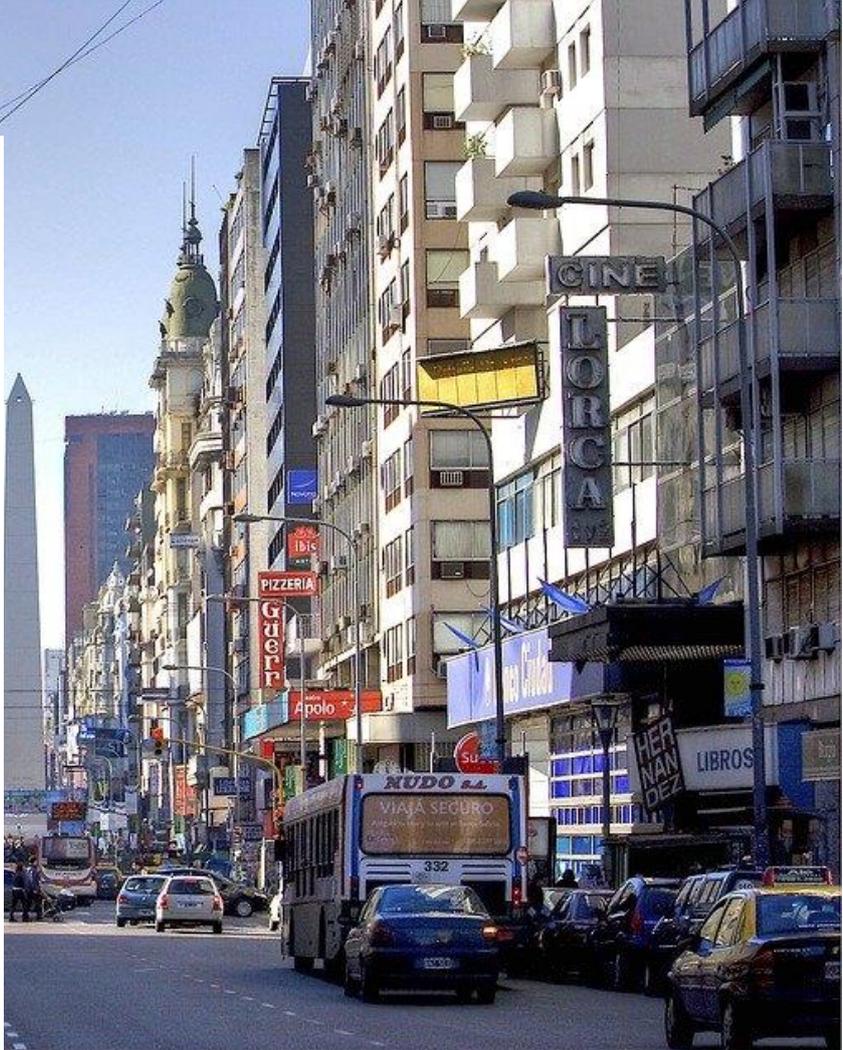


INFORME #2

Cambios observados en el clima de la ciudad de Buenos Aires

*Licitación Pública N°8933-0972-LPU19
"Servicio de Consultoría Tema
Cambio Climático"*

Inés Camilloni
Agosto 2020



1. Introducción

El clima de la ciudad de Buenos Aires está caracterizado por su ubicación en el centro-este del país sobre la margen occidental del Río de la Plata: húmedo con una estación cálida prolongada y con inviernos con escasas precipitaciones que ocurren mayormente asociadas a irrupciones de sistemas frontales. La circulación atmosférica está dominada por el centro anticiclónico semipermanente del Atlántico Sur que favorece que los vientos más frecuentes sean los provenientes del cuadrante noreste. Entre el otoño y la primavera se producen formaciones de sistemas de baja presión (ciclogénesis) generalmente al norte de Buenos Aires que en ocasiones pueden afectar el Río de la Plata causando vientos intensos del sector sur-sudeste ("sudestadas") y que desencadenan crecidas e inundaciones en la zona ribereña. En las últimas décadas se han evidenciado cambios en el clima del área donde está emplazada la ciudad principalmente asociados a los incrementos de la temperatura y de la precipitación (Barros y Camilloni, 2016). En el presente informe se realiza una evaluación detallada de los cambios observados en la ciudad de Buenos Aires para un conjunto de variables climáticas: temperatura media, temperatura mínima y temperatura máxima y de fenómenos como precipitaciones intensas, olas de calor y "sudestadas" así como también de la isla urbana de calor.

2. Información utilizada

El análisis presentado en este informe fue realizado utilizando la información meteorológica correspondiente a las estaciones Aeroparque y Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) pertenecientes a la red de medición del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Ambas estaciones se encuentran emplazadas dentro de los límites administrativos de la ciudad y si bien sólo distan entre sí aproximadamente 10 kilómetros, muestran algunas diferencias en sus propiedades atmosféricas debido a que Aeroparque está localizada junto al Río de la Plata mientras que el Observatorio Central Buenos Aires se ubica en su centro geográfico. Para comparar las características propias de la atmósfera urbana de Buenos Aires, se utiliza también la información correspondiente la estación Ezeiza operada por el SMN. Esta estación meteorológica, fuera de los límites de la ciudad puede ser considerada referencia de las condiciones climáticas suburbanas/rurales del entorno de Buenos Aires. En la Tabla 1 se listan las estaciones seleccionadas así como sus coordenadas geográficas. La información climática analizada corresponde mayoritariamente al período 1960-2018.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas.

Estación	Latitud (S)	Longitud (O)	Altura sobre el nivel del mar (m)
<i>Aeroparque</i>	34°34'	58°25'	6
<i>Buenos Aires Observatorio Central (OCBA)</i>	34°35'	58°29'	25
<i>Ezeiza</i>	34°49'	58°32'	20

3. *Temperatura media*

En esta sección se presenta la evolución anual de la temperatura media en las estaciones Aeroparque y OCBA para el período 1960-2018 para los promedios anual (Figura 1) y estacional (Figura 2). Las tendencias se encuentran detalladas en la Tabla 2. Si bien en todos los casos es posible apreciar variabilidad interanual, se encuentra una tendencia al calentamiento que en OCBA es máxima durante el verano (+0.21°C/10 años) y en Aeroparque en la primavera (+0.23°C/10 años). En el promedio anual, ambas estaciones meteorológicas presentan iguales tendencias (+0.18°C/10 años) que superan levemente a la de la temperatura global (+0.17°C/10 años) para el mismo período.

Las Figuras 3 y 4 muestran la evolución de los promedios decadales de la temperatura media anual (Figura 3) y estacional (Figura 4) en OCBA y Aeroparque. Se consideran las décadas 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 y el período de 9 años entre 2010 y 2018. Entre el último período y la primer década el incremento de la temperatura media anual es 0.9°C en OCBA y 1°C en Aeroparque. A nivel estacional, el mayor calentamiento del área urbana entre ambos períodos se registra durante el verano (1.2°C en OCBA y 1.3°C en Aeroparque) y es mínimo durante el invierno (0.6°C en ambas estaciones).

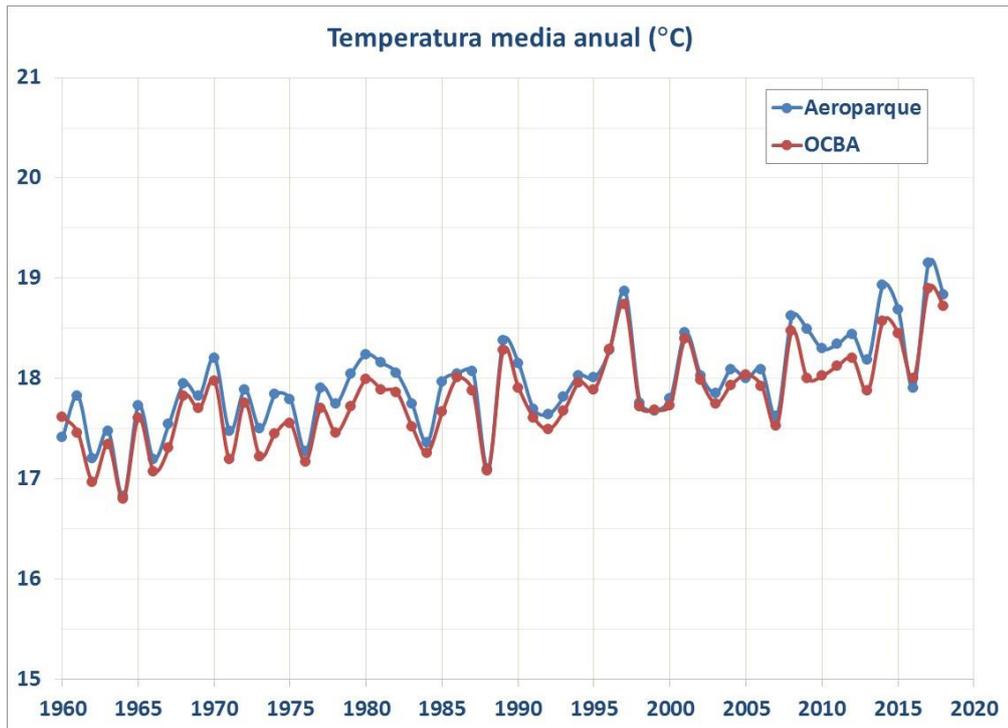


Figura 1. Temperatura media anual en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

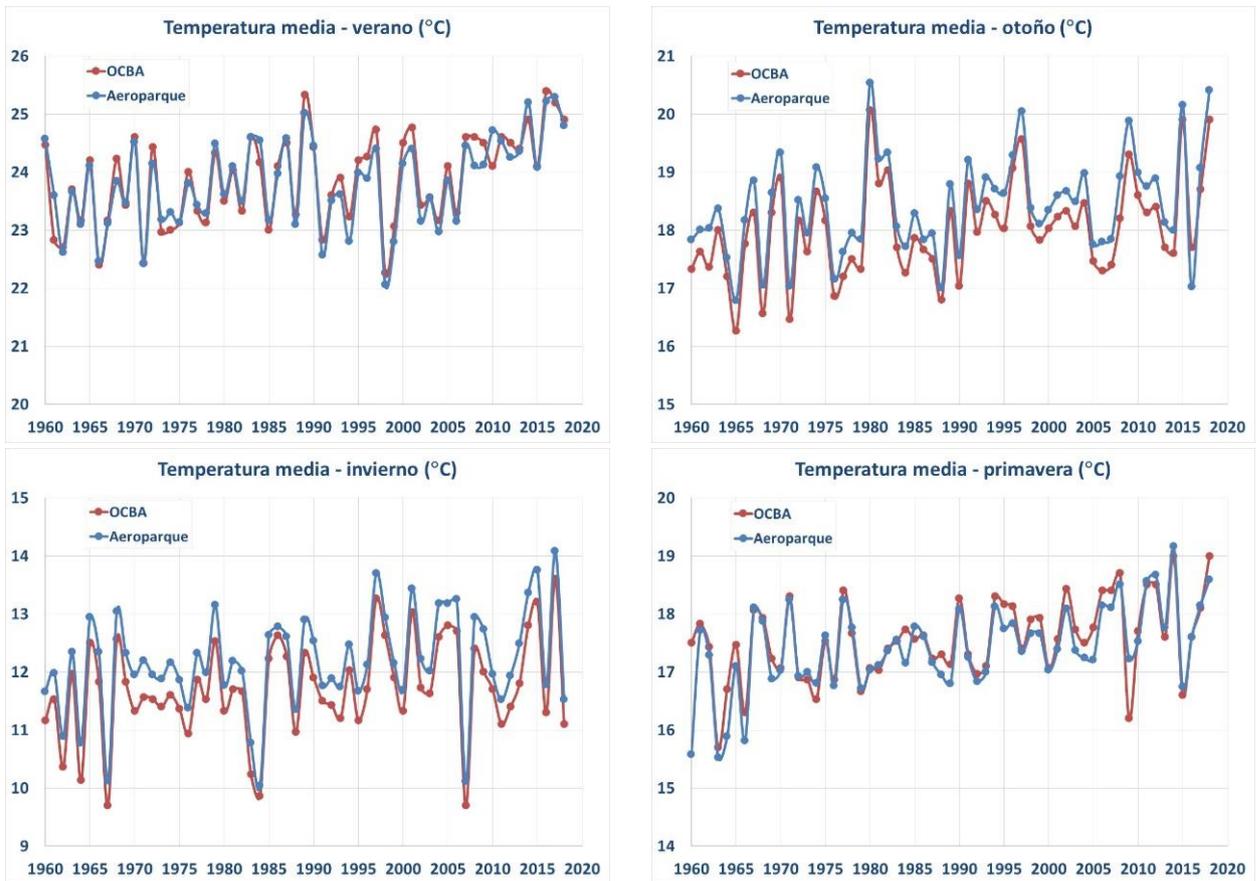


Figura 2. Temperatura media estacional en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

Tabla 2. Tendencias de la temperatura media (°C/10 años).

