



Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción

Facultad de Ciencias y Tecnología

Centro de Tecnología Apropriada

Maestría en Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio Climático

**Análisis de las tendencias de las temperaturas extremas del
periodo 1961-2019 en las ciudades de Asunción y Encarnación,
Paraguay**

Lucía Allegretti Casal

Asesor: Norman Breuer, PhD

Tesis de Maestría

Orientación Académica

Asunción, agosto de 2020





Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción
Facultad de Ciencias y Tecnología
Centro de Tecnología Apropriada

Maestría en Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio Climático

Análisis de las tendencias de las temperaturas extremas del periodo
1961-2019 en las ciudades de Asunción y Encarnación, Paraguay

Lucía Allegretti Casal

Asesor: Norman Breuer, PhD

Tesis de Maestría
Orientación Académica

Asunción, agosto de 2020



Con el apoyo de:



“La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo del CONACYT. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso se debe considerar que refleja la opinión del CONACYT”.

Agradecimientos

A mi familia, por la confianza y el apoyo incondicional a lo largo de este trayecto.

Al CONACYT por la oportunidad y confianza otorgada para participar del programa de maestría.

A la Dirección de Meteorología e Hidrología de la Dirección de Aeronáutica Civil a través del convenio con la Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción” por facilitarme los datos meteorológicos necesarios.

Al Dr. Norman Breuer, tutor de esta investigación, por sus aportes y orientaciones.

Al MSc. Max Pastén, por sus valiosas recomendaciones.

A Diego Bueno, Araceli González y Fátima Bareiro por el apoyo y ánimo otorgados.

A mis compañeros, por hacer éste trayecto un camino más llevadero, por la motivación y apoyo constante.

Índice

Índice de Figuras	iii
Índice de Tablas.....	vi
Listado de Siglas	vii
Resumen.....	viii
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Cambio climático.....	3
1.3. Evento extremo	7
1.4 Índices climáticos	8
1.5 Clima del Paraguay	9
1.6 Temperatura.....	10
2. Hipótesis y objetivos.....	11
2.1 Hipótesis.....	11
2.2 Objetivos	11
2.2.1 General	11
2.2.2 Específicos	11
3. Metodología	12
3.1 Localización de la investigación.....	12
3.2 Tipo de estudio	12
3.3 Población y muestras	12
3.4 Materiales	13

3.5 Procedimiento	14
3.6 Plan de análisis	14
4. Resultados y Discusión	19
4.1 Tendencias de la temperatura media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio.....	19
4.2 Tendencias de la temperatura máxima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio	21
4.3 Tendencias de la temperatura mínima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio	23
4.4 Análisis y descripción de la variabilidad de las temperaturas extremas (máxima y mínima) del periodo 1961-2019 en los dos sitios de estudio	25
4.4.1 Días de verano (SU25)	25
4.4.2 Noches tropicales (TR20)	28
4.4.3 Valor máximo de la temperatura máxima (TXx).....	31
4.4.4 Valor máximo de la temperatura mínima (TNx)	32
4.4.5 Valor mensual mínimo de temperatura máxima (TXn)	35
4.4.6 Valor mensual mínimo de temperatura mínima (TNn)	35
4.4.7 Noches frías (TN10p).....	36
4.4.8 Días fríos (TX10p)	39
4.4.9 Noches calientes (TN90p)	42
4.4.10 Días calientes (TX90p).....	45
4.4.11 Indicador de duración de periodos calientes (WSDI)	48
4.4.12 Indicador de duración de periodos fríos (CSDI).....	51
4.4.13 Rango diurno de temperatura (DTR)	51
5. Conclusión.....	54
5.1 Limitaciones e implicancias de la investigación	55
6. Referencias Bibliográficas	57

Índice de Figuras

Figura 1: Cambio en la temperatura respecto a 1850-1900. Fuente: IPCC (2019).	5
Figura 2: Distribución espacial de la temperatura media anual diaria en el periodo 1971-2000. Fuente: Pastén (2007).....	10
Figura 3: Tendencia de la temperatura media anual en Asunción en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 4: Tendencia de temperatura media anual en Encarnación en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 5: Tendencia de la temperatura máxima media anual en Asunción en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 6: Tendencia de la temperatura máxima media anual en Encarnación en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 7: Tendencia de temperatura mínima media anual en Asunción en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.....	24
Figura 8: Tendencia de temperatura mínima media anual en Encarnación en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 9: Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25 °C (Días de verano, SU25) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 10: Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25 °C (Días de verano, SU25) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 11: Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25 °C (Días de verano, SU25) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	28

Figura 12: Número de días en un año cuando la temperatura mínima es mayor a 20 °C (Noches tropicales, TR20) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 13: Número de días en un año cuando la temperatura mínima es mayor a 20 °C (Noches tropicales, TR20) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: elaboración propia.	30
Figura 14: Número de días en un año cuando la temperatura mínima es mayor a 20 °C (Noches tropicales, TR20) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 15: Valor mensual máximo de temperatura máxima por año (Máxima de temperatura máxima, TXx) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 16: Valor mensual máximo de temperatura mínima por año (Máxima de temperatura mínima, TNx) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 17: Valor mensual máximo de temperatura mínima por año (Máxima de temperatura mínima, TNx) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 18: Valor mensual máximo de temperatura mínima por año (Máxima de temperatura mínima, TNx) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 19: Valor mensual mínimo de temperatura mínima por año (Mínima de temperatura mínima, TNx) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 20: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 10 (Noches frías, TN10p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 21: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 10 (Noches frías, TN10p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 22: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 10 (Noches frías, TN10p) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 23: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 10 (Días fríos, TX10p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	40

Figura 24: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 10 (Días fríos, TX10p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 25: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 10 (días fríos, TX10p) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 26: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 90 (noches calientes, TN90p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 27: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 90 (noches calientes, TN90p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 28: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 90 (noches calientes, TN90p) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 29: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 90 (días calientes, TX90p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 30: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 90 (días calientes, TX90p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 31: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 90 (días calientes, TX90p) y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 32: Número anual de días con por lo menos 6 días consecutivos donde la temperatura máxima sea mayor al percentil 90 (WSDI) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 33: Número anual de días con por lo menos 6 días consecutivos donde la temperatura máxima sea mayor al percentil 90 (WSDI) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 34: Número anual de días con por lo menos 6 días consecutivos donde la temperatura máxima sea mayor al percentil 90 (WSDI) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 35: Diferencia media mensual entre la temperatura máxima y la temperatura mínima por año (DTR) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.	52

Índice de Tablas

Tabla 1: Lista de índices climáticos de <i>RClimDex</i> calculados en este estudio (Zhang et al. 2004).	13
Tabla 2: Estaciones meteorológicas.....	14
Tabla 3: Formato de datos para <i>RClimDex</i> (Zhang et al. 2004).	16
Tabla 4: Forma de cálculo de los índices climáticos de <i>RClimDex</i> utilizados (Zhang et al. 2004).	16
Tabla 5: Resultados de los análisis de regresión lineal simple de la temperatura media anual, máxima media anual y mínima media anual de los periodos 1961-1990 y 1991-2019 en las ciudades de Asunción y Encarnación.....	21

Listado de Siglas

CC	Control de Calidad
CCI	Comisión Conjunta de la OMM para la Climatología
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CLIVAR	Variabilidad y previsibilidad climática
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DINAC	Dirección Nacional de Aeronáutica Civil
DMH	Dirección de Meteorología e Hidrología
ET	Equipo experto
ETCCDMI	Equipo de Expertos en Detección, Monitoreo e Índices de Cambio Climático
GEI	Gases De Efecto Invernadero
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PIB	Producto Interno Bruto
UCA	Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”
WCRP	Programa Mundial de Investigación del Clima

Resumen

El cambio climático es una realidad presente en la actualidad, el cual se manifiesta, entre otros factores, con el aumento de la temperatura atmosférica debido a las actividades antrópicas. El objetivo general es el de analizar las tendencias de las temperaturas del periodo 1961-2019 en las ciudades de Asunción y Encarnación para demostrar la influencia del cambio climático en las mismas. Los objetivos específicos fueron (a) estimar las tendencias de la temperatura media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio y compararlas, (b) estimar las tendencias de la temperatura máxima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio y compararlas (c) estimar las tendencias de la temperatura mínima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio y compararlas, (d) analizar y describir la variabilidad de las temperaturas extremas (máxima y mínima) del periodo 1961-2019 en los dos sitios de estudio. La metodología utilizada consistió en un análisis de regresión lineal en *Microsoft Excel* y cálculo de índices climáticos con el *software RClimDex*, mediante el cual, a través de los *p-values* obtenidos se demostró la significancia estadística de los resultados de la tendencia de las temperaturas y de cada índice climático. Los resultados demostraron un incremento de la temperatura del periodo reciente en relación al periodo base, el cual podría estar relacionado con el cambio climático.

Capítulo 1

Introducción

En el año 1994 entra en vigor la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en la cual se aborda la problemática del cambio climático buscando tomar acciones y resaltar estrategias que permitan reducir los gases de efecto invernadero.

Según un estudio de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2014), el Paraguay sería más vulnerable al cambio climático, comparado con otros países de la región, por ser altamente dependiente del sistema primario de producción y con un sector de servicios aún en desarrollo, principalmente en el área de la salud. De hecho, es uno de los países de América Latina que presenta una de las tasas más altas de participación de las actividades agropecuarias en la formación del Producto Interno Bruto (PIB).

Esta investigación tiene como objetivo principal analizar las tendencias de las temperaturas extremas del periodo 1961-2019 en las ciudades de Asunción y Encarnación. Siendo la hipótesis del estudio:

Existen cambios en los patrones de temperatura del periodo 1990-2019 comparado al periodo base (1961-1990) en las ciudades de Asunción y Encarnación, los cuales tienen alta probabilidad de ser producto del cambio climático existente. De esta afirmación se desprende la necesidad de demostrar que los cambios han sido estadísticamente significativas.

Recabar y analizar información de las temperaturas extremas de los sitios de estudio permitirá conocer cómo se dieron las variaciones a lo largo del periodo de estudio y determinar las correlaciones entre dichos cambios. Esto facilitará la búsqueda de estrategias y planes para abordar la problemática de manera eficiente, contribuir en la prevención de situaciones de riesgo y orientar los esfuerzos en planes de gestión y desarrollo de políticas públicas de gestión de eventos extremos y cambio climático.

1.1 Planteamiento del problema

A lo largo de los años, el clima no se ha mantenido constante. Sin embargo, en los últimos años, se han percibido cambios más abruptos, lo cual muestra la evidencia de la presencia del cambio climático. El cambio climático es la alteración del clima estudiado durante un periodo comparable consecuente de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de las actividades antrópicas. Éstos gases se concentran en la atmósfera provocando el aumento de la temperatura promedio del planeta. El aumento constante de estas emisiones es estudiado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Este panel se ocupa de sintetizar un gran número de estudios llevado a cabo por investigadores científicos a nivel global.

Según el IPCC (2018), la evidencia de los cambios atribuidos a un calentamiento global de alrededor de 0,5 °C en relación con diversos fenómenos climáticos y meteorológicos extremos, sustenta la evaluación de que 0,5 °C más de calentamiento con respecto al nivel actual traerá consigo nuevos cambios detectables en esos fenómenos extremos. Se estima que se producirán varios cambios regionales en el clima como consecuencia de un calentamiento global de hasta 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales; entre ellos, el incremento de las temperaturas extremas en muchas regiones, el aumento de la frecuencia, la intensidad o la cantidad de las precipitaciones intensas en varias regiones y un aumento de la intensidad o la frecuencia de las sequías en algunas regiones. Estos cambios y eventos extremos tendrán impactos negativos sobre la naturaleza y el ser humano de diversa intensidad en diversas regiones de la tierra.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) utiliza una lista de siete indicadores del estado del clima para hacer un seguimiento de la variabilidad del clima y el cambio climático a nivel mundial, entre ellos, la temperatura en superficie, el contenido calorífico de los océanos, el CO₂ atmosférico, la acidificación de los océanos, el nivel del mar, el balance de masa de los glaciares y la extensión del hielo marino del Ártico y de la Antártida. Estos indicadores han sido extraídos de las 55 variables climáticas esenciales del Sistema Mundial de Observación del Clima (OMM, 2019). En esta investigación se utilizará como indicador la temperatura de la superficie para analizar las tendencias de las temperaturas.

Numerosos estudios sobre las tendencias de las temperaturas ponen en evidencia el aumento de la temperatura, lo cual se traduce en el calentamiento de la atmósfera. Resultados hallados por Vincent et al. (2005) en su estudio sobre tendencias en los índices de temperaturas

extremas diarias en América del Sur en el periodo 1960–2000, demostraron que no hay cambios consistentes en los índices basados en la temperatura máxima diaria, mientras que se encontraron tendencias significativas en los índices basados en la temperatura mínima diaria. Señalaron la existencia de tendencias crecientes significativas en el porcentaje de noches cálidas y tendencias decrecientes en el porcentaje de noches frías en muchas estaciones. Los autores consideraron que el calentamiento observado se debe principalmente a más noches cálidas y menos noches frías durante el verano (diciembre-febrero) y otoño (marzo-mayo). Señalaron que las estaciones con tendencias significativas parecen estar ubicadas más cerca de las costas oeste y este de América del Sur.

Ely y Fortín (2020) analizaron las tendencias de índices térmicos extremos en el sur de Brasil en el periodo 1971-2014, los resultados mostraron que, para los diversos índices térmicos, hay una reducción de los días fríos en todas las estaciones, lo que indica un aumento más pronunciado de los índices en función de las temperaturas máximas (TX), especialmente en el norte. Por otro lado, los índices basados en temperaturas mínimas (TN) mostraron un aumento más modesto y parcial, que varía según la ubicación de las estaciones. A nivel regional, las tendencias calculadas fueron similares, es decir, la región norte presenta un aumento más expresivo de los índices de calor, mientras que en el este predomina una reducción.

Villarroel (2013) demostró en su investigación acerca de eventos extremos de precipitación y temperatura en Chile y las proyecciones para fines del siglo XXI, que la temperatura mínima diaria aumentó significativamente en el periodo 1961-1990. Observó un incremento significativo en el porcentaje de días al año cuando la temperatura máxima sobrepasa el percentil 90% (noches cálidas), en el número de días con temperatura máxima por sobre los 25 °C (días de verano) y en la frecuencia de días con temperatura mínima superior a 20 °C (noches tropicales), mientras que los indicadores de extremos fríos disminuyeron su frecuencia. Asimismo, en un porcentaje importante de indicadores observó que la tendencia cambia al considerar un periodo más extenso (1961-2010), demostrando que la variabilidad decadal incide significativamente en las tendencias climáticas.

1.2 Cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) describe el cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la

actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables” (UN, 1992).

Según el IPCC, el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana (IPCC, 2007).

La temperatura media mundial de la superficie ha aumentado aproximadamente 1,1 °C desde finales del siglo XIX con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C, un cambio impulsado en gran medida por emisiones antropogénicas a la atmósfera. La mayor parte del calentamiento ocurrió durante las últimas tres décadas, con 16 de los 17 años más cálidos registrados desde el año 2001. Los científicos coinciden en que las temperaturas globales continuarán en aumento en las próximas décadas, en gran parte debido a los Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidos por las actividades humanas (Gürkan et al., 2017).

La Figura 1 muestra el cambio de temperatura observado con respecto a 1850-1900. Desde el período preindustrial (1850 a 1900), la temperatura media observada del aire en la superficie terrestre ha aumentado bastante más que la temperatura media global en superficie (tierra y océano). Desde 1850-1900 hasta 2006-2015, la temperatura media del aire en la superficie terrestre aumentó en 1,53 °C (muy probablemente en un rango de 1,38 °C a 1,68 °C), mientras que la temperatura media global en superficie aumentó en 0,87 °C (probablemente en un rango de 0,75 °C a 0,99 °C). El calentamiento ha provocado una mayor frecuencia, intensidad y duración de los fenómenos relacionados con el calor, incluidas las olas de calor en la mayoría de las regiones terrestres. La frecuencia e intensidad de las sequías han aumentado en algunas regiones (incluidos el Mediterráneo, Asia occidental, muchas partes de América del Sur, gran parte de África, y Asia nororiental) y ha aumentado la intensidad de las precipitaciones fuertes a escala mundial (IPCC, 2019).

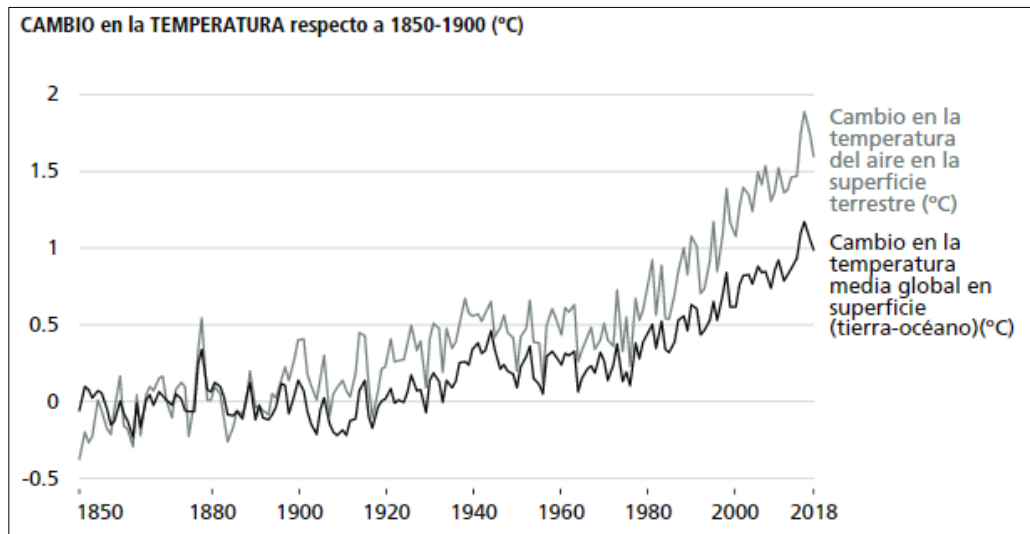


Figura 1: Cambio en la temperatura respecto a 1850-1900. Fuente: IPCC (2019).

Un ejemplo excepcional de temperatura extrema actual es la ola de calor que batió el récord en Europa occidental y central en el verano de 2003. Ese verano (junio-julio-agosto) fue el más cálido desde que se empezaron a registrar valores comparables aproximadamente a partir de 1780 (1,4 °C por encima del anterior más cálido en 1807). La sequedad de la superficie terrestre en Europa durante la primavera constituyó un factor importante para desencadenar las temperaturas extremas de 2003. Las pruebas demuestran que las olas de calor también aumentaron en frecuencia y duración en otras localidades (Solomon et al., 2007).

Brücker (2005) realizó un estudio denominado “Poblaciones vulnerables: las lecciones de la ola de calor del verano de 2003 en Europa” en el cual menciona que las olas de calor pueden provocar un exceso de mortalidad considerable, más de 50.000 muertes para Europa en agosto de 2003. Señala que, probablemente las consecuencias fueron subestimadas en muchos países, al menos en las primeras evaluaciones. Destaca prioritaria la identificación de los factores de riesgo para llevar a cabo las acciones indispensables de prevención.

En el estudio sobre variabilidad a largo plazo de las olas de calor en Argentina y probabilidad de recurrencia de la severa ola de calor de 2008 en Buenos Aires, realizado por Rusticucci et al. (2016) obtuvieron como resultado que la duración mínima de la ola de calor fue de 3 días. Usaron tres definiciones de olas de calor que se basaron en temperatura máxima diaria por encima del percentil 90 (MaxTHW), temperatura mínima diaria por encima del percentil 90 (MinTHW) y temperaturas máxima y mínima por encima de la correspondiente Percentiles 90 (EHW). Los valores de década en Buenos Aires experimentaron aumentos claros en las olas de calor según MinTHW y EHW, con la frecuencia más alta para ambos en la década

2001-2010, pero en otras estaciones, las combinaciones de diferentes tendencias y variabilidad decadal resultaron en algunos casos en una disminución de las olas de calor extremas. En la parte noroeste del país, se encontró un fuerte cambio positivo en la última década, principalmente debido al incremento en la persistencia de MinTHW pero también acompañado por aumentos en MaxTHW. En general, otras estaciones muestran una clara tendencia positiva en MinTHW y la variabilidad decadal en MaxTHW, con los casos de EHW más grandes en la última década. También estimaron la probabilidad de recurrencia de la ola de calor más larga y más severa en Buenos Aires (de acuerdo con la intensidad medida por el exceso acumulativo de la MaxTHW), mediante simulaciones realizadas. Señalaron que la probabilidad de recurrencia de una ola de calor tan larga y severa es pequeña en el clima actual, pero es probable que aumente sustancialmente en el futuro cercano incluso bajo una tendencia de calentamiento moderado.

Bitencourt et al. (2020) realizaron un estudio sobre la climatología de las olas de frío y calor en Brasil desde 1961 hasta 2016, a través del cual mostraron que en todas las regiones brasileñas la frecuencia de las olas de calor aumentó y la de las olas de frío disminuyó entre los años 1961 y 2016. El número de olas de calor por año, en particular, fue mayor que el de las olas de frío, y la duración media de las olas de calor fue aproximadamente 1 día más largo que el de las olas frías. Además, se descubrió que las olas frías eran más severas e intensas en áreas a menudo alcanzadas por masas de aire frío con temperaturas bajo cero en la mayor parte del sur de Brasil. En términos de severidad e intensidad de las olas de calor, se observaron dos configuraciones diferentes: eran más severas en la región sur y más intensas en la región del medio oeste del país, y no tan expresivas en las regiones norte y noreste. Esos hallazgos justifican la necesidad de una actualización continua de las políticas públicas centradas en sectores a menudo afectados por el frío y el calor.

Se prevé que las temperaturas extremas en tierra aumenten más que la temperatura media global en superficie. El aumento de las temperaturas de los días de calor extremo, en las latitudes medias se prevé en hasta aproximadamente 3 °C con un calentamiento global de 1,5 °C y hasta aproximadamente 4 °C con un calentamiento global de 2 °C; y el aumento de las temperaturas de las noches extremadamente frías, en las latitudes altas, se prevé en hasta aproximadamente en 4,5 °C con un calentamiento global de 1,5 °C y hasta aproximadamente 6 °C con un calentamiento global de 2 °C. Se calcula que el número de días cálidos aumentará en

la mayoría de las regiones terrestres y que los mayores incrementos tendrán lugar en los trópicos (IPCC, 2018).

