Informe Técnico

Tendencia de la temperatura del aire y los eventos extremos de olas de calor en AMSS

Proyecto: Planificación para el incremento de la temperatura debido al cambio climático en el Area Metropolitana de San Salvador

Octubre 2016

Autores: Maddalen Mendizabal, Sheila Carreño, Maialen Martija, Juan A. Acero, Pablo Ayala, Celina Kattan

Proyecto: Planificación para el incremento de la temperatura debido al cambio climático en el Area Metropolitana de San Salvador

Financiado por CDKN (Climate & Development Knowlegde Network)

Octubre, 2016

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) del Gobierno de El Salvador y a los funcionarios del Observatorio Ambiental que proveyeron la información y datos necesarios para el desarrollo del presente informe, así como sus comentarios e aportes de conocimiento experto de climatología de la región del Area Metropolitana de San Salvador.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION 1
2. DATOS Y METODOS 2
2.1. Datos históricos observados 2
2.2. Corrección del bias en modelos regionales 7
2.3. Anomalías 12
2.4. Estacionalidad 12
2.5. Cálculo de índices climáticos 12
3. RESULTADOS 16
3.1. Análisis de tendencias 16
3.2. Corrección del bias 18
3.3. Anomalías 19
3.4. Estacionalidad 20
3.5. Cálculo de índices climáticos 22
3.5.1. Temperatura media 22
3.5.2. Extremos calurosos 23
3.5.3. Olas de calor 25
3.5.4. Extremos fríos 28
4. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES EN AMSS 30
BIBLIOGRAFÍA 32
Anexo I. Análisis de tendencias de la temperatura máxima
Anexo II. Comparativa de temperaturas
Anexo III. Diagrama de cajas de Temperatura
Anexo IV. Índices climáticos calculados con Rclimdex

1. INTRODUCCION

Según el Quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático el fenómeno del cambio climático es indiscutible (IPCC, 2014)

Centroamérica (CA) se ha caracterizado tradicionalmente como una región con una alta exposición a amenazas geo-climáticas debido a su ubicación y topografía y con una alta vulnerabilidad debido a la población expuesta (los asentamientos humanos). También se caracteriza por ser una región con mayor influencia del cambio climático. Evidencia de ello es el aumento de los fenómenos extremos de los últimos 30 años (que incluyen tormentas, inundaciones y sequías).

Los impactos de estos eventos en la población y la economía de la región han sido elevados lo que ha hecho incrementar la percepción de la población con respecto al cambio climático. El Cambio Climático **es un desafío global de escala local y a nivel de las ciudades radican muchas de las soluciones y las respuestas concretas para adaptarse** a los impactos del cambio climático.

El presente informe tiene como objetivo analizar el clima de San Salvador (centrándonos en la temperatura) y ver cuáles serán los cambios esperados debido al cambio climático. Para ello se propone analizar los datos históricos observados, lo que nos servirá para conocer el tipo de clima de la zona de estudio. Este primer paso servirá de base para el estudio posterior de los efectos del cambio climático, en el que se analizará cómo el cambio climático afectará el clima futuro desde los niveles de temperatura y la frecuencia y duración de eventos extremos de olas de calor.

En el presente documento se describe inicialmente los datos y métodos utilizados para el análisis, y posteriormente se presentan los resultados y conclusiones.

2. DATOS Y METODOS

En este apartado se describirá la metodología seguida para el estudio. Se especificará qué datos de han utilizado y qué tratamientos se le han hecho.

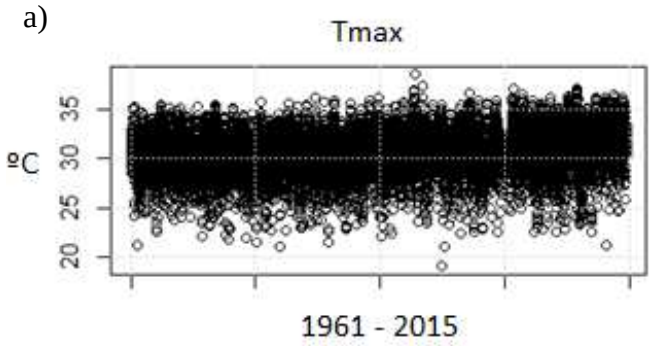
Este aparato se compone por los siguientes sub-apartados: datos históricos observados, corrección del bias o sesgo, anomalías, estacionalidad y cálculo de índices climáticos.

2.1. Datos históricos observados

La serie de Aeropuerto Ilopango comienza en el año 1961 y dispone de datos hasta 2015 (Fuente de datos: MARN). Consta de información de tres variables: precipitación acumulada en 24 horas, temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria.

A continuación se muestra el diagrama de puntos con la variable temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria y los estadísticos más importantes que las describen. Por otro lado, también se muestra el histograma y el diagrama de cajas, en este último se puede ver cuáles son los datos más extremos u outliers (Figura 1, Figura 2).

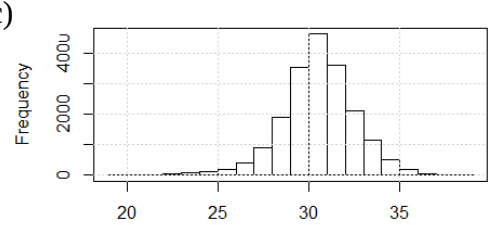
a)



b)

Min.	Qu.1	Median	Mean	Qu.3	Max.
19	29.5	30.66	30.62	31.8	38.6

c)



d)

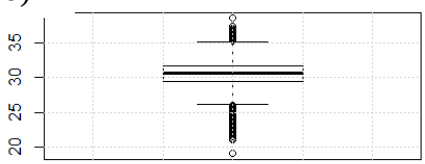
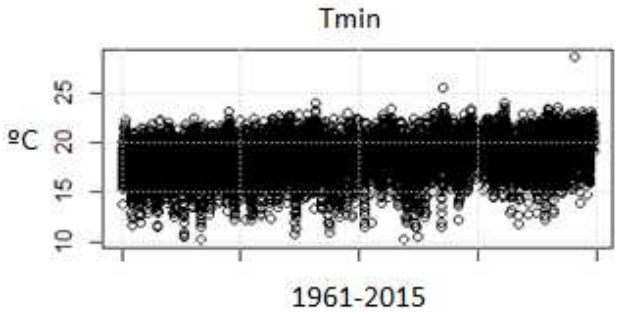


Figura 1. Representación de la Tmax (temperatura máxima) histórica de Aeropuerto Ilopango. Diagrama de puntos (a), estadísticos descriptivos (b) (mínimo, quartil 1, mediana, media, quartil 3 y máximo), histograma (c) y el diagrama de cajas (d).

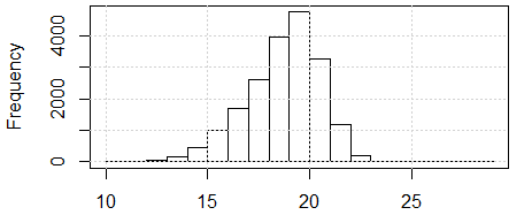
a)



b)

Min.	Qu.1	Median	Mean	Qu.3	Max.
10.2	17.7	19	18.8	20	28.6

c)



d)

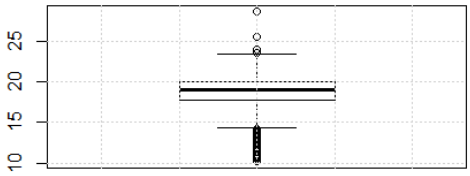


Figura 2. Representación de la Tmin (temperatura mínima) histórica de Aeropuerto Ilopango. Diagrama de puntos (a), estadísticos descriptivos (b) (mínimo, quartil 1, mediana, media, quartil 3 y máximo), histograma (c) y el diagrama de cajas (d).

Antes de utilizar esta serie de observados para la corrección del modelo climático, se ha realizado un análisis estadístico a los datos de temperatura, con el objetivo de detectar errores que puedan afectar a la corrección del bias, poniendo especial atención en los valores extremos. La primera conclusión de este análisis está relacionada con los datos perdidos. El porcentaje de estos datos no es muy elevado (no supera el 5% de los datos totales) por lo que se han descartado los posibles problemas derivados de ello. Por otro lado, se han descartado completamente los días en los que la temperatura máximas es menor que la mínima. Por último, se han revisado de manera más exhaustiva los días en los que la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima es menor a 2 º y aquellos días en los que la temperatura mínima o máxima es un extremo u outlier de la serie. Para tomar decisiones sobre estos últimos días, se ha realizado un análisis de cada valor y se ha decidido descartar el día o considerarlo bueno. En caso de duda, siempre se ha decidido mantener el registro como bueno. Uno de los datos descartados por ejemplo, es la temperatura máxima del día 15 de abril de 1995. Ese dato es un registro extremo (temperatura máxima de 19.0 grados), la mínima es un valor perdido y las máximas de los días anterior y posterior son 35.5 º C y 34 ºC respectivamente.

Conviene especificar que para este trabajo solamente se ha revisado con detalle el periodo de datos de 1961-2005. La razón por la cual no se ha analizado la serie completa es que el periodo de datos observados debe coincidir con el periodo de datos histórico de los modelos regionales mesoescalares, y como se verá en el apartado 2.5 va desde 1961 hasta 2005.

Selección de estaciones del año

La corrección de bias se aplica teniendo en cuenta las estaciones del año o los periodos de clima similar. Estos periodos o estaciones se han elegido teniendo en cuenta las características generales del clima en San Salvador. Una época seca entre noviembre y abril temperaturas bajas entre noviembre y febrero y temperaturas más altas entre marzo y mediados de mayo. El diagrama ombrotérmico de Gaussen representada en la Figura 3 identifica el período seco en el cual la precipitación es inferior a dos veces la temperatura media. Gracias a la termohieta se aprecian las épocas secas con temperaturas más bajas (noviembre, diciembre, enero y febrero), la época seca con temperaturas más altas (marzo, abril, aunque en este grupo se puede considerar mayo como el mes cálido aunque tenga algo de lluvia), finalmente la época lluvias y menos cálida (junio, julio, agosto, septiembre y octubre (Figura 4).

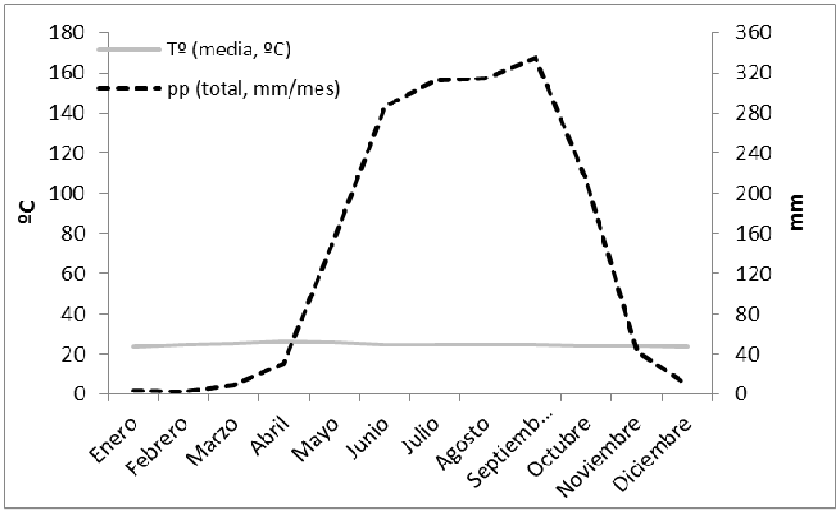


Figura 3. Diagrama ombrotérmico de Gaussen elaborado a partir de los datos de la estación de Aeropuerto Ilopango (años 1961-2014).

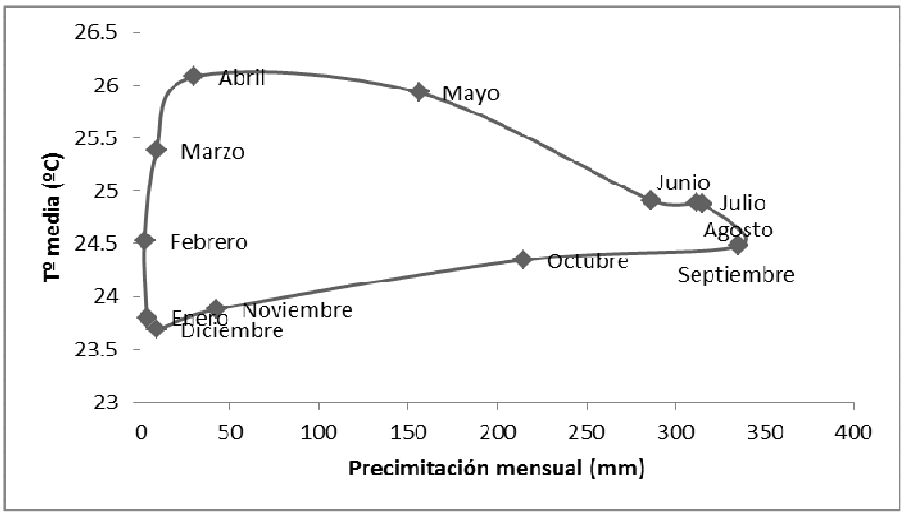


Figura 4. Diagrama de termohieta elaborado a partir de los datos de la estación de Aeropuerto Ilopango (años 1961-2014).

Por lo otro lado, en algunos años la temporada de lluvias ha sido bimodal, con junios y septiembres con menor temperaturas máximas, aunque mayores temperaturas mínimas y julio, agosto y octubre con temperaturas máximas ligeramente más altas (1961-1966) (Figura 5).

Por todo lo mencionado hasta el momento, se ha aplicado una corrección/calibración diferente según los modelos regiones en los siguientes periodos:

- Noviembre, diciembre, enero y febrero
- Marzo, abril y mayo
- Junio y septiembre (éstos aunque se podrían considerar por separado también se pueden unir a la siguiente época por presentar similitudes según los estadísticos, no habría diferencia en la corrección de los modelos)
- Julio, agosto y octubre

En las siguientes tablas se han calculado los estadísticos por meses para comprobar como efectivamente los grupos de meses seleccionados son similares entre sí (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Figura 5)

Tabla 1. Resumen de los estadísticos de Tmax para cada mes. Donde Min se refiere a mínimo, Qu.1 al cuartil 1, Qu.3 al cuartil 3 y Max. al máximo.

Tmax	Min.	Qu.1	Median	Mean	Qu.3	Max.
Enero	23.3	30	30.9	30.79	31.8	35.4
Febrero	24	30.78	31.8	31.76	32.8	37
Marzo	24.6	31.5	32.5	32.51	33.6	37.5
Abril	19	31.5	32.5	32.49	33.6	37
Mayo	21	30	31.2	31.6	32.3	38.6
Junio	22.2	29	30	29.86	31	35.2
Julio	22.8	29.6	30.5	30.35	31.2	34.8
Agosto	21	29.5	30.5	30.24	31.2	34
Septiembre	21.2	28.4	29.7	29.36	30.6	33.3
Octubre	22.1	28.5	29.6	29.39	30.5	33.5
Noviembre	22.5	28.6	29.8	29.57	30.7	34
Diciembre	22.7	29.2	30.2	30.13	21	34.6

Tabla 2. Resumen de los estadísticos de Tmin para cada mes. Donde Min se refiere a mínimo, Qu.1 al cuartil 1, Qu.3 al cuartil 3 y Max. al máximo.

Tmin	Min.	Qu.1	Median	Mean	Qu.3	Max.
Enero	10.2	15.7	17	16.81	18	21.3
Febrero	10.5	16.17	17.45	17.29	18.5	21.6
Marzo	11.5	17.2	18.35	18.26	19.5	23.5
Abril	10.5	18.6	19.9	19.67	20.9	28.6
Mayo	13	19.5	20.4	20.26	21	23.6
Junio	16.2	19.3	20	19.96	20.7	22.8
Julio	13.8	18.7	19.5	19.43	20.1	22.8
Agosto	10.3	18.9	19.5	19.52	20.2	22.9
Septiembre	12.5	19	19.6	19.6	20.4	22.5
Octubre	12.5	18.6	19.45	19.3	20.2	22.8
Noviembre	11.8	17.2	18.4	18.19	19.3	23
Diciembre	10.8	16.25	17.4	17.24	18.4	22.2

Tabla 3. Resumen de los estadísticos de precipitación (PP) para cada mes. Donde Min se refiere a mínimo, Qu.1 al cuartil 1, Qu.3 al cuartil 3 y Max. al máximo.

PP	Min.	Qu.1	Median	Mean	Qu.3	Max.
Enero	0.00	0.00	0.00	3.45	2.77	47.60
Febrero	0.00	0.00	0.00	2.10	2.00	28.50
Marzo	0.00	0.00	2.30	8.88	10.00	64.90
Abril	0.00	7.70	24.10	29.86	45.50	148.70
Mayo	0.00	99.40	146.20	156.20	209.30	307.50
Junio	152.00	230.60	272.30	286.50	345.20	457.80
Julio	179.50	246.30	306.90	312.10	357.30	512.60
Agosto	148.20	243.30	306.50	315.00	378.20	500.20
Septiembre	111.20	269.20	338.60	335.00	388.60	600.80
Octubre	38.70	152.80	195.10	214.60	254.00	524.10
Noviembre	0.00	11.80	26.60	42.78	62.30	261.40
Diciembre	0.00	0.00	1.10	9.09	16.50	60.60

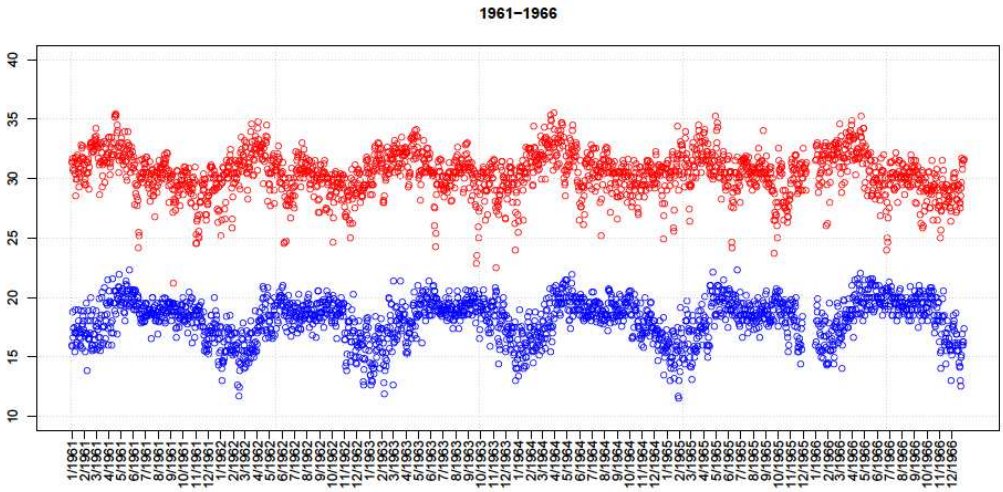


Figura 5. Temperatura máxima y mínima mensual de los datos históricos observados de la estación de Aeropuerto Ilopango (años 1961-1966).

Análisis de tendencias

En este apartado se ha analizado la tendencia de la temperatura y se ha dado la significancia estadística basado en test estadísticos. Para ganar en la independencia de los datos, se analiza la serie anual de las variables (Santos, 2011).

Los test se realizan con el objetivo de conseguir un resultado más robusto se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de los test realizados para el estudio de la serie temporal de variables meteorológicas.

Nombre del test	Uso	Tipo de test
Mann-Kendall Test	Detecta tendencias	no-paramétrico
Test de Spearman	Detecta tendencias	no-paramétrico
Regresión lineal	Detecta tendencias	paramétrico
Distribución libre de CUSUM	Detecta el cambio en la media/mediana	no-paramétrico
Desviación acumulada	Detecta el cambio en la media/mediana	paramétrico
Probabilidad Worsley	Detecta el cambio en la media/mediana	paramétrico
Suma de rangos	Compara la media/mediana en 2 periodos	no-paramétrico
t-test de Student	Compara la media/mediana en 2 periodos	paramétrico
Cruce de la mediana	Test de aleatoriedad	no-paramétrico
Punto de retorno	Test de aleatoriedad	no-paramétrico
Diferencia de rango	Test de aleatoriedad	no-paramétrico

Los test paramétricos asumen una distribución normal de la serie de datos y de los errores (las desviaciones de la tendencia). Además cuantifican el cambio en los datos, es decir, el gradiente de la tendencia. Aunque este tipo de test tiene más condicionantes que los no-paramétricos, las primeras generalmente son más robustas.

Los test no-paramétricos son más flexibles, detectan cambios en la tendencia pero sin cuantificarla. En el estudio de series de datos hidrológicos son muy utilizados ya que estas raras veces presentan una distribución normal.

2.2. Corrección del bias en modelos regionales

Generalmente, la mayoría de los estudios de impactos y el riesgo derivado del cambio climático se realizan a través de los resultados obtenidos de los modelos de clima globales (MCGs) y regionales (MCRs).

El comportamiento del sistema climático global y de la evolución del clima es simulado utilizando dichos modelos cuyo objetivo es la representación de los procesos responsables de mantener las circulaciones oceánicas y atmosféricas y su variabilidad. Sin embargo, hoy en día, la variabilidad climática también está definida

por las actividades antropogénicas influenciada por cambios en la dinámica de la población, actividades económicas y los desarrollos tecnológicos.

Así, para tratar este complejo cambio debido a estas actividades humanas que afectan al clima, el enfoque utilizado actualmente es el uso de los MCGs y los MCRs pero asumiendo diferentes escenarios o Trayectorias Representativas de Concentración (RCP), donde se representan las trayectorias de las futuras emisiones de Gases de Efecto de Invernadero (GEIs) (Figura 6). La fuente principal en donde se encuentran dichos escenarios es el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2013).

