



Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera
Caracterización de la Isla Urbana de Calor
de la ciudad de Buenos Aires

Tesista: Malena Sol Lozada Montanari

Directora: Dra. Inés Camilloni

2019

A Ignacio

*A Belén, Facundo
y Gonzalo*

A la memoria de Violeta y Norma

Agradecimientos

En primer lugar, a mi directora, la Dra. Inés Camilloni por dirigirme, por enseñarme y por dejarme explorar esta temática que siempre quise estudiar. Por su tiempo, su dedicación, su paciencia y su apoyo constante.

Al Servicio Meteorológico Nacional y al ex Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva por otorgarme la Beca de Formación de Recursos Humanos en Ciencias de la Atmósfera, la cual me permitió dedicarme los últimos años a estudiar esta carrera a tiempo completo y también poder hacer esta tesis.

Al departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos por todo lo aprendido en sus aulas. A sus docentes por las clases que hicieron a mi formación académica. A todas las personas que conocí en sus pasillos y que siempre están dispuestos a brindar ayuda.

A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y a la Universidad de Buenos Aires por ser mi segunda casa.

A la Dra. María Laura Bettolli, por ser la primera que me dio la oportunidad de incursionar en el mundo de la investigación científica, por su ayuda y sus consejos aun cuando ya no trabaje con ella.

A la Dra. María Paula Llano por su colaboración en conocimientos estadísticos.

A la Dra. Silvina Cichowolski y al Dr. Ariel Chernomoretz por su ayuda desinteresada en conocimientos de programación.

A Gabriela Raggio por su charla diaria que ayudaba a bajar los nervios y el estrés y por ayudar más de una vez a comprender los lenguajes informáticos.

A los amigos que hice en esta carrera por el apoyo incondicional; en especial a mis Meteo Amigos: Flor, Gise, Eli, Ine, Ani, Silvi y Fran por siempre empujarme a superarme, obligarme a dar finales y ser un pilar en esta carrera.

A Flor Iacovone, sin su presencia al lado mío todo este verano esta tesis hubiera sido imposible.

A Ani Sánchez por ser la hermana que encontré en estos pasillos, por ser mi compañera a lo largo de toda la carrera (desde el CBC!) y por ser quien sigue hoy en día al lado mío trabajando. Por mandarme mensajes de aliento desde el otro lado del mundo, por su amistad todos estos años y por compartir nuestras locuras.

A mi familia política porque nunca dejaron de preguntarme como iba con esta carrera y por su apoyo siempre.

A mi tía Liliana y a mi prima Carolina, por su acompañamiento constante

A Belén, Facundo y Gonzalo, ya que sin ellos la vida no tendría sentido.

A mi mamá y a mi papá, quienes son mi ejemplo a seguir. Gracias por dejarme ser quien soy y gracias por enseñarme a ser quien soy.

A Ignacio, mi compañero de vida; quien transitó literalmente todos estos años de carrera junto a mí siendo un apoyo incondicional.

Índice

Resumen	1
Capítulo 1: Introducción	3
1.1 Introducción	3
1.2 Causas de la isla urbana de calor	3
1.3 Tipos de isla urbana de calor	4
1.4 Cuantificación de la isla urbana de calor	4
1.5 Factores que controlan la intensidad de la isla urbana de calor	5
1.6 Consecuencias de la isla urbana de calor	6
1.7 Variabilidad temporal de la isla urbana de calor	6
1.8 Antecedentes de estudios de la isla urbana de calor de Buenos Aires	7
1.9 Objetivos	7
1.10 Estructura de la Tesis	8
Capítulo 2: Información utilizada	9
2.1 Área de Estudio	9
2.2 Datos correspondientes a estaciones meteorológicas	12
2.3 Datos correspondientes a sensores remotos	14
Capítulo 3: Tendencias de temperatura	15
3.1 Introducción	15
3.2 Análisis de tendencias en las estaciones meteorológicas disponibles en el AMBA	15
<i>Temperatura Máxima</i>	15
<i>Temperatura Mínima</i>	17
<i>Temperatura Media</i>	20
3.3 Análisis de tendencias para las estaciones meteorológicas disponibles en el AMBA con registros más prolongados	22
<i>Temperatura Máxima</i>	22
<i>Temperatura Mínima</i>	23
<i>Temperatura Media</i>	25
3.4 Análisis de las tendencias de temperatura media derivada de datos horarios ..	27
3.5 Conclusiones	29

Capítulo 4: Isla Urbana de Calor en Buenos Aires	31
4.1 Introducción	31
4.2 Ciclo diario	31
4.3 Ciclo anual	33
4.4 Variabilidad interanual	34
4.5 Variabilidad decadal	36
4.6 Conclusiones	40
Capítulo 5: Intensidad de la IUC y su relación con factores meteorológicos	42
5.1 Introducción	42
5.2 Metodología	42
5.3 Relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la nubosidad	43
5.4 Relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la velocidad del viento	44
5.5 Relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la humedad relativa	45
Capítulo 6: Isla Urbana de Calor Superficial de Buenos Aires y su comparación con otras ciudades argentinas	49
6.1 Introducción	49
6.2 IUC-S de Buenos Aires	49
6.3 IUC-S de Rosario	54
6.4 IUC-S de Córdoba	60
6.5 IUC-S de Mendoza	65
6.6 Comparación entre las IUC-S de los aglomerados Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza	70
6.7 Comparación entre las islas de calor de superficie (IUC-S) y de canopia (IUC) de Buenos Aires	72
6.8 Conclusiones	73
Capítulo 7: Conclusiones	75
7.1 Conclusiones	75
7.2 Trabajo Futuro	77
Referencias bibliográficas	78

Resumen

La Isla Urbana de Calor (IUC) es la manifestación atmosférica más reconocida del impacto de la urbanización sobre el clima de una ciudad y, desde su primera identificación como tal en 1833, ha sido objeto de gran cantidad de estudios de diversa índole. La importancia de estudiar cómo se modifica a lo largo del tiempo en magnitud e intensidad viene aparejada a los cambios esperados por causa del cambio climático que podrían exacerbar sus efectos negativos. En ciudades con climas cálidos, la IUC puede magnificar los impactos de las olas de calor teniendo así consecuencias desfavorables sobre la salud, generar una mayor demanda eléctrica para refrigeración y como resultado incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales eléctricas.

El objetivo de esta tesis consistió en avanzar en el estudio de la temperatura y de la IUC del Área Metropolitana de Buenos Aires, sus características estadísticas y su variabilidad a lo largo del tiempo de acuerdo con los registros de térmicos más extensos disponibles. Con esta finalidad se estudiaron los cambios en las temperaturas máximas, mínimas y medias de cinco estaciones. Dos de ellas están ubicadas en la Ciudad de Buenos Aires: Aeroparque y Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) y las tres restantes en el Gran Buenos Aires: Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero. Además, utilizando datos de temperatura horaria de OCBA y Ezeiza Aero se analizó la intensidad de la IUC a nivel anual, estacional y horario. Por último, se evaluaron y compararon características espaciales y temporales de la isla de calor superficial (IUC-S) estimada a partir de la temperatura de superficie derivada de sensores remotos, para cuatro ciudades de Argentina (Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza).

Las tendencias de temperatura correspondientes a las cinco estaciones del AMBA resultaron positivas y significativas a nivel anual en la temperatura máxima y media en OCBA y en la temperatura mínima en Ezeiza para el período de información simultánea y completa entre 1983 y 2005. Cuando se consideró el período 1959-2017 (el más prolongado posible con información de temperatura máxima y mínima pero disponible sólo en Aeroparque, OCBA y Ezeiza), las tendencias obtenidas fueron positivas y significativas en ambas variables y en la temperatura media derivada de ellas, con pendientes similares entre estaciones. El análisis de temperatura media derivada de datos horarios también mostró tendencias significativas siendo la correspondiente a Ezeiza superior a la de OCBA y Aeroparque.

La IUC de Buenos Aires presentó un ciclo diario marcado, alcanzando los mayores valores durante la noche y siendo nula o levemente negativa en algunas horas de día. Asimismo, se encontró que la IUC nocturna de verano fue superior a la de invierno al igual que lo detectado en otras ciudades de clima templado del mundo. Con respecto a la variabilidad interanual, se observó una tendencia a la reducción de la IUC media nocturna significativa estadísticamente tanto a nivel anual como durante los meses de verano e invierno pese al continuo aumento de la población del AMBA durante el período de estudio (1976-2017). Las relaciones halladas entre la magnitud de la IUC nocturna estival e invernal y la nubosidad total, la humedad relativa y la velocidad del viento en OCBA resultaron inversas siendo la nubosidad la variable que mayor proporción de varianza explicó.

El análisis de la IUC-S nocturna dio como resultado que su distribución espacial es semejante para Buenos Aires, Rosario y Córdoba con intensidades positivas en toda la zona urbana y con los máximos valores en la región más densamente construida de cada aglomerado. Durante la noche, Buenos Aires registró las mayores magnitudes tanto en el promedio anual como en el de verano e invierno mientras que en Mendoza el efecto es casi nulo. Además, las tendencias de la IUC-S nocturna resultaron negativas en las cuatro ciudades (sólo con significancia estadística en Mendoza) mientras que en el caso diurno fueron positivas en todos los aglomerados, aunque significativas sólo en Buenos Aires y Mendoza. La comparación entre la IUC y la IUC-S de Buenos Aires para el lapso de estudio común entre 2003 y 2017 mostró tendencias del mismo signo (negativas) en el período nocturno (significativa en la IUC) y opuestas en el diurno (significativa en la IUC-S).

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Los procesos de urbanización e industrialización modifican las características de la superficie terrestre y de la atmósfera local mediante la transformación de sus propiedades radiativas, térmicas y aerodinámicas dando como resultados ambientes urbanos más cálidos que su entorno que originan la denominada isla urbana de calor (IUC) (e.g. Oke 1982; Kalnay y Cai, 2003; Souch y Grimmond, 2006; Zhao y otros, 2014, Oke y otros, 2017). Este fenómeno hace referencia al calentamiento diferencial que se registra en áreas urbanas en comparación con las zonas rurales próximas a la ciudad y fue identificado por primera vez en Londres por Howard (1833). La IUC es la manifestación atmosférica más reconocida del impacto de la urbanización sobre el clima de una ciudad y afecta a millones de personas en el mundo. Una de sus características principales es que es un fenómeno que puede ser identificado en asentamientos humanos de diverso tamaño y forma y en distintas regiones climáticas (Roth, 2013). Dada la rápida urbanización actual y considerando el crecimiento previsto, se hace imprescindible una mejor comprensión de la IUC y su evolución espacial y temporal de forma de desarrollar medidas de adaptación y estrategias de mitigación eficaces.

1.2 Causas de la isla urbana de calor

La formación de la IUC está estrechamente relacionada con el balance de energía en áreas urbanas. Las estructuras y materiales urbanos, el cambio de cobertura del suelo y la actividad humana alteran los términos del balance de energía a través de los siguientes cambios (Oke, 1982):

- Incremento de la radiación de onda corta absorbida debido a la geometría urbana,
- Aumento de la radiación de onda larga recibida como consecuencia de la acción de los contaminantes en suspensión en la atmósfera urbana,
- Disminución de la pérdida de radiación de onda larga debido a la geometría urbana,
- Liberación de calor por fuentes antropogénicas,

- Aumento del calor sensible almacenado por los materiales utilizados en las construcciones,
- Disminución de la evapotranspiración,
- Disminución del transporte turbulento de calor debido a las menores velocidades del viento en áreas urbanas

1.3 Tipos de isla urbana de calor

Pueden distinguirse dos tipos básicos de IUC (Arnfield, 2003; Roth, 2013; Azevedo, 2016, Oke y otros, 2017). Uno de ellos hace referencia al aumento de temperatura medido en el aire cerca de la superficie dentro de un asentamiento urbano en comparación con su entorno suburbano/rural. Dentro de esta categoría se definen dos subtipos: la IUC de canopia y la IUC de la capa límite. La canopia urbana es la capa delgada de atmósfera entre el nivel del suelo y la altura de los techos y está fuertemente influenciada por la geometría urbana y el intercambio de energía de microescala. La capa límite urbana está ubicada sobre el nivel de los techos y sus características se ven afectadas por los procesos de mesoescala (es decir, el viento predominante) y los procesos de microescala que tienen lugar en la canopia. El segundo tipo de IUC corresponde a estimaciones de la temperatura de superficie realizadas a partir de imágenes satelitales que han permitido definir un tipo de isla de calor urbano, conocida como isla urbana de calor superficial (IUC-S) (Takebayashi y Moriyama, 2007; Xu, 2009; Schwarz y otros, 2011; Peng y otros, 2012; Deng y Wu, 2013; Du y otros, 2016, Haashemi y otros, 2016).