Existen países que están predispuestos a mitigar el cambio climático, pero los países que no lo están representan un problema. El hecho es que los eventos climáticos extremos como tales no se limitan a ninguna región en particular, por lo que es crucial que las naciones cooperen para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero GEI y el consiguiente calentamiento planetario. Lo mejor es ser proactivo para mitigar el cambio climático y encontrar la forma efectiva de adaptarse al clima cambiante (Salazar, 2017).

Honty (2007) menciona que las acciones no parecen desarrollarse al mismo ritmo con el que el cambio climático avanza en el mundo según demuestra el reciente informe del IPCC, ni al mismo ritmo al que avanzan los mecanismos y programas de mitigación. Los tomadores de decisión, los empresarios, los productores rurales y la sociedad en general, continúan planeando su futuro y tomando decisiones sin considerar las nuevas condiciones climáticas que se avecinan.

Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla (2007) señalan que la falta de evaluaciones integradas del cambio climático y sus posibles impactos es un tema crucial en América Latina. Los débiles sistemas actuales de monitoreo y observación han llevado a tener una baja capacidad para generar información confiable para la investigación y para el diseño de políticas. A su vez, la carencia de un sistema de investigación fuerte y de políticas expresamente orientadas a reforzar esos sistemas les impide su desarrollo.

1.3. Evento extremo

Se llama evento extremo a un evento que es raro en un determinado lugar y estación (un evento extremo puede salir del percentil 10 o 90). Los extremos varían de un lugar a otro. Un extremo en un área específica puede ser común en otra. Los eventos extremos no pueden ser atribuidos a ser causados por el cambio climático, ya que éstos se pueden dar de manera natural; sin embargo, se espera que el cambio climático pueda incrementar la ocurrencia de eventos extremos. Ejemplos incluyen inundaciones, sequías, tormentas tropicales y olas de calores (Solomon et al., 2017).

Según IPCC (2014), un fenómeno climático extremo es un fenómeno meteorológico excepcional en un determinado lugar y época del año. Aunque las definiciones de excepcional

son diversas, la excepcionalidad habitual de un fenómeno meteorológico extremo sería igual o superior a los percentiles 10 o 90 de la estimación de la función de densidad de probabilidad observada. Por definición, las características de un fenómeno meteorológico extremo pueden variar de un lugar a otro en sentido absoluto. Una configuración extrema del tiempo puede clasificarse como fenómeno meteorológico extremo cuando persiste durante cierto tiempo (p. ej., una estación), especialmente si sus valores promediados o totales son extremos (p. ej., sequía o precipitación intensa a lo largo de una temporada).

1.4 Índices climáticos

Según Quiroz (2011) un índice climático es un valor que puede ser usado para describir el estado y los cambios en el sistema climático. El clima de un sitio en particular es el estado promedio de la atmósfera durante un periodo prolongado de tiempo por lo que los cambios en el clima son mucho más lentos que los del estado del tiempo ya que éste puede cambiar bruscamente día con día. Los índices climáticos permiten realizar análisis estadísticos tales como la comparación de series de tiempo, la estimación de medias y la identificación de valores extremos y tendencias.

La Comisión Conjunta de la OMM para la Climatología (CCI) / Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP) Variabilidad y Previsibilidad Climática (CLIVAR) del Equipo de Expertos en Detección, Monitoreo e Índices de Cambio Climático (ETCCDMI) coordina esfuerzos complementarios para permitir el análisis global de los extremos climáticos (Peterson, 2005). Esta comisión cuenta con página web disponible en <https://public.wmo.int/es/comisión-de-climatología> dónde se encuentra información acerca de las actividades técnicas realizadas, los programas y proyectos relacionados al clima.

Los miembros del equipo experto (ET, por sus siglas en inglés, *Expert Team*) provienen de todos los continentes y abarcan una amplia gama de experiencia en el campo del cambio climático. Una de las actividades del ET es la coordinación internacional de un conjunto de índices de cambio climático derivados de datos diarios que se centran principalmente en los extremos. El desarrollo de los índices involucra no solo a los miembros ET sino también a otros numerosos científicos que trabajan con datos climáticos diarios. Al establecer una fórmula exacta para cada índice, los análisis realizados en diferentes países o diferentes regiones pueden encajar sin problemas (Peterson, 2005).

Se considera que un total de 27 índices son los índices básicos, los cuales se basan en valores de temperatura diaria o precipitación diaria. Otros se basan en umbrales fijos, relevantes para aplicaciones particulares. En estos casos, los umbrales son los mismos para todas las estaciones. Otros índices se basan en umbrales que varían de un lugar a otro. En estos casos, los umbrales generalmente se definen como un percentil de las series de datos relevantes (Peterson, 2005).

Las definiciones de los 27 índices y las fórmulas para calcularlos están disponibles en <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI>. Este sitio web también proporciona un paquete de software fácil de usar para calcular los índices. Este paquete de software, llamado *RClimDex*, utiliza el software gratuito R, que es un lenguaje y un entorno para la computación y los gráficos estadísticos (Peterson, 2005).

1.5 Clima del Paraguay

El clima de Paraguay es de tipo tropical seco y húmedo con tendencia a la continentalidad, presenta veranos muy calurosos y lluviosos e inviernos templados y secos. Uno de los factores fundamentales que influyen en el clima de Paraguay es su escasa altitud, que permite una libre circulación de las masas de aire (Secretaría de Emergencia Nacional, 2018).

Según Grassi et al. (2004), citados por Pastén et al. (2011), las sequías y las inundaciones forman parte del escenario climático del Paraguay; el verano es largo, caluroso y húmedo; mientras que el invierno es breve, suave y seco, aunque suelen registrarse frecuentemente heladas entre los meses de julio a agosto.

Existen dos estaciones bien diferenciadas: una lluviosa y otra seca. La estación lluviosa se da en la primavera y el verano austral, y la seca en el otoño y el invierno austral. Los meses más secos son julio y agosto, y los más lluviosos de octubre a marzo. Las precipitaciones, sobre todo en verano, suelen ser torrenciales, y varían mucho de una región a otra (Secretaría de Emergencia Nacional, 2018).

La temperatura media anual (Figura 2) oscila entre 21 °C en el sureste de la región Oriental, a más de 25 °C en el norte del Chaco. En esta última región se registran las temperaturas máximas medias más elevadas, que superan los 31 °C. Ocasionalmente, supera los 40 °C en verano, mientras que en la región Oriental se registran las temperaturas medias

más bajas, próximas a los 15 °C y, en los meses de invierno, suelen registrarse heladas importantes en gran parte del país (Pastén et al., 2009).

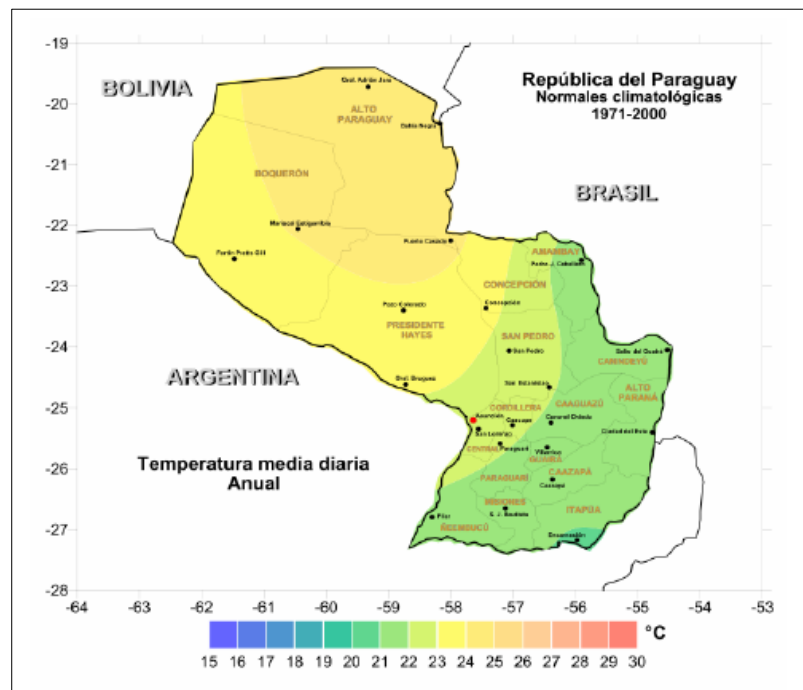


Figura 2: Distribución espacial de la temperatura media anual diaria en el periodo 1971-2000. Fuente: Pastén (2007).

1.6 Temperatura

La OMM (1992) define la temperatura del aire como "la temperatura indicada por un termómetro expuesto al aire en un lugar protegido de la radiación solar directa". Aunque esta definición no puede usarse como la definición de la cantidad termodinámica en sí, es adecuada para la mayoría de las aplicaciones (WMO, 2008b).

La temperatura termodinámica (T), con unidades de Kelvin (K) (también definida como "temperatura Kelvin"), es la temperatura básica. El kelvin es la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. La temperatura (t), en grados Celsius (o "temperatura Celsius") definida por la siguiente ecuación $t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$ se utiliza para la mayoría de los propósitos meteorológicos.

En meteorología se registran diariamente los valores de temperatura instantánea, temperatura máxima (T_{máx}) y temperatura mínima (T_{mín}) (Jarrín, 2016).

Capítulo 2

Hipótesis y objetivos

2.1 Hipótesis

Existen cambios en los patrones de temperatura del periodo 1990-2019 comparado al periodo base (1961-1990) en las ciudades de Asunción y Encarnación el cual es producto del cambio climático existente.

2.2 Objetivos

2.2.1 General

Analizar las tendencias de las temperaturas del periodo 1961-2019 en las ciudades de Asunción y Encarnación para demostrar la influencia del cambio climático en las mismas.

2.2.2 Específicos

- Estimar las tendencias de la temperatura media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio y compararlas
- Estimar las tendencias de la temperatura máxima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio y compararlas
- Estimar las tendencias de la temperatura mínima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio y compararlas
- Analizar y describir la variabilidad de las temperaturas extremas (máxima y mínima) del periodo 1961-2019 en los dos sitios de estudio

Capítulo 3

Metodología

3.1 Localización de la investigación

Esta investigación tuvo como área de estudio dos ciudades de la República del Paraguay, Asunción, la capital del país y Encarnación, ubicado en el departamento de Itapúa. Se seleccionaron estos dos sitios porque las mismas cuentan con estaciones meteorológicas con datos históricos necesarios para el análisis del presente estudio. Además, las dos ciudades son importantes por su gran población, Asunción con 529.433 habitantes (DGEEC, 2016) y Encarnación con 119.336 habitantes (STP/DGEEC, 2014).

3.2 Tipo de estudio

Este estudio consistió en una investigación no experimental, con un diseño longitudinal de tendencia, ya que se analizaron cambios al paso del tiempo en variables y sus relaciones con una población en general (Hernández et al., 2014).

3.3 Población y muestras

La población de la investigación fueron las temperaturas de las estaciones meteorológicas “Asunción, Silvio Pettrossi, Capital de la República” con código número 11000218 y “Encarnación, Departamento de Itapúa” con código número 7000297.

La variable independiente fue el periodo de estudio 1961 a 2019 y las variables dependientes fueron las temperaturas medias anuales, temperaturas máximas medias anuales, temperaturas mínimas medias anuales, medidas en grados centígrados (°C) y 13 índices climáticos (Tabla 1).

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, según sus siglas en inglés) estableció el periodo de 1960 a 1990 como un período de referencia estándar para evaluaciones de cambio

climático a largo plazo (WMO, 2017), por lo cual se eligieron los periodos de 1961-2019 para este estudio.

Tabla 1: Lista de índices climáticos de *RClimDex* calculados en este estudio (Zhang et al. 2004).

<i>ID</i>	<i>Nombre del indicador</i>	<i>Definición</i>	<i>Unidad</i>
SU25	Días de verano	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) > 25 °C	Días
TR20	Noches tropicales	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) > 20 °C	Días
TXx	Max Tmax	Valor máximo de temperatura máxima diaria	°C
TNx	Max Tmin	Valor máximo de temperatura mínima diaria	°C
TXn	Min Tmax	Valor mínimo de temperatura máxima diaria	°C
TNn	Min Tmin	Valor mínimo de temperatura mínima diaria	°C
TN10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando TN < 10 th percentil	Días
TX10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando TX < 10 th percentil	Días
TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de días cuando TN > 90 th percentil	Días
TX90p	Días cálidos	Porcentaje de días cuando TX > 90 th percentil	Días
WSDI	Indicador de la duración de periodos calientes	Cantidad anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX > 90 th percentil	Días
CSDI	Indicador de la duración de periodos	Cantidad anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN < 10 th percentil	Días
DTR	Rango diurno de temperatura	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C

3.4 Materiales

Los materiales utilizados para esta investigación fueron: datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima (medidos en °C) y precipitación (medidos en mm) del periodo 1961-2019 de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC) (Tabla 2), notebook, procesador de texto de Microsoft Office 2016, procesador de datos de Microsoft Excel 2016, Bloc de notas de Microsoft Windows 10, software estadístico RStudio 1.3.959, internet y materiales bibliográficos.

Tabla 2: Estaciones meteorológicas.

<i>Nombre de la estación meteorológica</i>	<i>Código</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>
Asunción, Silvio Pettrossi, Capital de la República	11000218	-25.435	-57.514
Encarnación, Departamento de Itapúa	7000297	-27.305	-55.886

3.5 Procedimiento

La selección del área de estudio se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad de datos en forma continua de las estaciones meteorológicas. Las estaciones meteorológicas de Asunción y Encarnación cuentan con datos históricos hasta la fecha. Además, son dos de las tres ciudades más importantes del país, dónde se incluye Ciudad del Este. Presentan una importante actividad económica, Asunción debido a ser la capital del país dónde se encuentra concentrada su población y Encarnación, al ser frontera con Argentina, realiza grandes intercambios comerciales.

Se utilizaron las series de datos de precipitación y temperatura del periodo 1961-2019 proveídos mediante el Convenio de Cooperación Técnica entre la Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción” (UCA) y la DINAC.

3.6 Plan de análisis

Para estimar la tendencia de las temperaturas, primeramente, se ordenaron los datos en columnas en las planillas del procesador de datos de *Microsoft Excel*. Se hallaron las medias anuales de las temperaturas medias, máximas y mínimas mediante fórmulas y funciones propias del programa. Se procedió a realizar los gráficos de las tendencias y el análisis de regresión lineal simple, incluido el análisis de la varianza para el periodo base (1961-1990) y el periodo reciente (1991-2019) de las dos áreas de estudio, Asunción y Encarnación.

Para el cálculo de los índices climáticos se siguió la metodología del Manual de usuario de *RClimDex* (1.0) elaborado por Zhang et al. (2004). *RClimDex* es capaz de calcular 27 índices de extremos climáticos de precipitación y temperatura. Para esta investigación se seleccionaron aquellos índices relacionados con la temperatura.

Primeramente, se ordenaron los datos diarios de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en columnas de la siguiente forma: año, mes, día, dato de precipitación en mm, dato de temperatura máxima en °C, dato de temperatura mínima en °C en el bloc de notas con formato ASCII. Cada columna estuvo delimitada con espacios (cada dato fue separado con un espacio). Los datos faltantes fueron completados con -99.9 (Tabla 3).

Posteriormente, se ejecutó el software con los datos preparados previamente. Una vez cargados los datos, se obtuvo el primer archivo de salida, el cual consiste en un control de datos. La herramienta realiza un control de calidad (CC) de los datos, ya que es un prerrequisito para el cálculo de los índices.

El *RCLimDex* tiene un sistema interno de control de calidad de datos. Esto resulta muy útil en el caso de un país como Paraguay donde las series históricas contienen brechas y errores. El CC de *RCLimDex* desarrolla el siguiente procedimiento: 1) Reemplaza todos los datos faltantes (actualmente codificados como -99.9) en un formato interno que reconoce R (i.e. NA, no disponible), y 2) Reemplaza todos los valores no razonables por NA. Estos valores incluyen a) cantidades de precipitación diarias menores que cero y b) temperatura máxima diaria menor que temperatura mínima diaria. Adicionalmente, CC también identifica valores extremos (“*outliers*”) en temperaturas diarias máximas y mínimas. Los valores extremos son valores diarios que se encuentran fuera de una región definida por el usuario. Actualmente esta región se define como n veces la desviación estándar del valor del día, esto es, $[media - n*std, media+n*std]$. Donde std representa la desviación estándar para el día y n es una entrada del usuario (Zhang et al. 2004).

Una vez obtenido y verificado el archivo de control de datos, se volvió a ejecutar el software, utilizando este archivo como dato de entrada. Se seleccionaron los índices necesarios para la investigación y se obtuvieron los archivos de salida utilizados para el análisis de los resultados.

Tabla 3: Formato de datos para *RClimDex* (Zhang et al. 2004).

1901	1	1	-99.9	-3.1	-6.8
1901	1	2	-99.9	-1.3	-3.6
1901	1	3	-99.9	-0.5	-7.9
1901	1	4	-99.9	-1	-9.1
1901	1	7	-99.9	-1.8	-8.4

En la Tabla 4 se incluyen las definiciones para los indicadores calculados. Por razones prácticas, en esta versión del software, no todos los índices son calculados en una base mensual. Índices mensuales son calculados si en un mes hay no más de 3 días faltantes, mientras que los valores anuales son calculados si en un año no hay más de 15 días faltantes. No se calcula un valor anual si cualquier mes de datos está faltando. Para índices con umbral, el umbral se calcula si por lo menos el 70% de los datos están presentes. Para indicadores de duración de temporada (WSDI y CSDI), una temporada puede continuar en el año siguiente y se la cuenta en el año en que la temporada termina. Por ejemplo, una temporada fría (CSDI) en el Hemisferio Norte comenzando el 31 de diciembre de 2000 y terminando el 6 de enero de 2001 se cuenta dentro del número total de temporadas frías en el 2001 (Zhang et al. 2004).

Tabla 4: Forma de cálculo de los índices climáticos de *RClimDex* utilizados (Zhang et al. 2004).

<i>ID</i>	<i>Índices</i>
SU25	Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i periodo j . Cuente el número de días cuando: $Tx_{ij} > 25^{\circ}C$
TR20	Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando: $Tn_{ij} > 20^{\circ}C$
TXx	Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces: $TXx_{kj} = \max(Tx_{kj})$
TNx	Sea Tn_{kj} la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces: $TNx_{kj} = \max(Tn_{kj})$

Tabla 4: Forma de cálculo de los índices climáticos de *RClimDex* utilizados (Zhang et al. 2004) (Cont.).

<i>ID</i>	<i>Índices</i>
TXn	Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces: $TXn_{kj} = \min(Tx_{kj})$
TNn	Sea Tn_{kj} la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es entonces: $TNn_{kj} = \min(Tn_{kj})$
TN10p	Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn_{in10} el día calendario del percentil 10 th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Tn_{ij} < Tn_{in10}$
TX10p	Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx_{in10} el día calendario del percentil 10 th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Tx_{ij} < Tx_{in10}$
TN90p	Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn_{in90} el día calendario del percentil 90 th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Tn_{ij} > Tn_{in90}$
TX90p	Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx_{in90} el día calendario del percentil 90 th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Tx_{ij} > Tx_{in90}$
WSDI	Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx_{in90} el día calendario del percentil 90 th centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos: $Tx_{ij} > Tx_{in90}$
CSDI	Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn_{in10} el día calendario del percentil 10 th centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos: $Tn_{ij} < Tn_{in10}$

Tabla 4: Forma de cálculo de los índices climáticos de *RClimDex* utilizados (Zhang et al. 2004) (Cont.).

<i>ID</i>	<i>Índices</i>
DTR	<p>Sean Tx_{ij} y Tn_{ij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j. Si I representa el número de días en j, entonces:</p> $DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$

En esta investigación, tanto para los resultados de las tendencias de las temperaturas media, máxima media y mínima media anuales como para los índices climáticos calculados, se analizaron los resultados obtenidos con un nivel de confianza estadística del 95%. La aceptación o rechazo de la hipótesis se realizó teniendo en cuenta los valores p resultantes de cada índice arrojados por el *RClimDex*.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 Tendencias de la temperatura media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio

Los resultados obtenidos de la temperatura media anual en las dos ciudades estudiadas mostraron una tendencia positiva tanto en el periodo base (1961-1990) como en el periodo reciente (1991-2019) (Figura 1 y Figura 2).

La temperatura media anual de Asunción en el periodo base va aumentando 0,01 °C/año y en el periodo reciente aumenta 0,02 °C/año. En cuanto a Encarnación, los aumentos de la temperatura media anual son similares a los valores de Asunción, en el primer periodo aumenta 0,01 °C/año y en el periodo reciente 0,03 °C/año.

Los valores extremos de la temperatura media anual en el periodo base en Asunción fueron 21,71 °C en el 1962 y 24,33 °C en el 1977 y en el periodo reciente 22,54 °C en el 1992 y 24,54 °C en el 2006. En cuanto a Encarnación, en el periodo base coinciden los años con valores extremos de la temperatura media anual de Asunción, siendo 20,15 °C en el 1962 y 22,30 °C en el 1977 y en el periodo reciente los valores fueron 20,97 °C en el 1992 y 22,80 °C en el 2014.

Se observó una diferencia de temperatura media anual de 0,62 °C en la ciudad de Asunción en el periodo reciente con respecto al periodo base. En cuanto a Encarnación, la diferencia entre ambos periodos fue de 0,84 °C.

El resultado del análisis estadístico (Tabla 5) demuestra que no existe una correlación lineal fuerte, y al mismo tiempo determina que, con una probabilidad de error de 4% para Asunción y 0 % para Encarnación, existe cambios en los patrones de temperatura media anual del periodo 1991-2019 en relación a la temperatura media anual del periodo base 1961-1990.

