

Caballero C.P., Fernández Long M.E.. Aproximaciones al cambio climático: tendencias históricas en Paraguay. Rev. Soc. cient. Parag. 2023; 28(2): 370-395.
<https://doi.org/10.32480/rscp.2023.28.2.370>
Recibido: 30/06/2023. Aceptado: 21/09/2023.
Editor Responsable: Nérida Soria

ARTÍCULO DE REVISION
REVIEW ARTICLE

Aproximaciones al cambio climático: tendencias históricas en Paraguay

Approaches to climate change: historical trends in Paraguay

Claudia Patricia Caballero Chávez ¹ , María Elena Fernández Long ² 

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina.

Autor correspondiente: claucaballeropy@gmail.com

RESUMEN: El Cambio Climático se plantea como uno de los desafíos más urgentes que enfrenta la humanidad a nivel global, siendo una problemática compleja que implica desiguales consecuencias. Se observan aumentos y disminuciones de la temperatura en muchas regiones del mundo. Estos cambios climáticos podrían afectar significativamente en los sistemas naturales y la vida humana en los países menos desarrollados. El principal objetivo del presente trabajo fue analizar las tendencias históricas de la temperatura del aire (1960-2018) en Paraguay. Para analizar las posibles variaciones de la tendencia se aplicaron dos pruebas estadísticas no paramétricas (pendiente de Sen y Mann-Kendall). Los resultados muestran aumentos significativos de las temperaturas anuales en gran parte de las estaciones meteorológicas analizadas con un nivel de confianza de 99%.

Palabras clave: temperatura media, temperatura máxima media, temperatura mínima media, Mann-Kendall, Sen.



ABSTRACT: Climate Change is considered one of the most urgent challenges facing humanity at a global level, being a complex problem that implies unequal consequences. Increases and decreases in temperature are observed in many regions of the world. These climatic changes could significantly affect natural systems and human life in less developed countries. The main objective of this work was to analyze the historical trends of average air temperature (1960-2018) in Paraguay. To analyze the possible variations of the trend, two non-parametric statistical tests (Sen and Mann-Kendall slope) were applied. The results show significant increases in the annual temperature in most of the weather stations analyzed with a confidence level of 99%.
Keywords: mean temperature, mean maximum temperature, mean minimum temperature, Mann-Kendall, Sen.

INTRODUCCIÓN

El Cambio Climático se plantea como uno de los desafíos más urgentes que enfrenta la humanidad a nivel global desde el siglo pasado ^(1-4.) siendo una problemática extremadamente compleja ya que se entrelaza con muchas cuestiones que abarca a la física del sistema climático, el desarrollo económico, las políticas internacionales, las amenazas a la diversidad de la vida del planeta y sus desiguales consecuencias sociales, ambientales y económicas ^(2, 5).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1 define el cambio climático como “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 observada durante períodos de tiempo comparables” ⁽⁶⁾. La CMNUCC distingue entre “cambio climático” atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y “variabilidad climática” atribuida a causas naturales. Entre las evidencias del cambio climático son los cambios graduales en la temperatura que van transformado lenta y progresivamente el clima de una región.

Desde el comienzo de la segunda mitad del siglo XX, se han registrado aumentos sistemáticos en las temperaturas a escala global ⁽⁷⁾. De acuerdo con el último reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) los cambios recientes en todo el sistema climático y el estado actual del clima no tienen precedentes

durante muchos siglos o miles de años ⁽⁸⁾. La temperatura global seguirá aumentando hasta al menos mediados de siglo, se estima que la temperatura global llegue o supere los 1,5°C durante el siglo XXI a menos que se produzcan reducciones drásticas del dióxido de carbono (CO₂) y otras emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas ⁽⁸⁾.

Para la detección del cambio climático, las tendencias históricas de la temperatura del aire han recibido considerable atención en las últimas décadas a medida que ha aumentado el interés en la adaptación a escala local o regional y las estrategias de mitigación a posibles cambios futuros en el clima, existen numerosos estudios a nivel internacional ⁽⁹⁻¹⁸⁾, Latinoamérica ⁽¹⁹⁻²⁷⁾ y algunos estudios en Paraguay ⁽²⁸⁻³⁰⁾.

Las tendencias señalan el cambio sistemático y continuo sobre una muestra de información, indicando tendencias positivas o negativas de las variables climáticas. A efectos de la investigación, se utilizaron dos métodos no paramétricos, la prueba estadística de Mann-Kendall ^(31, 32) y el estimador de la pendiente de Sen ⁽³³⁾ para la detección de las tendencias de la temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima.

El objetivo del estudio fue analizar las tendencias históricas de la temperatura del aire (1960-2018) en Paraguay. La hipótesis planteada es que los valores de temperatura del aire en Paraguay han experimentado cambios durante el período 1960-2018, influenciado por el cambio climático.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos históricos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima, y temperatura media brindados por el Departamento de Banco de Datos de la Dirección de Meteorología e Hidrología de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DMH-DINAC). Respecto a los datos de la estación meteorológica de Formosa, fueron brindados por el Servicio Meteorológico Nacional Argentino.

Para el presente estudio se analizaron 14 estaciones meteorológicas, sin embargo, se tuvieron en cuenta solo 9 debido a que el resto de las estaciones cuentan con registros cortos o han tenido interrupciones en el tiempo y, por lo tanto, fueron descartadas para los objetivos perseguidos en esta investigación. En la Tabla 1, así como en la Figura 1, se observa la información de las 9 estaciones meteorológicas utilizadas. Los registros históricos superan los 40 años con menos del 10% de datos faltantes en todos los casos.

