

CARACTERÍSTICAS DE LAS TEMPERATURAS EXTREMAS EN BUENOS AIRES MEDIANTE REGISTROS CENTENARIOS. ESTUDIO DE LAS CONDICIONES INVERNALES

María Paula Llano^{1,2} y Walter Vargas^{1,2}

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina

²CONICET. Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 5 de mayo de 2016, en su versión final el 15 de julio de 2016)

RESUMEN

El estudio de las condiciones climáticas en la ciudad de Buenos Aires es de gran importancia dada la población que habita en la misma. Las temperaturas extremas tienen un gran impacto en la provisión de servicios lo que implica la necesidad de un diagnóstico de las mismas para diversas aplicaciones. Las series de Observatorio Central Buenos Aires por su calidad han sido elegidas para este estudio verificando que representan una gran área de influencia que abarca una superficie mayor que la de la ciudad. Los registros que se emplean en este trabajo cubren en algunas escalas desde mitad del siglo XIX y en particular en escala diaria el período 1909-2013. Se estudia la evolución de las temperaturas a lo largo del siglo, centrándose principalmente en el semestre frío. Se define un estado natural de la serie correspondiente a los primeros 20 años del registro en donde ambas series no presentan una tendencia lineal significativa. Valores de corte son definidos en base al estado natural para estudiar diferentes propiedades de los semestres fríos. La duración de los mismos en cuanto a las temperaturas máximas sufrió una disminución de 30 días, mientras que en las mínimas 53 días. La amplitud de los armónicos anuales sufre variaciones, en las máximas se observa una tendencia lineal negativa, mientras que en las mínimas es positiva. Estos resultados están mostrando la existencia de una variabilidad interanual de la variabilidad intranual. Los análisis realizados a las series centenarias permiten reconstruir a las mismas según un estado natural o un estado antropogénico. *Palabras clave: temperatura, centenario, ciudad, invierno, extremos*

CHARACTERISTICS OF EXTREMES TEMPERATURES IN BUENOS AIRES BY CENTENARY RECORDS. WINTER CONDITIONS STUDY

ABSTRACT

The study of climatic conditions in Buenos Aires city has a great importance because of the people living in it. Extreme temperatures present a major impact on the supplying of services which implies the necessity of a diagnosis for various applications. The temperatures series of Buenos Aires Central Observatory have been chosen for this study, for their quality and it have been verified that they represent a large area of influence covering a zone larger than the city. The records

used in this work, on some scales cover from mid-nineteenth century up to now and especially from 1909 to 2013 in a daily scale. The evolution of temperatures throughout the century is studied, focusing mainly on the cold periods. A natural state corresponding to the first 20 years of record series is defined where both series do not show a significant linear trend. The cut-off values are defined based on the natural state for studying the different properties of cold semesters. The duration of these as to the maximum temperatures experienced a decrease of 30 days, whereas in the minimum temperatures, of 53 days. The amplitude of the annual harmonics present variations, in the maximum temperatures a negative linear trend is observed, while in the minimum temperatures it is positive. These results are showing the existence of inter-annual variability of the intra-annual variability. The analyses made on the centenarian series allow to reconstruct them as a natural state or an anthropogenic state.

Keywords: temperature, centenary, city, winter, extremes

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los puntos centrales del estudio de la variabilidad climática de largo período requiere de series de record extenso. Esto tiene especial importancia cuando se quiere estimar los impactos de la actividad humana y el calentamiento global. Las series más afectadas y de mayor importancia para este propósito son las series de temperatura, especialmente las máximas y mínimas diarias. La región que contiene a la ciudad de Buenos Aires es una de las más medidas y de mejor calidad entre las series de la Argentina.

Cambios en las temperaturas extremas han sido estudiados en la Argentina por medio del uso de índices (Rusticucci y Barrucand, 2004) hallando que las principales variaciones las sufren las temperaturas mínimas, principalmente en verano. Barrucand y Rusticucci (2001) estudian la variabilidad temporal y regional de ambas temperaturas, destacando una disminución de las mínimas frías en los meses de verano y un aumento de las máximas cálidas en invierno. Para la ciudad de Buenos Aires existen numerosos trabajos en donde el estudio de las temperaturas está enfocado desde el punto de vista de isla de calor (Camilloni y Barros, 1997; Camilloni y Barrucand, 2012). Rusticucci y Vargas (1991) estudian las temperaturas en

la ciudad de Buenos Aires durante 12 años para distinguir el efecto del río y de la ciudad, encontrando que los procesos que dominan en las estaciones son homogéneos, el río ejerce una mayor influencia en la temperatura nocturna y la ciudad en la diurna.

Las estaciones climáticas son divisiones del año de acuerdo a fenómenos astronómicos o climáticos regularmente recurrentes. Las mismas son una característica principal del clima en las latitudes medias, y presentan modificaciones a lo largo del tiempo ya sea en su duración o en su intensidad. Cada estación exhibe un clima complejo con una circulación atmosférica asociada. Las estaciones climáticas comienzan en un momento diferente en cada año dependiendo de las condiciones del tiempo. Trabajos en otras regiones del mundo muestran que es el invierno la estación que más cambios sufre en cuanto a estas propiedades (Jaagus et al., 2003). Variedad de trabajos científicos utilizan umbrales de temperaturas extremas para el análisis de las estaciones climáticas como por ejemplo para identificar el comienzo y fin de las mismas (Jaagus and Ahas, 2000, Qian et al., 2009), para analizar los cambios en la duración de las estaciones y modelar el futuro de las mismas (Lopez de la Franca et al., 2013) o para analizar las tendencias (DeGaetano, 1996).

Trabajar con series de largo periodo de

temperatura diaria extrema para una ciudad en particular permite ampliar el conocimiento sobre su homogeneidad y su variabilidad de baja frecuencia (Serra et al. 2001; Dahech and Beltrando, 2012). Así mismo, uno de los intereses de la elección del período frío del año se debe a la necesidad de conocer como las temperaturas extremas afectan al consumo de energía, principalmente para la calefacción.

La estación Observatorio Central es representativa de la ciudad de Buenos Aires y se encuentra ubicada en el centro de la misma ($34,34^{\circ}\text{S} - 58,25^{\circ}\text{O}$ y 6 msnm.) en un parque que vio parcialmente alterada su fisonomía a lo largo del tiempo con la construcción de edificios y el crecimiento de los árboles, en consonancia con el desarrollo de la ciudad a su alrededor.

El principal objetivo del presente trabajo es contribuir al conocimiento de las temperaturas extremas en la ciudad de Buenos Aires. Entre los objetivos particulares se pueden mencionar: describir las características estadísticas de las series de temperatura máxima y mínima de la estación Observatorio Central Buenos Aires y la zona que representa, esto último pretende definir a estas series como de referencia en la región. Al mismo tiempo en esta primera fase, estudiar el comportamiento del semestre frío y del invierno astronómico en relación a los efectos naturales y antropogénicos, fundamentalmente el de ciudad en el período 1856-2013.

2. DATOS Y METODOLOGÍAS

La ciudad de Buenos Aires, una de las grandes ciudades del mundo, se encuentra ubicada en una zona llana en latitudes medias (aproximadamente 35°S) sobre la costa del estuario del Río de la Plata. Es una localidad con clima templado y en lo referido a su climatología sinóptica de las precipitaciones se puede mencionar como característica sobresaliente el pasaje de sistemas frontales a lo largo de todo el año preferencialmente con una dirección sudoeste-noreste (Hoffmann, 1975).



Figura 1: Ubicación geográfica de las estaciones empleadas en el estudio.

