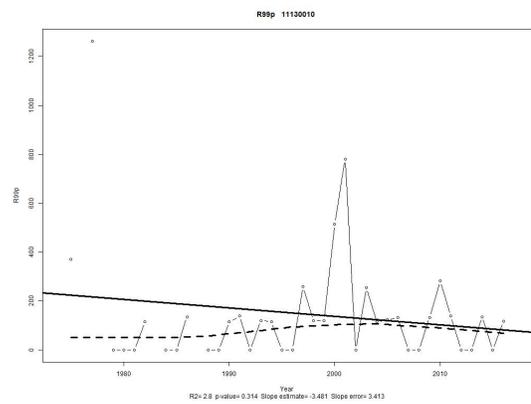


Figura 121: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 11130010

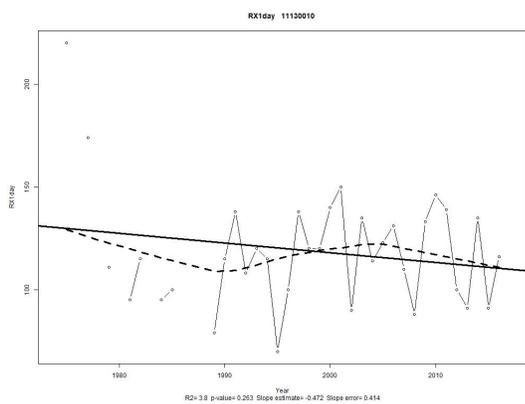


Figura 122: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 11130010

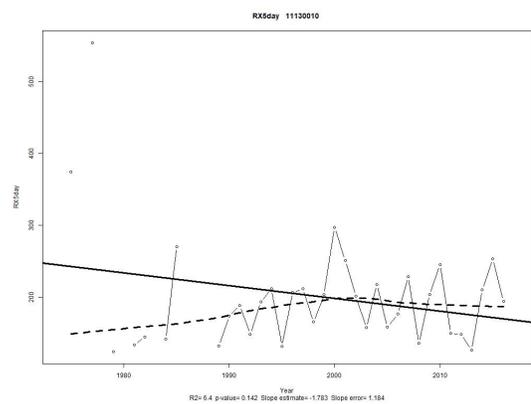


Figura 123: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 11130010

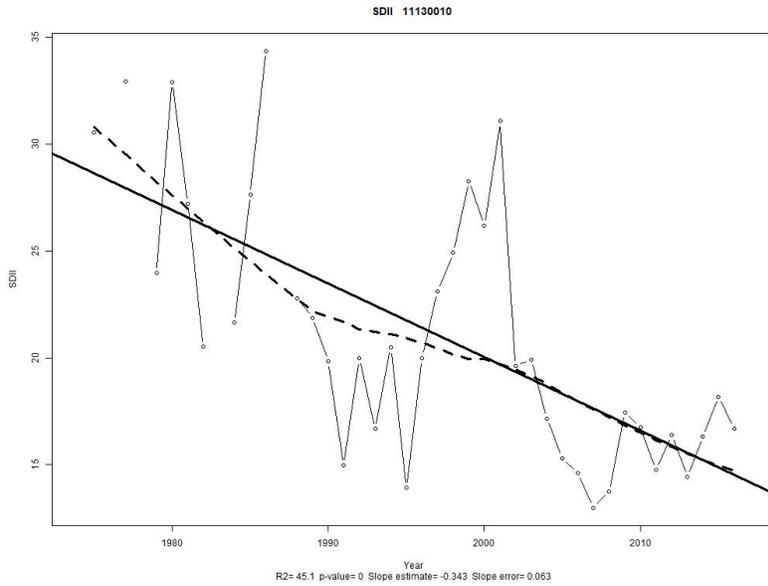


Figura 124: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 11130010

8.8.3. Estación 11150010

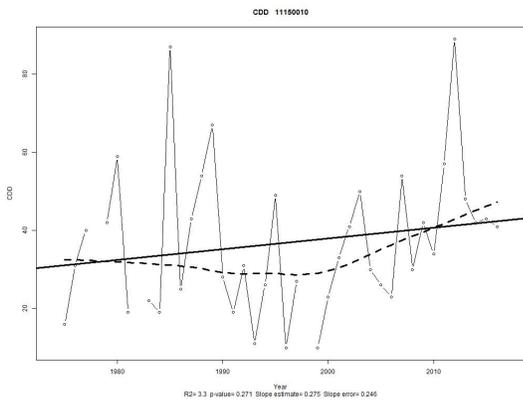


Figura 125: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 11150010

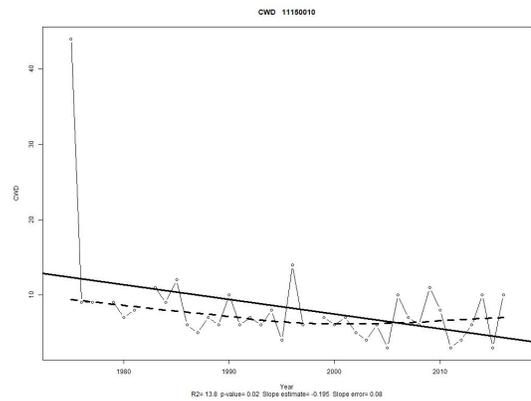


Figura 126: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 11150010

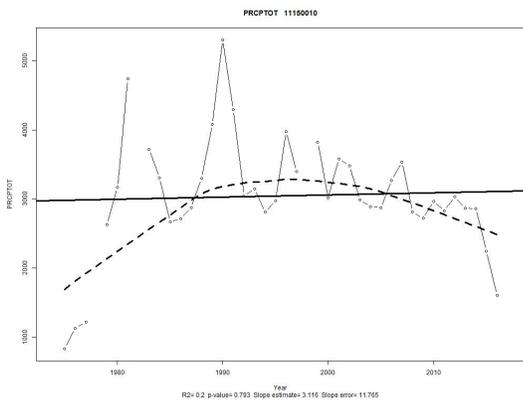


Figura 127: Precipitación total al año (mm) para la estación 11150010

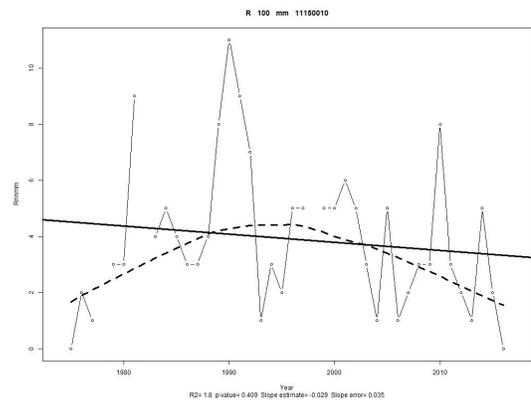


Figura 128: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 11150010

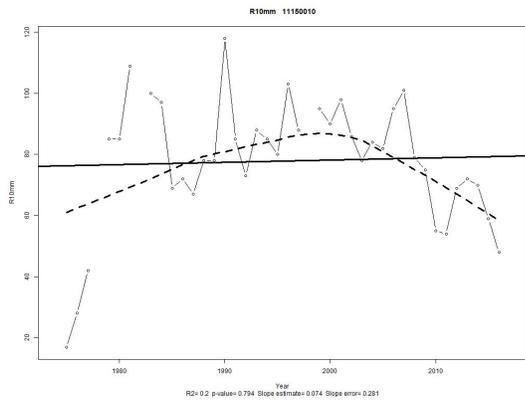


Figura 129: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 11150010

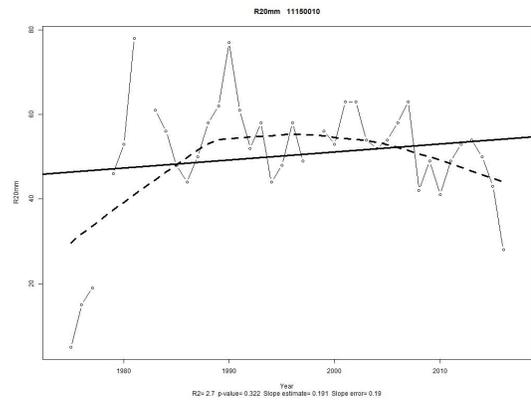


Figura 130: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 11150010

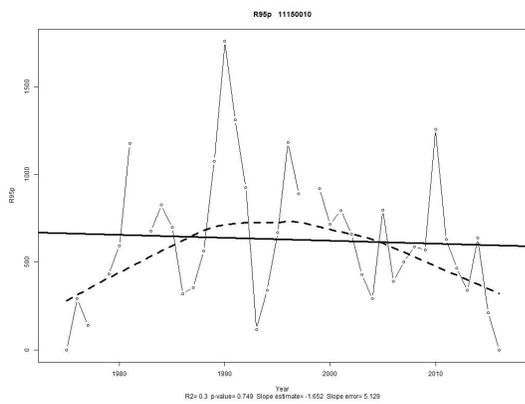


Figura 131: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 11150010

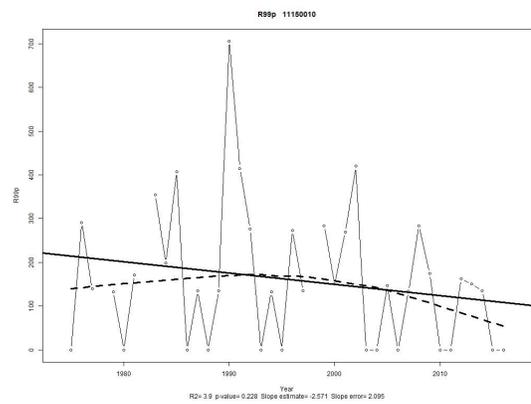


Figura 132: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 11150010

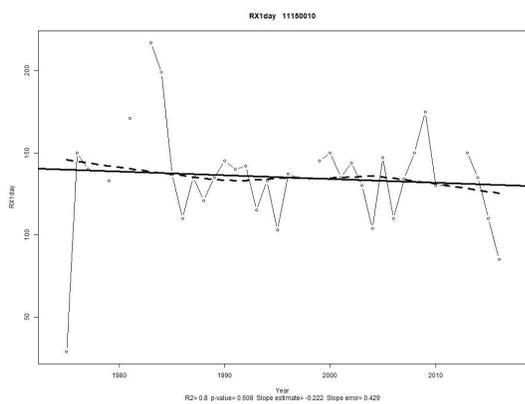


Figura 133: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 11150010

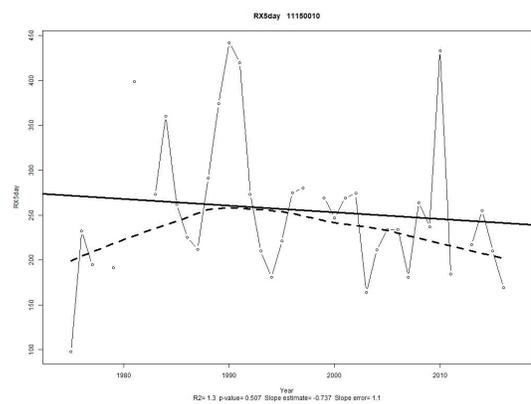


Figura 134: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 11150010

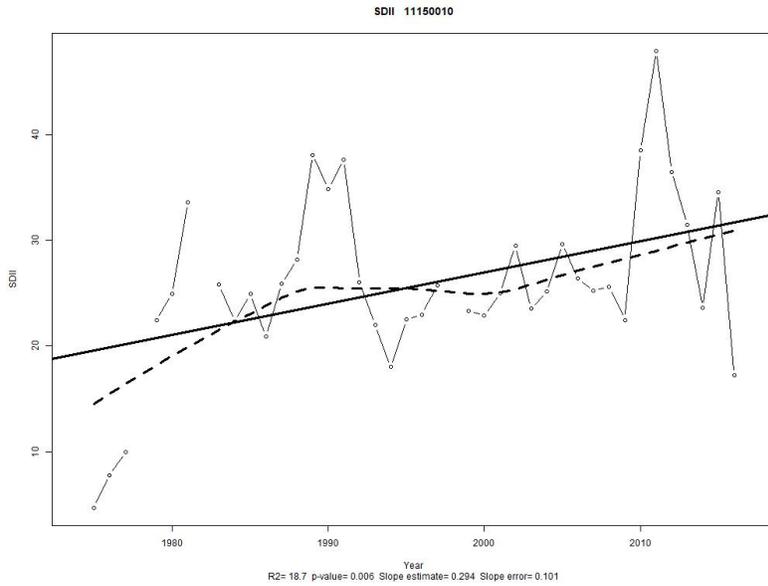


Figura 135: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 11150010

8.8.4. Estación 11150020

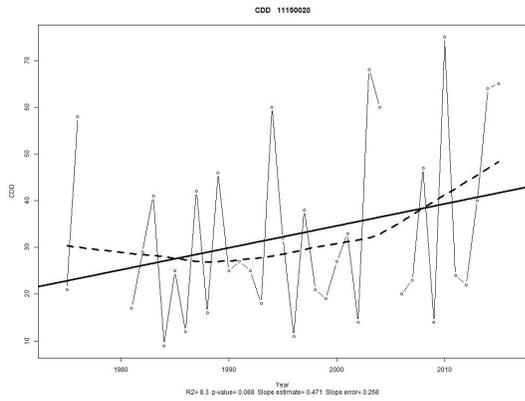


Figura 136: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 11150020

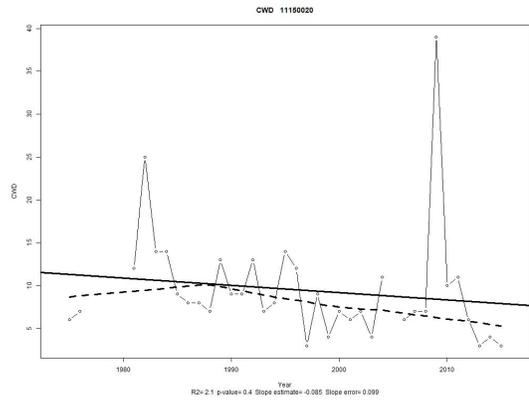


Figura 137: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 11150020

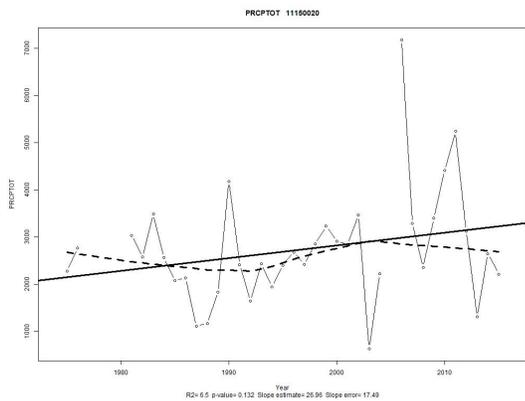


Figura 138: Precipitación total al año (mm) para la estación 11150020

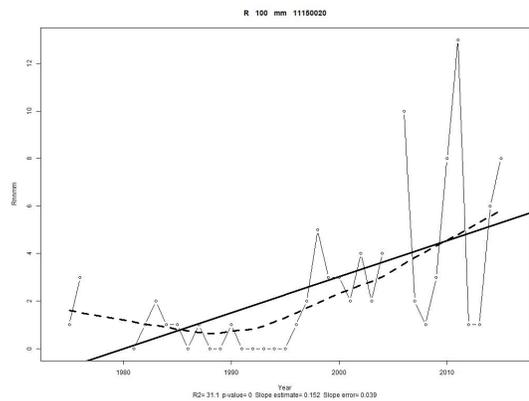


Figura 139: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 11150020

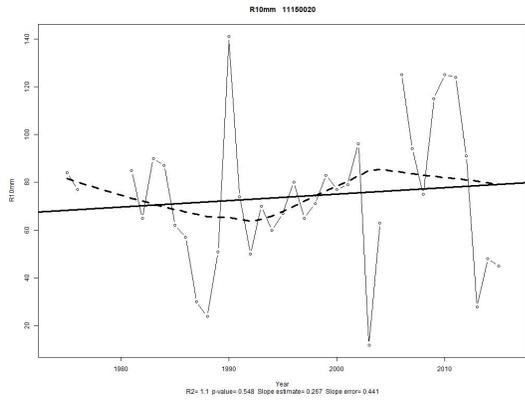


Figura 140: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 11150020

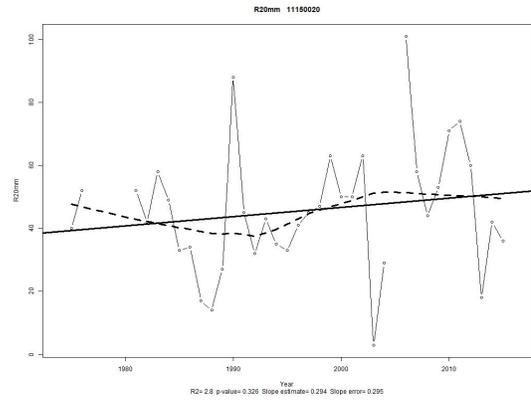


Figura 141: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 11150020

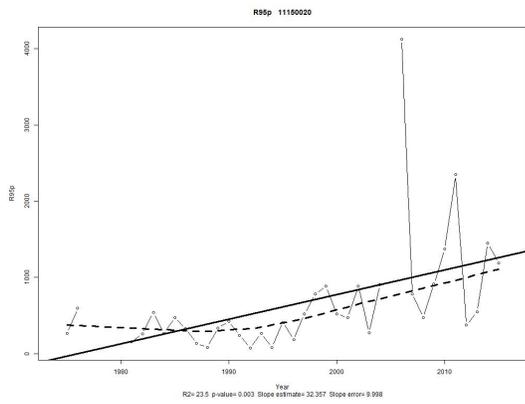


Figura 142: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. > 1,0mm) para la estación 11150020