1.4 Cuantificación de la isla urbana de calor

La estimación de la magnitud de la IUC de canopia usualmente se realiza a partir del contraste entre las temperaturas del aire medidas en una estación meteorológica urbana y una rural. La Figura 1.1 muestra un esquema del perfil de la temperatura del aire de acuerdo con el uso del suelo. Se computa la magnitud de la IUC según:

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r \quad (1.1)$$

donde T_u indica la temperatura del área urbana y T_r la de la zona rural.

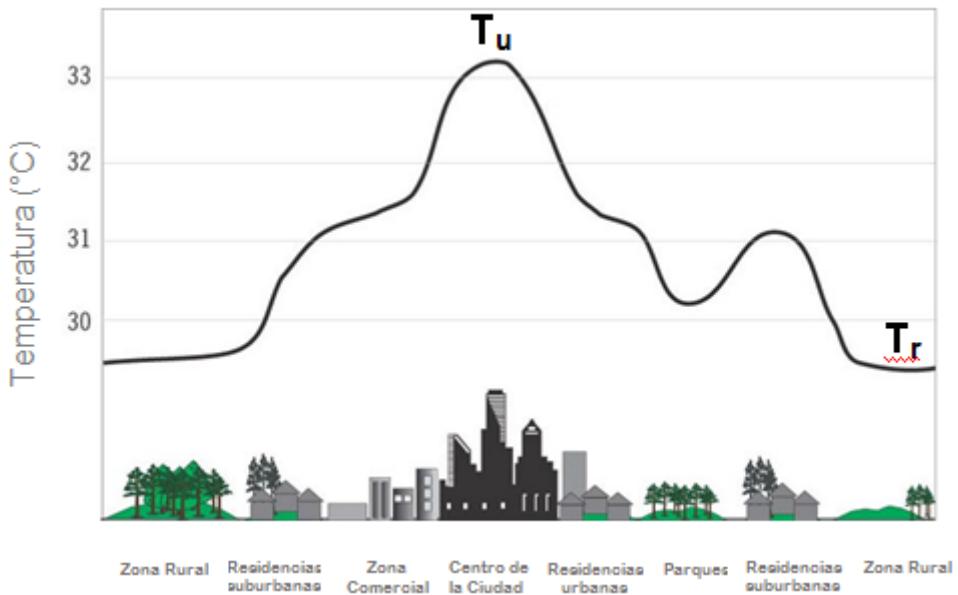


Figura 1.1: Esquema del perfil de la temperatura del aire según usos del suelo.

La magnitud de la IUC-S es calculada como la diferencia entre la temperatura de la superficie terrestre del área urbana y la de su área no urbana circundante (Rao, 1972). Si bien las intensidades de ambos tipos de IUC son similares en la escala anual, pueden tener diferentes variabilidades diurnas y estacionales (Cui y De Foy, 2012; Chakraborty y otros, 2016).

1.5 Factores que controlan la intensidad de la isla urbana de calor

La intensidad del efecto urbano depende de un conjunto de parámetros meteorológicos entre los que se encuentran la estabilidad atmosférica, la velocidad del viento, la presión atmosférica, la humedad relativa y la nubosidad. Como resultado de cambios en estos factores, las IUC cambian constantemente de forma e intensidad a lo largo del día (e.g. Runnalls y Oke 2000; Morris y otros, 2001; Mihalakakou y otros, 2002; Kim and Baik, 2002, 2004; Alonso y otros, 2007, Camilloni y Barrucand, 2012). Varios autores sugieren que la velocidad del viento y la nubosidad son los parámetros meteorológicos más significativos que influyen en la intensidad y el desarrollo IUC. Esto se debe a que la cantidad de nubes y la velocidad del viento afectan la insolación y la ventilación que son variables representativas de los intercambios radiativos y turbulentos tanto dentro como alrededor de la región urbana. Ambos intercambios influyen en la estabilidad atmosférica, que tiene una fuerte correlación con la intensidad de la IUC (Lee, 1975; Krüger y Emmanuel, 2013; Azevedo y otros, 2016). Por ejemplo, Morris y otros (2001) encontraron una relación

inversa entre la magnitud de la IUC de Melbourne tanto para la velocidad del viento como para la nubosidad. Hoffmann y otros (2012) estudiaron la relación entre la intensidad de la IUC de Hamburgo y la presión atmosférica, la velocidad del viento, la humedad relativa y la nubosidad encontrando la mayor vinculación con las tres últimas variables.

1.6 Consecuencias de la isla urbana de calor

La IUC tiene implicaciones en diversos sectores como el uso de la energía, confort humano y productividad, contaminación del aire y ecología urbana. Por ejemplo, la IUC puede estar asociada a efectos positivos cuando ocurre dentro de ciudades en climas fríos ya que el calor urbano adicional reduce el requerimiento de calefacción residencial. Por el contrario, en las ciudades en climas cálidos, la mayor necesidad de refrigeración transfiere la carga de calor interior al ambiente externo local. A escalas más grandes, la demanda eléctrica adicional para los sistemas de aire acondicionado aumenta las concentraciones de gases de efecto invernadero de las centrales eléctricas que consumen combustibles fósiles (Roth, 2013). Otro aspecto negativo de la IUC estival es debido a sus impactos sobre la salud, ya que las poblaciones urbanas están expuestas a temperaturas elevadas (Kalkstein y Greene, 1987; Luber y McGeehin, 2008) con impactos conocidos sobre la morbilidad y la mortalidad (WMO, 2014). La IUC puede exacerbar los efectos de olas de calor dando lugar a una sinergia entre ambos fenómenos (Li y Bou-Zeid, 2013, Li y otros, 2015, Ramamurthy y Bou-Zeid, 2017, Ramamurthy y otros, 2017, Zhao y otros, 2018).

1.7 Variabilidad temporal de la isla urbana de calor

La intensidad de la IUC presenta variaciones diarias que están relacionadas principalmente con la evolución de los distintos términos de la ecuación de balance de energía durante las horas del día y la noche, y con modificaciones en la situación sinóptica regional. En general, la intensidad máxima se alcanza algunas horas después de la puesta del sol, debido al rápido enfriamiento rural. Más avanzada la noche, el enfriamiento urbano es importante y por lo tanto el desarrollo de la IUC es más lento. Luego del amanecer, el calentamiento rural es más acelerado que el urbano debido a que sus superficies tienen menores capacidades térmicas y mayor exposición a la radiación solar. De esta forma, es frecuente que durante algunas horas del día se desarrolle una "isla fría" (Alonso y otros, 2003; Arnfield, 2003; Alonso y otros, 2007; Gonçalves y otros, 2018).

La variabilidad interanual de la IUC fue analizada por diversos autores quienes encontraron una intensificación a medida que las ciudades crecen y su urbanización continúa (Martínez

y otros, 1991; Comrie ,2000; Kim y Baik, 2002; Gaffin y otros, 2008). Sin embargo, a diferencia de lo que se observó en algunas ciudades del mundo, Camilloni y Barrucand (2012) identificaron una tendencia lineal negativa en la IUC media anual de Buenos Aires entre 1959 y 2007 a pesar del crecimiento de la ciudad. Esta tendencia estaría asociada a la disminución en las condiciones de cielo claro y calma y a un aumento en la velocidad media del viento. Scott y otros (2018) encontraron también una tendencia a la reducción en la magnitud de la IUC en 38 de las 54 ciudades de Estados Unidos analizadas durante el período 2000-2015 asociando este comportamiento a cambios en las condiciones sinópticas.

1.8 Antecedentes de estudios de la isla urbana de calor de Buenos Aires

Buenos Aires es una de las ciudades más grandes del mundo en términos de población y en los últimos años se han realizado diversos estudios para caracterizar diferentes aspectos de su clima urbano (Camilloni y Mazzeo, 1987; Rusticucci y Vargas, 1991; Barros y Camilloni, 1994; Camilloni y Barros, 1997; Figuerola y Mazzeo, 1998; Bejarán y Camilloni, 2003; Camilloni y Barrucand, 2012, Llano y Vagas, 2017). En todos los casos donde se analiza la IUC de Buenos Aires, estos trabajos identifican los máximos contrastes de temperatura entre la ciudad y sus alrededores en horas nocturnas e indicios de una isla fría en las primeras horas de la tarde. En términos de la variabilidad temporal de la magnitud de la IUC, Camilloni y Barrucand (2012) encuentran que, si bien la población del AMBA tuvo un aumento persistente desde principios del siglo XX, el efecto de IUC nocturna ha disminuido. Tanto el análisis de variabilidad decenal como el interanual muestran una reducción de la intensidad nocturna de la IUC de Buenos Aires en todas las estaciones del año.

1.9 Objetivos

El objetivo general en el que se enmarca este trabajo es avanzar en el conocimiento del clima urbano del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) con énfasis en los cambios observados en la temperatura durante las últimas décadas.

Los objetivos específicos son:

Realizar una caracterización de la variación temporal de la temperatura media, máxima y mínima del AMBA

Analizar la evolución de la isla urbana de calor de canopia (IUC) de la ciudad de Buenos Aires durante las últimas décadas

Identificar parámetros atmosféricos que se vinculan con la intensidad de la IUC

Comparar la intensidad de la isla urbana de calor superficial de la ciudad de Buenos Aires con la de otros grandes centros urbanos del país

1.10 Estructura de la Tesis

La presente tesis está estructurada de la siguiente forma: en el Capítulo 2 se presenta el área de estudio y la información utilizadas. En el Capítulo 3, se muestran los resultados obtenidos en el estudio de las tendencias de temperatura máxima, mínima y media a nivel mensual, estacional y anual. Luego, en el Capítulo 4, se presenta el análisis de la intensidad de la IUC de Buenos Aires y su variabilidad temporal incluyendo la descripción de los ciclos diario y anual, así como la variabilidad interanual y decadal. Posteriormente en el Capítulo 5, se relaciona la intensidad de la IUC con factores meteorológicos tales como nubosidad, intensidad del viento y humedad relativa. A continuación, el Capítulo 6 presenta las IUC-S de los aglomerados urbanos Buenos Aires, Rosario, Córdoba, Mendoza y Buenos Aires y realiza una comparación entre las intensidades de la IUC derivadas de la temperatura del aire y la IUC-S para la ciudad de Buenos Aires. Finalmente, el Capítulo 7 resume las conclusiones de esta tesis y presenta el trabajo a seguir.

Capítulo 2

Información Utilizada

2.1 Área de Estudio

El Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) se encuentra sobre la costa occidental del Río de la Plata, que a la altura de la ciudad de Buenos Aires tiene aproximadamente 50 km de ancho. El suelo de esta región es relativamente llano con diferencias de nivel de no más de 30 metros y se encuentra atravesado por ríos y arroyos. Ocupa un territorio de cerca de 3.900 km² (Figura 2.1), concentra 14 millones de habitantes que representan el 32% de la población nacional, y genera aproximadamente el 52 % del Producto Bruto Interno (PBI) del país. Este gran territorio situado en la provincia de Buenos Aires está bajo la jurisdicción de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), con 3 millones de habitantes y una superficie de 200 km², y de 24 partidos que constituyen el denominado Conurbano Bonaerense (GBA), donde se concentran los 11 millones de habitantes restantes (INDEC, 2019).