La base de datos empleada comprende la serie de valores diarios de temperaturas máximas y mínimas de la estación Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) provista por el Servicio Meteorológico Nacional cuyo período es 1909-2013, la serie de medias mensuales de temperatura para la misma estación para el período 1856-1994 (en adelante llamada “histórica”). Así mismo se trabaja con información diaria de temperaturas máximas y mínimas de estaciones cercanas a la estación OCBA. Las estaciones (Aeroparque, Ezeiza, La Plata, El Palomar) comprenden varios intervalos de tiempo, siendo el período común 1961-2011. (Figura 1).

Las series diarias de temperaturas son siempre consideradas como equi-espaciadas en el tiempo, es decir que presentan un Δt característico de 24 horas. Esto es una aproximación ya que por efecto sinóptico y de características geográficas existe una distribución de las horas de ocurrencia de máximas y mínimas. En la figura 2 se muestra la distribución de las horas de máxima frecuencia de ocurrencia de ambas temperaturas obtenidas durante un período de prueba (1982-1988) en la estación OCBA. En número se presenta el valor de las frecuencias en los 45 minutos alrededor de la hora de máxima ocurrencias indicada para cada mes.

Las temperaturas máximas en esta muestra presentan su máximo principalmente entre las 15 y las 16 y 30 horas, pero solamente un 30-35 % de

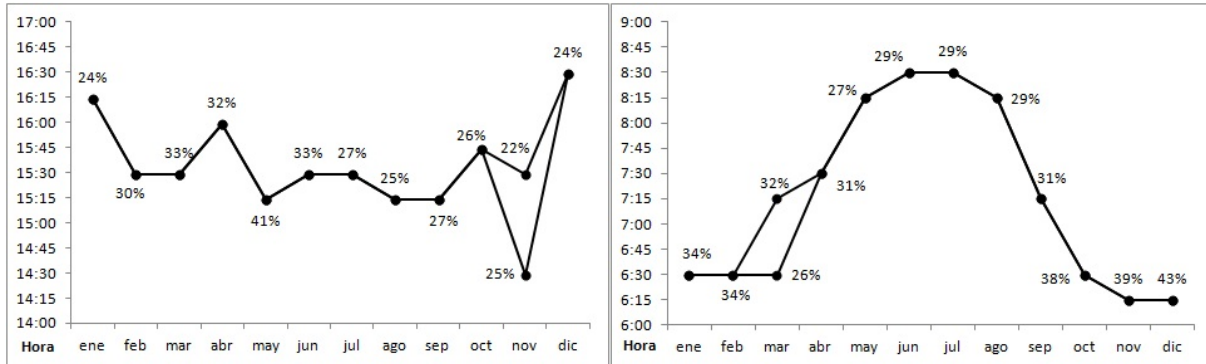


Figura 2: Horas de frecuencia máxima de ocurrencia de temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha), en valores se presentan los porcentajes de ocurrencia en un intervalo de 45 minutos alrededor a la hora medida.

las veces ocurren en los 45 minutos que rodean a la hora de máxima ocurrencia. Esto sucede por el efecto de las condiciones sinópticas presentes en la hora de ocurrencia de las máximas por efecto astronómico, es decir, solamente considerando la posición del sol. En las temperaturas mínimas esta situación se repite y también es posible notar el efecto astronómico que afecta a la ocurrencia de esta variable a lo largo del año.

Estos resultados podrían utilizarse en la planificación de las disponibilidades energéticas necesarias para solventar los máximos y los mínimos consumos. Los cuales tienen como condicionante la hora de ocurrencia de los extremos térmicos. Es posible observar en la muestra estudiada que aproximadamente solo en un 35% de las veces los máximos absolutos ocurren en las horas teóricas de ocurrencia (dadas según la posición del sol y la época del año) de las máximas y mínimas temperaturas diarias. Esto es importante porque un modelo de despacho de cargas de energía debe contemplar las horas posibles de máximo requerimiento.

La metodología de análisis armónico (Wilks, 2006) es empleada para definir el semestre frío. A las series de temperatura máxima y mínima de cada año en particular se les aplica este análisis (ecuación 1) para obtener el primer armónico o armónico anual que permite suavizar las fluctuaciones diarias que presentan dichas series. Estas nuevas series anuales suavizadas son

las que se utilizan para determinar el semestre frío.

$$T_i = \bar{T} + A \sin\left(\frac{2\pi i}{P}\right) + B \cos\left(\frac{2\pi i}{P}\right) \quad (1)$$

T_i es la temperatura diaria obtenida por el armónico anual,

\bar{T} es la temperatura media anual

A y B son constantes del primer armónico

P es el período fundamental, en este cálculo es 364 días

Cambios en el ciclo anual y en la modulación del mismo son estudiados empleando análisis armónico por diferentes autores entre los que pueden mencionarse a Mann and Park (1996) y Wallace and Osborn (2002). Dada la necesidad de que todas las series anuales presenten el mismo largo y sean pares se procede a remover los días 29 de febrero y se quitan todos los 31 de diciembre, por lo que las series individuales tienen una duración 364 días.

Otra de las metodologías que se emplea en este estudio es el análisis espectral simple según el método de Blackman Tukey (OMM, 1966).

$$B_i = \frac{C_0}{m} + \frac{2}{m} \sum_{L=0}^{m-1} \left[C_L \cos\left(\frac{2\pi i L}{2m}\right) \right] + \frac{(-1)^i C_m}{m} \quad (2)$$

B_i es la estimación espectral

C es la función de autocovarianza

L es el lag (desde $L = 1$ a $L = m - 1$)

m es el 30

Para estudiar el tipo de modelo que sigue el espectro se plantea el test de Anderson con la hipótesis nula de que el coeficiente de correlación en el lag = 1 (r_1) es significativamente igual a cero.

$$R_t = \frac{-1 \pm t_g \sqrt{n-2}}{n-1} \quad (3)$$

Si el r_1 está dentro del intervalo dado por R_t , r_1 resulta significativo, se acepta H_0 y el modelo es ruido blanco, en caso contrario el espectro sigue un modelo de ruido rojo, es decir la serie presenta persistencia.

3. RESULTADOS

3.1. Definición del “estado natural”

En la figura 3 se presentan los valores de los censos poblacionales (www.deie.mendoza.gov.ar), la serie de temperatura media calculada a partir de los valores diarios de temperatura máxima y mínima y la serie histórica para los años previos. En ella es posible observar que desde el censo del año 1910 hasta el del año 1945 no hay información sobre la cantidad de población de la ciudad, por lo que la forma de la curva en ese período es subjetiva a la resolución gráfica. Si bien la temperatura aumenta en forma continúa hasta nuestros días producto principalmente de un calentamiento urbano, este último no parece explicar totalmente este fenómeno ya que desde la década de 1960 no aumenta sustancialmente la cantidad de habitantes de la ciudad. Pero si es posible suponer que el aumento de la temperatura es proporcional a la edificación y a los diferentes servicios (ejemplo pavimentación de calles) que provocan el calentamiento de la última parte del registro.

La serie de datos histórica de temperatura media mensual es empleada para analizar la presencia de tendencia y para la definición de un estado natural de la ciudad de Buenos Aires. Esta serie comprende información mensual desde el año 1856. Para la determinación del estado natural se calculan las tendencias lineales de los valores medios anuales de dicha serie para los primeros 10 años del registro y luego se van

incorporando al cálculo de a uno los restantes años. Los valores de las tendencias en los primeros cálculos son muy variables, sin alcanzar un nivel de significancia estadística mediante un test t-Student con un 95 % de confianza. Dicha significancia se obtiene alrededor de los 80 años de registro, más específicamente en el año 1932. La misma metodología de evaluación de la tendencia se realiza con la serie de valores medios anuales calculada. En esta oportunidad la tendencia comienza a ser significativa estadísticamente en el año 1927. Dada la estructura que tiene la serie y los resultados del cálculo de la pendiente se decide definir como período “natural” al comprendido entre los años 1909-1928. A estos 20 años de datos diarios de temperatura se los considera como un período en el cual la ciudad no sufrió cambios significativos en cuanto a la temperatura debido al crecimiento poblacional de la misma. Esto se encuentra en coincidencia con el inicio de un crecimiento edilicio de la ciudad que se prolonga hasta nuestros días.