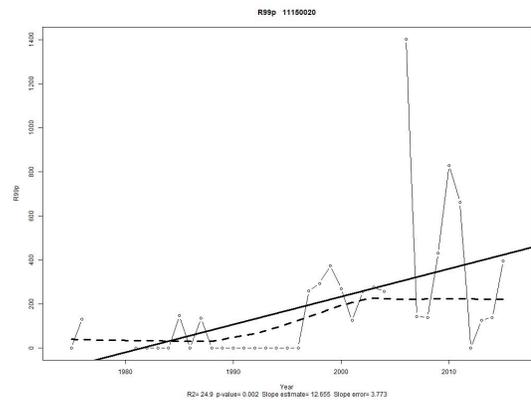


Figura 143: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. > 1,0mm) para la estación 11150020

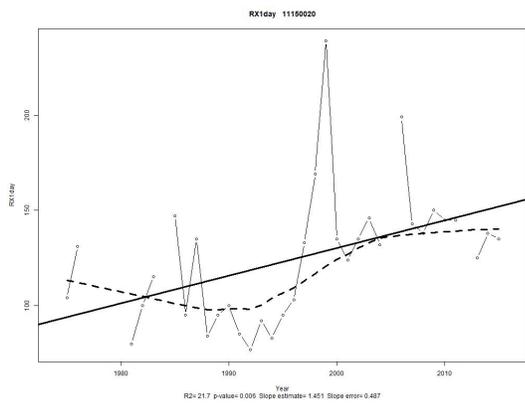


Figura 144: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 11150020

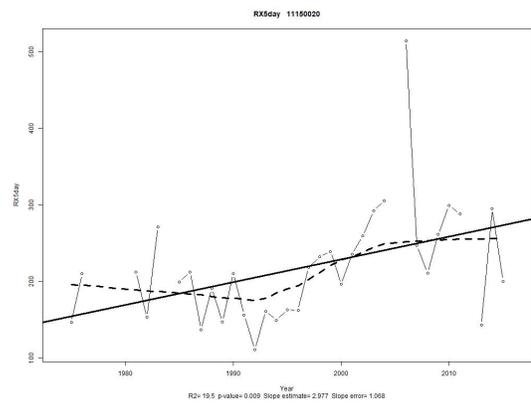


Figura 145: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 11150020

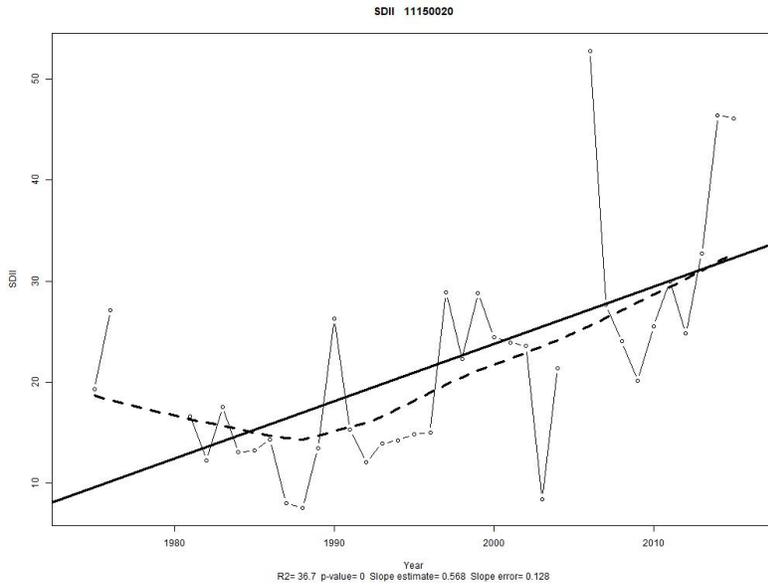


Figura 146: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 11150020

8.8.5. Estación 12010010

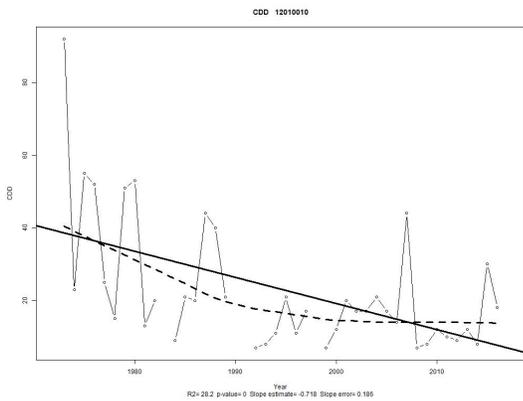


Figura 147: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010010

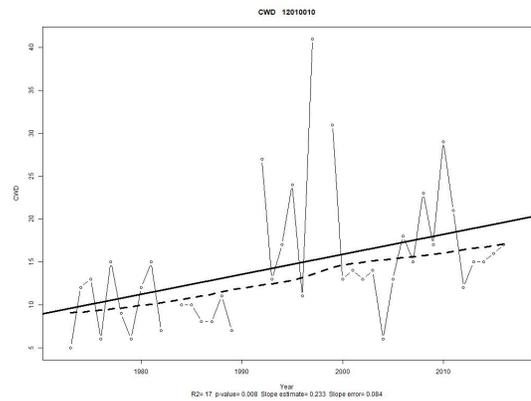


Figura 148: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010010

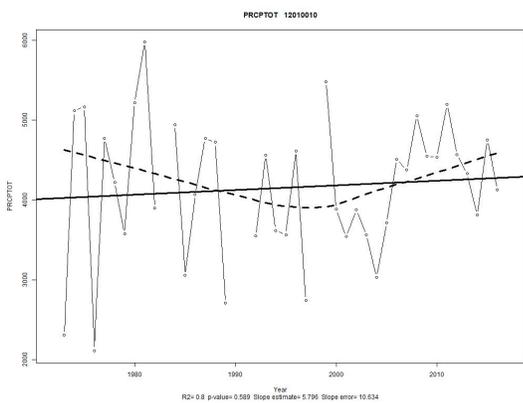


Figura 149: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010010

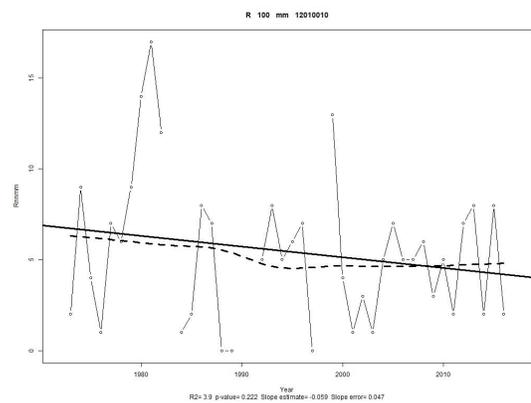


Figura 150: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010010

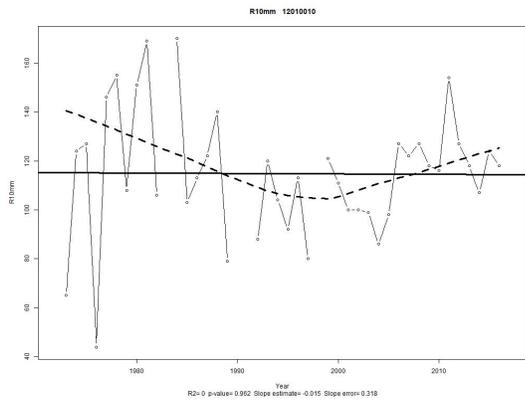


Figura 151: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010010

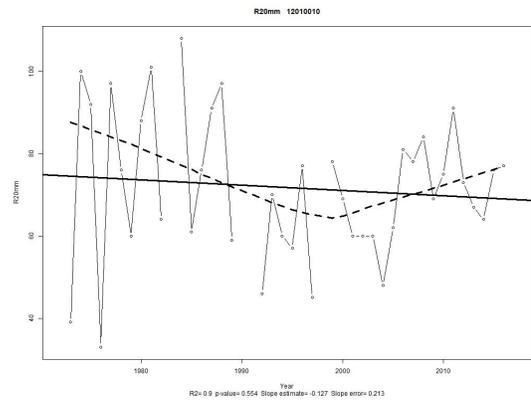


Figura 152: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010010

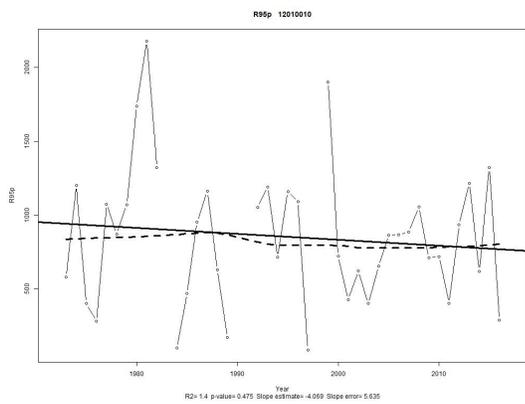


Figura 153: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 12010010

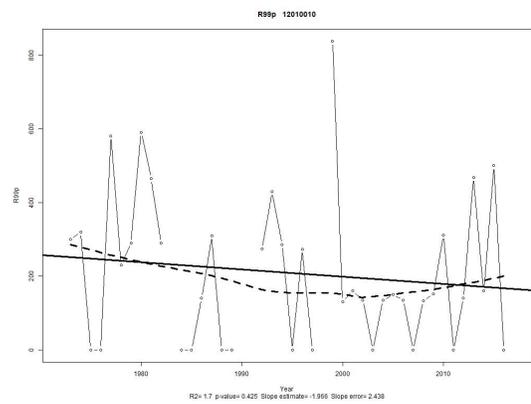


Figura 154: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 12010010

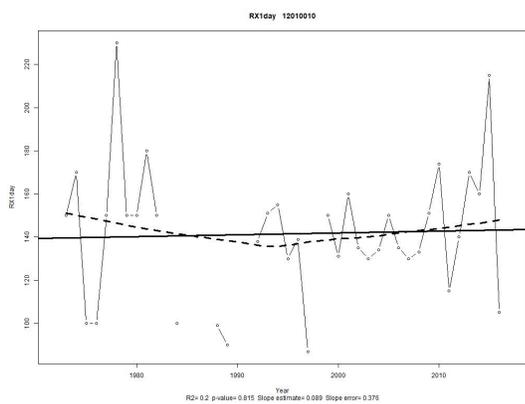


Figura 155: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010010

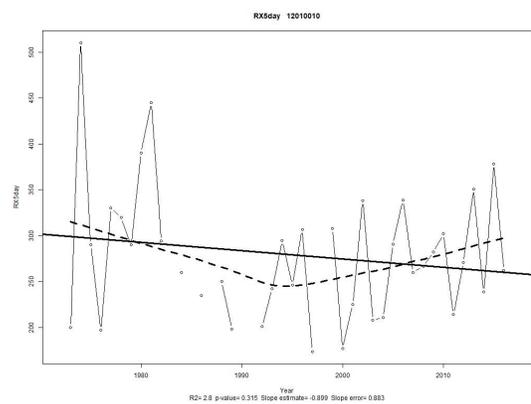


Figura 156: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010010

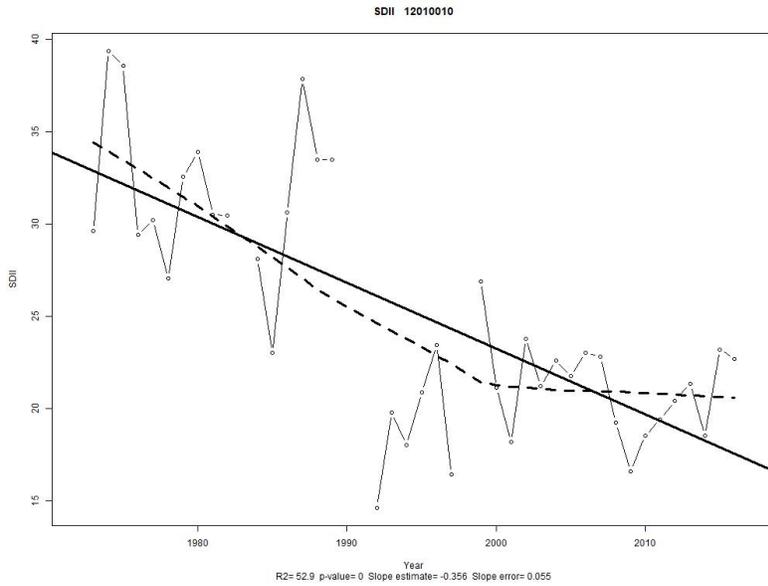


Figura 157: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 12010010

8.8.6. Estación 12010030

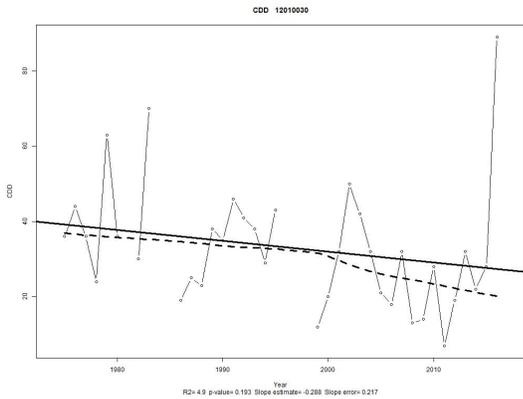


Figura 158: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010030

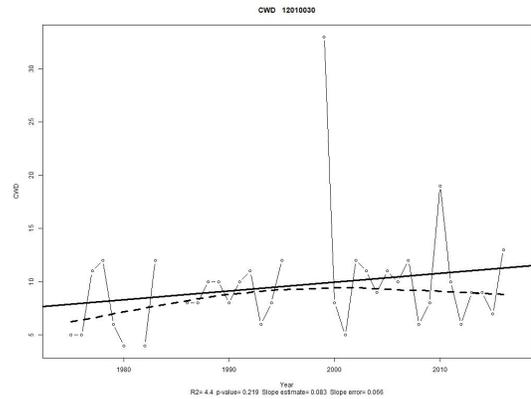


Figura 159: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010030

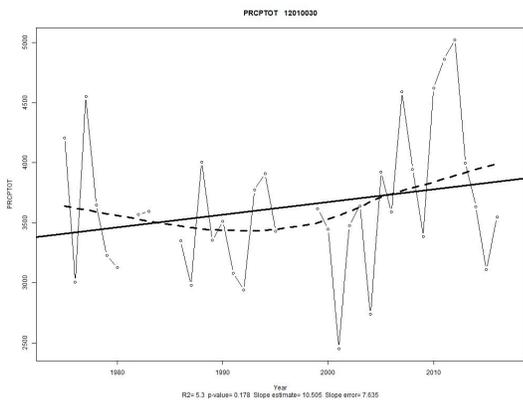


Figura 160: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010030

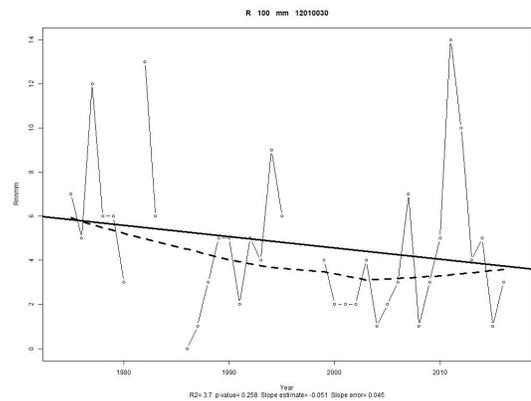


Figura 161: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010030

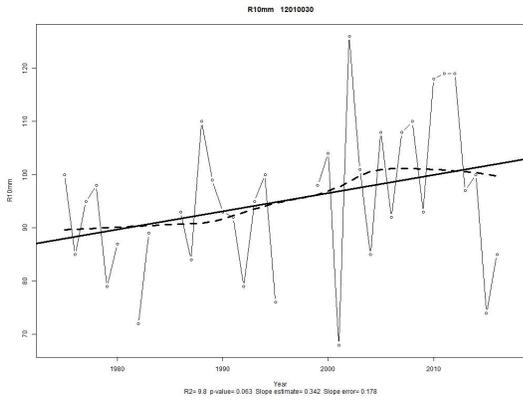