Periodo	OCBA	Aeroparque
<i>Verano</i>	+0.21	+0.17
<i>Otoño</i>	+0.18	+0.16
<i>Invierno</i>	+0.16	+0.15
<i>Primavera</i>	+0.18	+0.23
<i>Anual</i>	+0.18	+0.18

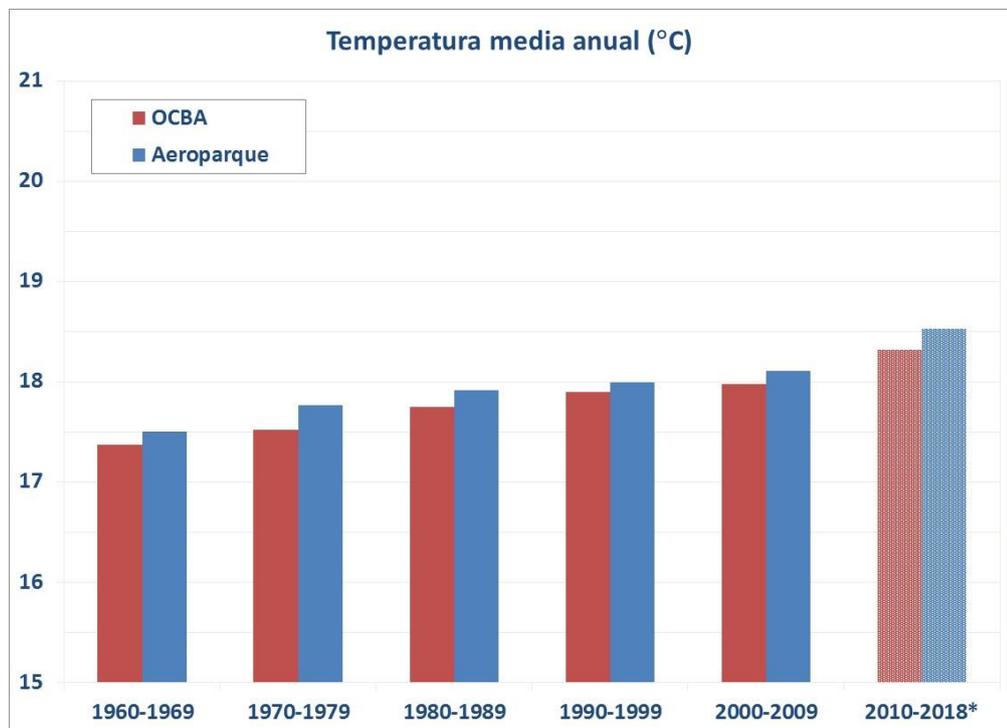


Figura 3. Temperatura media anual en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

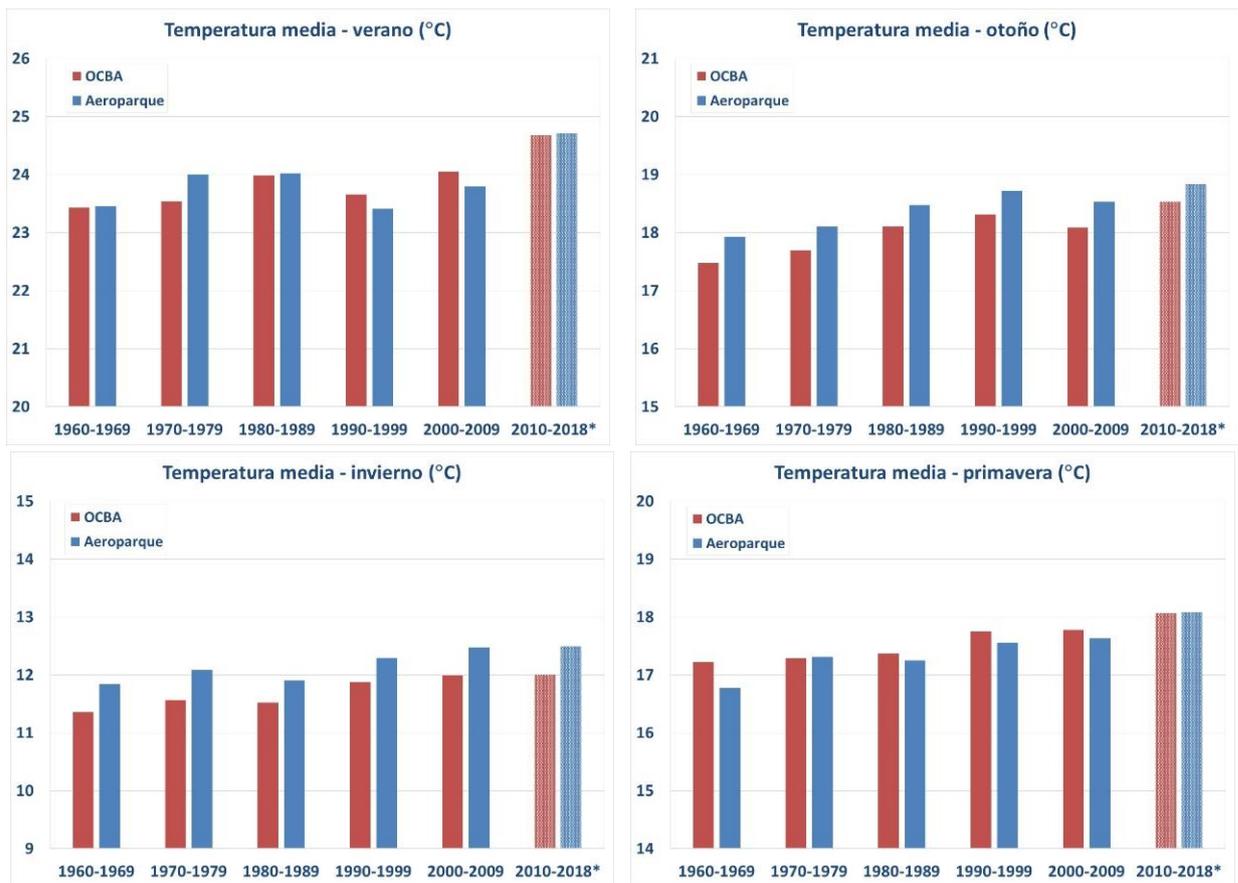


Figura 4. Temperatura media estacional en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

4. Temperatura mínima

Las Figuras 5 y 6 presentan la evolución anual de la temperatura mínima media anual (Figura 5) y estacional (Figura 6) en las estaciones urbanas consideradas mientras que las correspondientes tendencias se indican en la Tabla 3. En todos los casos las tendencias obtenidas indican calentamiento y superan a las de la temperatura media (Tabla 2). Las diferencias entre las estaciones OCBA y Aeroparque son también más importantes, siendo las temperaturas mínimas prácticamente siempre superiores en esta última estación (la única excepción es el año 1961) y mostrando a nivel anual el máximo calentamiento en Aeroparque (+0.27°C/10 años) frente al de OCBA (+0.22°C/10 años). El verano, invierno y primavera presentan mayores tendencias en Aeroparque respecto de OCBA tomando el máximo valor en verano (+0.29°C/10 años).

La evolución de las temperatura mínima anual y estacional para cada década se presenta en las Figuras 6 y 7 respectivamente. Entre el primer y el último período el incremento de la temperatura mínima anual es de 1.2°C en OCBA y 1.7°C en Aeroparque. En los casos estacionales, el verano presenta un aumento máximo de 1.6°C en ambas estaciones mientras que es mínimo en invierno (0.6°C en OCBA y 1.2°C en Aeroparque).

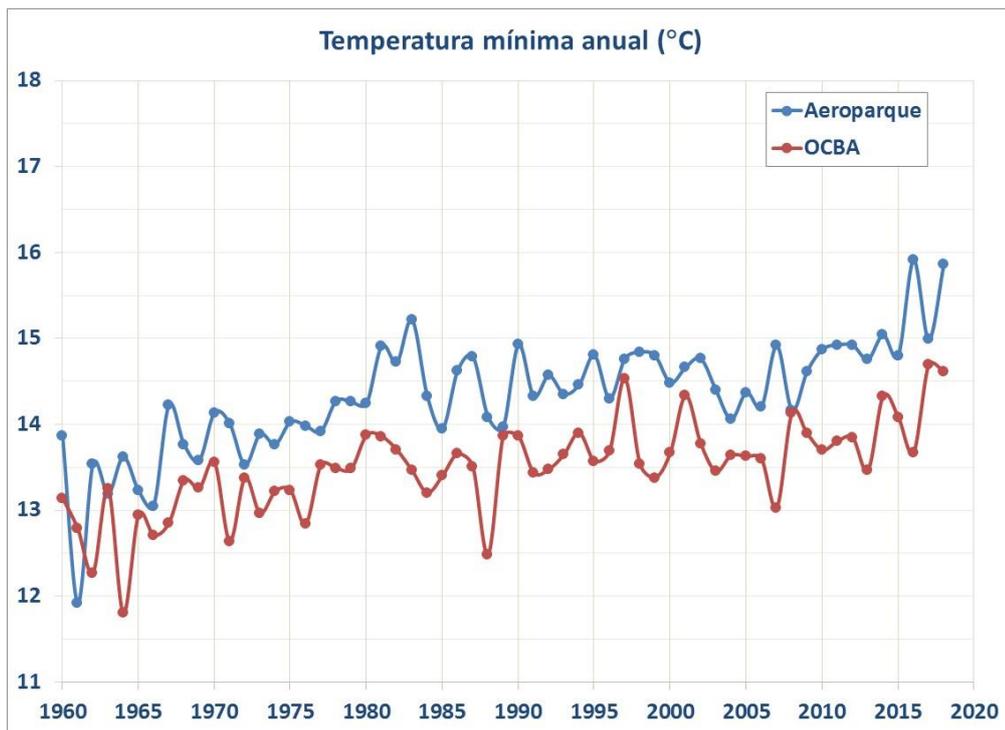


Figura 5. Temperatura mínima media anual en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

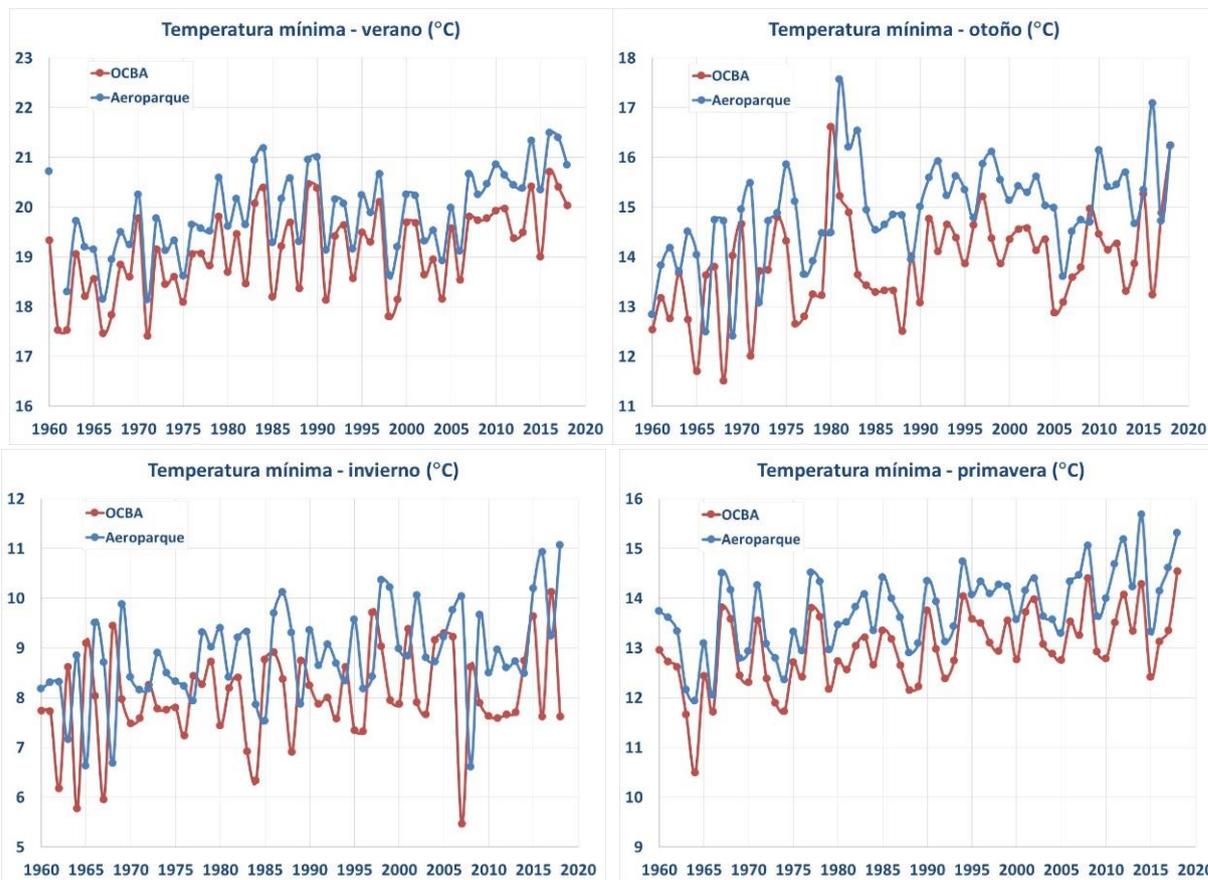


Figura 6. Temperatura mínima estacional en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

Tabla 3. Tendencias de la temperatura mínima (°C/10 años).