Los 20 años de este período son promediados día a día generando una serie de valores medios, a dichos valores se los suaviza con el primer armónico y se divide al año en un semestre cálido y uno frío, por encima y por debajo del valor medio anual. Este valor de corte es empleado en la identificación del semestre frío en todo el período de estudio incluyendo período natural. Para las temperaturas máximas el valor de corte es de 21,44 °C y para las temperaturas mínimas es de 10,99 °C. Con la identificación de dicho valor de corte se pueden establecer los días del comienzo y fin del semestre frío para cada año. Estos días calendario son empleados en los datos originales (temperaturas sin el suavizado del primer armónico) para posicionar al semestre frío y de esta forma calcular su intensidad. En el presente trabajo se analizan diferentes propiedades del semestre frío en cuanto a su variabilidad respecto a este estado natural: longitud, inicio y fin, tendencia, ondas significativas, cambios en la amplitud y la relación con la temperatura media.

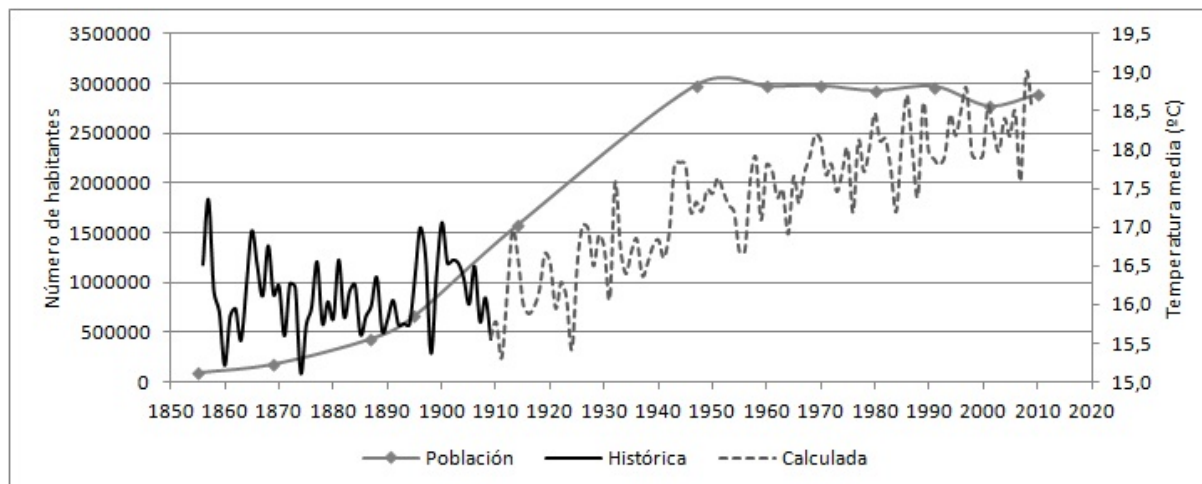


Figura 3: Evolución de la cantidad de habitantes de la ciudad de Buenos Aires (línea gris), valores de temperatura media anual de la serie histórica de OCBA (línea negra) y de la serie calculada a partir de los valores diarios de temperatura máxima y mínima (línea gris a trazos).

3.2. Representatividad regional de la serie de temperaturas máximas y mínimas diarias de OCBA

Como primer punto del análisis de la representatividad de la estación OCBA se calculan para las estaciones cercanas los valores medios anuales de ambas temperaturas para ver su evolución a lo largo del período común. En los 51 años de análisis se observa una pendiente positiva en ambas temperaturas para la mayoría de las estaciones, por este motivo se realiza un análisis de las tendencias lineales. Todas las estaciones presentan tendencias positivas significativas, salvo El Palomar en ambas temperaturas. Se podría concluir con este simple estudio que todas las estaciones tienen presente el efecto ciudad menos una de ellas que está ubicada en un aeropuerto más pequeño y con menos edificaciones cercanas. Esta suposición puede llevar a inferir que en Ezeiza la presencia del efecto ciudad no debería estar presente ya que también es una estación ubicada en un aeropuerto. Pero trabajos sobre isla urbana de calor llevados a cabo afirman que este efecto se observa en el ciclo diario de las temperaturas, pero no así en los valores medios anuales (Barros y Camilloni, 1997).

Coef.Corr.	Anuales		Enero		Julio	
	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn
Aeroparque	0,78	0,94	0,92	0,97	0,98	0,98
Ezeiza	0,89	0,85	0,95	0,94	0,97	0,95
Palomar	0,77	0,45	0,95	0,89	0,92	0,91
La Plata	0,84	0,85	0,95	0,88	0,97	0,94

Tabla I: Valores del coeficiente de correlación de las temperaturas máximas y mínimas anuales y mensuales entre las estaciones que se mencionan y OCBA.

Se realizan las correlaciones de los valores anuales de ambas temperaturas entre todas las estaciones con respecto a OCBA encontrándose que las mismas son significativas. Para estudiar más en detalle la relación de las temperaturas extremas entre las diferentes estaciones se calcula el coeficiente de correlación para dos meses característicos: enero y julio. (Tabla I).

Para observar en detalle la relación entre las estaciones se analizan las diferencias de las temperaturas medias mensuales en función de las distancias (figura 4). Con la estación Aeroparque todos los meses presentan una diferencia de temperatura máxima similar con OCBA teniendo un máximo en verano ($1,5^{\circ}$ - $1,3^{\circ}$ C) y un mínimo en junio con $0,86^{\circ}$ C. La estación El Palomar

es la que menor diferencia en promedio tiene con OCBA, presentando la misma temperatura media en enero y febrero y alcanzando la mayor diferencia en los meses de mayo, octubre y noviembre con $0,35^{\circ}\text{C}$ por debajo del valor de la estación OCBA. Ezeiza es la única estación que tiene la particularidad de que en los meses de verano la temperatura es mayor a la de OCBA, mientras que en invierno se encuentra por debajo de la misma en casi medio grado. Finalmente La Plata siendo la estación más lejana presenta siempre valores menores a OCBA, y es el otoño “temprano” la época en donde las diferencias son menores (cercanas al grado) mientras que en la primavera “tardía” las diferencias rondan los $1,5^{\circ}\text{C}$. (Resultados similares se observan para las temperaturas mínimas, figura no mostrada).

Se infiere por el análisis de las correlaciones y su significancia que en esta escala mensual las series de datos de OCBA pueden considerarse como una serie de referencia de 160 años.

3.3. Análisis del ciclo anual

El armónico anual obtenido a lo largo de los años de registro explica en promedio un 66% de la variabilidad de la temperatura máxima y un 56% de la temperatura mínima. A modo de ejemplo en la figura 5 se presentan los años que mejor ajuste tienen con el primer armónico para ambas temperaturas: para la temperatura máxima del año 1926 el armónico anual explica un 77% de la varianza, mientras que para la temperatura mínima del año 1983 alcanza un 69%.

Las amplitudes del primer armónico permiten saber cómo es el rango anual de las temperaturas analizadas. A lo largo de los 105 años presentan una gran variabilidad y una tendencia significativa al 95% (t-Student) asociada. En el caso de las temperaturas máximas dicha tendencia es negativa, dado por un mayor aumento de las temperaturas máximas en los meses de invierno que en los de verano. Mientras que con las temperaturas mínimas la tendencia es positiva, las temperaturas mínimas de invierno y verano aumentaron, pero las últimas en una

mayor medida lo que da lugar a este aumento en la amplitud. (Figura 6).