Tabla 1: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

N° de OMM	Estación Meteorológica	Altitud (msnm)	Longitud (°W)	Latitud (°S)
86218	Asunción, Aeropuerto Internacional Silvio Petirosi, Paraguay	83	57° 30' 53,1"	25° 14' 9,99"
86268	Caazapá, Departamento de Caazapá, Paraguay	142	56° 21' 16,9"	26° 10' 31,7"
86248	Ciudad del Este, Departamento de Alto Paraná, Paraguay	196	54° 36' 0"	25° 32' 0"
86134	Concepción, Departamento de Concepción, Paraguay	75	57° 25' 48,7"	23° 26' 29,5"
86255	Pilar, Departamento de Ñeembucú, Paraguay	58	58° 19' 6,18"	26° 52' 52,5"
86233	Villarrica, Departamento del Guairá, Paraguay	163	56° 26' 16,5"	25° 45' 14,9"
87162	Formosa, Argentina	60	58° 10' 0"	26° 12' 0"
86260	San Juan Bautista Misiones, Departamento de Misiones	131	57° 8' 2,9"	26° 40' 13"
86297	Encarnación, Departamento de Itapúa	90	55° 53' 46,8"	27° 18' 14,7"

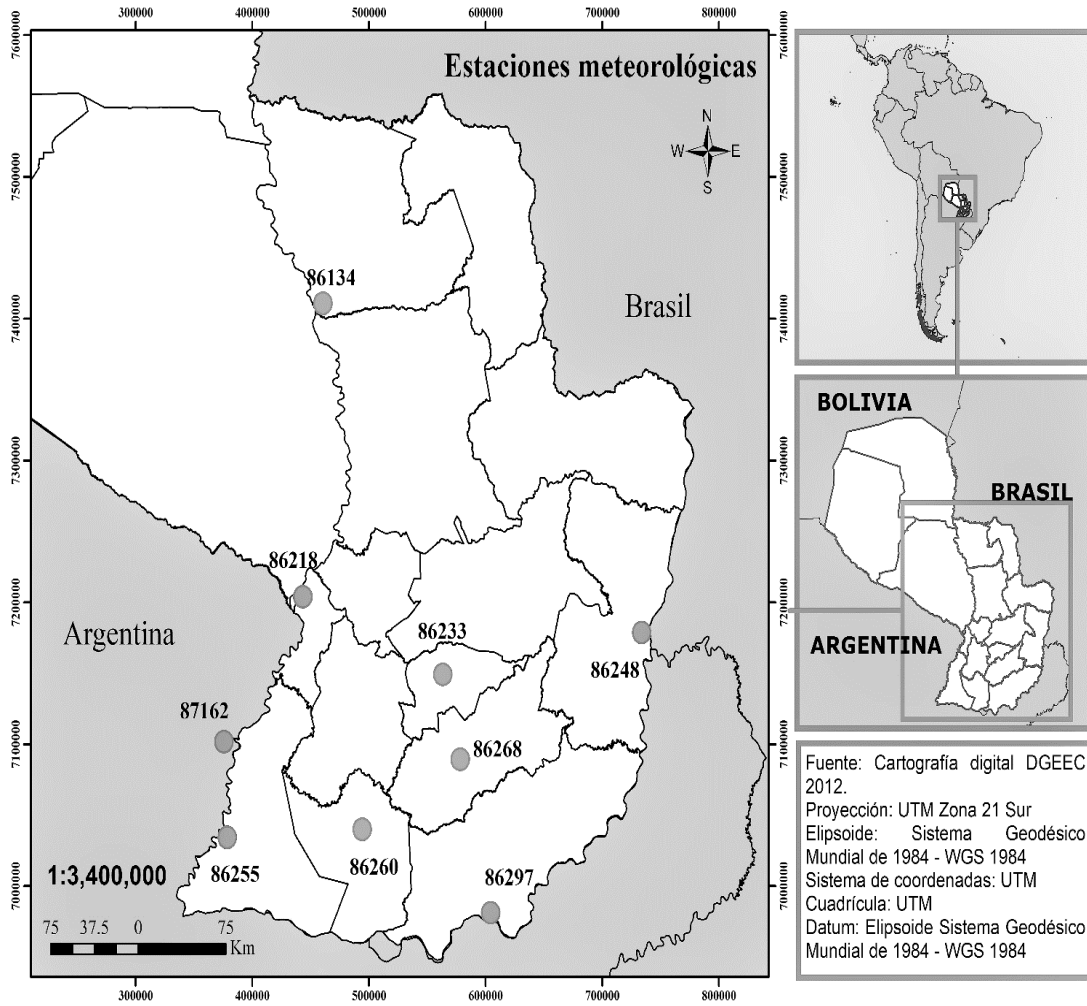


Figura 1: Distribución de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

1.1 Parámetros climáticos utilizados

Temperatura media

La temperatura media mensual corresponde al promedio de todas las temperaturas medias diarias del mes, mientras que la temperatura media anual es el promedio de las doce temperaturas medias mensuales. El cálculo de la temperatura media diaria para Formosa corresponde a la suma de las temperaturas máxima y mínima registradas en un día dividido por dos.