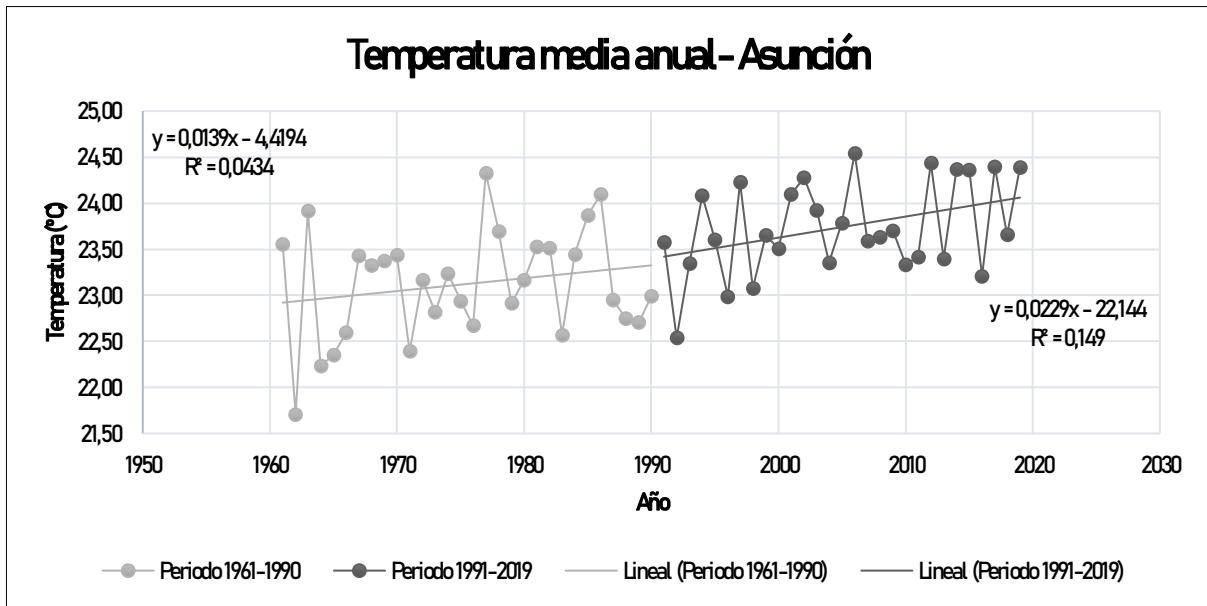


Figura 3: Tendencia de la temperatura media anual en Asunción en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.

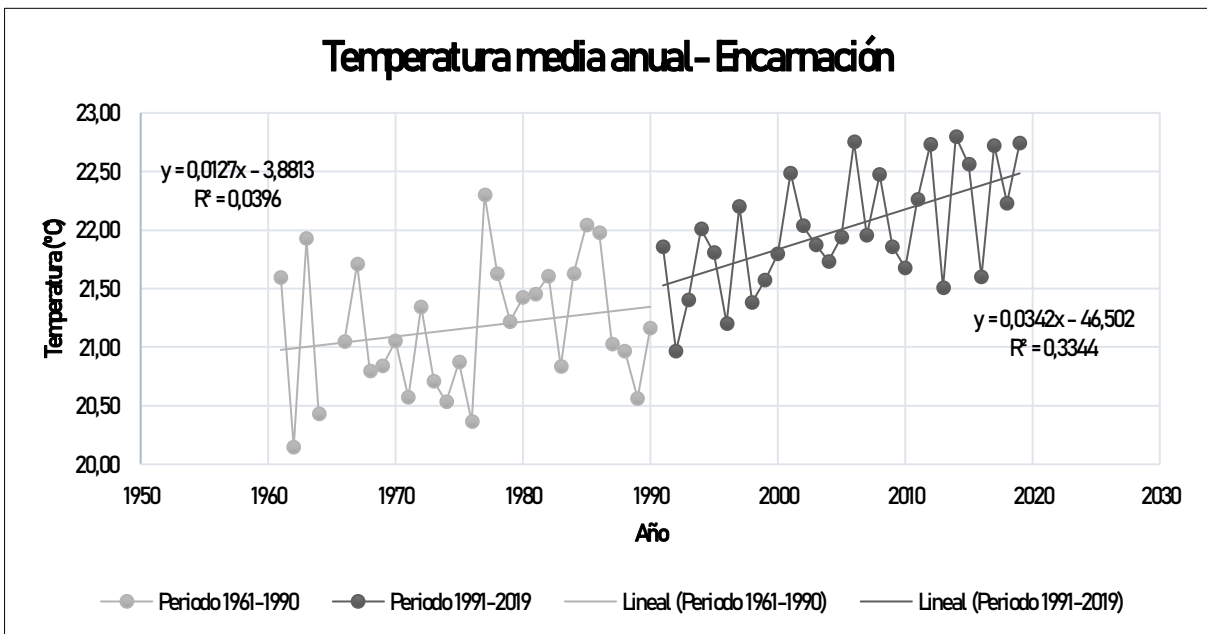


Figura 4: Tendencia de temperatura media anual en Encarnación en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Resultados de los análisis de regresión lineal simple de la temperatura media anual, máxima media anual y mínima media anual de los periodos 1961-1990 y 1991-2019 en las ciudades de Asunción y Encarnación.

	Temperatura media anual				Temperatura máxima media anual				Temperatura mínima media anual			
	Asunción		Encarnación		Asunción		Encarnación		Asunción		Encarnación	
Periodo	1961-1990	1991-2019	1961-1990	1991-2019	1961-1990	1991-2019	1961-1990	1991-2019	1961-1990	1991-2019	1961-1990	1991-2019
Coefficiente de determinación (R^2)	0,04	0,15	0,04	0,33	0,01	0,13	0,05	0,02	0,09	0,10	0,01	0,49
Valor p	0,27	0,04*	0,30	0,00*	0,66	0,05*	0,23	0,51	0,11	0,09	0,71	0,00*

Los valores con asterisco corresponden a los periodos con significancia estadística igual o superior al 95%.

4.2 Tendencias de la temperatura máxima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio

Los resultados obtenidos de las temperaturas máximas medias anuales en las dos ciudades estudiadas mostraron una tendencia positiva tanto en el periodo base (1961-1990) como en el periodo reciente (1991-2019) (Figura 3 y Figura 4).

La temperatura máxima media anual de Asunción en el periodo base tiene un aumento muy reducido de 0,006 °C/año, en el periodo reciente aumenta 0,02 °C/año. En cuanto a Encarnación, los aumentos de la temperatura máxima media anual fueron de 0,01 °C/año en el periodo base y 0,009 °C/año en el periodo reciente.

Los valores extremos de la temperatura máxima media anual en el periodo base en Asunción fueron 29,5 °C en el 1963 y 27 °C en el 1965. Siendo en el periodo reciente 27,34 °C en el 1992 y 30,19 °C en el 2006. En cuanto a Encarnación, en el periodo base los valores extremos de la temperatura máxima media anual fueron 25,62 °C en el 1962 y 27,90 °C en el 1977, en el periodo reciente los valores fueron 26,26 °C en el 1992 y 28,76 °C en el 2006.

Se observó una diferencia de 0,71 °C de la temperatura máxima media anual en la ciudad de Asunción en el periodo reciente en relación al periodo base. En cuanto a Encarnación, la diferencia fue de 0,75 °C.

El análisis estadístico (Tabla 5) demuestra que no existe una correlación lineal fuerte, y al mismo tiempo determina que, con una probabilidad de error de 5,48%, existen cambios en los patrones de temperatura máxima media anual del periodo 1990-2019 comparado al periodo base 1961-1990 en Asunción. Los datos obtenidos de ciudad de Encarnación no demostraron

cambios estadísticamente significativos en los patrones de temperatura máxima media anual del periodo 1990-2019 comparado al periodo base 1961-1990.

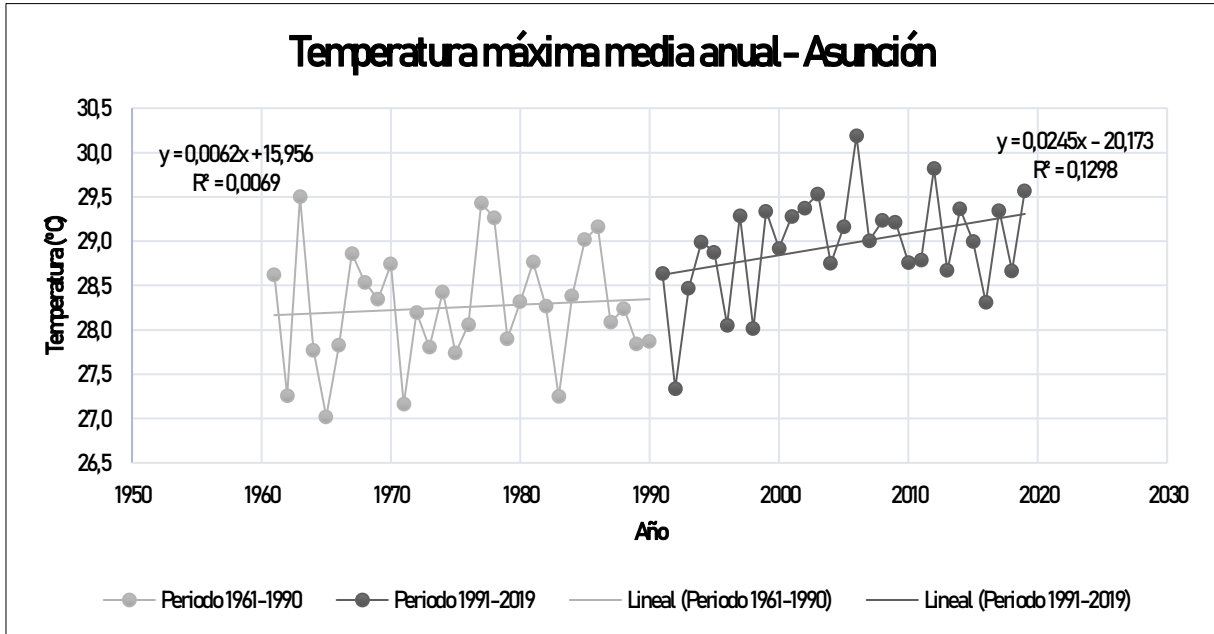


Figura 5: Tendencia de la temperatura máxima media anual en Asunción en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.

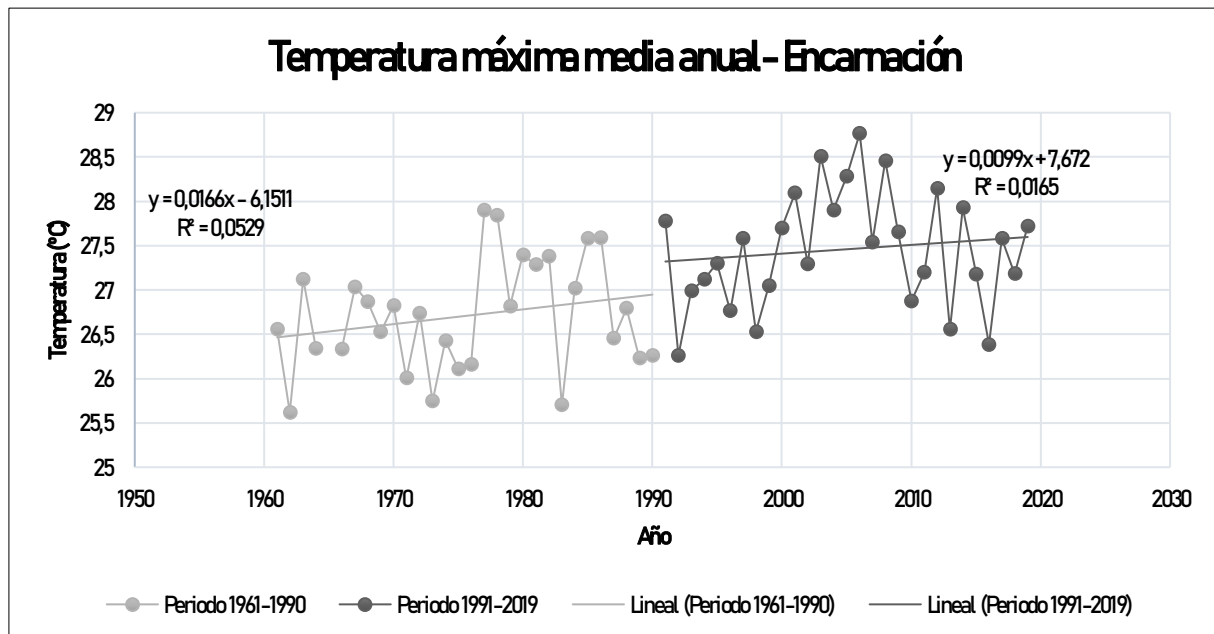


Figura 6: Tendencia de la temperatura máxima media anual en Encarnación en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.

4.3 Tendencias de la temperatura mínima media anual del periodo 1961-1990 y del periodo 1991-2019 en los dos sitios de estudio

Los resultados obtenidos de las temperaturas mínimas medias anuales en las dos ciudades estudiadas mostraron una tendencia positiva tanto en el periodo base (1961-1990) como en el periodo reciente (1991-2019) (Figura 5 y Figura 6).

La temperatura mínima media anual de Asunción en ambos periodos aumenta 0,02 °C/año. En cuanto a Encarnación, los aumentos de la temperatura mínima media anual son, en el periodo base de 0,005 °C/año y en el periodo reciente 0,06 °C/año.

Los valores extremos de la temperatura mínima media anual en el periodo base en Asunción fueron 16,2 °C en el 1962 y 19,2 °C en el 1977. Siendo en el periodo reciente 17,74 °C en el 1992 y 19,72 °C en el 2015. En cuanto a Encarnación, en el periodo base los valores extremos fueron 13,97 °C en el año 1962 y 16,46 en el 1963, en el periodo reciente 14,98 °C en el 2003 y 17,71 °C en el 2015.

Se observó una diferencia de 0,53 °C de la temperatura mínima media anual en la ciudad de Asunción en el periodo reciente en relación al periodo base. En cuanto a Encarnación, la diferencia fue de 0,97 °C.

El análisis estadístico (Tabla 5) demuestra que no existe una correlación lineal fuerte, y al mismo tiempo determina que en la ciudad de Asunción no existen cambios estadísticamente significativos en los patrones de temperatura mínima media anual del periodo 1990-2019 comparado al periodo base 1961-1990. Mientras que, en Encarnación, con una probabilidad de error de 0%, existe cambios en los patrones de temperatura mínima media anual del periodo 1990-2019 comparado al periodo base 1961-1990.

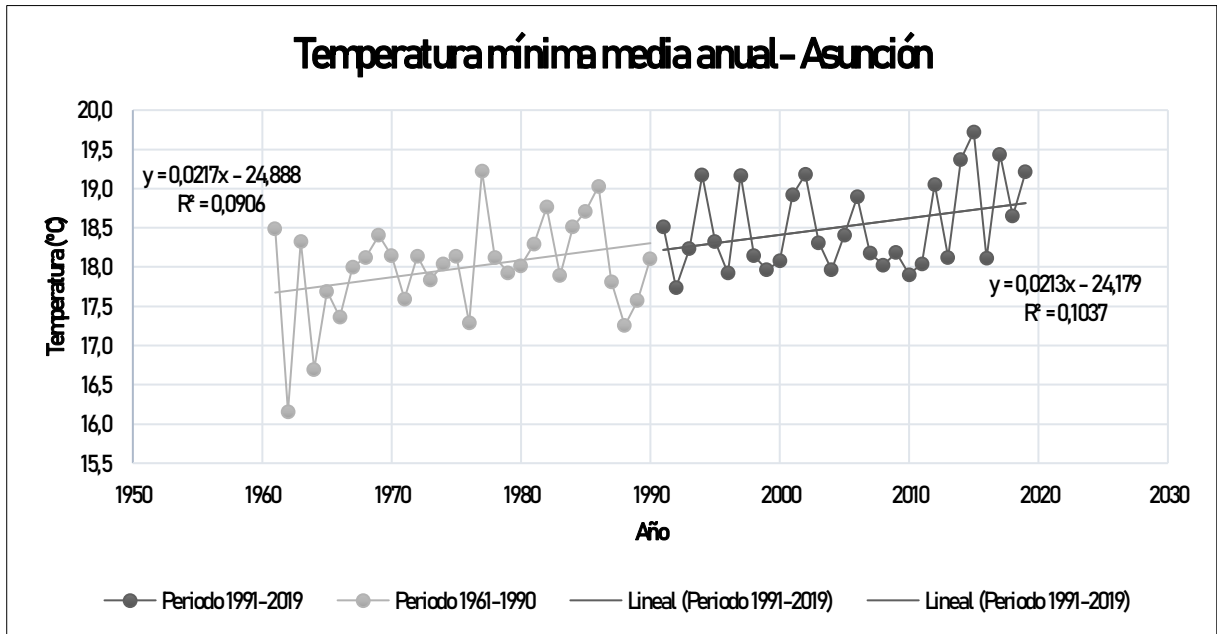


Figura 7: Tendencia de temperatura mínima media anual en Asunción en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.

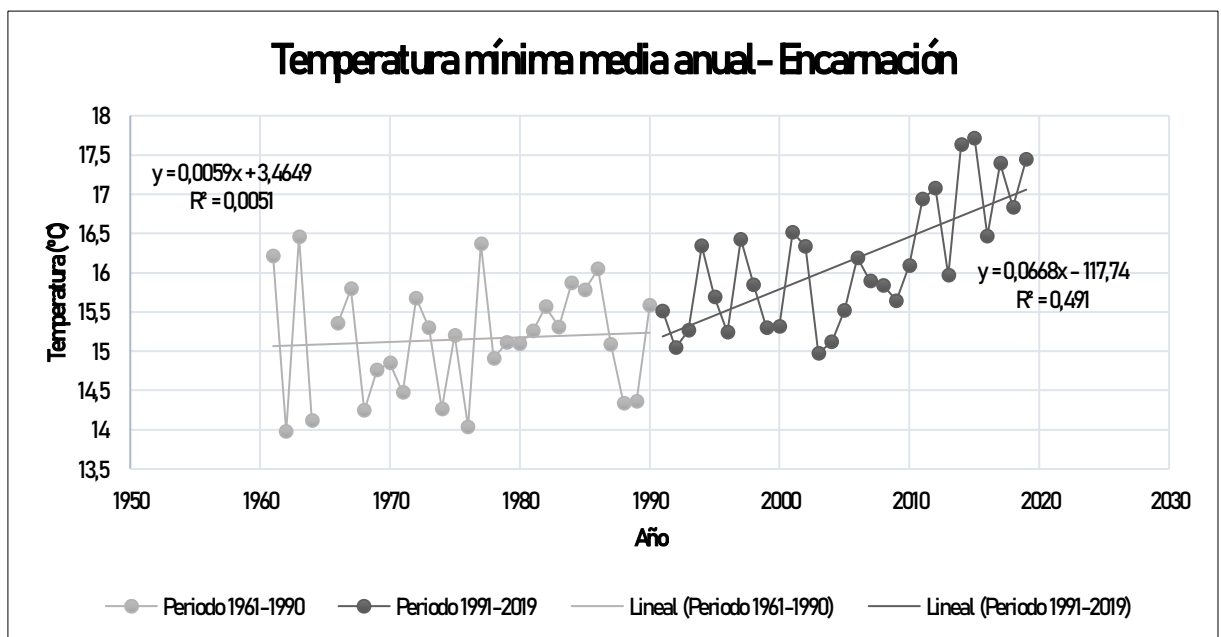


Figura 8: Tendencia de temperatura mínima media anual en Encarnación en el periodo base (1961-1990) y periodo reciente (1991-2019). Fuente: Elaboración propia.

4.4 Análisis y descripción de la variabilidad de las temperaturas extremas (máxima y mínima) del periodo 1961-2019 en los dos sitios de estudio

4.4.1 Días de verano (SU25)

Los resultados de este índice indicaron que en los dos sitios de estudio existe una tendencia positiva bien definida (Figura 7), con un nivel de confianza de 98,5% en Asunción (Figura 8) y 99,9% en Encarnación (Figura 9) según los valores de *p-value* de cada estación. Por lo tanto, existe una significación estadística según estos resultados.

Se observa que los últimos años del periodo reciente (1991-2019) cuentan con mayor cantidad de SU25, mientras que en el periodo base (1961-1990) el año con mayor SU25 se dio, coincidentemente, en el 1977 en los dos sitios de estudio.

El periodo reciente tiene valores máximos de SU25, no existentes en el periodo base, en Asunción el valor es de 298 días en el año 2006 y en Encarnación los valores máximos fueron 278 días en 2006 y 282 días en el año 2003. Caso contrario tiene lugar en el periodo base, donde se ven valores mínimos de SU25 no existentes en el periodo reciente, estos son 231 en el 1962, 242 en 1983, 243 en 1971, 247 en el 1979 y 1990 y 252 en el 1975, mientras que en Encarnación fueron los siguientes 210 en 1983, 218 en 1962, 220 en 1973 y 1975, 221 en 1964 y 223 en el 1990. Este índice indicó que el número de días de verano aumenta 0,299 días por año en Asunción y 0,39 en Encarnación.