En la Figura 2.2 se presenta la evolución de la población del Área Metropolitana para los años censales del período 1914-2010 junto con la estimación para el año 2017 y la proyección para el año 2025 (INDEC, 2019). Se observa un crecimiento constante durante todo el período con una aceleración a partir de la década del '40. Sin embargo, este crecimiento es diferencial según se considere CABA o GBA. La población de CABA se ha mantenido sin variaciones significativas desde el censo de 1947 mientras que en el GBA se identifica un incremento sostenido a lo largo de todos los censos (Figura 2.3). Las proyecciones realizadas por el INDEC para el año 2025 muestran que la población del AMBA sería de aproximadamente 15 millones de habitantes (Figura 2.2).

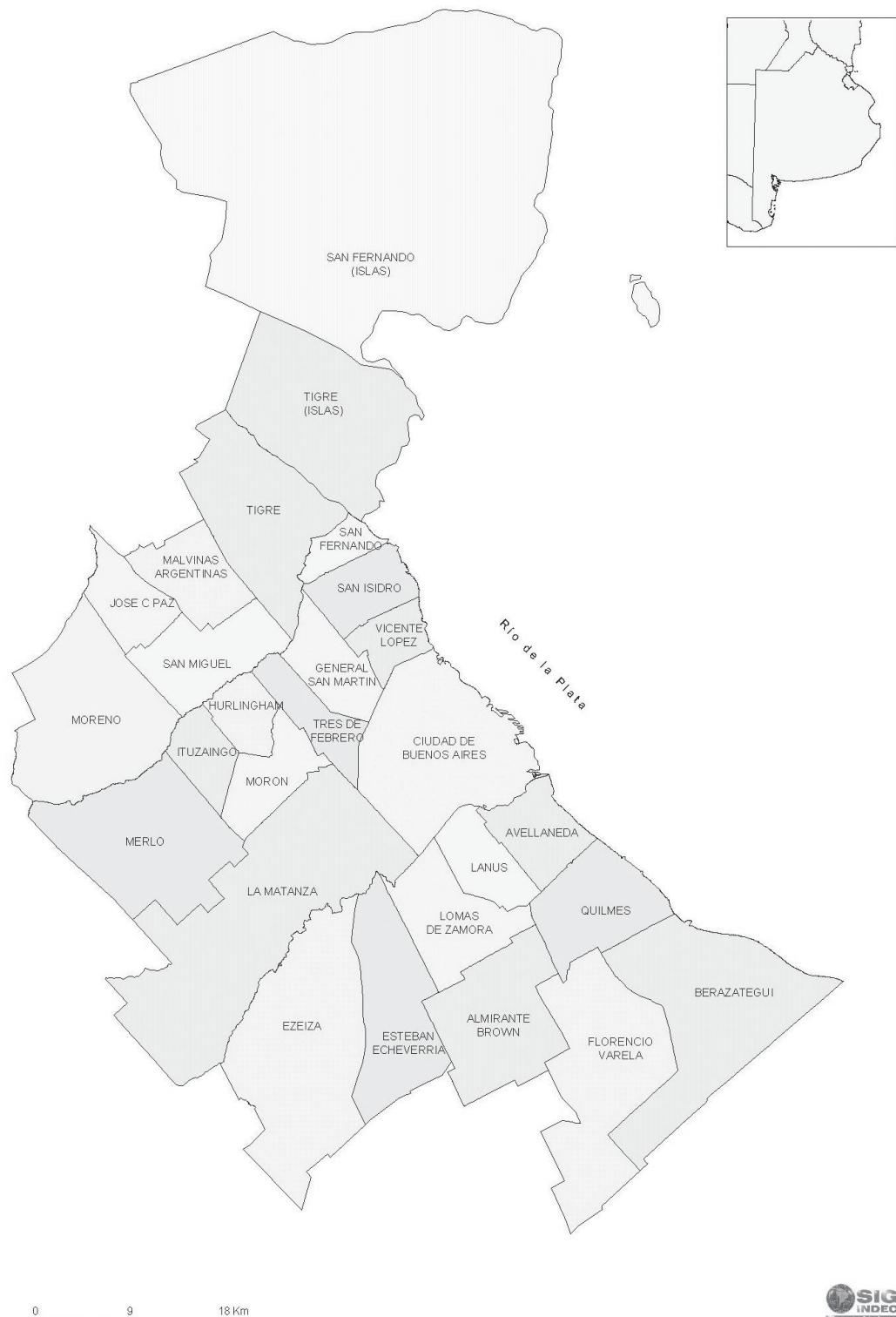


Figura 2.1: Área Metropolitana de Buenos Aires conformada por CABA y 24 partidos del Gran Buenos Aires. Fuente: INDEC (2003).

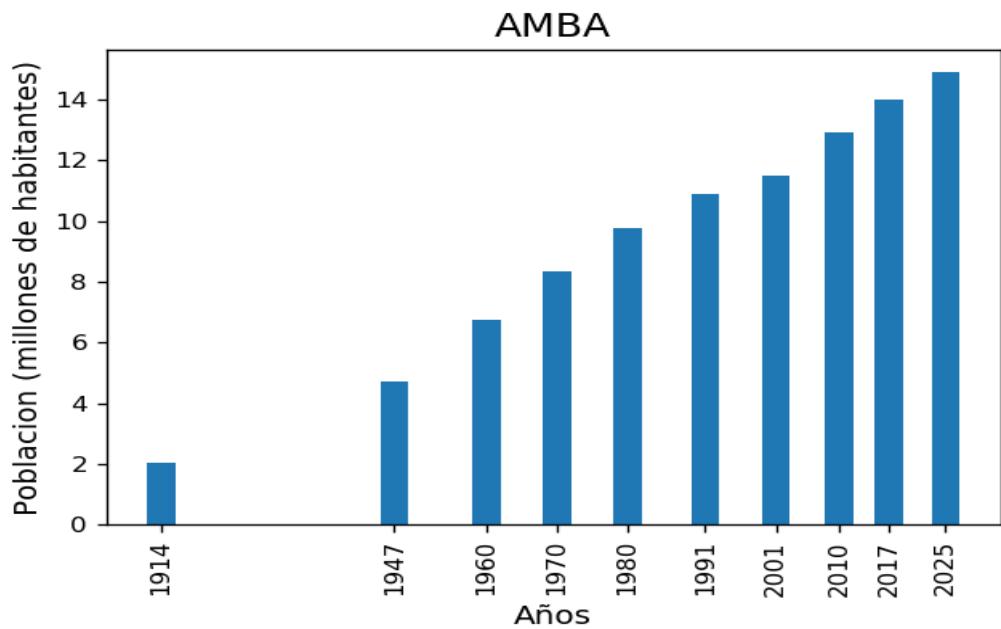


Figura 2.2: Evolución de la población del AMBA según censos nacionales. El dato del año 2017 es una estimación y el del año 2025 es una proyección. Fuente: IINDEC (2019).

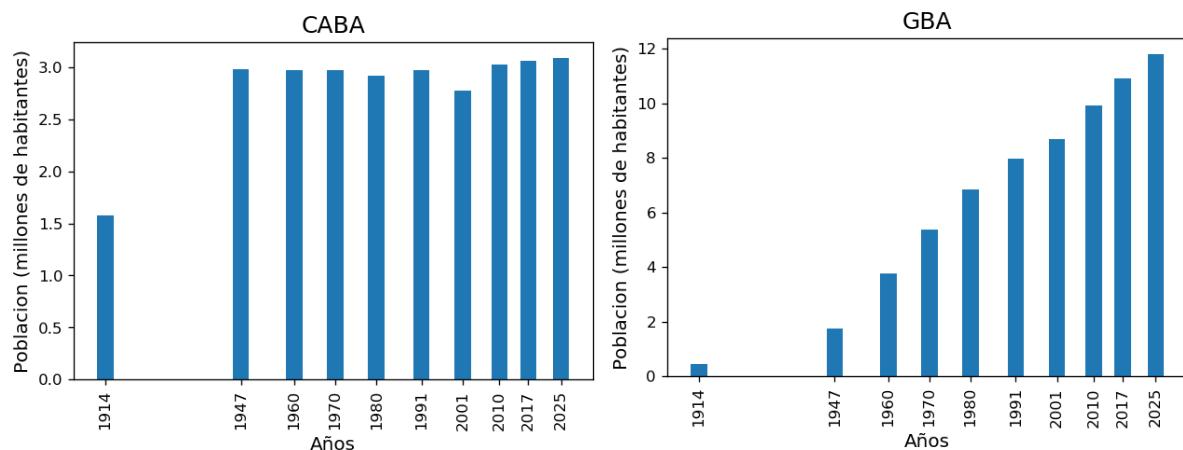


Figura 2.3: Idem Figura 2.2 para CABA (izquierda) y GBA (derecha).

Con el objeto de realizar una comparación de algunas características de la isla urbana de calor de Buenos Aires con las de otras ciudades argentinas, se seleccionaron los tres aglomerados del país que la siguen en importancia en términos de población urbana: Rosario, Córdoba y Mendoza. En la Tabla 2.1 se presenta la población estimada para cada una de ellas, así como el área que ocupan (INDEC, 2019).

Aglomerado Urbano	Población	Área (km ²)
Mendoza	984.000	168
Córdoba	1.438.000	576
Rosario	1.447.000	589

Tabla 2.1: Población estimada para el año 2017 y superficie de los tres aglomerados urbanos que le siguen en importancia al AMBA. Fuente: INDEC (2019)

2.2 Datos correspondientes a estaciones meteorológicas

Se analizaron datos de cinco estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de observación del Servicio Meteorológico Nacional ubicadas en el AMBA. Dos de ellas se encuentran dentro de CABA: Aeroparque y el Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA) y las tres restantes se ubican en el Gran Buenos Aires: Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero. En la Figura 2.4 se muestra la ubicación de cada una de ellas y en la Tabla 2.2. se indican sus coordenadas geográficas.



Figura 2.4: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas consideradas: Aeroparque, OCBA, Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero.

Estación	Latitud (S)	Longitud (O)	Altura (m)
Aeroparque	34°34'	58°25'	6
Observatorio Central de Buenos Aires	34°35'	58°29'	25
Ezeiza Aero	34°49'	58°32'	20
El Palomar Aero	34°36'	58°36'	12
Don Torcuato Aero	34°29'	58°37'	4

Tabla 2.2: Estaciones meteorológicas seleccionadas en el área de estudio. Se indican las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y altura sobre el nivel del mar.

Las variables analizadas fueron temperatura horaria, así como las temperaturas máxima y mínima diarias. En la Tabla 2.3 se presenta el período con información disponible en cada una de las estaciones para las diferentes variables de temperatura, así como el porcentaje de datos faltantes.