En Paraguay, la estadística climatológica mensual que publica la DMH, es calculada a partir de los promedios diarios obtenidos de las medias aritméticas de los valores observados a las 06; 09; 15 y 21 horas local en el verano y, 05; 08; 14 y 20 horas local en el invierno (correspondientes a las 09, 12, 18 y 24 UTC). Anteriormente, se realizaban los cálculos de medias con sólo tres observaciones diarias ⁽³⁵⁾. A partir de 1971, se introduce una observación horaria más en la ecuación, a las 05 horas local en invierno y a las 06 horas local en verano y las mismas son utilizadas para aumentar la muestra de las temperaturas horarias. Sin embargo, no se han aplicado el factor de corrección a ambas formas de cálculo de las medias, por lo tanto, los resultados de la fórmula anterior pueden ser diferentes a la fórmula actual ⁽²⁸⁾. Por lo cual, para fines del presente estudio, los datos históricos de la temperatura media de Paraguay fueron utilizados a partir de 1971.

Temperatura máxima media

La temperatura máxima media mensual refiere al promedio de las temperaturas máximas diarias registradas en el mes correspondiente. Por su parte, la temperatura máxima media anual es el promedio de las máximas medias mensuales de cada año.

Temperatura mínima media

La temperatura mínima media mensual se calcula tomando el promedio de todas las temperaturas mínimas diarias del mes correspondiente. La mínima media anual es el promedio de todas las mínimas medias mensuales de cada año.

1.2 Tendencias climáticas

Test de Mann-Kendall

Uno de los test no-paramétricos más utilizados en la detección de tendencias ha sido el test de Mann-Kendall ^(31, 32), sugerido para evaluar la tendencia en series de datos ambientales, climáticos o hidrológicos. El test de Mann-Kendall indica una tendencia en una serie de tiempo sin especificar si la tendencia es lineal o no lineal ⁽³⁶⁾.

Kendall propuso una medida *tau* para medir la fuerza de la relación entre dos variables ⁽³⁷⁾. Mann sugirió utilizar la prueba para la significación de *tau* de Kendall, donde una de las variables es el tiempo como prueba de tendencia ⁽³¹⁾. La prueba es conocida como el test de Mann-Kendall, para comprobar si la tendencia está aumentando, disminuyendo o si no existe una tendencia de cambio. Bajo la hipótesis nula H_0 , de que una serie $\{x_1, \dots, x_N\}$ proviene de una población donde las variables aleatorias son independientes y están distribuidas de manera idéntica, el test estadístico de Mann-Kendall es:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i), \text{ donde } \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{si } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{si } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{si } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Si el estadístico S es positivo se infiere de forma subjetiva que la tendencia de la serie es creciente, mientras que si S es negativo hay una tendencia decreciente o de disminución.

El estadístico *tau*, nos indica el signo (positivo o negativo) de la tendencia, y su intensidad. Cuando los valores se alejan de cero, estaríamos ante la existencia de una tendencia, positiva si los valores son positivos y negativa si los valores son negativos.

Sin embargo, si hay valores iguales en la serie, se puede ver afectada la validez de la prueba. Para la situación en la que puede haber empates, es decir, valores iguales de x ($\text{sgn}(x_j - x_i) = 0$), Kendall demostró que la varianza de S , $\text{Var}(S)$ es dada por ⁽³²⁾:

$$\text{Var}(S) = [N(N - 1)(2N + 5) - \sum_{i=1}^m t_i (t_i - 1)(2t_i + 5)]/18 \quad (2)$$

Donde m es el número de grupos de medidas iguales y t_i es el número de datos en el grupo i -ésimo.

La estadística de la prueba estandarizada Z_s se calcula para probar la hipótesis ⁽³⁸⁾:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

A partir del estadístico Z_s se evalúa la hipótesis de interés, que puede ser:

H_0 : No hay tendencia vs. H_1 : Hay tendencia decreciente

H_0 : No hay tendencia vs. H_1 : Hay tendencia creciente

Cuando Z_s es $-1,96 \leq Z_s \leq 1,96$, se acepta la hipótesis nula (H_0), lo que indica que no hay una tendencia significativa. La tendencia es significativa al nivel de confianza del 95% si $|Z_s| > 1,96$ y al nivel de confianza del 99% si $|Z_s| > 2,58$. Valores negativos (positivos) de Z_s indican tendencias negativas (positivas) de la variable analizada, y los niveles de significación α pueden ser computados. En este estudio, para expresar los niveles de significación, se utilizó la siguiente convención: ** y * según sea $\alpha=0,01$, $\alpha=0,05$ respectivamente.

Estimación de la pendiente de Sen

El estimador de la pendiente de Sen corresponde a un método no paramétrico robusto que cuantifica la tendencia como cambio por unidad de tiempo en una serie, cuando existe en ella tendencia y tiene ciertas ventajas como el hecho de permitir valores faltantes o que la muestra no se debe ajustar a una distribución en particular ⁽³⁹⁾.

El método de Sen se puede utilizar en casos en que la tendencia puede ser asumida como lineal ⁽³³⁾, por ejemplo:

$$f(t) = B + Q * t \quad (4)$$

Donde Q es la pendiente, B es una constante y t es el tiempo. Para obtener la estimación de Q, primero se calculan todas las pendientes considerando los pares de datos N mediante la siguiente ecuación:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ For } i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

Donde x_j y x_k son los valores de los datos en los momentos j y k ($j > k$), respectivamente. Si hay n valores en la serie de tiempo habrá tantos como $N = n(n-1) / 2$ pendientes estimadas Q_i . La mediana de los N valores es el estimador de la pendiente de Sen.