Periodo	OCBA	Aeroparque
<i>Verano</i>	+0.22	+0.29
<i>Otoño</i>	+0.26	+0.25
<i>Invierno</i>	+0.24	+0.28
<i>Primavera</i>	+0.14	+0.24
<i>Anual</i>	+0.22	+0.27

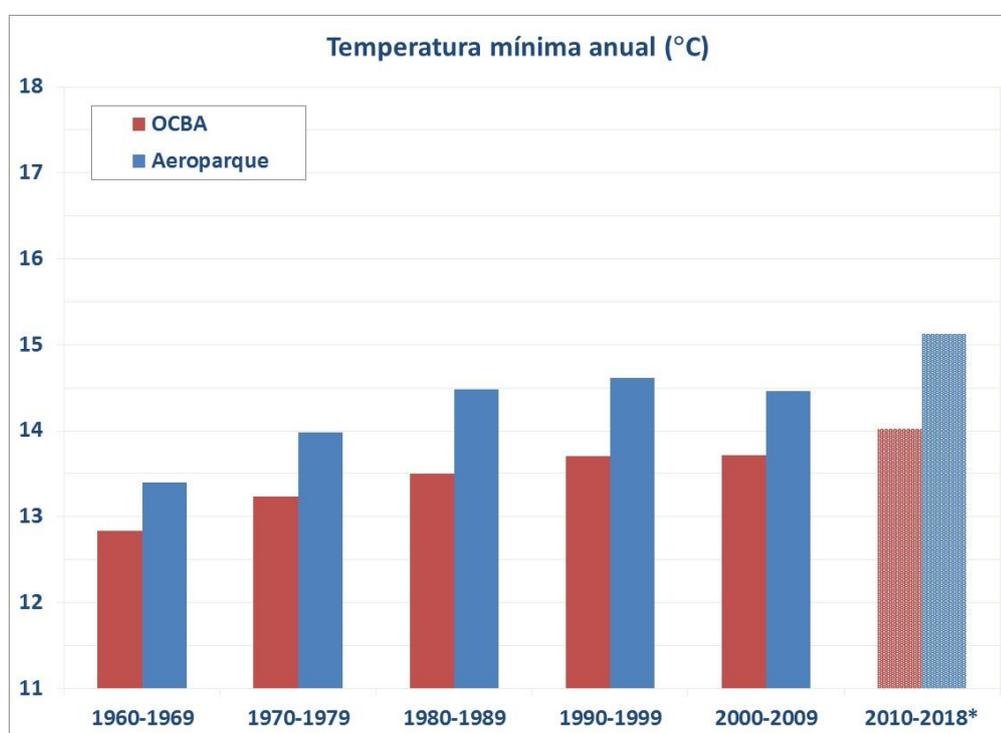


Figura 7. Temperatura mínima anual en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

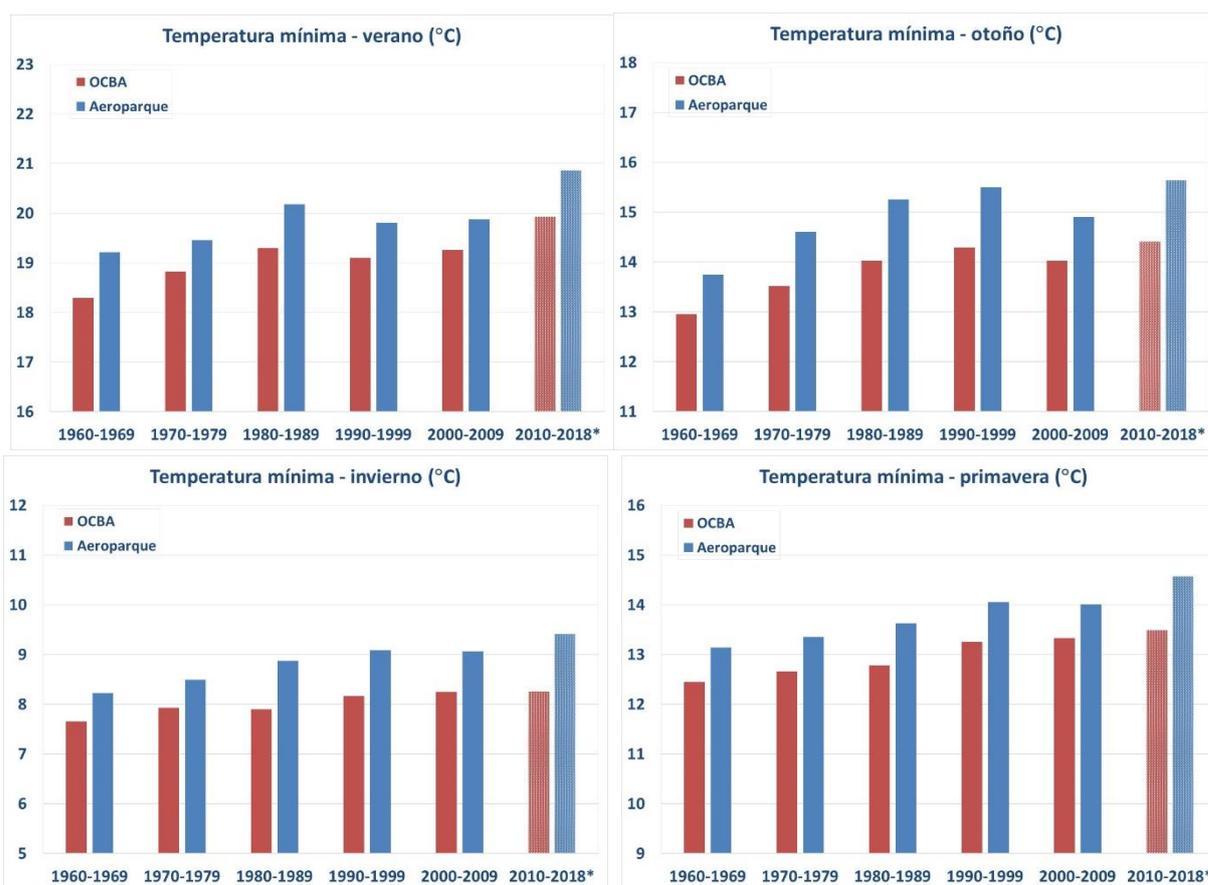


Figura 8. Temperatura mínima estacional en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

5. Temperatura máxima

La evolución anual de la temperatura máxima en las estaciones OCBA y Aeroparque se presenta en las Figuras 9 (media anual) y 10 (promedios estacionales) mientras que las tendencias correspondientes se encuentran en la Tabla 4. A diferencia de lo observado para la temperatura mínima media (Figura 5), la temperatura máxima media anual es siempre superior en OCBA (Figura 9). Esta estación presenta también la máxima tendencia al calentamiento ($+0.22^{\circ}\text{C}/10$ años) frente al computado para Aeroparque ($+0.12^{\circ}\text{C}/10$ años). Las tendencias estacionales son en todos los casos también superiores en OCBA registrando el máximo durante el otoño ($+0.21^{\circ}\text{C}/10$ años).

Las Figuras 11 y 12 presentan las temperaturas mínimas anual y estacional para ca década. Entre el primer y el último período el incremento de la temperatura máxima anual es de 0.9°C en OCBA y 1.1°C en Aeroparque. En los casos estacionales, el verano presenta un aumento máximo de 1.2°C en OCBA mientras que es mínimo en otoño (0.3°C) en la misma estación.

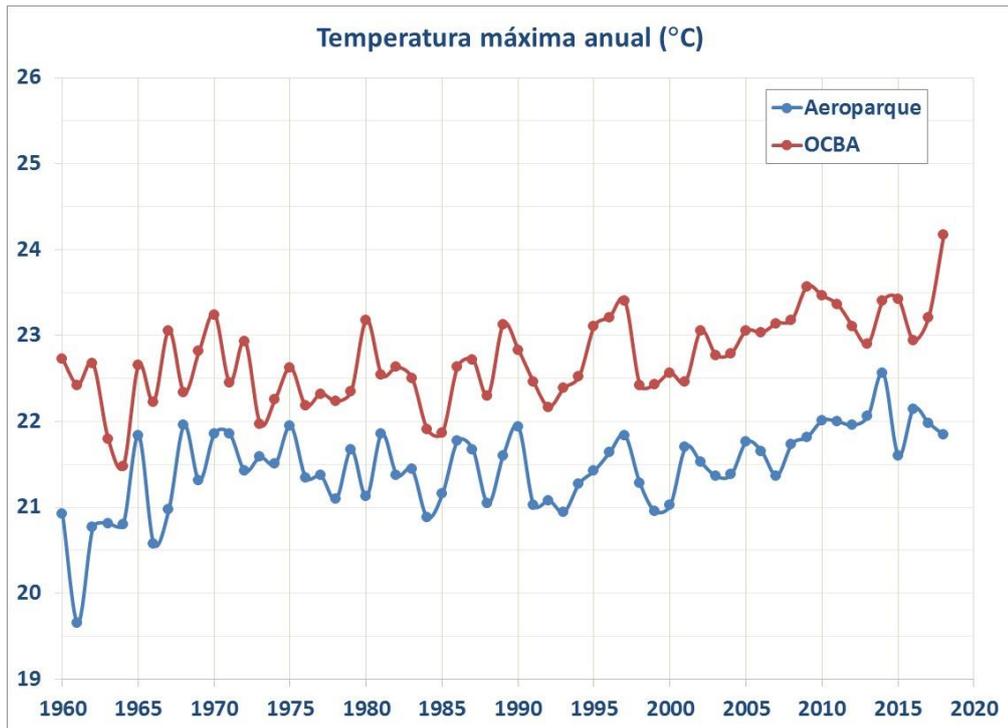


Figura 9. Temperatura máxima media anual en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

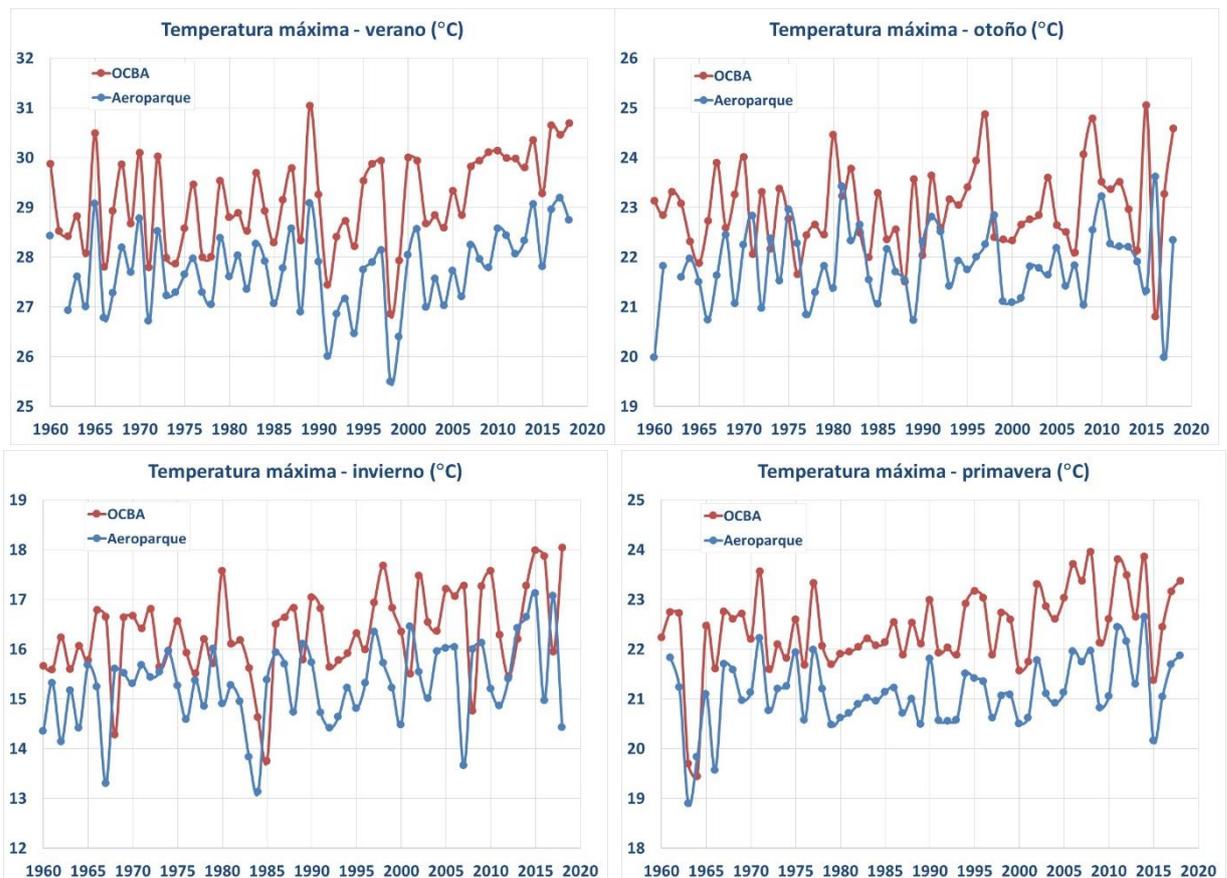


Figura 10. Temperatura máxima estacional en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

Tabla 4. Tendencias de la temperatura máxima (°C/10 años).

Periodo	OCBA	Aeroparque
<i>Verano</i>	+0.18	+0.15
<i>Otoño</i>	+0.21	+0.10
<i>Invierno</i>	+0.10	+0.07
<i>Primavera</i>	+0.20	+0.16
<i>Anual</i>	+0.22	+0.12

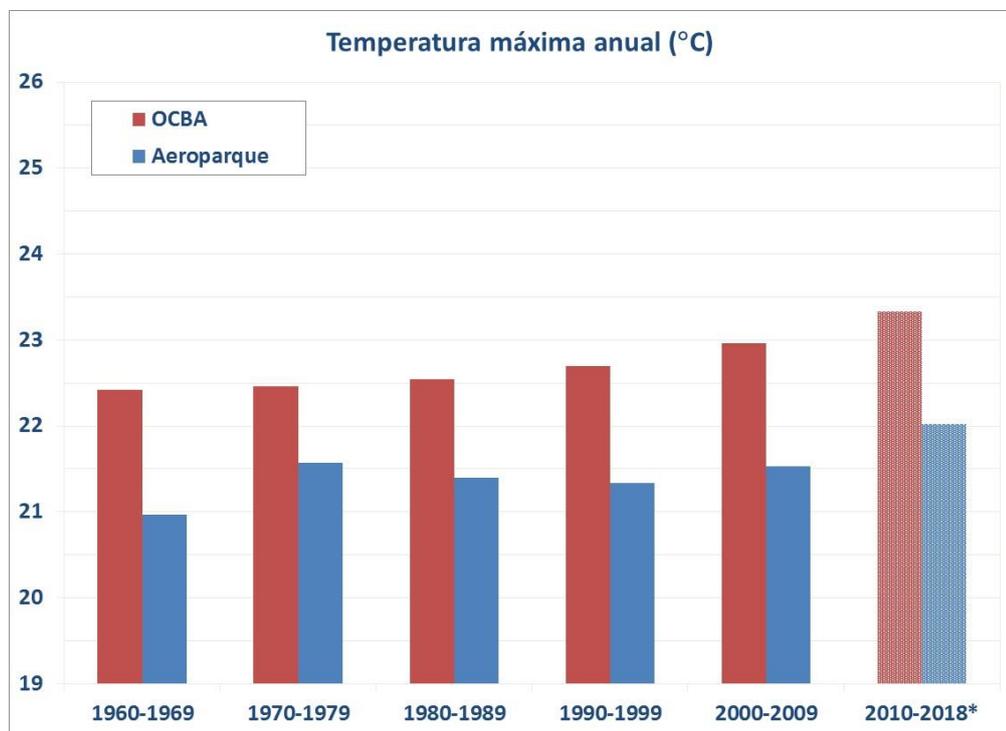


Figura 11. Temperatura máxima anual en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