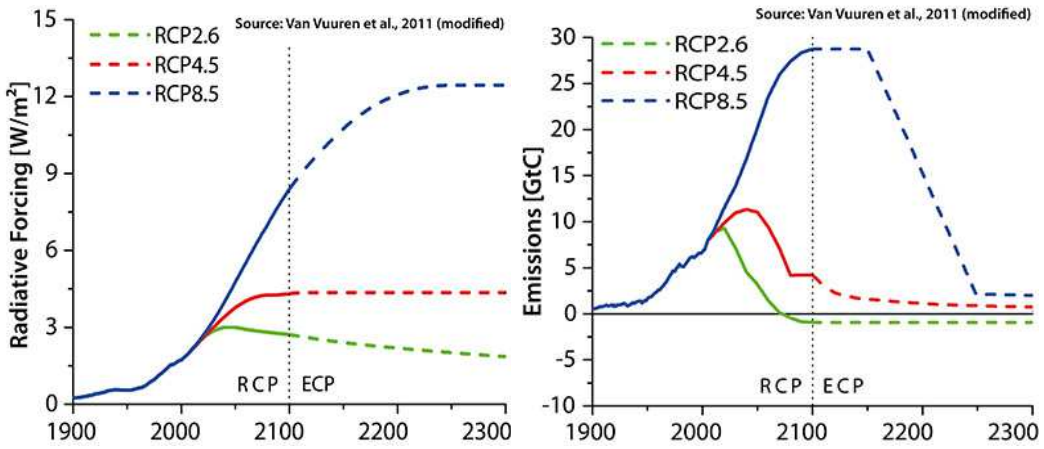


Figura 6. Trayectorias Representativas de Concentración o RCPs. RCP2.6: radiative forcing reached nearly 3 W/m2 (equal to 490 ppm CO2 equivalent) and will decrease to 2.6 W/m2 by 2100; RCP4.5: Stabilization with overshooting. 4.5 W/m2 by 2100 (~650 ppm CO2 equivalent); RCP6: Stabilization with overshooting. 6 W/m2 by 2100 (~850 ppm CO2 equivalent) [this scenario is not represented as it was not carried out for all models]; RCP8.5: rising radiative forcing, leading to 8.5 W/m2 by 2100 (equivalent to 1370 ppm CO2 equivalent)[1].

Aun así, siguen siendo las únicas herramientas que proporcionan una percepción relevante de los resultados y del riesgo que podría llegar a suponer el cambio climático. Hoy en día, además de los escenarios del IPCC, bajo la misma iniciativa del IPCC se está desarrollando el proyecto de intercomparación de modelos climáticos (**CMIP5**)[2].

Se ha de tener en cuenta, que la resolución horizontal de los modelos climáticos globales (sobre 300 km) es demasiado grosera para representar las heterogeneidades regionales y locales (en particular sobre zonas con terrenos complejos y masas de agua) afectando directamente a parámetros meteorológicos tan cambiantes con la zona, como es la temperatura y los eventos extremos. Por ello, para evaluar los riesgos del cambio climático, en la temperatura, se utilizan los

[1] Detlef P. van Vuuren, Jae Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, Allison Thomson, Kathy Hibbard, George C. Hurtt, Tom Kram, Volker Krey, and Jean-Francois Lamarque, et al., 2011: The representative concentration pathways: an overview

[2] http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/

modelos de clima regional con una resolución de 25-50 km, los cuales se ejecutan guiados por los modelos de clima global, en particular para Europa[3].

Este tipo de análisis se ha llevado a cabo en proyectos Europeos como PRUDENCE[4] que tuvo lugar desde el 2001 hasta el 2004. Su consecución fue el proyecto ENSEMBLES[5] que tuvo lugar desde el 2004 hasta el 2009. Actualmente, este tipo de simulaciones se está llevando a cabo en el proyecto **CORDEX**[6], que comenzó en el 2009. El proyecto CORDEX trabaja con las nuevas Trayectorias de Concentración Representativas (http://cordex.dmi.dk/) y por tanto se propone como una de las opciones utilizar las salidas de CORDEX para San Salvador. Cuenta con proyecciones de temperatura mínima y máxima desde 1951 hasta 2100, bajo los **RCP 2.6, RCP 8.5** y **RCP 4.5** que sería el RCP más extremo (RCP 8.5) y menos extremo (RCP 2.5) según la Figura 6 (Flato, G. et al., 2013).

A nivel internacional existen otras iniciativas de interés que se deben de nombrar, como es la iniciativa **PRECIS** (Providing REgional Climates for Impacts Studies). Se trata de un modelo climático regional basado en la tercera generación del MCR del Centro Hadley (HadRM3). Han realizado proyecciones bajo los antiguos escenarios de emisiones de GEIs (SRES) del cuarto informe del IPCC (2007). Seguramente en los próximos meses o años será posible disponer de las nuevas proyecciones bajo los nuevos RCPs para Centro América.

De todas formas, la resolución de 50 km, 25 km o incluso de 12 km en ocasiones no es suficiente para proporcionar los riesgos o estudios de evaluaciones de impacto con una mayor resolución: debido a errores sistemáticos del modelo (conceptualizaciones imperfectas). Para corregir estos errores, se aplican técnicas de correcciones a las salidas de los modelos regionales de clima permitiendo evaluar los riesgos del cambio climático en localizaciones concretas (Figura 7).

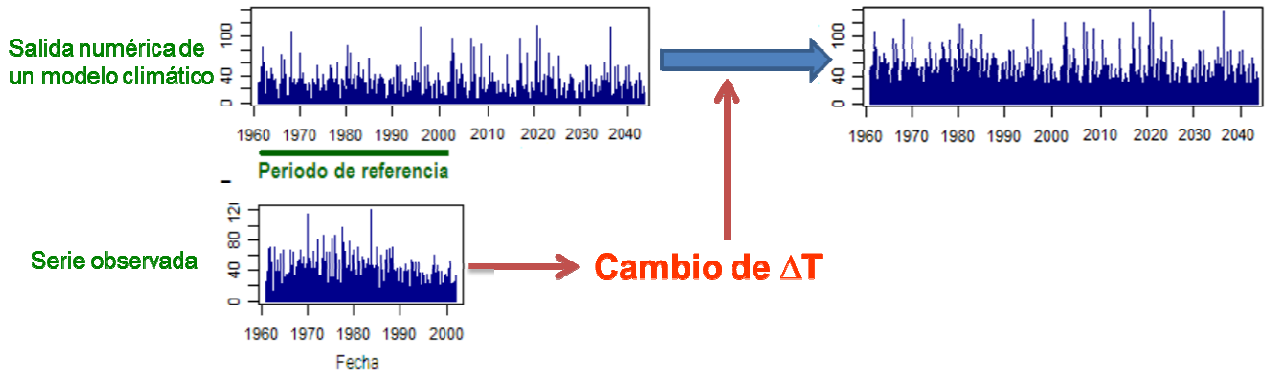


Figura 7. Ejemplo de la corrección del sesgo del MCR con las observaciones históricas de las estaciones meteorológicas.

[3] Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T., Kram, T., Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Rihani, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., Rooijen, S., Victor, N. & Dadi, Z. (2000) IPCC report on Emissions Scenarios Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom

[4] http://prudence.dmi.dk/

[5] http://www.ensembles-eu.org/

[6] http://www.euro-cordex.net/

Modelos regionales

Se han analizado los datos de dos modelos regionales disponibles gracias al proyecto CORDEX. Estos dos modelos tienen proyecciones bajo los 2 escenarios que se han propuesto analizar (RCP4.5 and RCP8.5).

- Del Instituto "Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre (SMHI)" tenemos el modelo regional climático RCA4 (resultado del MCR del centro Rossby), forzado por el MCG EC-EARTH (Kjellström et al., 2016).
- Del Instituto "Max Planck Institut für Meteorologie (MPI)" tenemos el modelo regional climático RCA4, forzado por el MCG MPI-ESM-LR (Kjellström et al., 2016).

Los modelos utilizados realizan simulaciones hasta 2100. Entre 1951 y 2005 tienen el llamado periodo histórico y las proyecciones corresponden al periodo entre 2006 y 2100.

Los puntos del modelo están distribuidos a menos de 0.44° de longitud. En el siguiente grafico se muestran los puntos del modelo (en rojo) y las coordenadas de la capital San Salvador (13°41.9'N y 89°7.1'W) en verde (Figura 8).

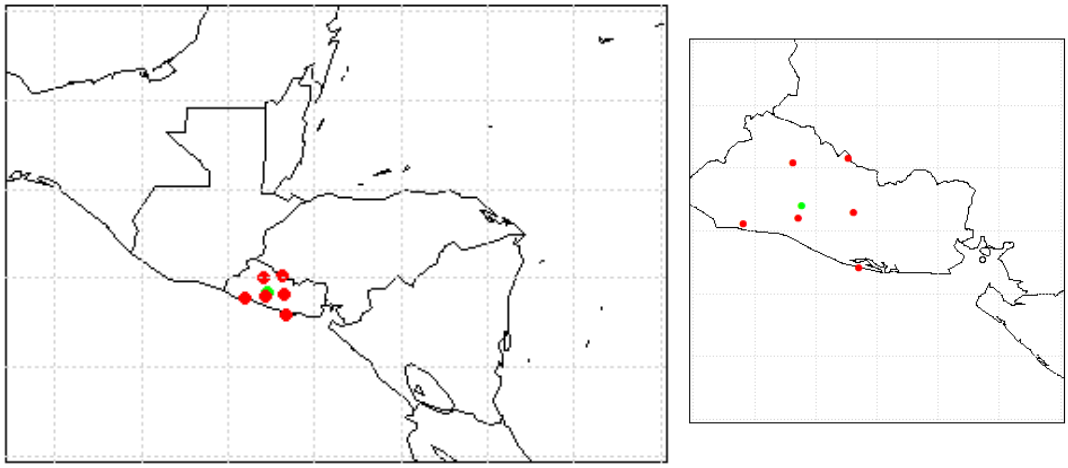


Figura 8. Localización de los puntos de la malla de los modelos CORDEX (en rojo) y la localización de San Salvador (en verde). La figura de la derecha es un zoom de la figura de la izquierda.

Se considera que debido a la extensión y la distribución de los puntos, la mejor representación de San Salvador, es el punto de rejilla más cercano.

Corrección

Los Modelos de Circulación General o General Circulation Models (GCMs) sugieren que crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero tienen implicaciones significativas en el clima a escala global y regional. La mejor herramienta para estimar el clima a escala global son los modelos de GCMs pero debido a su baja resolución horizontal, no se adaptan correctamente a las características de clima a escala regional o local. Por lo que habitualmente para evaluar los riesgos del cambio climático a alta

resolución se utilizan técnicas de adecuación de escala o downscaling, dinámicas o estadísticas, que trasladan la información de resolución espacial y temporal entre los modelos climáticos a escala global y regional.

En este caso se ha optado por seleccionar las salidas de modelos regionalizados mencionados anteriormente (que han tenido un downscaling dinámico). Antes de realizar un análisis exhaustivo de tendencia climática, a los modelos regionalizados se les ha aplicado una corrección estadística de bias, tomando como referencia las observaciones locales en un periodo de tiempo suficientemente largo (en nuestro caso, la estación del Aeropuerto de Ilopnago). Existen diferentes técnicas que correlacionan los datos observados y los predichos. Unas, se basan en aproximaciones a distribuciones teóricas de Gamma y Gauss, en donde se tiene en cuenta la distribución de los datos observados, es decir, la función de densidad de probabilidad (PDF) y otras, se centran en las distribuciones empíricas que tienen en cuenta el cambio de temperatura (Piani et al., 2010a, 2010b; Räty et al., 2014; Themeßl et al., 2012). Estas correcciones se pueden aplicar a datos mensuales o a datos de estaciones del año (Deque, 2007; Jacob et al., 2007; Kjellström et al., 2007). En este proyecto se ha decidido aplicar una tercera técnica que compagina las dos anteriores (González-Aparicio and Hidalgo, 2012).

Para desarrollar esta técnica, en primer lugar se han calculado los cuartiles tanto de los datos observados como de los datos de predicción del modelo, en ambos casos para el periodo histórico pre-fijado. En concreto, se han calculado los cuartiles que dividen la distribución en 20 partes iguales (percentiles de 5 a 95, cada 5 unidades). Además, para caracterizar mejor los outliers superiores e inferiores de la distribución, se han añadido los percentiles 1 y 99. Estos dos percentiles se añaden con el objetivo de que el grupo de casos en los que ambas distribuciones difieren más, queden mejor caracterizados.

Una vez identificados los cuartiles mencionados anteriormente, se obtiene el valor de temperatura correspondiente a cada uno de ellos, tanto para la serie de datos observada como para la del modelo y de esta forma obtenemos el incremento esperado en cada tramo.

Se considera que el error sistemático del bias durante el periodo de control es estacionario en la curva de calibración en el futuro, por lo que esta corrección se aplica a la serie completa del modelo. Si un punto de la curva del modelo cae entre dos cuartiles, se aplica una interpolación lineal teniendo en cuenta el incremento de ambos, si el punto cae encima de la curva, se aplica el incremento esperado asociado. En el caso en el que el punto caiga por encima o por debajo de los percentiles 1 y 99, se aplica el incremento esperado en cada caso.

Como resultado obtenemos las funciones PDF de los modelos corregidos a partir de las funciones PDF de los datos observados (González-Aparicio and Hidalgo, 2012). Por último, se hace la corrección del modelo en base a las observaciones de la estación meteorológica en los meses elegidos para cada época.

2.3. Anomalías

La anomalía es un indicador que expresa la desviación del valor medio anual de temperatura de un año determinado, respecto a la temperatura media histórica de un periodo de referencia. Los datos de anomalía de variables meteorológicas para la capital salvadoreña, se ha calculado siguiendo las recomendaciones del IPCC, que establece como periodo de referencia 1961-1990.

2.4. Estacionalidad

El componente estacional busca recoger las oscilaciones que se producen con un periodo mensual. Para estudiar el comportamiento estacional de una serie es más adecuado representar el diagrama de cajas o box-plot de cada mes (que es la unidad de tiempo que compone el periodo en el que se agrupa el patrón de repetición) (Esparza, 2013).

2.5. Cálculo de índices climáticos

Generalmente el cambio climático es descrito en términos de cambios de temperaturas y de precipitación, pero la mayoría de los costes socio-económicos asociados al cambio climático resultan del cambio en la frecuencia y en la severidad de los eventos extremos derivados de las temperaturas y precipitaciones extremas. Este hecho se ilustra con una amplia lista de ejemplos observados en todo el mundo desde los años 1980. Cabe destacar el huracán Katrina (2005), ola de calor rusa (2010), las mayores inundaciones en Pakistán (2010), el 2010 fue el año más caluroso de Canadá en los últimos 30 años, el 2011 fue el año más seco en el sudoeste australiano, y el segundo verano más seco en Estados Unidos en la historia, etc. De esta manera, la cuestión que emerge es si el calentamiento global está causando un clima más extremo (http://www.c2es.org/publications/extreme-weather-and-climate-change).

Así, la incertidumbre sobre las condiciones del tiempo futuro es necesaria asociarla a los cambios en el clima extremo y tratarlo en un solo contexto del cambio climático y clima extremo. Generalmente, a través de los resultados de la ejecución de los modelos de clima y técnicas estadísticas se estudian los eventos climáticos y las temperaturas extremas mediante incides climáticos estandarizados.

El proyecto **STARDEX**[7] ha tenido como objetivo estudiar los cambios esperados tanto en frecuencia como en intensidad de estos extremos, como por ejemplo las temperaturas extremas, olas de calor, etc. Los escenarios generados se utilizan para aspectos de diseño futuro como la gestión de los recursos de agua, salud pública, irrigación, construcciones, etc. Cuyo principal logro es contribuir a la información de los cambios climáticos extremos. Esta nueva información ocurrida y predicha en el pasado, presente y futuro ilustran los riesgos para la salud humana y en particular, el

[7] http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/summary.htm

riesgo que supone las temperaturas máximas durante el verano (González-Aparicio and Hidalgo, 2012; Hewitt and Director, 2005).

Se pueden agrupar los indicadores climáticos en:

1. Temperatura media: temperatura media (TMn)
2. Extremos calurosos: número de días cálidos (TX90p); 90 percentil de temperaturas máximas (Tmax90p); número de noches cálidas (TN90p); temperatura máxima diaria (TXx, TNx).
3. Olas de calor: existen varios indicadores de ola de calor. Según unos autores, las olas de calor o periodos cálidos se pueden definir como al menos 3 días consecutivos donde la temperatura máxima supera el percentil 90 (Alexander et al., 2016; Collins et al., 2000; Russo et al., 2014). Sin embargo, otros autores consideran la ola de calor como al menos 6 días consecutivos en el que la temperatura máxima supera el percentil 90 (Nairn et al., 2013; Zang, X. and Yang, F., 2004). Por último también encontramos trabajos en el que consideran mínimo 6 días consecutivos en el que la temperatura máxima supera 5ºC (Fischer et al., 2011; González-Aparicio and Hidalgo, 2012) (Perkins et al., 2012; Perkins and Alexander, 2012). La definición adoptada en este trabajo coincide con la definición que se utiliza en el programa RClimdex, pero el cálculo no se ha hecho con este programa debido a que sólo calcula el número de días. Por tanto en este trabajo la ola de calor se considera aquél evento en el que durante al menos 6 días se supera el percentil 90 de la temperatura máxima (Zang, X. and Yang, F., 2004). A partir de esta definición se ha calculado el número de olas de calor al año (HWN), número promedio de días que componen la ola de calor (duración en días, HWF) y temperatura de la ola de calor (HWA).
4. Extremos de frío: 10 percentil de temperaturas mínimas (Tmin10p).

<u>Índices considerados</u>

En la Tabla 5 se muestra el listado de índices climáticos considerados para el estudio de la temperatura.

Tabla 5. Resumen de los índices climáticos analizados. Abreviatura (ID), nombre del indicador, definición y unidades.

ID	Nombre del indicador	Definición	UNIDAD
TMn	Temperatura media	Promedio de la temperatura media	ºC
TX90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando TX>90th percentil	% días
Tmax90p	Temperatura máxima	90 percentil de la temperatura máxima	ºC
TN90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando TN>90th percentil	% días
TXx	Max Tmax	Valor máximo de temperatura máxima diaria	ºC
TNx	Max Tmin	Valor máximo de temperatura mínima diaria	ºC
HWN	Número de olas de calor al año	Contaje anual de número de eventos clasificados como ola de calor (6 días consecutivos en el que TX>90p)	Nº
HWF	Número de días que componen la ola de calor	Promedio de número de días que componen una ola de calor	Días
HWA	Temperatura envuelta en la ola de calor	Promedio de la Tº envuelta en una ola de calor	ºC
TN10p	Temperatura mínima	10 percentil de la temperatura mínima	ºC

Uso del programa RClimdex

Para el cálculo de algunos de los índices se ha utilizado el programa RClimdex (Saiful, A.K.M, 2013; Zang, X. and Yang, F., 2004) (WSDI, TNx, TXn, TNn, TN90p, TX90p, TXx, SU33, DTR). Para ello se definen los siguientes parámetros en el programa:

- Latitud y Longitud: Latitud: 13° 41.9 N Longitud: 89° 07.1 43° O (13.419; -89.07143)
- Definición de umbrales:
  - Umbral alto de la temperatura máxima diaria: percentil 90 de las temperaturas máximas es 33.85 (33 de la serie observada), por tanto se escoge 33ºC como umbral.
  - El umbral bajo de la temperatura máxima diaria es 0

- Umbral alto de la temperatura mínima diaria: percentil 90 de las temperaturas mínimas es 21.7 (21 de la serie observada), por tanto se escoge 21ºC como umbral.
- El umbral bajo de la temperatura máxima diaria corresponde al percentil 10 de la temperatura mínima diaria de los meses de invierno y es 0.6ºC. Por tanto, se considera 0.
- Si un dato queda fuera de 3 desviaciones estándares (a veces 5) se considera un outlier (Kiware, 2010).

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de tendencias

Se ha analizado la tendencia de temperaturas máximas históricas (percentil 90 de temperatura máxima, tmaxp90) (periodo 1961-2015). En los párrafos siguientes se presentan los resultados (Tabla 6):

Análisis de tendencias: Mann-Kendall (no-paramétrico), Spearman's Rho (non-parametric) y regresión lineal (paramétrico).

Los datos muestran una tendencia significativa para todas las pruebas estadísticas (excepto para el "turning point"). Existe una tendencia positiva de la temperatura máxima en el periodo estudiado (1961-2015), lo que supone que ha habido un incremento de la misma a lo largo de los años (Figura 9, Anexo I. Análisis de tendencias de la temperatura máxima).

Detección de cambios en la media y mediana: CUSUM libre de distribución (non-parametric), desviación acumulada (parametric), Worsley Likelihood Ratio (parametric)

El año en el que se detecta un cambio en las tendencias corresponde al año 1991 según CUSUM y desviación acumulada. La temperatura en años posteriores es mayor que en años anteriores (Figura 10, Anexo I. Análisis de tendencias de la temperatura máxima).

Diferencias en la media y mediada en 2 periodos distintos: Rank-Sum (non-parametric), Student's t-test (parametric).

Quedan marcadas 2 periodos, una anterior (1961-1990) con una temperatura media del Tmax90p de 32 grados y la otra "actual" (1991-2015) con 1 grado más de Tmaxp90. Según el student´s t-test, ambos periodos son distintos (0.001).

Según la distribución de CUSUM <u>se detecta el año de cambio: 1990</u>

Test de aleatoriedad: Median Crossing (non-parametric), Turning Points (non-parametric), Rank Difference (non-parametric). Los datos no vienen de un proceso aleatorio.

Tabla 6. Estadísticos para el análisis de tendencia: tipo de test, estadístico, valores críticos y resultado. S=significativo (entre paréntesis se muestra el nivel de significancia), NS=no significativo.

	Estadístico	Valores críticos (table estdística)			Resultado
		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Mann-Kendall Test	3.252	1.645	1.96	2.576	S (0.01)
Test de Spearman	3.387	1.645	1.96	2.576	S (0.01)
Regresión lineal	53.5	1.666	1.992	2.642	S (0.01)
Distribución libre de CUSUM	19	12.2	13.6	16.3	S (0.01)
Desviación acumulada	2.42	1.162	1.285	1.542	S (0.01)
Probabilidad Worsley	8.083	2.87	3.159	3.79	S (0.01)
Suma de rangos	2.307	1.645	1.96	2.576	S (0.05)
t-test de Student	-4.707	1.665	1.991	2.641	S (0.01)
Cruce de la mediana	2.177	1.645	1.96	2.576	S (0.05)
Punto de retorno	0.108	1.645	1.96	2.576	NS
Diferencia de rango	2.005	1.645	1.96	2.576	S (0.05)

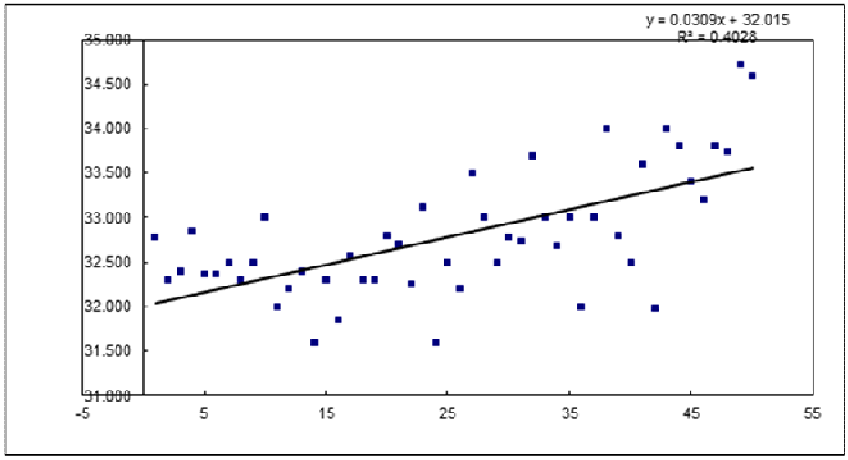


Figura 9. Resultado del test de regresión lineal. Eje de abscisas años y eje de coordenadas temperatura (ºC). Se muestra la línea de la tendencia, la ecuación y R^2.