Estación	T máxima	T mínima	T horaria
Aeroparque	1959-2017 (1.6%)	1959-2017 (0.2%)	1976-2017 (0.5%)
Observatorio Central de Buenos Aires	1959-2017 (0.4%)	1959-2017 (0.3%)	1976-2017 (0.8%)
Ezeiza Aero	1959-2017 (1.8%)	1959-2017 (1.3%)	1976-2017 (0.03%)
El Palomar Aero	1959-2008 (4.1%)	1959-2008 (4.1%)	1959-2017* (3.5%)
Don Torcuato Aero	1963-2005 (7.8%)	1963-2005 (7.3%)	S/D

Tabla 2.3: Períodos con información de temperatura máxima, mínima y horaria disponible en cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas. Se indicada además en cada caso el porcentaje de datos faltantes en el período. * sólo horas principales. S/D: sin datos

De acuerdo con la disponibilidad de datos, se seleccionó el período 1964-2005 para llevar a cabo el análisis comparativo de temperatura máxima y mínima, así como de la temperatura media derivada de las temperaturas extremas en las cinco estaciones. El lapso más prolongado analizado es 1959-2017 que sólo cuenta con información de temperaturas máxima y mínima diarias en las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza Aero. Finalmente, el análisis de datos horarios se restringió también a estas tres estaciones

y al período 1976-2017 (1978-2017 en el estudio decadal). En el caso particular de la estación OCBA, se utilizó información de temperatura de rocío, nubosidad total y velocidad del viento a nivel horario disponible en el período 1991-2017. A partir de la temperatura de rocío se obtuvo la humedad relativa de acuerdo con la ecuación psicrométrica.

2.3. Datos correspondientes a sensores remotos

Para el análisis de la isla urbana de calor superficial (IUC-S) se utilizó la información generada a través del algoritmo *simplified-urban-extent* (SUE) desarrollado por Chakraborty y Lee (2018). Este algoritmo permitió calcular la intensidad de la IUC-S a través de imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de alrededor de 9500 clusters urbanos para el período 2003-2017. El conjunto de datos desarrollado por Chakraborty y Lee (2018) está disponible a través de una aplicación web interactiva donde se puede obtener información acerca de las intensidades de islas urbanas de calor de casi todos los clusters.

En la metodología desarrollada por Chakraborty y Lee (2018), se consideraron datos de temperatura de superficie derivados del MODIS TERRA (MOD11A2) y AQUA (MYD1A2), disponibles para una resolución de 1km x 1km donde sólo se utilizaron pixeles de cielo claro con un error promedio de temperatura de superficie menor a 3K. Se distinguieron dos subconjuntos de datos de acuerdo con el uso del suelo (urbano y no-urbano) y se removieron los pixeles correspondientes a agua debido a su gran capacidad calorífica que podría llevar a una sobreestimación de la intensidad de la IUC-S en el día y una subestimación durante la noche. Para cada uno de los clusters urbanos, la magnitud de la IUC-S fue estimada como el promedio espacial derivado de cada subconjunto. El valor diurno se calculó como la media entre la estimación para las horas 10.30 y 13.30 y el nocturno a partir del promedio de las 01.30 y 22.30 horas.

Capítulo 3

Tendencias de Temperatura

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis de las tendencias de la temperatura media, máxima y mínima a nivel mensual, estacional y anual de las estaciones meteorológicas seleccionadas en el Área Metropolitana de Buenos Aires (ver sección 2.2). Se comparan los resultados obtenidos con el objeto de contrastar el comportamiento urbano/suburbano de la evolución temporal de la temperatura, así como entre estaciones emplazadas en un mismo ambiente, esto es Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) y Aeroparque (urbanas) y Ezeiza, El Palomar y Don Torcuato (suburbanas). El análisis de significancia estadística de las tendencias fue realizado de acuerdo con el test de Mann Kendall (Kendall 1975).

3.2 Análisis de tendencias en las estaciones meteorológicas disponibles en el AMBA

De acuerdo con la disponibilidad de información, se seleccionó el período 1964-2005 como aquel donde se cuenta con información de temperatura máxima y mínima diarias en las cinco estaciones meteorológicas del AMBA (Tabla 2.2). Sin embargo, debido a que en las estaciones El Palomar y Don Torcuato faltan 6 y 11 años respectivamente durante ese lapso de tiempo, el cómputo de tendencias se realizó sólo para el subperíodo 1983-2005 donde la cantidad de datos faltante es mínima (4 años). La temperatura media diaria fue calculada a partir del promedio de las temperaturas extremas y los promedios mensuales y anuales en todos los casos fueron obtenidos a partir de los datos diarios.

Temperatura Máxima

En las Figuras 3.1 y 3.2 se presenta la evolución de la temperatura máxima media anual para las estaciones urbanas (Figura 3.1) y suburbanas (Figura 3.2). La comparación entre las estaciones de la ciudad de Buenos Aires muestra que la temperatura máxima anual en OCBA está siempre por encima que en Aeroparque con un promedio de 1.2°C durante el período analizado. Este comportamiento asociado al efecto moderador de la temperatura

que ejerce el Río de la Plata sobre la zona costera de la ciudad fue también identificado por distintos autores analizando diferentes períodos de tiempo (Rusticucci y Vargas, 1991; Camilloni, 2015). En el caso de las estaciones suburbanas (Figura 3.2) se identifica un comportamiento similar entre Ezeiza y El Palomar y temperaturas algo más frías en Don Torcuato a partir de 1990. De la comparación entre todas las estaciones surge que OCBA es la estación con temperaturas máximas más elevadas con una diferencia de 0.3°C en promedio con respecto a la media de las estaciones suburbanas.

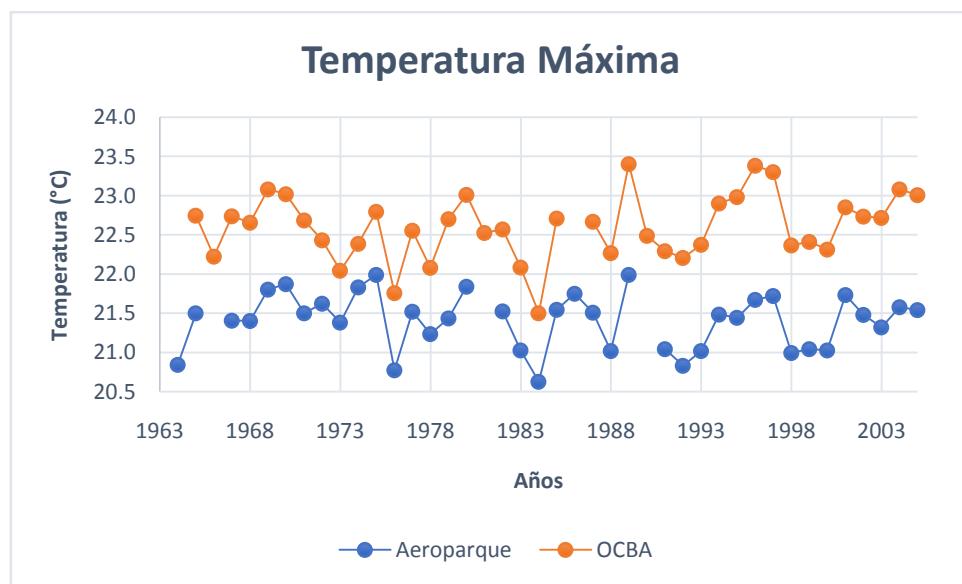


Figura 3.1: Evolución de la temperatura máxima anual (°C) para las estaciones urbanas OCBA y Aeroparque en el período 1964-2005.

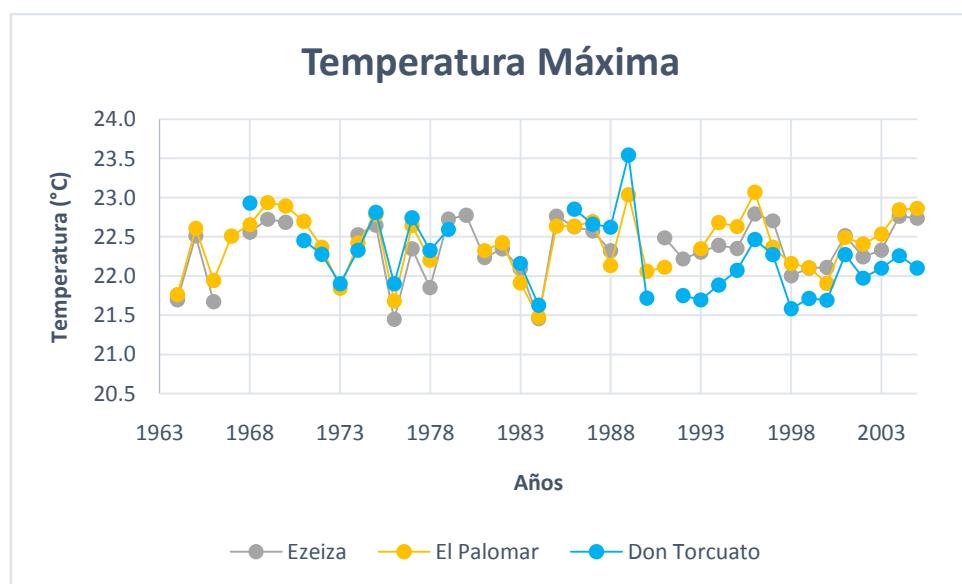


Figura 3.2: Evolución de la temperatura máxima anual (°C) para las estaciones suburbanas Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero en el período 1964-2005.

En la Tabla 3.1, se presentan las tendencias de la temperatura máxima en el subperíodo 1983-2005 para las cinco estaciones meteorológicas seleccionadas. Se encuentra que hay muy pocos casos de tendencias significativas. A nivel mensual, sólo los meses de julio y agosto en OCBA muestran tendencias positivas y con nivel de significancia del 95% y 90%, respectivamente. Las tendencias estacionales presentan significancia durante el trimestre de invierno sólo en OCBA. En términos anuales, esta estación presenta una tendencia positiva significativa (95%) en la temperatura máxima de $+0.31^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Las restantes estaciones muestran también tendencias sin significancia estadística que son positivas con excepción de Don Torcuato donde presenta una tendencia hacia el enfriamiento.

Tendencias de la Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$)					
	<i>Aeroparque</i>	<i>OCBA</i>	<i>Ezeiza</i>	<i>El Palomar</i>	<i>Don Torcuato</i>
Enero	-0.28	-0.15	-0.19	-0.21	-0.59
Febrero	-0.37	-0.21	-0.21	-0.28	-0.66
Marzo	+0.06	+0.33	+0.22	+0.27	-0.21
Abril	+0.03	+0.09	-0.09	+0.11	-0.42
Mayo	+0.11	+0.32	+0.11	+0.30	-0.15
Junio	+0.54	+0.64	+0.37	+0.60	+0.13
Julio	+0.40	*+0.73	+0.20	+0.40	-0.06
Agosto	+0.60	^+0.79	+0.35	+0.65	+0.30
Septiembre	+0.22	+0.31	-0.11	+0.24	-0.16
Octubre	-0.05	+0.17	+0.05	+0.15	-0.31
Noviembre	-0.10	+0.21	0.00	+0.01	-0.20
Diciembre	+0.08	+0.25	+0.11	+0.09	-0.25
DEF	-0.24	-0.09	-0.09	-0.26	+0.10
MAM	+0.05	+0.25	+0.08	+0.22	-0.26
JJA	+0.51	*+0.74	+0.30	+0.55	+0.10
SON	+0.02	+0.23	0.00	+0.13	-0.27
ANUAL	+0.11	*+0.31	+0.11	+0.17	-0.19

Tabla 3.1: Tendencias ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$) de la temperatura máxima para las estaciones Aeroparque, OCBA, Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero y su significancia estadística (^ indica al 90% y * al 95%).

Temperatura Mínima

En las Figuras 3.3 y 3.4 se muestra la evolución de la temperatura mínima anual para las cinco estaciones meteorológicas estudiadas según estén emplazadas en un ambiente

urbano (Figura 3.3) o suburbano (Figura 3.4). A la inversa de lo que sucede con la temperatura máxima, la Figura 3.3 muestra valores mayores en la estación Aeroparque en comparación con OCBA. Nuevamente, el efecto moderador ejercido por el Río de la Plata durante el período frío es probablemente responsable de estas diferencias. La comparación entre las estaciones suburbanas muestra a Don Torcuato con mayores valores que Ezeiza y El Palomar. Estas últimas estaciones presentan un comportamiento similar a partir del año 1983. En este caso, la diferencia promedio de la temperatura mínima en OCBA y la media de las estaciones suburbanas es de 2°C.