Los valores de N de Q_i se clasifican del más pequeño al más grande y la mediana de la pendiente o el estimador de la pendiente de Sen se calcula como $Q_{med} = Q_{[(N+1)/2]}$ si N aparece impar, y se considera como $Q_{med} = Q_{(N/2)} + Q_{[(N+2)/2]} / 2$ si N aparece par. Un valor positivo de Q_i indica una tendencia ascendente o creciente y un valor negativo de Q_i señala una tendencia descendente o decreciente en la serie temporal.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Temperatura media

Gran parte de las localidades presentaron tendencias positivas, a excepción de Pilar donde se registró una tendencia negativa. De acuerdo con el test estadístico de Mann-Kendall, las temperaturas medias anuales del aire de 7 estaciones meteorológicas (Asunción, Caazapá, Ciudad del Este, Concepción, Villarrica, Formosa y Encarnación), mostraron tendencias positivas con un nivel de significancia de 0,01 ($|Z_s| > 2,58$). En San Juan Bautista, la tendencia fue positiva, aunque no significativa ($1,96 > Z_s = 0,98$). En Pilar, se observó una tendencia a la disminución ($-0,06^\circ\text{C}/\text{década}$) no significativa ($-1,96 < Z_s = -0,98$). La temperatura media del aire a escala anual se ha vuelto más cálida durante los períodos analizados ($0,19^\circ\text{C}/\text{década}$), los mayores aumentos significativos se registraron en el sureste de la región, en Caazapá ($0,41^\circ\text{C}/\text{década}$), Ciudad del Este ($0,40^\circ\text{C}/\text{década}$), Villarrica ($0,23^\circ\text{C}/\text{década}$) y Encarnación ($0,20^\circ\text{C}/\text{década}$) (Tabla 2).

La tendencia al calentamiento de la temperatura media anual del aire durante el periodo analizado concuerda con la tasa de calentamiento global de $0,19^\circ\text{C}/\text{década}$ ⁽⁴⁰⁾. La temperatura media anual ha incrementado aproximadamente $0,84^\circ\text{C}$, coincidiendo con el aumento de la temperatura a escala global ⁽⁷⁾, a nivel continental, con el incremento en América Central y América del Sur ($0,7^\circ\text{C}$ a 1°C en 40 años desde mediados de la década de los 70) ⁽⁴¹⁾ y, a nivel regional, con el aumento de la temperatura media anual en el Sureste de América del Sur ($0,6^\circ\text{C}$ a $0,8^\circ\text{C}$ para el periodo 1976-2000) ^(42, 43).

Este estudio se corresponde con estudios previos que reportaron un aumento de la temperatura media en casi todas las estaciones meteorológicas analizadas en Paraguay ^(29, 30). En Argentina, en gran parte del territorio, considerando el periodo 1960 y 2010, los aumentos fueron entre $0,5^\circ\text{C}$ y 1°C aproximadamente ^(20, 2), aunque ciertas regiones presentaron menores valores, por ejemplo, en la Región Pampeana Argentina con $0,4^\circ\text{C}$ ⁽⁴⁴⁾. En Uruguay el incremento de la temperatura media anual fue de $0,5^\circ\text{C}$ teniendo en cuenta el periodo 1961 al 2005 ⁽⁴⁵⁾ y en gran parte del territorio brasileño se observaron aumentos de la temperatura media anual ⁽⁴⁶⁾, en el sur de Brasil el incremento fue de $0,58^\circ\text{C}$ considerando el periodo 1950 al 2010 ⁽²⁷⁾.

A nivel mensual, los menores cambios se presentaron en los valores negativos de mayo y julio (-0,02°C/década), donde todas las estaciones meteorológicas analizadas señalaron cambios no significativos. Por otro lado, los valores positivos que presentaron mayores cambios fueron en abril (0,40°C/década), agosto (0,41°C/década) y octubre (0,37°C/década), donde gran parte de las estaciones meteorológicas presentaron tendencias positivas significativas (Tabla 2).

En concordancia con los resultados en la Región Pampeana Argentina, donde se observaron los menores cambios en mayo y julio, y los mayores en octubre y agosto (44).

Tabla 2: Tendencias de las temperaturas medias (°C/década) para las 9 estaciones meteorológicas analizadas y para el promedio regional.

Estación meteorológica	Meses												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Asunción	0,15 *	0,16 no	0,04 no	0,29 *	-0,13 no	0,09 no	-0,07 no	0,42 *	0,37 no	0,36 **	0,14 no	0,24 *	0,16 **
Caazapá	0,32 **	0,37 **	0,22 no	0,61 **	0,23 no	0,34 no	0,15 no	0,54 **	0,61 **	0,48 **	0,34 **	0,24 *	0,40 **
Ciudad del Este	0,37 **	0,09 no	0,41 **	0,79 **	0,04 no	0,76 **	0,19 no	0,66 *	0,31 no	0,72 **	0,47 **	0,49 **	0,41 **
Concepción	0,16 *	0,08 no	0,05 no	0,32 *	-0,09 no	0,16 no	0,00 no	0,46 *	0,40 *	0,43 *	0,11 no	0,27 **	0,16 **
Pilar	-0,11 no	-0,10 no	-0,12 no	0,06 no	-0,25 no	-0,14 no	-0,25 no	0,07 no	0,03 no	0,04 no	-0,03 no	-0,06 no	-0,06 no
Villarrica	0,10 no	0,12 no	0,06 no	0,46 **	0,06 no	0,30 no	0,05 no	0,44 *	0,36 no	0,43 **	0,21 *	0,29 **	0,23 **
Formosa	0,21 **	0,12 no	0,11 no	0,28 **	-0,17 no	0,04 no	-0,11 no	0,34 no	0,23 no	0,29 **	0,11 no	0,19 no	0,15 **
San Juan Bautista	0,01 no	-0,03 no	-0,05 no	0,27 no	-0,01 no	0,10 no	-0,06 no	0,46 *	0,26 no	0,22 no	0,06 no	-0,10 no	0,05 no
Encarnación	0,09 no	0,13 no	0,14 no	0,53 **	0,15 no	0,18 no	-0,09 no	0,33 no	0,31 no	0,36 **	0,20 no	0,20 no	0,20 **
Promedio	0,14	0,10	0,10	0,40	-0,02	0,20	-0,02	0,41	0,32	0,37	0,18	0,20	0,19

*estadísticamente significativo con un 95% de confianza, **estadísticamente significativo con un 99% de confianza y no: no significativo.