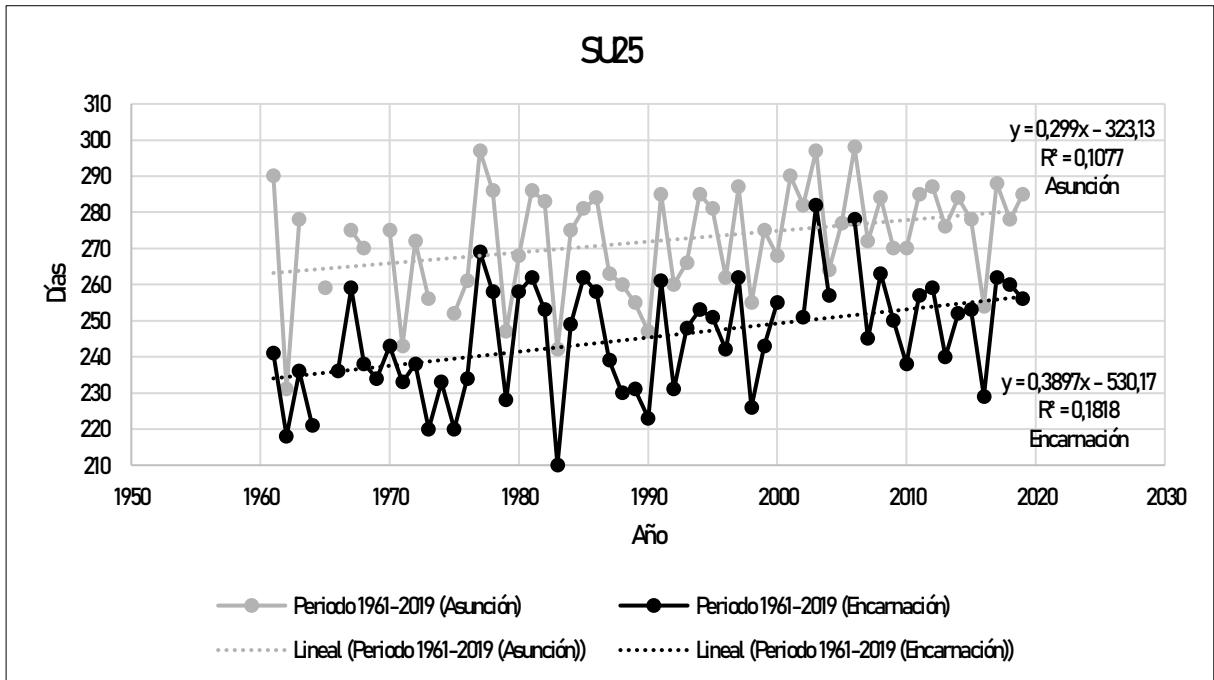


Figura 9: Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25 °C (Días de verano, SU25) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

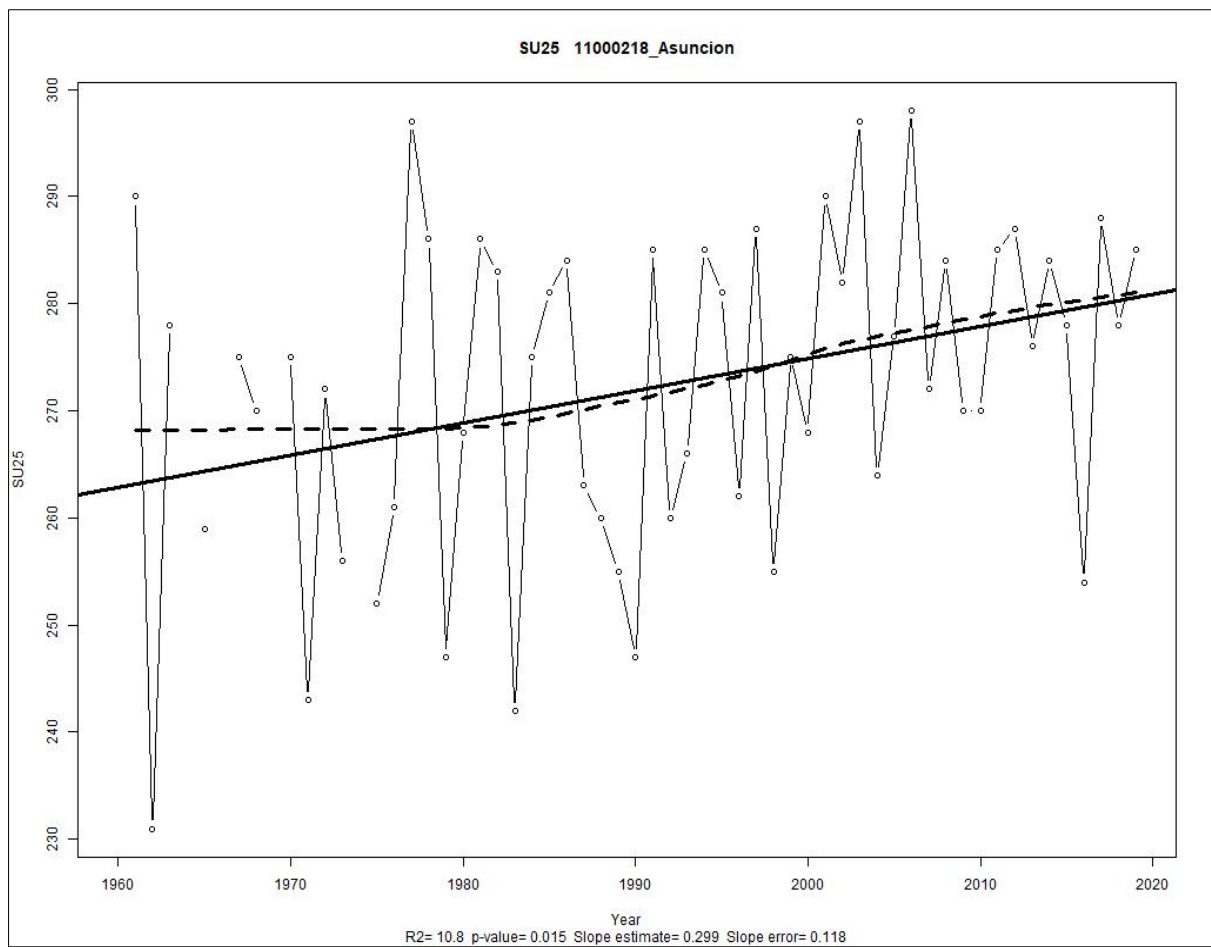


Figura 10: Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25 °C (Días de verano, SU25) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

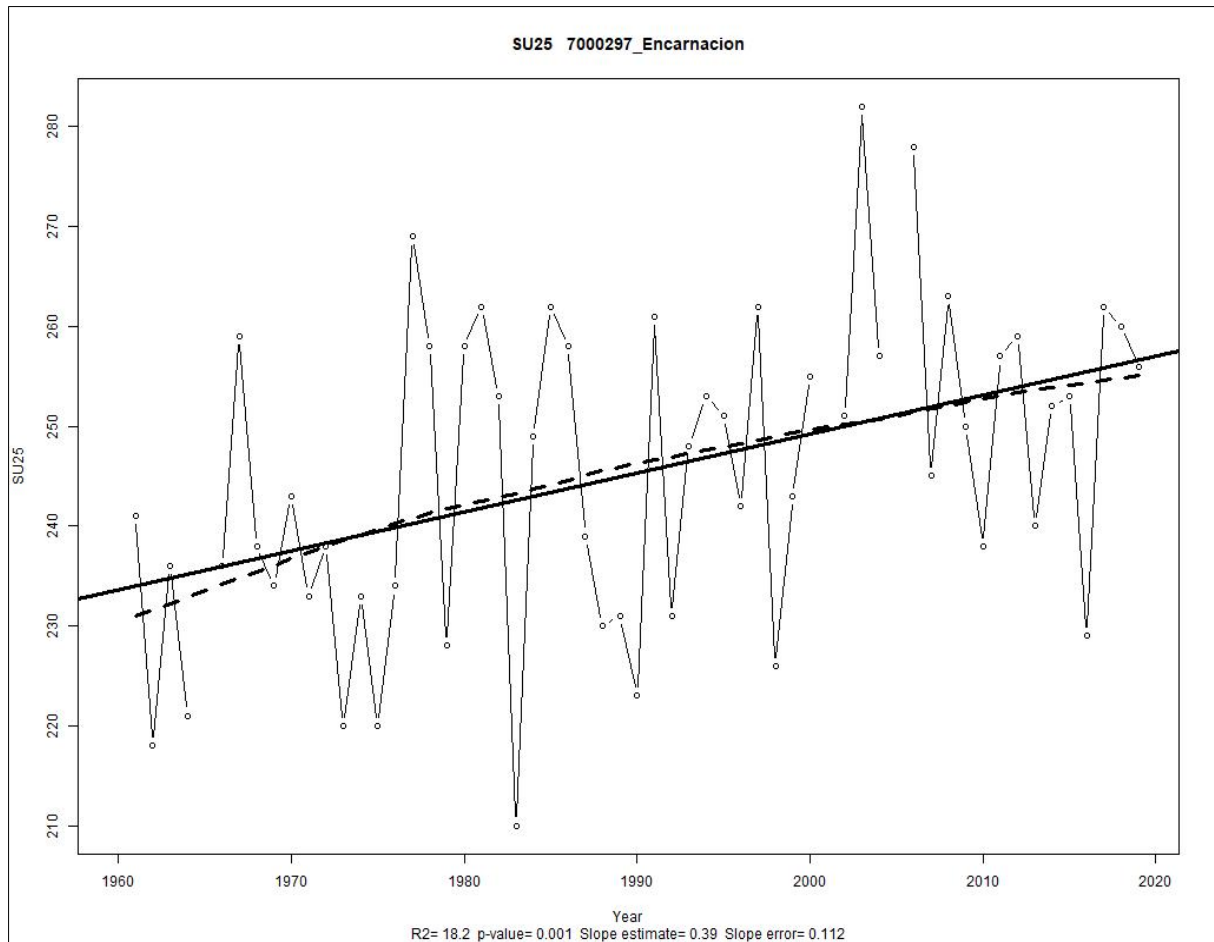


Figura 11: Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25 °C (Días de verano, SU25) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Noches tropicales (TR20)

Los resultados para este índice demostraron una tendencia claramente positiva (Figura 10), con un nivel de confianza de 100% en los dos sitios de estudio, lo que demuestra la significación estadística de los resultados.

Se observa que los últimos años del periodo reciente (1991-2019) cuentan con mayor cantidad de años con TR20 en los dos sitios de estudio (Figura 11 y 12); los valores fueron entre 190 y 197 días en Asunción y 119 y 127 en Encarnación. En el periodo base se presentaron los valores mínimos de TR20; en Asunción fueron de 102 a 137 días y en Encarnación 48 a 50 días. Este índice indicó que el número de noches tropicales aumenta 0,647 días por año en Asunción y 0,818 en Encarnación.

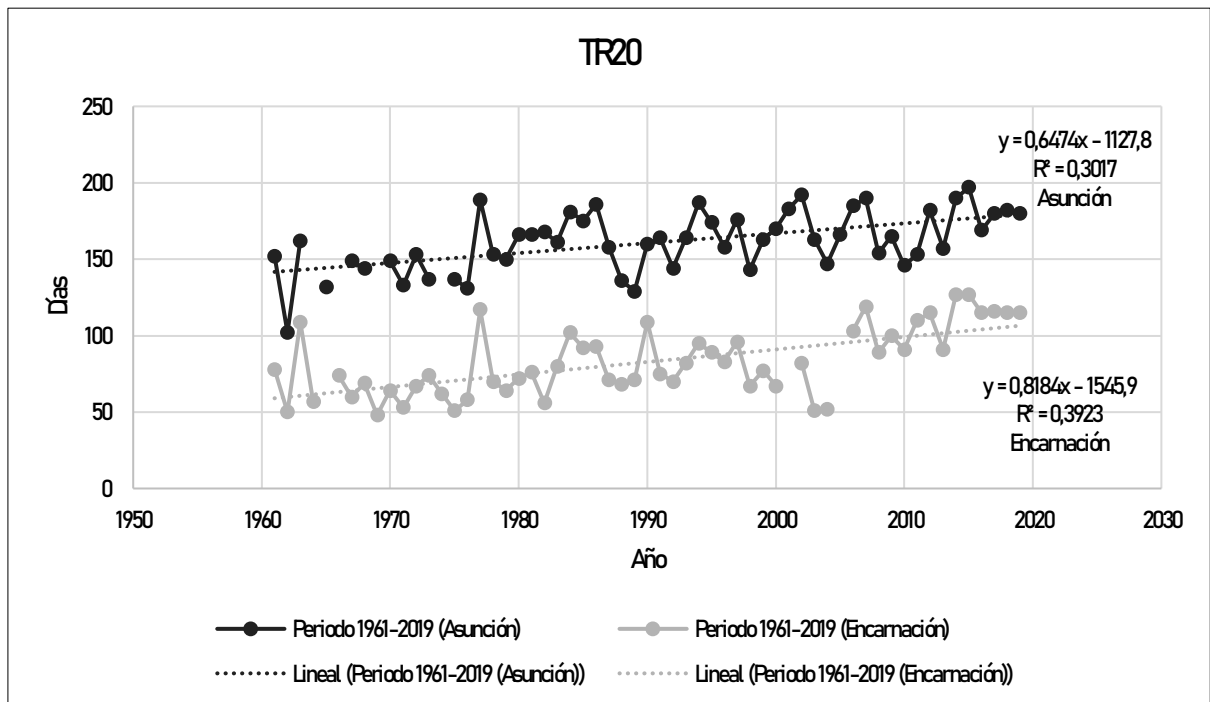


Figura 12: Número de días en un año cuando la temperatura mínima es mayor a 20 °C (Noches tropicales, TR20) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

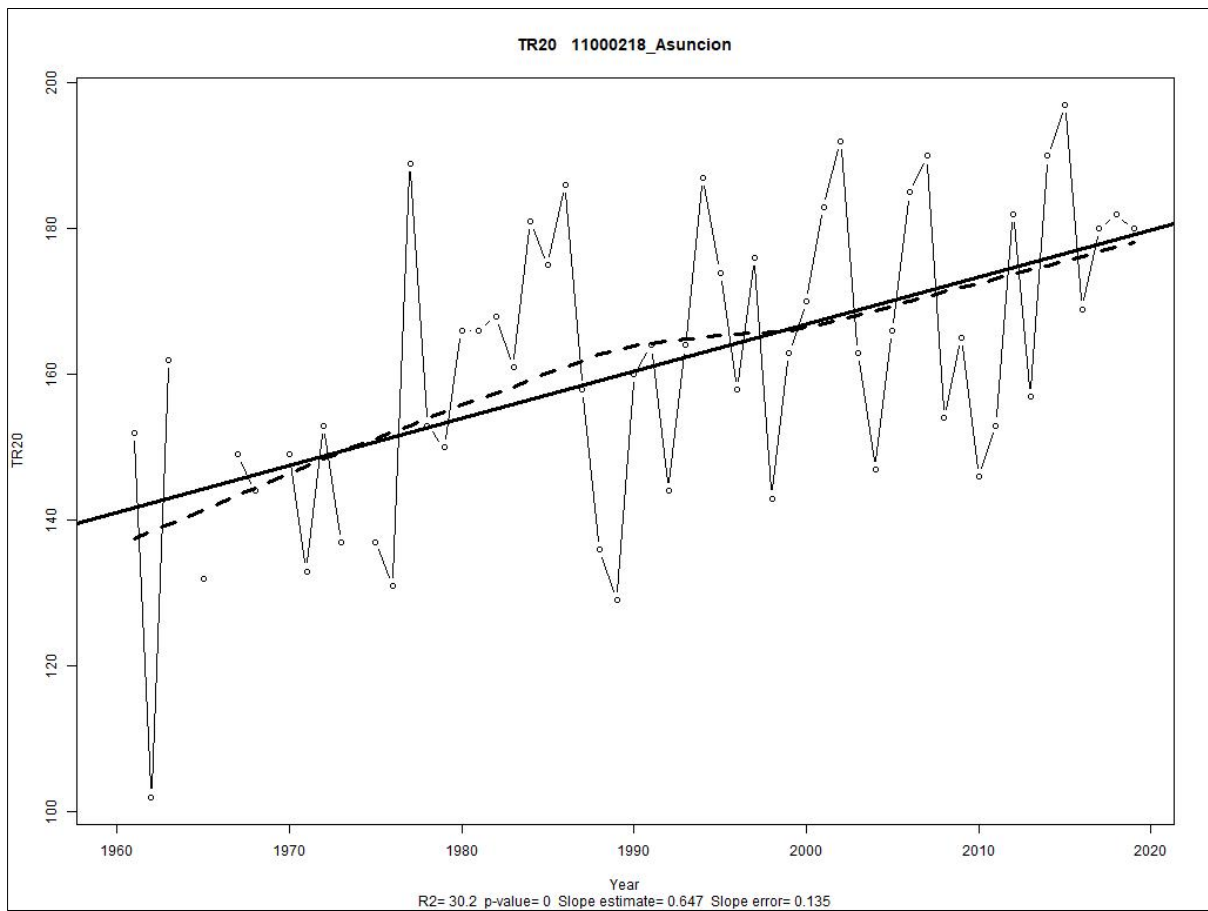


Figura 13: Número de días en un año cuando la temperatura mínima es mayor a 20 °C (Noches tropicales, TR20) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: elaboración propia.

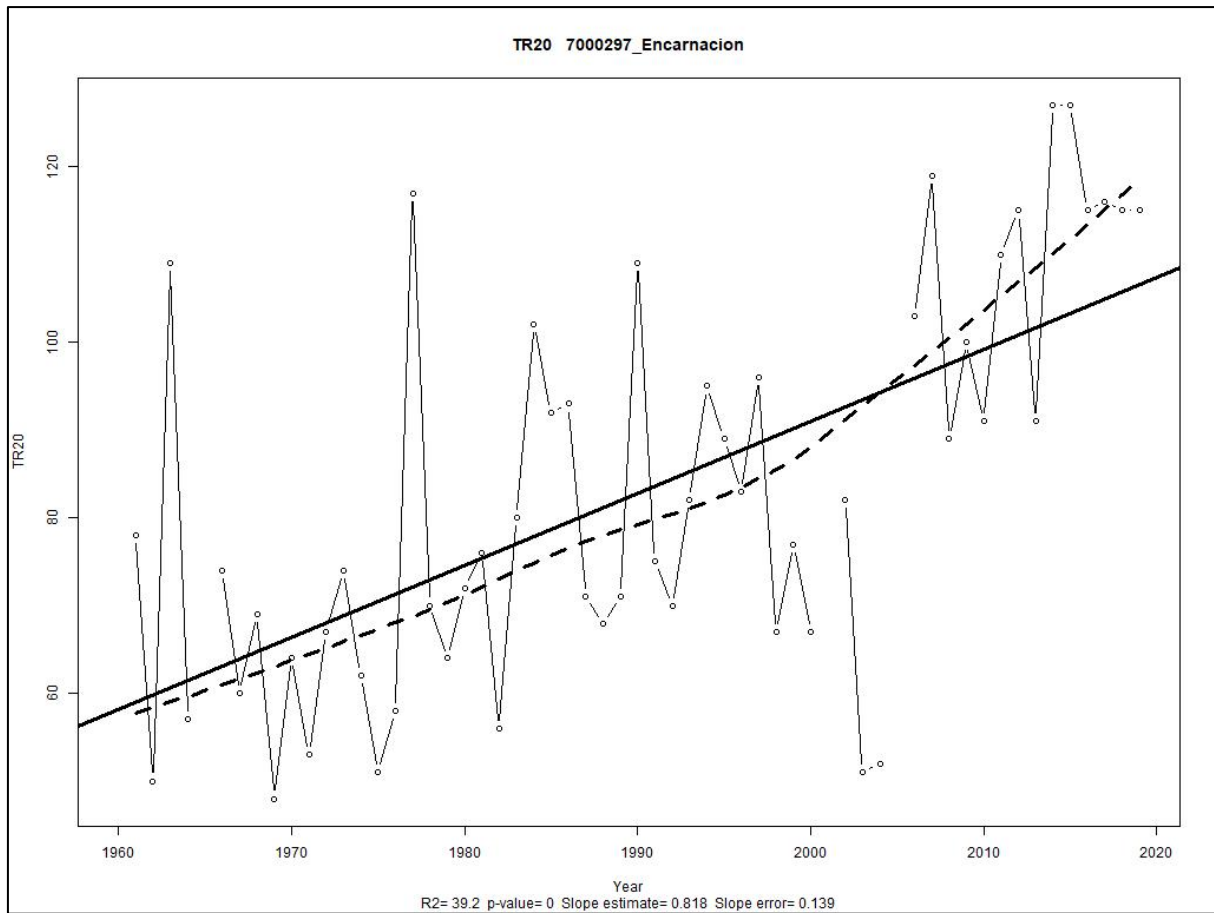


Figura 14: Número de días en un año cuando la temperatura mínima es mayor a 20 °C (Noches tropicales, TR20) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Valor máximo de la temperatura máxima (TXx)

Este índice mostró una tendencia positiva (Figura 13), con un nivel de confianza 96,7% en Encarnación, demostrando la significación estadística del resultado. Los resultados de Asunción no fueron considerados válidos por dar como resultado un nivel de significancia estadística menor al 95%, lo cual no puede ser aceptado según los criterios de este estudio.

Se observa que los últimos años del periodo reciente (1991-2019) la ciudad de Encarnación presenta mayor cantidad de años con TXx. Los valores mínimos de TXx tuvieron lugar en el periodo base con 36 °C en los años 1976 y 1981 y 36,6 °C en el año 1974. El valor máximo de TXx fue de 42 °C ocurridos en los dos periodos de estudio, en los años 1985 y 2008. Este índice mostró que la máxima temperatura máxima diaria en cada mes aumenta 0,024 °C por año.