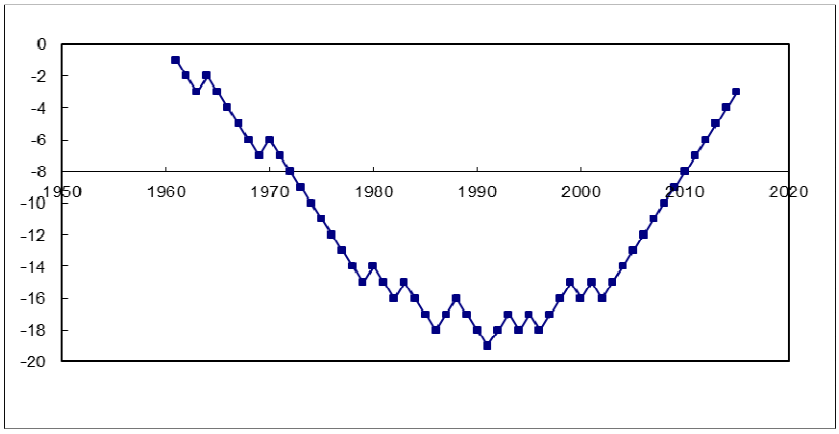


Figura 10. Resultado del test de Cusum. Eje de abscisas años y eje de coordenadas la distribución.

3.2. Corrección del bias

La corrección del bias realizada a través de la metodología presentada ha obtenido buenos resultados. Para el periodo de referencia (1961-1990), la diferencia entre la temperatura máxima y mínima observada y del escenario corregidas es aceptable. Para ambos casos (temperatura mínima y máxima) se representan adecuadamente la forma de los ciclos anuales (Figura 11, Figura 12). En rasgos generales, se observa una ligera sobreestimación de la temperatura máxima y mínima en caso del modelo (escenario RCP): excepto para enero, marzo, septiembre y diciembre, en el que la temperatura máxima se subestima ligeramente; y abril, mayo y junio, en el que se subestima ligeramente la temperatura mínima. El error medio de la corrección del bias es de 0.3±0.2ºC para la temperatura máxima (sin superar los 0.6ºC) y 0.1±0.1ºC (sin superar los 0.4ºC) para la temperatura mínima. Los meses que presentan mayor error son marzo y mayo, en caso de la temperatura máxima, y septiembre, en caso de la temperatura mínima.

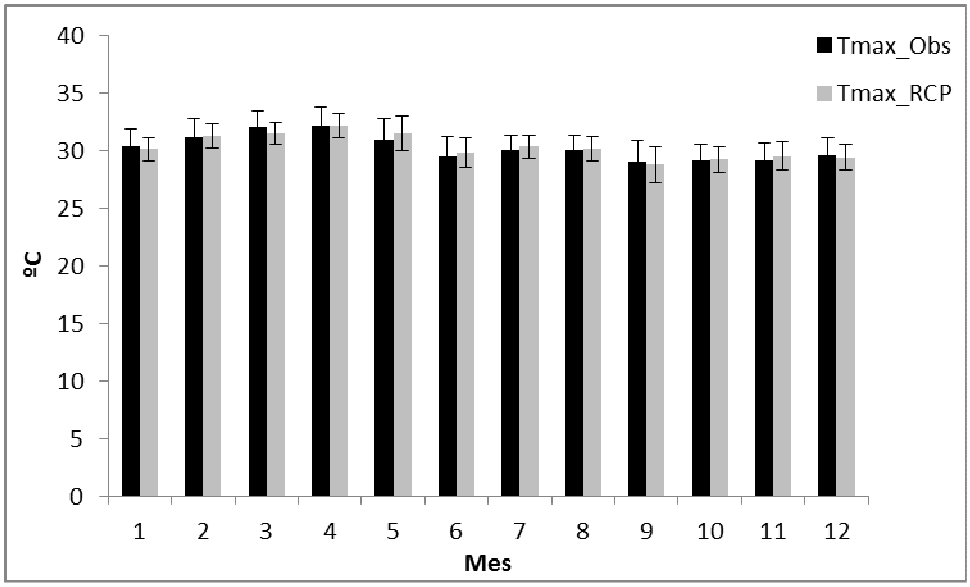


Figura 11. Temperatura máxima de las observaciones y de las proyecciones (escenarios RCP) para el periodo de referencia (1961-1990), con su desviación típica para cada mes del año.

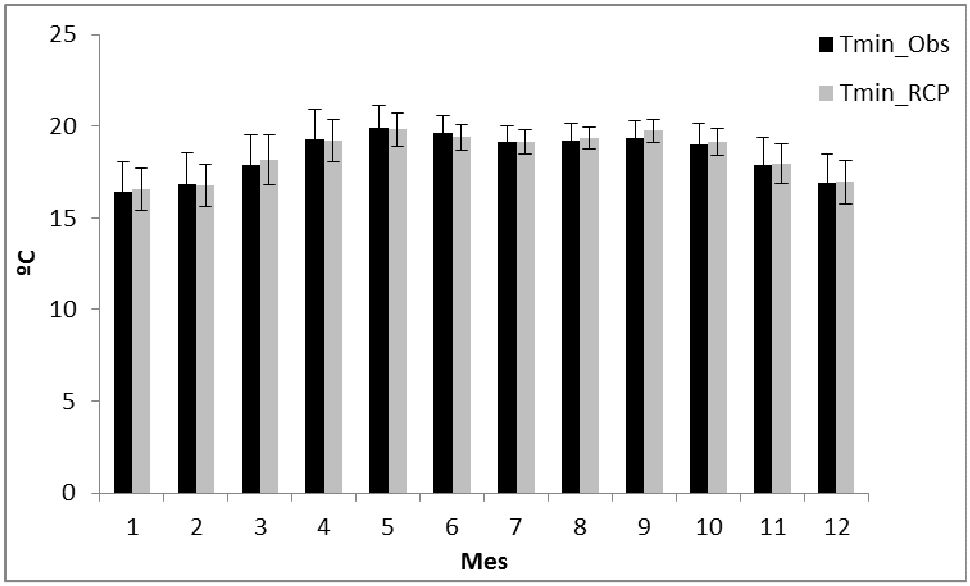


Figura 12. Temperatura mínima de las observaciones y de las proyecciones (escenarios RCP) para el periodo de referencia (1961-1990), con su desviación típica para cada mes del año.

Se considera por tanto aceptable la corrección del bias de los modelos regionales (del instituto SMHi y del MPI) para ambos escenarios (RCPs). Muestra de ello se presenta la comparativa de temperaturas en el Anexo II. Comparativa de temperaturas.

3.3. Anomalías

Los datos de temperatura, tanto los históricos (estación Aeropuerto Ilopango) (a partir de 1994) como las proyecciones bajo escenarios de CC (RCP45 y RCP85), muestran una tendencia positiva, en concordancia con los datos recogidos para el Climate Fact-Sheet (0.19ºC por década, aunque el incremento es mayor en los últimos 30 años) (GERICS, 2016). Desde el año 1994 en adelante, las observaciones de temperatura muestran un incremento positivo continuo. Las temperaturas del escenario RCP8.5 son de las que se espera mayor incremento. La temperatura del escenario RCP4.5 es la que menor incremento de temperatura espera (Figura 13). El incremento de la temperatura media bajo el escenario RCP8.5 es de 0.3ºC por década hasta llegar a 5ºC de diferencia para finales de siglo (periodo 1951-2100); mientras que para el escenario RCP4.5 es de 0.19ºC por década hasta llegar a 2ºC a finales de siglo (periodo 1951-2100), lo cual coincide con la tendencia de los datos observados (que ha tenido un incremento de 0.19ºC por década en el periodo 1961-2015) y por tanto augura la misma tendencia positiva para el futuro.

Estos datos son consistentes con los datos publicados en el Climate Fact-Shet (para el escenario RCP8.5 se esperan anomalías que pueden llegar a 5ºC para finales de siglo con respecto al periodo de referencia, 1971-2000) (GERICS, 2016).

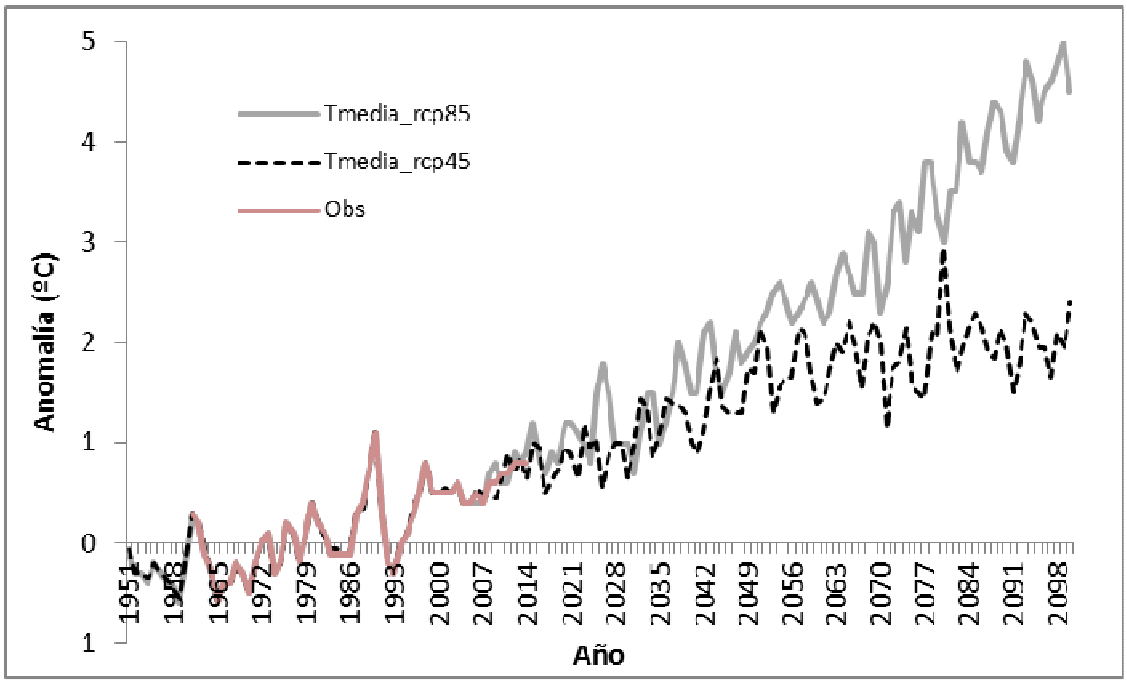


Figura 13. Anomalía de Temperatura media anual con respecto al periodo de referencia 1961-1990 para San Salvador. Registros de temperatura media de la estación Aeropuerto Ilopango y proyecciones de temperatura media para los escenarios RCP45 y RCP85.

3.4. Estacionalidad

A continuación se analiza la diferencia de temperaturas máximas y mínimas de los escenarios con respecto al periodo de referencia para cada mes. Para la temperatura máxima, se espera mayor incremento para mayo en ambos escenarios (+2.9 para RCP4.5 y +5.2ºC para RCP8.5, finales de siglo) y menor para octubre en ambos escenarios (+1.3ºC para RCP4.5 y +2.7ºC para RCP8.5, finales de siglo) (Figura 14). En el caso de la temperatura mínima, se espera mayor incremento para junio (+2.1 para RCP4.5 y +4.4ºC para RCP8.5, finales de siglo) y menor para enero (+1.7 para RCP4.5 y +3.3ºC para RCP8.5, finales de siglo) (Figura 15). Para mayor detalle ver Anexo III (Diagrama de cajas de Temperatura).

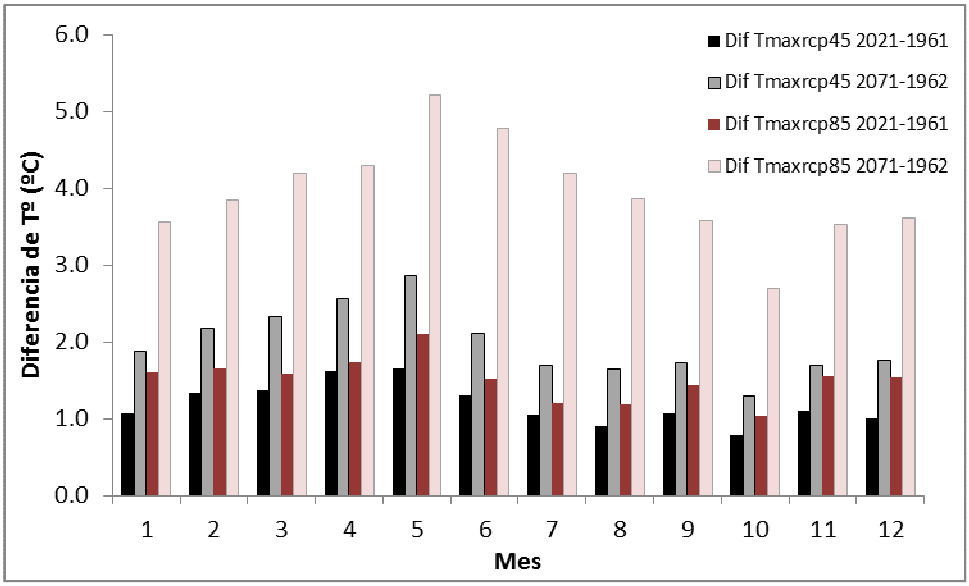


Figura 14. Diferencia de temperatura máxima para distintos periodos (2021-2050 con respecto a 1961-1990, 2071-2100 con respecto a 1961-1900) y escenarios (RCP4.5 y RCP8.5).

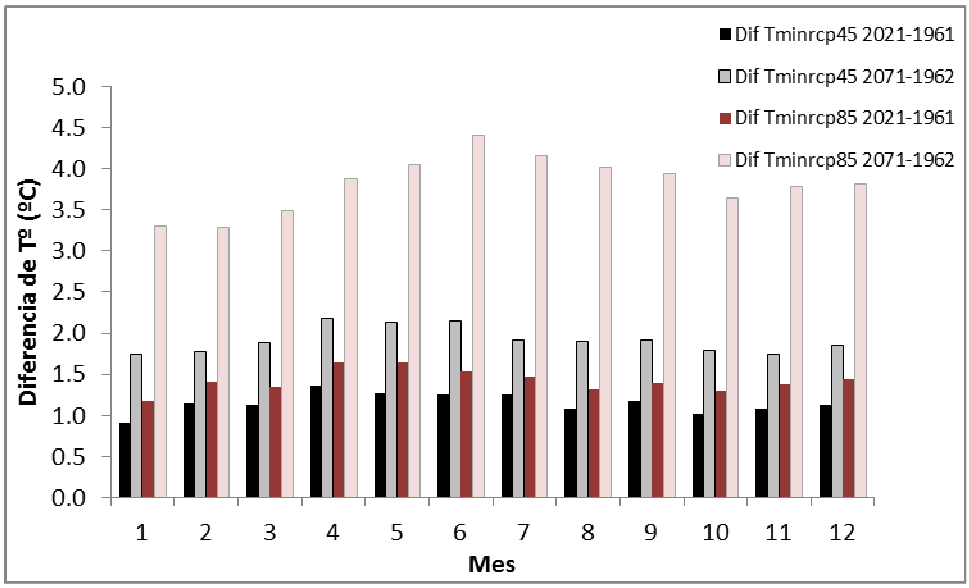


Figura 15. Diferencia de temperatura mínima para distintos periodos (2021-2050 con respecto a 1961-1990, 2071-2100 con respecto a 1961-1900) y escenarios (RCP4.5 y RCP8.5).

3.5. Cálculo de índices climáticos

3.5.1. Temperatura media

Se espera un incremento de la temperatura media entre 1.3ºC y 1.5 ºC para mediados de siglo (RCP4.5 y RCP8.5) y entre 2.9ºC y 3.9 ºC para finales de siglo (RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente) (Tabla 7). Esta tendencia creciente de la temperatura se observa también en los datos históricos (a partir de 1994) y en el futuro se espera mayor incremento (también comentado en el apartado de anomalías) (Figura 16).

Tabla 7: Promedio (Av.) y desviación estándar (Std. Dv.) del percentil 90 de la temperatura máxima de cada periodo estudiado y la diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 y con respecto a los últimos 30 años (1986-2015). Los resultados corresponden a la media de los modelos climáticos estudiados.

Tº media	Periodo	Av.	Std. Dv.	Diferencia1 (1961-1990)	Diferencia2 (1986-2015)
RCP45	1961-1990	24.4	0.4		
	1986-2015	24.9	0.3		
	2021-2050	25.7	0.3	1.3	0.8
	2071-2100	27.3	0.4	2.9	2.4
RCP85	1961-1990	24.4	0.4		
	1986-2015	24.9	0.3		
	2021-2050	25.9	0.4	1.5	1.0
	2071-2100	28.3	0.6	3.9	3.4

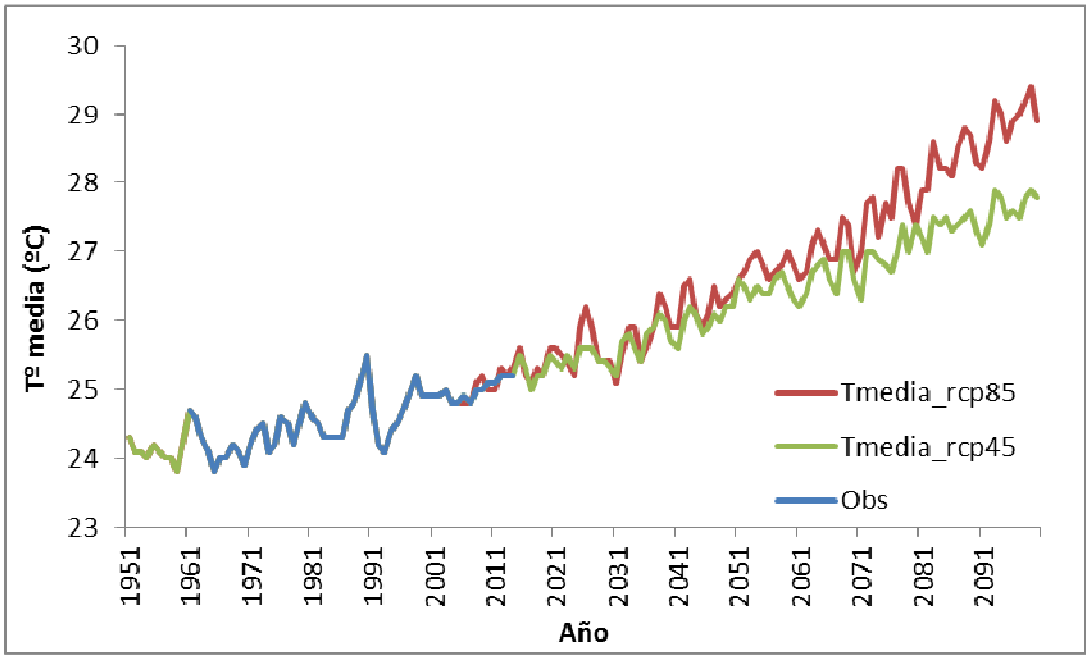


Figura 16. Serie temporal de la temperatura media para los 2 escenarios, RCP4.5 y RCP8.5 (correspondiente a los 2 modelos climáticos analizados) y las observaciones.

3.5.2. Extremos calurosos

Las temperaturas máximas extremas, percentil 90, muestran una tendencia positiva con un incremento a finales de siglo XXI de 2.6ºC para el RCP 4.5 y 4.5 para el RCP 8.5 (con respecto al periodo de referencia de 1961-1990). El percentil 90 del conjunto de modelos para el periodo 1961-1991 es de 32.2ºC mientras que para el periodo 2071-2100 aumenta hasta 34.9ºC (RCP4.5) o 36.7ºC (RCP8.5) (Tabla 8) (Figura 17).

Tabla 8: Promedio (Ensemble Av.) y desviación estándar (Ensembles Std. Dv.) del percentil 90 de la temperatura máxima de cada periodo estudiado y la diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 y con respecto a los últimos 30 años (1986-2015).

Tmax90p	Period	Ensemble Av.	Ensemble Std. Dv.	Difference (1961-1990)	Difference (1986-2015)
AVERAGE of models, RCP45	1961-1990	32.2	0.4		
	1986-2015	32.8	0.4		
	2021-2050	33.8	0.4	1.6	1.0
	2071-2100	34.9	0.5	2.6	2.0
AVERAGE of models, RCP85	1961-1990	32.2	0.4		
	1986-2015	32.8	0.5		
	2021-2050	34.0	0.6	1.8	1.2
	2071-2100	36.7	0.7	4.5	3.9

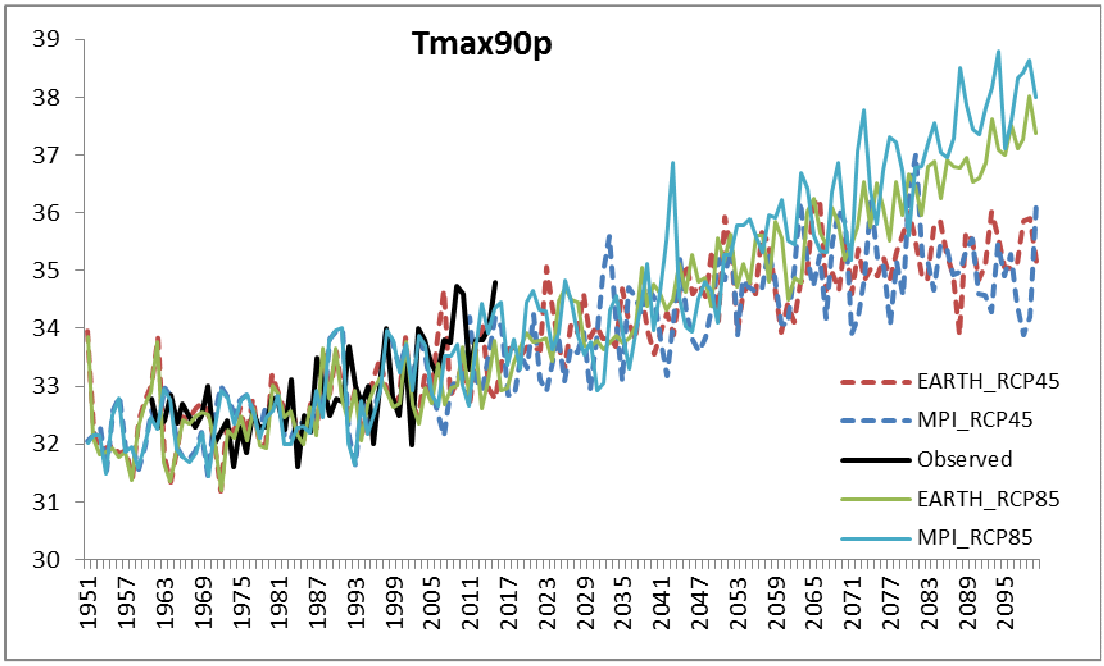


Figura 17. Serie temporal del percentil 90 de la temperatura máxima correspondiente a los 2 modelos climáticos analizados, comparando con las observaciones.