2.2 Temperatura mínima media

Las temperaturas mínimas medias anuales se han vuelto significativamente más cálidas en la mayor parte de las estaciones meteorológicas analizadas. La variación espacial de la temperatura mínima media anual, donde 7 estaciones meteorológicas (Asunción, Caazapá, Ciudad del Este, Concepción, Villarrica, San Juan Bautista y Encarnación), mostraron tendencias positivas significativas, con un nivel de confianza del 99% ($p < 0,01$), en Formosa, la tendencia fue positiva, aunque no significativa ($Z_s = 1,92 < 1,96$). Por otro lado, en Pilar, se observó una tendencia decreciente, aunque estadísticamente no significativa ($-1,96 < Z_s = -0,67$). La temperatura mínima media anual del aire varió espacialmente y osciló entre $-0,05^\circ\text{C}/\text{década}$ (Pilar) y $0,66^\circ\text{C}/\text{década}$ (Ciudad del Este).

En la Tabla 3, puede observarse el aumento promedio de la temperatura mínima anual en gran parte de las localidades, el incremento en la región fue de $0,25^\circ\text{C}/\text{década}$. Los aumentos más elevados de la temperatura mínima media fueron observados en Ciudad del Este ($0,66^\circ\text{C}/\text{década}$), Caazapá ($0,43^\circ\text{C}/\text{década}$) y Encarnación ($0,36^\circ\text{C}/\text{década}$) (Tabla 3). Las estaciones meteorológicas que exhiben tendencias positivas y significativas para las temperaturas mínimas medias anuales muestran tasas de calentamiento que varían entre $0,7$ y $2,7^\circ\text{C}$.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el sur de Brasil, el estado de Paraná, que linda con el este del país, donde se registraron aumentos de la temperatura mínima media anual entre $0,7$ y $2,1^\circ\text{C}$, para el periodo 1961-2011 ⁽⁴⁷⁾. Asimismo, en el sur de Brasil, en el estado de Río Grande del Sur, se hallaron aumentos significativos en la temperatura mínima media anual de $1,6^\circ\text{C}$ (1960-2002) ⁽⁴⁸⁾.

En la región húmeda de Argentina (comprendida por las provincias de Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires), el aumento de la temperatura mínima media anual fue significativa e indicó un incremento de $0,7^\circ\text{C}$ para el periodo 1950-2010 ⁽²⁰⁾. En el noroeste de Argentina, el incremento fue incluso mayor, se registró un

aumento significativo de la temperatura mínima media anual, que osciló entre 2 y 3,6 °C para el periodo 1960-2007 ⁽²²⁾. En la Región Pampeana se observó un aumento promedio de 2,0°C, para el período 1925-2007 ⁽⁴⁴⁾.

En Colombia y Venezuela, se registraron tendencias de incremento de la temperatura mínima media en gran parte del territorio, con magnitudes significativas que varían entre 0,46 y 1,60°C ⁽⁴⁹⁾.

Todos estos resultados, están en concordancia con los obtenidos en el sur de Sudamérica y en la Región Oriental de Paraguay en particular para el periodo 1960-2000 ⁽⁹⁾, donde se hallaron aumentos significativos en la ocurrencia de noches cálidas y disminución de noches frías, condiciones que determinan un aumento en la temperatura mínima, en coincidencia con estudios globales en más regiones del mundo, lo cual modificó la amplitud térmica ⁽⁵⁰⁾, con tendencia a la disminución de la misma ⁽¹¹⁾.

A nivel mensual, el menor cambio se presentó en julio (-0,01°C/década), donde la mayoría de las estaciones meteorológicas analizadas señalaron tendencias negativas (Asunción, Caazapá, Pilar, Formosa y Encarnación), aunque no llegaron a ser significativas, presentaron un comportamiento diferente al resto del año. Por otro lado, los valores positivos que presentaron mayores cambios fueron en abril (0,43°C/década), y en octubre (0,47°C/década), donde todas las estaciones presentaron aumentos significativos a excepción de Pilar que no alcanzó un nivel de significancia (Tabla 3).

En concordancia con los registros en la Región Pampeana, donde se observaron los menores cambios en julio, y los mayores en octubre y abril ⁽⁴⁴⁾. Asimismo, en el noroeste de Argentina, se registraron los mayores cambios en el mes de octubre ⁽²²⁾.

Tabla 3: Tendencias de las temperaturas mínimas medias (°C/década) para las 9 estaciones meteorológicas analizadas y para el promedio regional.