Figura 162: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010030

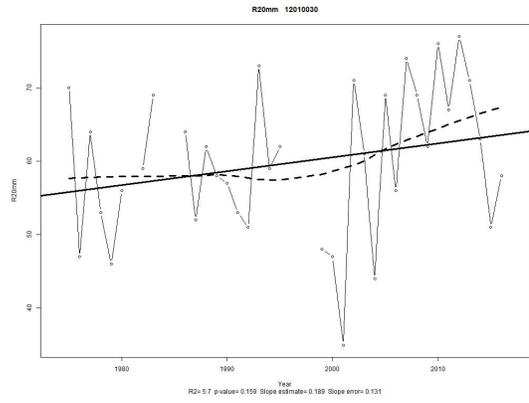


Figura 163: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010030

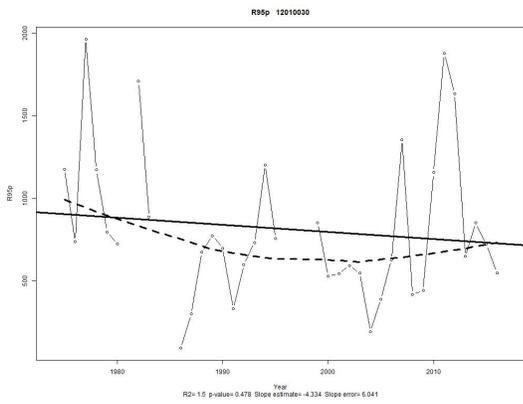


Figura 164: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 12010030

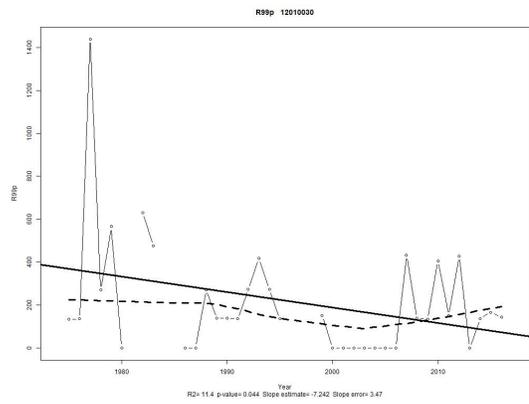


Figura 165: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 12010030

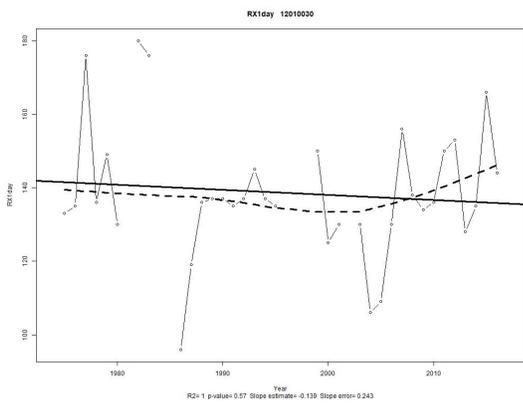


Figura 166: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010030

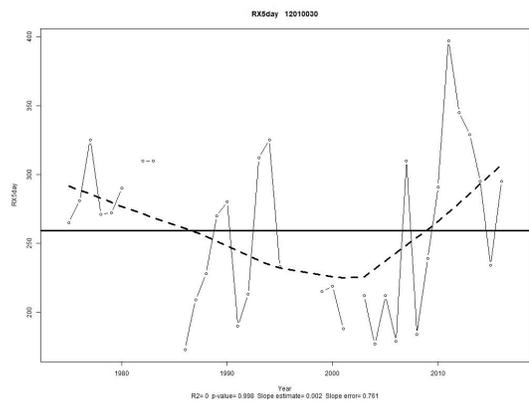


Figura 167: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010030

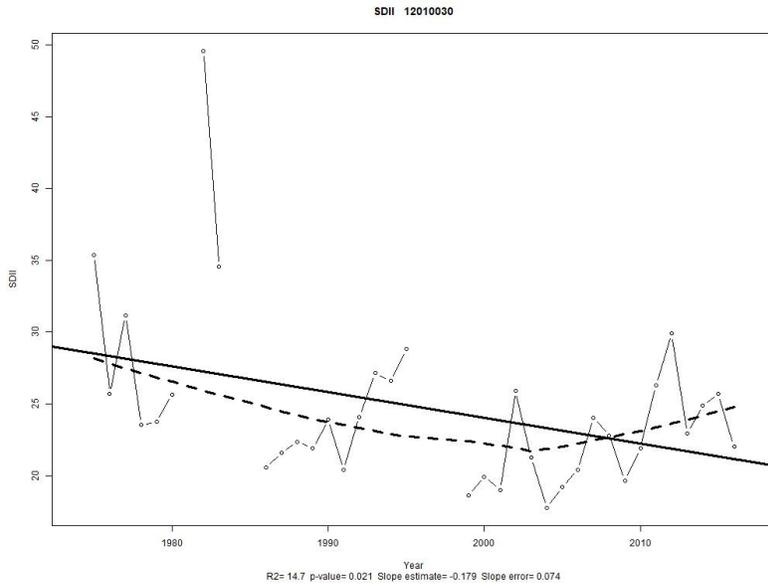


Figura 168: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 12010030

8.8.7. Estación 12010060

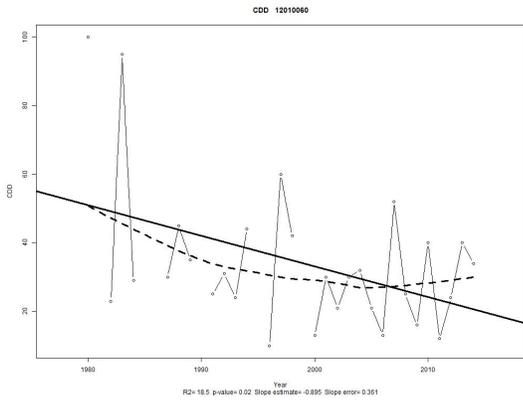


Figura 169: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010060

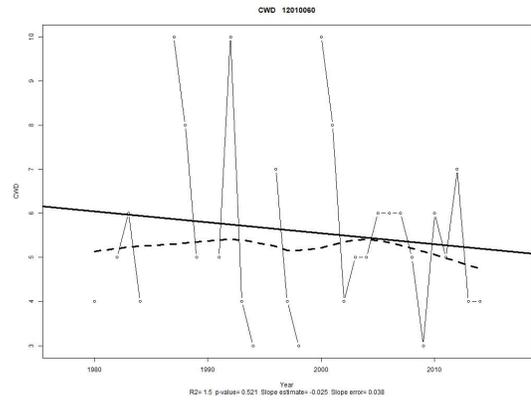


Figura 170: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010060

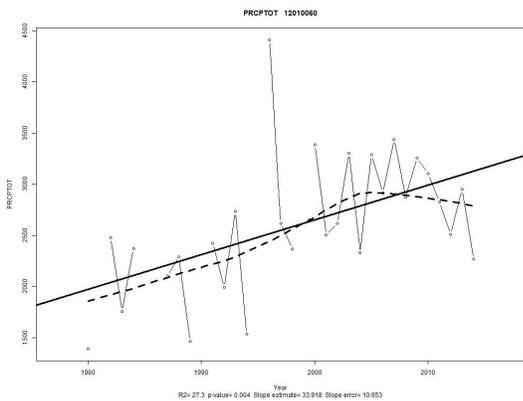


Figura 171: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010060

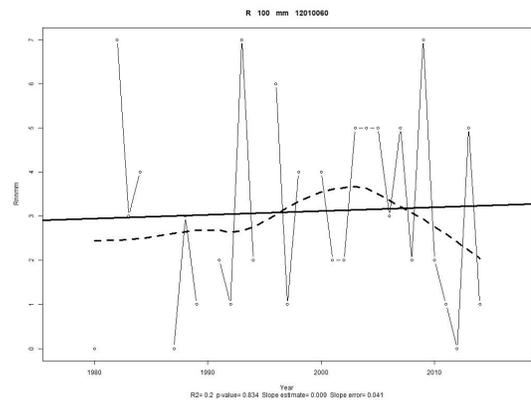


Figura 172: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010060

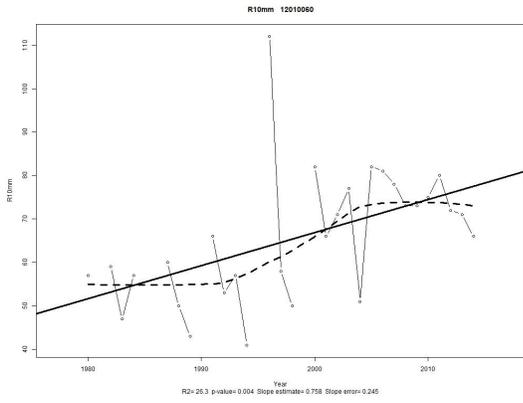


Figura 173: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010060

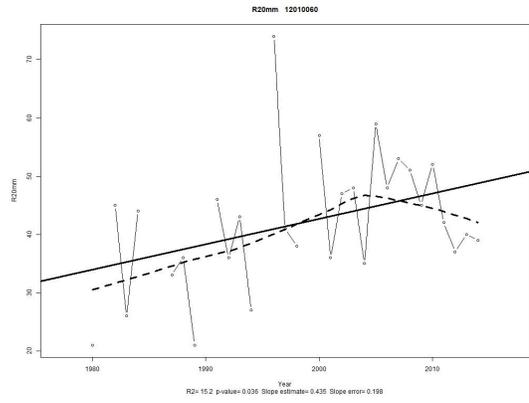


Figura 174: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010060

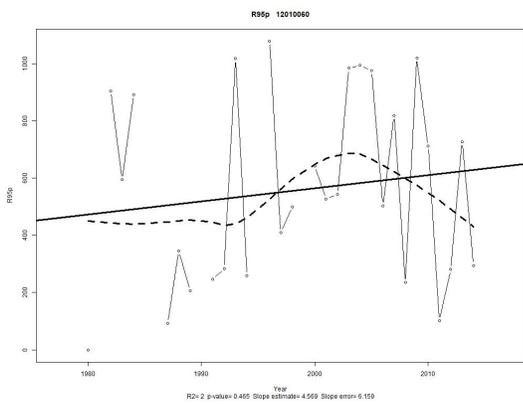


Figura 175: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010060

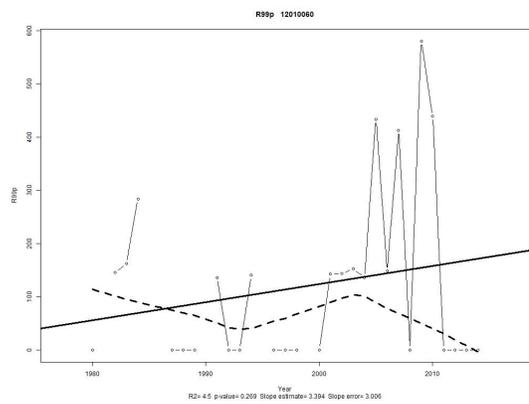


Figura 176: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010060

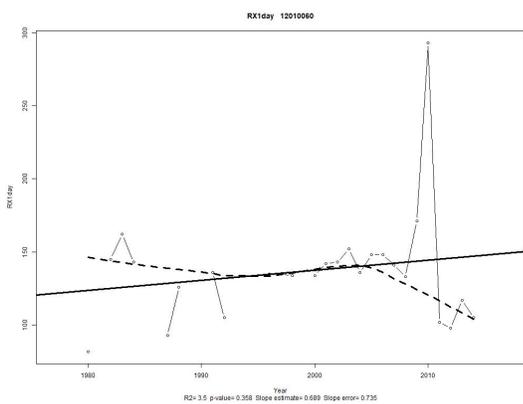


Figura 177: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010060

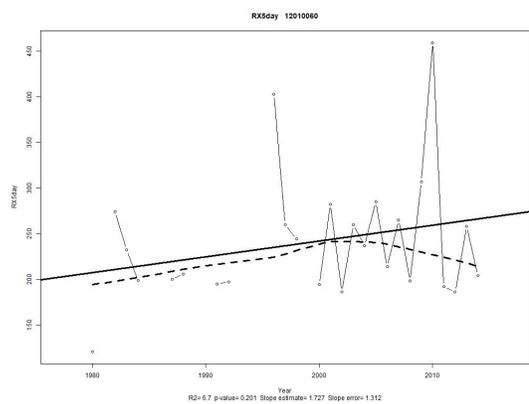


Figura 178: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010060

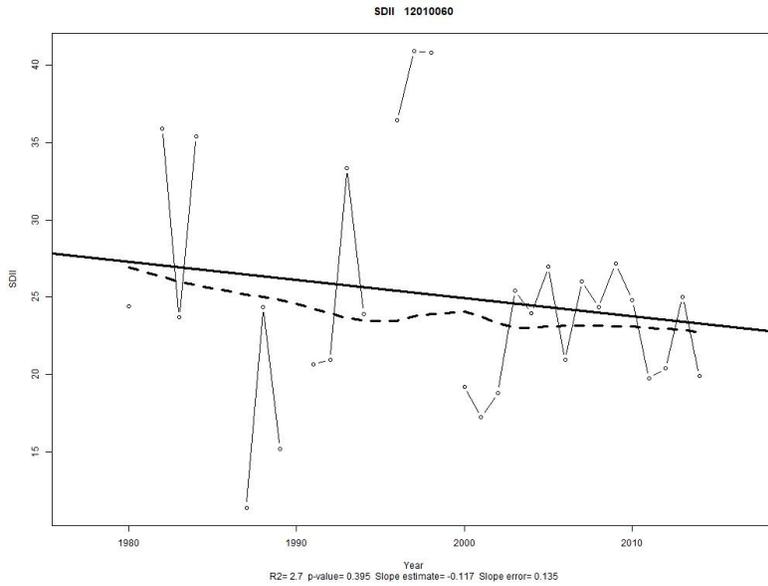


Figura 179: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 12010060

8.8.8. Estación 12010070

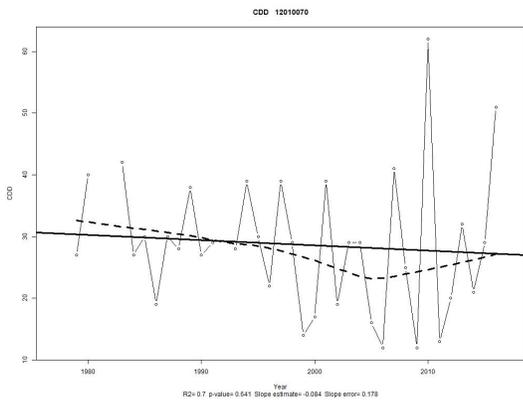


Figura 180: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010070

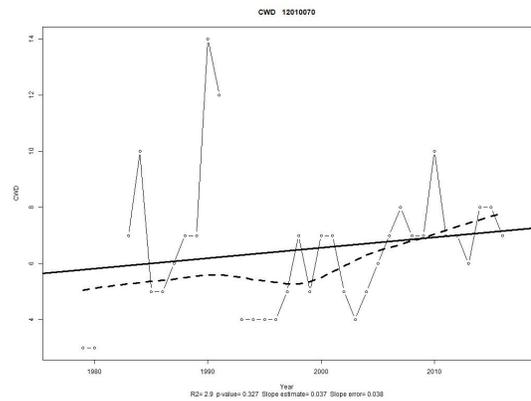


Figura 181: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010070

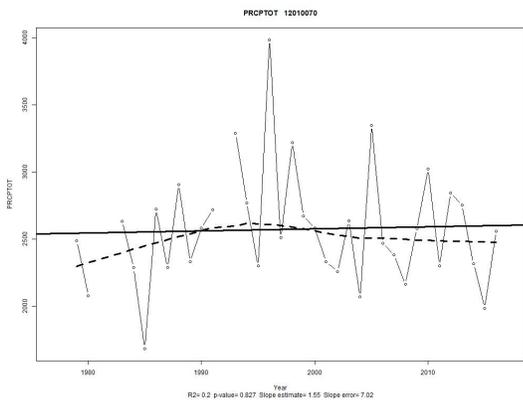