Si comparamos estos resultados con el Climate-Fact-Sheet de Guatemala - El Salvador - Honduras – Nicaragua vemos que se parecen mucho. Según el Fac-Sheet la temperatura máxima se verá incrementada 2.6ºC para el RCP4.5 y 4.7ºC para el RCP8.5. Esto nos sirve para ver que las tendencias esperadas para San Salvador están en línea con las que se esperan para Centro América (GERICS, 2016).

Con respecto al número de días cálidos (TX90p) y noches cálidas (TN90p) la tendencia es significativamente positiva tanto para el escenario RCP4.5 como para el RCP8.5, con una pendiente más pronunciado para este último (Anexo IV. Índices climáticos calculados con Rclimdex). Para finales de siglo se espera un incremento de entre 62 y 86 (según RCP4.5 y RCP8.5) en el porcentaje de días que superan el percentil 90 de la temperatura máxima (Tabla 9); y un incremento entre 68 y 87 en el porcentaje de noches cálidas (Tabla 10).

Tabla 9: Promedio (Av.) y desviación estándar (Std. Dv.) TX90P de cada periodo estudiado y la diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 y con respecto a los últimos 30 años (1986-2015). Los resultados corresponden a la media de los modelos climáticos estudiados.

TX90P	Periodo	Av.	Std. Dv.	Diferecia1 (1961-1990)	Diferecia2 (1986-2015)
RCP45	1961-2000	10.5	12.2		
	1986-2015	22.7	12.6		
	2021-2050	48.2	14.1	37.7	25.5
	2071-2100	72.4	11.2	61.9	49.6
RCP85	1961-2000	10.5	12.2		
	1986-2015	23.9	14.0		
	2021-2050	58.8	17.0	48.3	34.9
	2071-2100	96.1	3.7	85.6	72.2

Tabla 10: Promedio (Av.) y desviación estándar (Std. Dv.) TN90P de cada periodo estudiado y la diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 y con respecto a los últimos 30 años (1986-2015). Los resultados corresponden a la media de los modelos climáticos estudiados.

TN90P	Periodo	Av.	Std. Dv.	Diferecia1 (1961-1990)	Diferecia2 (1986-2015)
RCP45	1961-2000	10.4	8.7		
	1986-2015	24.4	11.5		
	2021-2050	53.5	11.2	43.0	29.1
	2071-2100	78.2	7.4	67.8	53.9
RCP85	1961-2000	10.4	8.7		
	1986-2015	24.3	11.9		
	2021-2050	63.4	13.2	52.9	39.1
	2071-2100	97.3	2.8	86.9	73.1

El valor máximo de las temperaturas máximas y mínimas diarias también espera un incremento para finales de siglo y para los dos escenarios (RCP4.5 y RCP8.5) (Anexo IV. Índices climáticos calculados con Rclimdex). En incremento en el valor de la temperatura máxima se espera que oscile entre 2.4ºC y 4.4ºC (escenario RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente) (Tabla 11). Para el valor máximo de las temperaturas mínimas se espera también incrementos de entre 2.1ºC y 4.4ºC (escenario RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente) (Tabla 12).

Tabla 11: Promedio (Av.) y desviación estándar (Std. Dv.) TXx de cada periodo estudiado y la diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 y con respecto a los últimos 30 años (1986-2015). Los resultados corresponden a la media de los modelos climáticos estudiados.

TXx	Periodo	Av.	Std. Dv.	Diferecia1 (1961-1990)	Diferecia2 (1986-2015)
RCP45	1961-2000	34.1	0.6		
	1986-2015	34.8	0.6		
	2021-2050	35.7	0.6	1.6	0.9
	2071-2100	36.5	0.5	2.4	1.7
RCP85	1961-2000	34.1	0.6		
	1986-2015	34.8	0.6		
	2021-2050	35.9	0.6	1.7	1.0
	2071-2100	38.5	0.7	4.4	3.7

Tabla 12: Promedio (Av.) y desviación estándar (Std. Dv.) TNx de cada periodo estudiado y la diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 y con respecto a los últimos 30 años (1986-2015). Los resultados corresponden a la media de los modelos climáticos estudiados.

TNx	Periodo	Av.	Std. Dv.	Diferecia1 (1961-1990)	Diferecia2 (1986-2015)
RCP45	1961-2000	21.8	0.5		
	1986-2015	22.4	0.5		
	2021-2050	23.1	0.5	1.2	0.6
	2071-2100	24.0	0.5	2.1	1.6
RCP85	1961-2000	21.8	0.5		
	1986-2015	22.4	0.5		
	2021-2050	23.5	0.5	1.7	1.1
	2071-2100	25.9	0.9	4.1	3.6

3.5.3. Olas de calor

Existen varias definiciones de ola de calor. La definición adoptada en este trabajo coincide con la definición que se utiliza en el programa RClimdex, pero el cálculo no se ha hecho con este programa debido a que sólo calcula el número de días. Por tanto en este trabajo la ola de calor se considera aquél evento en el que durante al menos 6 días se supera el percentil 90 de la temperatura máxima (Zang, X. and Yang, F., 2004).

A partir de esta definición se ha calculado el número de olas de calor al año, duración promedio de la ola de calor (días) y temperatura envuelta en la ola de calor.

Para finales del siglo XXI se esperan más periodos de olas de calor y más largos o con mayor duración. De todas formas, viendo los datos dudamos de la certitud de la misma, debido a la desviación típica del resultado de duración de la ola de calor esperados para finales de siglo (±15 días para el RCP8.5) (Tabla 13). Esta desviación se debe a la variabilidad que se espera para el periodo 2071-2100, en el que la duración de las olas de calor para RCP8.5 varía entre un mínimo de 18 días y un máximo de 77 días (con un promedio para el periodo de 40±15 días de duración de las olas de calor) (Figura 19).

A finales de siglo 2071-2100 se espera: que el número de olas de calor al año se incremente entre 4 y 5 (RCP4.5 y RCP8.5); que los días de las olas de calor se incrementen entre 17 y 31 días para el RCP4.5 y 8.5 respectivamente (aunque hay que destacar la incertidumbre que llevas asociados estos números); y que la temperatura de la ola de calor se incremente entre 0.7ºC y 1.1ºC (RCP4.5 y RCP8.5) (Tabla 14).

Cabe destacar la tendencia positiva tanto del número de olas de calor como de la duración (a pesar de la incertidumbre en el grado de incremento) (Figura 18, Figura 19). En el caso de la temperatura de la ola de calor para el escenario RCP4.5 y RCP8.5 (mediados de siglo) la tendencia no es significativa. Para finales de siglo y el escenario RCP8.5 es cuando se espera un incremento en la temperatura de la ola de calor, aunque cada modelo estudiado diverja en la cuantía (Figura 20, Earth en morado en la figura y MPI en azul).

Tabla 13: Promedio (Av.) y desviación estándar (Std. Dv.) de número de olas de calor, duración y temperatura envuelta de cada periodo estudiado para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (media de ambos modelos analizados).

		Nº de olas de calor		**Duración ola de calor**		**Tº de la ola de calor**	
	Periodo	Av.	Std. Dv.	Av.	Std. Dv.	Av.	Std. Dv.
RCP45	**1961-1990**	2.0	1.2	8.7	3.1	32.9	0.2
	1986-2015	3.2	1.4	12.1	4.0	33.1	0.2
	2021-2050	5.0	1.7	16.5	5.5	33.4	0.2
	2071-2100	5.5	2.2	26.2	8.5	33.6	0.3
RCP85	**1961-1990**	2.1	1.6	8.4	2.4	33.0	0.2
	1986-2015	3.2	1.6	10.6	3.4	33.1	0.3
	2021-2050	5.5	1.8	17.8	7.4	33.5	0.3
	2071-2100	7.4	2.2	39.6	15.1	34.1	0.3

Tabla 14: Diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 (D1) y con respecto a los últimos 30 años 1986-2015 (D2) de número de olas de calor, duración y temperatura.

		Nº de olas de calor		**Duración ola de calor**		**Tº de la ola de calor**	
	Periodo	**D1**	**D2**	**D1**	**D2**	**D1**	**D2**
RCP45	**2021-2050**	3.1	1.8	7.9	4.5	0.5	0.3
	2071-2100	3.6	2.3	17.5	14.1	0.7	0.5
RCP85	**2021-2050**	3.4	2.3	9.4	7.2	0.5	0.3
	2071-2100	5.3	4.2	31.2	29.0	1.1	0.9

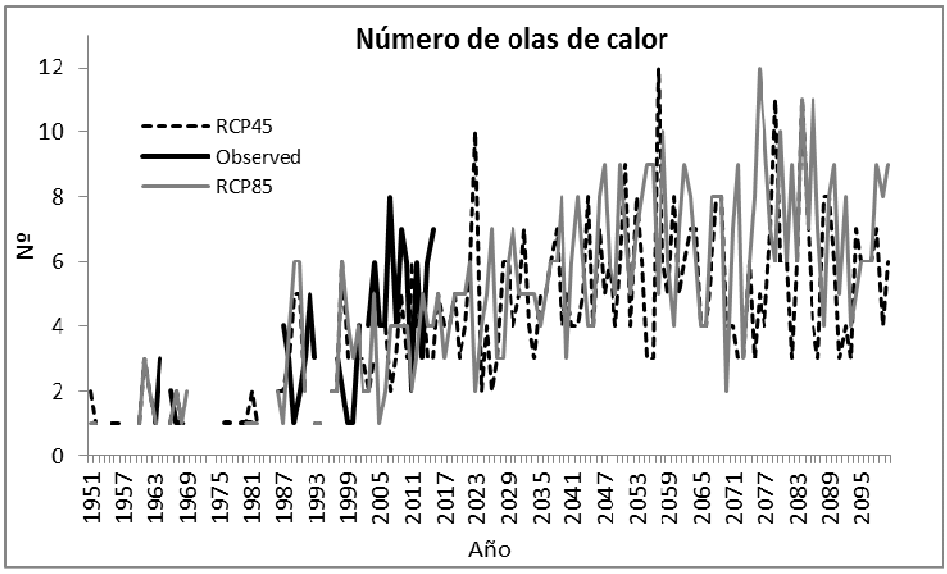


Figura 18. Número de olas de calor al año para los datos observados (aeropuerto Ilopnago), los datos del escenario RCP4.5 (media de los modelos) y el escenario RCP8.5 (media de los modelos).

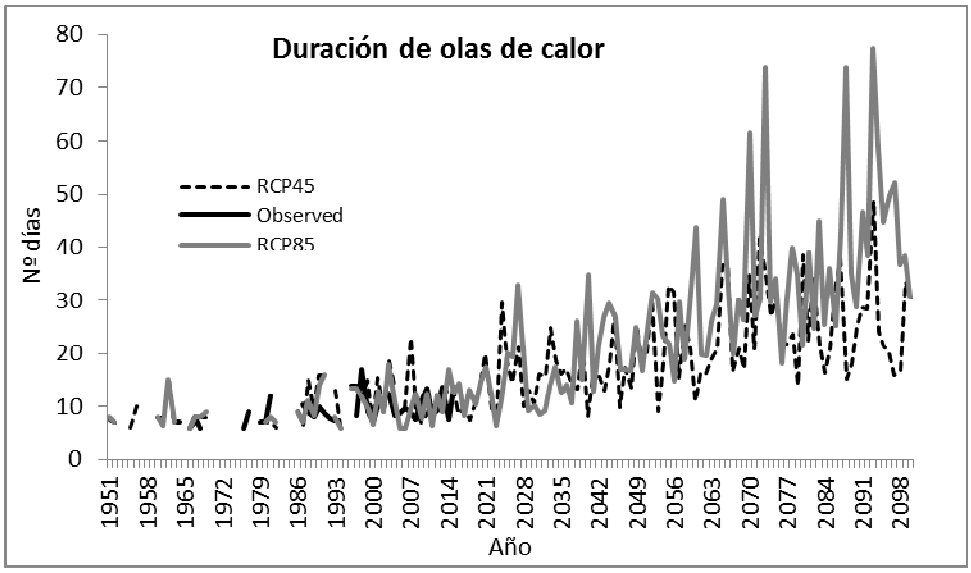


Figura 19. Duración (número de días) de las olas de calor para los datos observados (aeropuerto Ilopnago), los datos del escenario RCP4.5 (media de los modelos) y el escenario RCP8.5 (media de los modelos).

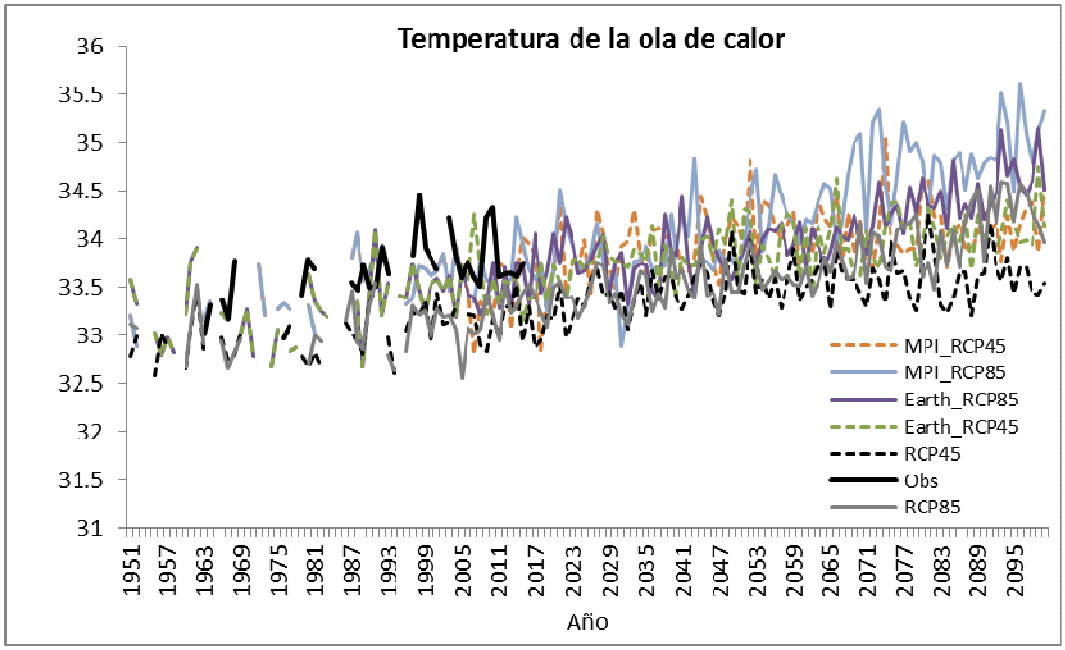


Figura 20. Temperatura (ºC) envuelta en las olas de calor para los datos observados (aeropuerto Ilopnago), los datos del escenario RCP4.5 (media de los modelos y cada modelo estudiado) y el escenario RCP8.5 (media de los modelos y cada modelo estudiado).

3.5.4. Extremos fríos

Las temperaturas mínimas extremas, percentil 10, muestran una tendencia positiva con un incremento a finales de siglo XXI de entre 1.7ºC (para el RCP4.5) y 3.4ºC (para el RCP8.5). El percentil 10 del conjunto de modelos para el periodo 1961-2000 es 16.4ºC mientras que para el periodo 2071-2100 es de 18.1ºC (RCP4.5) o 19.8ºC (RCP8.5) (Tabla 15).

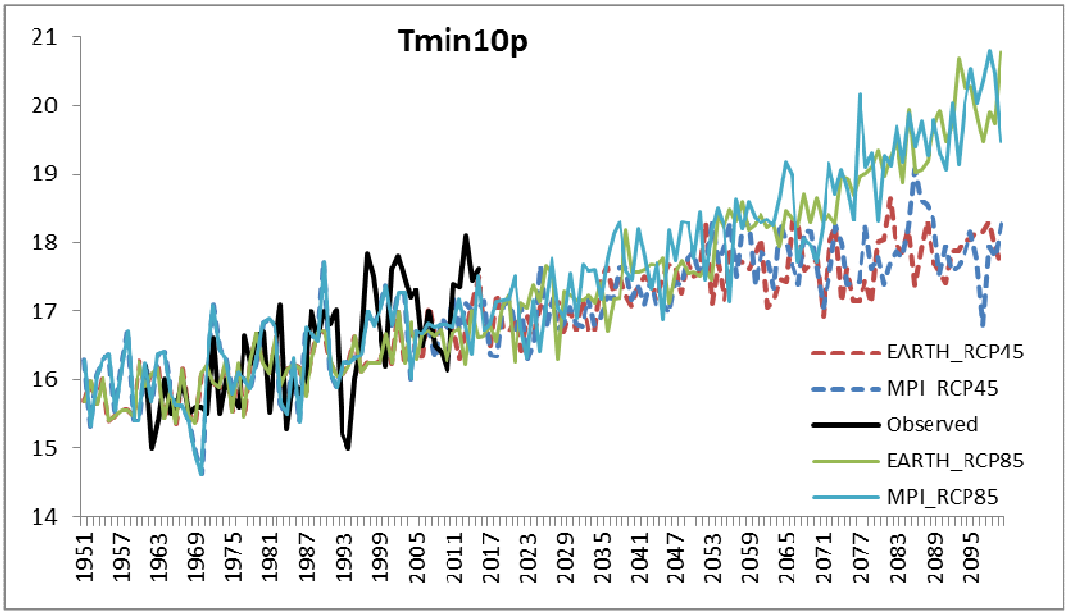


Figura 21. Serie temporal del percentil 10 de la temperatura mínima correspondiente a los 2 modelos climáticos analizados, comparando con las observaciones.

Tabla 15: Promedio (Ensemble Av.) y desviación estándar (Ensembles Std. Dv.) del percentil 90 de la temperatura máxima de cada periodo estudiado y la diferencia con respecto al periodo de referencia marcado por el IPCC 1961-1990 y con respecto a los últimos 30 años (1986-2015).

Tmin10p	**Period**	**Av.**	**Std. Dv.**	**Difference (1961-1990)**	**Difference (1986-2015)**
RCP45	1961-1990	16.4	0.4		
	1986-2015	16.8	0.4		
	2021-2050	17.4	0.4	1.0	0.6
	2071-2100	18.1	0.3	1.7	1.3
RCP85	1961-1990	16.4	0.4		
	1986-2015	16.8	0.4		
	2021-2050	17.7	0.4	1.3	0.9
	2071-2100	19.8	0.6	3.4	3.0

Si comparamos estos resultados con el Climate-Fact-Sheet de Guatemala - El Salvador - Honduras – Nicaragua (GERICS, 2016) vemos que los extremos fríos se parecen mucho aunque para San Salvador incrementarán algo menos. Según el Fac-Sheet la temperatura mínima se verá incrementada 2.1ºC para RCP4.5 y 3.8ºC para el RCP8.5.

4. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES EN AMSS

Los datos observados históricos analizados muestran una tendencia al aumento de la temperatura del aire en el Area Metropolitana de San Salvador (AMSS). En concreto, en el periodo 1991-2015 la temperatura promedio y las temperaturas máximas han aumentado casi 0.5ºC y 1ºC respectivamente (con respecto al periodo 1961-1990).

Los resultados obtenidos indican que esta tendencia positiva se mantendrá durante las siguientes décadas pudiendo ser incluso más marcada si consideramos un escenario de emisiones de gases efecto invernadero extremo (RCP8.5). En un escenario moderado (RCP4.5), la temperatura media para finales de siglo (periodo 1971-2100) aumentará 2.9ºC con respecto al periodo 1961-1990. Sin embargo, en el escenario RCP8.5 el aumento a finales de siglo sería de 3.9ºC. Estos resultados son consistentes con otros estudios para Centro América (GERICS, 2016).

El incremento en la temperatura del aire no se dará de igual forma a lo largo de los meses del año. Se espera el mayor incremento de la temperatura máxima en Mayo y el menor incremento en Octubre (coincidiendo con el inicio de la época más cálida, que es de Junio a Septiembre y menos cálida, que es de Noviembre a Febrero).

Las consecuencias de este incremento de la temperatura, repercutirá en los índices climáticos de la zona. El indicador de temperatura máxima diaria extrema (Tmax90p), que es una referencia para las situaciones de mucho calor, se incrementará a finales de siglo (periodo 1971-2100) en 2.6ºC y 4.5ºC con respecto al periodo referencia (1961-1990) para el escenario moderado (RCP4.5) y el escenario más extremo (RCP8.5) respectivamente. Si comparamos el valor futuro (finales de siglo, 2071-2100) de las temperaturas máximas (Tmax90p) con un periodo más actual (1986-2015), en el que ya se está notando el efecto del cambio climático, el incremento se situará entre 2ºC y 3.9ºC (pasaría de 32.9ºC a 34.9ºC-36.7ºC) dependiendo del escenario considerado. Considerando que estos incrementos de temperatura suponen el rango de valores posibles para finales de siglo, habría que esperar un impacto significativo en el confort térmico en AMSS.

Además de la temperatura máxima extrema, es de suma importancia conocer el porcentaje de noches cálidas debido a su influencia sobre la salud y la capacidad del metabolismo humano de recuperarse de elevadas temperaturas durante el periodo diurno. En este sentido, se espera un incremento notable del porcentaje de las noches cálidas (entre 68 y 87%) para finales de siglo (periodo 2071-2100).

Ligado al incremento de temperatura y los efectos en salud humana, se encuentran los eventos de ola de calor. Para finales del siglo XXI se esperan más periodos de ola de calor y más largos (con mayor duración). Aunque la incertidumbre de la duración de las olas de calor para finales de siglo es elevada, sí que es seguro que las olas de calor serán más prolongadas (40±15 días para el escenario más extremo, RCP8.5). Se espera además que haya más olas de calor a finales de siglo: entre 5 y 9 olas de calor al año (en el escenario más extremo, RCP8.5), frente a 1-3 olas de calor anuales del periodo de referencia (1961-1990); o 2-5 olas de calor en el periodo más actual (1986-2015).