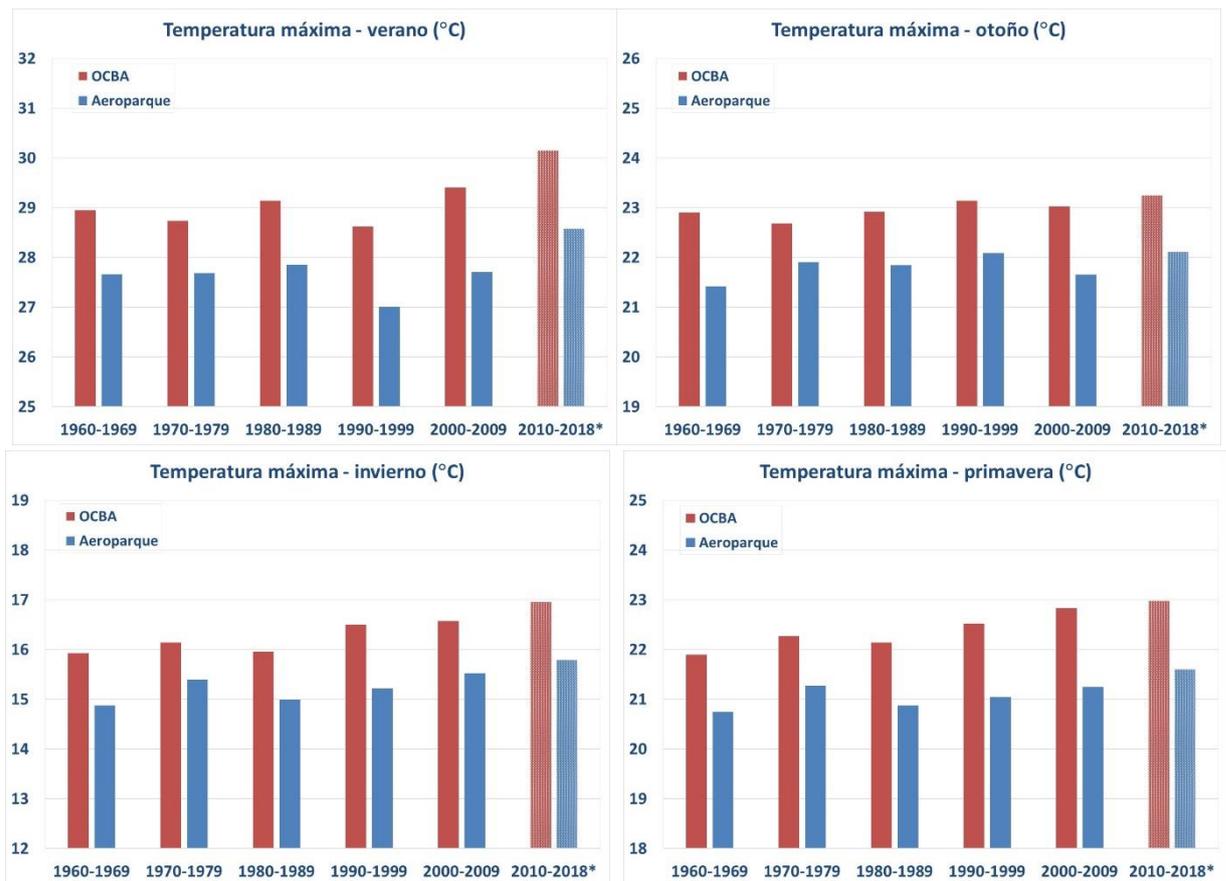


Figura 12. Temperatura máxima estacional en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

6. Precipitación

Las Figuras 13 y 14 muestran la evolución de la precipitación acumulada anual y estacional en las estaciones OCBA y Aeroparque para el período 1960-2018. En la Tabla 5 se presentan las correspondientes tendencias. En ambas estaciones meteorológicas se identifica una tendencia creciente en la precipitación acumulada que es mayor en OCBA (+55.1 mm/10 años) que en Aeroparque (+39.5 mm/10 años). Estos incrementos en ambas estaciones son mayormente explicados por el aumento de la precipitación en verano y otoño. Durante la primavera las tendencias son positivas mientras que en el invierno (estación seca) son casi nulas.

Asimismo, la evolución decadal de la precipitación acumulada a nivel anual y estacional en OCBA y Aeroparque se encuentra en las Figuras 15 y 16. En todos los casos se identifica que la precipitación en OCBA es aproximadamente un 10% superior a la registrada en Aeroparque. Esta característica podría deberse a la ubicación geográfica de la estación OCBA en el centro de la ciudad en comparación con Aeroparque que está localizada en el límite con el Río de la Plata. La precipitación es una de las variables climáticas que sufre modificaciones más significativas en ambientes urbanos siendo afectada por fenómenos como la isla urbana de calor que favorece la convección del aire que puede

iniciar la precipitación, el efecto de obstáculo de la ciudad que hace que el desplazamiento de los sistemas meteorológicos sea más lento sobre las zonas construidas y los contaminantes atmosféricos que actúan como núcleos de condensación (Oke et al., 2017). Es esperable que asociado a la ubicación de ambas estaciones meteorológicas en el ámbito de la ciudad, estos factores sean más relevantes en OCBA que en Aeroparque. Por otra parte, la comparación entre la década 1960-1969 y 2010-2018 muestra que el incremento de la precipitación anual es de 30% en OCBA y 29% en Aeroparque (Tabla 6).

La Figura 17 muestra el número medio anual de días con precipitación en las estaciones OCBA y Aeroparque para las diferentes décadas consideradas y la Tabla 7 indica el cambio de cada década respecto de 1960-1969. En general, no se identifican cambios significativos en los días con lluvia a diferencia con el aumento en la cantidad de precipitación acumulada (Figura 15). Combinando esta información, es posible computar la intensidad media diaria de un evento de precipitación para cada década analizada a partir del cociente entre la precipitación anual y el número de días con lluvia al año. Los resultados se muestran en la Figura 18 mientras que los cambios respecto de la década 1960-1969 se incluyen en la Tabla 8. Es posible apreciar una clara tendencia al aumento de la intensidad o torrencialidad de la precipitación. Este resultado es consistente con lo observado en diferentes regiones del mundo donde condiciones más cálidas están asociada a una mayor frecuencia de eventos de precipitación intensa (Karl y Knight, 1998; Groisman, 1999; Karl y Trenberth, 2003).

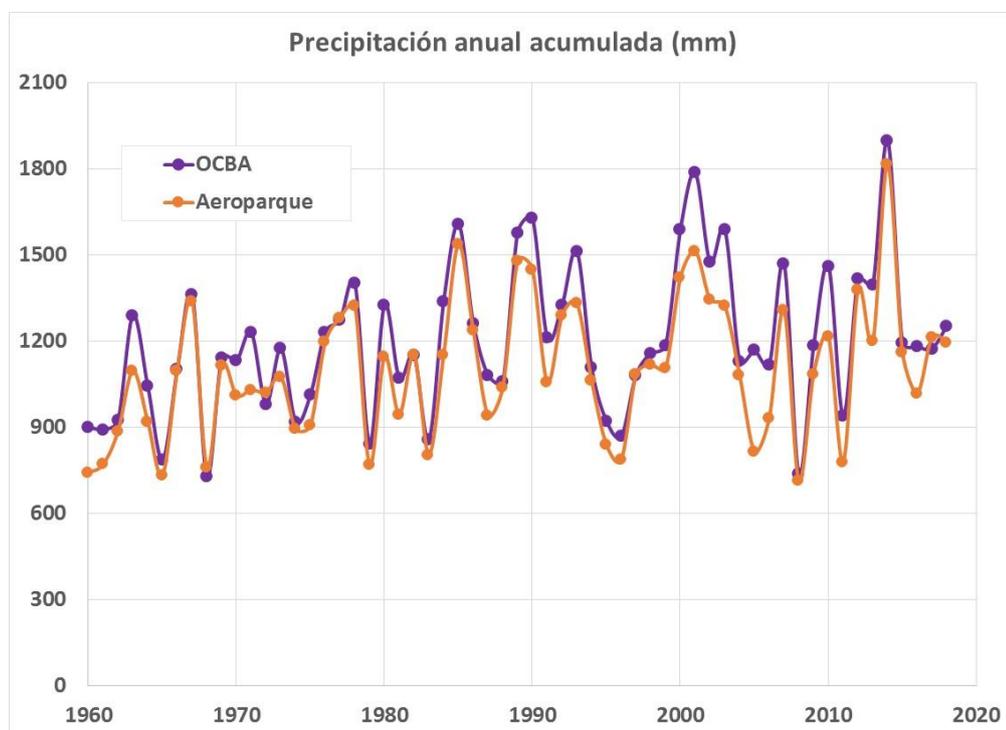


Figura 13. Precipitación anual acumulada en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

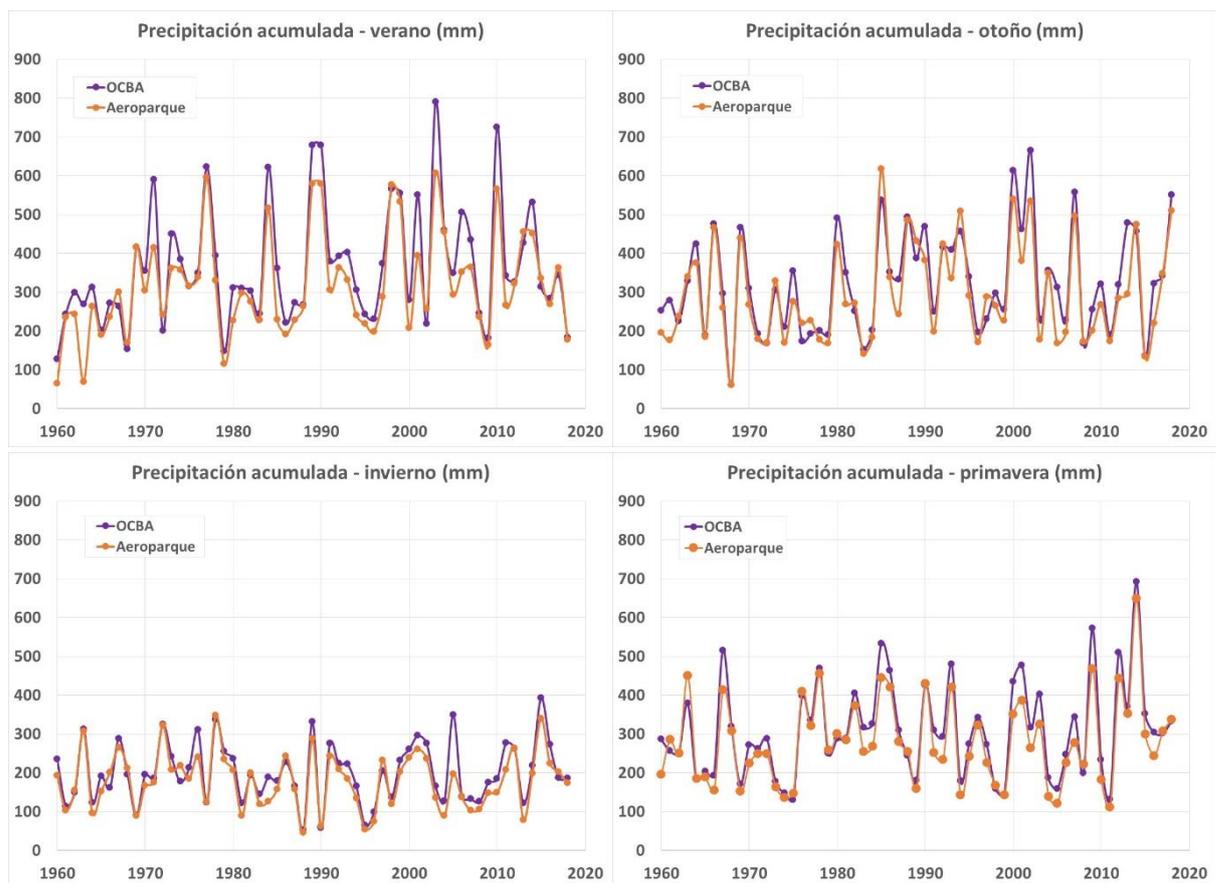


Figura 14. Precipitación estacional acumulada en las estaciones OCBA y Aeroparque (1960-2018).

Tabla 5. Tendencias de la precipitación acumulada (mm/10 años).