Además de observar la tendencia presente en la amplitud del primer armónico, se analiza como es el comportamiento frente al armónico de referencia obtenido en el estado natural de la serie (20 primeros años del registro). En las temperaturas máximas es posible notar como a partir de la década de 1960 la amplitud anual se encuentra por debajo del valor de $15,16^{\circ}\text{C}$ que representa al estado natural. Mientras que en las temperaturas mínimas no se observa claramente un patrón de comportamiento. Si es posible notar que entre los años 1930 y 1980 la amplitud se encuentra por debajo del valor característico de $12,58^{\circ}\text{C}$.

En la figura 7 de la distribución de las varianzas explicadas por los armónicos anuales es posible notar la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas. Las varianzas explicadas en las primeras son claramente superiores. Los años que se ubican en el período natural tienen la distribución relativa más extrema hacia las mayores varianzas. Siendo el intervalo entre el 64 y el 68% el que mayor frecuencia alcanza. Las varianzas explicadas en el caso de las temperaturas mínimas son menores y se distribuyen a lo largo de una mayor cantidad de intervalos. Durante el período natural el máximo se alcanza en el intervalo 56-60% mientras que en el resto del registro el máximo relativo lo presenta el intervalo comprendido entre un 52 y un 56%.

Como otro punto de análisis de las series de armónicos anuales se decide estudiar la presencia de alguna onda característica en las series de las amplitudes. Este estudio permite obtener información de cómo es la variabilidad intra-anual de las temperaturas a lo largo del registro. Como puede observarse en las figuras 8, para ambas temperaturas existe una onda característica de aproximadamente 2 años de longitud, dando como resultado que es muy variable la amplitud de las temperaturas, se puede concluir que existe

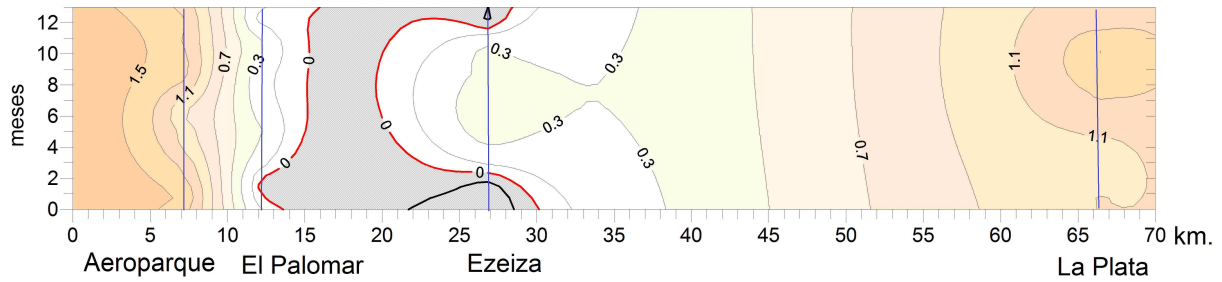


Figura 4: Diferencia de temperatura máxima media mensual entre OCBA y el resto de las estaciones (en sombra con trama están las diferencias negativas). En el eje vertical se encuentran los meses y en el eje horizontal están representados los kilómetros de distancia entre las estaciones (cada una de estas estaciones está representada por una de las barras verticales azules).

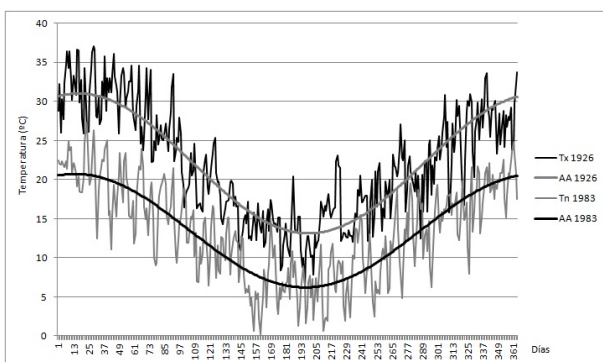


Figura 5: Onda anual de la temperatura máxima del año 1926 (línea negra) mejor ajuste con un 77% de varianza explicada y para la temperatura mínima del año 1983 (línea gris) mejor ajuste con un 69% de varianza explicada. (sobre curvas esta graficado el correspondiente armónico anual)

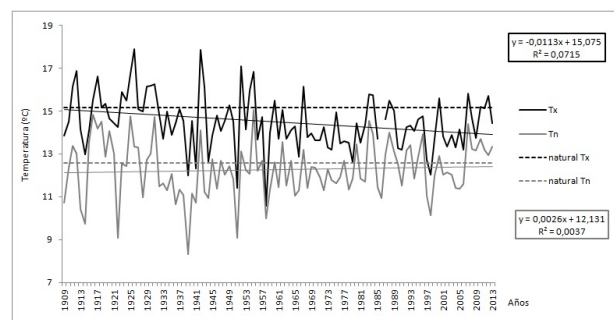


Figura 6: Evolución de la amplitud dada por el armónico anual de cada uno de los años para la temperatura máxima y mínima (línea llena negra y gris, respectivamente), con sus respectivas tendencias lineales (líneas finas) y el valor de la amplitud media del período natural (líneas a trazos negra y gris respectivamente).

una marcada variabilidad interanual de la variabilidad intranual. Además se advierte que la serie presenta un proceso de Markov insinuando una persistencia interanual significativa.

3.4. Características climáticas del semestre frío

Como ya se menciona en la sección Metodologías, un valor de corte es hallado para la definición del semestre frío en cada uno de los años que comprende el estudio. En las temperaturas máximas dicho valor es 21,44°C. Los semestres fríos definidos de esta forma presentan una

gran variabilidad en algunas de sus propiedades (duración, intensidad). La duración del mismo presenta como es de esperar una tendencia negativa significativa a lo largo del registro. El semestre frío más largo se produjo en el año 1911 con 198 días y el más corto en 2008 con solo 144 días. En el estudio de la tendencia acumulada de la cantidad de días, la misma es significativa a partir de los 20 años de registro. Estabilizándose al final del mismo ya que los últimos 22 años no presentan una tendencia significativa. Los primeros 20 años (estado natural) presentan un semestre frío en promedio de 182 días de duración, mientras que los últimos 20 años de

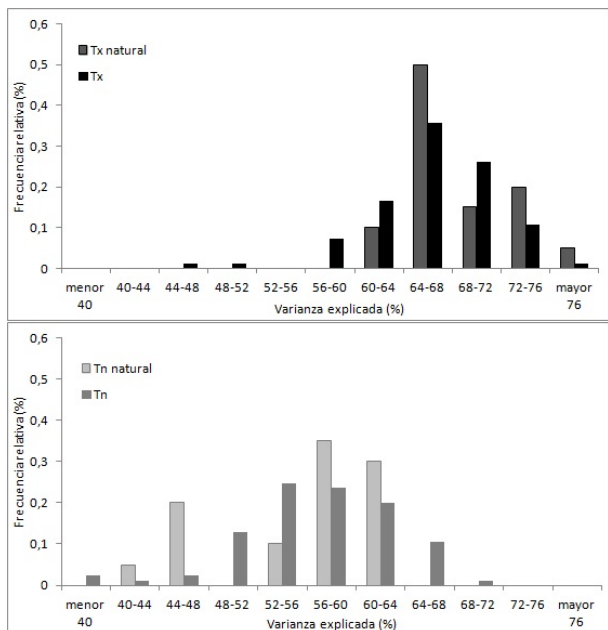


Figura 7: Distribución de frecuencias reativas de la varianza explica para el armónico anual de cada uno de los 105 años de registro, identificando la distribución de los años que integran el período natural. Para las temperaturas máximas (izquierda) y mínimas (derecha).

registro el valor desciende hasta los 156 días, es decir el semestre frío pierde un mes de duración en los 100 años de estudio. (Figura 9).