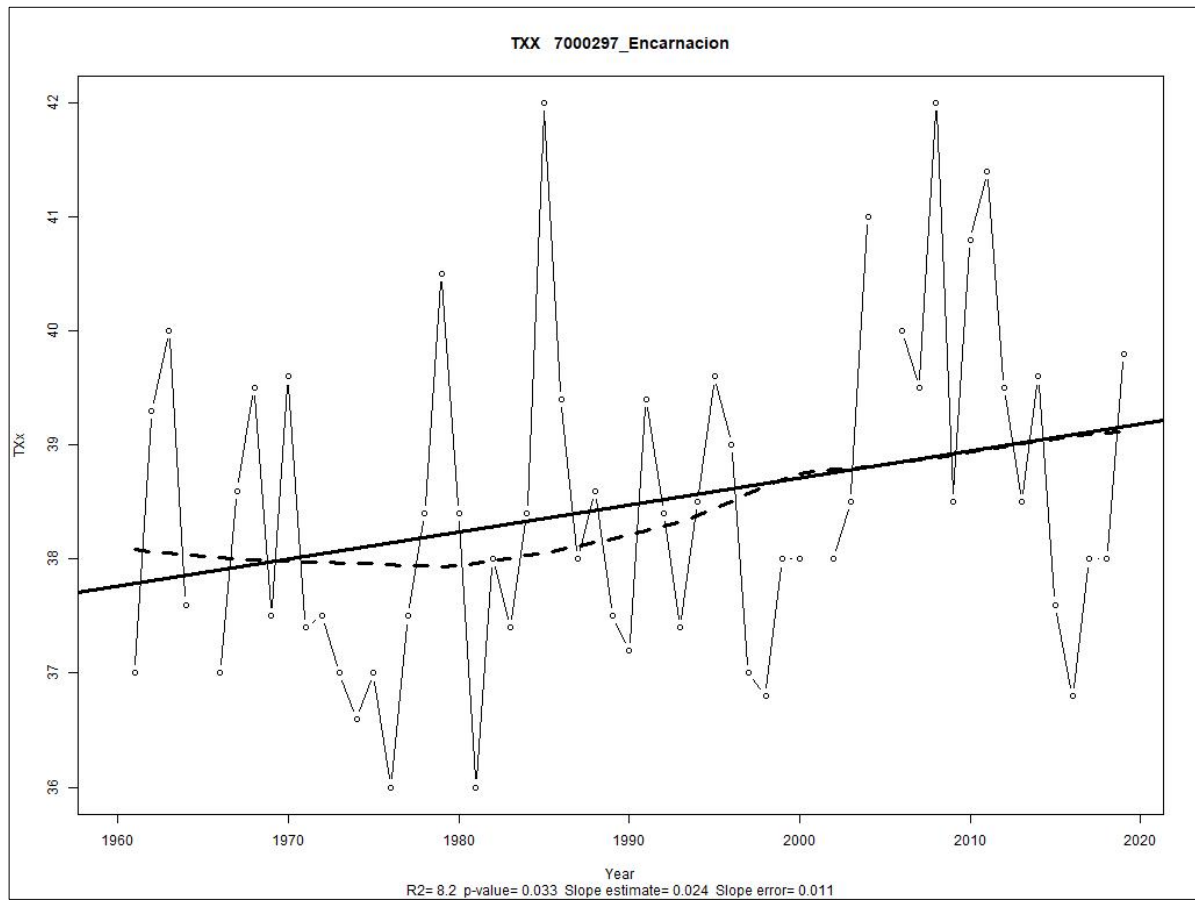


Figura 15: Valor mensual máximo de temperatura máxima por año (Máxima de temperatura máxima, TXx) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.4 Valor máximo de la temperatura mínima (TNx)

Los resultados de este índice mostraron tendencia positiva en los dos sitios de estudio (Figura 14), con un nivel de confianza de 100% en Asunción (Figura 15) y 96,6% en Encarnación (Figura 16), lo que representa una significación estadística de los resultados.

Se observa que en los últimos años del periodo reciente (1991-2019) se encuentran los picos de la máxima de la temperatura mínima en los dos sitios de estudio. En Asunción estas temperaturas fueron 28,8 °C en los años 2008 y 2019 y 29 °C en el 2012. En Encarnación los valores fueron 28,6 °C en el año 2014 y 28,8 °C en el 2010. Los valores mínimos de TNx fueron 26 °C en Asunción y 24 °C en Encarnación en los dos periodos de estudio.

Este índice indicó que la máxima temperatura mínima diaria en cada mes aumenta 0,023 °C por año en Asunción y 0,017 °C en Encarnación.

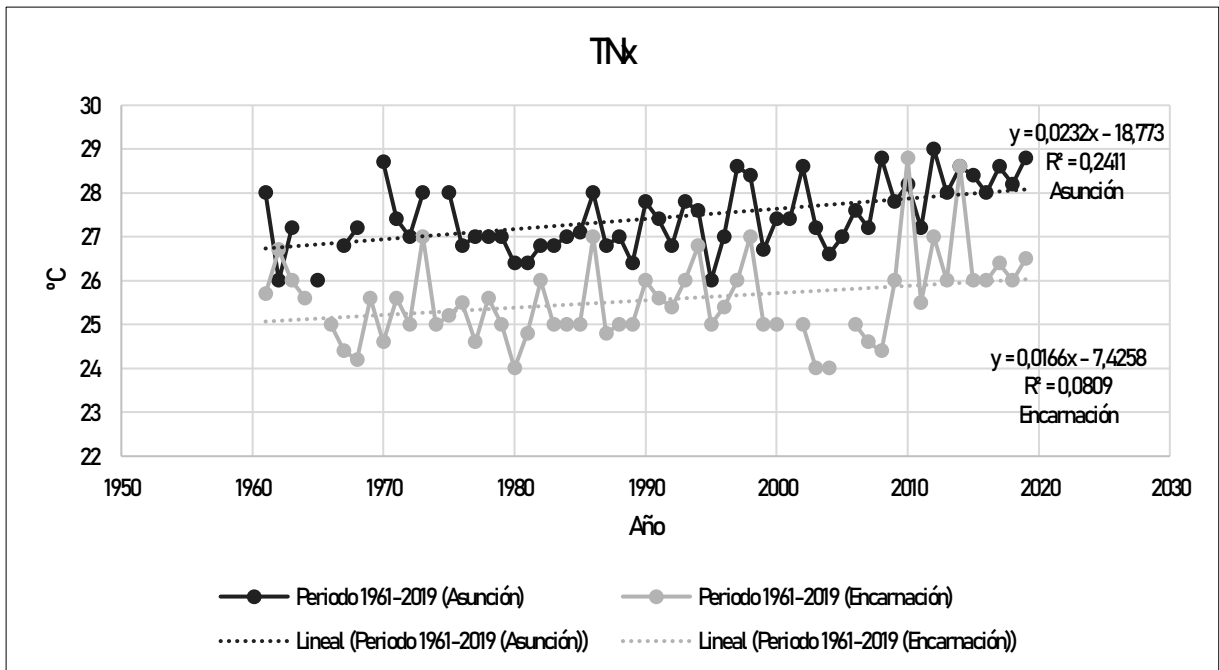


Figura 16: Valor mensual máximo de temperatura mínima por año (Máxima de temperatura mínima, TNx) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

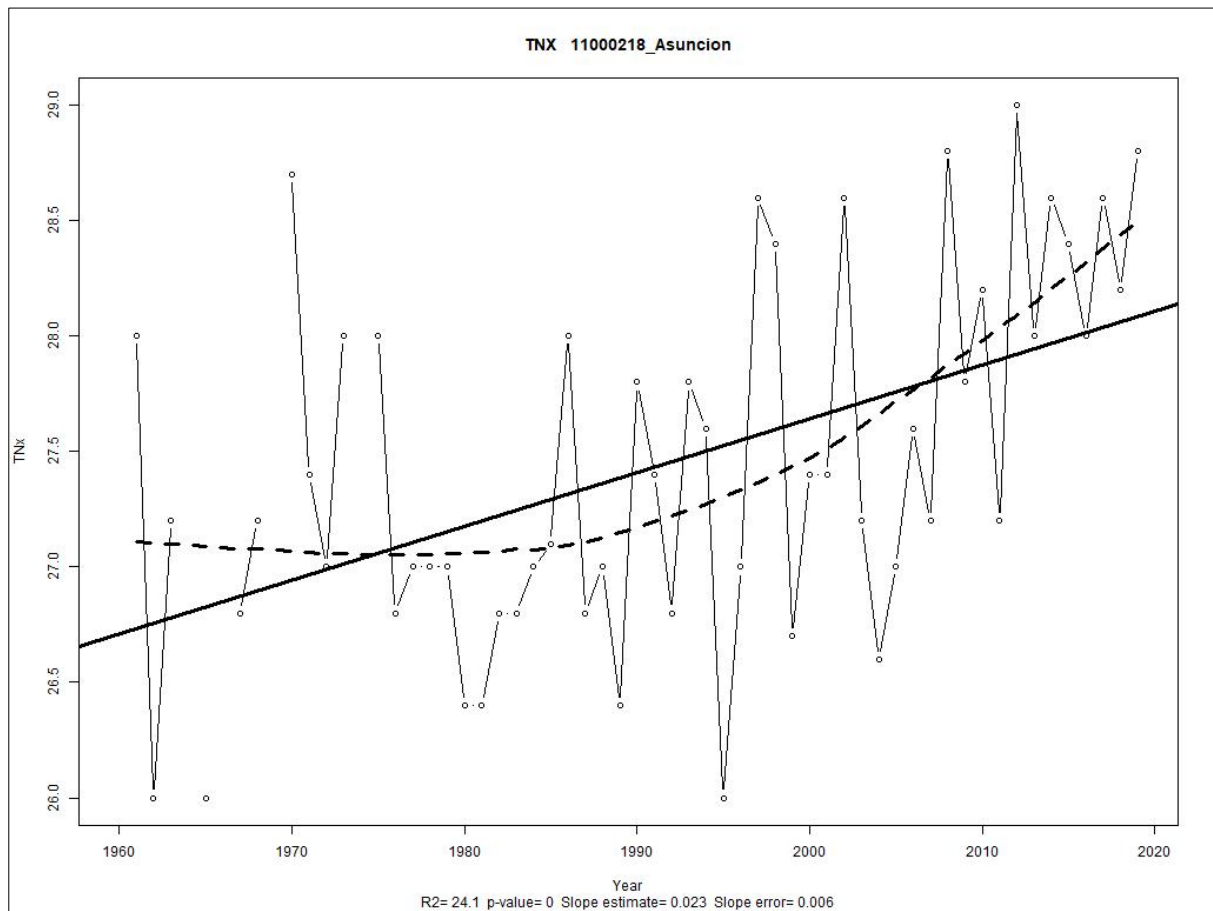


Figura 17: Valor mensual máximo de temperatura mínima por año (Máxima de temperatura mínima, TNx) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

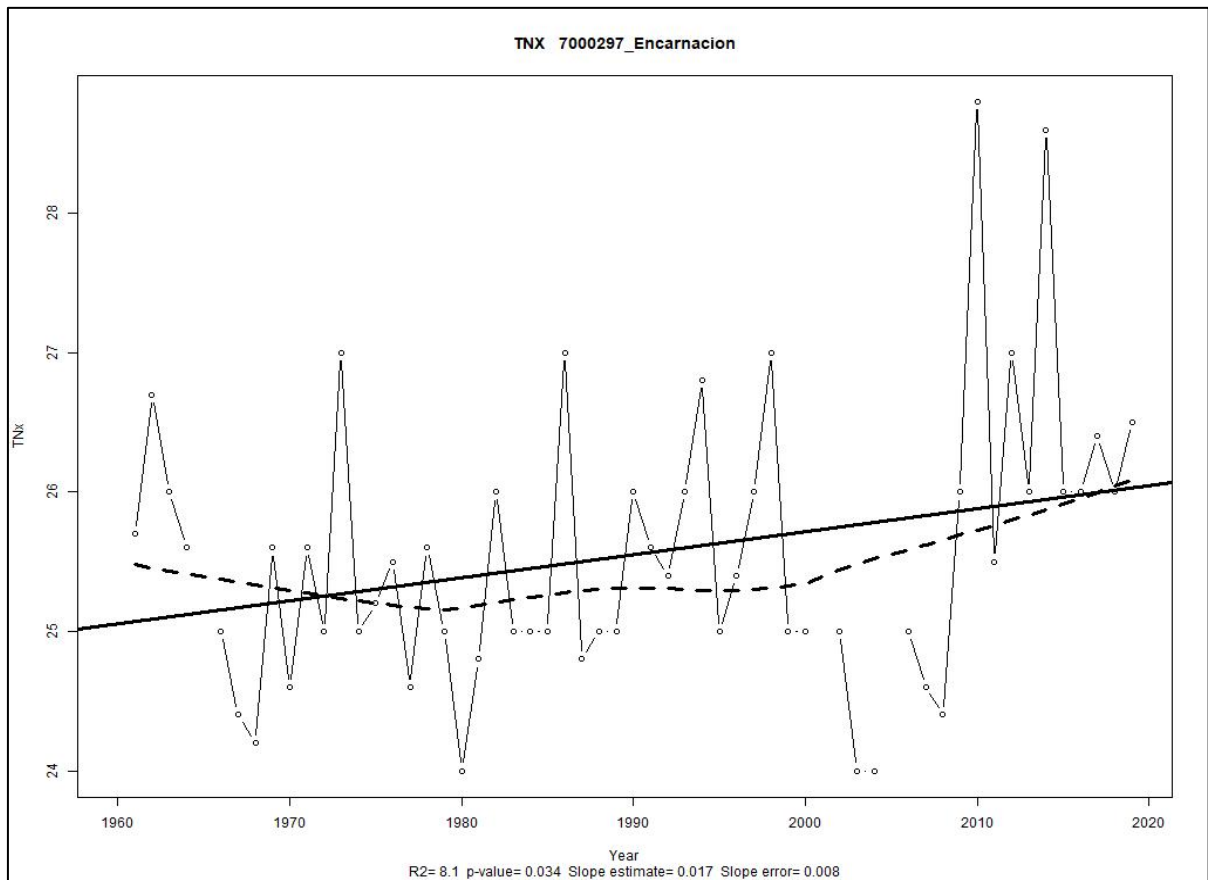


Figura 18: Valor mensual máximo de temperatura mínima por año (Máxima de temperatura mínima, TNx) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.5 Valor mensual mínimo de temperatura máxima (TXn)

Los resultados de este índice no tuvieron la significancia estadística mínima aceptada para este estudio, ya que los mismos fueron menor al 95% en ambos sitios de estudio. El valor mínimo de temperatura máxima mensual se mantuvo entre 7 a 8 °C en los sitios de estudio. El valor mínimo de TXn en el primer periodo (1961-1990) fue de 8,2 °C y en el periodo reciente (1991-2019) fue de 8 °C. En Encarnación, en el primer periodo, el valor mínimo de TXn fue de 7,8 °C y en el periodo reciente de 7 °C.

4.4.6 Valor mensual mínimo de temperatura mínima (TNn)

Este índice mostró una clara tendencia positiva (Figura 17) con un nivel de confianza de 99,8% para Encarnación. Los resultados de la ciudad de Asunción no tuvieron significancia estadística por lo que no se consideraron válidos para este estudio.

Se observa en el periodo reciente (1991-2019) los valores máximos de TNn. Éstos fueron 2 a 3 °C, los mismos no existieron en el periodo base (1961-1990), donde el mayor de valor de TNn fue 1,2 °C en el año 1988. Este índice demostró que la mínima de temperatura mínima aumenta 0,016 °C por año.

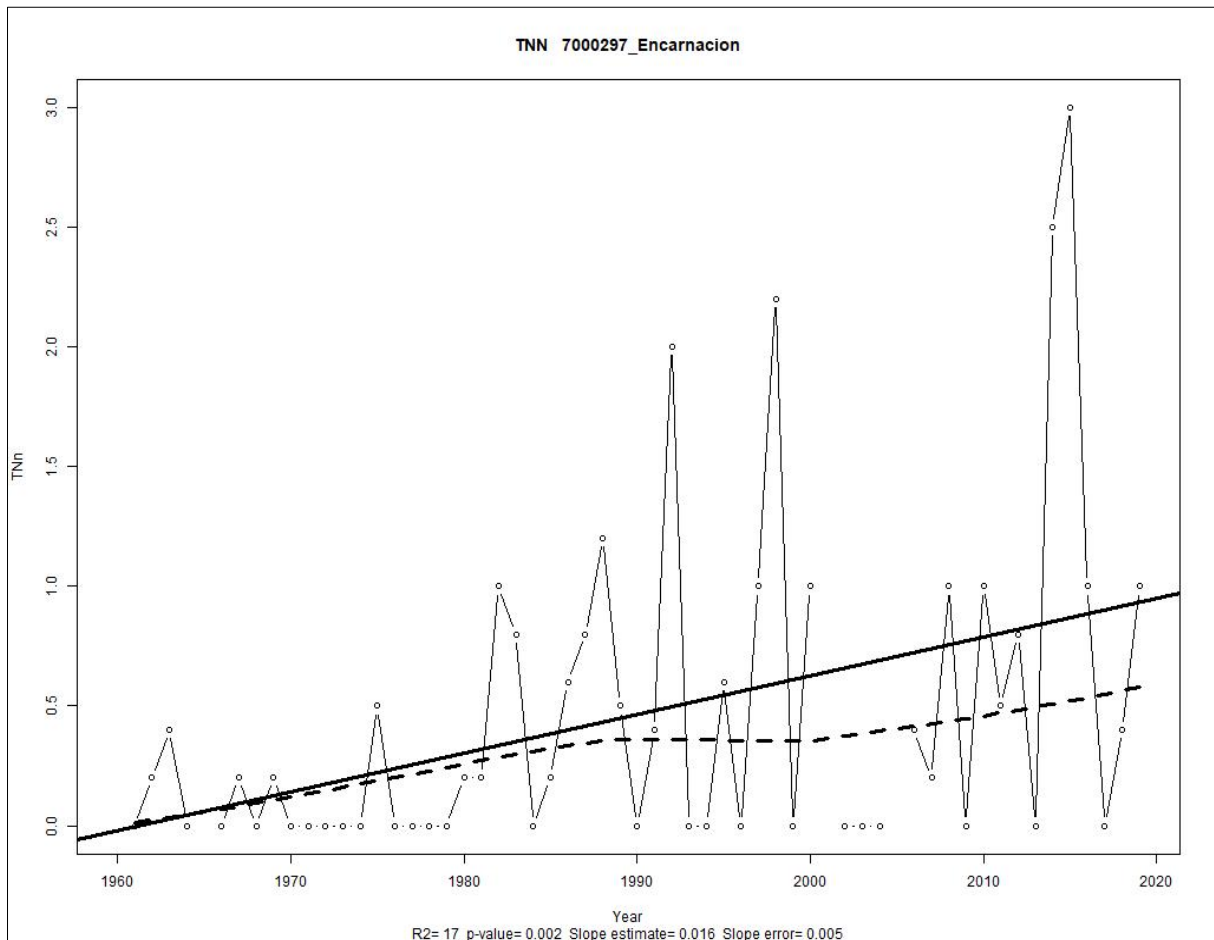


Figura 19: Valor mensual mínimo de temperatura mínima por año (Mínima de temperatura mínima, TNx) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.7 Noches frías (TN10p)

Los resultados para este índice demostraron una tendencia negativa en los dos sitios de estudio (Figura 18), con un nivel de confianza de 100% tanto en Asunción (Figura 19) como en Encarnación (Figura 20).

Se observa que el periodo base (1961-1990) tiene valores máximos de TN10p no existentes en el periodo reciente (1991-2019). Estos valores van de 11,37 a 20,09 en Asunción y de 13,73 a 17,66 en Encarnación. Caso opuesto tiene lugar en el periodo reciente, donde se

ven valores mínimos de TN10p no existentes en el periodo reciente. Estos valores van de 1,64 a 4,93 en Asunción y de 1,1 a 4,24 en Encarnación. Este índice indicó que las noches frías disminuyen 0,01 noches por año en Asunción y 0,163 noches por año en Encarnación.

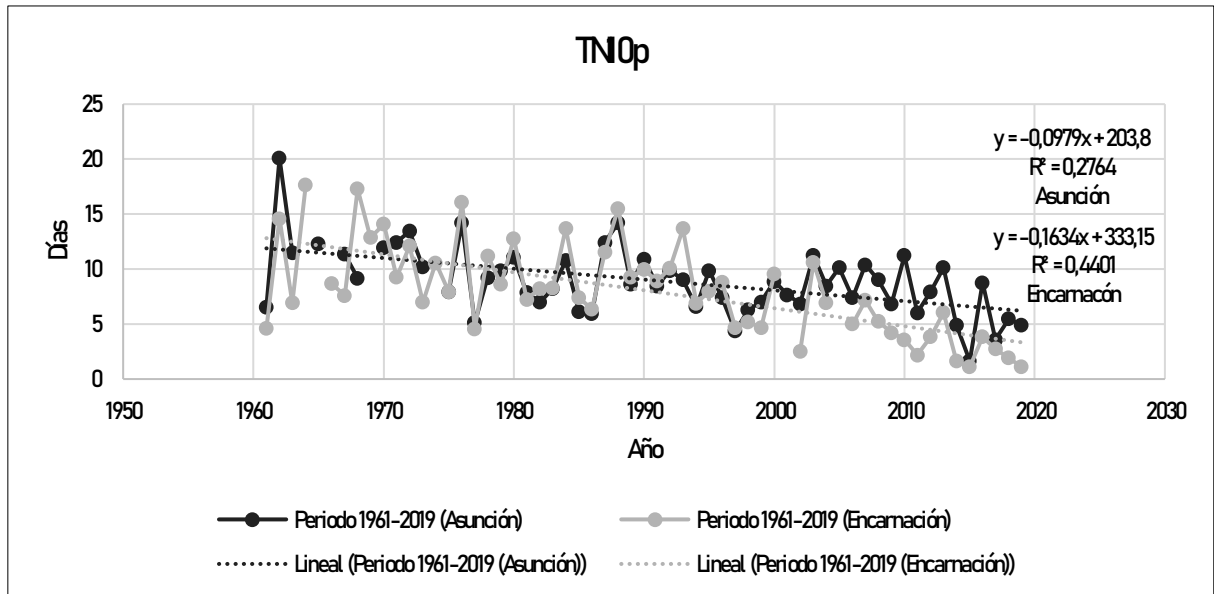


Figura 20: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 10 (Noches frías, TN10p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