Finalmente, se estima que el incremento en la temperatura de la ola de calor para finales de siglo (periodo 2071-2100) será de 0.5ºC y 0.9ºC para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente en comparación con los 30 últimos años (1986-2015).

Estos resultados, basados en las proyecciones climáticas globales de los escenarios IPCC, muestran una situación futura preocupante para AMSS debido al incremento significativo de los valores de temperatura del aire. Las consecuencias de los escenarios climáticos futuros implicarán unas condiciones de confort térmico en los espacios exteriores difícil de asumir por la población que no solo se darán en situaciones excepcionales de olas de calor, sino que el disconfort térmico se extenderá durante gran parte del año. En concreto, el porcentaje de situaciones climáticas peligrosas para la salud humana se incrementará con implicaciones directas en la mortalidad y morbilidad, así como en la productividad laboral y la economía tanto pública como privada. En este sentido, es necesario tener presente la elevada vulnerabilidad de una parte importante de la población y de los sistemas urbanos de AMSS donde existe un porcentaje significativo de hogares con acceso deficiente a servicios básicos (sistemas de abastecimiento, de saneamiento, de disponibilidad de alimentos, etc.). En este contexto, el necesario aislamiento térmico de las edificaciones o el acceso a sistemas de refrigeración se plantea como un gran reto para los hogares más pobres que sin duda serán los más vulnerables al cambio climático. En cualquier caso, es preciso, reducir la vulnerabilidad del conjunto de AMSS frente al cambio climático actual y futuro, integrando la adaptación con la planificación (urbana, energética, de transporte, de salud, entre otros) y la toma de decisiones y buscando sinergias con otros posibles planes de desarrollo ya en vigor o previstos.

La adaptación al cambio climático debe plantearse como una opción clave e ineludible para reducir los impactos y bordar nuevas oportunidades de desarrollo urbano y económico en AMSS. En este contexto, la evaluación de vulnerabilidad de AMSS se presenta como un ejercicio clave para evaluar las condiciones de cada municipio para afrontar los retos del cambio climático. Dicho análisis se presenta en el informe: “Análisis de vulnerabilidad socioeconómica frente al aumento de temperaturas en los municipios del Área Metropolitana de San Salvador”.

Así mismo, es del todo primordial tener un entendimiento de la fenomenología del clima urbano (isla de calor) de AMSS que, como no puede ser de otra manera, está condicionado por la tipología de desarrollo urbano y su interacción con la climatología regional. De esta forma, conociendo las causas que condicionan el confort térmico en AMSS se podrán proponer actuaciones de adaptación al cambio climático concretas y específicas para su casuística particular. Este análisis se presenta en otro documento titulado: “Análisis de la Isla de Calor y Mapa de Clima Urbano en AMSS”.

BIBLIOGRAFÍA

Alexander, L., Yang, H., Perkins, S., 2016. Background Material.

Collins, D.A., Della-Marta, P.M., Plummer, N., Trewin, B.C., 2000. Trends in annual frequencies of extreme temperature events in Australia. Aust. Meteorol. Mag. 49, 277–292.

Deque, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Glob. Planet. Change 57, 16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030

Esparza, C., 2013. SERIES TEMPORALES. CSIC.

Fischer, E.M., Lawrence, D.M., Sanderson, B.M., 2011. Quantifying uncertainties in projections of extremes—a perturbed land surface parameter experiment. Clim. Dyn. 37, 1381–1398. doi:10.1007/s00382-010-0915-y

Flato, G., Marotzke, J, Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jacob, C., Kattsov, V., Reason, C., Rummukainen, M., 2013. Evaluation of Climate Models, In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assess-ment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (ed. ed. .)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

GERICS, 2016. Climate -Fact-Sheet. Guatemala - El Salvador - Honduras - Nicaragua.

González-Aparicio, I., Hidalgo, J., 2012. Dynamically based future daily and seasonal temperature scenarios analysis for the northern Iberian Peninsula. Int. J. Climatol. 32, 1825–1833. doi:10.1002/joc.2397

Hewitt, C., Director, E., 2005. The ENSEMBLES project. EGU Newslett 13, 22–25.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Final Draft IPCC WGII AR5.

Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O.B., Christensen, J.H., Castro, M. de, Déqué, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sánchez, E., Schär, C., Seneviratne, S.I., Somot, S., Ulden, A. van, Hurk, B. van den, 2007. An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. Clim. Change 81, 31–52. doi:10.1007/s10584-006-9213-4

Kjellström, E., Bärring, L., Jacob, D., Jones, R., Lenderink, G., Schär, C., 2007. Modelling daily temperature extremes: recent climate and future changes over Europe. Clim. Change 81, 249–265. doi:10.1007/s10584-006-9220-5

Kjellström, E., Bärring, L., Nikulin, G., Nilsson, C., Persson, G., Strandberg, G., 2016. Production and use of regional climate model projections – A Swedish perspective on building climate services. Clim. Serv. doi:10.1016/j.cliser.2016.06.004

MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales), Dirección General del Observatorio Ambiental, Gerencia de Meteorología. Gobierno de El Salvador. Datos históricos de Aeropuerto Ilopango

Nairn, J.R., Fawcett, R.G., Day, K.A., Centre for Australian Weather and Climate Research, 2013. Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia. Centre for Australian Weather and Climate Research, Melbourne, Vic.

Perkins, S.E., Alexander, L.V., 2012. On the Measurement of Heat Waves. J. Clim. 26, 4500–4517. doi:10.1175/JCLI-D-12-00383.1

Perkins, S.E., Alexander, L.V., Nairn, J.R., 2012. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. Geophys. Res. Lett. 39, L20714. doi:10.1029/2012GL053361

Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E., 2010a. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theor. Appl. Climatol. 99, 187–192. doi:10.1007/s00704-009-0134-9

Piani, C., Weedon, G.P., Best, M., Gomes, S.M., Viterbo, P., Hagemann, S., Haerter, J.O., 2010b. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. J. Hydrol. 395, 199–215. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.024

Räty, O., Räisänen, J., Ylhäisi, J.S., 2014. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. Clim. Dyn. 42, 2287–2303. doi:10.1007/s00382-014-2130-8

Russo, S., Dosio, A., Graversen, R.G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M.B., Singleton, A., Montagna, P., Barbola, P., Vogt, J.V., 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. J. Geophys. Res. Atmospheres 119, 12,500-12,512. doi:10.1002/2014JD022098

Saiful, A.K.M, 2013. Exterme_climate_using RClimIndex.pdf.

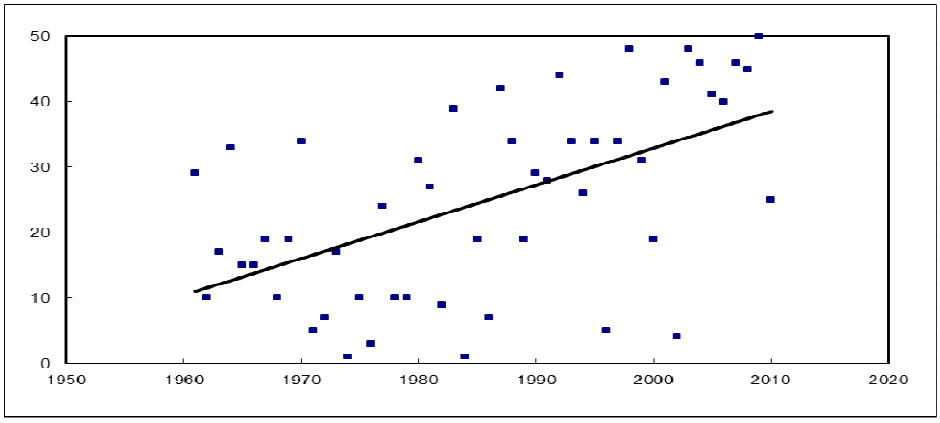
Santos, C.A.C. dos, 2011. Trends in indices for extremes in daily air temperature over Utah, USA. Rev. Bras. Meteorol. 26, 19–28.

Themeßl, M.J., Gobiet, A., Heinrich, G., 2012. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. Clim. Change 112, 449–468. doi:10.1007/s10584-011-0224-4

Zang, X., Yang, F., 2004. RClimDex (1.0). Manual del Usuario.

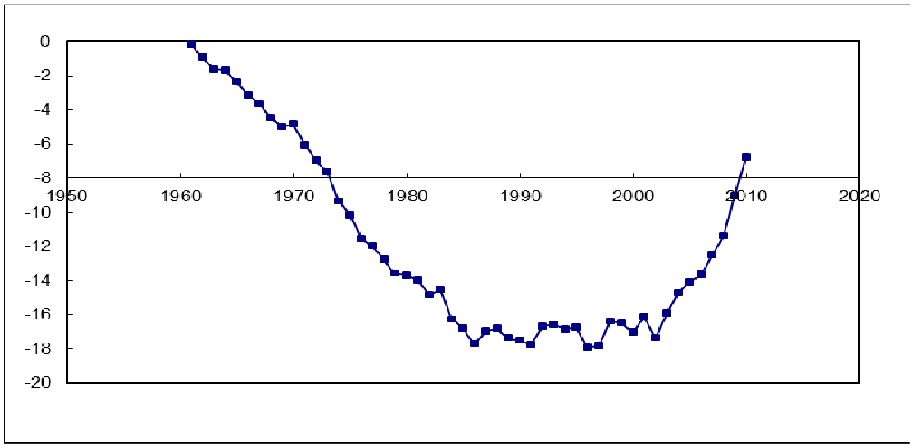
Anexo I. Análisis de tendencias de la temperatura máxima

Spearmans Rho



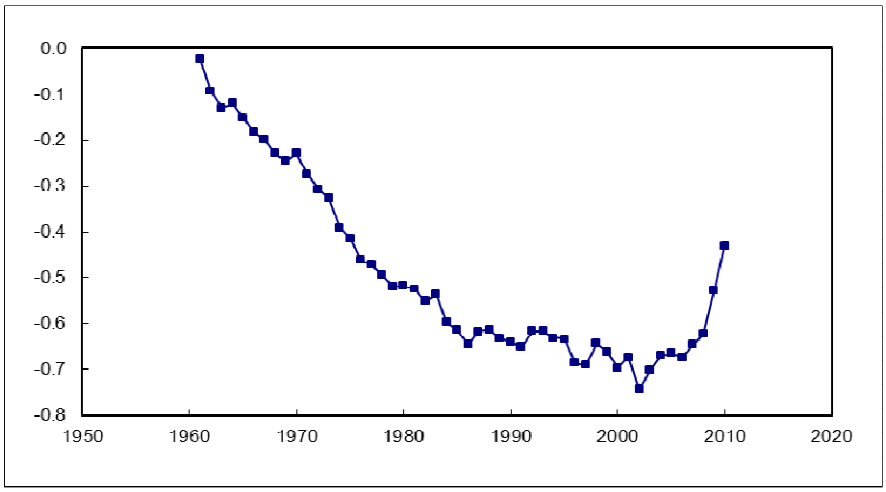
Resultado del test de Spearmans Rho. Eje de abscisas años y eje de coordenadas el ranking. Se muestra la línea de la tendencia.

Desviación acumulada



Resultado del test de Desviación acumulada. Eje de abscisas años y eje de coordenadas la desviación.

Probabilidad Worsely



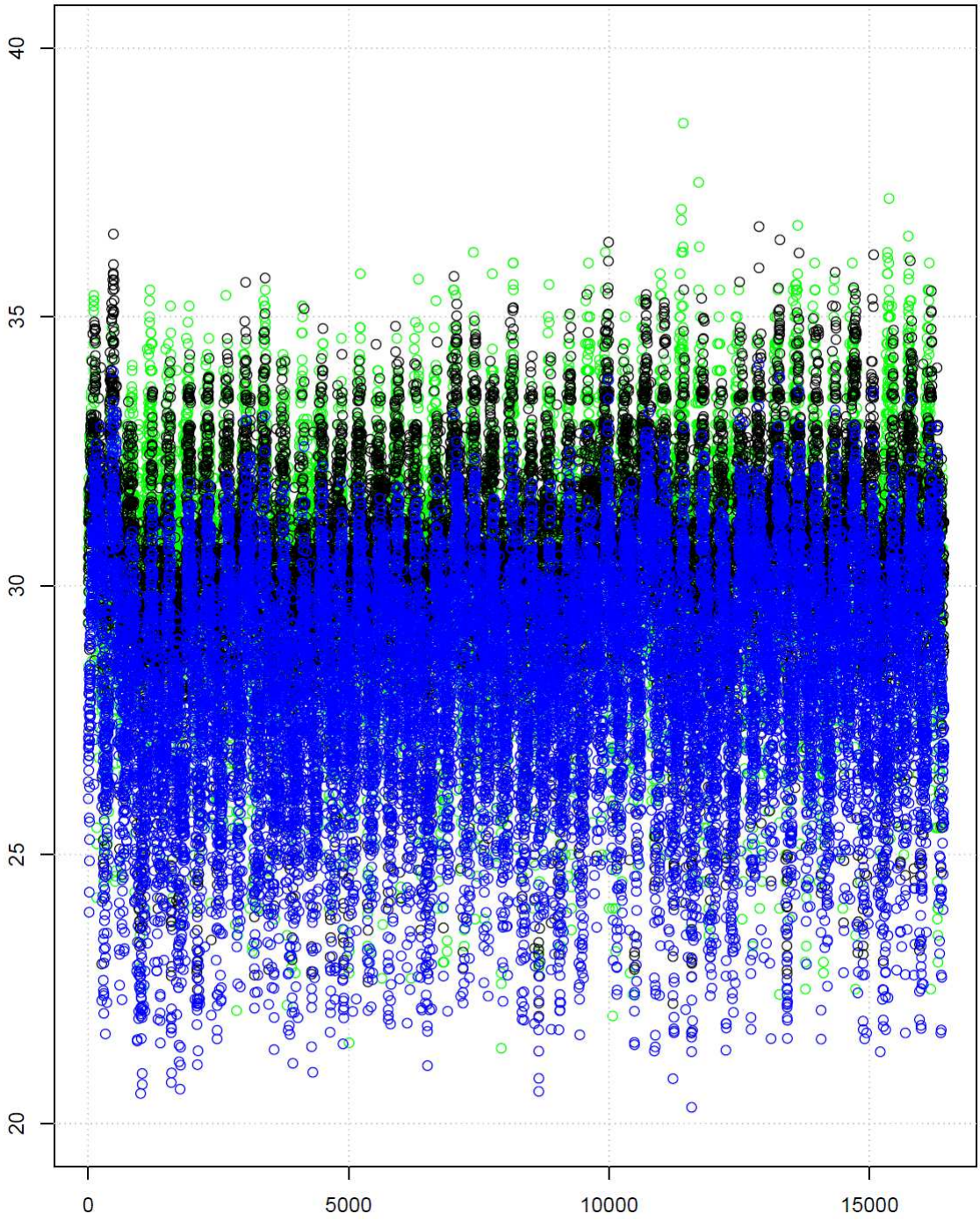
Resultado del test de Probabilidad Worsely. Eje de abscisas años y eje de coordenadas la probabilidad (en negativo).

Anexo II. Comparativa de temperaturas

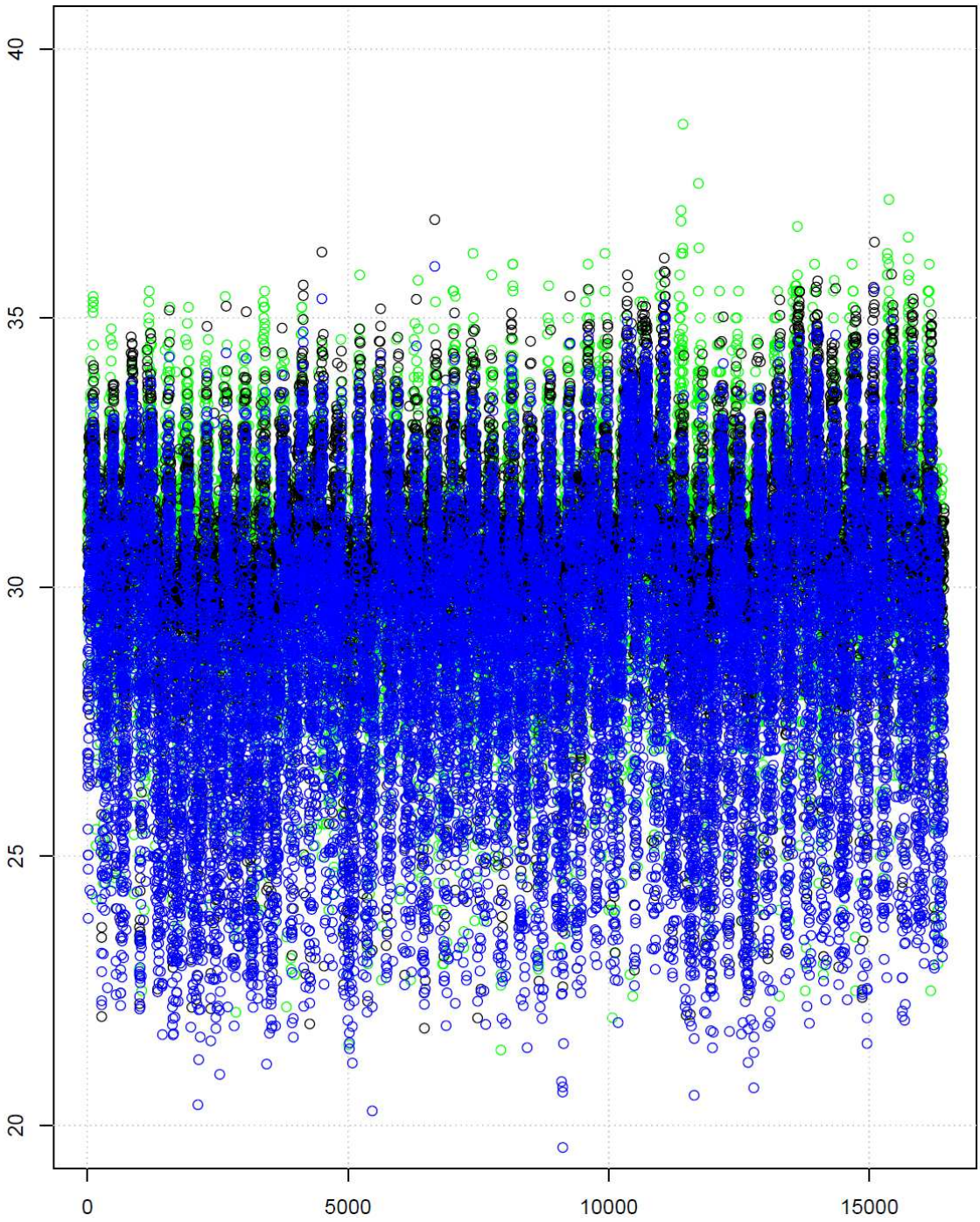
NOTA: Observaciones en verde, modelo sin corrección en azul, modelo corregido en negro (eje de abscisas días de 1961 hasta 2014 y eje de coordenadas temperatura, ºC)

Temperatura máxima, RCP45

- Instituto SMHI (modelo regional RCA4 forzado por EC-EARTH)

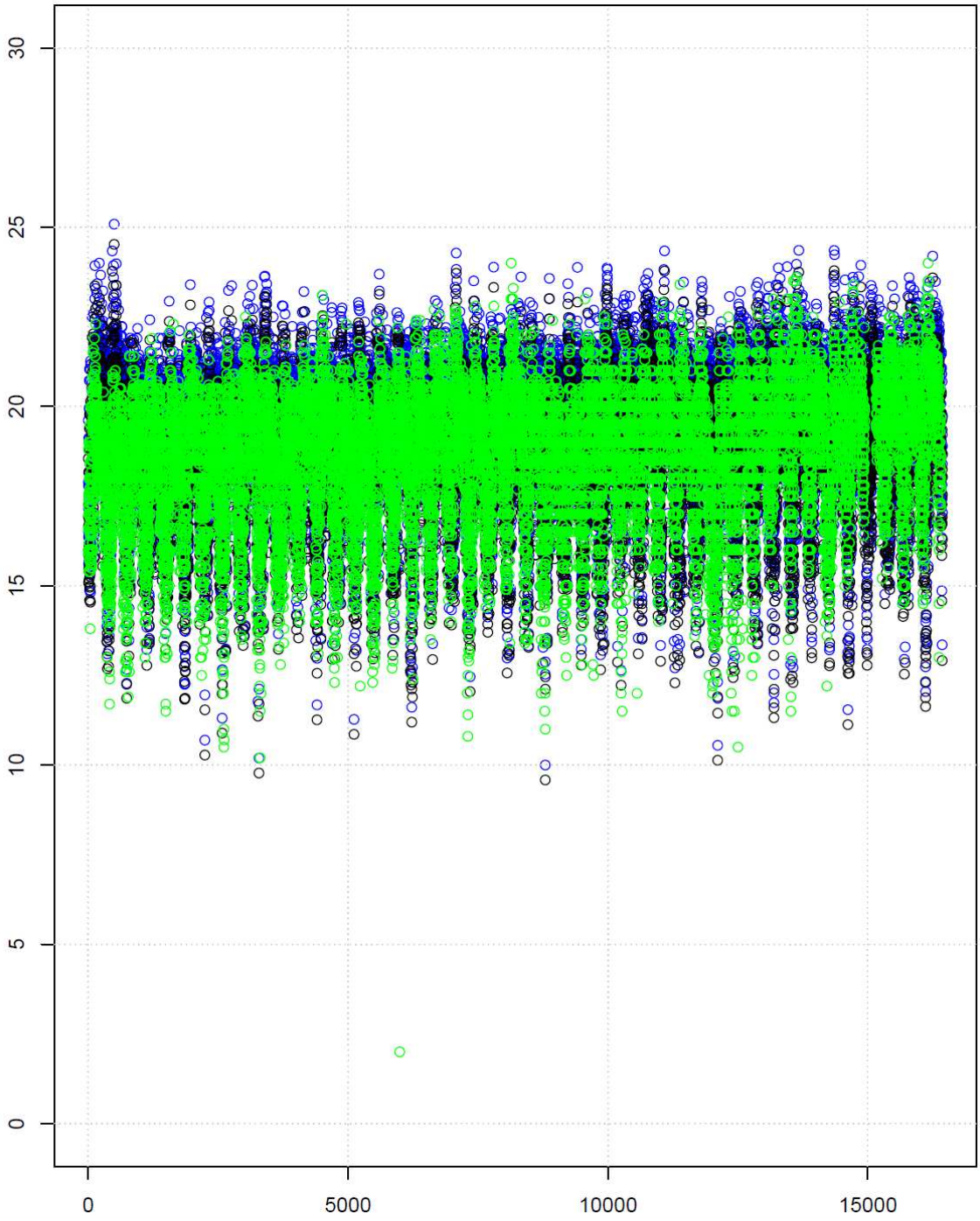


- Instituto MPI (modelo regional RCA4 forzado por ESM-LR)