En la Tabla 3.2 se presentan las tendencias de la temperatura mínima en el período entre 1983 y 2005 para las cinco estaciones consideradas. Se encuentra que en las dos estaciones urbanas sólo hay tendencias significativas en febrero y en verano (Aeroparque) y en junio y otoño (OCBA). En el primer caso son negativas y en el segundo positivas. En el caso de las estaciones suburbanas, las tendencias son significativas y positivas sólo en mayo, junio y agosto en Ezeiza. Para los meses de enero, noviembre y diciembre en El Palomar y en Don Torcuato las tendencias son significativas (con diferente nivel de significancia) y negativas. En términos estacionales, hay tendencia con significancia que es positiva durante el otoño e invierno en Ezeiza y negativa en el verano en El Palomar y Don Torcuato. Ezeiza es el único lugar donde se registra una tendencia significativa a nivel anual.

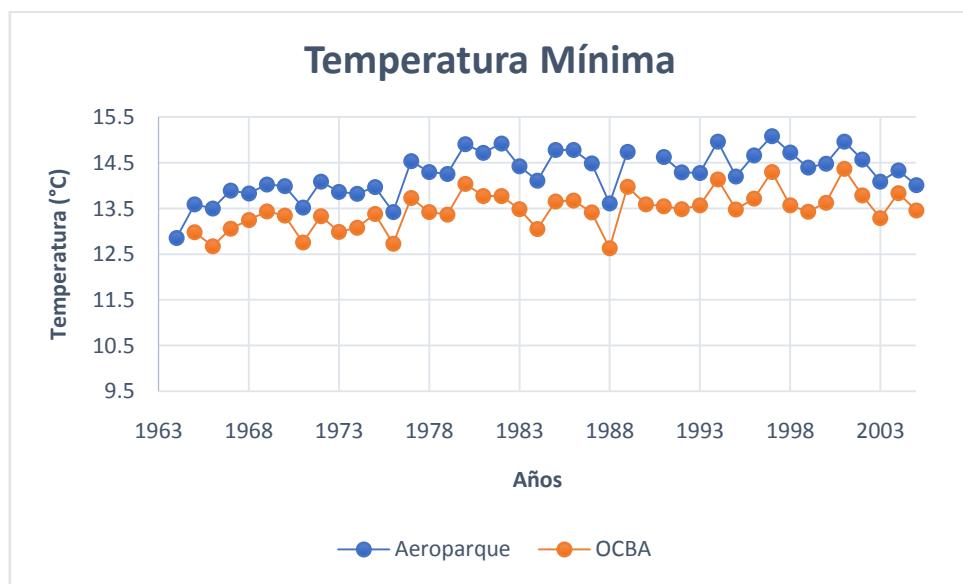


Figura 3.3: Evolución de la temperatura mínima anual (°C) para las estaciones urbanas OCBA y Aeroparque en el período 1964-2005.

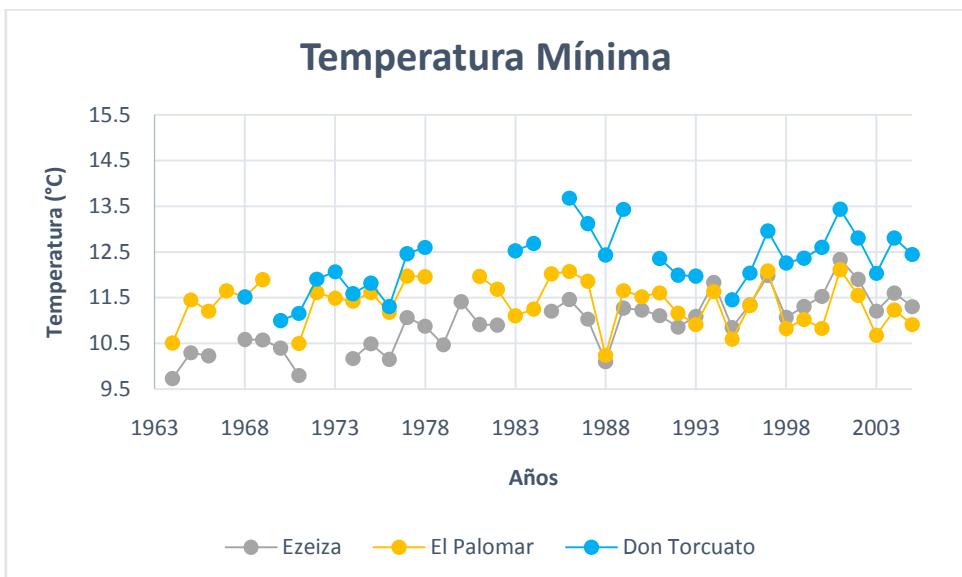


Figura 3.4: Evolución de la temperatura mínima anual (°C) para las estaciones suburbanas Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero en el período 1964-2005.

Tendencias de la Temperatura Mínima (°C/década)					
	Aeroparque	OCBA	Ezeiza	El Palomar	Don Torcuato
Enero	-0.46	-0.44	-0.22	*-1.07	^-0.78
Febrero	*-0.47	-0.24	-0.04	-0.60	-0.43
Marzo	+0.29	+0.54	+0.66	+0.11	+0.08
Abril	-0.10	+0.19	+0.54	-0.04	-0.20
Mayo	+0.35	+0.59	*+0.91	+0.37	+0.23
Junio	+0.72	^+0.85	^+1.04	+0.47	+0.35
Julio	+0.12	+0.28	+0.63	+0.08	-0.12
Agosto	+0.26	+0.43	^+1.04	+0.32	+0.18
Septiembre	+0.07	+0.22	+0.46	+0.02	-0.10
Octubre	-0.02	+0.09	+0.26	-0.41	-0.23
Noviembre	-0.18	+0.01	+0.11	^-0.53	^-0.35
Diciembre	-0.54	-0.42	+0.09	*-0.85	*-0.82
DEF	^-0.48	-0.33	+0.07	*-0.81	^-0.42
MAM	+0.15	^+0.44	*+0.70	+0.15	+0.04
JJA	+0.37	+0.52	^+0.90	+0.29	+0.14
SON	-0.04	+0.11	+0.25	-0.30	-0.19
ANUAL	0.00	+0.17	^+0.35	-0.18	-0.15

Tabla 3.2: Tendencias (°C/década) de la temperatura mínima para las estaciones Aeroparque, OCBA, Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero y su significancia estadística (^ indica al 90% y * al 95%).

Temperatura Media

Las Figuras 3.5 y 3.6 presentan las series temporales de la temperatura media anual para las estaciones de la zona urbana (Figura 3.5) y suburbana (Figura 3.6). La temperatura media es similar en las estaciones Aeroparque y OCBA ya que se obtuvo del promedio de las temperaturas máxima y mínima que muestran un comportamiento inverso en ambas variables. Sin embargo, a partir del año 1987, OCBA muestra sistemáticamente valores más altos que alcanzan un máximo de 18.8°C en 1997. Respecto a las estaciones suburbanas. Ezeiza y El Palomar tienen un comportamiento similar entre sí. mientras que Don Torcuato tiende a mostrar valores más altos forzados por la temperatura mínima (Figura 3.4). A partir del año 1999, Ezeiza toma valores levemente superiores a los de El Palomar.

La Tabla 3.3 presenta las tendencias de la temperatura media para el período 1983-2005. Sólo se encuentran tendencias que son significativas para los meses de junio en OCBA (positiva) y enero en Don Torcuato (negativa) y en el otoño en Ezeiza e invierno en OCBA (positivas) y en verano en El Palomar y Don Torcuato (negativas) La temperatura media anual muestra tendencias significativas sólo en OCBA (+0.25°C/década).

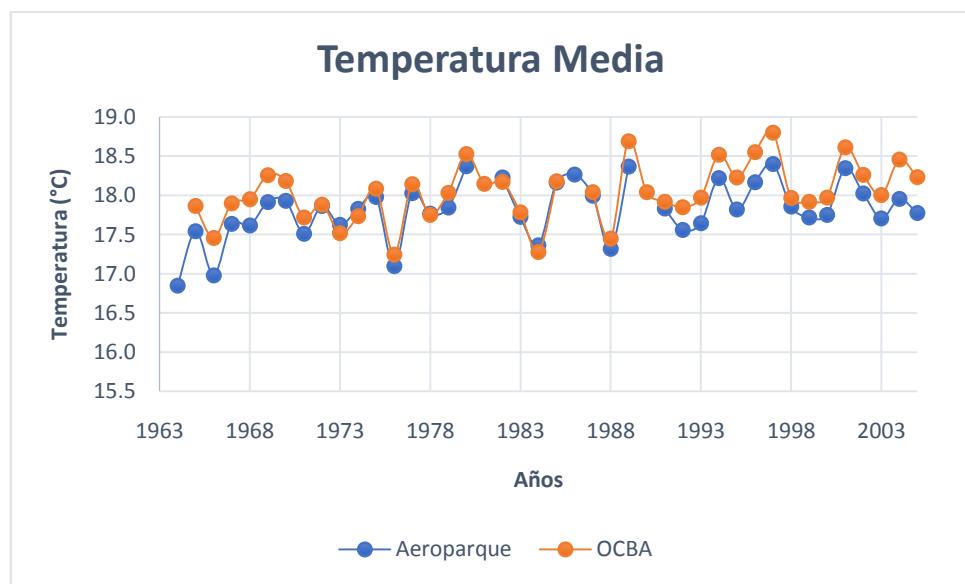


Figura 3.5: Evolución de la temperatura media anual (°C) para las estaciones urbanas OCBA y Aeroparque en el período 1964-2005.

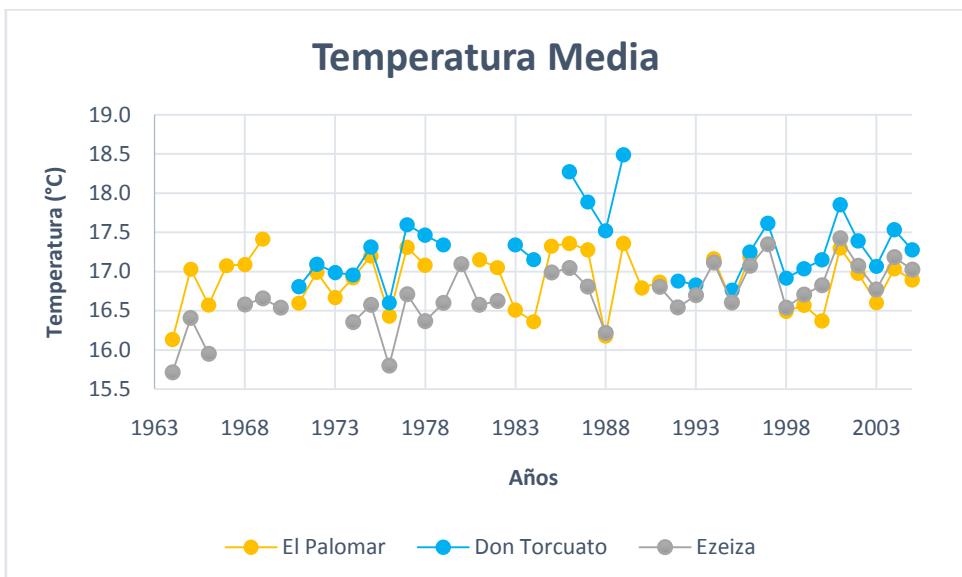


Figura 3.6: Evolución de la temperatura media anual (°C) para las estaciones suburbanas Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero en el período 1964-2005.