En cuanto a la variación de las temperaturas máximas medias en los semestres fríos, se puede observar un aumento significativo de las mismas. En el período natural de 20 años el valor medio es de 16,62°C. Se consideran dos posibles estados, el primero es evaluar la temperatura en los mismos 182 días en que se definió al semestre frío en el estado natural y el segundo en los días que conforman los semestres fríos de cada año según el valor de corte. (Figura 10)

En el primer caso, las temperaturas fueron aumentando en forma progresiva. El valor más bajo se registra en el año 1911 con 15,2°C, mientras que el más elevado es de 19,27°C en 1951. Si se consideran los últimos 20 años del registro la temperatura máxima promedio de

los 182 días que comprende el semestre frío es de 18,47°C, lo que da un aumento promedio de 1,85°C en los 100 años de estudio. Es posible tomar los últimos 20 años en promedio ya que hacia el fin del registro los valores de temperatura se estabilizan, no presentando tendencia desde 1987.

En el segundo caso los años de ocurrencia de los valores extremos son los mismos, siendo el mínimo registro de 15,65°C y el máximo de 18,7°C. Las diferencias halladas con respecto a los anteriores valores radican en que en esta oportunidad se está trabajando con los días que se encuentran por debajo del valor de corte, es por ello que las magnitudes son menores. Los últimos 20 años del registro presentan un valor medio de 17,85 °C. Presentando en esta oportunidad un aumento de 1,23 °C en los 100 años. La tendencia lineal desde 1984 no es significativa, por lo que promediar los últimos 20 años es una buena aproximación para comparar un período inicial con otro final.

En el caso de las temperaturas mínimas el valor de corte que define al semestre es 10,99°C. Nuevamente la duración del semestre presenta una marcada tendencia negativa. El año de mayor duración es 1924 con 209 días en donde la temperatura mínima suavizada mediante el primer armónico se encuentra por debajo de dicho valor, lo que estaría mostrando que el período frío duró aproximadamente 7 meses. Por otro lado, el año de menor duración es 1997 con 108 días de duración, es decir dos meses y medio menos que la duración “ideal”. En los últimos años del registro la duración del semestre frío presenta variabilidad pero no así una tendencia negativa significativa desde 1970. Al igual que en las temperaturas máximas se toman los últimos 20 años para ver la variación con respecto al estado natural. En dicho estado la duración promedio es de 181 días, mientras que al fin del registro el valor desciende a 128 días, es decir se perdieron 53 días fríos. (Figura 9).

Analizando la variación de las temperaturas mínimas medias en los semestres fríos, para el

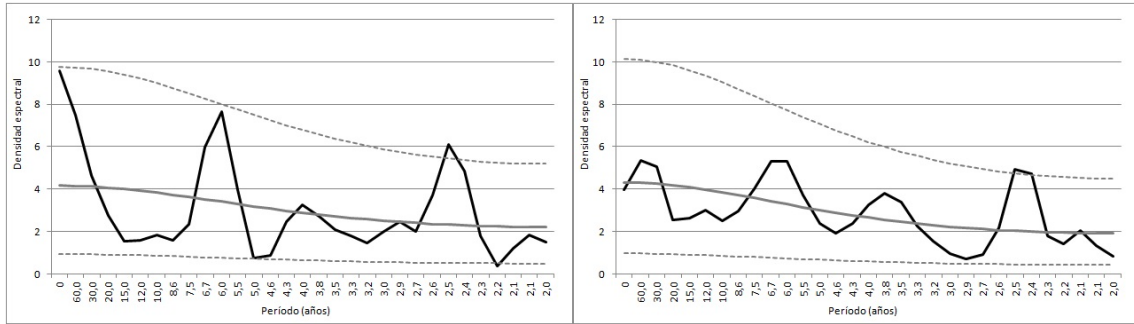


Figura 8: Análisis espectral de las amplitudes del primer armónico para las temperaturas máximas (izquierda) y las temperaturas mínimas (derecha). (95 % de significancia).

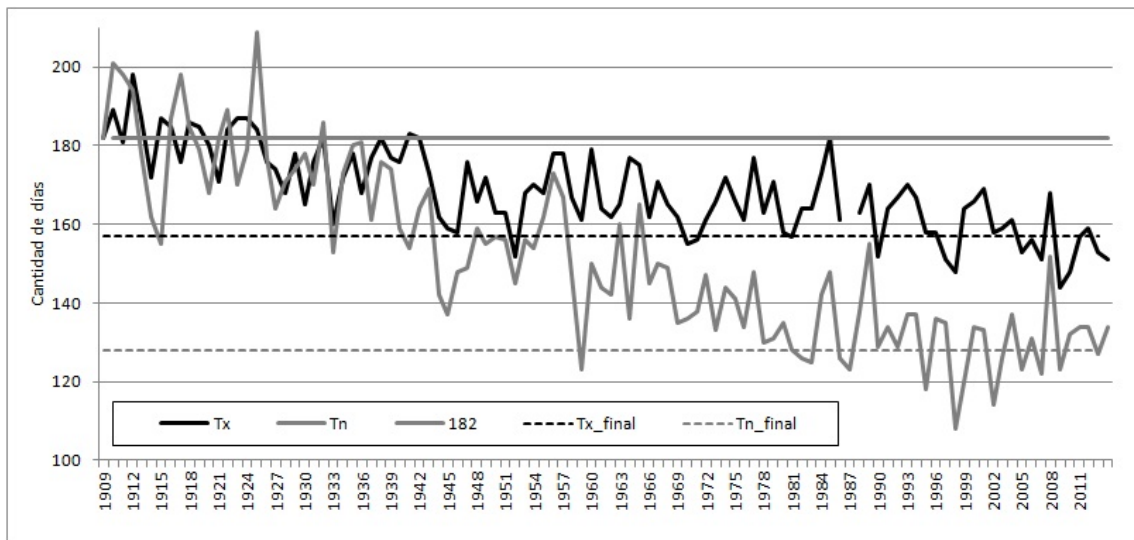


Figura 9: Cantidad de días que se encuentran por debajo del valor de corte (línea negra llena: máximas- línea gris llena: mínimas). En línea horizontal llena se presenta la longitud del semestre ideal, es decir los 182 días fríos que se deberían tener al dividir al año en 6 meses fríos y 6 meses cálidos. En línea a trazos es la duración media de los últimos 20 años del registro para cada temperatura.

caso en que se toman siempre los 182 días del semestre, en los primeros años del estado natural la temperatura promedio es de 7,01 °C, mientras que si se promedian los últimos 20 años el valor asciende a 9,76°C. Lo que está indicando un aumento de 2,75°C en 100 años, incremento mayor al sufrido por las temperaturas máximas.

En el caso en donde se toma el promedio para los días de cada semestre frío definido por el valor de corte, la temperatura en los 20 años del estado natural presenta un valor de 6,98°C, y al final el registro medio es de 8,7°C, mostrando

un aumento de 1,7°C en 100 años, nuevamente un mayor incremento al presentado por las temperaturas máximas. (Figura 10).