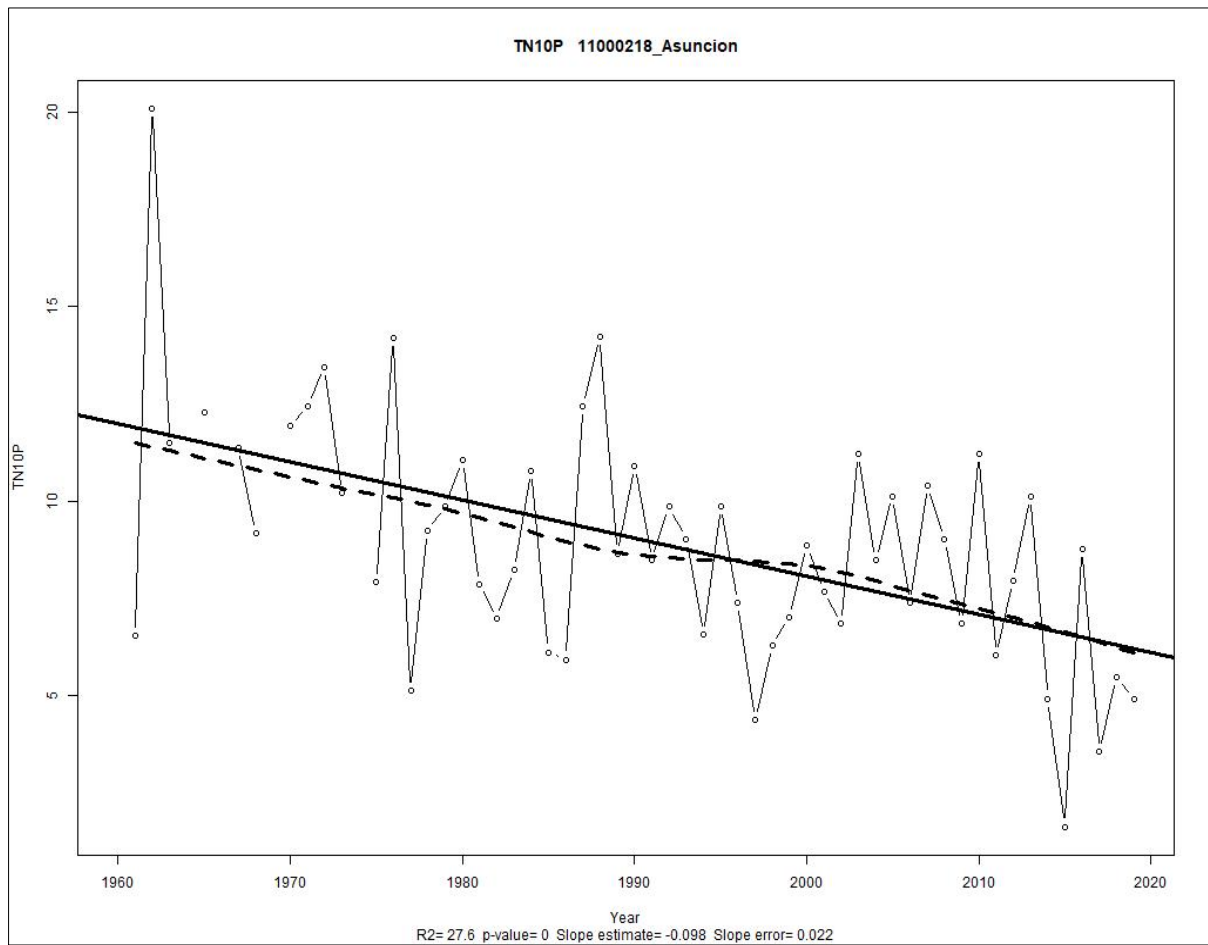


Figura 21: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 10 (Noches frías, TN10p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

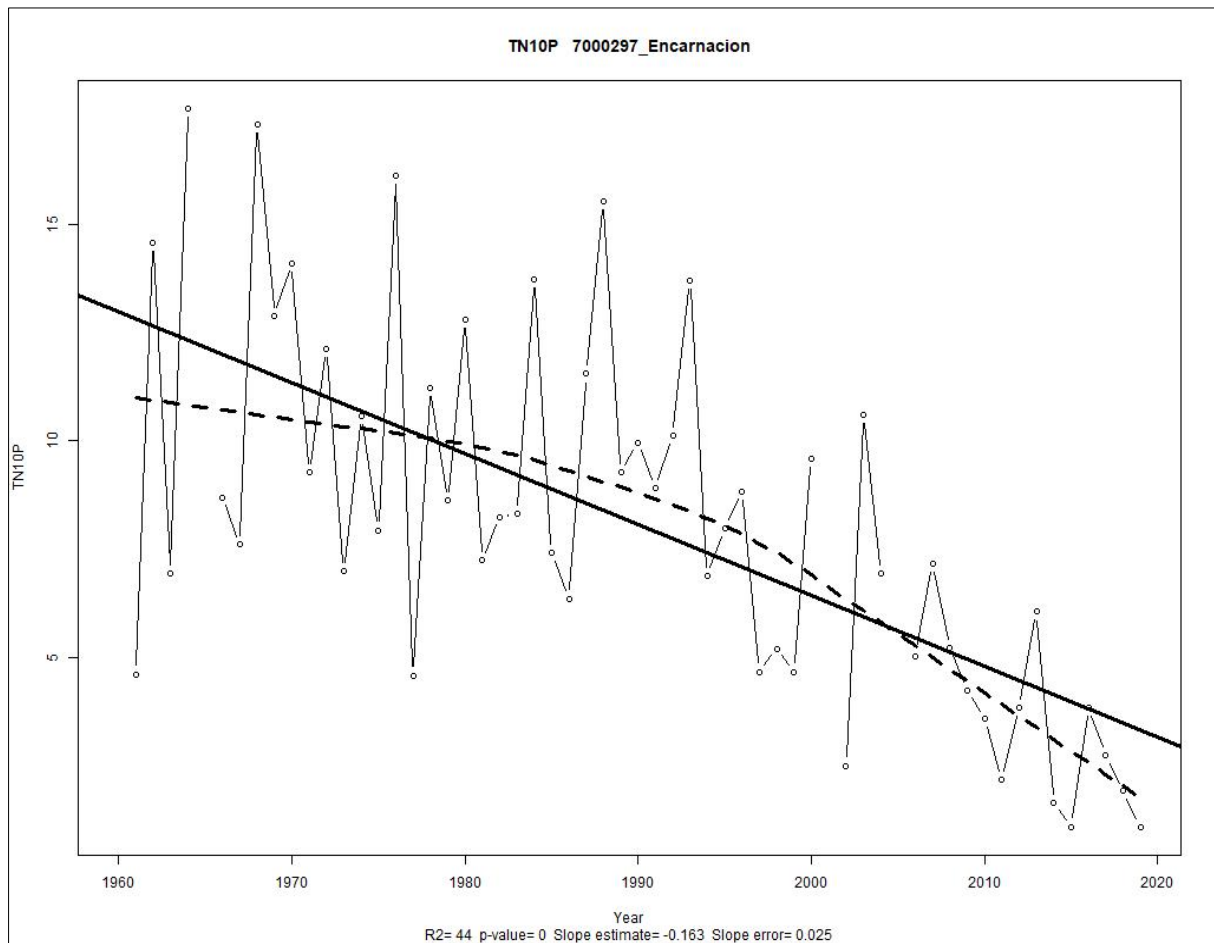


Figura 22: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 10 (Noches frías, TN10p) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.8 Días fríos (TX10p)

Los resultados para este índice mostraron una tendencia negativa en los dos sitios de estudio (Figura 21), con un nivel de confianza de 100% en Asunción (Figura 22) y 99,9% en Encarnación (Figura 23).

Se observa que el periodo base (1961-1990) tiene valores máximos de TX10p no existentes en el periodo reciente (1991-2019). Estos valores van de 12,27 a 19,02 en Asunción y 12,55 a 17,08 en Encarnación. Los valores máximos alcanzados en el periodo reciente fueron 12,05 en Asunción y 12,35 en Encarnación. Este índice indicó que los días fríos disminuyen 0,08 días por año en Asunción y 0,077 días por año en Encarnación.

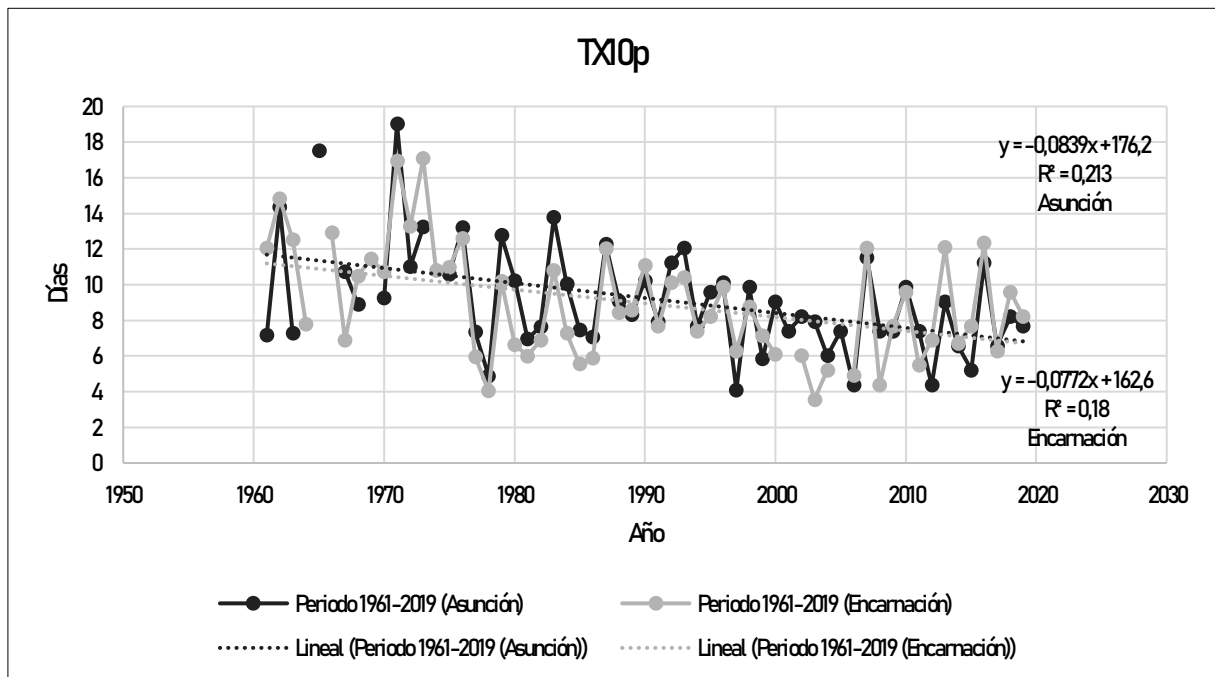


Figura 23: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 10 (Días fríos, TX10p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

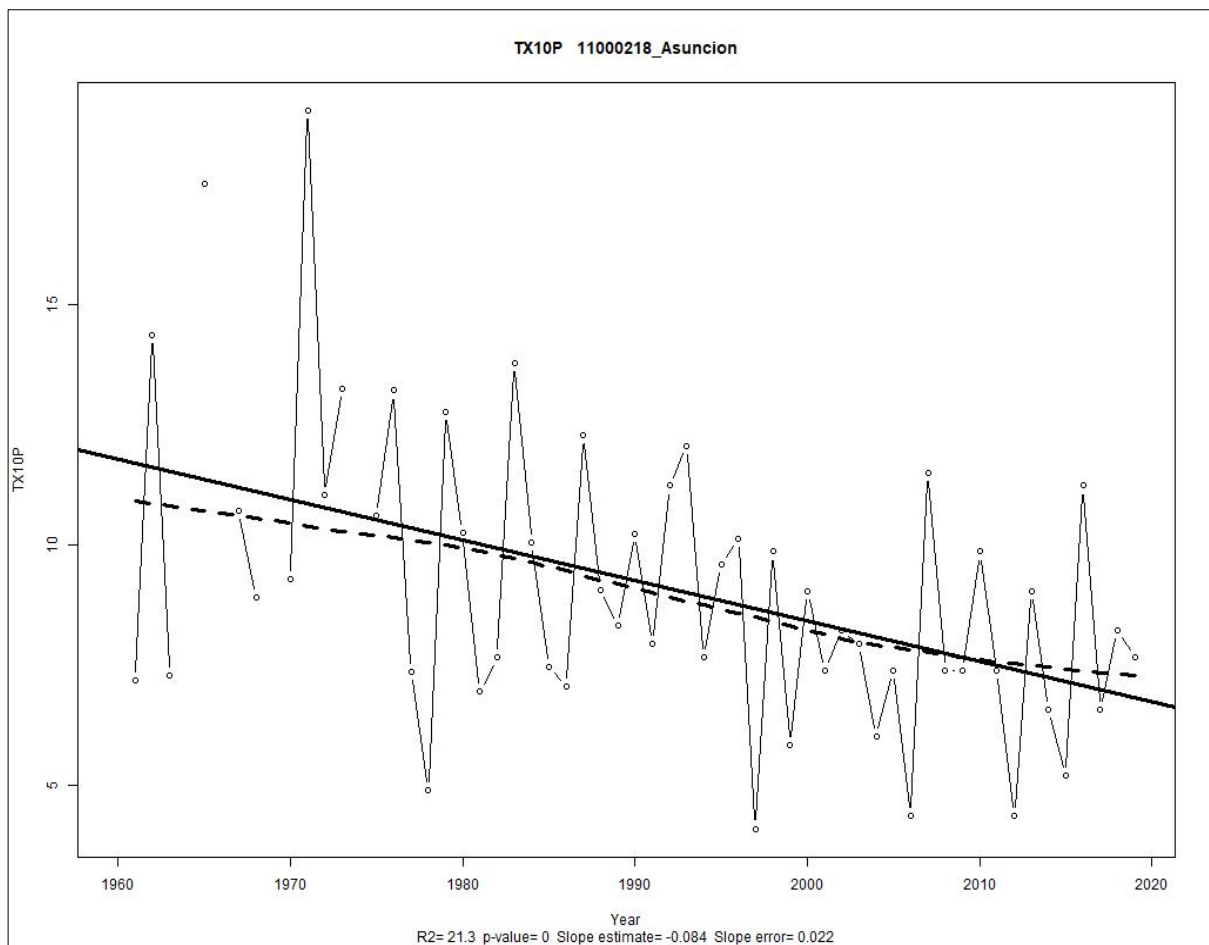


Figura 24: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 10 (Días fríos, TX10p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

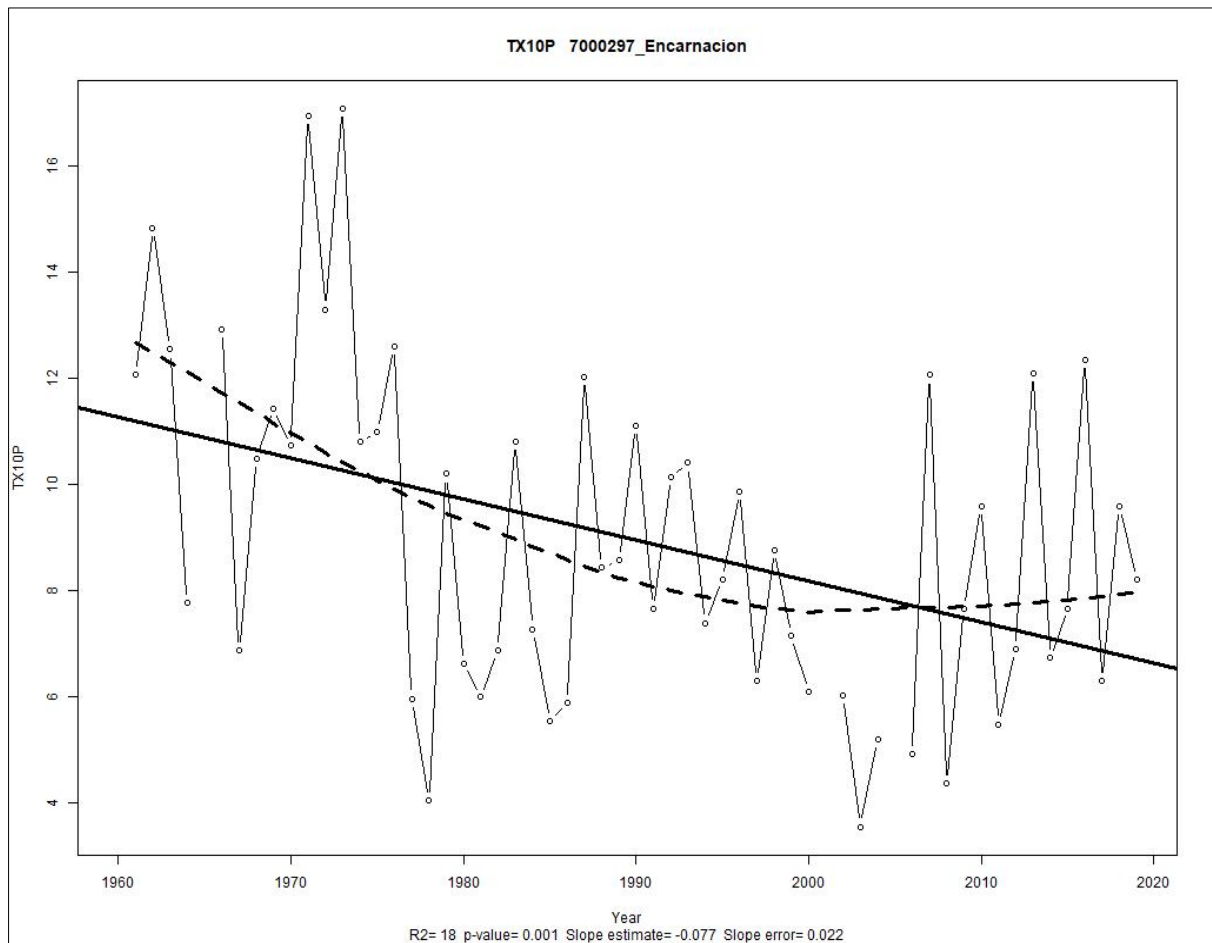


Figura 25: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 10 (días fríos, TX10p) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.9 Noches calientes (TN90p)

Este índice mostró una tendencia positiva bien definida (Figura 24), con un nivel de confianza de 100% en ambos sitios de estudio (Figura 25 y 26).

Se observa que el periodo base (1961-1990) tiene valores mínimos de TN90p no existentes en el periodo reciente (1991-2019). Estos valores en Asunción van de 4,05 a 6,52 y 5,21 a 5,95 en Encarnación. Caso opuesto tiene lugar en el periodo reciente, donde se ven valores máximos de TN90p no existentes en el periodo base, éstos valores van de 15,62 a 21,37 en Asunción y 17,84 a 25,75 en Encarnación. Este índice indicó que las noches calientes aumentan 0,113 noches por año en Asunción y 0,192 noches por año en Encarnación.

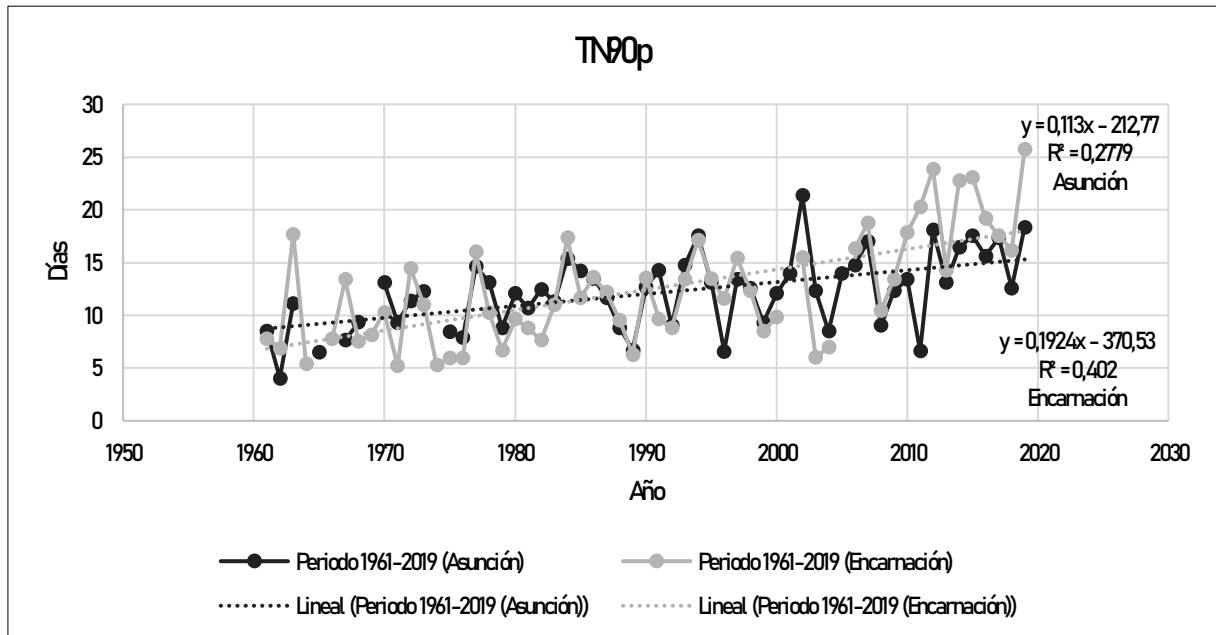


Figura 26: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 90 (noches calientes, TN90p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

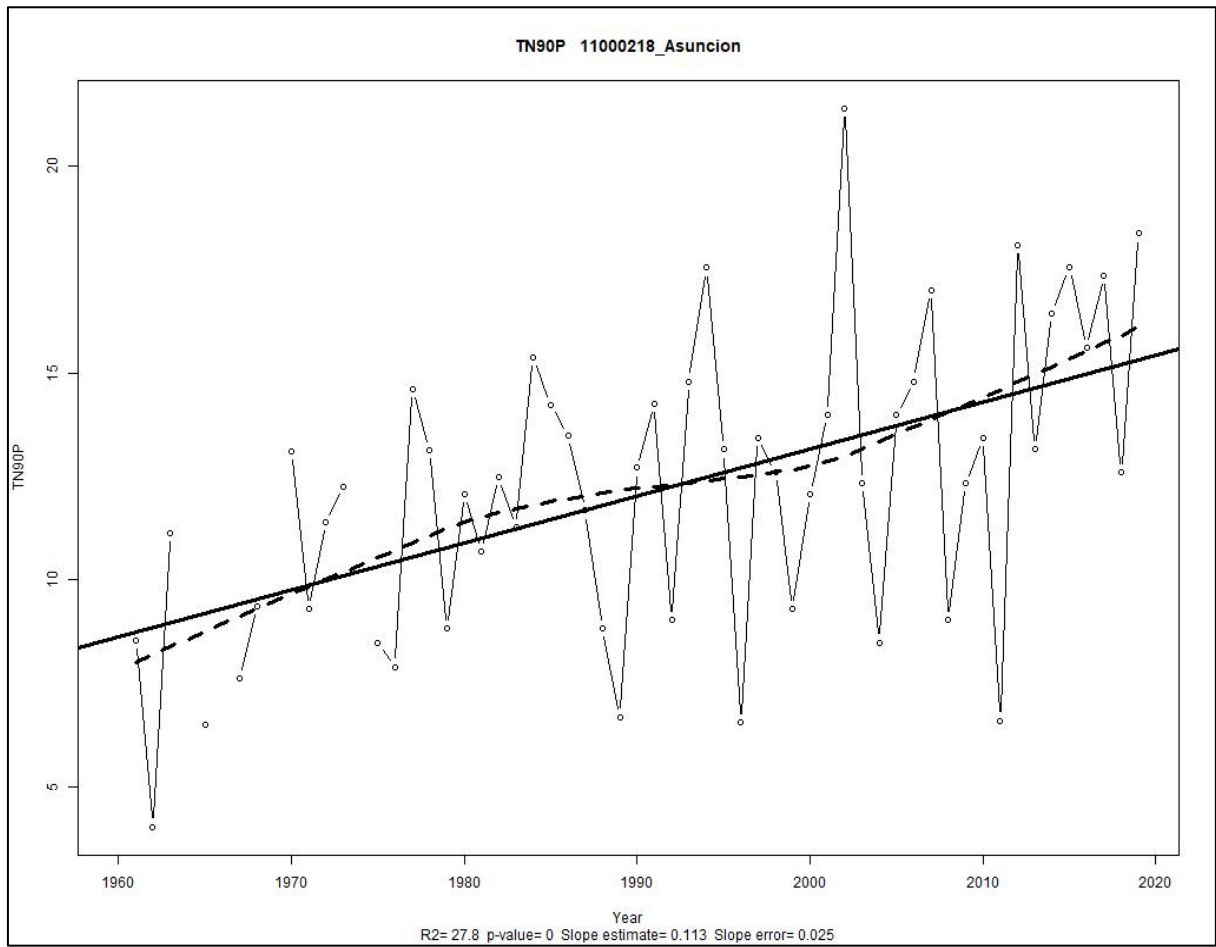


Figura 27: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 90 (noches calientes, TN90p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