Estación meteorológica	Meses												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Asunción	0,24 **	0,18 *	0,20 *	0,36 **	0,07 no	0,11 no	-0,13 no	0,09 no	0,17 no	0,40 **	0,24 *	0,26 **	0,12 **
Caazapá	0,47 **	0,47 **	0,24 no	0,64 **	0,28 no	0,33 no	-0,03 no	0,31 no	0,58 *	0,65 **	0,56 **	0,54 **	0,43 **
Ciudad del Este	0,70 **	0,22 *	0,56 **	0,89 **	0,35 no	0,99 **	0,50 no	0,79 **	0,62 **	0,89 **	0,65 **	0,74 **	0,66 **
Concepción	0,22 **	0,15 **	0,14 no	0,35 **	0,04 no	0,22 no	0,03 no	0,20 no	0,13 no	0,45 **	0,23 *	0,26 **	0,18 **
Pilar	0,04 no	0,04 no	-0,08 no	0,08 no	-0,22 no	-0,05 no	-0,30 no	-0,08 no	-0,16 no	0,08 no	0,01 no	0,10 no	-0,05 no
Villarrica	0,37 **	0,22 **	0,25 **	0,45 **	0,18 no	0,26 no	0,05 no	0,24 no	0,15 no	0,48 **	0,33 **	0,37 **	0,27 **
Formosa	0,23 *	0,11 no	0,01 no	0,29 *	-0,21 no	0,17 no	-0,17 no	0,15 no	0,11 no	0,39 **	0,11 no	0,25 **	0,13 no
San Juan Bautista	0,10 no	0,06 no	0,10 no	0,25 *	0,08 no	0,24 no	0,00 no	0,38 **	0,25 *	0,32 *	0,08 no	0,06 no	0,15 **
Encarnación	0,36 **	0,28 *	0,21 *	0,58 **	0,29 no	0,36 *	-0,04 no	0,34 no	0,30 no	0,55 **	0,37 **	0,46 **	0,36 **
Promedio	0,30	0,19	0,18	0,43	0,09	0,29	-0,01	0,27	0,24	0,47	0,29	0,34	0,25

*estadísticamente significativo con un 95% de confianza, **estadísticamente significativo con un 99% de confianza y no: no significativo.

2.3 Temperatura máxima media

Se identificó una tendencia al calentamiento de la temperatura máxima media anual del aire en toda la región. Esta tendencia positiva fue significativa de acuerdo con el test estadístico de Mann-Kendall, alcanzando un nivel de significancia de 0,01 ($|Z_s| > 2,58$).

Las tasas crecientes de temperatura máxima anual variaron espacialmente, donde los mayores aumentos se registraron en Caazapá (0,39°C/década), Concepción (0,28°C/década) y Ciudad del Este (0,26°C/década) durante los períodos analizados. En la Tabla 4, puede observarse que, la temperatura máxima anual, registró un aumento promedio en la región de 0,22 °C/década.

Este estudio se corresponde con estudios previos que reportaron un aumento de los días cálidos en casi todas las localidades del territorio paraguayo para el periodo 1960 – 1990 ⁽⁵¹⁾.

Las temperaturas máximas que presentan tendencias positivas y significativas varían entre 0,8 y 1,8°C para el periodo 1960–2018. Estas tendencias fueron relativamente más bajas que las temperaturas mínimas.

En Brasil, en el estado de Paraná, también se observaron aumentos significativos más pronunciados en la temperatura mínima media que en la máxima ⁽⁴⁷⁾, las temperaturas máximas medias que fueron positivas y significativas variaron entre 0,1 y 1,4°C para el periodo 1961-2011. Asimismo, en el estado de Río Grande del Sur, se observaron un aumento significativo levemente superior de la temperatura mínima media anual en comparación con la temperatura máxima media anual (0,28°C) (1950-2009) ⁽²⁷⁾. Sin embargo, en el mismo estado de Brasil, considerando el periodo 1913-2006, no hallaron tendencias significativas en la temperatura máxima media anual ⁽⁴⁸⁾.

En Colombia y Venezuela, se observaron tendencias de incremento de la temperatura máxima media en gran parte del territorio, con magnitudes significativas que varían entre 0,28 y 0,71°C ⁽⁴⁹⁾.

En Argentina, la temperatura máxima media en la Región Húmeda no aumentó más de 0,1°C entre 1950 y 2010, se destaca la subregión Buenos Aires, por ser la que presentó un valor positivo significativo (0,8°C), seguida por la subregión Corrientes-Misiones (0,3°C), aunque no significativa ⁽²⁰⁾. En el noroeste de Argentina, se observaron tendencias de aumento, aunque no alcanzaron valores significativos, a excepción de una localidad ⁽²²⁾. Sin embargo, en la Región Pampeana, la tendencia anual señaló un valor negativo de -1,2 °C de la temperatura máxima en el período 1925-2007 ⁽⁴⁴⁾.

A nivel mensual, los meses más cálidos en la región se presentaron en agosto (0,51°C/década), donde todas las localidades presentaron aumentos significativos que

varían entre 0,38°C/década (Encarnación) y 0,77°C/década (Caazapá), y en setiembre donde gran parte de las localidades presentaron aumentos significativos que varían entre 0,34°C/década (Encarnación y Pilar) y 0,8°C/década (Caazapá), excepto por Ciudad del Este que no presentó un aumento significativo. Los menores cambios se observaron en los meses invernales, en julio (0,02°C/década), y en mayo (-0,05°C/década) donde gran parte de las localidades presentaron tendencias negativas, aunque no significativas (Tabla 4).

En el noroeste de Argentina, también se observaron tendencias negativas en mayo, donde la mayoría de las localidades analizadas señalaron disminuciones significativas⁽²²⁾.