Tendencia de la Temperatura Media (°C/década)					
	Aeroparque	OCBA	Ezeiza	El Palomar	Don Torcuato
Enero	-0.37	-0.30	-0.21	-0.69	*-0.68
Febrero	-0.43	-0.22	-0.10	-0.44	-0.55
Marzo	+0.17	+0.43	+0.42	+0.19	-0.07
Abril	-0.03	+0.14	+0.22	+0.05	-0.31
Mayo	+0.23	+0.46	+0.51	+0.34	+0.04
Junio	+0.63	^+0.74	+0.69	+0.53	+0.24
Julio	+0.26	+0.56	+0.41	+0.24	-0.09
Agosto	+0.43	+0.61	+0.69	+0.49	+0.25
Septiembre	+0.15	+0.27	+0.17	+0.13	-0.11
Octubre	-0.04	+0.13	+0.17	-0.15	-0.25
Noviembre	-0.14	+0.11	+0.06	-0.27	-0.27
Diciembre	-0.23	-0.07	+0.14	-0.38	^-0.53
DEF	+0.09	+0.25	+0.52	^-0.54	*-0.62
MAM	+0.10	+0.34	*+0.39	+0.19	-0.11
JJA	+0.44	^+0.68	+0.59	+0.42	+0.12
SON	-0.01	+0.17	+0.15	-0.09	-0.23
ANUAL	+0.05	^+0.25	+0.16	-0.02	-0.19

Tabla 3.3: Tendencias (°C/década) de la temperatura media para las estaciones Aeroparque, OCBA, Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero y su significancia estadística (^ indica al 90% y * al 95%).

3.3 Análisis de tendencias para las estaciones meteorológicas disponibles en el AMBA con registros más prolongados

En esta sección se analizan las temperaturas máxima, mínima y media para el período 1959-2017 en las tres estaciones con información disponible en ese lapso de tiempo: Aeroparque, OCBA y Ezeiza. Al igual que en la sección anterior, la temperatura media fue obtenida a partir del promedio de las temperaturas extremas. La cantidad de datos faltantes en este período en la temperatura media anual son 6 años en Aeroparque, 3 años en OCBA y 11 años en Ezeiza.

Temperatura Máxima

En la Figura 3.7 se presenta la evolución de la temperatura máxima anual y la correspondiente tendencia lineal para las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza. Se observa que Aeroparque presenta valores de temperatura máxima anual inferiores a los de OCBA y Ezeiza como resultado de su cercanía al Río de la Plata. De esta forma, se encuentra que la diferencia media en la temperatura máxima entre las estaciones urbanas es 1.2°C, mayor que entre las estaciones de la ciudad con Ezeiza: 1.0°C en el caso de Aeroparque y 0.2°C para OCBA.

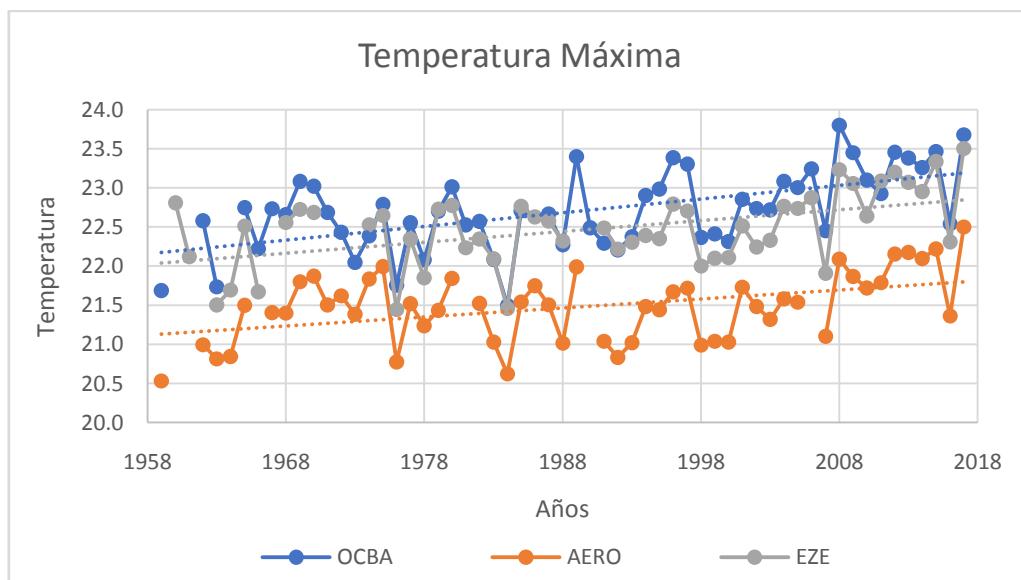


Figura 3.7: Evolución de la temperatura máxima anual (°C) para las estaciones OCBA, Aeroparque y Ezeiza en el período 1959-2017. En línea punteada se indican las tendencias lineales de cada serie.

La Tabla 3.4 presenta las tendencias a nivel mensual, estacional y anual de la temperatura máxima para las tres estaciones meteorológicas. La mayor cantidad de meses (7) y estaciones (3) con tendencias positivas significativas se encuentra en OCBA seguida de Ezeiza (5 meses y 2 estaciones) y Aeroparque (3 meses y 2 estaciones). En las tres estaciones meteorológicas se encuentran tendencias positivas y significativas en los valores anuales con el máximo valor en OCBA (+0.17°C/década).

Tendencias de la Temperatura Máxima (°C/década)			
	Aeroparque	OCBA	Ezeiza
Enero	+0.08	*+0.20	+0.14
Febrero	0.00	+0.06	0.00
Marzo	+0.04	+0.11	+0.11
Abril	+0.11	^+0.18	+0.12
Mayo	+0.03	-0.03	-0.07
Junio	*+0.20	*+0.24	*+0.23
Julio	+0.09	+0.09	+0.03
Agosto	*+0.25	*+0.27	*+0.26
Septiembre	+0.10	+0.11	+0.07
Octubre	^+0.15	*+0.23	*+0.22
Noviembre	+0.11	*+0.23	*+0.24
Diciembre	+0.16	*+0.28	*+0.25
DEF	^+0.09	*+0.20	+0.11
MAM	+0.07	+0.09	+0.07
JJA	*+0.19	*+0.20	*+0.15
SON	+0.10	*+0.19	*+0.18
ANUAL	*+0.12	*+0.17	*+0.14

Tabla 3.4: Tendencias (°C/década) de la temperatura máxima para las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza Aero y su significancia estadística (^ indica al 90% y * al 95%).

Temperatura Mínima

En la Figura 3.8 se presenta la evolución de la temperatura mínima anual de las tres estaciones meteorológicas consideradas en esta sección. Los valores más elevados se registran en Aeroparque que en promedio son superiores en 0.8°C a los de OCBA y en 3.2°C a los de Ezeiza. La Tabla 3.5 muestra las tendencias de la temperatura mínima a nivel mensual, estacional y anual. Se encuentra que, a nivel mensual y estacional, la mayor parte de las tendencias son significativas y positivas en las estaciones Aeroparque (11

meses y 4 estaciones) y Ezeiza (11 meses y 4 estaciones) y en menor medida en OCBA (9 meses y 3 estaciones). Las tendencias anuales son significativas y positivas para las tres estaciones meteorológicas alcanzando el valor máximo en Ezeiza (+0.29°C/década). Asimismo, en todos los casos, las magnitudes de las tendencias son superiores a las encontradas para la temperatura máxima.

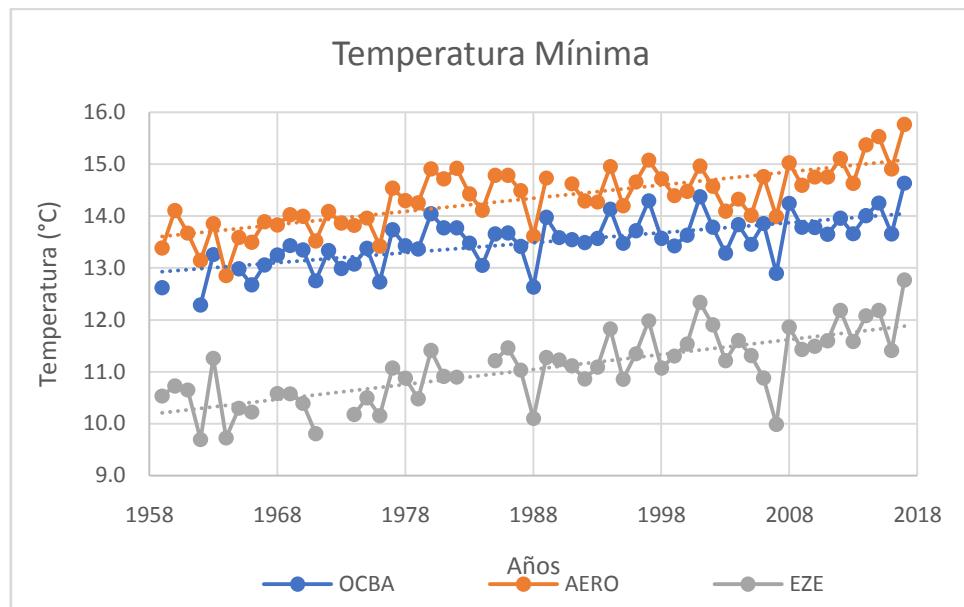


Figura 3.8: Evolución de la temperatura mínima anual (°C) para las estaciones OCBA, Aeroparque y Ezeiza en el período 1959-2017. En línea punteada se indican las tendencias lineales de cada serie.

Tendencias de la Temperatura Mínima (°C/década)			
	Aeroparque	OCBA	Ezeiza
Enero	*+0.28	*+0.31	*+0.35
Febrero	*+0.20	*+0.20	*+0.30
Marzo	*+0.27	*+0.22	*+0.29
Abril	*+0.29	*+0.28	*+0.32
Mayo	*+0.28	^+0.21	*+0.33
Junio	*+0.26	+0.16	^+0.21
Julio	+0.13	+0.01	+0.03
Agosto	*+0.33	*+0.26	*+0.38
Septiembre	*+0.20	^+0.14	*+0.30
Octubre	*+0.30	*+0.26	*+0.31
Noviembre	*+0.24	+0.16	*+0.31
Diciembre	*+0.28	*+0.28	*+0.33
DEF	*+0.28	*+0.27	*+0.33
MAM	*+0.28	*+0.23	*+0.32
JJA	*+0.24	+0.15	*+0.19
SON	*+0.25	*+0.18	*+0.33
ANUAL	*+0.25	*+0.19	*+0.29

Tabla 3.5: Tendencias (°C/década) de la temperatura mínima para las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza Aero y su significancia estadística (^ indica al 90% y * al 95%).

Temperatura Media

La evolución de la temperatura media anual de las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza derivada de las temperaturas máxima y mínima se presenta en la Figura 3.9. Las temperaturas urbanas se mantienen durante todo el período por encima de las de Ezeiza siguiendo un patrón semejante al de la temperatura mínima. La diferencia media entre las estaciones urbanas durante el período es 0.2°C con OCBA levemente más cálida que Aeroparque mientras que el contraste entre OCBA y Ezeiza es de 1.3°C.