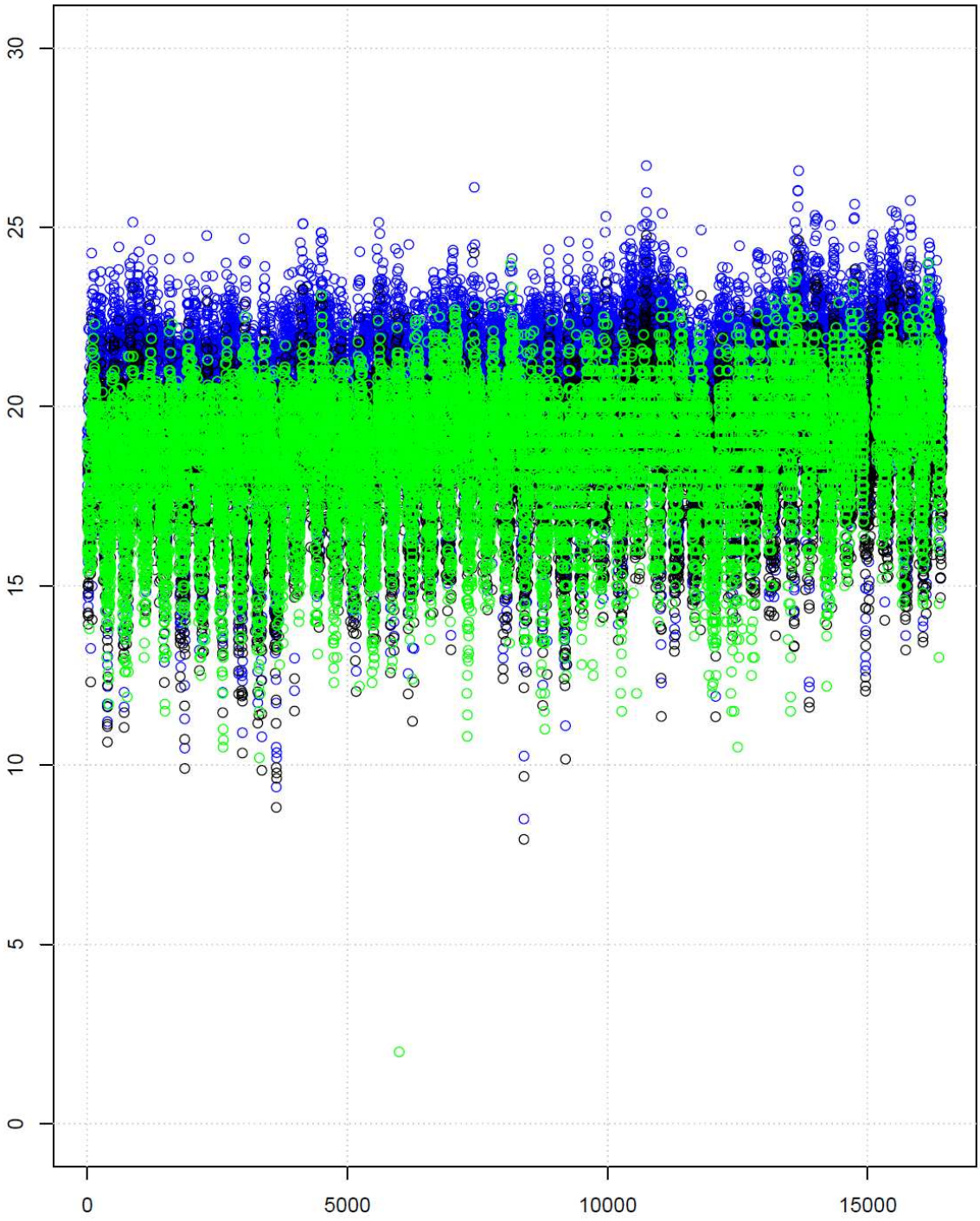


Temperatura mínima, RCP45

- Instituto SMHI (modelo regional RCA4 forzado por EC-EARTH)

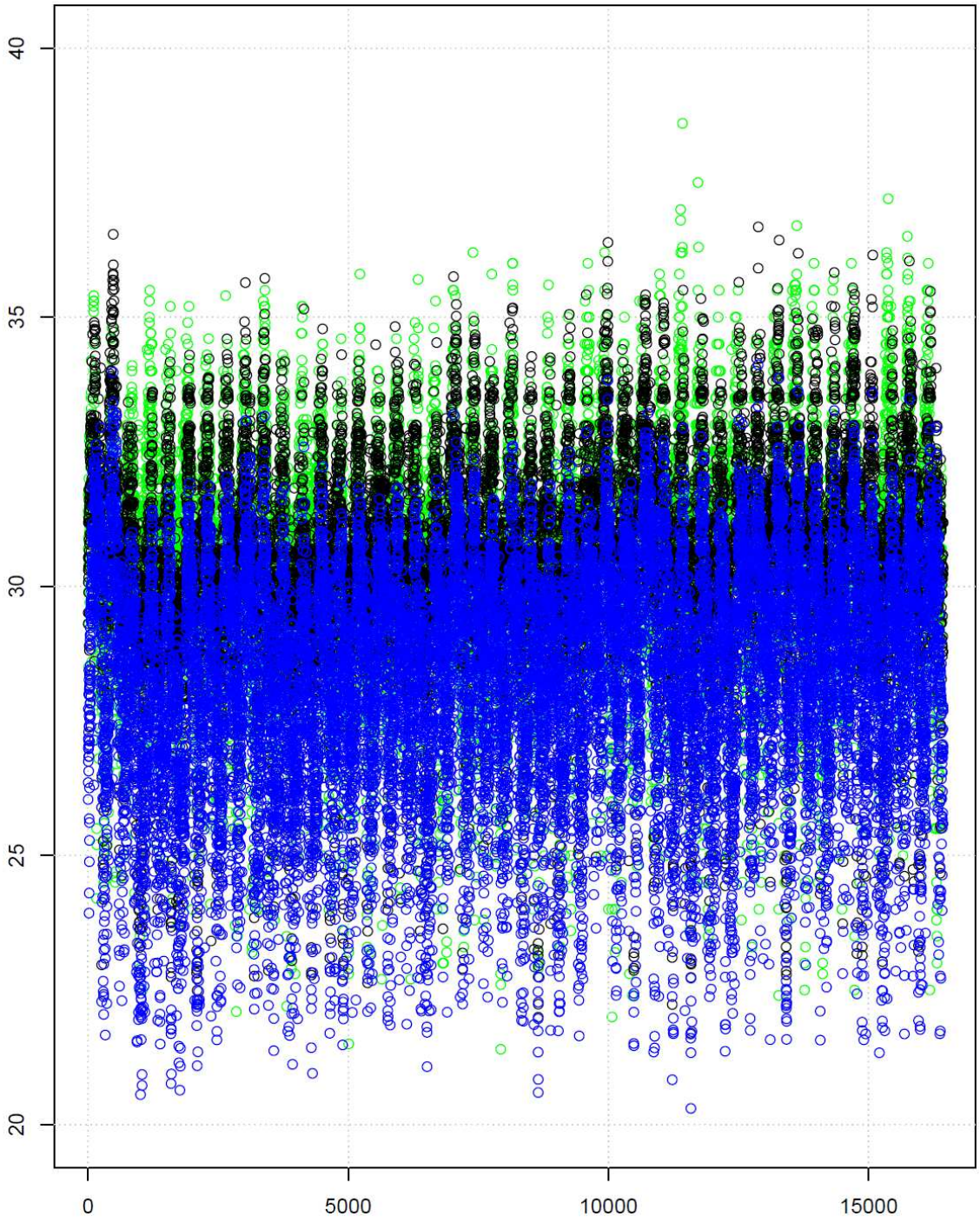


- Instituto MPI (modelo regional RCA4 forzado por ESM-LR)

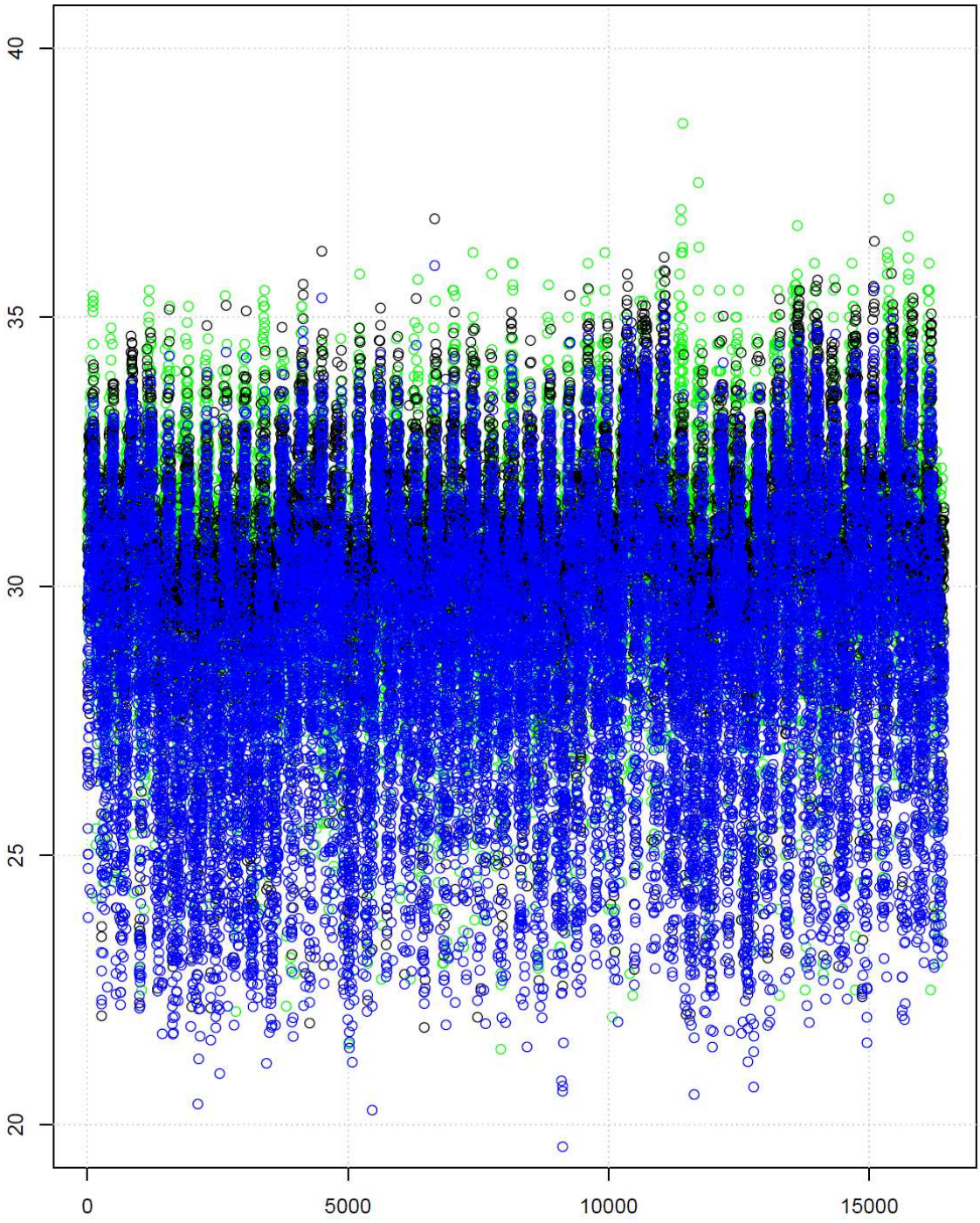


Temperatura máxima, RCP85

- Instituto SMHI (modelo regional RCA4 forzado por EC-EARTH)

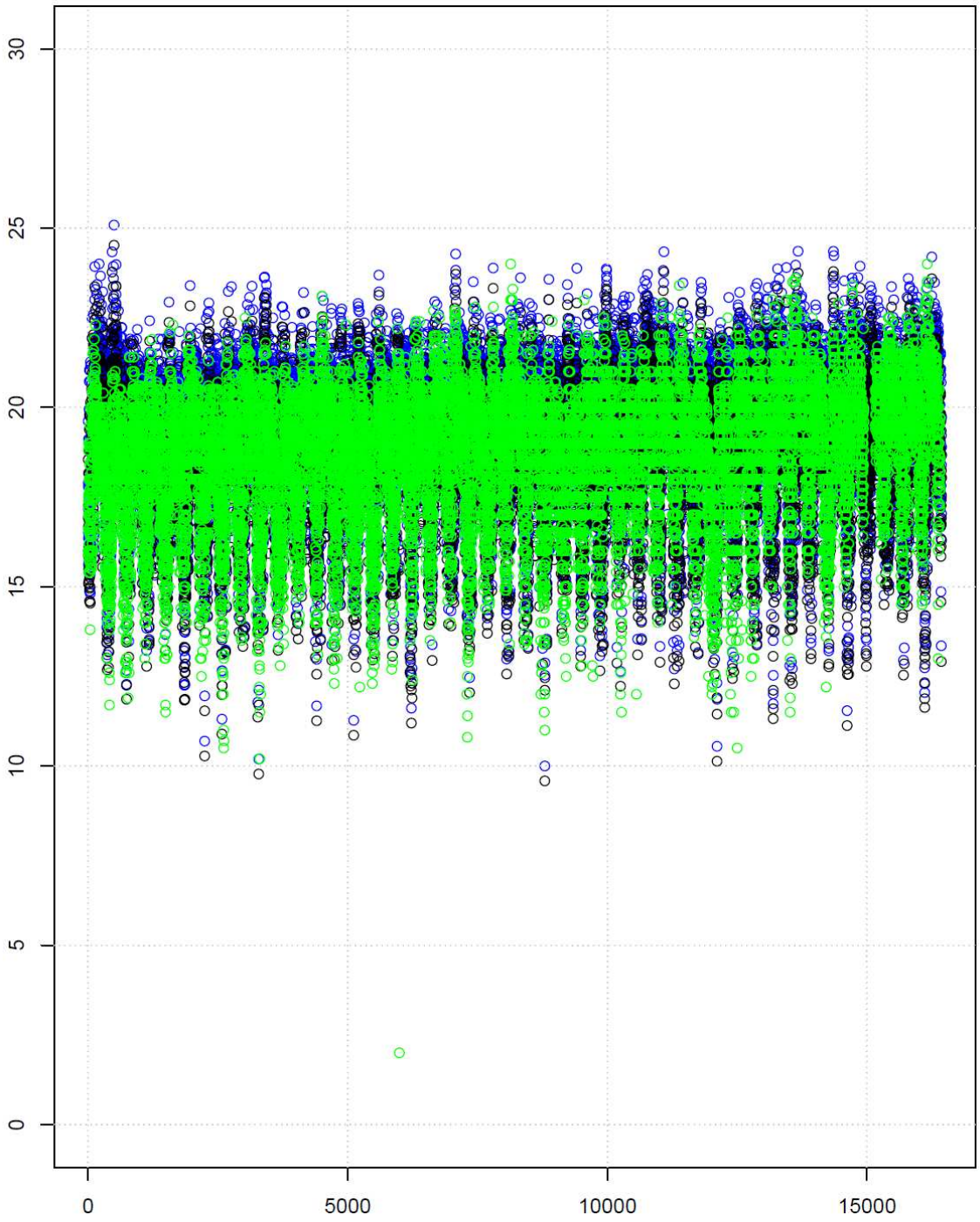


- Instituto MPI (modelo regional RCA4 forzado por ESM-LR)

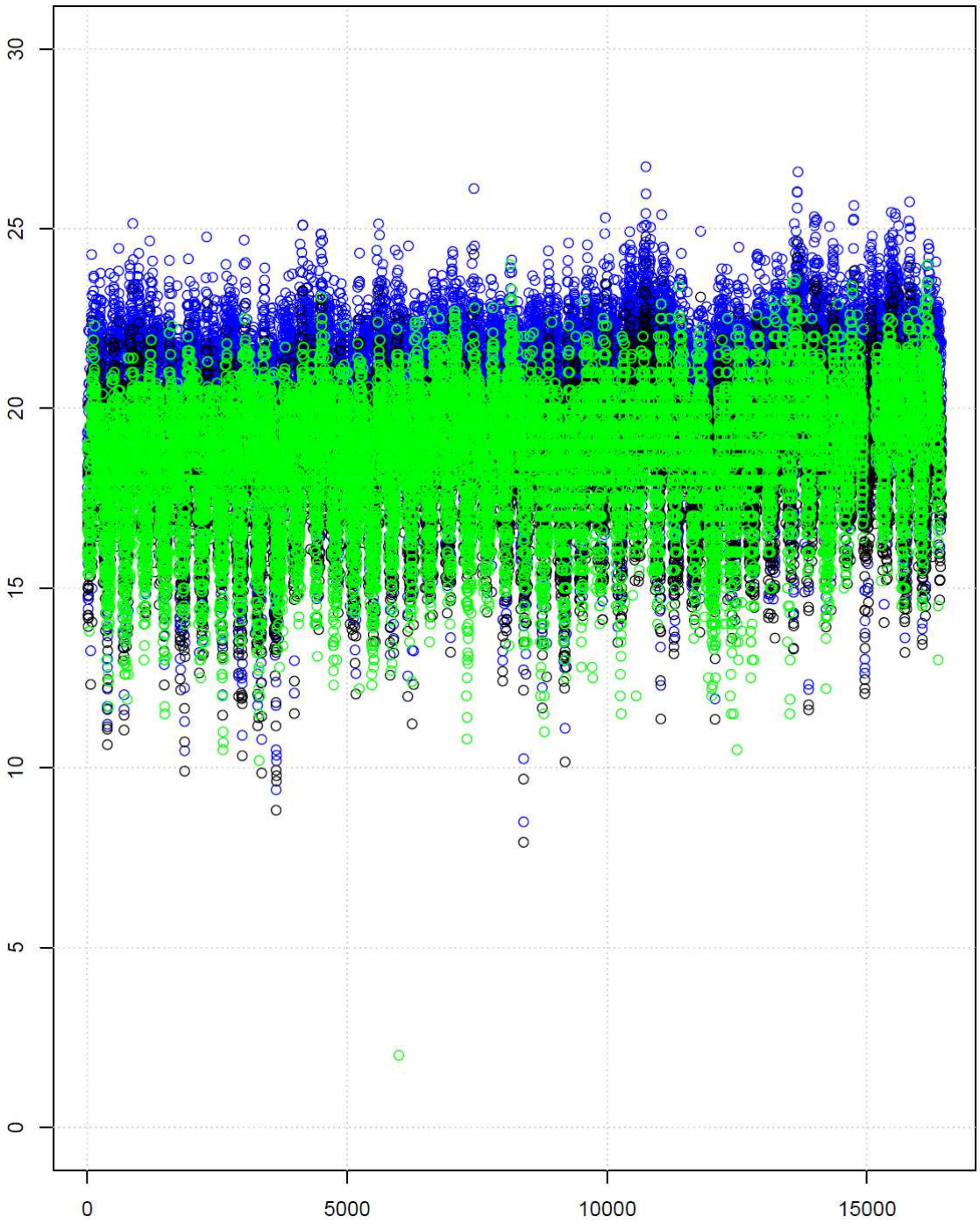


Temperatura mínima, RCP85

- Instituto SMHI (modelo regional RCA4 forzado por EC-EARTH)



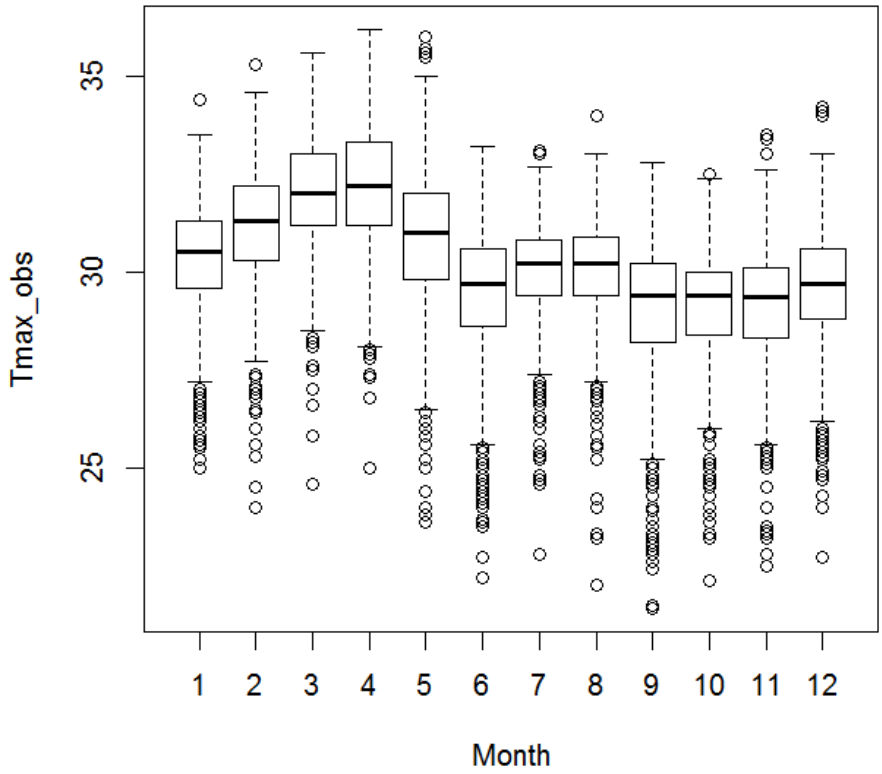
- Instituto MPI (modelo regional RCA4 forzado por ESM-LR)