Figura 182: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010070

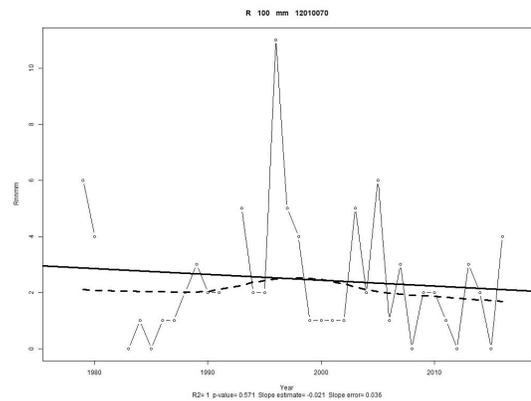


Figura 183: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010070

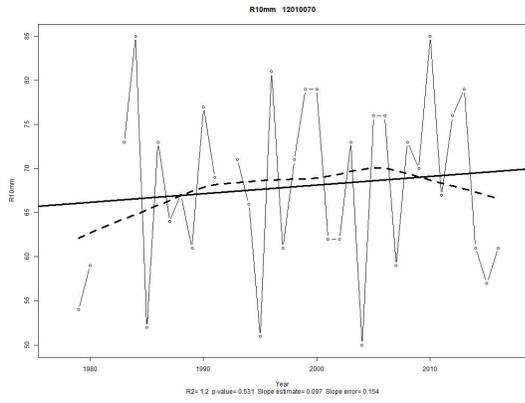


Figura 184: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010070

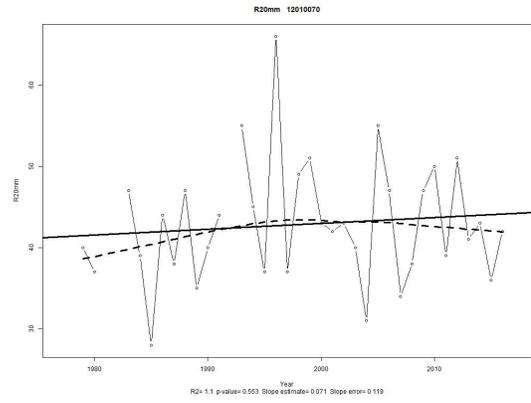


Figura 185: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010070

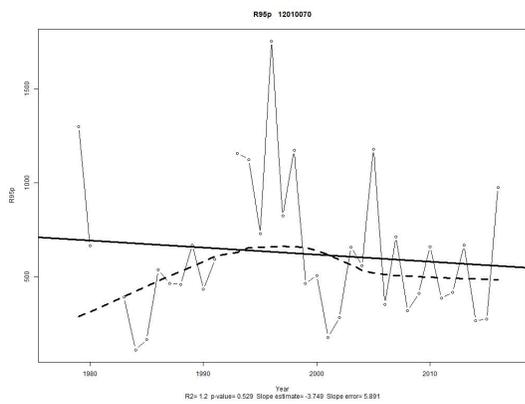


Figura 186: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 12010070

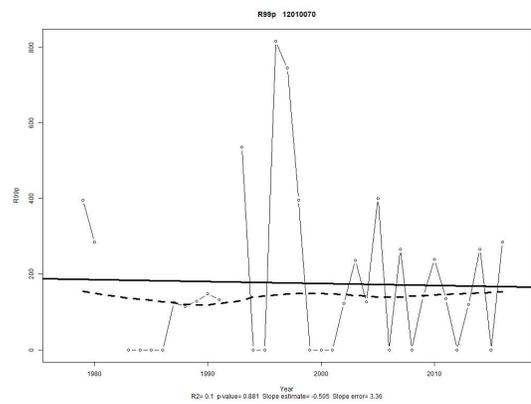


Figura 187: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) para la estación 12010070

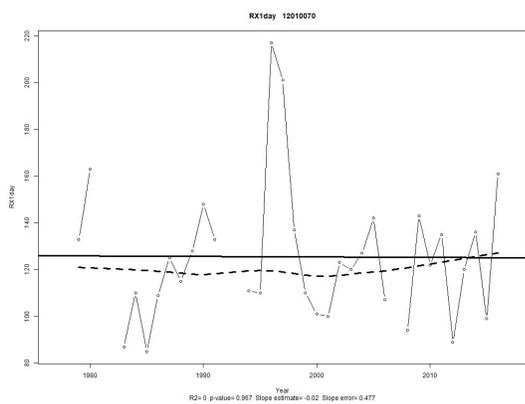


Figura 188: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010070

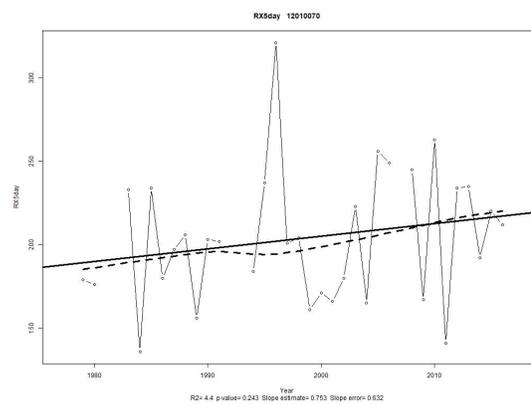


Figura 189: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010070

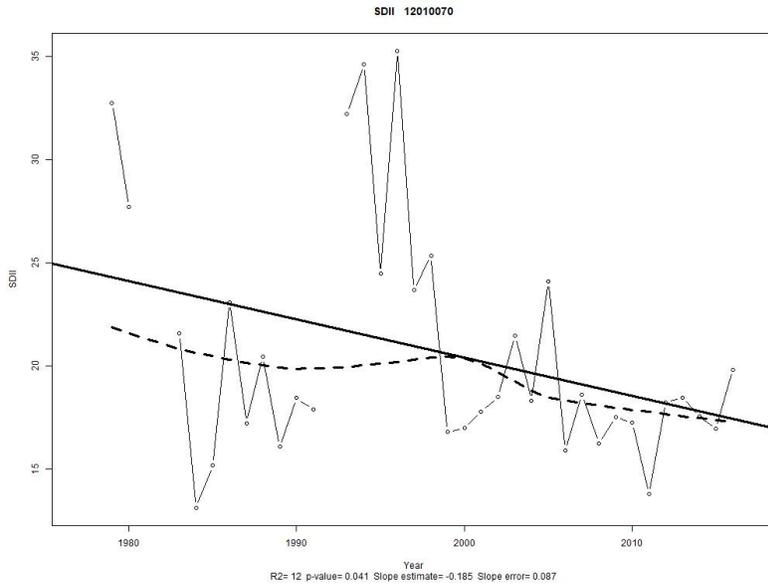


Figura 190: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0\text{mm}$) (mm/día) para la estación 12010070

8.8.9. Estación 12010090

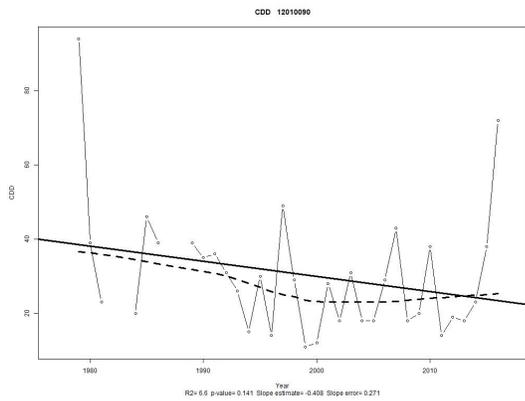


Figura 191: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010090

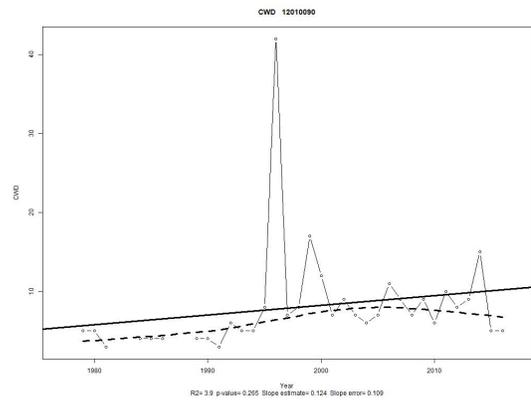


Figura 192: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010090

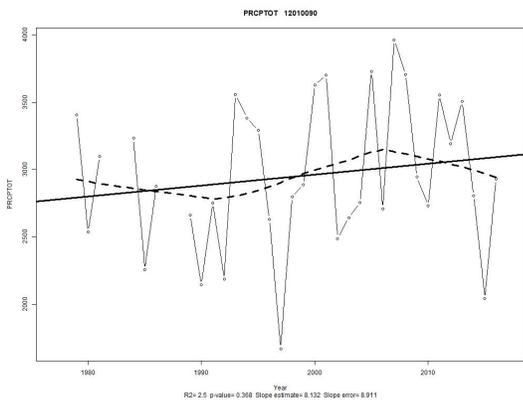


Figura 193: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010090

Rclimdex_pr/12010090_R100mm.jpg

Figura 194: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010090

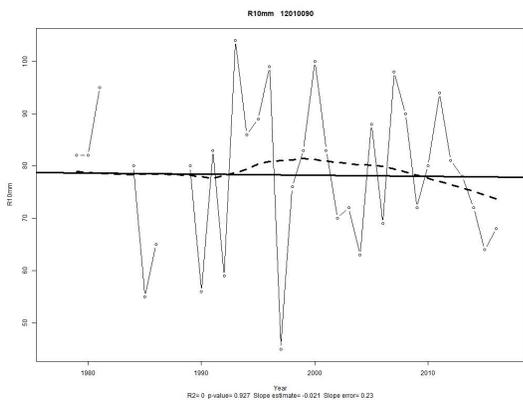


Figura 195: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010090

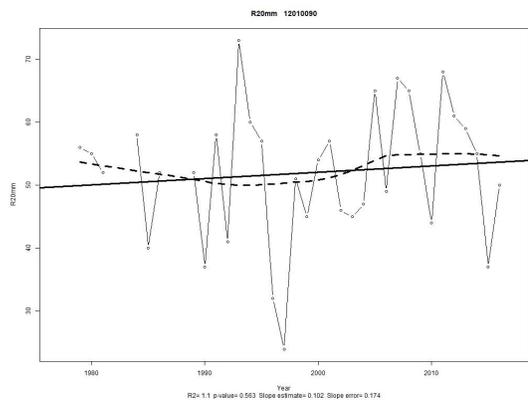


Figura 196: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010090

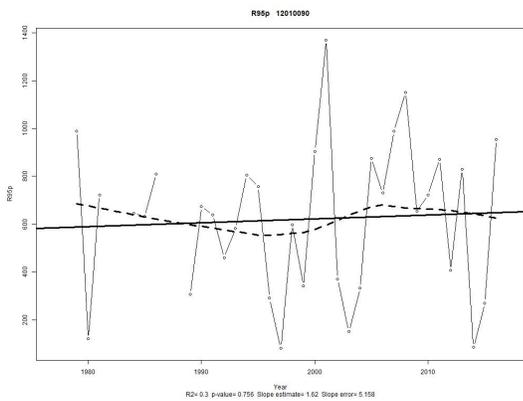


Figura 197: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010090

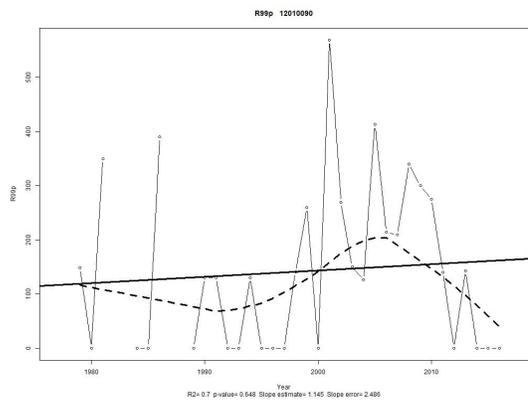


Figura 198: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010090

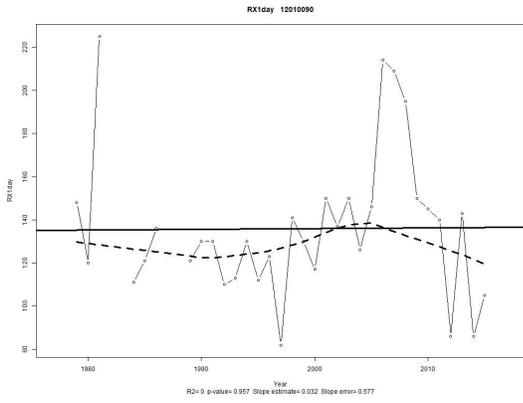


Figura 199: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010090

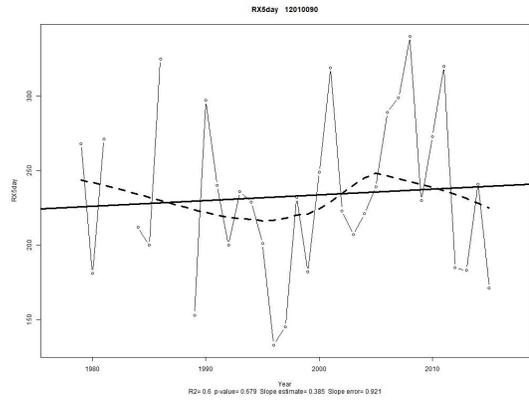


Figura 200: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010090

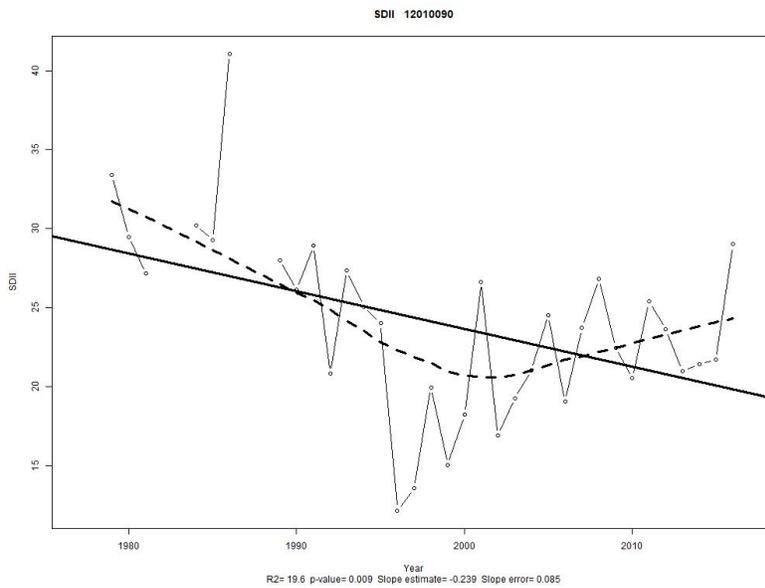


Figura 201: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0$ mm) (mm/día) para la estación 12010090