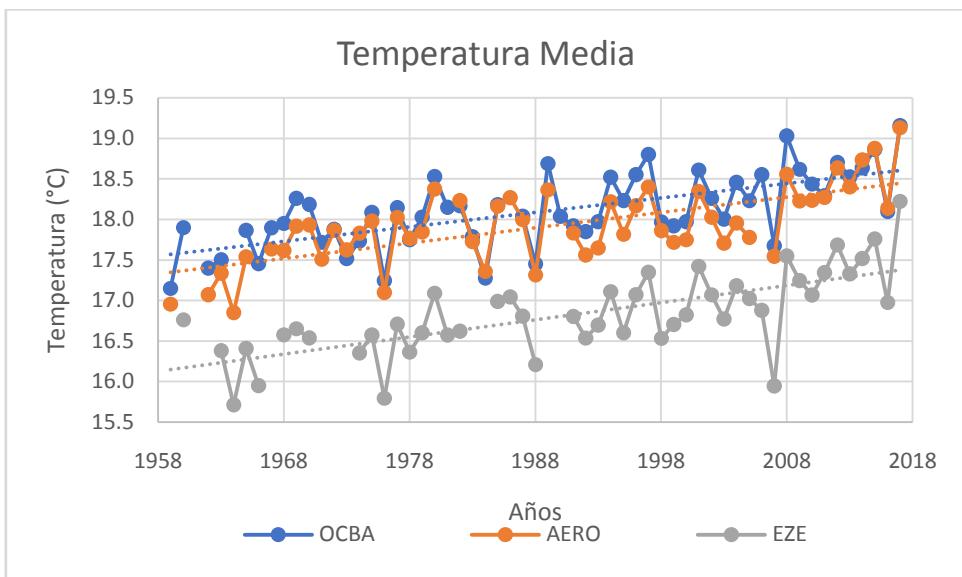


Figura 3.9: Evolución de la temperatura media anual (°C) para las estaciones OCBA, Aeroparque y Ezeiza en el período 1959-2017. En línea punteada se indican las tendencias lineales de cada serie.

Tendencias de la Temperatura Media (°C/década)			
	Aeroparque	OCBA	Ezeiza
Enero	*+0.17	*+0.24	*+0.26
Febrero	^+0.10	^+0.14	^+0.18
Marzo	*+0.15	*+0.16	*+0.19
Abril	*+0.19	*+0.23	*+0.20
Mayo	^+0.18	+0.09	+0.11
Junio	*+0.22	*+0.20	*+0.23
Julio	+0.09	+0.05	+0.04
Agosto	*+0.29	*+0.27	*+0.34
Septiembre	*+0.15	^+0.12	*+0.20
Octubre	*+0.23	*+0.25	*+0.27
Noviembre	^+0.17	*+0.19	*+0.29
Diciembre	*+0.21	*+0.28	*+0.29
DEF	*+0.16	*+0.21	*+0.33
MAM	*+0.18	*+0.16	*+0.20
JJA	*+0.21	*+0.17	*+0.33
SON	*+0.17	*+0.18	*+0.31
ANUAL	*+0.19	*+0.18	*+0.21

Tabla 3.6: Tendencias (°C/década) de la temperatura media para las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza Aero y su significancia estadística (^ indica al 90% y * al 95%).

3.4 Análisis de las tendencias de la temperatura media derivada de datos horarios

En esta sección se realiza el análisis de la evolución de la temperatura media derivada de datos horarios en las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza. El período con información disponible es el comprendido entre 1976 y 2017. En este caso, la cantidad de datos faltantes es mínimo como se indicó en la Tabla 2.3. En la Figura 3.10 se presentan las temperaturas medias anuales para las tres estaciones junto con la tendencia lineal de cada una de ellas. Al igual que en las secciones 3.2 y 3.3, se pueden observar las diferencias entre las estaciones que se encuentran dentro de la Ciudad de Buenos Aires y Ezeiza donde en promedio las estaciones urbanas son 1.1°C más cálidas.

En la Tabla 3.7 se presentan las tendencias de la temperatura media a nivel mensual, estacional y anual. Se encuentra que la mayor parte de tendencias mensuales y estacionales significativas se registran en Ezeiza (6 meses y 4 estaciones). En términos

anuales, la mayor tendencia se registra en la misma estación ($+0.29^{\circ}\text{C}/\text{década}$) superando a las de las estaciones urbanas ($+0.17^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en Aeroparque y $+0.19^{\circ}\text{C}/\text{década}$ de OCBA).

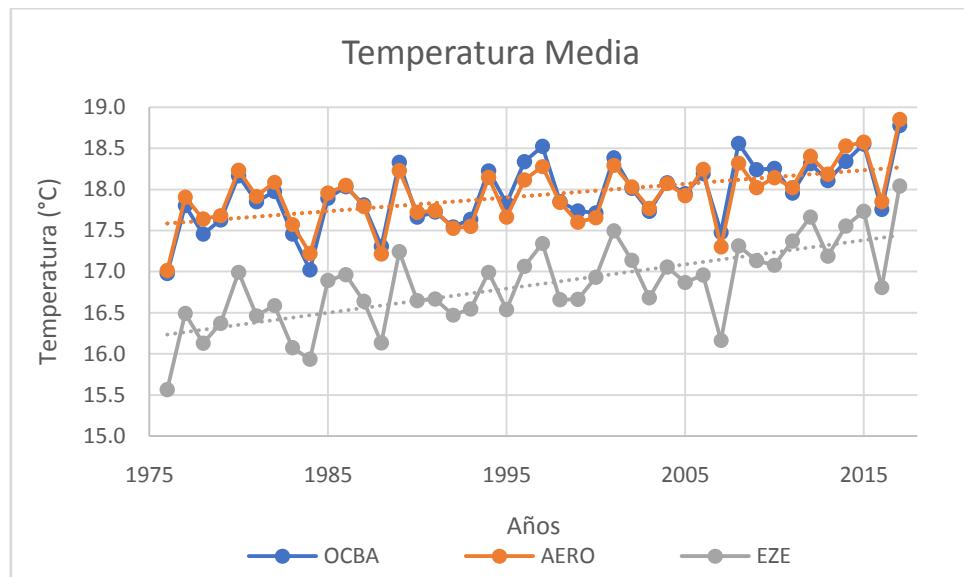


Figura 3.10: Evolución de la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$) para las estaciones OCBA, Aeroparque y Ezeiza en el período 1976-2017. En línea punteada se indican las tendencias lineales de cada serie.

Tendencias de la Temperatura Media (°C/década)			
	Aeroparque	OCBA	Ezeiza
Enero	+0.10	+0.16	*+0.27
Febrero	^+0.19	*+0.24	*+0.32
Marzo	+0.03	+0.06	+0.16
Abril	+0.16	+0.18	^+0.25
Mayo	+0.09	+0.09	^+0.18
Junio	*+0.35	*+0.30	^+0.36
Julio	+0.14	+0.10	+0.21
Agosto	+0.22	+0.22	*+0.42
Septiembre	+0.17	+0.15	*+0.27
Octubre	+0.08	+0.10	*+0.22
Noviembre	^+0.25	*+0.32	*+0.45
Diciembre	+0.21	^+0.30	*+0.42
DEF	^+0.16	*0.23	*+0.33
MAM	+0.09	+0.11	*+0.20
JJA	*+0.24	^+0.21	*+0.33
SON	*+0.17	*+0.19	*+0.31
ANUAL	*+0.17	*+0.19	*+0.29

Tabla 3.7: Tendencias (°C/década) de la temperatura media para las estaciones Aeroparque, OCBA y Ezeiza Aero y su significancia estadística (^ indica al 90% y * al 95%).

3.5 Conclusiones

En este Capítulo se analizaron las tendencias de la temperatura para cinco estaciones meteorológicas del AMBA, dos de ellas ubicadas dentro de CABA y las tres restantes emplazadas en el área suburbana próxima. Se evaluaron las tendencias de las temperaturas máxima y mínima y de la temperatura media derivada de ellas. Asimismo, se calcularon las tendencias derivadas de datos horarios a nivel mensual, estacional y anual. En este último caso, el estudio se limitó a las tres estaciones con datos de esta variable: Aeroparque, OCBA y Ezeiza.

Los resultados obtenidos mostraron que al comparar las cinco estaciones en el período 1983-2005 en escala anual, sólo la temperatura máxima y media en OCBA y la temperatura mínima en Ezeiza presentaron tendencias significativas y positivas. Asimismo, se encontró que la temperatura máxima en OCBA es más cálida que en Aeroparque y que esta relación es inversa para la temperatura mínima poniendo de manifiesto el efecto

moderador del Río de la Plata. Cuando se analizaron las tendencias para las estaciones OCBA, Aeroparque y Ezeiza en el período más prolongado disponible (1959-2017), se obtuvieron tendencias positivas significativas en las tres variables y estaciones de magnitudes semejantes: $+0.19^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en Aeroparque, $+0.18^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en OCBA y $+0.21^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en Ezeiza. Cuando se consideró la temperatura media en estas estaciones derivadas de datos horarios para el período disponible (1976-2017), se encontró que los valores de Aeroparque y OCBA resultaron semejantes y, en promedio, 1.1°C más cálidos que en Ezeiza. Las tendencias anuales obtenidas fueron significativas con el valor correspondiente a Ezeiza ($+0.29^{\circ}\text{C}/\text{década}$) superando a los de Aeroparque ($+0.17^{\circ}\text{C}/\text{década}$) y OCBA ($+0.19^{\circ}\text{C}/\text{década}$). La tendencia de la temperatura media anual en Ezeiza es coincidente con la de la temperatura media global sobre regiones continentales computada para el mismo período con datos disponibles a través de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* de Estados Unidos (<https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series>). Por lo tanto, se puede concluir que Ezeiza es posible de ser considerada como estación de referencia suburbana/rural ya que la tendencia que presenta en la temperatura media es coincidente con el calentamiento global “de fondo” observado para el mismo período de tiempo. En el caso de estación de referencia urbana, se considera que OCBA es la más apropiada ya que está emplazada en un ámbito menos influenciado por el efecto del Río de la Plata que Aeroparque.

Capítulo 4

Isla Urbana de Calor de Buenos Aires

4.1 Introducción

En este capítulo se analizan diversos aspectos de la variabilidad temporal de la intensidad de la isla urbana de calor (IUC) de la ciudad de Buenos Aires durante el período 1978-2017. Este lapso de tiempo que conforma un sub-período dentro del cual se dispone información (1976-2017) fue seleccionado porque permite el estudio de cuatro décadas completas. La magnitud de la IUC es calculada de acuerdo con la ecuación 1.1 (ver Capítulo 1) como la diferencia de temperatura entre el área urbana y el área rural considerando a la temperatura registrada en OCBA como representativa del área urbana y a los datos provenientes de la estación Ezeiza como indicadores de la temperatura rural de acuerdo con lo obtenido en el Capítulo 3.

El análisis que se presenta incluye la descripción de los ciclos diario y anual, así como de la variabilidad interanual y decadal. Dado que la máxima intensidad de la IUC se registra durante la noche y la mínima en horas de la tarde, se calcula la magnitud de la IUC nocturna considerando los datos de temperatura de la hora 03 y la de la IUC diurna con los de la hora 15.

4.2 Ciclo diario

Las Figuras 4.1 y 4.2 presentan el ciclo diario de la intensidad media anual y estacional de la IUC de Buenos Aires, así como el correspondiente desvío estándar para cada hora. A nivel anual (Figura 4.1), la máxima intensidad es de 2.0°C y se encuentra durante la noche entre las 01 y 05 horas mientras que la mínima de 0.1°C tiene lugar a las 17 horas. El desvío estándar oscila entre 1.1°C durante las horas del mediodía y las primeras de la tarde y 1.7°C durante la noche. El análisis estacional muestra que la máxima amplitud del ciclo diario se observa en verano (2.4°C) con los mayores valores de intensidad de la IUC durante las horas nocturnas y una isla fría de -0.1°C de magnitud entre las 12 y 19 horas. Este fenómeno donde la ciudad está relativamente más fría que la región circundante es apreciable sólo durante esta estación del año. La menor intensidad de la IUC nocturna se observa durante el invierno donde la amplitud máxima es de 1.5°C. Durante el otoño y la

primavera, la IUC es inferior a los valores del período invernal a partir del mediodía y hasta las primeras horas de la noche.