El estudio de la tendencia lineal a lo largo de los más de 100 años para el caso de las temperaturas mínimas promedio de los semestres presenta particularidades con respecto a las temperaturas máximas. Estas últimas al calcular la tendencia lineal acumulada presentan períodos sin tendencia significativa al comienzo y al fin del registro y en el medio una clara tendencia positiva. En cambio las temperaturas mínimas

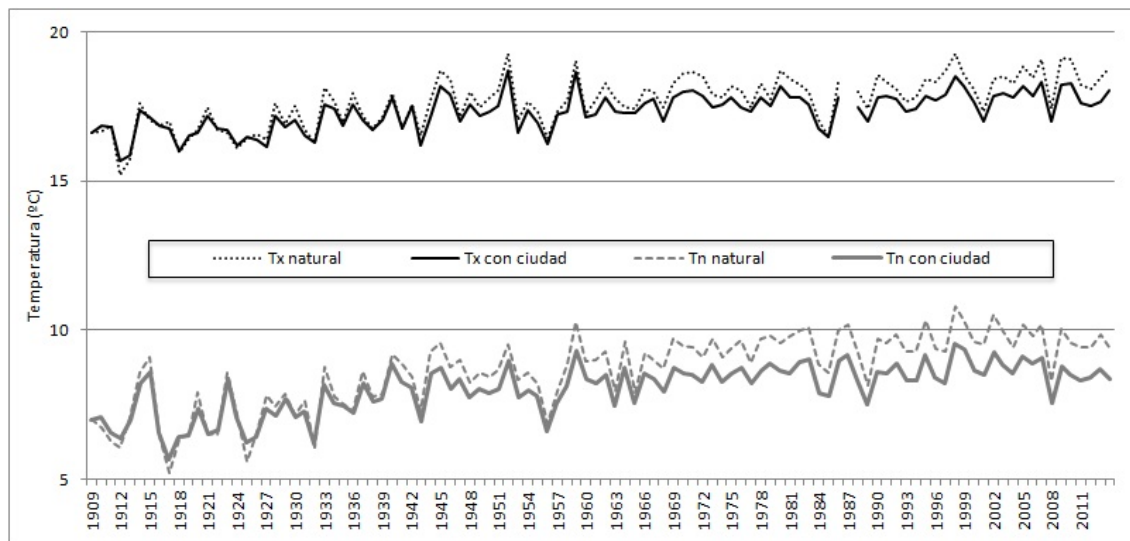


Figura 10: Evolución de la temperatura máxima y mínima media en el período frío. La curva “natural” es el promedio de los mismos 182 días que se obtienen del armónico anual de la ciudad natural (primeros 20 años). La curva “con ciudad” es el promedio de los días que se encuentran por debajo del valor de corte para cada año en particular.

tienen un comportamiento más variable, al comienzo del registro en los años del período natural la tendencia comienza a ser significativa alrededor de los primeros 30 años, desde mitad del registro la serie tiene períodos con y sin significancia que alternan en signo.

3.5. Evolución de la intensidad del semestre frío

Como otro de los parámetros para caracterizar el período frío se analiza la intensidad media para cada semestre frío: como primer paso se calculan las anomalías diarias con respecto al estado natural. Luego para cada año se obtienen las sumatorias de las anomalías positivas y negativas. Este cálculo permite también obtener la cantidad de días que aportan a cada tipo de anomalía. En adelante llamaremos a estas variables: suma positiva, suma negativa, días positivos y días negativos. Se realizan promedios decadales de las mismas a fin de analizar su variabilidad a lo largo del siglo, comenzando por la década 1909-18 y finalizando en el último período 2009-13.

Para las temperaturas máximas los valores medios decadales de la suma positiva presentan

un aumento a lo largo de los años, que se ve reflejado en una disminución de la suma negativa (figura 11). Estos aumentos no presentan una variación lineal, ya que visualmente se pueden observar escalonamientos progresivos en los valores medios. A su vez, las distribuciones sufren alteraciones en sus parámetros, las sumas positivas son las que mayor variabilidad presentan dentro de cada década, esto es posible observarlo en los valores de máximos y mínimos y con el rango entre cuartiles. La suma negativa presenta una distribución decadal con mayor curtosis que la suma positiva.

Para las temperaturas mínimas los aumentos de ambas sumas son similares a los ya mencionados, pero es notorio como la suma negativa tiene un comportamiento asintótico alrededor de 100°C desde la década de 1960 con muy poca variabilidad en el rango intercuartil. La particularidad de la suma positiva es el amplio rango en los valores extremos.

La suma de cantidad de días que aportan en particular cada extremo siempre es 182 días, pero a lo largo del registro se observa el comportamiento esperable de que los días

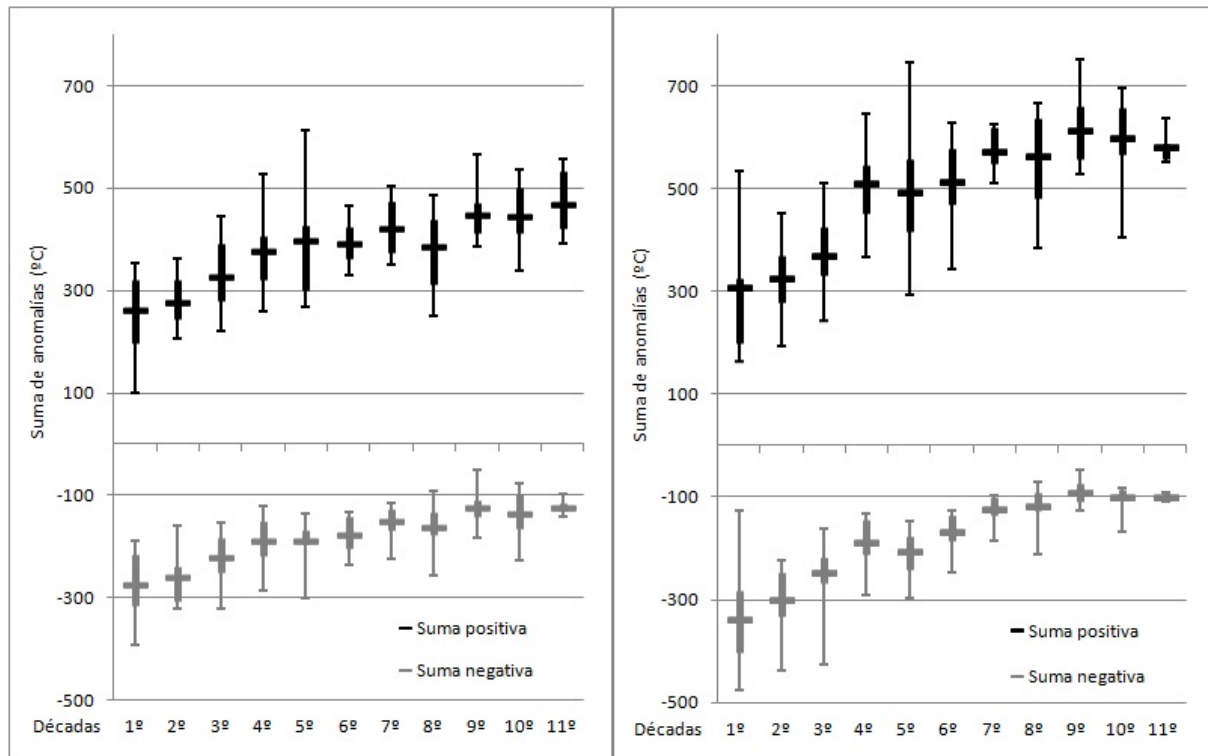


Figura 11: Promedio decadal de la suma de las anomalías de temperatura entre el dato original y el armónico del estado natural para los casos positivos y negativos. En barra horizontal gruesa se presenta el valor medio, en barra vertical gruesa los valores de los cuartiles correspondientes al 25 % y 75 % y en barra vertical fina el valor máximo y mínimo decadal. Temperaturas máximas (mínimas) panel de la izquierda (derecha).

positivos se incrementen a expensas de los días negativos (figura 12).