Tabla 4: Tendencias de las temperaturas máximas medias (°C/década) para las 9 estaciones meteorológicas analizadas y para el promedio regional.

Estación meteorológica	Meses												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Asunción	0,27 **	0,17 no	0,27 *	0,35 **	-0,01 no	0,02 no	0,08 no	0,46 **	0,44 **	0,32 **	0,07 no	0,17 no	0,18 **
Caazapá	0,39 **	0,40 **	0,28 no	0,53 **	0,19 no	0,31 no	0,20 no	0,77 **	0,80 **	0,47 **	0,40 **	0,28 no	0,39 **
Ciudad del Este	0,33 *	0,11 no	0,38 *	0,45 no	-0,17 no	0,32 no	-0,07 no	0,66 **	0,27 no	0,51 **	0,27 no	0,22 no	0,26 **
Concepción	0,32 **	0,18 *	0,26 *	0,45 **	0,03 no	0,18 no	0,16 no	0,57 **	0,50 **	0,46 **	0,16 no	0,20 *	0,28 **
Pilar	0,19 **	0,16 *	0,25 *	0,29 *	-0,07 no	0,06 no	-0,05 no	0,46 **	0,34 **	0,22 **	0,05 no	-0,04 no	0,14 **
Villarrica	0,22 **	0,20 *	0,22 *	0,33 **	-0,06 no	0,04 no	0,01 no	0,45 **	0,35 **	0,28 **	0,14 no	0,15 no	0,19 **
Formosa	0,25 *	0,13 no	0,24 no	0,22 no	-0,18 no	-0,05 no	-0,10 no	0,50 **	0,40 *	0,17 no	0,10 no	0,15 no	0,17 **
San Juan Bautista	0,13 no	0,12 no	0,16 no	0,20 no	-0,15 no	-0,08 no	-0,02 no	0,39 **	0,36 **	0,26 **	0,12 no	0,02 no	0,16 **
Encarnación	0,21 *	0,22 *	0,29 *	0,41 **	-0,03 no	0,08 no	0,00 no	0,38 *	0,34 **	0,35 **	0,23 *	0,13 no	0,21 **
Promedio	0,26	0,19	0,26	0,36	-0,05	0,10	0,02	0,51	0,42	0,34	0,17	0,14	0,22

*estadísticamente significativo con un 95% de confianza, **estadísticamente significativo con un 99% de confianza y no: no significativo.

3. CONCLUSIONES

El aumento de la temperatura media del aire observadas, se enmarcan dentro del cambio climático que se ha estado manifestando a nivel regional y global.

Los resultados muestran que la mayor parte de la región experimentó un aumento estadísticamente significativo tanto en la temperatura mínima media como en la temperatura máxima media, sin embargo, el aumento de la temperatura mínima es más pronunciada que la temperatura máxima.

En cuanto a las disminuciones, solamente la estación de Pilar presentó tendencias negativas no significativas en las temperaturas mínimas y en la media.

Los mayores aumentos se presentaron en los meses de septiembre, octubre y diciembre en las temperaturas máximas como mínimas. Se observaron tendencias positivas significativas de las temperaturas en gran parte de las localidades durante el mes de abril. El cambio climático no sólo aumenta el calor, sino que prolonga las condiciones del verano a otoño ⁽⁵²⁾.

Los resultados obtenidos afirman la hipótesis, los valores de temperatura del aire en Paraguay han experimentado cambios durante el período 1960-2018, influenciado por el cambio climático, principalmente en los parámetros de la temperatura analizados que indicaron aumentos significativos.

AGRADECIMIENTOS

In memoriam de Benjamín Grassi, por su optimismo y apoyo constante al inicio de esta investigación.

Al Departamento de Banco de Datos de la Dirección de Meteorología e Hidrología de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DMH-DINAC).

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

CC y MF han trabajado en la búsqueda de literatura, recolección de datos, análisis estadístico y en la redacción del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Fuentes de financiación: Ninguna

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IPCC. “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático”. Stocker, T.F., D; 2013.
2. Barros VR, Camilloni IA. La Argentina y el cambio climático. De la física a la política. Editorial: EUDEBA; 2016. 286p.
3. Olmos E, González ME, Contreras MR. Percepción de la población frente al cambio climático en áreas naturales protegidas de Baja California Sur, México. Revista Latinoamericana; 2013. 12(35): 459 – 481.
4. Soares D, Gutiérrez I. Vulnerabilidad social, institucionalidad y percepciones sobre el cambio climático: un acercamiento al municipio de San Felipe, Costa de Yucatán. Ciencia Ergo Sum; 2011. 18(3): 249 – 263.
5. Lowe TD, Lorenzoni I. Danger is all around: Eliciting expert perceptions for managing climate change through a mental model’s approach. Global Environmental Change; 2007. 17(1): 131 – 146.

6. CLIMATICO, S. E. C. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; 1992.
7. IPCC. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra (Suiza); 2014.
8. IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press; 2021.
9. Vincent LA, Peterson TC, Barros VR, Marino MB, Rusticucci M, Carrasco G, ... Karoly D. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *Journal of Climate*; 2005. 18(23), 5011-5023.
10. Folland CK, Karl TR, Salinger JM. Observed climate variability and change. *Weather*; 2002. 57, 269 – 278.