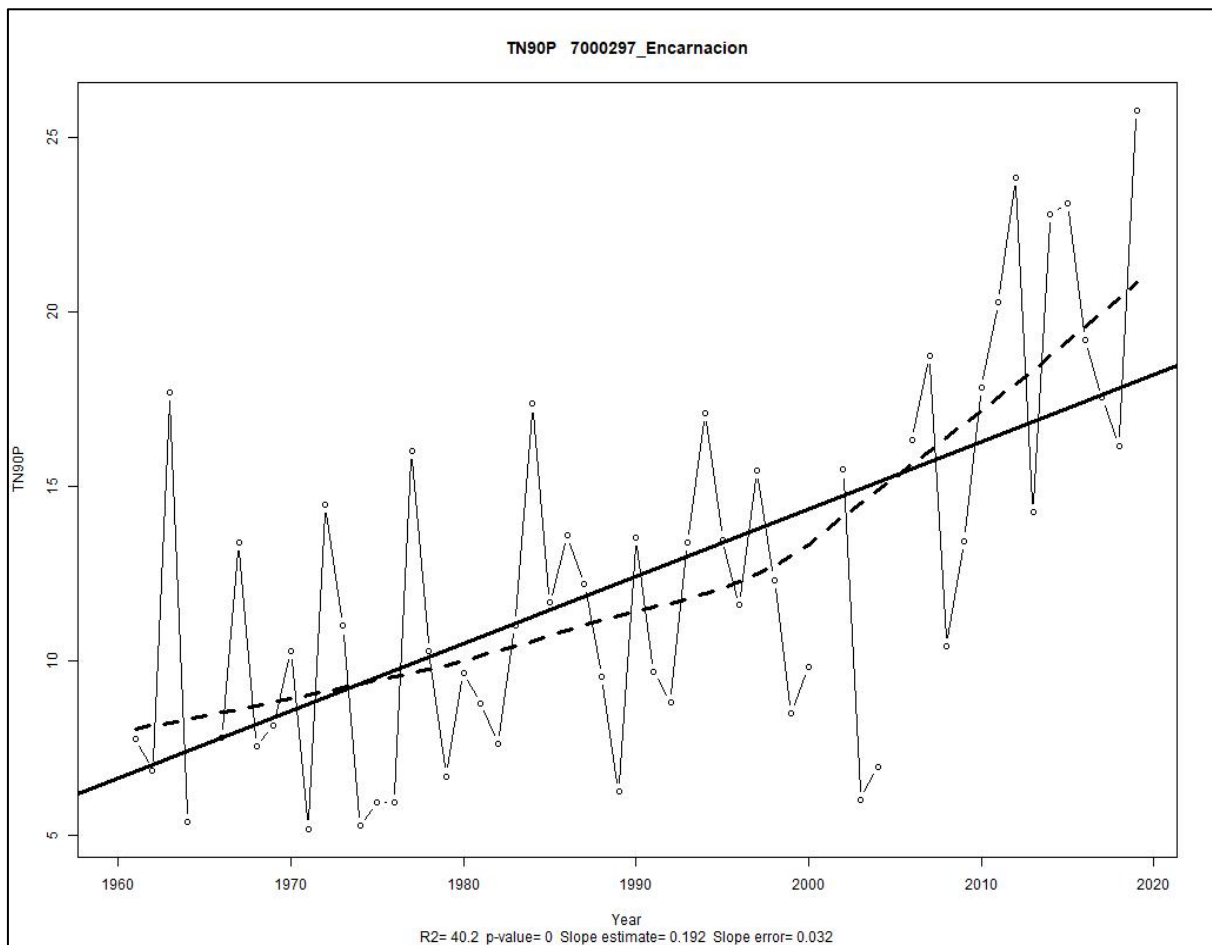


Figura 28: Porcentaje de días cuando la temperatura mínima es menor al percentil 90 (noches calientes, TN90p) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.10 Días calientes (TX90p)

Este índice mostró una tendencia positiva (Figura 27), con un nivel de confianza de 99,8% en ambos sitios de estudio (Figura 28 y 29).

Se observa que el periodo reciente (1991-2019) tiene valores mínimos y máximos de TX90p no existentes en el periodo base (1961-1990). Los valores mínimos son 1,64 en Asunción y 4,11 en Encarnación. Los valores máximos encontrados van de 20,27 a 24,38 en Asunción y 20,37 a 26,3 en Encarnación. Este índice indicó que los días calientes aumentan 0,135 días por año en Asunción y 0,117 días por año en Encarnación.

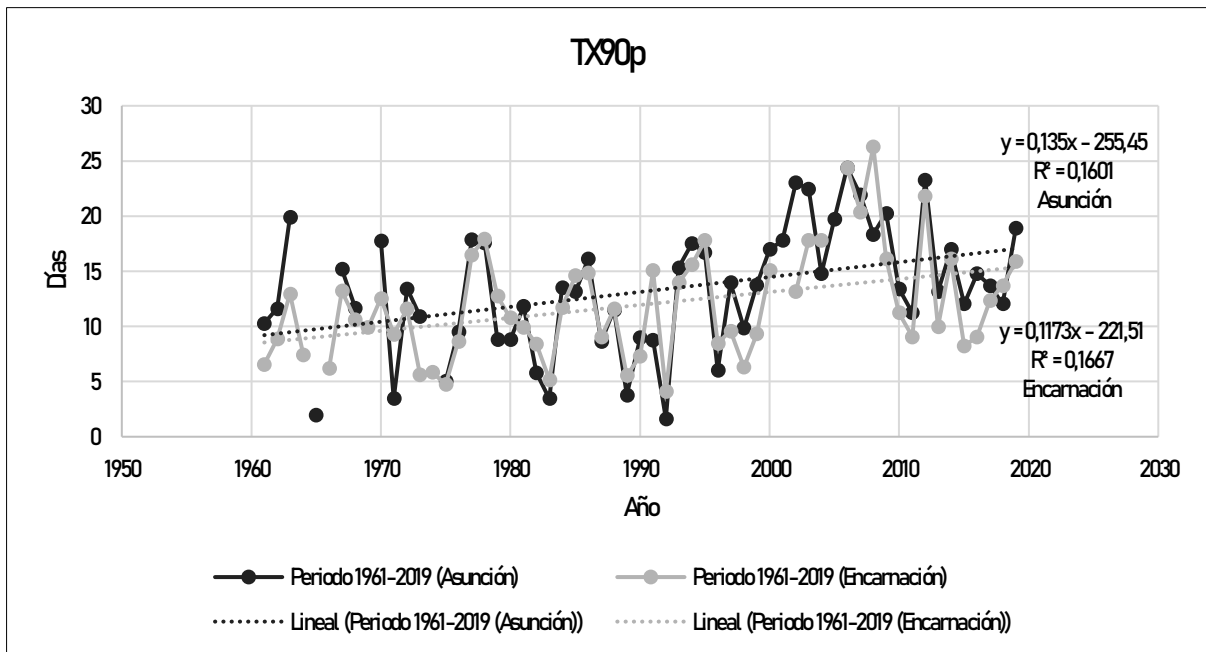


Figura 29: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 90 (días calientes, TX90p) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

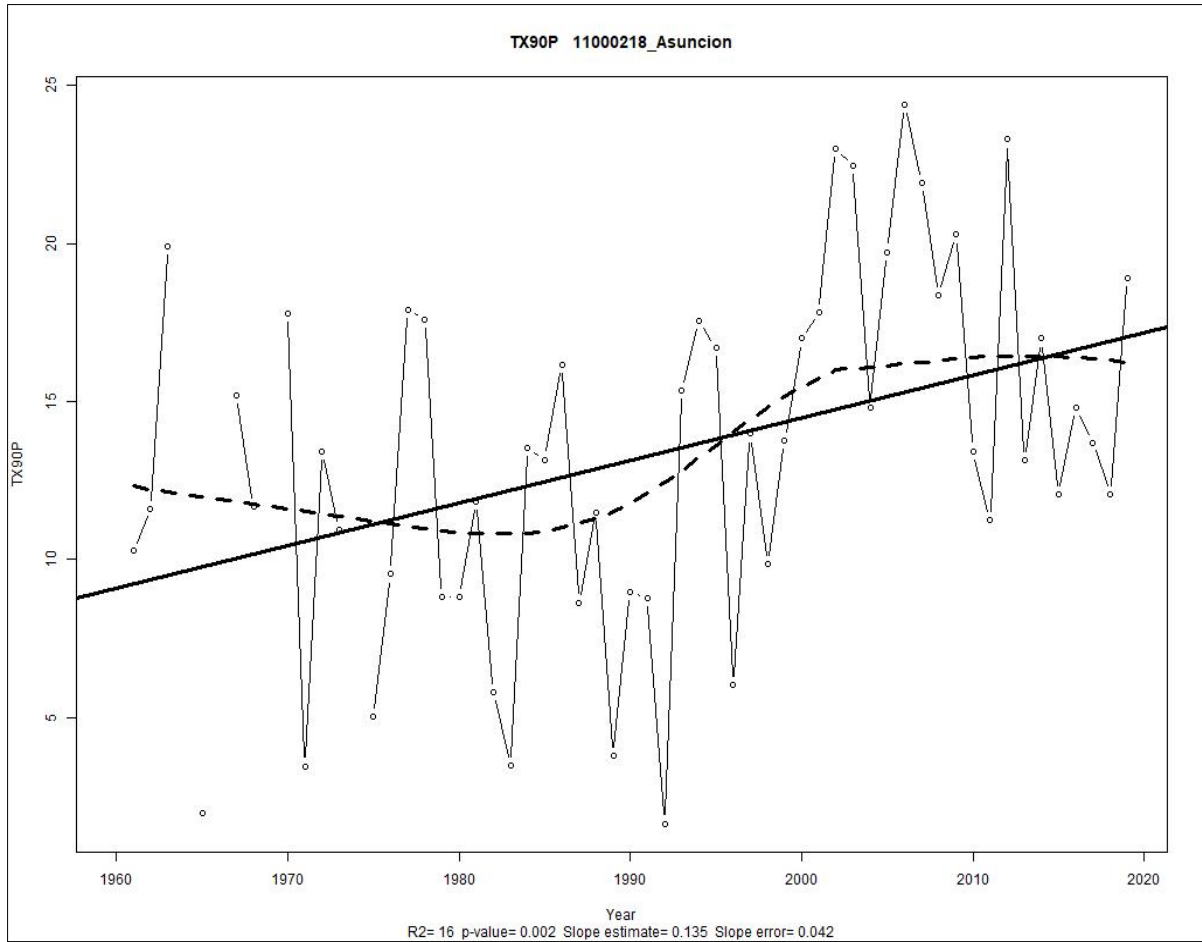


Figura 30: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 90 (días calientes, TX90p) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

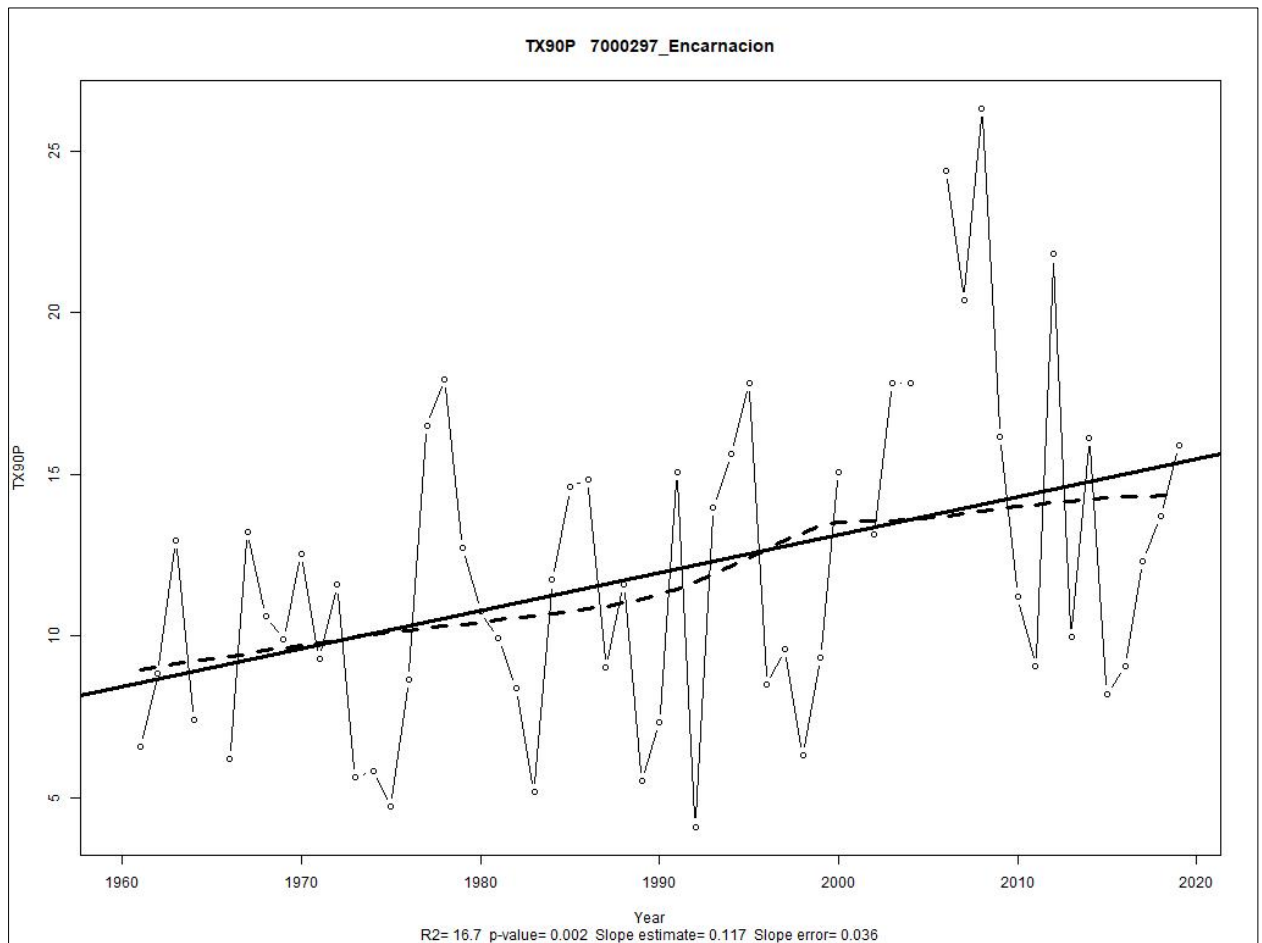


Figura 31: Porcentaje de días cuando la temperatura máxima es menor al percentil 90 (días calientes, TX90p) y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.11 Indicador de duración de periodos calientes (WSDI)

Este índice mostró una tendencia positiva (Figura 30), con un nivel de confianza de 98% en Asunción (Figura 31) y 98,9% en Encarnación (Figura 32).

Se observa que el periodo reciente (1991-2019) tiene valores máximos de WSDI no existentes en el periodo base (1961-1990). Estos valores van de 24 a 28 en Asunción y de 20 a 29 en Encarnación. Este índice indicó que la duración de los periodos calientes tiene un aumento de 0,148 días por año en Asunción y 0,49 días por año en Encarnación.

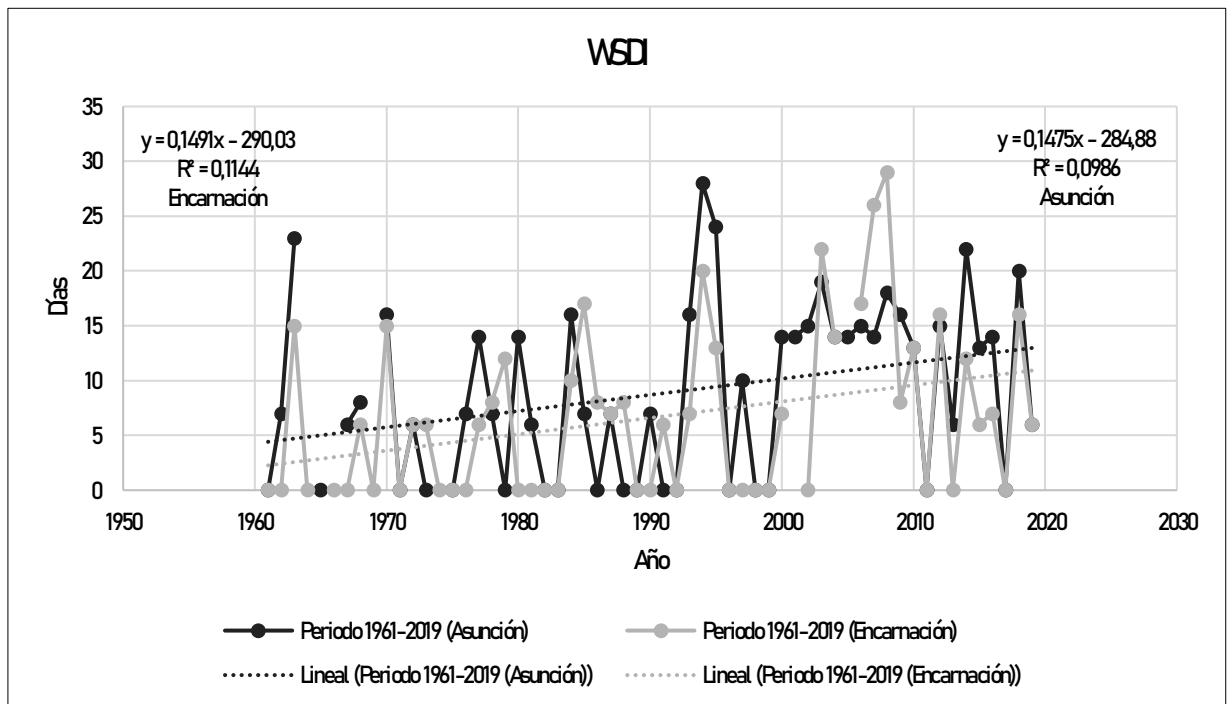


Figura 32: Número anual de días con por lo menos 6 días consecutivos donde la temperatura máxima sea mayor al percentil 90 (WSDI) en Asunción y Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

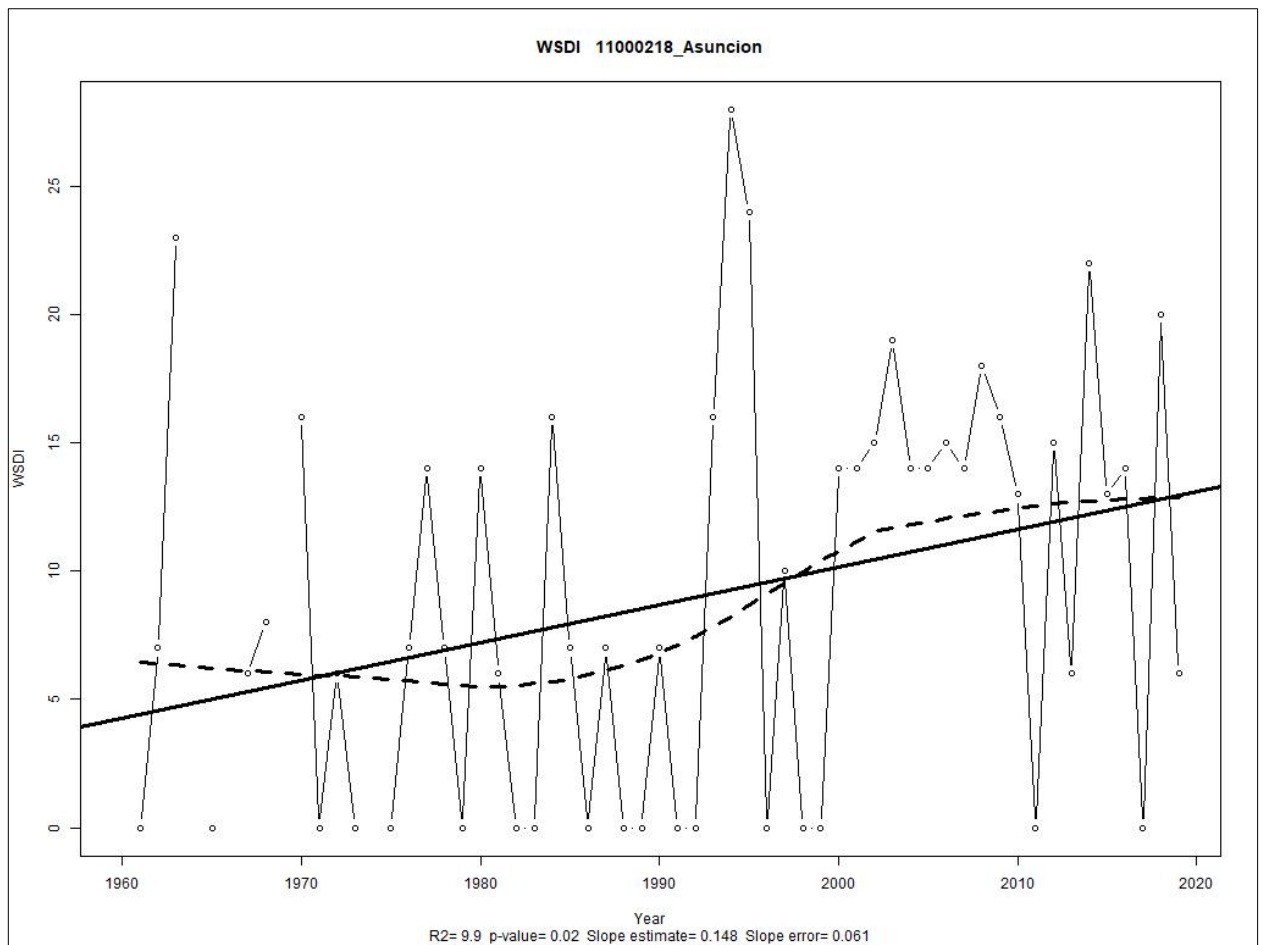


Figura 33: Número anual de días con por lo menos 6 días consecutivos donde la temperatura máxima sea mayor al percentil 90 (WSDI) en Asunción en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