Para las temperaturas máximas en las primeras décadas se observa que los valores medios son similares en ambas cantidades de días presentando mayores valores los días negativos en las 2 primeras décadas. Pero este comportamiento rápidamente se revierte llegando en las últimas décadas a que los días positivos duplican en valor a los negativos. Ambas cantidades de días presentan una fuerte variabilidad en sus distribuciones a lo largo del registro, tanto en sus valores extremos como en la forma de la misma.

Con las temperaturas mínimas no se encuentran muchas diferencias, lo que sí es observable es que la cantidad de días positivos triplica a la de negativos en las últimas décadas. Al igual que

con las temperaturas máximas las distribuciones de ambas cantidades de días varían en su forma y asimetría.

3.6. Homogeneidad de los meses invernales

Los pronósticos estacionales identifican a los inviernos como fríos o cálidos, pero muchas veces esto no es representativo de los meses que los componen. En las siguientes figuras se presenta el porcentaje de meses que se encuentra en las mismas categorías en la que está definida el invierno. Ya que el semestre frío presenta una variación en su inicio y fin, que comprende principalmente los meses de abril y mayo para el inicio y los meses de septiembre y octubre para el fin, se decide analizar el comportamiento de los 5 meses que en la mayoría de los años integran el “semestre” frío, ellos son: mayo,

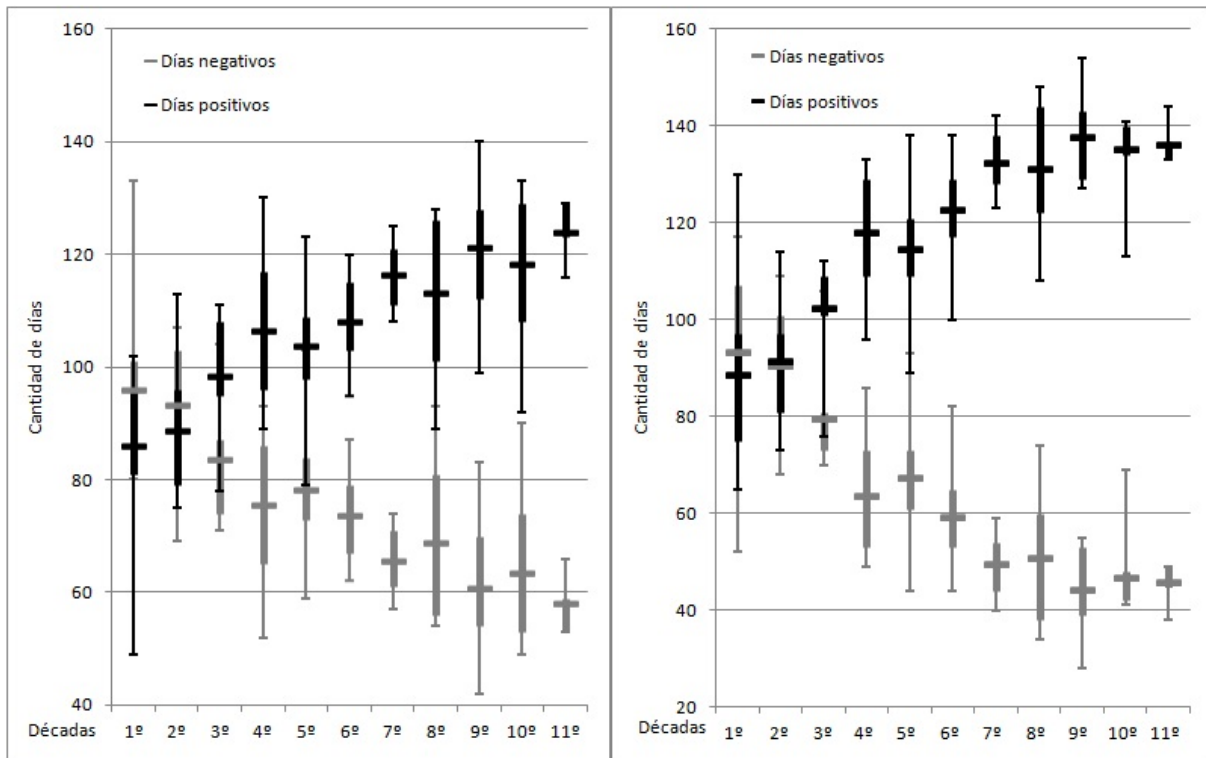


Figura 12: Promedio decadal de la cantidad de días que se encuentran por debajo (encima) del valor del armónico correspondiente para cada uno de los 182 días del semestre frío. Días negativos (positivos) en línea gris (negra). En barra horizontal gruesa se presenta el valor medio, en barra vertical gruesa los valores de los cuartiles correspondientes 25 % y 75 % y en barra vertical fina el valor máximo y mínimo decadal. Temperaturas máximas (mínimas) panel de la izquierda (derecha).

junio, julio, agosto y septiembre. Al promedio de temperaturas de estos meses se los dividió en terciles llamándolos: frío, normal y cálido. El mismo procedimiento se realizó para cada mes en particular. Es por ello que para analizar la homogeneidad del período frío y del invierno (junio, julio y agosto) se contabilizó para cada año la cantidad de meses que presentan la misma característica de frío, normal y cálido. La cantidad de meses puede variar entre 5 meses a ningún mes. (Figuras 13 y 14).

Los años en que los semestres / inviernos son homogéneos no siempre se repiten para ambas temperaturas. Los inviernos homogéneos están incluidos en los semestres. Los períodos fríos que entran en la categoría fría son más homogéneos que los cálidos para ambas temperaturas extremas. Solo en tres oportunidades a comienzo

de siglo se observa que para ambas temperaturas el semestre es homogéneo. En el caso del invierno las distribuciones de los eventos fríos o cálidos de ambas temperaturas no presentan muchas diferencias.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizan las variaciones que sufrieron las temperaturas extremas en la ciudad de Buenos Aires a lo largo del siglo XX, demostrándose que los datos de OCBA son representativos de una zona más amplia en estas variables. Se trabaja con el estado natural (primeros 20 años del registro) pretendiendo cuantificar los cambios en las temperaturas durante los periodos invernales por el incremento poblacional como principal causa.

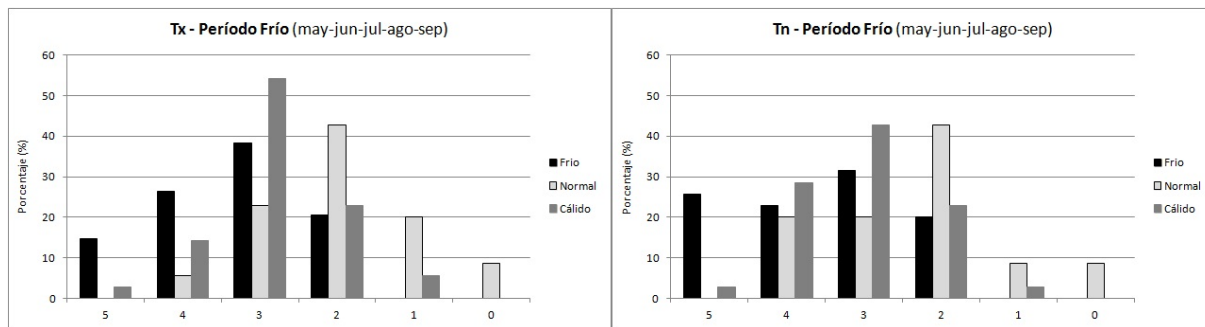


Figura 13: Porcentaje de meses en igual categoría que el período frío analizado mediante las temperaturas máximas (izquierda) y mínimas (derecha).