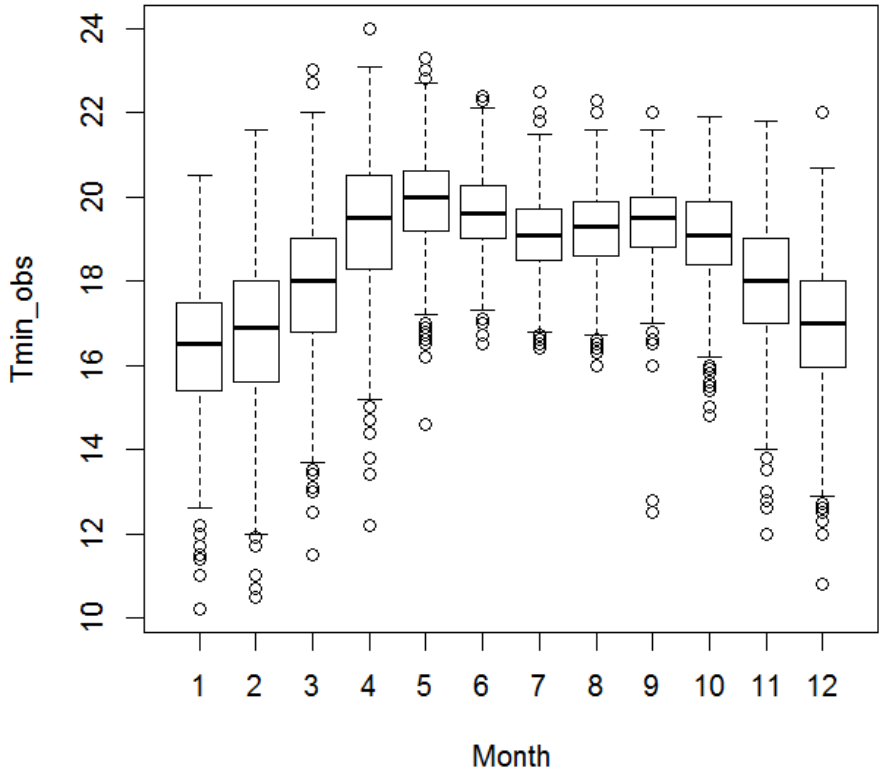


Anexo III. Diagrama de cajas de Temperatura

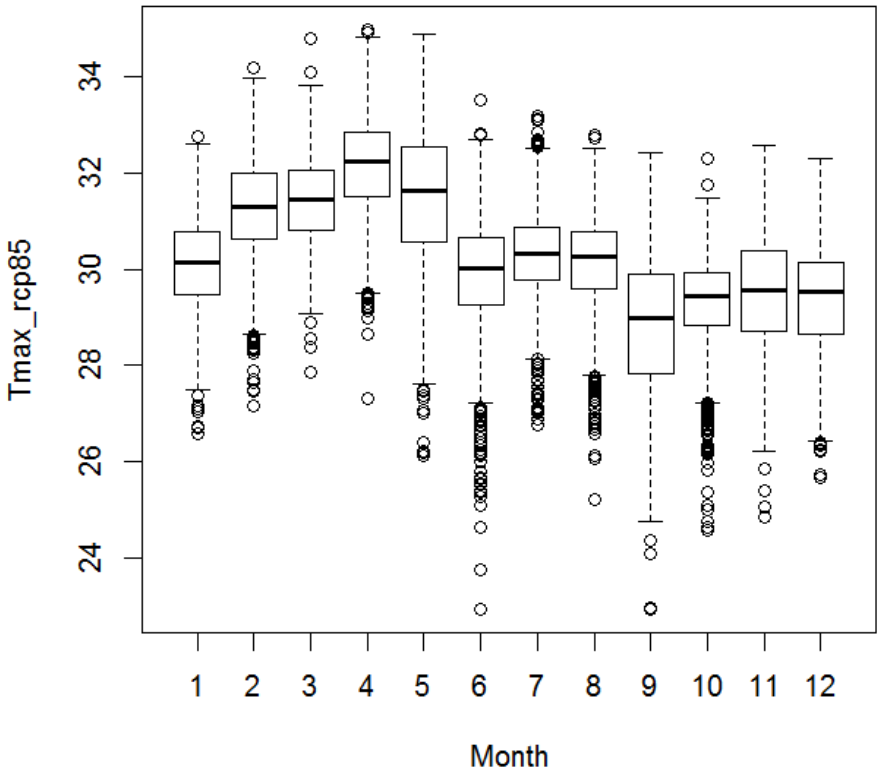
Periodo 1961-1990

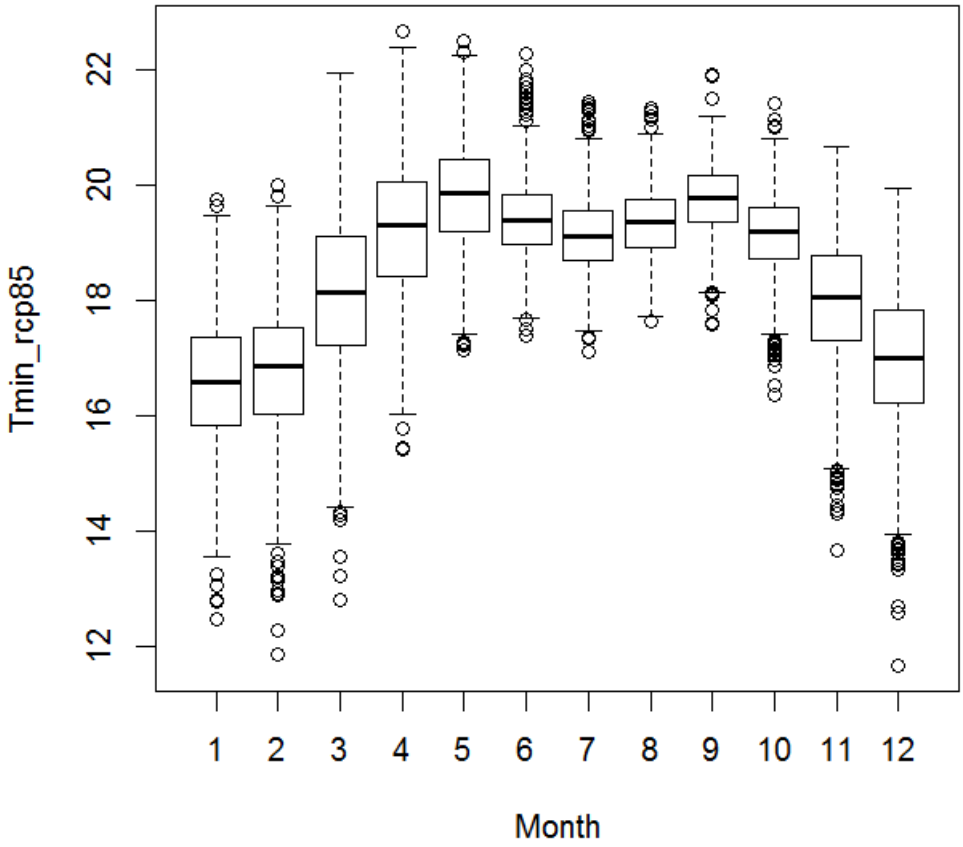
Observaciones





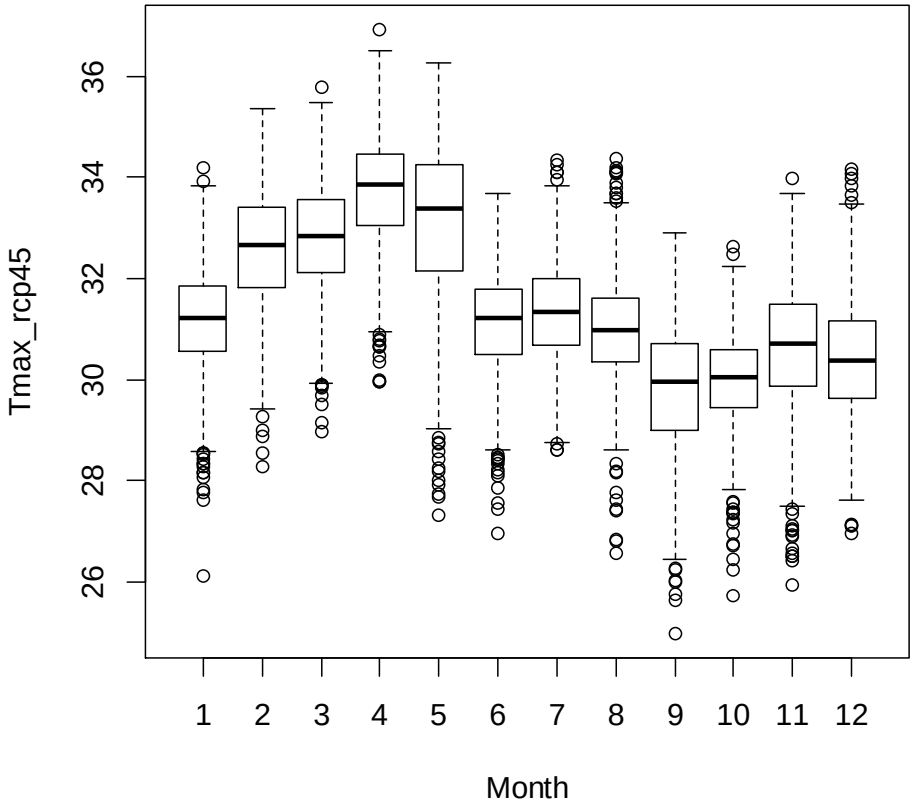
Proyecciones:

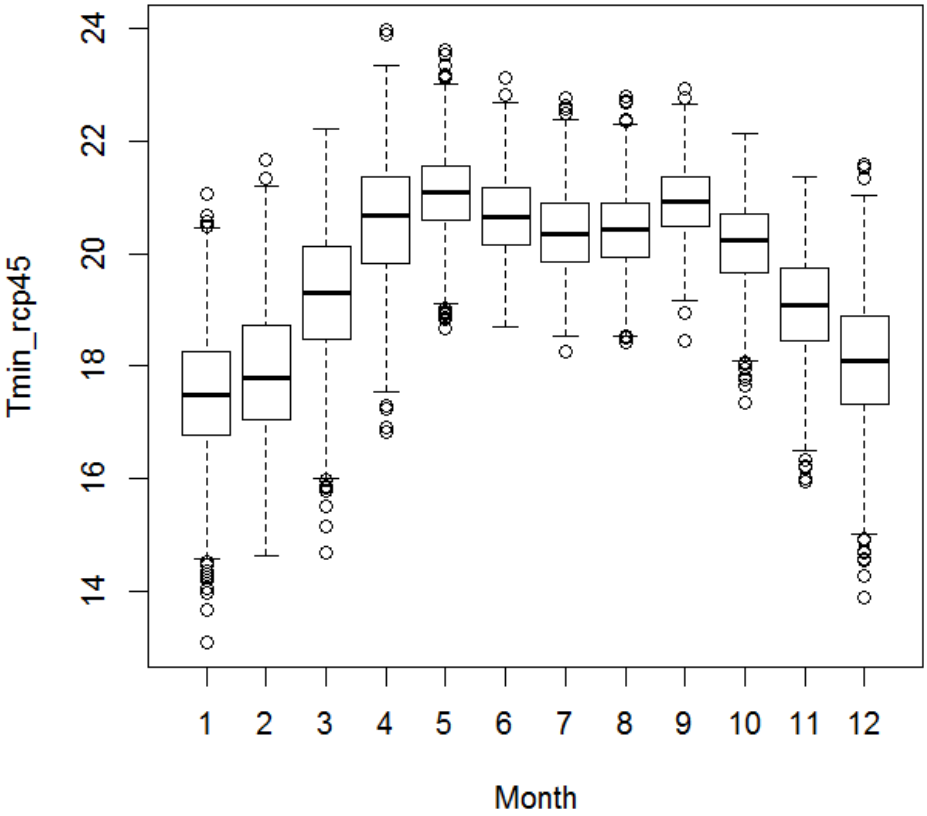




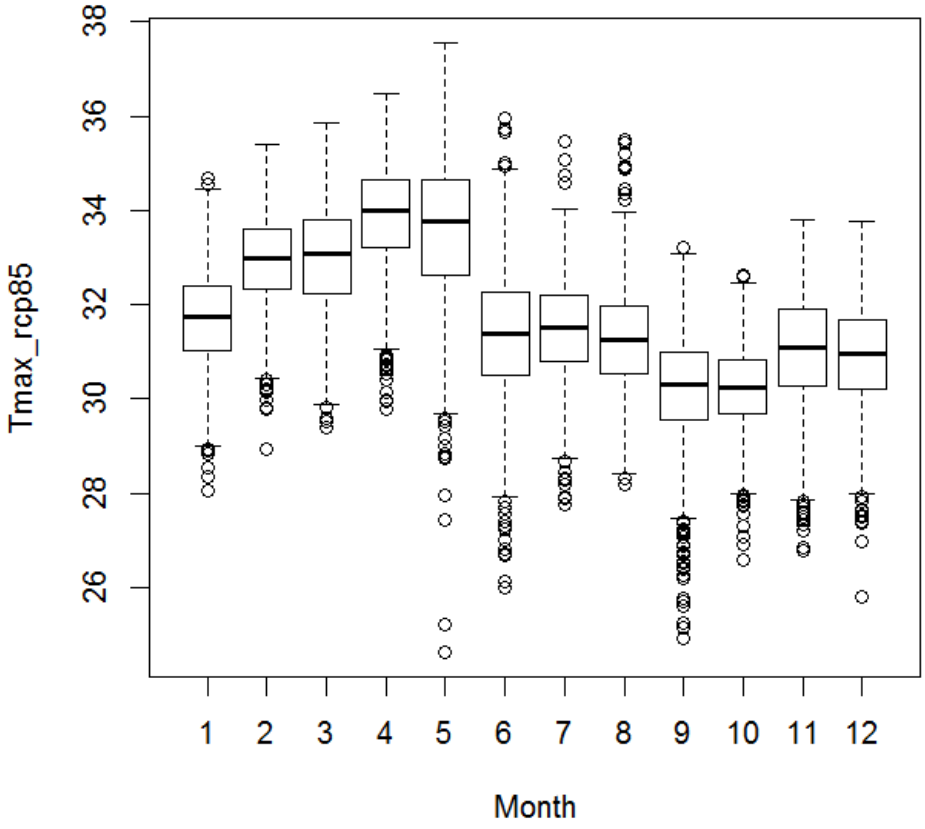
Periodo 2021-2050

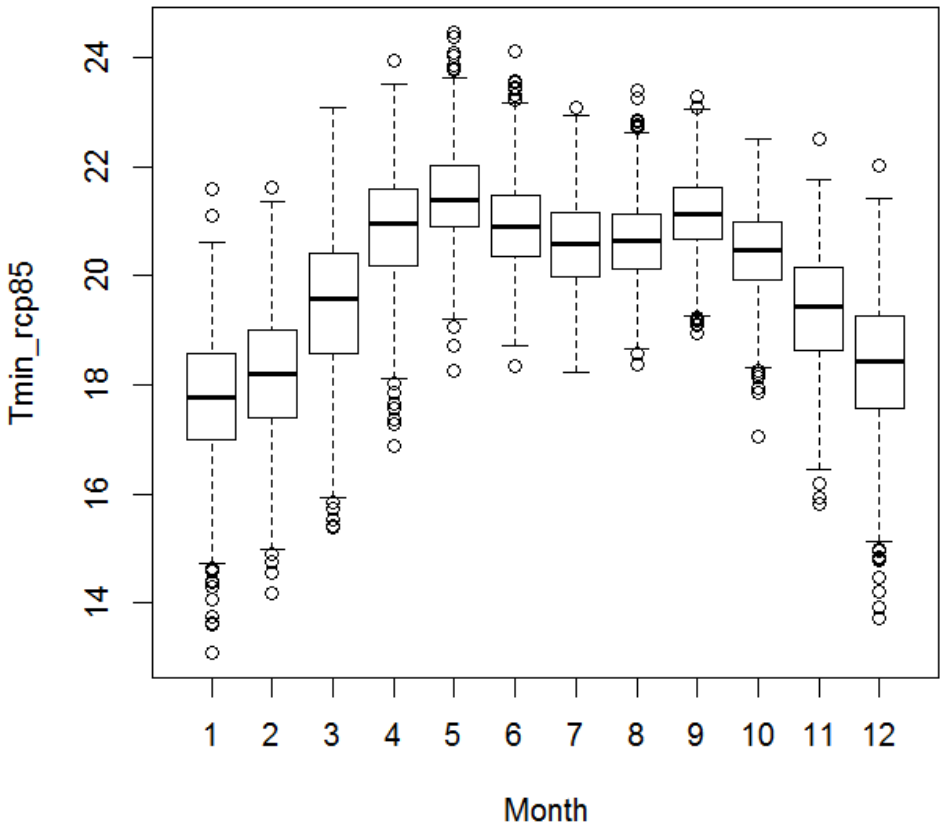
Proyecciones RCP4.5





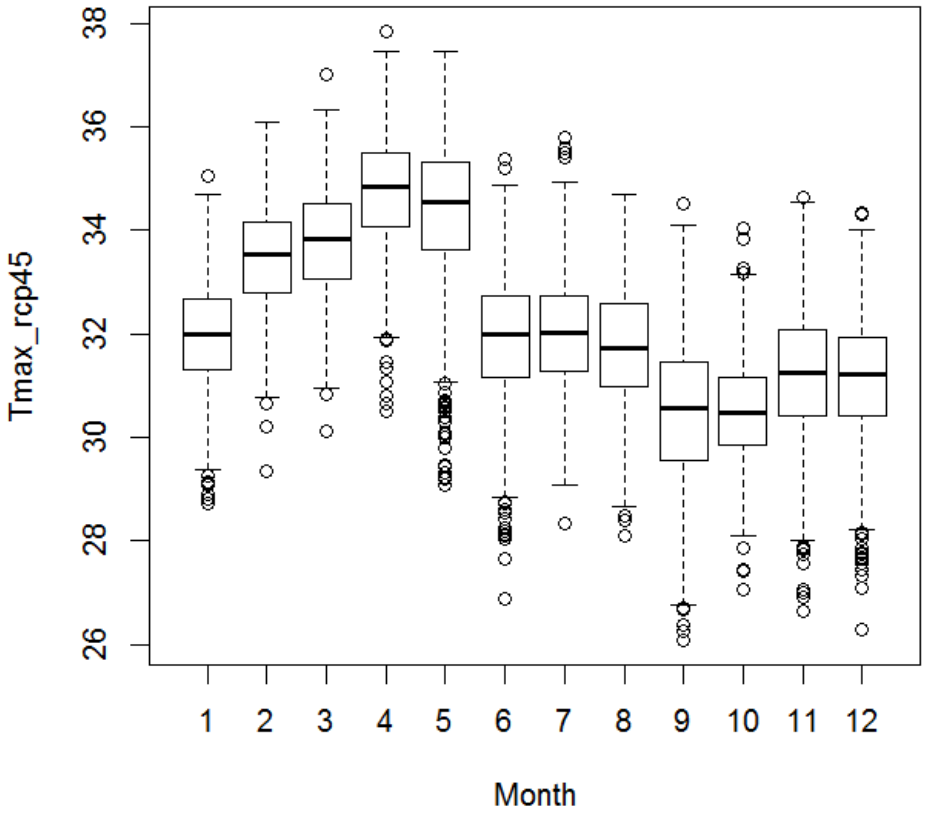
Proyecciones RCP8.5

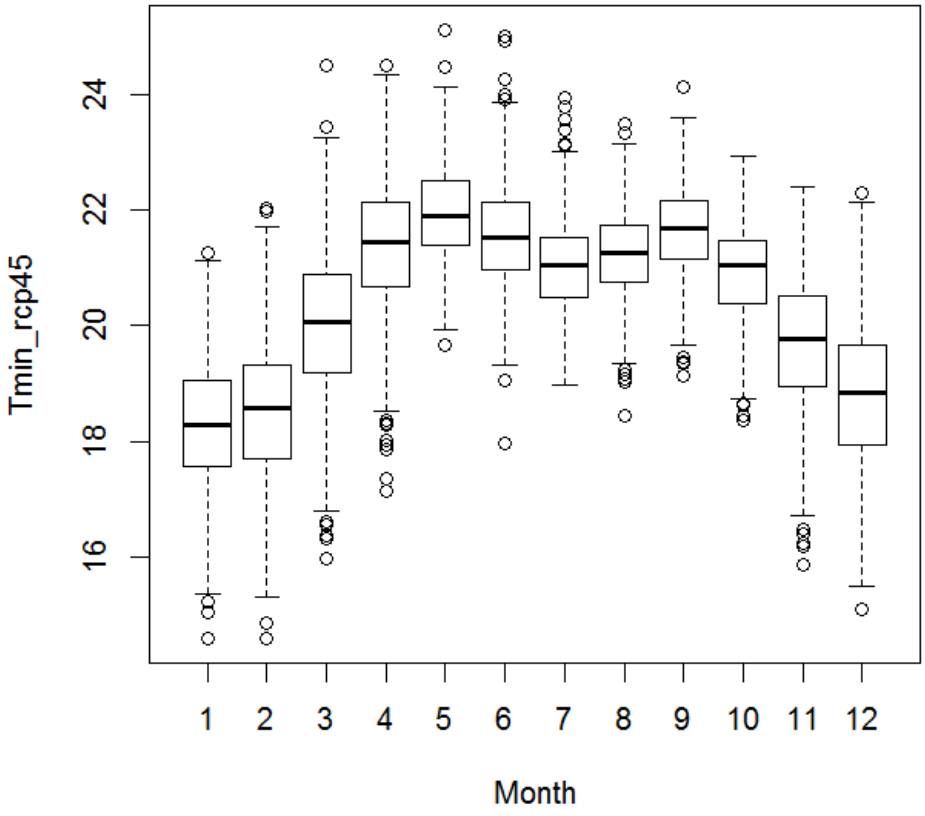




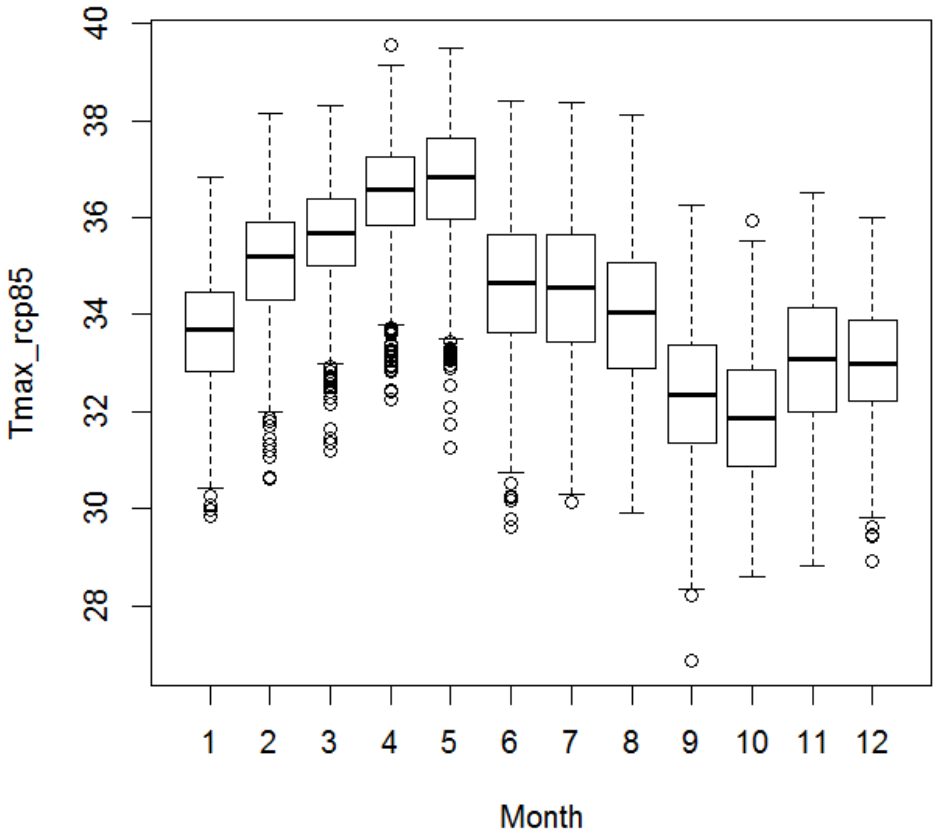
Periodo 2071-2100

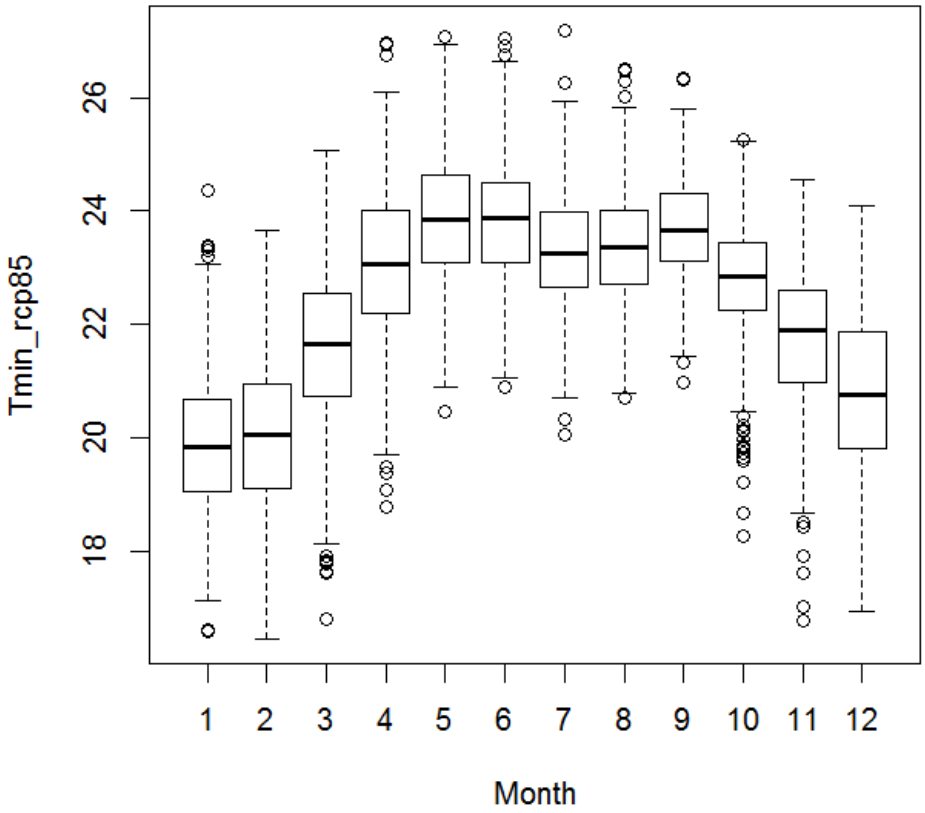
Proyecciones RCP4.5



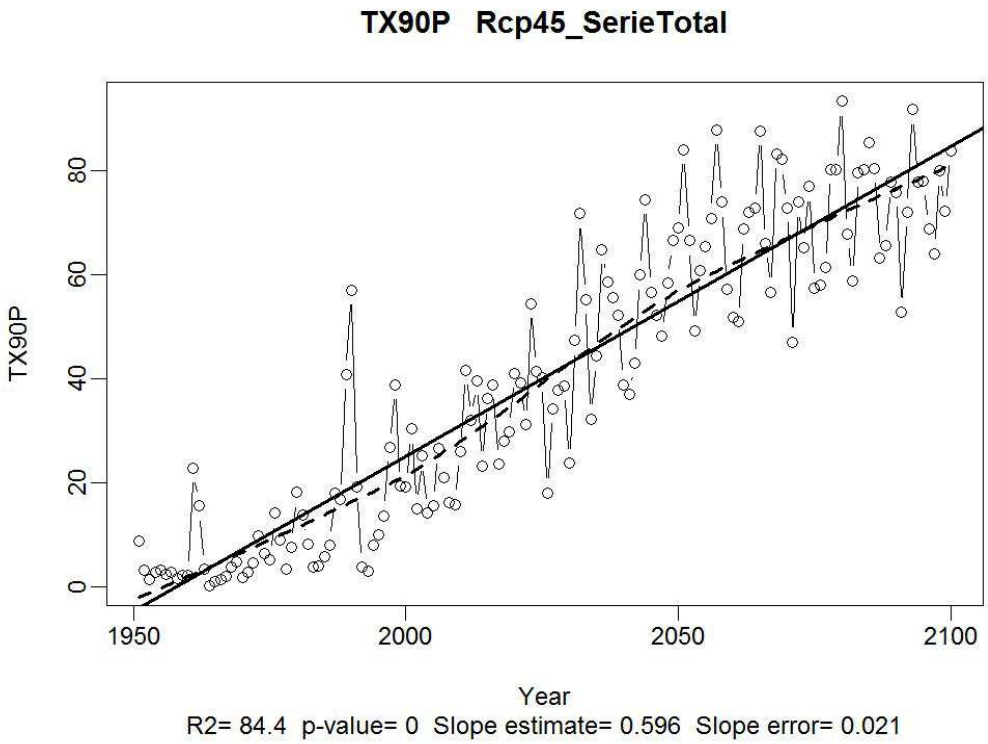


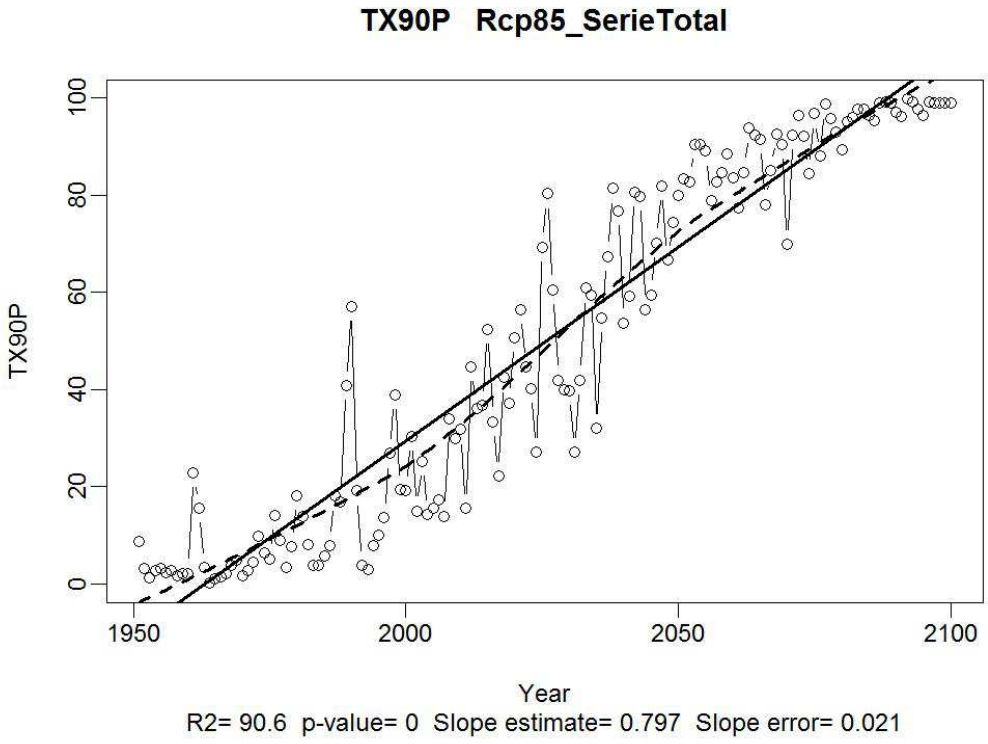
Proyecciones RCP8.5

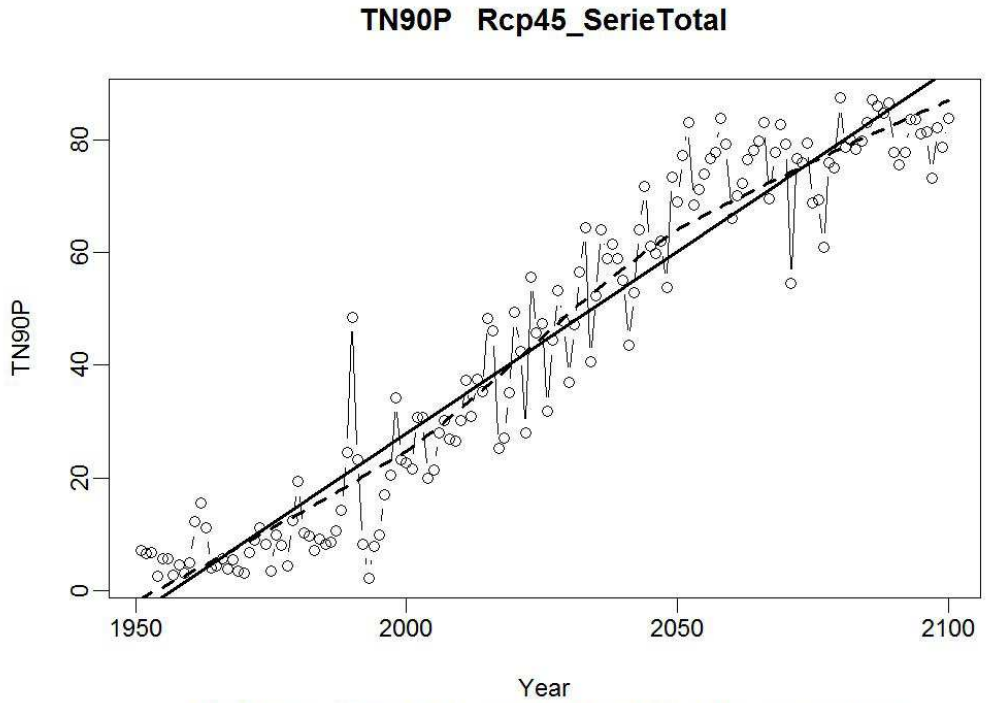




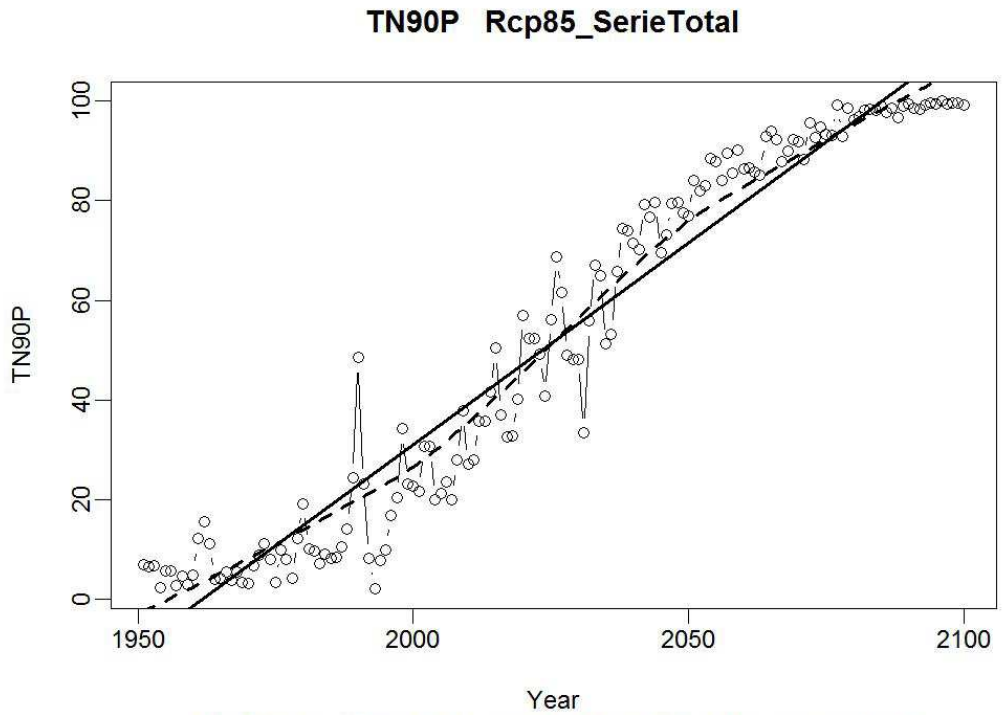
Anexo IV. Índices climáticos calculados con Rclimdex



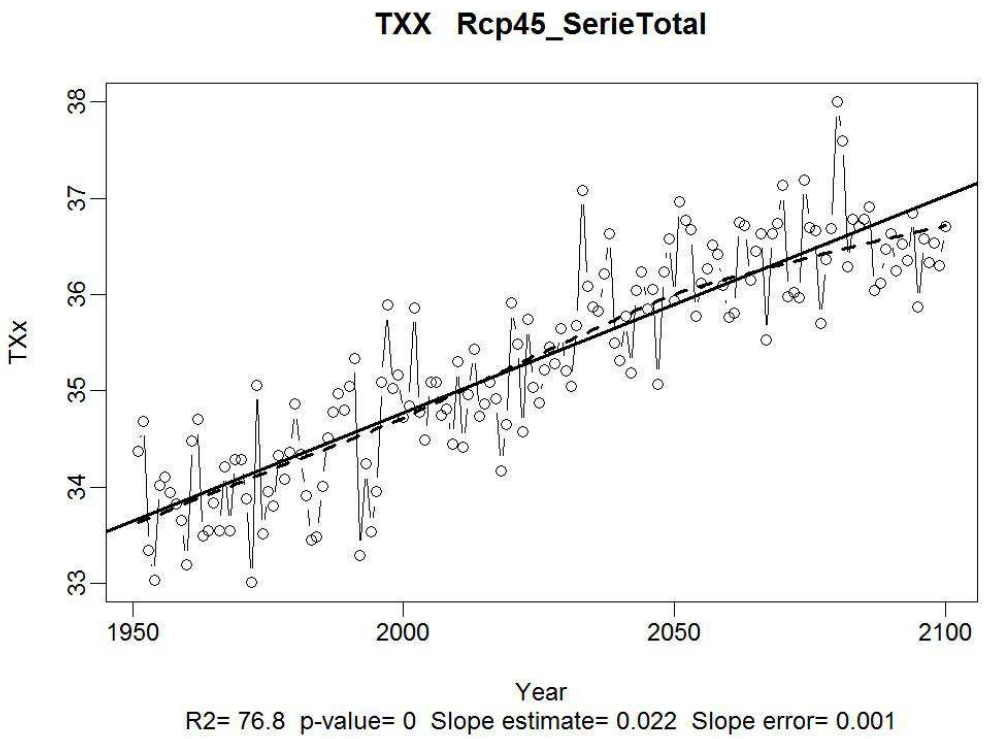


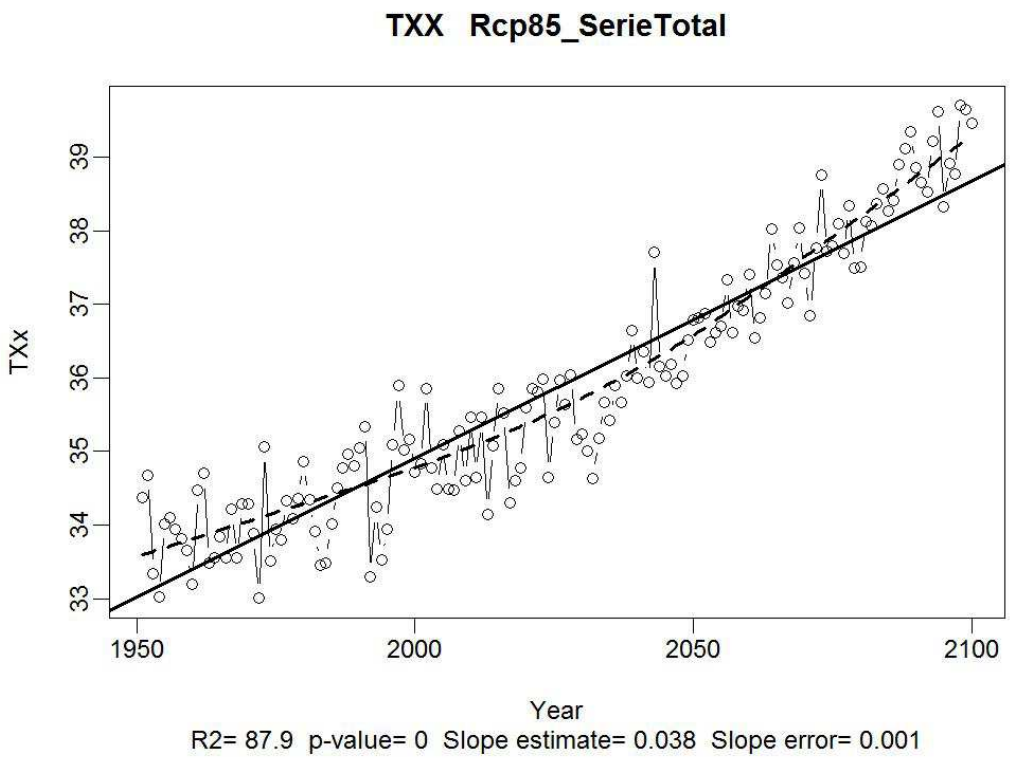


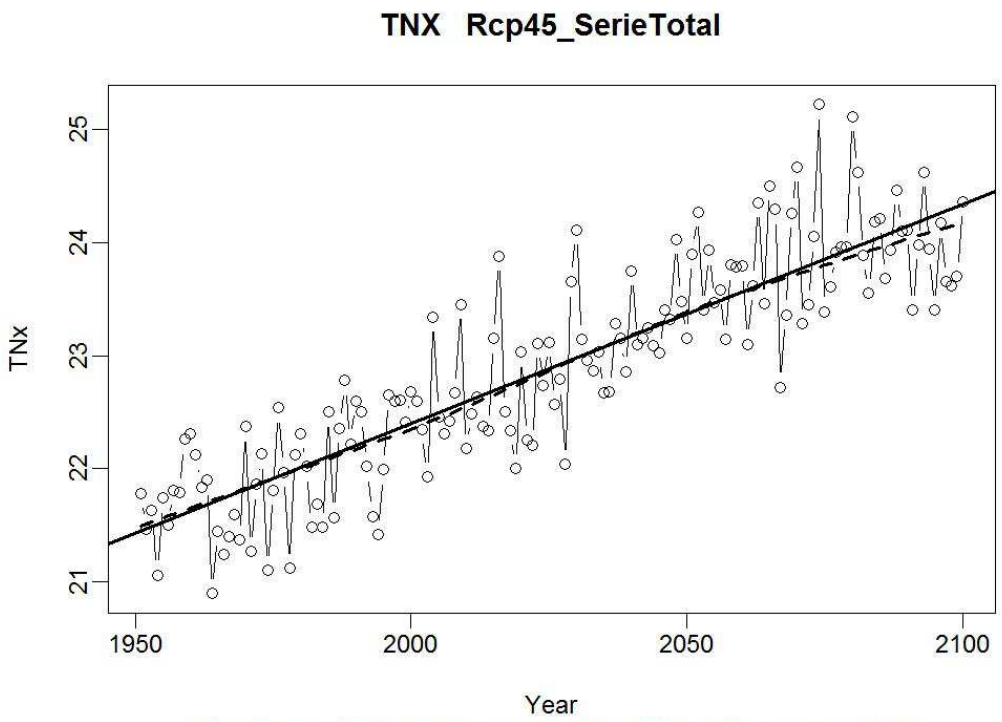
R2= 91.2 p-value= 0 Slope estimate= 0.645 Slope error= 0.016



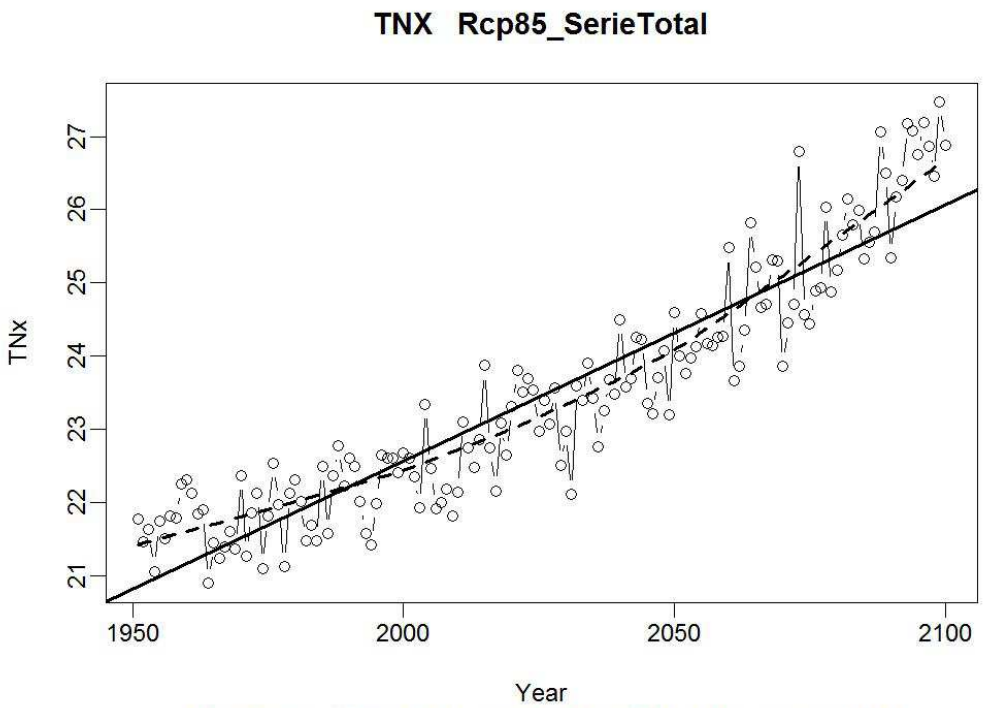
R2= 93.9 p-value= 0 Slope estimate= 0.808 Slope error= 0.017


TXX Rcp45_SerieTotal
TXx
33
34
35
36
37
38
1950
2000
2050
2100
Year
R2= 76.8 p-value= 0 Slope estimate= 0.022 Slope error= 0.001


TXX Rcp85_SerieTotal
TXx
33
34
35
36
37
38
39
1950
2000
2050
2100
Year
R2= 87.9 p-value= 0 Slope estimate= 0.038 Slope error= 0.001



R2= 76.5 p-value= 0 Slope estimate= 0.019 Slope error= 0.001



R2= 85.6 p-value= 0 Slope estimate= 0.035 Slope error= 0.001