Periodo	OCBA	Aeroparque
Verano	+20.6	+21.0
Otoño	+17.6	+11.6
Invierno	+2.6	-1.8
Primavera	+14.3	+8.8
Anual	+55.1	+39.5

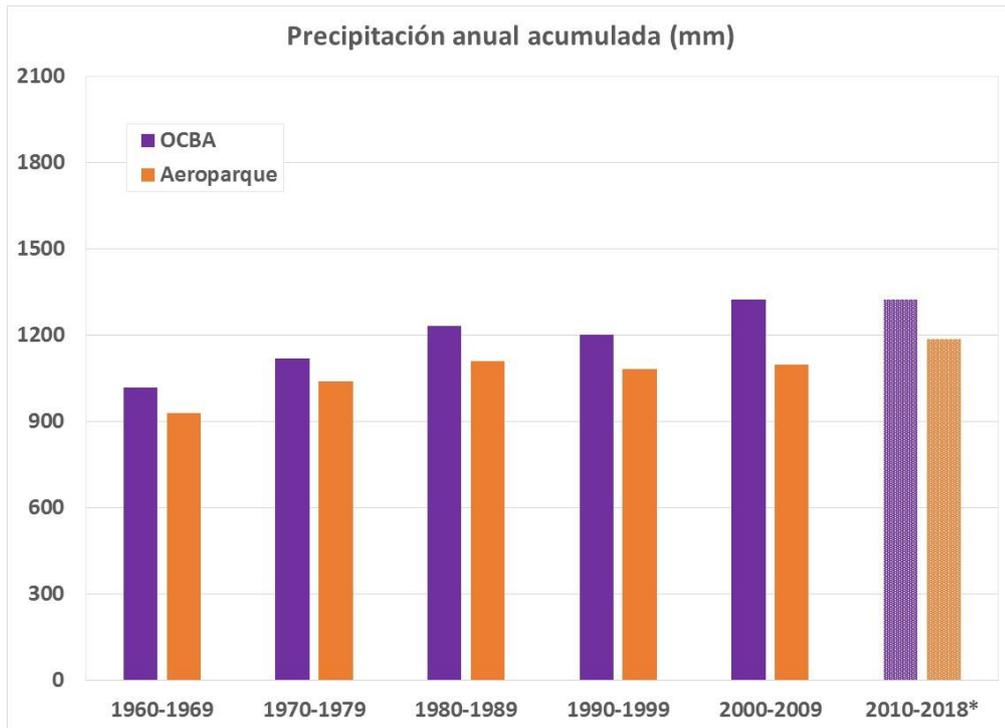


Figura 15. Precipitación anual acumulada en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

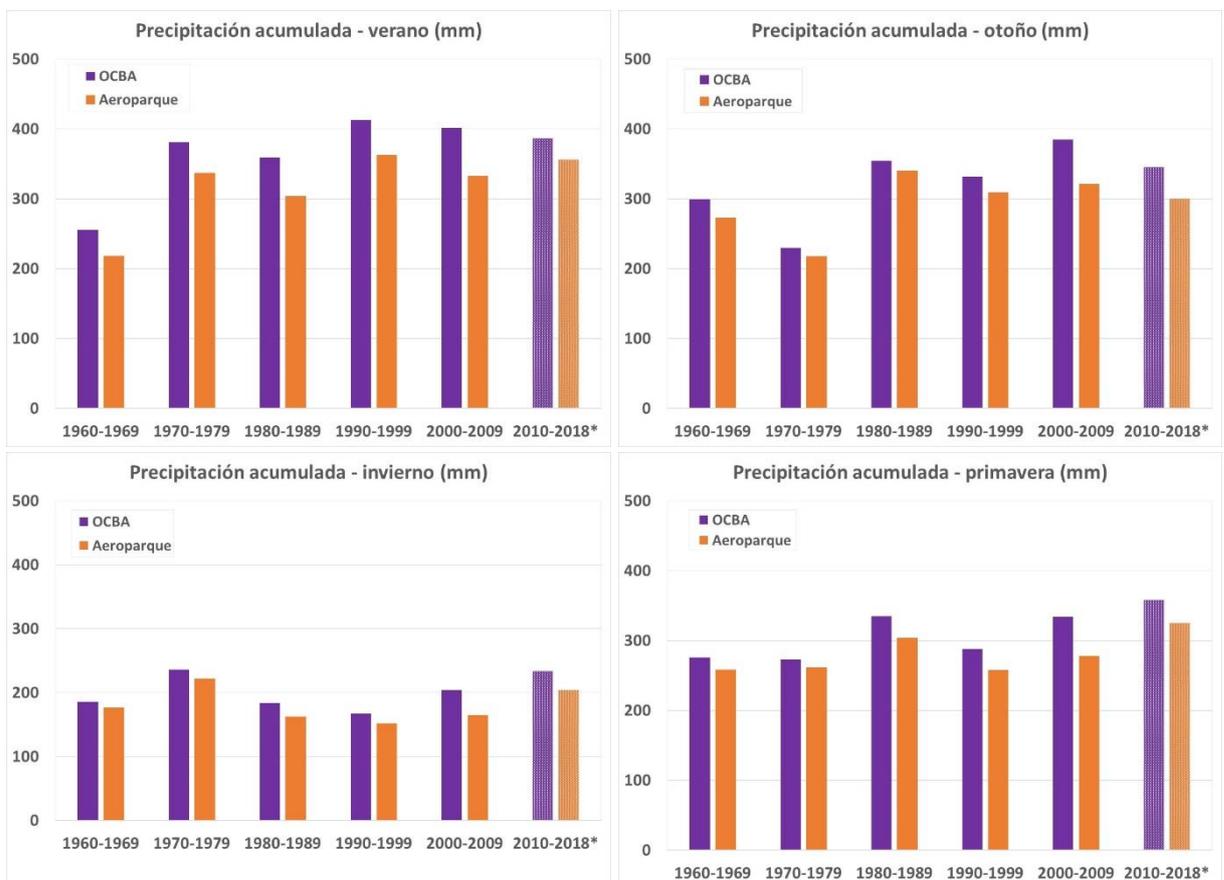


Figura 16. Precipitación estacional acumulada en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

Tabla 6. Cambios (%) en la precipitación anual acumulada para diferentes décadas en las estaciones OCBA y Aeroparque respecto de la década 1960-1969

	1970-1979	1980-89	1990-1999	2000-2009	2010-2018*
OCBA	+10	+21	+18	+30	+30
Aeroparque	+12	+15	+15	+19	+29

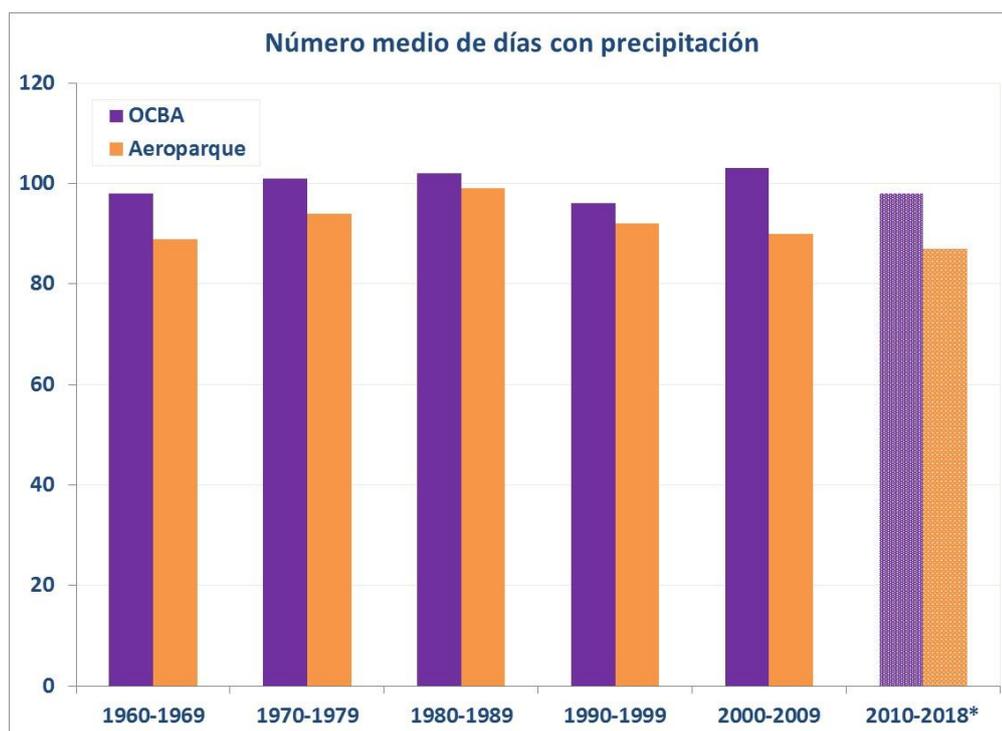


Figura 17. Número de días al año con precipitación en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

Tabla 7. Cambios (%) en el número de días al año con precipitación en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas respecto de la década 1960-1969

	1970-1979	1980-89	1990-1999	2000-2009	2010-2018*
OCBA	+3	+4	-2	+5	0
Aeroparque	+6	+11	+3	+1	-2

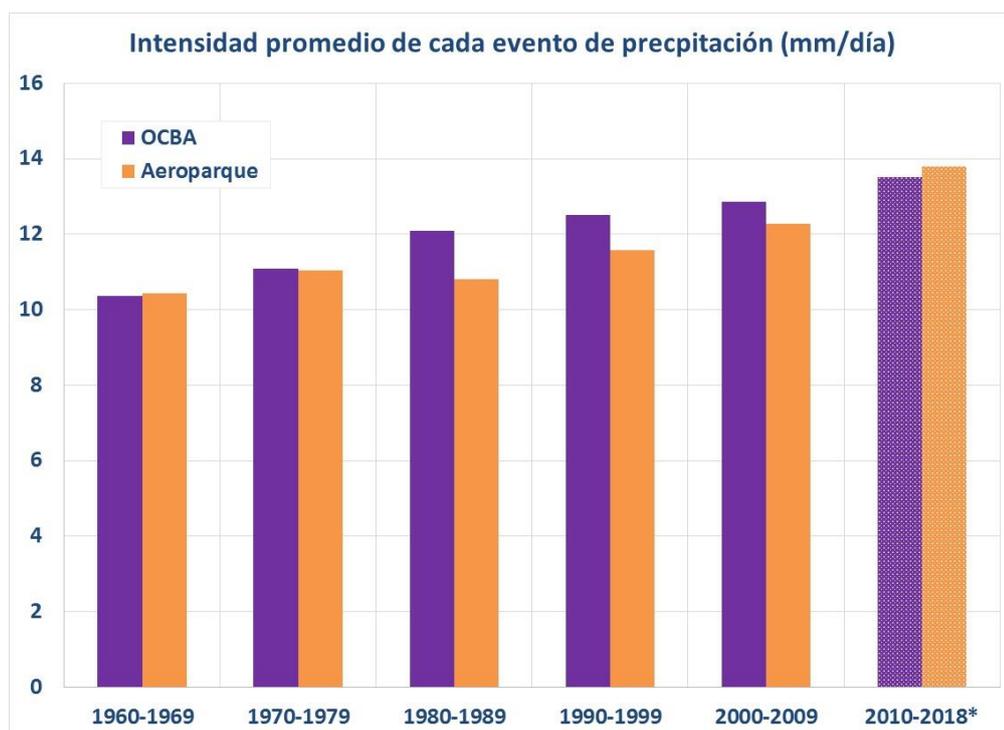


Figura 18. Intensidad promedio de eventos de precipitación diaria (mm/día) en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

Tabla 8. Cambios (%) en la intensidad promedio de cada evento de precipitación diaria en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas respecto de la década 1960-1969

	1970-1979	1980-89	1990-1999	2000-2009	2010-2018*
OCBA	+7	+16	+20	+24	+30
Aeroparque	+6	+4	+11	+18	+32

7. Eventos extremos

7.1 Precipitaciones intensas

La evolución en la precipitación máxima diaria registrada cada año entre 1960 y 2018 en las estaciones OCBA y Aeroparque se presenta en la Figura 19. En el caso de OCBA, se identifica una tendencia creciente de +2.3 mm/año indicando un incremento significativo de la lluvia acumulada en eventos extremos de hasta 24 horas de duración. Por el contrario, la tendencia en la estación Aeroparque es nula.

La Figura 20 muestra en las dos estaciones analizadas, el número de eventos por década en los que la precipitación diaria superó 100 mm. Este umbral de precipitación es extraordinario ya que se

refiere a eventos en los que en menos de un día precipitó aproximadamente el 10% de la lluvia anual. Se identifica una tendencia al aumento de ocurrencia de estos eventos extremos en la estación OCBA mientras que en Aeroparque hay mayor variabilidad interdecadal. La Figura 21 presenta la evolución anual de eventos de precipitación máxima en períodos de corta duración: 30 minutos, 1 hora y 3 horas en la estación OCBA para el período 1961-2016. En todos los casos se obtiene una tendencia positiva señalando que la lluvia tiende a ser más torrencial, esto es que precipita mayor cantidad de agua en cada unidad de tiempo considerada. Si se considera un umbral de 30 mm de precipitación acumulada en 30 minutos y 1 hora, puede verse que hay un incremento en la ocurrencia de estos eventos a lo largo de las diferentes décadas particularmente para los de 1 hora (Figura 22).

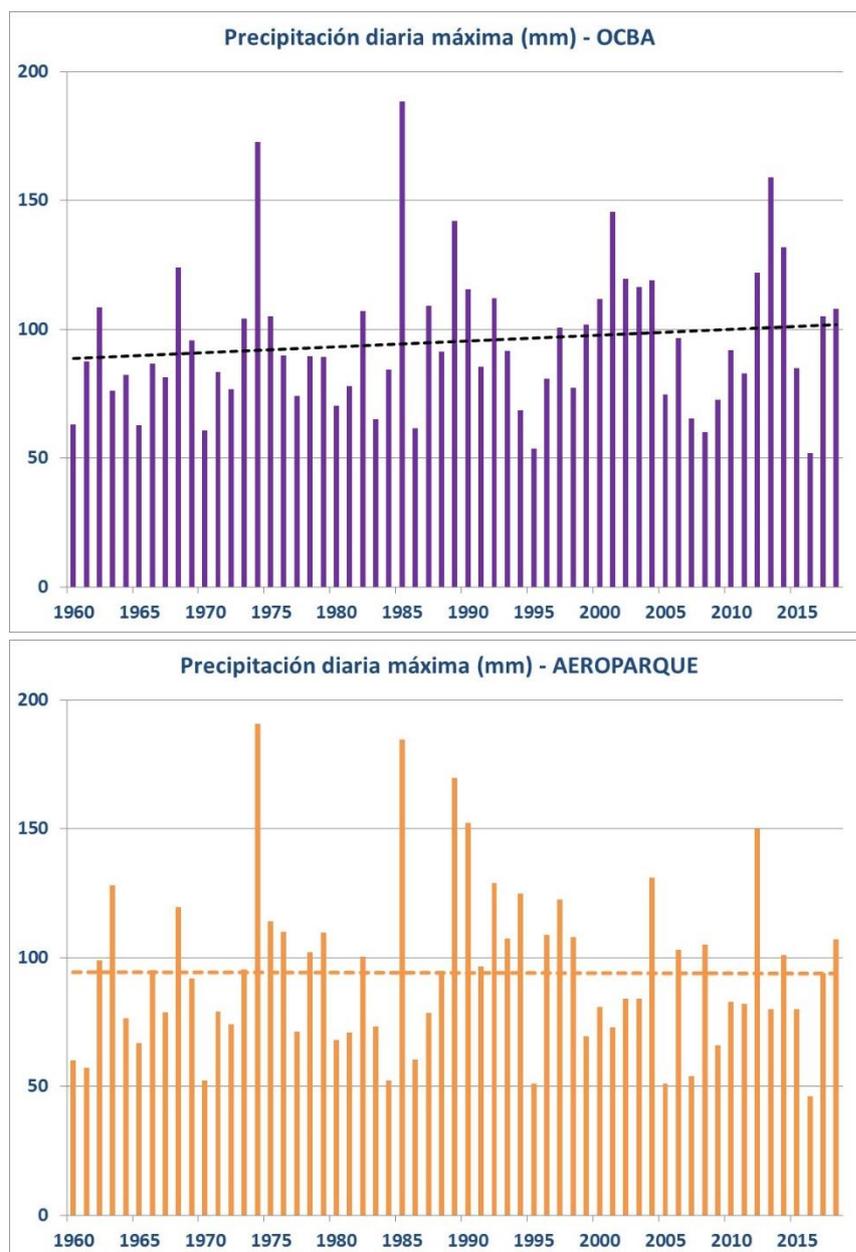


Figura 19. Precipitación máxima diaria en las estaciones OCBA y Aeroparque para cada año del período 1960- 2018.