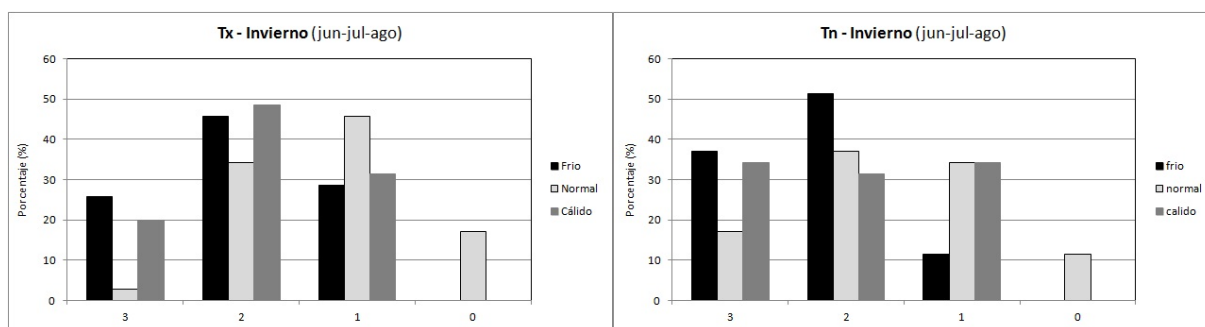


Figura 14: Porcentaje de meses en igual categoría que el invierno analizado mediante las temperaturas máximas.

Las temperaturas máximas en este período sufrieron aumentos siendo los mismos mayores en los meses de invierno que en los de verano. Una situación opuesta sucede con las temperaturas mínimas, en los veranos el aumento fue mayor. Esto estaría indicando un mayor rango diario en los meses de invierno. Las amplitudes con respecto al estado natural presentan un comportamiento errático para las mínimas. En las máximas, luego de los años sesenta en la mayoría de los casos presentan una menor amplitud, es decir la variabilidad dentro del año disminuye.

En lo que se refiere a los resultados del período frío propiamente dicho se estudian diferentes propiedades. La longitud de semestre frío de 182 días para el estado natural se ve reducida en aproximadamente 2 meses para las temperaturas mínimas y 1 mes para las temperaturas máximas. Nuevamente este resultado está mostrando que son las mínimas las que mayor incremento

presentaron.

Ambas temperaturas sufrieron aumentos en el período frío, al tomar los 182 días de semestre frío las máximas aumentan $1,85^{\circ}\text{C}$ y las mínimas $2,75^{\circ}\text{C}$, mientras que si solo se analizan los días que se encuentran por debajo del valor de corte, los aumentos son de $1,23^{\circ}\text{C}$ y $1,7^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Estos resultados siguen mostrando que son las temperaturas mínimas las que mayores variaciones sufrieron y cabe aclarar que estos aumentos se minimizan para los últimos veinte años del registro, coincidiendo con igual efecto en el aumento de población.

Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia de un periodo frío / invierno homogéneo (cálido, medio o frío) es muy baja, esto estaría limitando el uso del término de invierno con una determinada condición (ejemplo: invierno cálido).

Este trabajo permite reconstruir dos series

de referencia para OCBA de records mayores a 100 años: una llamada “estado natural” donde se ha extraído el efecto de la tendencia suponiendo que toda ella está definida por el efecto antropogénico, y otra serie llamada “estado actual/antropogénico” que consiste en sumarle a la muestra original la tendencia. Cabe aclarar que bajo los efectos prácticos de un análisis por diagnóstico se advierte que la tendencia no es estrictamente lineal para el periodo completo, ya que existen sub-períodos sin tendencia significativa.

Agradecimientos: Los autores agradecen los valiosos comentarios realizados por los revisores anónimos. Agradecen al Dr. Pablo Leal por la asistencia en el procesamiento gráfico. Este trabajo fue realizado gracias a los subsidios de la Universidad de Buenos Aires 2002130300014BA y del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica PICT 2012-1507.

REFERENCIAS

- Barrucand, M. y Rusticucci, M., 2001. Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. *Variabilidad temporal y regional. Meteorológica*, 16, 85-101.
- Camilloni, I. y Barros, V., 1997. On the urban heat island effect dependence on temperature trends. *Climate Change*, 37, 665-681.
- Camilloni, I. y Barrucand, M., 2012. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 47-58.
- Christidis, N., Stott, P., Brwn, S., Hegerl, G., Caesar, J.k 2005. Detection of changes in temperature extremes during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters* 32, L20716, DOI:10.1029/2005GL023885.
- Dahech, S. y Beltrando, G., 2012. Observed temperature evolution in the City of Sfax (Middle Eastern Tunisia) for the period 1950-2007. *Climate Change*, 114, 689-706.
- DeGaetano, A., 1996. Recent trends in maximum and minimum temperature threshold exceedences in the northeastern United States. *Journal of Climate*, 9, 1646-1660.
- Easterling, D., Horton, B., Jones, P., Peterson, T., Karl, T., Parker, D., Salinger, M., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P. y Folland, C., 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-367.
- Griffiths, M., Bradley, R., 2007. Variations of twentieth-century temperatura and precipitation extreme indicators in the northeast United States. *Journal of Climate*, 20, 5401-5417.
- Hoffmann, J., 1975. Atlas climático de Sud América. Organización Meteorológica Mundial.
- Jaagus, J. y Ahas, R., 2000. Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *Climate Research*, 15, 207-219.
- Jaagus, J., Truu, J., Ahas, R. y Aasa, A., 2003. Spatial and temporal variability of climatic seasons on the East European Plain in relation to large-scale atmospheric circulation. *Climate Research*, 23, 111-129.
- López de la Franca, N., Sánchez, E., Domínguez, M., 2013. Changes in the onset and length of seasons from an ensemble of regional climate models over Spain for future climate conditions. *Theoretical Applied Climatology* 114, 635-642.
- Mann, M. y Park, J., 1996. Greenhouse warming and changes in the seasonal cycle of temperature: model versus observations. *Geophysical Research Letters*, 23, 1111-1114.
- Martínez, M.D., Serra, C., Burgueño, A. y Lana, X., 2010. Time trends of daily maximum and minimum temperature in Catalonia (ne Spain) for the period 1975-2004. *International Journal of Climatology*, 30, 267-290.
- Morerg, A., Jones, P., 2005. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in Central and Western Europe, 1901-99. *International Journal of Climatology*, 25, 1149-1171.
- OMM, 1966. Nota Técnica N°79 de la

Organización Meteorológica Mundial sobre el Cambio Climático.

- Qian, C., Fu, C., Wu, Z. y Yan, Z., 2009. On the secular change of spring onset at Stockholm. *Geophysical Research Letters*, 36(12) L12706. DOI: 10.1029/2009GL38617.
- Rusticucci, M. y Barrucand, M., 2004. Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *Journal of Climate*, 17, 4099-4107.
- Rusticucci, M., Vargas, W., 1991. Efecto de la ciudad y el río sobre la temperatura de superficie en Buenos Aires. *GEOACTA*, 18, 35-48.
- Serra, C. Burgueño, A. and Lana, X., 2001. Analysis of maximum and minimum daily temperatures recorded at Fabra Observatory (Barcelona, NE Spain) in the period 1917-1998. *International Journal of Climatology*, 21, 617-636.
- Wallace, C. and Osborn, T., 2002. Recent and future modulation on the annual cycle. *Climate Research*, 22, 1-11.
- Wilks, D., 2006. *Statistics Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series 91. Ed. Elsevier.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.