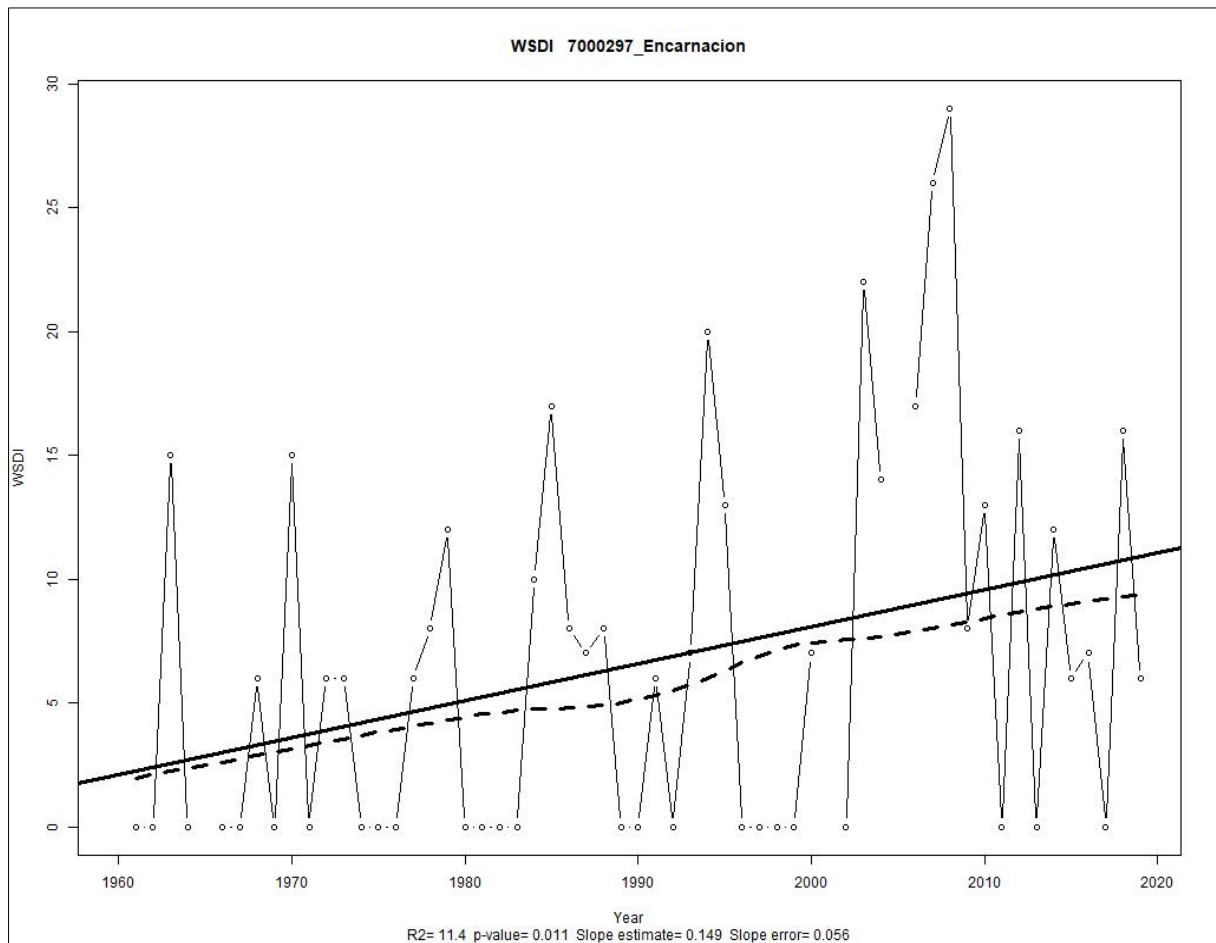


Figura 34: Número anual de días con por lo menos 6 días consecutivos donde la temperatura máxima sea mayor al percentil 90 (WSDI) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

4.4.12 Indicador de duración de periodos fríos (CSDI)

Los resultados de este índice no tuvieron la significancia estadística mínima aceptada para este estudio, ya que los mismos fueron menor al 95% en ambos sitios de estudio.

4.4.13 Rango diario de temperatura (DTR)

Este índice mostró una tendencia negativa (Figura 33), con un nivel de confianza 96% en Encarnación. Los resultados obtenidos de la ciudad de Asunción no contaron con el nivel de significancia estadística mínima para su aceptación en este estudio, por lo que no se los consideró válidos para ser estudiados.

Se observa que el periodo reciente (1991-2019) presenta los valores mínimos y máximos de DTR del periodo estudiado (1961-2019) en la ciudad de Encarnación, los cuáles son 9,69 °C en el 2015 y 13,75 °C en el 2003 respectivamente. Este índice indicó que la tendencia de diferencia media mensual entre la temperatura máxima y la mínima disminuye 0,014 °C por año en Encarnación.

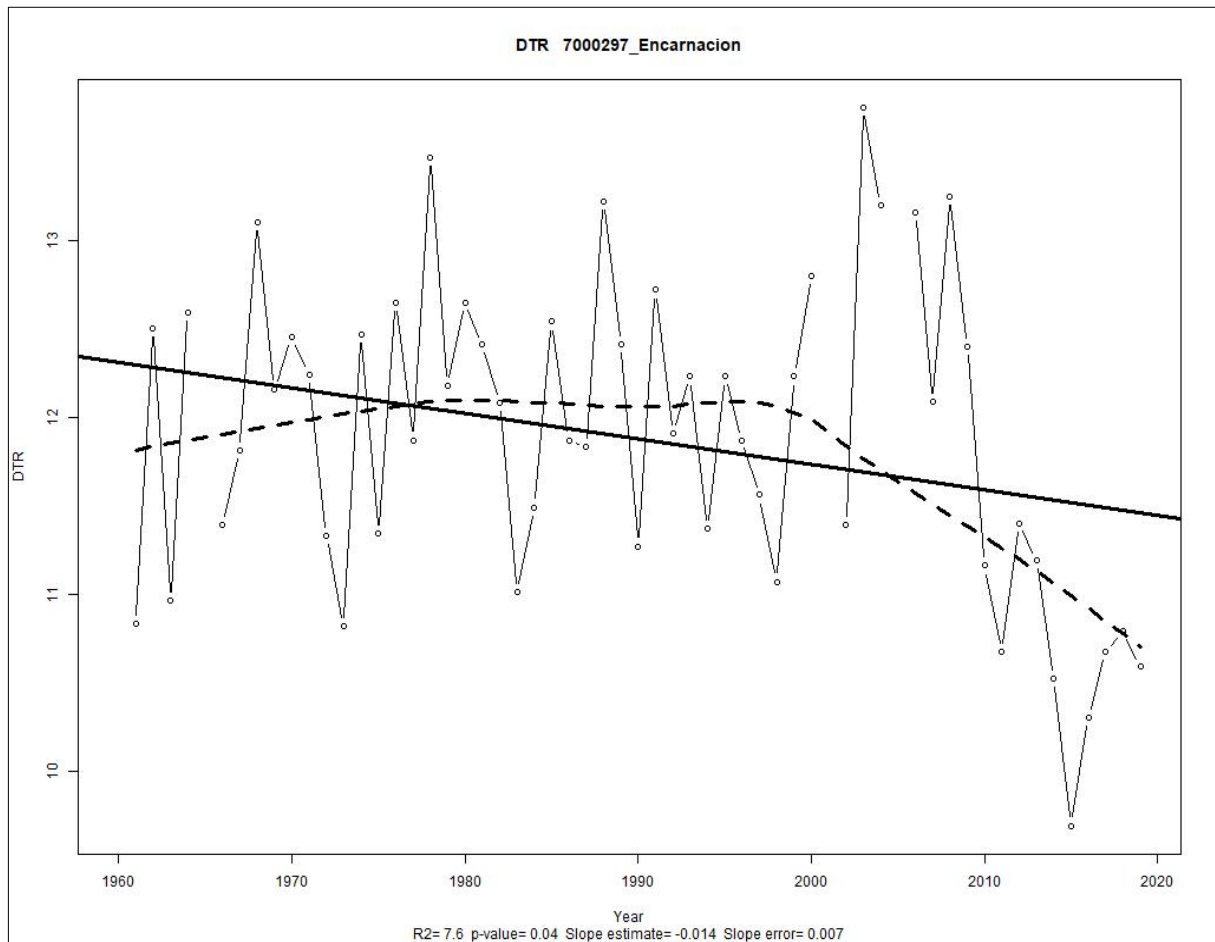


Figura 35: Diferencia media mensual entre la temperatura máxima y la temperatura mínima por año (DTR) en Encarnación en el periodo 1961-2019. Fuente: Elaboración propia.

Esta investigación busca demostrar, a través de la hipótesis, la existencia de cambios en los patrones de temperatura del periodo 1990-2019 comparado al periodo base (1961-1990) en las ciudades de Asunción y Encarnación lo cual es producto del cambio climático existente.

Para aceptar o rechazar la hipótesis, se utilizó como criterio los valores p (p -values) para cada índice resultante de $R_{Climdex}$, los cuales fueron generados por el *software* en cuestión. Los índices que dieron como resultado un valor $p < 0,05$ para intervalos de confianza de 95%

y $p < 0,01$ para intervalos de confianza de 99% señalaron diferencias estadísticamente significativas en los cambios de patrones de la temperatura de los periodos estudiados (basado en Jarrín, 2016).

Según el análisis de resultados, se puede indicar que existe diferencias estadísticamente significativas en los valores de temperatura de los índices SU25, TR20, TN_x, TN10p, TX10p, TN90p, TX90p y WSDI en Asunción y de los índices SU25, TR20, TX_x, TN_x, TNn, TN10p, TX10p, TN90p, TX90p, WSDI y DTR en Encarnación, lo cual demuestra un aumento general de las temperaturas.

Los demás índices (FD, TX_n, CSDI) no fueron considerados como válidos por no contar con los criterios de significancia estadística aceptados para esta investigación; por lo tanto, fueron descartados del análisis. Como menciona Jarrín (2016), esto puede deberse a vacíos de información presente en datos históricos de las series estudiadas.

Capítulo 5

Conclusión

En cuanto a la temperatura media anual, los resultados demostraron la existencia de cambios en los patrones de temperatura del periodo reciente (1991-2019) comparado al periodo base (1961-1990) en los dos sitios de estudio. En Asunción la diferencia entre temperatura media anual del periodo reciente en relación al periodo base fue de 0,62 °C, mientras que en Encarnación la diferencia fue de 0,84 °C.

Los resultados de la temperatura máxima media anual demostraron la existencia de cambios en los patrones de temperatura del periodo 1990-2019 comparado al periodo base (1961-1990) en la ciudad de Asunción, con una diferencia de 0,71 °C.

Los resultados de la temperatura mínima media anual demostraron cambios en los patrones de temperatura del periodo 1990-2019 comparado al periodo base (1961-1990) en la ciudad de Encarnación, con una diferencia de 0,97 °C.

Los análisis de los resultados de los índices climáticos demostraron claramente un incremento de la temperatura y de cantidad de días con aumento de temperatura. Los índices relacionados a bajas temperaturas como días fríos (TX10p) y noches frías (TN10p) resultaron mostrar una tendencia decreciente; por lo tanto, se presume que estos resultados **demostraron la presencia del cambio climático**. Cabe resaltar que, los índices que no demostraron significancia estadística corresponden a aquellos relacionados a días con heladas y periodos fríos.

Éste estudio permitió conocer el comportamiento de la temperatura en el periodo de estudio. Se observa un aumento de la temperatura en el periodo de estudio lo que plantea la necesidad de ahondar esfuerzos en los planes de mitigación y adaptación al cambio climático, buscando las mejores estrategias para hacer frente a los riesgos resultantes de estos cambios.

5.1 Limitaciones e implicancias de la investigación

Como todo trabajo de investigación, esta tesis tiene limitaciones, al tratarse de datos de estaciones meteorológicas, muchas veces existen fallas en las mismas. Cabe mencionar la existencia de datos faltantes de algunos días para los dos sitios de estudio, y en particular todo el año 1965 de la ciudad de Encarnación. Por lo tanto, este estudio tampoco se ve ajeno a algún nivel de incertidumbre. Los resultados se dan reconociendo que están sujetas a probabilidades científicas. La incertidumbre científica generalmente significa que hay un rango de valores posibles dentro del cual se encuentra el verdadero valor de la medición. La investigación adicional sobre un tema o teoría puede reducir el nivel de incertidumbre o el rango de valores posibles. En este estudio se reconoce que futuros trabajos pueden buscar mayor precisión con nuevas metodologías de control, filtración y síntesis (generación de datos sintéticos) de datos, así como de fuentes alternativas de datos, como los satelitales.

Como evaluación técnica, los incrementos de la temperatura con los años demuestran el compromiso que existe en incluir al cambio climático como eje transversal en las políticas públicas.

A partir de esta investigación surgen interrogantes como cuál es el comportamiento de las precipitaciones en las áreas y periodos de análisis, y qué relación existe con el Fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS), los cuales podrían ser abordados en próximos estudios.

Los hallazgos del estudio coinciden en general con Belmonte (2017), Cordeiro et al. (2016) y Silva et al. (2015). Estos autores encontraron que, en la región, el primero en Anguil, región central de Argentina, los segundos en Rio Grande do Sul, Brasil y los últimos, en el estado del Paraná, Brasil, existe un aumento de la temperatura y otros índices.

Belmonte (2017), encontró en el periodo evaluado (1961-2016) tendencias anuales positivas en la cantidad de noches cálidas y tropicales, periodos calientes y temperatura mínima diaria. Tendencias negativas se encontraron en cantidad de días con heladas y noches frías, en amplitud térmica diaria, y en cantidad de días secos consecutivos. Características que atribuye al cambio climático como el incremento de temperatura.

Los resultados de Cordeiro et al. (2016) en cuanto a las tendencias climáticas del periodo 1950-2009 en Rio Grande do Sul, Brasil, mostraron una tendencia creciente de la temperatura mínima y temperatura media en las cuatro estaciones del año y en el caso anual, a excepción de

la temperatura máxima en el verano, que mostró una tendencia decreciente. La tendencia creciente de las temperaturas mínima, máxima y media fue más débil en invierno y más fuerte en primavera. La temperatura mínima del aire fue la que mostró una tendencia ascendente más fuerte, ejerciendo una gran influencia en la tendencia a aumentar la temperatura promedio del aire. Las tendencias observadas están relacionadas con el fenómeno de la Oscilación del Sur de El Niño (ENOS), **especialmente su clima cálido**. Sin embargo, mencionan que también son consistentes con el aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera y con el calentamiento global y regional del sistema climático.

Silva et al. (2015), señalaron que los resultados de los indicadores asociados con la temperatura indicaron un patrón generalizado de calentamiento estadísticamente significativo en casi todo el estado de Paraná. El porcentaje de días y noches calurosos en el Estado aumentó significativamente a una tasa de 0.1 a 0.4%/año entre 1976 y 2010. Las temperaturas medias mínimas y máximas anuales indicaron un aumento en casi todo Paraná de + 0.02 ° C/año durante el año en el mismo periodo. Los indicadores de temperatura mínima mostraron tendencias crecientes más significativas que la temperatura máxima.

Aunque los valores o magnitud del aumento hallado por estos autores no hayan coincidido exactamente con lo hallado en esta investigación, las tendencias son similares en sus estudios, indicando que este aumento se está dando en toda la región.

Los aumentos de calor tienen efectos negativos en la salud humana, salud animal, producción o rendimientos agrícolas, infraestructura, economía y otras áreas. Los mecanismos de adaptación, así como la gestión de riesgo no es tarea solo para el futuro distante, sino que ya se debe dar, en toda la sociedad, desde ahora. A través de una participación integral incluyendo una mesa de trabajo multidisciplinaria para orientar los esfuerzos a cada ámbito desfavorecido por el cambio climático.

Referencias Bibliográficas

- Belmonte, M. L., 2017: Thermal and pluviometric indicators of climate change in Anguil: trends of the period 1961-2016 RADA VIII: 29-42
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., Franke, A. E., Silveira, R. B., Alves, M. P., 2020: The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. *International Journal of Climatology*, 40(4), 2464-2478.
- Brücker, G., 2005: Poblaciones vulnerables: las lecciones de la ola de calor del verano de 2003 en Europa. *Eurosurveillance*, 10(7), 1-2.
- CEPAL, 2014: La economía del cambio climático en el Paraguay (LC/W.617), Santiago de Chile. 108 págs.
- Conde-Álvarez, C., Saldaña-Zorrilla, S., 2007: Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 23(2), 23-30.
- Cordeiro, A. P. A., Berlato, M. A., Fontana, D. C., Alves, R. D. C. M., 2016: Tendências climáticas das temperaturas do ar no estado do Rio Grande do Sul, Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(03), 868-880.
- DGEEC, 2016: Atlas demográfico del Paraguay, 2012. Fernando de la Mora, Paraguay, 133 págs.
- Ely, D. F., Fortin, G., 2020: Trend analysis of extreme thermal indices in south Brazil (1971 to 2014). *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3), 1045-1056.
- Gürkan, H., Eskioğlu, O., Yazici, B., Şensoy, S., Kömüştü, A. Ü., Çalik, Y., 2017: Projected trends in heat and cold waves under effect of climate change. In 8th Atmospheric Sciences Symposium-ATMOS2017 (pp. 111-122).
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P., 2014: Metodología de la Investigación 6 Edición (Vol. 5ta Edición). Perú: MC Graw Hill.
- Honty, G., 2007: América Latina ante el cambio climático. *América Latina*, 12 págs.

- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- IPCC, 2014: Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141.
- IPCC, 2018: Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].
- IPCC, 2019: Resumen para responsables de políticas. En: El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. En prensa.
- Jarrín, F., 2016: Análisis de índices climáticos a partir de datos instrumentales meteorológicos para determinación de cambio climático en las demarcaciones hidrográficas Guayas y Manabí, <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/93594/d-cd102189.pdf>
- Jarrín Pérez, F. X, 2016: Análisis de Índices Climáticos a Partir de Datos Instrumentales Meteorológicos Para Determinación de Cambio Climático en las Demarcaciones Hidrográficas Guayas y Manabí (Bachelor's thesis, Espol).

- Organización Meteorológica Mundial, 2019: Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2018, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5845
- Quiroz, M. C., 2011: Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México, <https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/BOLETINES/hidroclimatico/INDICES-CLIMATICOS.pdf>
- Pasten, A. M., 2007: Análisis de eventos meteorológicos extremos en el Paraguay. Facultad Politécnica, Universidad nacional de Asunción.
- Pastén, A. M., 2009: Caracterización de la sequía en Paraguay usando el índice estandarizado de Presentación (IEP). San Lorenzo, Paraguay: Universidad Nacional de Asunción – DGICT
- Pastén, M., González, V., Espínola, C., 2011: Clasificación climática del Paraguay utilizando los métodos de Köppen y Thornthwaite.
- Peterson, T. C., 2005: Índices de cambio climático. Boletín-Organización Meteorológica Mundial, 54(2), 83-86.
- Rusticucci, M., Kysely, J., Almeida, G., Lhotka, O., 2016: Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4), 679-689.
- Salazar, J. T., 2017: *Climate Change, Heat Waves, and Human Health*. The University of Arizona.
- Secretaría de Emergencia Nacional, 2018: “Atlas de Riesgos de la República del Paraguay”.
- STP/DGEEC, 2014: Paraguay. Proyección de la población por sexo y edad, según distrito, 2000-2025, <https://www.datos.gov.py/dataset/paraguay-proyecci%C3%B3n-de-la-poblaci%C3%B3n-por-sexo-y-edad-seg%C3%BAn-distrito-2000-2025>
- Luiz Silva, W., Dereczynski, C. P., Chang, M., Freitas, M., Machado, B. J., Tristão, L., Ruggeri, J., 2015: Observed trends in climate extreme indicators of temperature and precipitation in the state of Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(2), 181-194.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Miller, H., 2007: IPCC fourth assessment report (AR4). Climate change.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos,

- J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Resumen Técnico. En: Cambios Climáticos 2007: Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos.
- UN, 1992: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). FCCC/INFORMAL/84. Nueva tirada por razones técnicas. GE.05--62301 (S) 220705 220705.
- Vincent, L. A., Peterson, T. C., Barros, V. R., Marino, M. B., Rusticucci, M., Carrasco, G., Grimm, A. M., 2005: Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *Journal of climate*, 18(23), 5011-5023.
- Villaruel Jiménez, C. P., 2013: Eventos extremos de precipitación y temperatura en Chile: proyecciones para fines del siglo XXI.
- World Meteorological Organization, 2008b: Guide to meteorological instruments and methods of observation, 7nd ed. Pt. 1 chap. 2
- World Meteorological Organization, 2017: WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals.
- Zhang, X., Yang, F., Santos, J. L., 2004: RCLimDex (1.0). Manual del usuario. Climate Research Branch Environment Canada. Versión en español: Santos, JL CIIFEN



La maestría “Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio Climático” es cofinanciada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - CONACYT con recursos del FEEL.