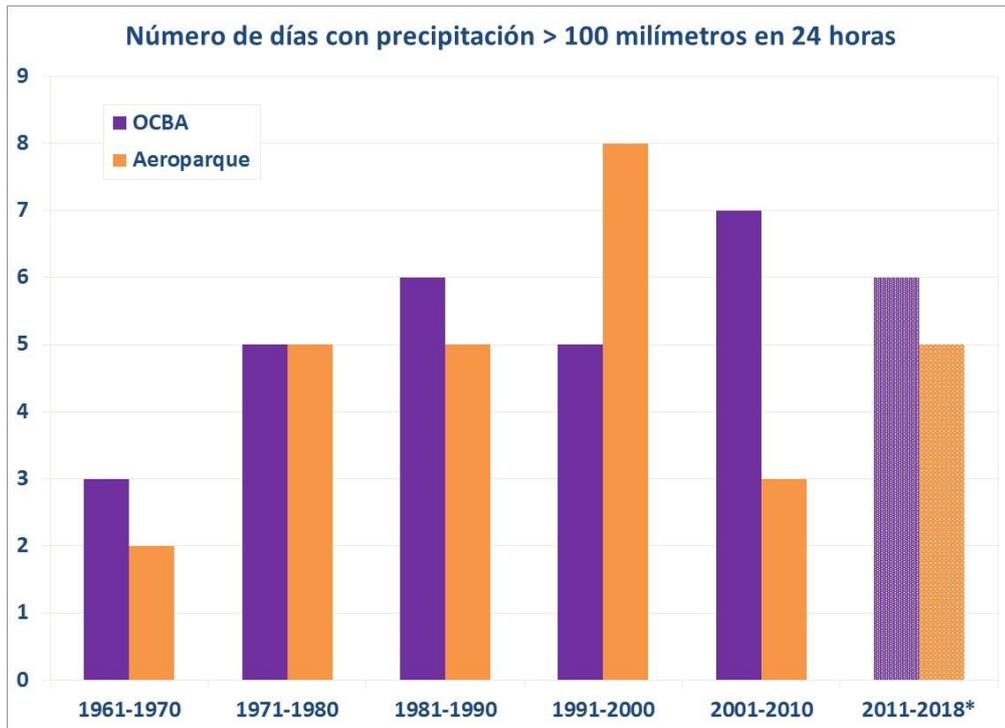


Figura 20. Número de eventos en los que la precipitación diaria acumulada supera 100 mm en las estaciones OCBA y Aeroparque para diferentes décadas entre 1960 y 2018.

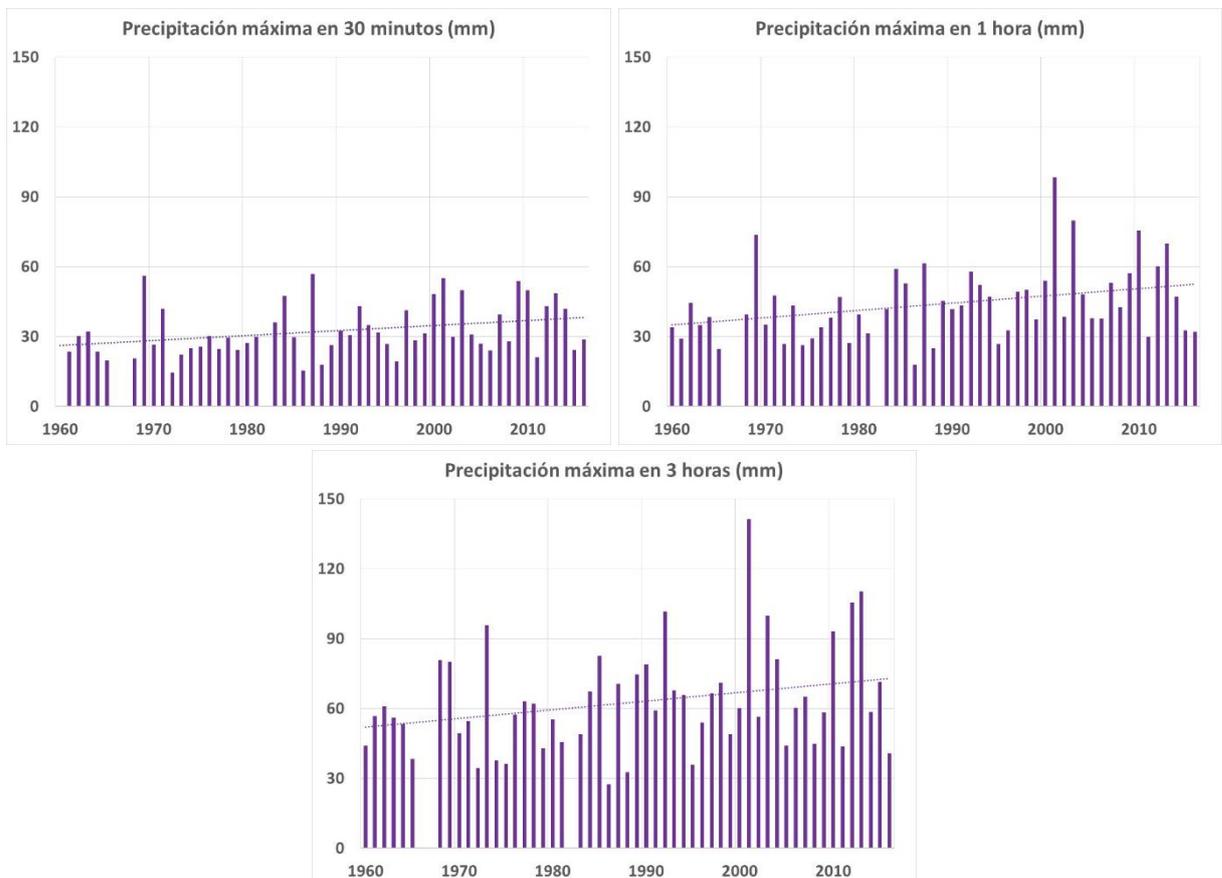


Figura 21. Precipitación máxima acumulada en 30 minutos, 1 hora y 3 horas para cada año entre 1960 y 2016 en la estación OCBA.

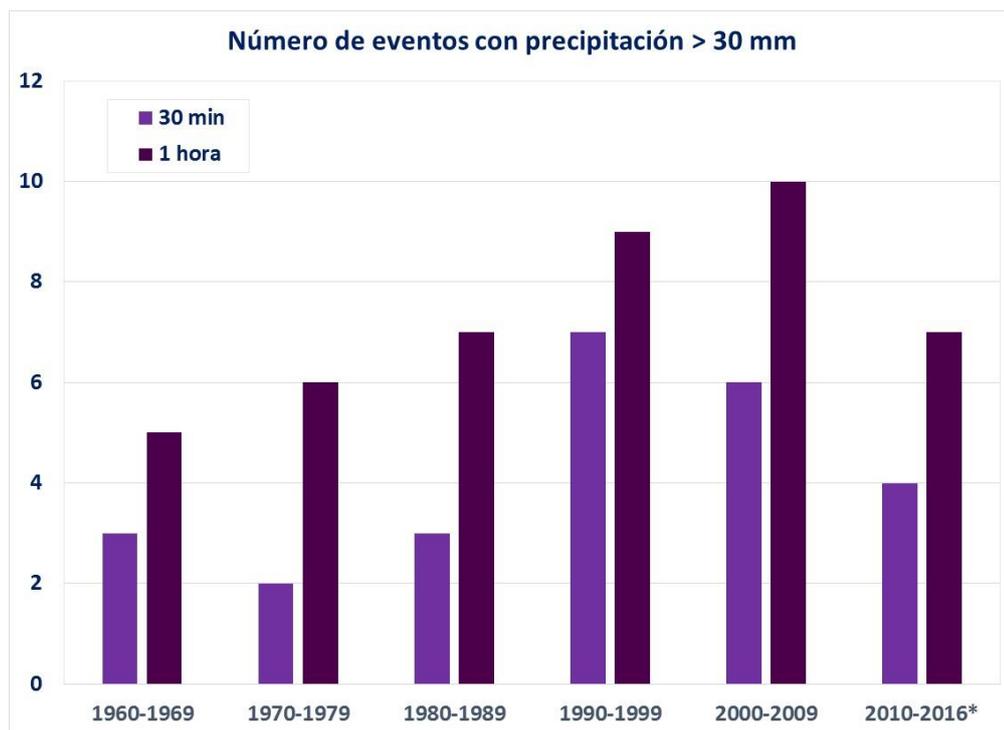


Figura 22. Número de eventos con precipitación acumulada mayor a 30 mm en 30 minutos y 1 hora para diferentes décadas entre 1960 y 2018 en la estación OCBA.

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son habitualmente utilizadas en hidrología ya que son necesarias para el diseño hidráulico de infraestructuras. Las características de estas curvas dependen de la precipitación por lo que pueden verse alteradas en el contexto del cambio climático (Willems et al. , 2012, Sanchez Schutze, 2019). En la Figura 23 se presentan las curvas IDF para la ciudad de Buenos Aires calculadas considerando una función de densidad de probabilidad de Gumbel con parámetros estacionarios (Gumbel, 2004) para los períodos de retorno de 10 años y 25 años. Para la construcción de estas curvas se utilizaron los datos de precipitación máxima en distintos intervalos de tiempo de corta duración correspondientes a la estación OCBA del período 1961-2016. De forma de evaluar los cambios temporales de estas curvas se dividió el período de información disponible en tres subperíodos: 1961-1980, 1981-1999 y 1999-2016. Para los dos períodos de retorno se encuentra que las curvas correspondientes al periodo más reciente (1999-2016), se encuentran por encima de las curvas computadas para los períodos anteriores. Este resultado indica que los eventos de precipitación de corta duración en la ciudad de Buenos Aires están siendo también más torrenciales. Por ejemplo, para el período de retorno de 10 años frecuentemente utilizado para el dimensionamiento de obras hidráulicas, se encuentra que para una lluvia de 5 minutos de duración la intensidad de la precipitación es de 300 mm/hora en el último período, mientras que en los periodos anteriores era de 250 mm/hora (20% de aumento). En el caso del período de retorno de 25 años, estos valores son 342 mm/hora y 290 mm/hora respectivamente (18% de aumento).

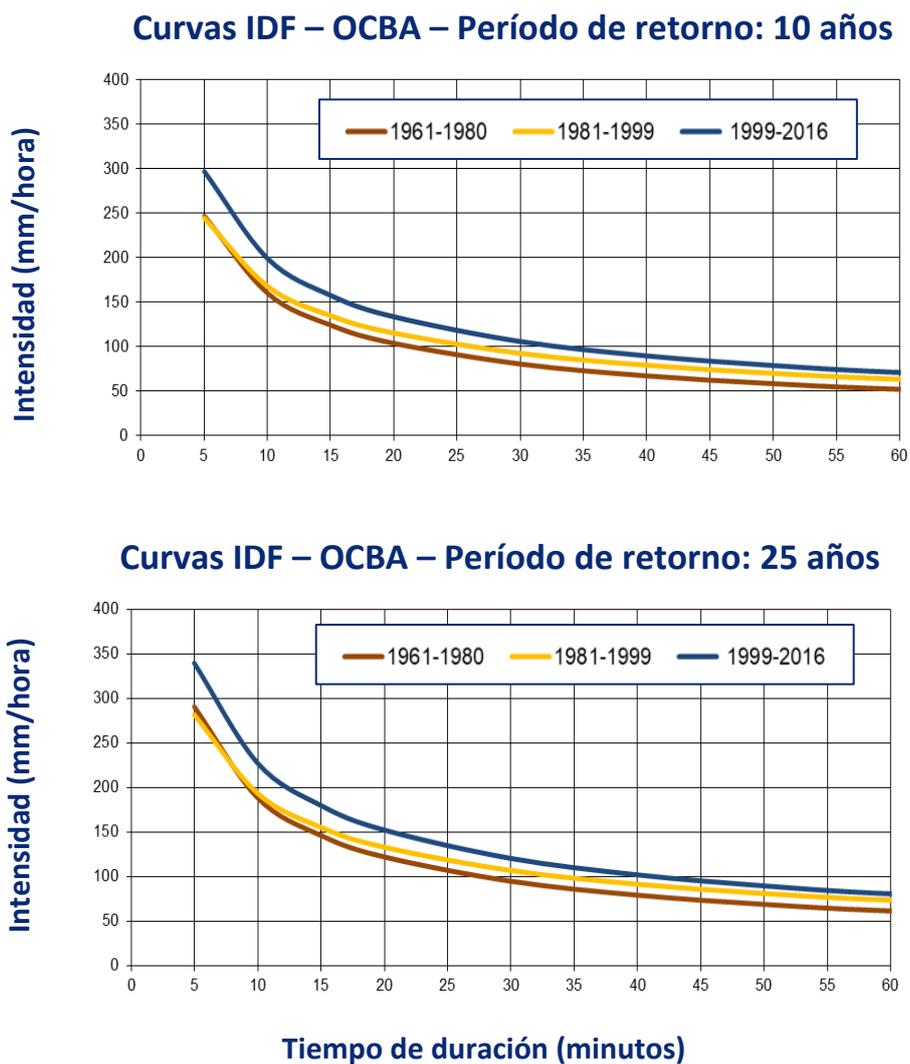


Figura 23. Curvas IDF para la estación OCBA para tres intervalos de tiempo y períodos de retorno de 10 y 25 años.