8.8.10. Estación 12010100

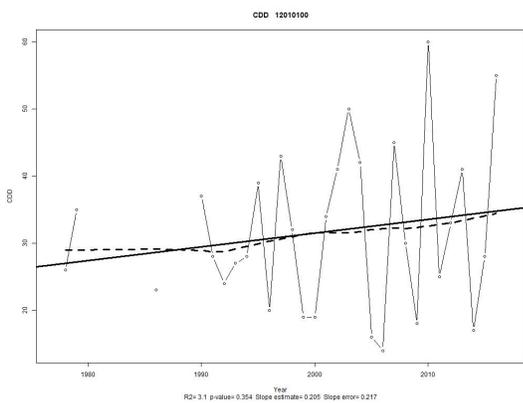


Figura 202: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010100

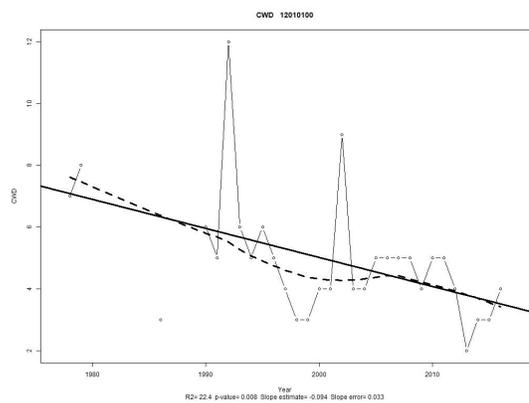


Figura 203: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010100

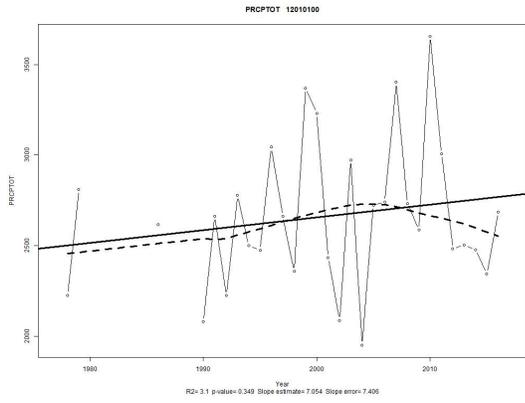


Figura 204: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010100

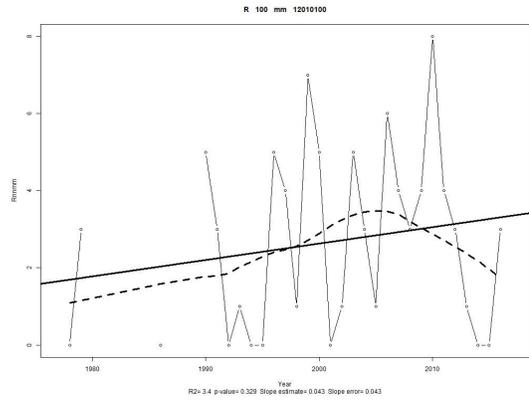


Figura 205: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010100

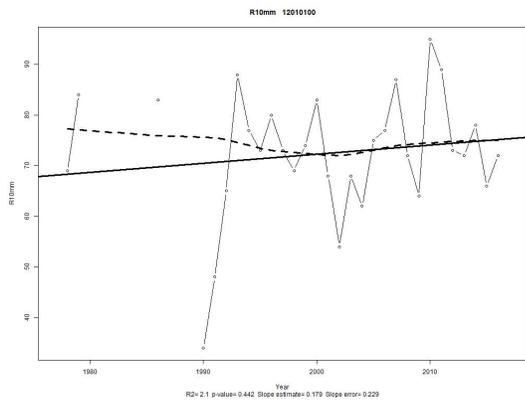


Figura 206: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010100

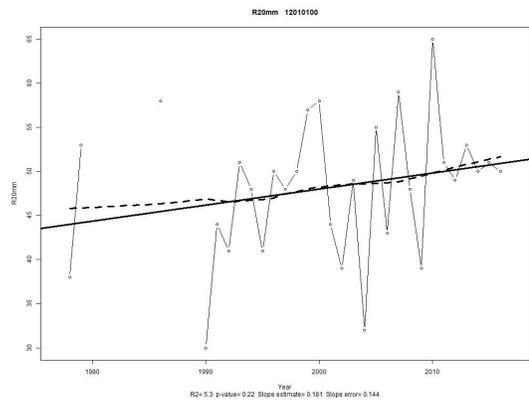


Figura 207: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010100

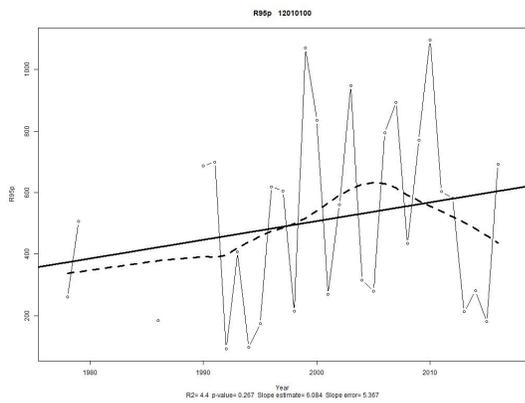


Figura 208: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010100

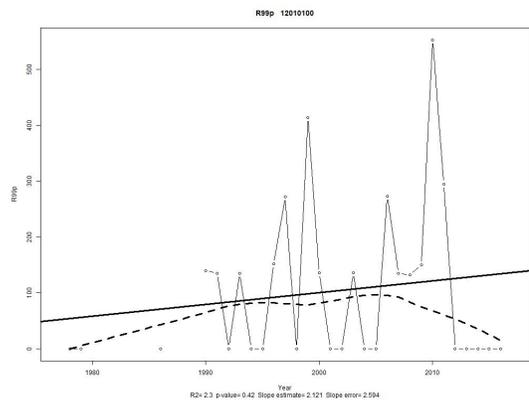


Figura 209: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010100

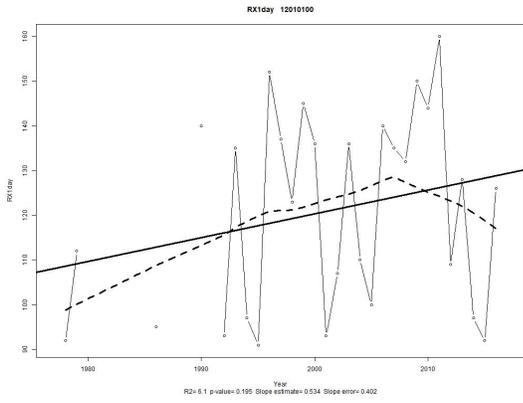


Figura 210: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010100

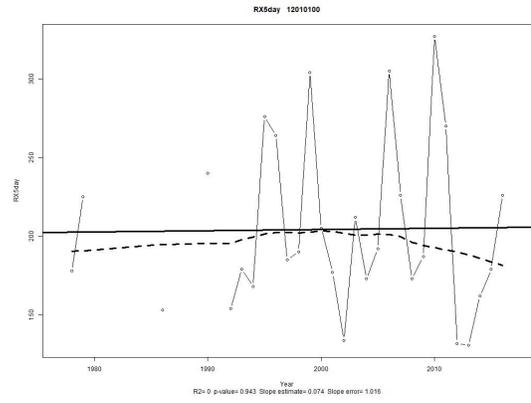


Figura 211: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010100

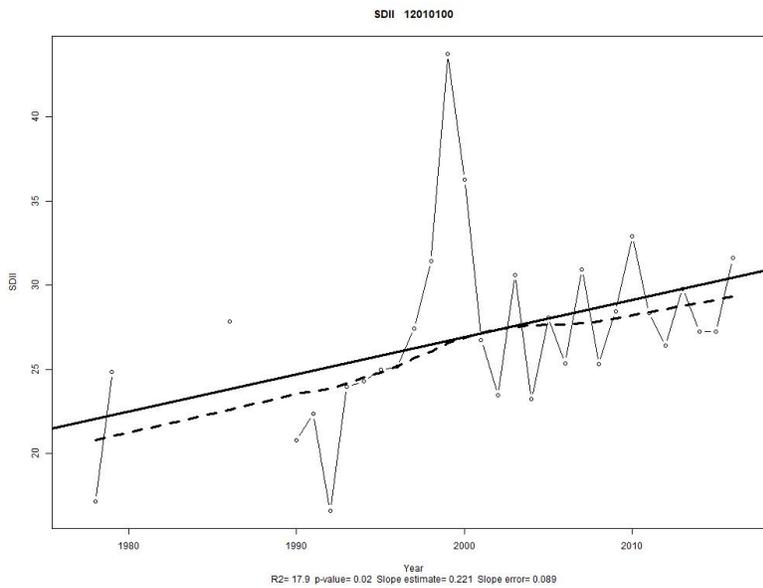


Figura 212: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0$ mm) (mm/día) para la estación 12010100

8.8.11. Estación 12010110

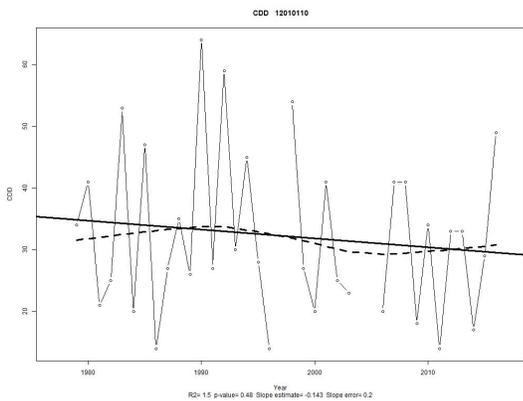


Figura 213: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010110

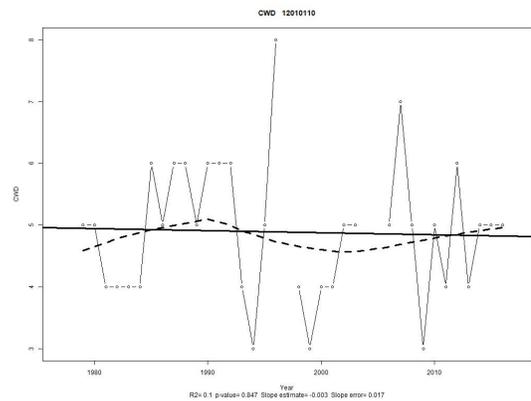


Figura 214: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010110

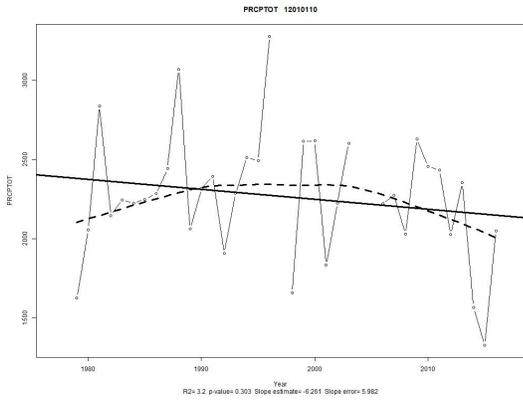


Figura 215: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010110

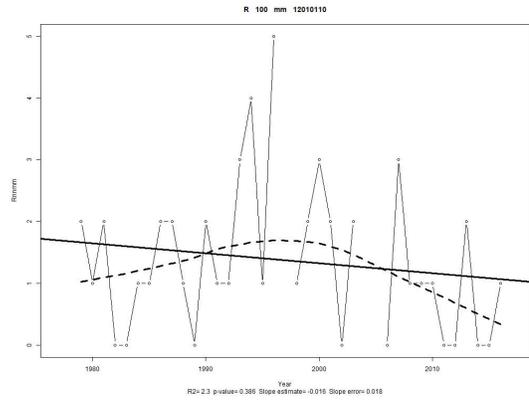


Figura 216: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010110

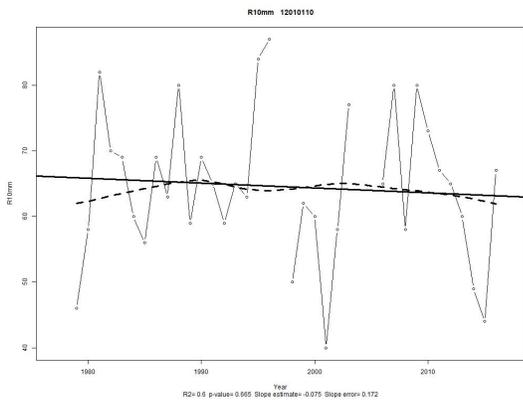


Figura 217: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010110

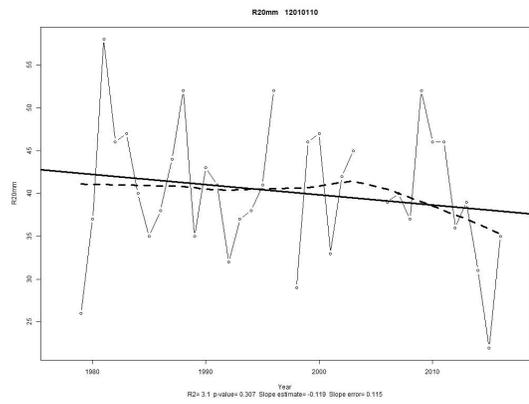


Figura 218: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010110

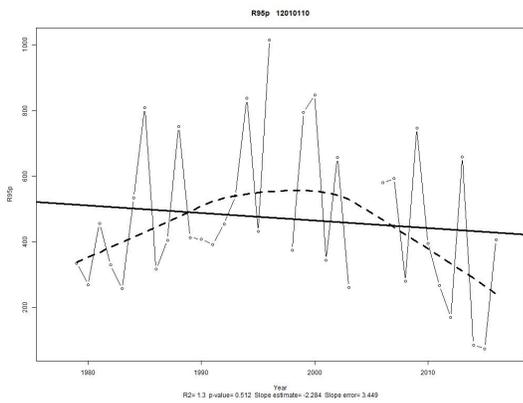


Figura 219: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010110

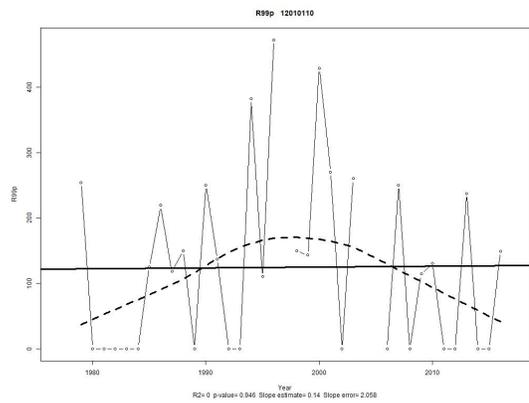


Figura 220: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010110

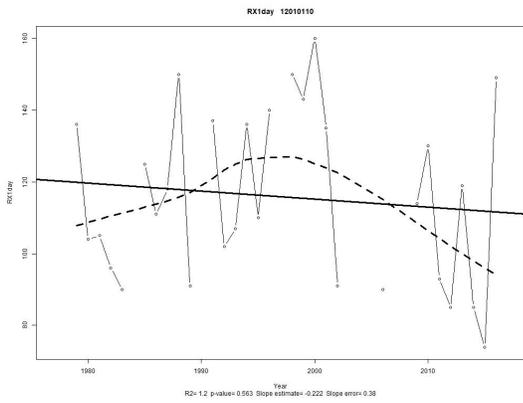


Figura 221: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010110

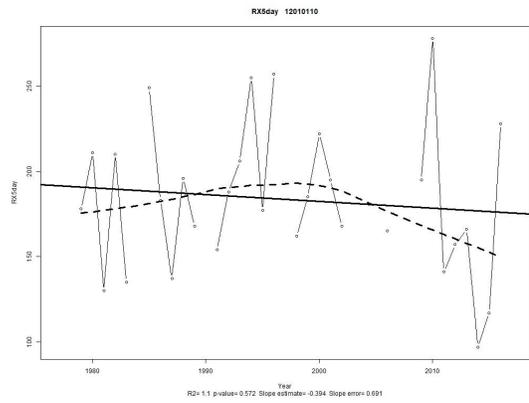


Figura 222: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010110

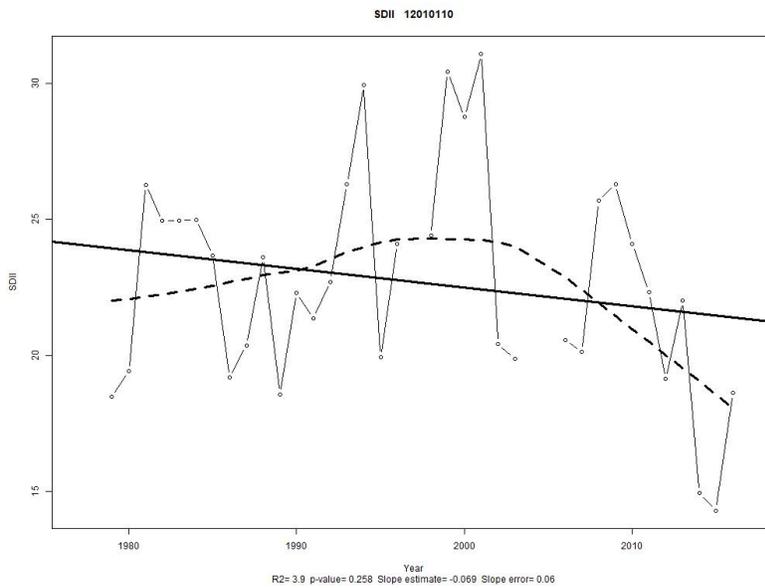


Figura 223: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0$ mm) (mm/día) para la estación 12010110