11. Vose RS, Easterling DR, Gleason B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004. *Geophysical Research Letters*; 2005. 32(23).
12. Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*; 2013. 100, 172 – 182.
13. Kruger AC, Shongwe S. Temperature Trends in South Africa: 1960-2003. *International Journal of Climatology*; 2004. 24, 1929-1945.
14. Xu M, Kang S, Wu H, Yuan X. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia. *Atmospheric Research*; 2018. 203, 141–163.
15. Amin A, Nasim W, et al. Regional climate assessment for temperature and precipitation in Southern Punjab (Pakistan) using SimCLIM climate model for different time temporal scales. *Theoretical and Applied Climatology*; 2016. 131. 121-131.
16. Asfaw A, Simane B, Hassen A, Bantider A. Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. *Weather and Climate Extremes*; 2017. 19, 29 – 41.
17. Yang X, Xu L, Liu K, Chunhui L, Hu J, Xia X. Trends in Temperature and Precipitation in the Zhangweinan River Basin during the last 53 Years. *Procedia Environmental Sciences*; 2012. 13. 1966-1974.

18. Martinez CJ, Maleski JJ, Miller MF. Trends in precipitation and temperature in Florida, USA. *Journal of Hydrology*; 2012. 452 – 453, 259 – 281.
19. Barros VR, Doyle ME, Camilloni IA. Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol*; 2008. 93(1-2): 19–33.
20. Barros VR, Boninsegna JA, Camilloni IA, Chidiak M, Magrín GO, Rusticucci M. "Climate change in Argentina: Trends, projections, impacts and adaptation" *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*; 2015. 6(2):151-169.
21. Fernández-Long ME, Müller GV, Beltrán-Przekurat A, Scarpati OE. Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology*; 2013. 33:1673–1686.
22. Hurtado R, Fernández ME, Serio L. Tendencias de las temperaturas máximas y mínimas en el noroeste argentino. *Estrategias integradas de mitigación y adaptación a cambios globales*; 2009. 93 – 99.
23. Rusticucci M, Barrucand M. Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Consistencia de datos. Relación entre la temperatura media estacional y la ocurrencia de días extremos. *Meteorológica*; 2001.
24. Rojas E, Arce B, Peña A, Boshell F, Ayarza M. Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia). *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*; 2010. 11(2): 173 – 182.

25. Rossato MS. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. 240f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul; 2011.
26. Marengo J, Camargo C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal of Climatology*; 2008. 28. 893 – 904.
27. Cordeiro A, Berlato M, Fontana D, Alves R. Tendências climáticas das temperaturas do ar no estado do Rio Grande do Sul, Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*; 2016. 9(03), 868-880.
28. Grassi B, Pastén AM, Armoa J. Análisis de la tendencia de la temperatura del aire en el Paraguay: Informe final. Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay; 2004.
29. Grassi B, Pastén AM, Armoa J. Un análisis del comportamiento de la precipitación en el Paraguay: Informe final. Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay; 2005.
30. Grassi B. Estudio del Clima Paraguay 2019. MADES-STP. Asunción, Paraguay; 2020.
31. Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*; 1945. 13, 245–259.
32. Kendall MG. Rank Correlation Methods. Griffin, London, UK; 1975.
33. Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*; 1968. 63, 1379–1389.

34. OMM, Organización Meteorológica Mundial. Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer (R. G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194 (WMO-No. 759). Ginebra; 1992.
35. Vázquez M. Proyecto PAR/98/G31, apoyo a áreas prioritarias en cambio climático. Red de Observación Sistemática; 2002.
36. Yue S, Pilon P, Phinney B, Cavadias G. The Influence of Autocorrelation on the Ability to Detect Trend in Hydrological Series. Hydrological Processes; 2002. 16. 1807 – 1829.
37. Kendall, MG. A new measure of rank correlation, Biometrika; 1938. Vol 30, no1/2, 81–93.
38. Hirsch RM, Slack JR. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. Water Resources Research; 1984. 20(6), 727-732.
39. Castro DA, Carvajal Y. Análisis de tendencia en la precipitación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca. Memorias; 2013. 11(20), 9-18.
40. Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lo K, Lea DW, Medina-Elizade M. Global temperature change. Proc. Natl. Acad. Sci.; 2006. 103, 14288-14293.
41. IPCC. Magrin GO, Marengo JA, Boulanger JP, Buckeridge MS, Castellanos E, Poveda G, Scarano FR, Vicuña S, 2014: Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O.

- Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2014. 1499-1566.
42. IPCC. In Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds.) Cambridge University Press: Cambridge, 1033; 2001.
 43. IPCC. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, 1033; 2001.
 44. Fernández-Long ME, Barnatán I, Serio L, Murphy G. Cambios en la disponibilidad térmica para los cultivos de la región pampeana argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*; 2008. 28(2–3), 111-120.
 45. CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. La economía del cambio climático en el Uruguay. Síntesis. Documento LC/W330; 2010.
 46. Salviano M, Groppo J, Pellegrino G. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*; 2016. 31, 64-73.
 47. Rosso F, Boiaski N, Ferraz S, Dewes C, Tatsch J. Trends and decadal variability in air temperature over Southern Brazil. *Am J Environ Eng* 5(1A); 2015. 85-95.
 48. Sansigolo C, Kayano M. Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitation in Southern Brazil for the 1913–2006 period. *Theoretical and Applied Climatology*; 2010. 101, 209-216.

49. Quintana-Gomez R. Trends of Maximum and Minimum Temperatures in Northern South America, *Journal of Climate*; 1999. 12(7), 2104-2112.
50. Alexander LV, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5); 2006.
51. Pasten AM. Análisis de eventos meteorológicos extremos en el Paraguay. Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción; 2007.
52. Hansen J, Sato M, Ruedy R. Perception of climate change. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*; 2012. 109, E2415–E2423.