7.2 Olas de calor

Se define como ola de calor al fenómeno que se caracteriza por temperaturas anómalamente cálidas durante varios días consecutivos. De acuerdo con los parámetros establecidos por el Servicio Meteorológico Nacional, en la ciudad de Buenos Aires se desarrolla una ola de calor estival (entre octubre y marzo) cuando las temperaturas mínimas se elevan por encima de 22°C y las máximas superan los 32.3°C y esta situación persiste durante al menos 3 días consecutivos. Entre las causas principales de ocurrencia de las olas de calor estivales en la ciudad se encuentra el aumento de radiación solar por recurrencia de días despejados y la entrada de aire cálido desde el norte. El mes en donde se desarrolla con mayor frecuencia este tipo de episodios es enero, mientras que noviembre y marzo son los meses don menos usuales.

En la Figura 24 se presenta la evolución en la ocurrencia del número de olas de calor para diferentes décadas estimadas a partir de la información correspondiente a la estación OCBA. Se identifica una tendencia clara hacia la mayor frecuencia de eventos a partir de la década 1990-1999 y es posible apreciar que en el último período (2010-2018) se registraron más del doble de olas de calor que las que tuvieron lugar en la década del '90. Asimismo, en la Figura 25 se muestra la evolución de la duración máxima de las olas de calor donde se observa un incremento de los eventos más extensos (8 y 9 días de duración) en los últimos períodos analizados.

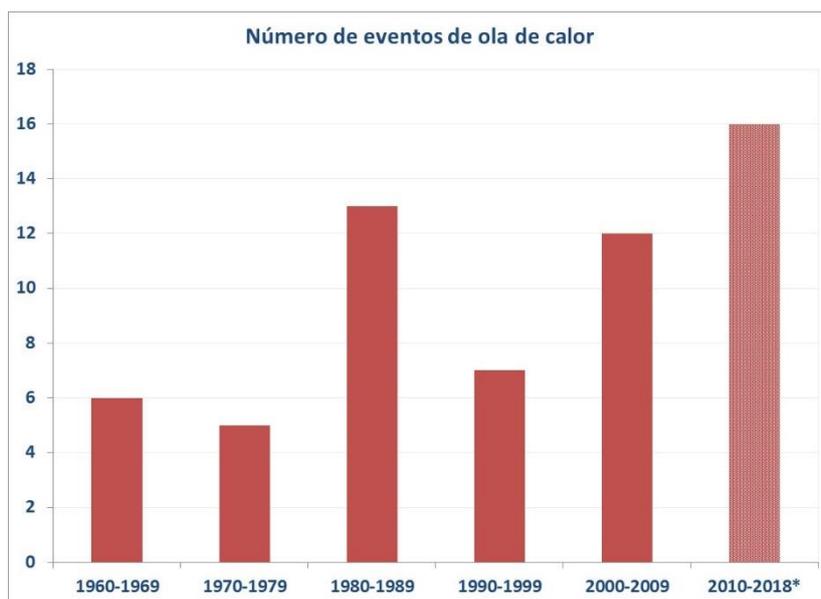


Figura 24. Número de olas de calor para diferentes décadas entre 1960 y 2018 en la estación OCBA.

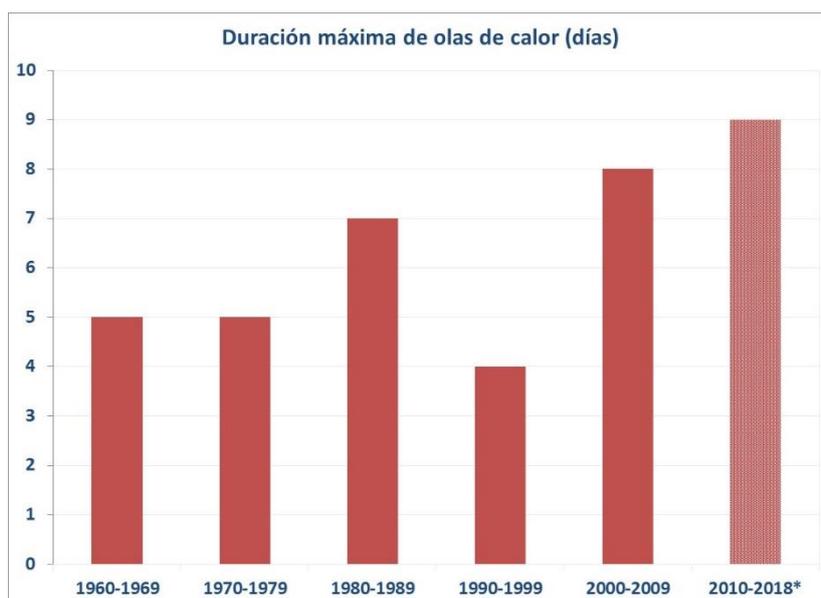


Figura 25. Duración máxima (días) de olas de calor para diferentes décadas entre 1960 y 2018 en la estación OCBA.

7.3 Sudestadas

La “sudestada” es un fenómeno meteorológico que afecta el estuario del Río de la Plata y se desarrolla por la ocurrencia de vientos persistentes provenientes del sector sur-sudeste de intensidad moderada a fuerte y que pueden alcanzar 100 km/h. La mayoría de las sudestadas están asociadas a un patrón atmosférico con presiones altas al sur del Río de la Plata y una zona de baja presión profunda al norte. Se desarrollan principalmente en verano y al inicio del otoño y primavera. En algunas ocasiones la “sudestada” está acompañada de precipitaciones. Tiene una duración típica es de 1 a 3 días y afecta las márgenes y el valle aluvial del Río de la Plata causando importantes crecientes e inundaciones.

La Figura 26 presenta la evolución en la ocurrencia de “sudestadas” para diferentes décadas entre 1943 y 2013 y para el período reciente 2014-2018. El análisis hasta 2003 corresponde a resultados presentados por D’Onofrio et al (2008). Se encuentra que hay un progresivo aumento en la ocurrencia de este fenómeno, así como en el número promedio de horas al año en las que se registran (Figura 27). Entre las décadas 1943-1952 y 2004-2013 la ocurrencia de sudestadas aumentó 27% mientras que el número de horas al año con “sudestada” se incrementó 56% comparando los mismos períodos.

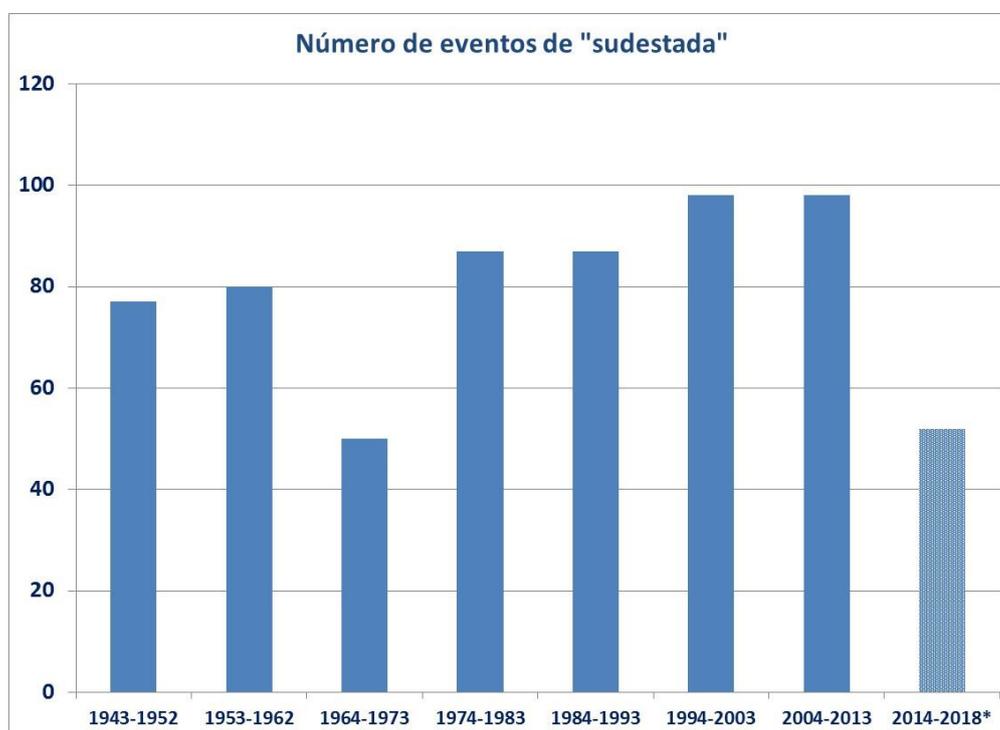


Figura 26. Número de eventos de “sudestada” en la ciudad de Buenos Aires para diferentes décadas entre 1943 y 2018.

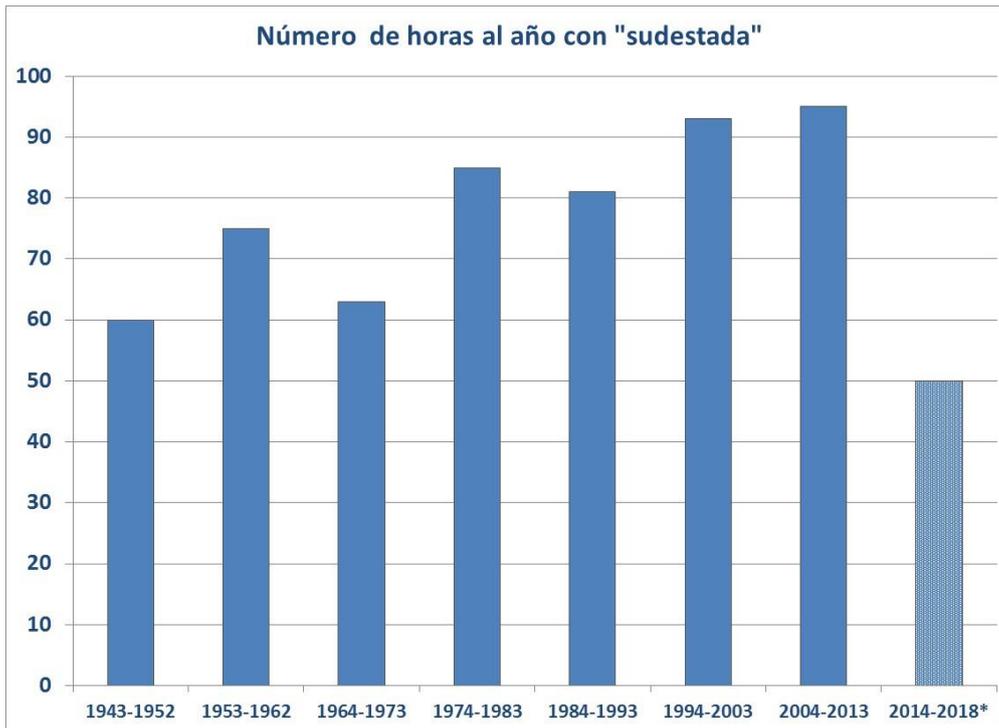


Figura 27. Número promedio de horas al año con “sudestada” en la ciudad de Buenos Aires para diferentes décadas entre 1943 y 2018.

8. *Isla urbana de calor*

El fenómeno de “isla urbana de calor” (IUC) hace referencia a que principalmente durante noches sin viento y escasa nubosidad, las ciudades suelen ser más cálidas que el medio suburbano/rural que las rodea. Entre las causas que generan este fenómeno se encuentran: el mayor almacenamiento de calor durante las horas del día en la ciudad debido a las propiedades térmicas de los materiales urbanos (hormigón, cemento, asfalto, etc.) utilizados en las edificaciones y su posterior devolución a la atmósfera durante la noche; la producción de calor como consecuencia de las diferentes actividades humanas y los procesos de combustión que se llevan a cabo en áreas urbanas; la disminución de la evaporación, debido al reemplazo de los espacios verdes naturales por pavimento lo cual favorece el rápido escurrimiento de la precipitación e impide el almacenamiento de agua en el suelo; la disminución en la pérdida de calor debido a la menor velocidad del viento en ambientes urbanos; el aumento de la absorción de radiación solar debido a la mayor cantidad de superficies expuestas por la geometría urbana y la absorción de la radiación terrestre absorbida y reemitida hacia el suelo por la contaminación del aire urbano (Oke et al., 2017).

La intensidad de la IUC se evalúa como la diferencia observada entre la temperatura medida en el centro de la ciudad y la del área rural próxima. Esta intensidad varía con la hora del día y estación del año y depende también de factores meteorológicos como el viento y la nubosidad, y características urbanas como la densidad de población o el tamaño de la ciudad. En general, la

máxima intensidad se produce entre 4 y 6 horas después de la puesta del Sol mientras que durante el mediodía y las primeras horas de la tarde la diferencia suele ser mínima e incluso en algunas ciudades, como Buenos Aires la temperatura urbana puede ser inferior a la rural (Camilloni y Barrucand, 2012, Lozada Montanari, 2019). Este fenómeno inverso suele denominarse “isla fría” o anti-isla de calor. Durante el invierno algunas ciudades pueden verse beneficiadas por el calentamiento asociado a la IUC debido a una reducción en las necesidades de calefacción. Sin embargo el efecto contrario se produce durante el verano: debido a la mayor temperatura urbana aumentan los requerimientos de refrigeración y se agravan los impactos sobre la salud incrementando el riesgo de muertes en el sector de la población afectado por dolencias cardiovasculares y respiratorias.