8.8.12. Estación 12010120

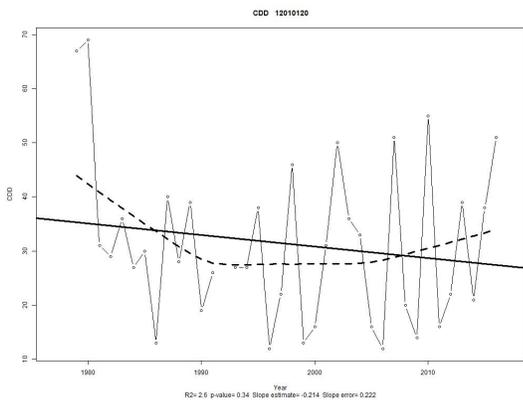


Figura 224: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12010120

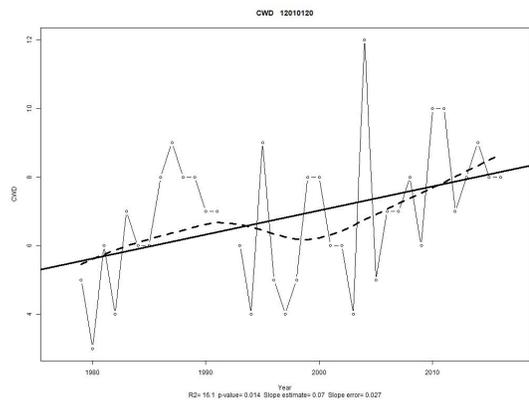


Figura 225: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12010120

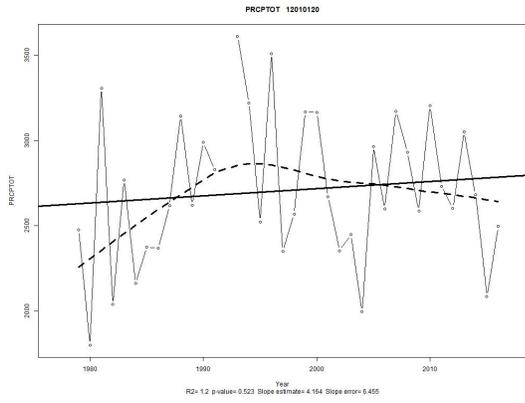


Figura 226: Precipitación total al año (mm) para la estación 12010120

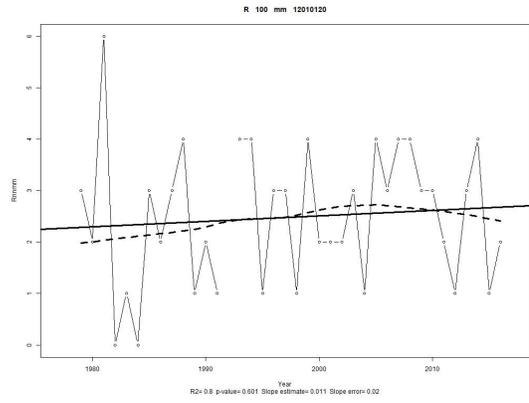


Figura 227: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12010120

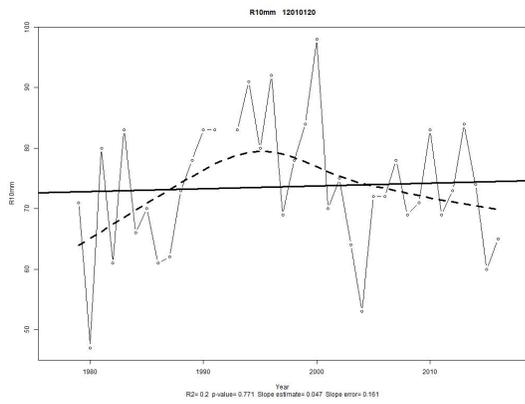


Figura 228: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12010120

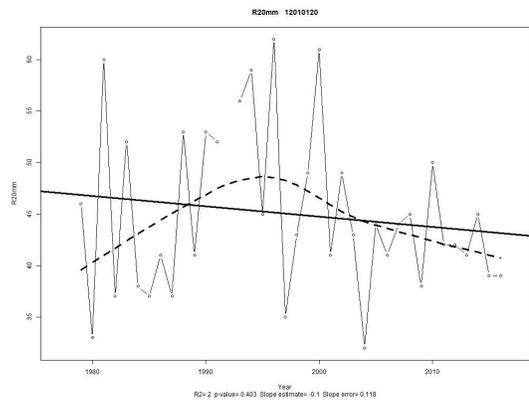


Figura 229: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12010120

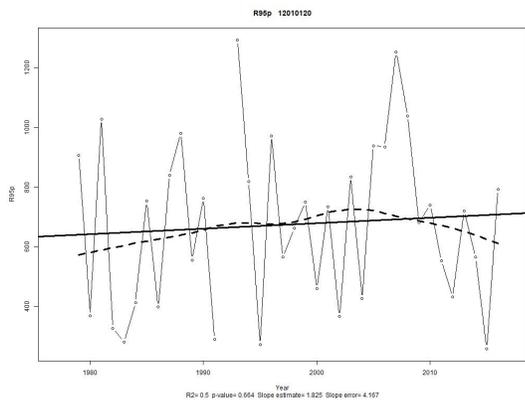


Figura 230: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010120

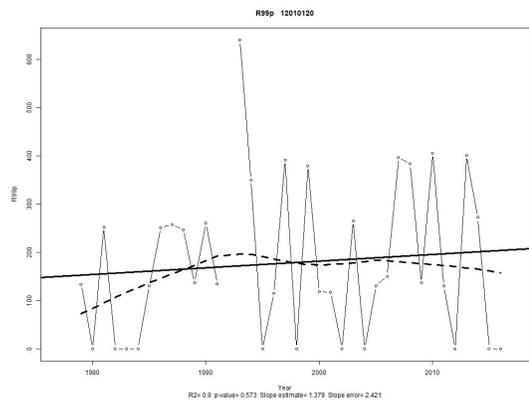


Figura 231: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. >1,0mm) para la estación 12010120

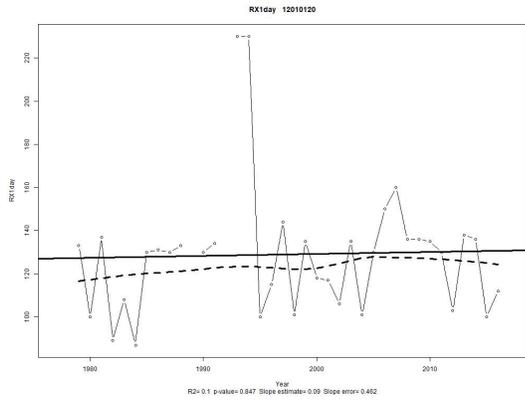


Figura 232: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12010120

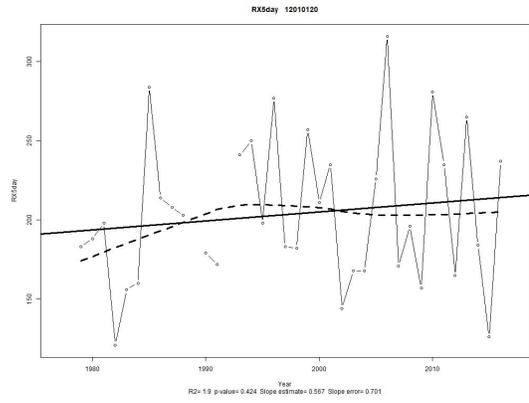


Figura 233: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12010120

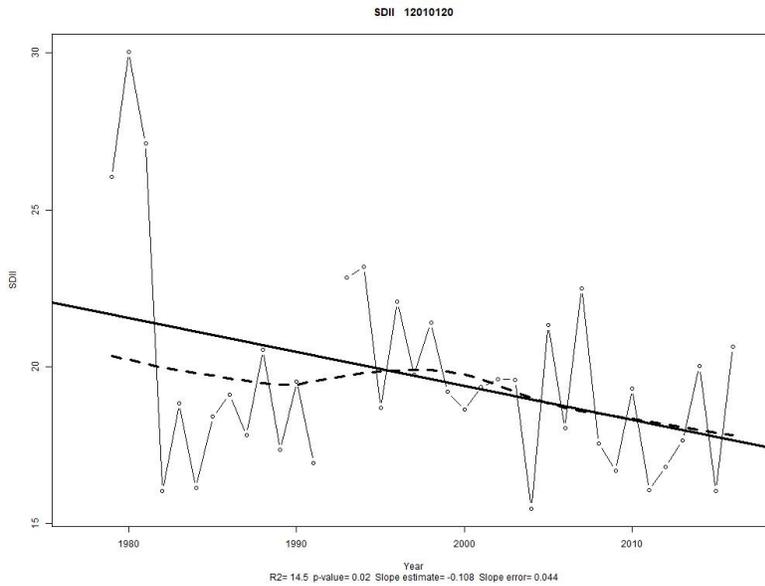


Figura 234: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. >1,0mm) (mm/día) para la estación 12010120

8.8.13. Estación 12015020

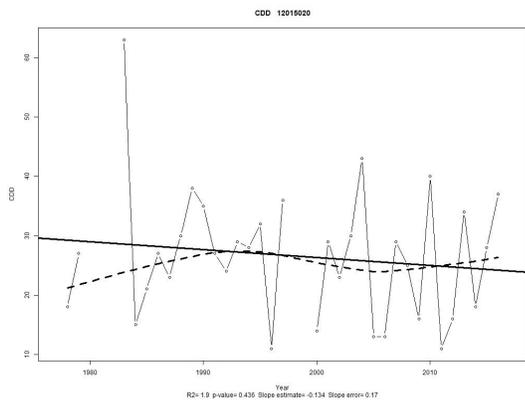


Figura 235: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12015020

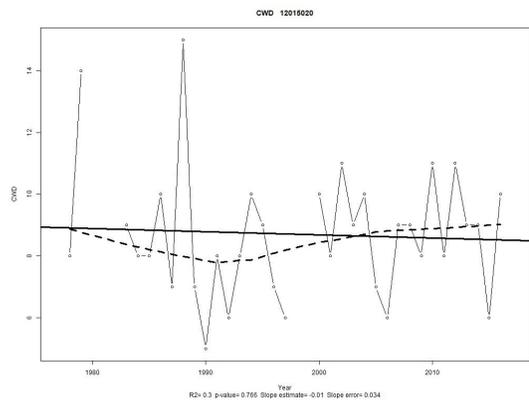


Figura 236: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12015020

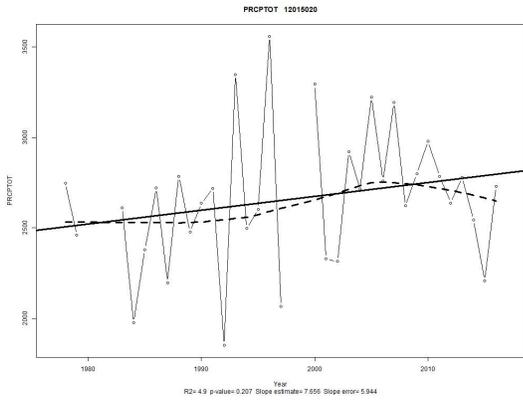


Figura 237: Precipitación total al año (mm) para la estación 12015020

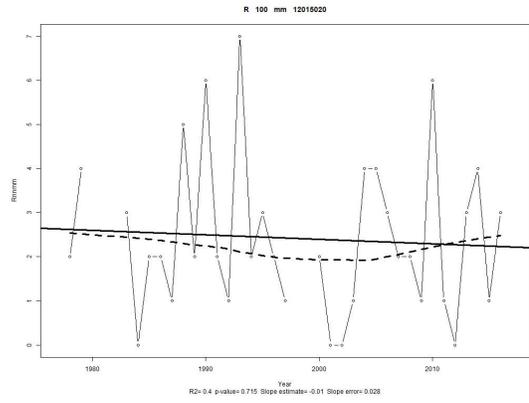


Figura 238: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12015020

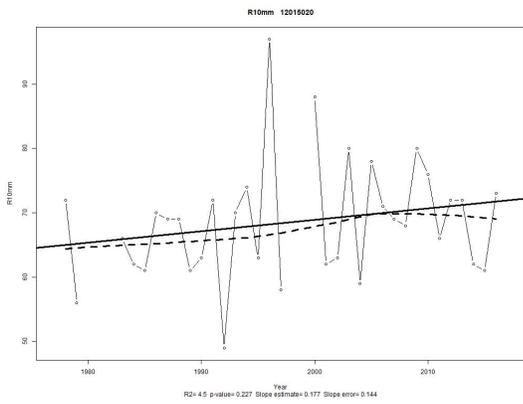


Figura 239: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12015020

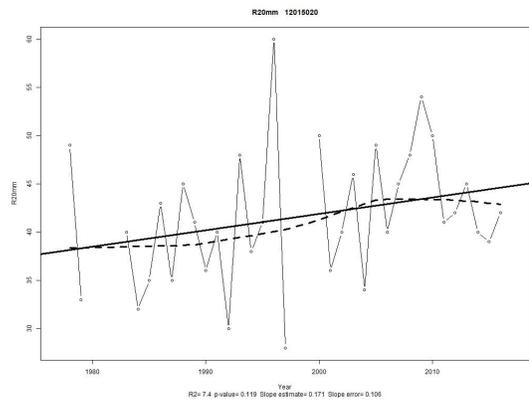


Figura 240: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12015020

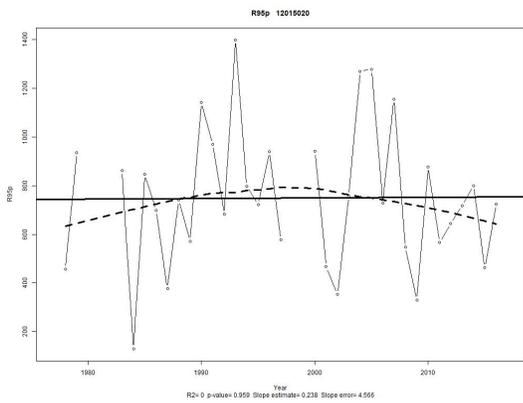


Figura 241: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0$ mm) para la estación 12015020