La intensidad de la IUC de Buenos Aires puede calcularse a partir de la información de las estaciones OCBA (considerada como referencia urbana) y Ezeiza (representativa de la atmósfera rural próxima a la ciudad). Utilizando las temperaturas a nivel horario correspondientes a ambas estaciones meteorológicas disponibles para el período 1978-2017, es posible estimar la IUC como la diferencia entre ellas (temperatura urbana menos temperatura rural). La Figura 28 presenta la evolución horaria de la IUC donde se observa que tiene un ciclo diario bien definido con máximos durante la noche y mínimos entre las 12 y 19 horas debido principalmente a las diferencias en las velocidades con que se calientan y enfrían las superficies urbanas y rurales en respuesta a los cambios de insolación a lo largo del día. De la misma forma, la magnitud de la IUC varía según la época del año alcanzando el máximo durante las noches de verano (2.4°C) y un efecto de “isla fría” de -0.1°C durante las horas de la tarde. En el invierno, la máxima intensidad es alcanzada durante la noche (1.5°C).

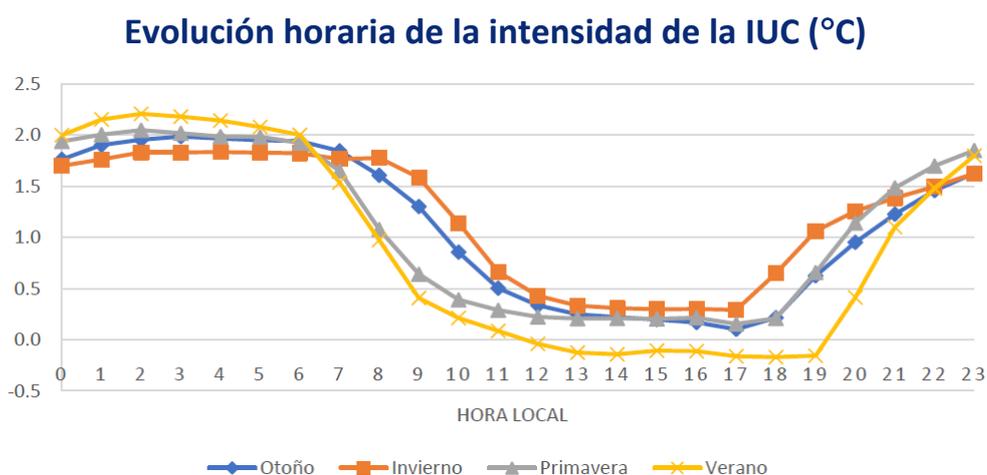


Figura 28. Evolución horaria promedio de la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires para las diferentes estaciones del año.

Considerando el comportamiento diferencial en la IUC nocturna y diurna, se evalúan los cambios en su intensidad a lo largo del tiempo en forma separada. La Figura 29 presenta la evolución de la intensidad media anual de la IUC nocturna mientras que la Figura 30 incluye la de las horas diurnas. En el caso nocturno, se identifica una tendencia a la reducción de $-0.17^{\circ}\text{C}/10$ años mientras que la IUC diurna presenta una tendencia creciente de $+0.09^{\circ}\text{C}/10$ años. La progresiva reducción en la intensidad de la IUC nocturna fue identificada también en otras ciudades del mundo (Scott et al., 2018) y entre sus causas aparecen cambios en las condiciones atmosféricas que favorecen el desarrollo de la IUC (nubosidad, viento, estabilidad atmosférica) y la menor variabilidad interanual de la temperatura urbana en comparación con la de las zonas rurales circundantes. La Figura 31 muestra la evolución anual de la intensidad máxima de la IUC nocturna que toma valores entre 6.1°C y 9.4°C (entre 3 y 4.5 veces superior al promedio) sin una tendencia significativa durante el período analizado.

Intensidad de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$)

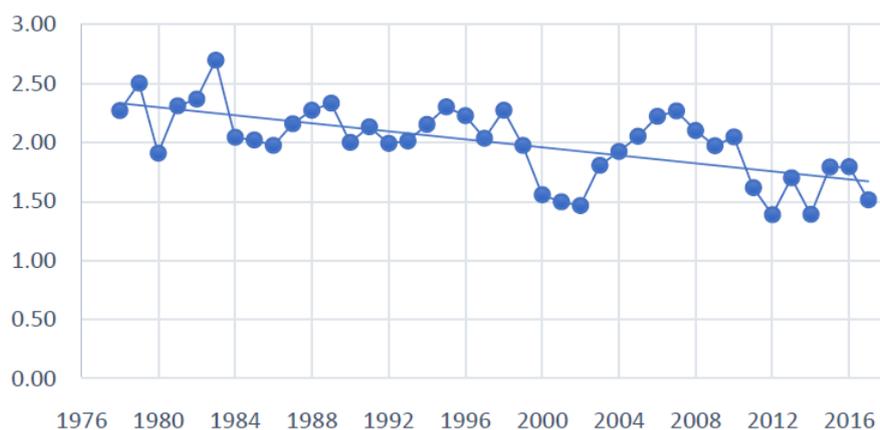


Figura 29. Intensidad media anual de la IUC nocturna de Buenos Aires (1978-2017).

Intensidad de la IUC diurna ($^{\circ}\text{C}$)

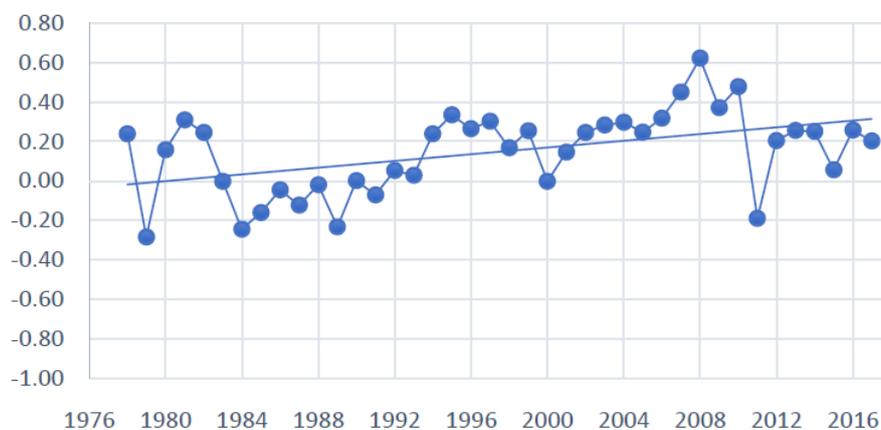


Figura 30. Intensidad media anual de la IUC diurna de Buenos Aires (1978-2017).



Figura 31. Intensidad máxima de la IUC nocturna de Buenos Aires (1978-2017).

9. Conclusiones

En el presente informe se describe los cambios observados en el clima de la ciudad de Buenos Aires para un conjunto de variables climáticas: temperatura media, temperatura mínima y temperatura máxima y de fenómenos como precipitaciones intensas, olas de calor y “sudestadas” así como de la isla urbana de calor. A continuación se resumen los resultados más relevantes.

• Temperatura

Del análisis de las temperaturas media, mínima y máxima en las estaciones OCBA y Aeroparque para el período 1960-2018 surge que:

- La **temperatura media** anual en ambas estaciones se incrementó a razón de $+0.18^{\circ}\text{C}/10$ años. La tendencia al calentamiento en OCBA es máxima durante el verano ($+0.21^{\circ}\text{C}/10$ años) y en Aeroparque en la primavera ($+0.23^{\circ}\text{C}/10$ años). Entre la década 1960-1969 y el período 2010-2018 el incremento de la temperatura media anual fue 0.9°C en OCBA y 1°C en Aeroparque. A nivel estacional, el mayor calentamiento entre ambos períodos se registra durante el verano (1.2°C en OCBA y 1.3°C en Aeroparque) y es mínimo durante el invierno (0.6°C en ambas estaciones).

- La **temperatura mínima** anual en Aeroparque supera siempre a la de OCBA. La tendencia al calentamiento en Aeroparque es de $+0.27^{\circ}\text{C}/10$ años y de $+0.22^{\circ}\text{C}/10$ años en OCBA. El verano, invierno y primavera presentan mayores tendencias en Aeroparque respecto de OCBA tomando el máximo valor en verano ($+0.29^{\circ}\text{C}/10$ años). Entre 1960-1969 y 2010-2018 el incremento del promedio anual es de 1.2°C en OCBA y 1.7°C en Aeroparque, el verano presenta un aumento máximo (1.6°C en ambas estaciones) y es mínimo en invierno (0.6°C en OCBA y 1.2°C en Aeroparque).

- La **temperatura máxima** anual en OCBA supera siempre a la de Aeroparque. La tendencia al calentamiento en el promedio anual en OCBA es $+0.22^{\circ}\text{C}/10$ años y $+0.12^{\circ}\text{C}/10$ años Aeroparque. Las tendencias estacionales son en todos los casos también superiores en OCBA registrando el máximo durante el otoño ($+0.21^{\circ}\text{C}/10$ años). Entre 1960-1969 y 2010-2018 el incremento de la

temperatura máxima anual fue de 0.9°C en OCBA y 1.1°C en Aeroparque. El verano presenta un aumento máximo de 1.2°C en OCBA mientras que es mínimo en otoño (0.3°C) en la misma estación.

- **Precipitación**

Del análisis de la precipitación anual y mensual en las estaciones OCBA y Aeroparque para el período 1960-2018 surge que:

- En ambas estaciones meteorológicas hay una tendencia creciente en la **precipitación** anual acumulada que es mayor en OCBA (+55.1 mm/10 años) que en Aeroparque (+39.5 mm/10 años). Estos incrementos se deben al aumento de la precipitación en verano y otoño. Durante la primavera las tendencias son positivas mientras que en el invierno (estación seca) son casi nulas. La comparación entre 1960-1969 y 2010-2018 muestra un crecimiento de la precipitación anual de 30% en OCBA y 29% en Aeroparque junto con una clara tendencia al aumento de la intensidad o torrencialidad de la precipitación.

- **Lluvias intensas**

- La **precipitación máxima diaria** registrada cada año entre 1960 y 2018 en OCBA tiene una tendencia creciente de +2.3 mm/año indicando un incremento significativo de la lluvia acumulada en eventos extremos de hasta 24 horas de duración. Por el contrario, la tendencia en la estación Aeroparque es nula.

- Los eventos de **precipitación mayor a 100 mm en 24 horas** son cada vez más frecuentes en OCBA.

- La evolución anual de eventos de **precipitación máxima en períodos de corta duración (30 minutos, 1 hora y 3 horas)** en OCBA para el período 1961-2016 muestra que tienden a ser más torrenciales, esto es que llueve más en cada unidad de tiempo considerada.

- Los eventos de **precipitación acumulada mayor a 30 mm en 1 hora** en OCBA son cada vez más frecuentes.

- Las curvas de **Intensidad-Duración-Frecuencia** contruidas con información de precipitación máxima en distintos intervalos de tiempo (5 min a 60 min) de OCBA del período 1961-2016 muestran que los eventos de precipitación de corta duración en la ciudad de Buenos Aires están siendo más torrenciales en los últimos años con incrementos del orden del 20% en lluvias de 5 min de duración para los períodos de retorno de 10 años y 25 años.

- **Olas de calor**

- Se identifica una mayor **frecuencia** de olas de calor estivales (octubre a marzo) a partir de la década 1990-1999 de acuerdo con la información de la estación OCBA. En el período 2010-2018 ocurrieron más del doble de olas de calor que en la década del '90.

- Con respecto a la **duración**, en los períodos 2000-2009 y 2010-2018 tuvieron lugar las más extensas (8 y 9 días de duración).

- **“Sudestadas”**

- Entre las décadas 1943-1952 y 2004-2013 la **ocurrencia** de sudestadas aumentó 27%.

- El número de horas al año con sudestada se incrementó 56% comparando los mismos períodos.

- **Isla urbana de calor (IUC)**

Se analiza la intensidad de la IUC a partir de la información de temperatura horaria de OCBA y Ezeiza para el período 1978-2017:

- la **magnitud** de la IUC es máxima durante la noche y mínima en el día, alcanzando el mayor valor durante las noches de verano (2.4°C) y generando un efecto de “isla fría” de -0.1°C durante las horas de la tarde. En el invierno, la máxima intensidad es alcanzada durante la noche (1.5°C). La IUC nocturna presenta una tendencia a la reducción de -0.17°C/10 años mientras que la IUC diurna presenta una tendencia al aumento de +0.09°C/10 años.

- la **intensidad máxima** de la IUC nocturna toma valores entre 6.1°C y 9.4°C sin una tendencia significativa durante el período analizado.

Referencias

Barros, V. y Camilloni, I., 2016: La Argentina y el cambio climático: de la física a la política. Ed. EUDEBA.

Camilloni, I. and Barrucand, M., 2012: Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theor. and Appl. Climatol.* 107, 47-58.

Groisman, P. Y., Karl, T. R., Easterling, D. R., Knight, R. W., Jamason, P. F., Hennessy, K. J., ... and Razuvaev, V. N., 1999: Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change* 42, 243-283.

Gumbel, E. J., 2004: *Statistics of Extremes*, Dover Publications, Inc. New York, USA.

Karl, T. R., and Knight, R. W. , 1998: Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(2), 231-242.

Karl, T. R., and Trenberth, K. E., 2003: Modern global climate change. *Science*, 302, 1719-1723.

Lozada Montanari, M., 2019: Caracterización de la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

Oke, T., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J. ,2017: *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139016476.

Sánchez Schutze, A.B. 2019: Ciudades y cambio climático: cambios observados en la precipitación en la ciudad de Buenos Aires. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

Scott, A.A., Waugh, D.W. and Zaitchik, B.F. 2018. Reduced Urban Heat Island intensity under warmer conditions. *Environ. Res. Lett.* 13 ,064003.