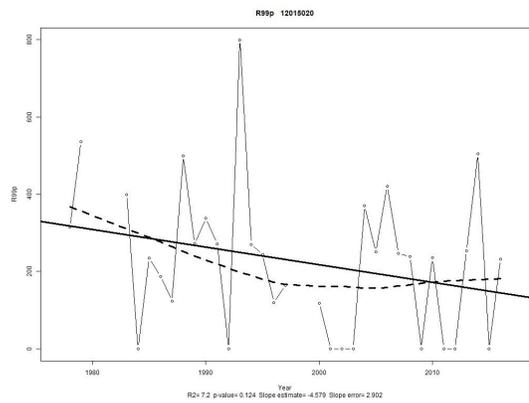


Figura 242: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0$ mm) para la estación 12015020

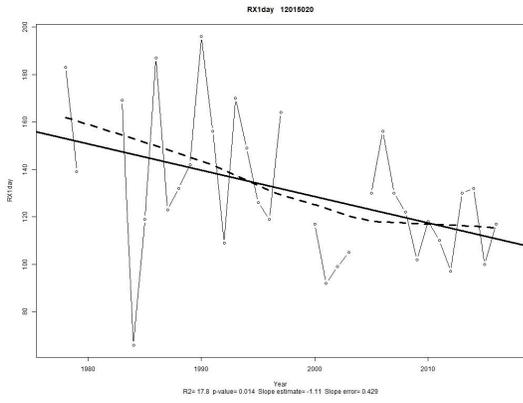


Figura 243: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12015020

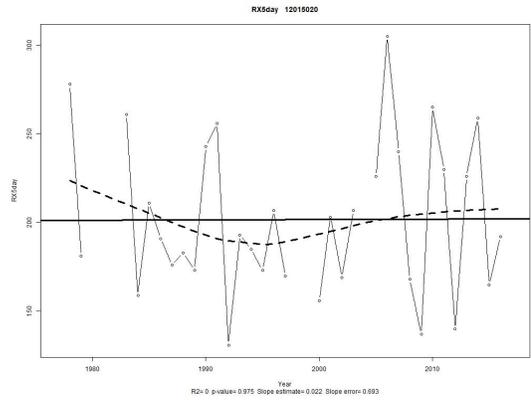


Figura 244: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12015020

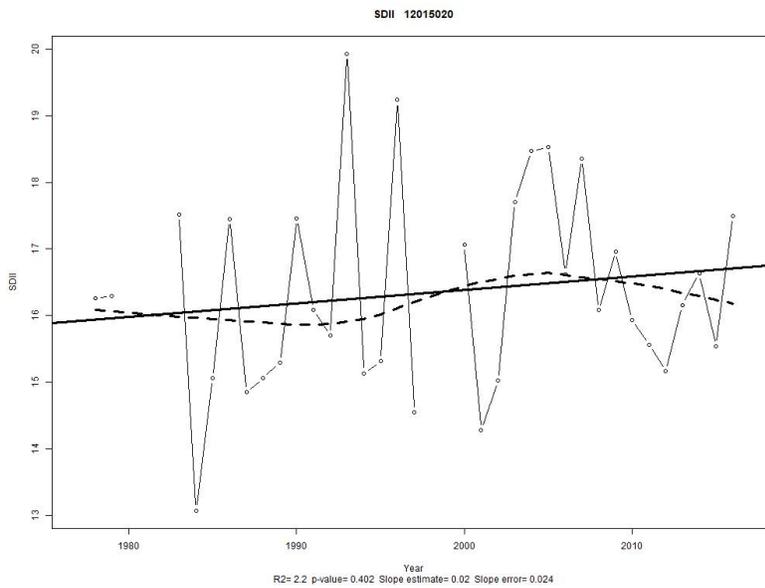


Figura 245: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0$ mm) (mm/día) para la estación 12015020

8.8.14. Estación 12020010

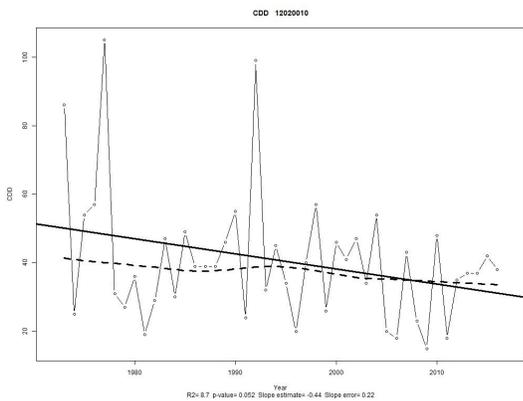


Figura 246: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12020010

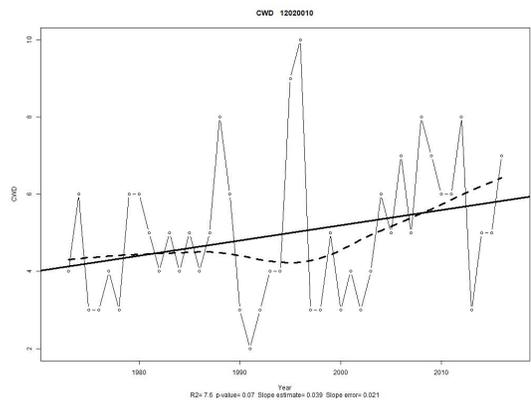


Figura 247: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12020010

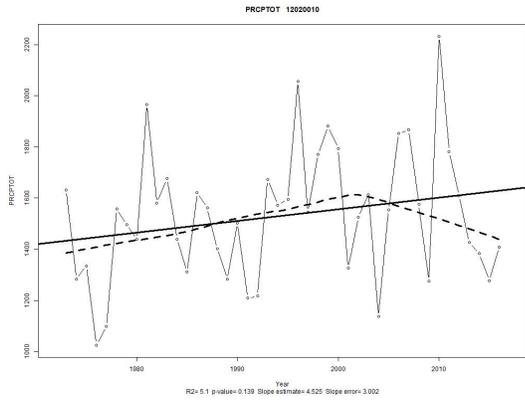


Figura 248: Precipitación total al año (mm) para la estación 12020010

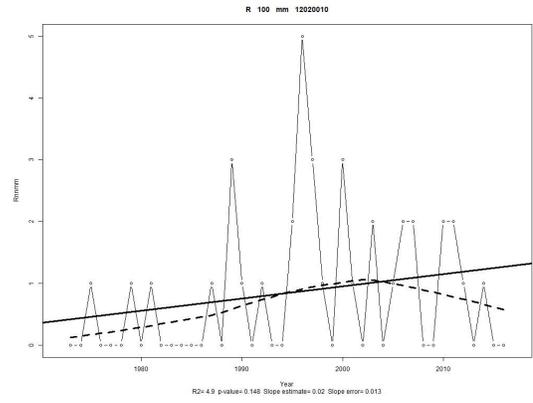


Figura 249: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12020010

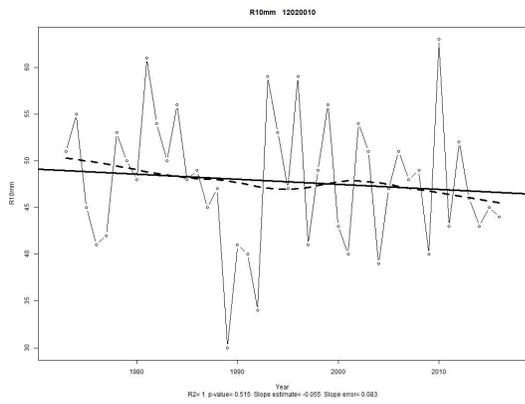


Figura 250: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12020010

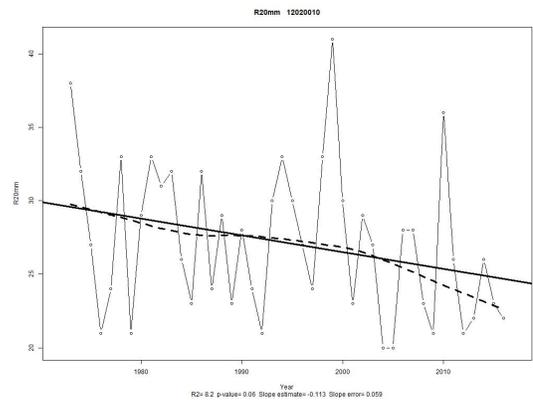


Figura 251: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12020010

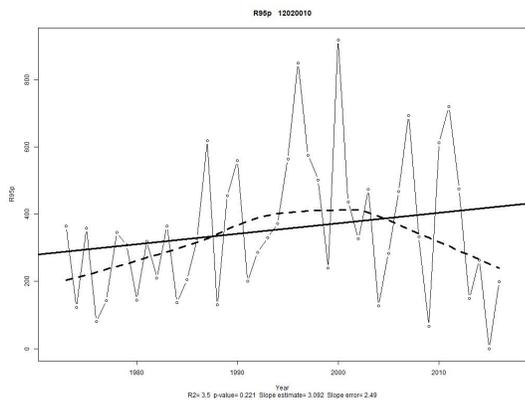


Figura 252: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0$ mm) para la estación 12020010

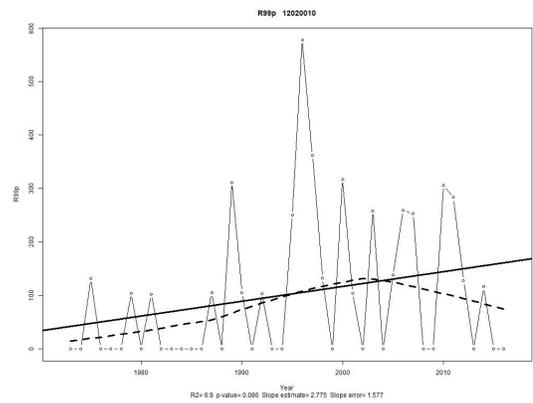


Figura 253: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0$ mm) para la estación 12020010

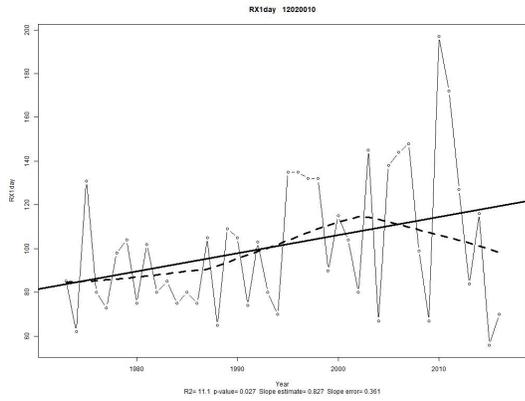


Figura 254: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12020010

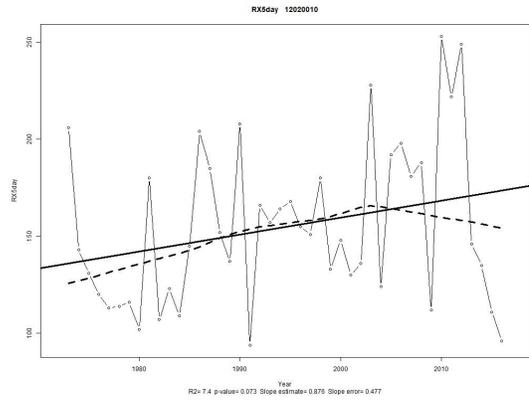


Figura 255: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12020010

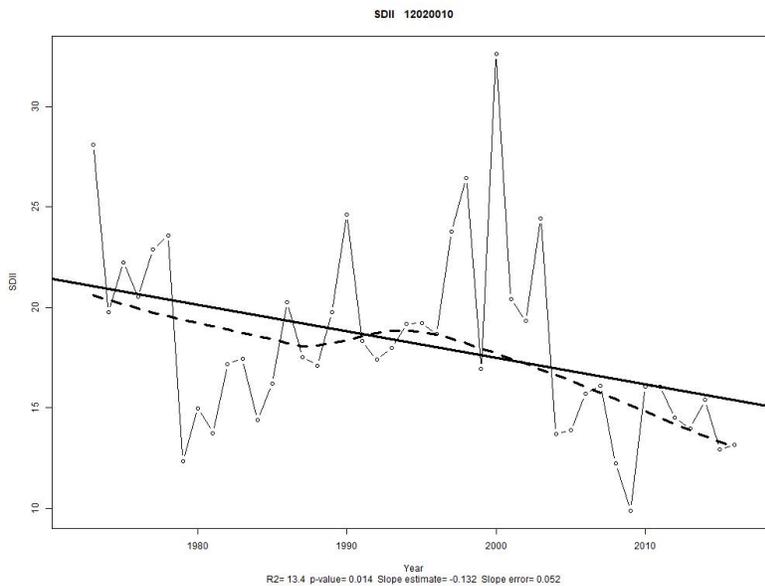


Figura 256: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. >1,0mm) (mm/día) para la estación 12020010

8.8.15. Estación 12030020

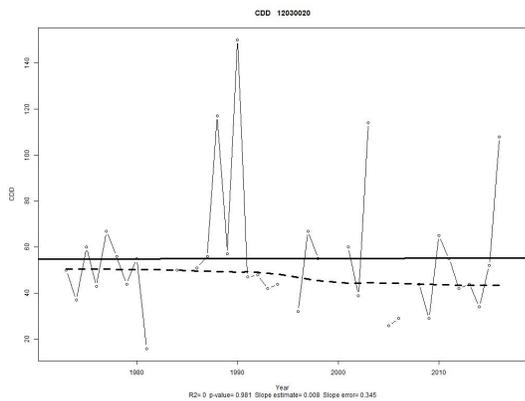


Figura 257: Mayor número de días secos consecutivos en un año (días) para la estación 12030020

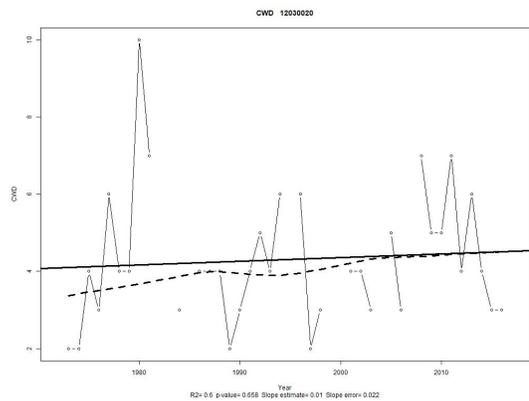


Figura 258: Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (días) para la estación 12030020

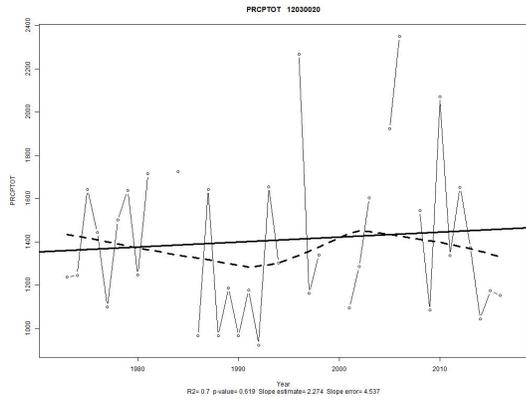


Figura 259: Precipitación total al año (mm) para la estación 12030020

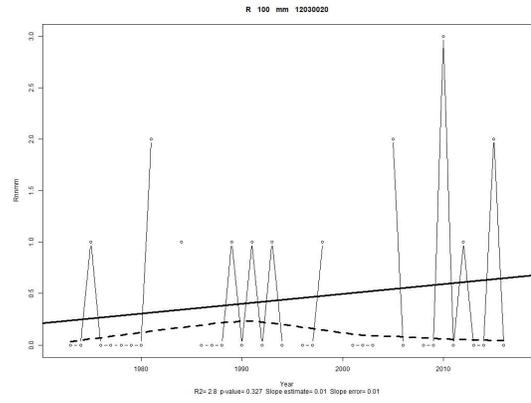


Figura 260: Numero de días en un año con lluvia mayor a 100mm (días) para la estación 12030020

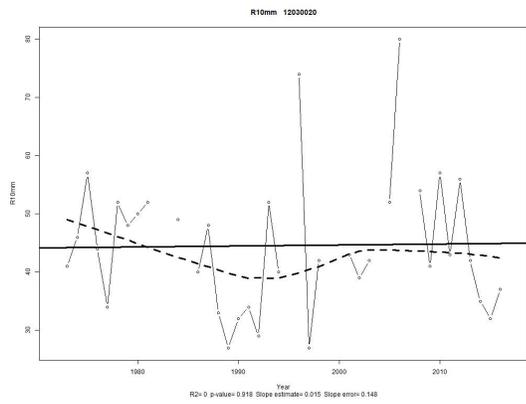


Figura 261: Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm (días) para la estación 12030020

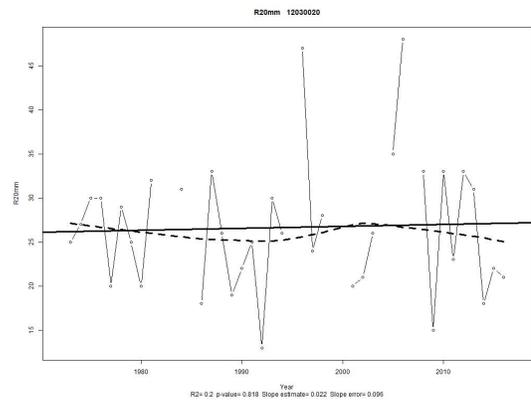


Figura 262: Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm (días) para la estación 12030020

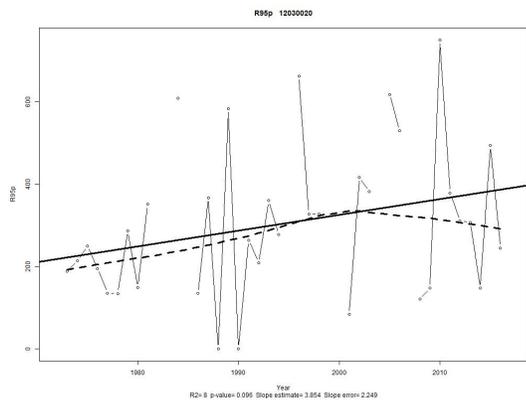


Figura 263: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0$ mm) para la estación 12030020

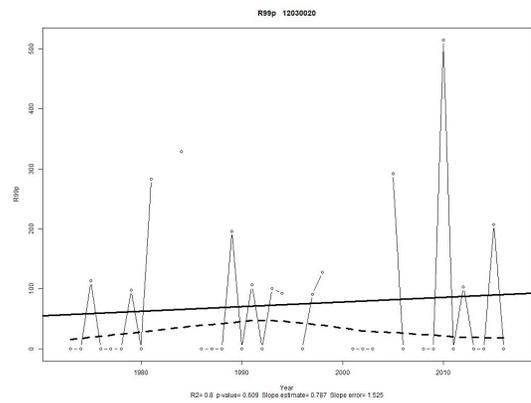


Figura 264: Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. $\geq 1,0$ mm) para la estación 12030020

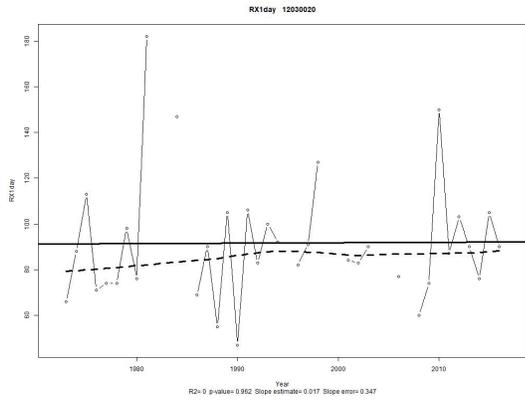


Figura 265: Máximo anual de precip. en 1 día (mm) para la estación 12030020

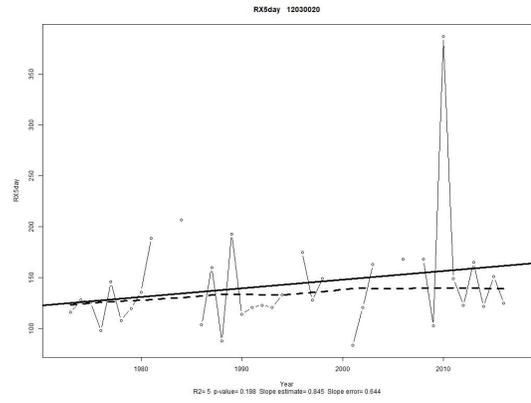


Figura 266: Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos (mm) para la estación 12030020

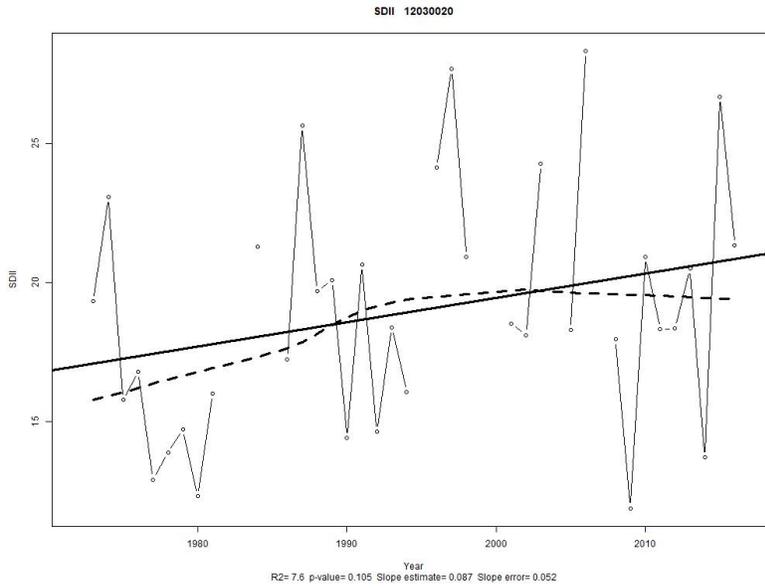


Figura 267: Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. $\geq 1,0$ mm) (mm/día) para la estación 12030020

8.9. Índices de cambio climático para temperatura

8.9.1. Estación 12015070

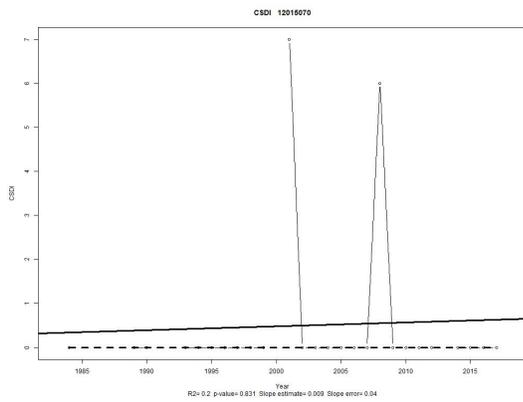


Figura 268: Conteo anual de días (por lo menos 6 días consecutivos) en que la temperatura mínima (TN) ¡percentil 10 (duración de periodos fríos) (días) para la estación 12015070

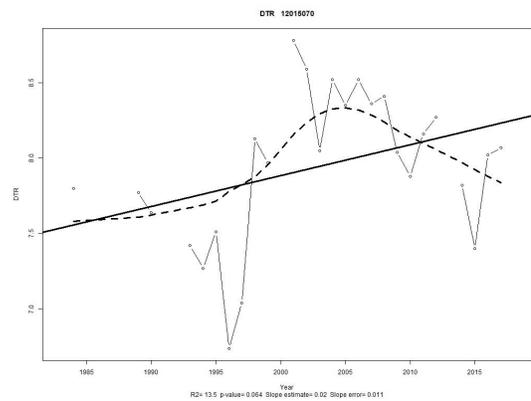


Figura 269: Diferencia media mensual entre la Temp. Máx. y la Temp.. Min. (°C) para la estación 12030020

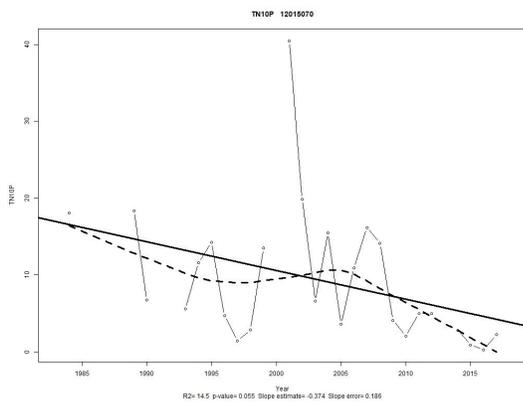


Figura 270: Días fríos: % de días con Temp. Máx. menor al Percentil 10 para la estación 12015070

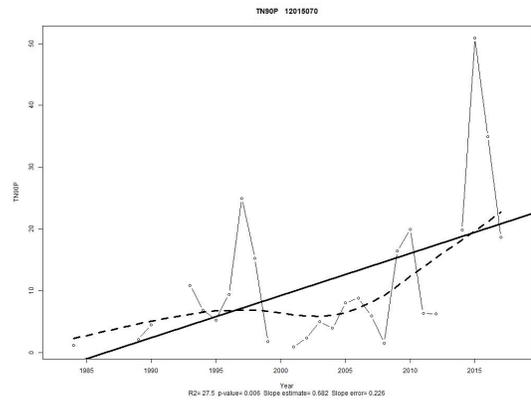


Figura 271: Días calientes: % de días con Temp. Máx. mayor al Percentil 90 para la estación 12030020

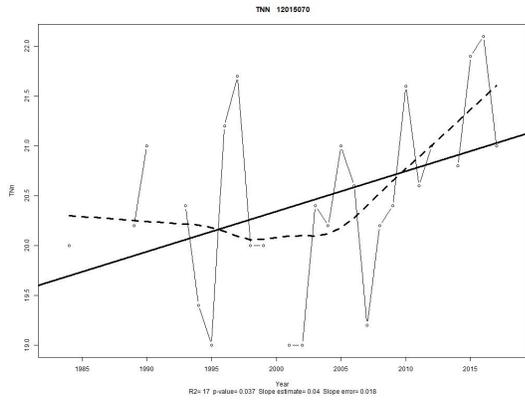


Figura 272: Temperatura nocturna mínima: Valor mensual mínimo de la temperatura mínima diaria para la estación 12015070

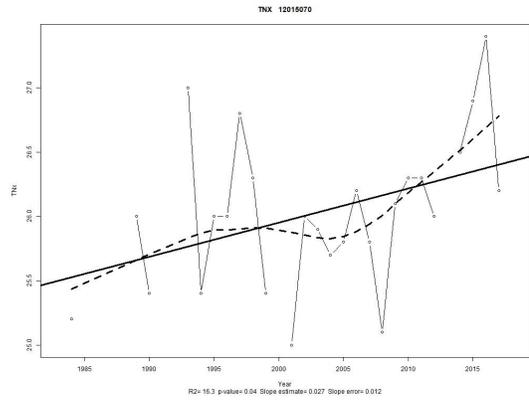


Figura 273: Temperatura nocturna máxima: Valor mensual máximo de la temperatura mínima diaria para la estación 12030020

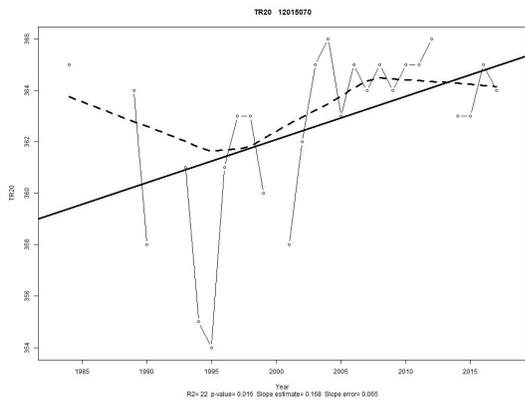


Figura 274: Noches calientes (2): Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20°C para la estación 12015070

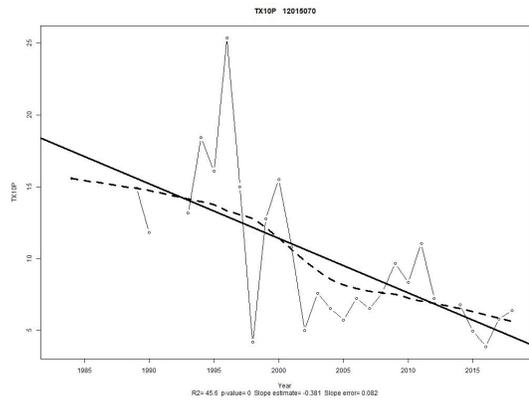


Figura 275: Días fríos: % de días con Temp. Máx. menor al Percentil 10 para la estación 12030020

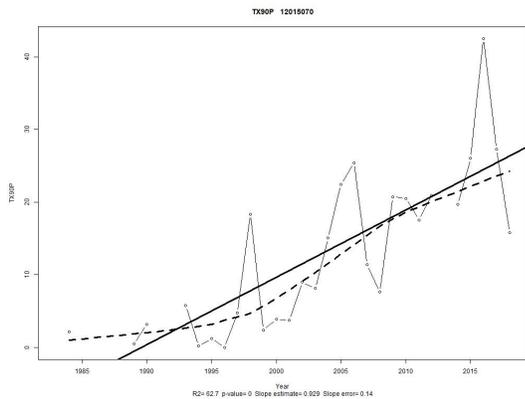


Figura 276: Días calientes: % de días con Temp. Máx. mayor al Percentil 90 para la estación 12015070

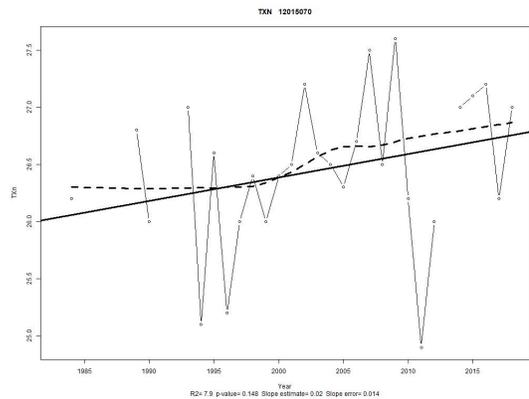


Figura 277: Temperatura diaria mínima: Valor mensual mínimo de la temperatura máxima diaria para la estación 12030020

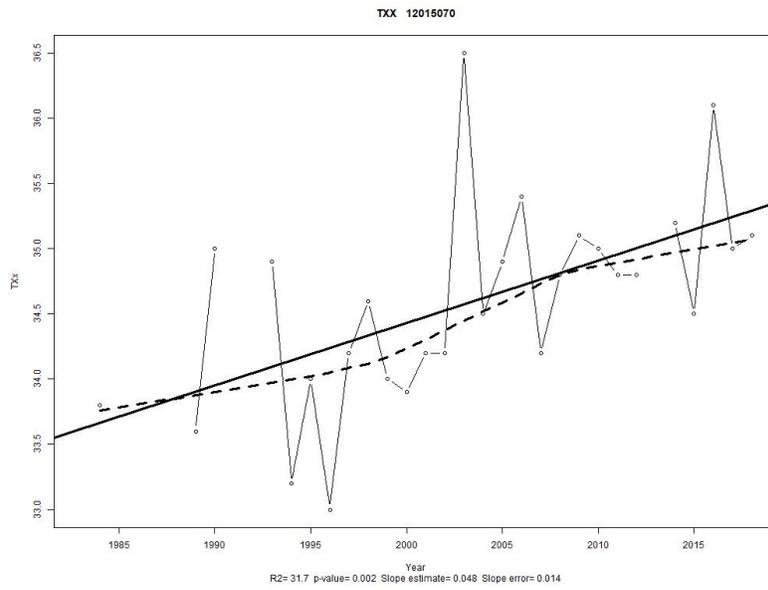


Figura 278: Temperatura diaria máxima: Valor mensual máximo de la temperatura máxima diaria para la estación 12030020