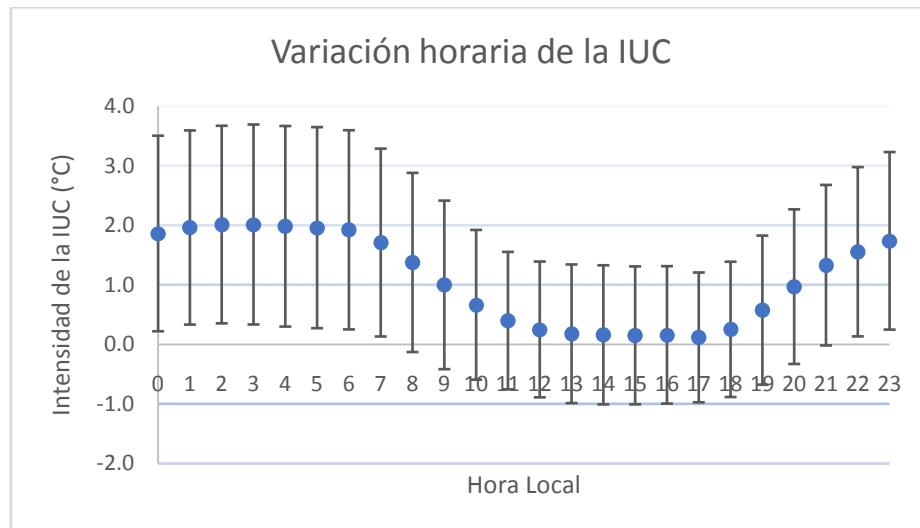


Figura 4.1: Variación horaria de la intensidad de la isla urbana de calor de Buenos Aires ($^{\circ}\text{C}$). Se muestran los valores medios (puntos azules) y la desviación estándar (barras)

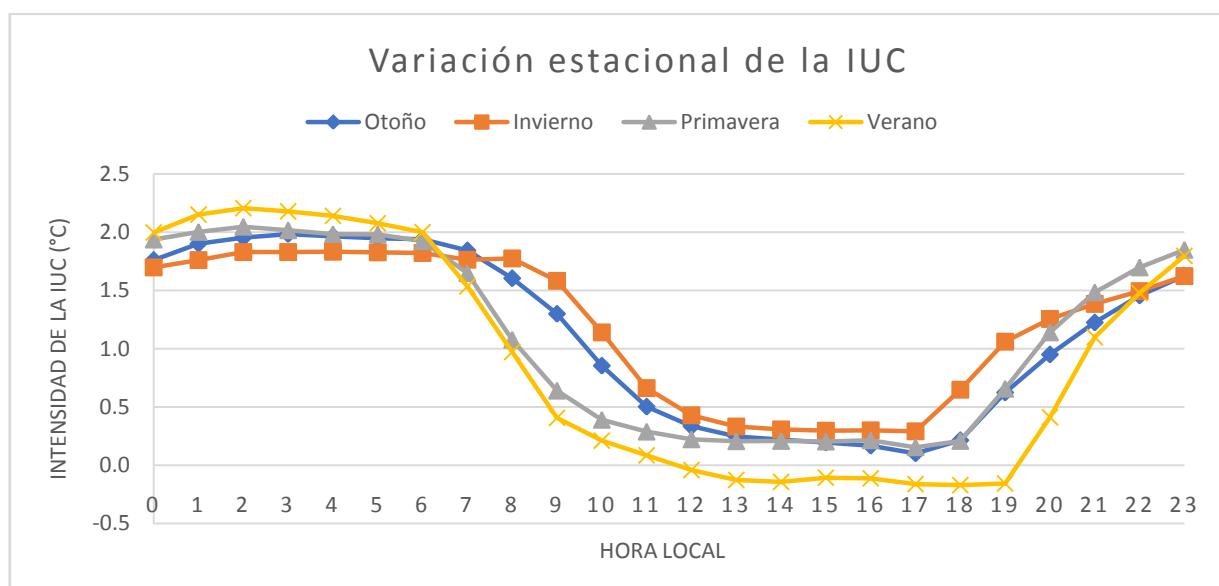


Figura 4.2: Variación estacional del ciclo diario de la intensidad de la IUC ($^{\circ}\text{C}$).

4.3 Ciclo anual

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran el ciclo anual de la intensidad y el correspondiente desvío estándar de la IUC nocturna y diurna respectivamente. La IUC nocturna tiene un promedio anual de 2°C y presenta mínimos valores en los meses de invierno y máximos en los de verano con una la amplitud de 0.6°C (Figura 4.3). En el caso de la IUC diurna, el promedio anual es de 0.2°C , pero el ciclo se invierte y toma los valores más altos durante el invierno y los mínimos en el verano con una amplitud anual de 0.5°C (Figura 4.4). En particular, durante los meses de diciembre y enero la intensidad es negativa. Además, se encuentra que los valores de desvío estándar que presenta la isla diurna son menores a los de la isla nocturna.

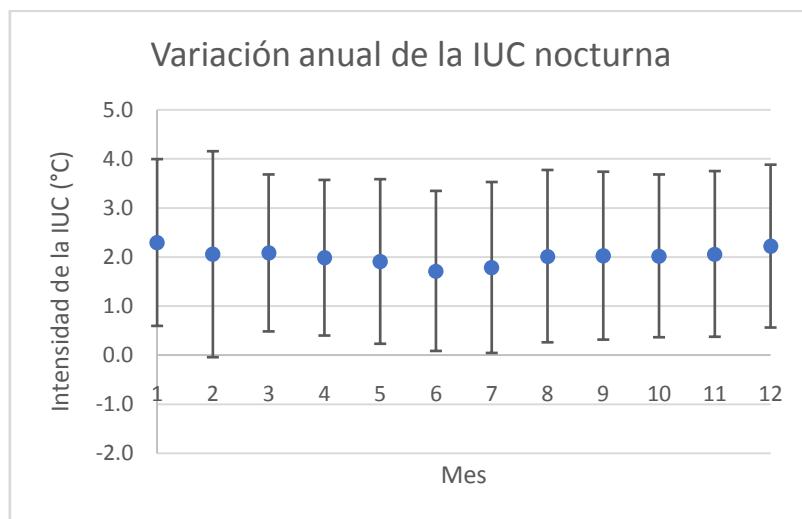


Figura 4.3: Variación anual de la intensidad media de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$). Las barras representan el desvío estándar para cada mes.

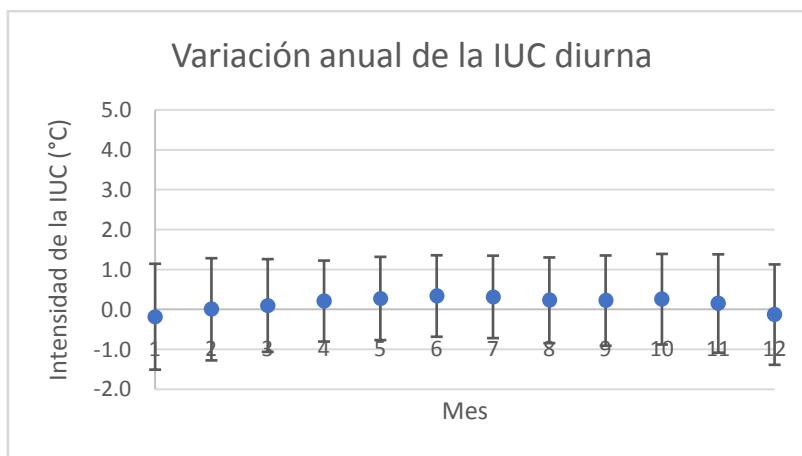


Figura 4.4: Variación anual de la intensidad media de la IUC diurna ($^{\circ}\text{C}$). Las barras representan el desvío estándar para cada mes.

4.4 Variabilidad interanual

La Figura 4.5 presenta la evolución de la intensidad media anual de la IUC nocturna mientras que en la Figura 4.6 se presenta la variabilidad interanual para los trimestres de verano e invierno. En todos los casos se encuentran tendencias a la reducción de la magnitud de la IUC que son significativas estadísticamente para un nivel de confianza del 95%. A nivel anual, la tendencia es $-0.17^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Figura 4.5) mientras que para verano e invierno es de $-0.24^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y $-0.15^{\circ}\text{C}/\text{década}$ respectivamente (Figura 4.6).

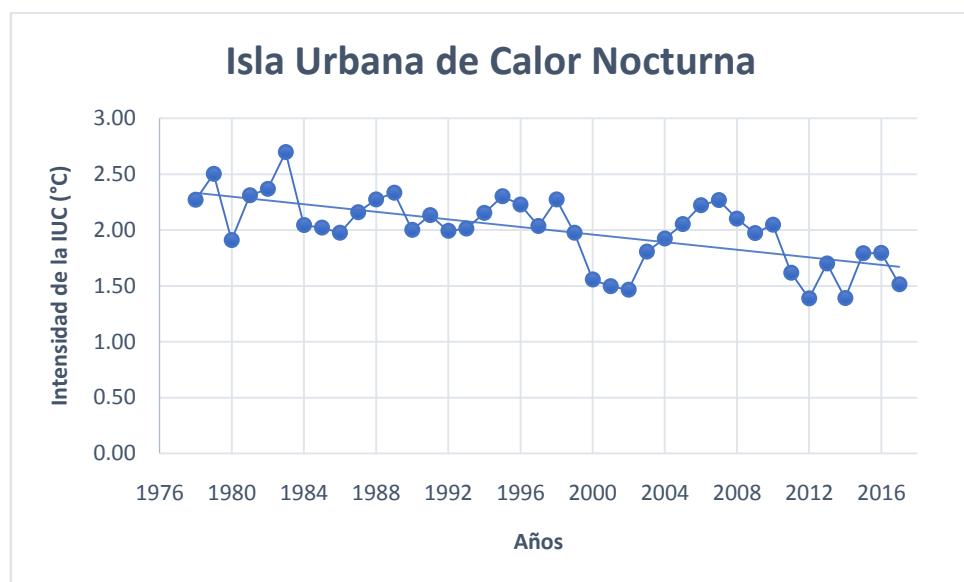


Figura 4.5: Variabilidad interanual de la intensidad de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$).

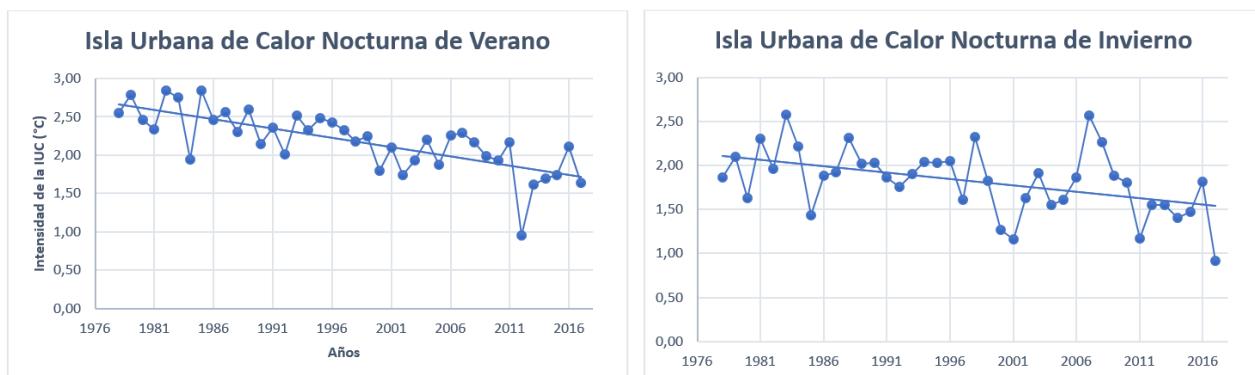


Figura 4.6: Variabilidad interanual de la intensidad de la IUC nocturna de verano e invierno ($^{\circ}\text{C}$).

La Figura 4.7 muestra la evolución de la intensidad media anual de la IUC diurna mientras que en la Figura 4.8 se presenta la variabilidad interanual para el verano e invierno. En todos los casos se encuentran tendencias positivas significativas que implican un comportamiento inverso al nocturno. A nivel anual, la tendencia es $+0.09^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Figura 4.7) y de $+0.10^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y $+0.09^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para verano e invierno respectivamente (Figura 4.8).

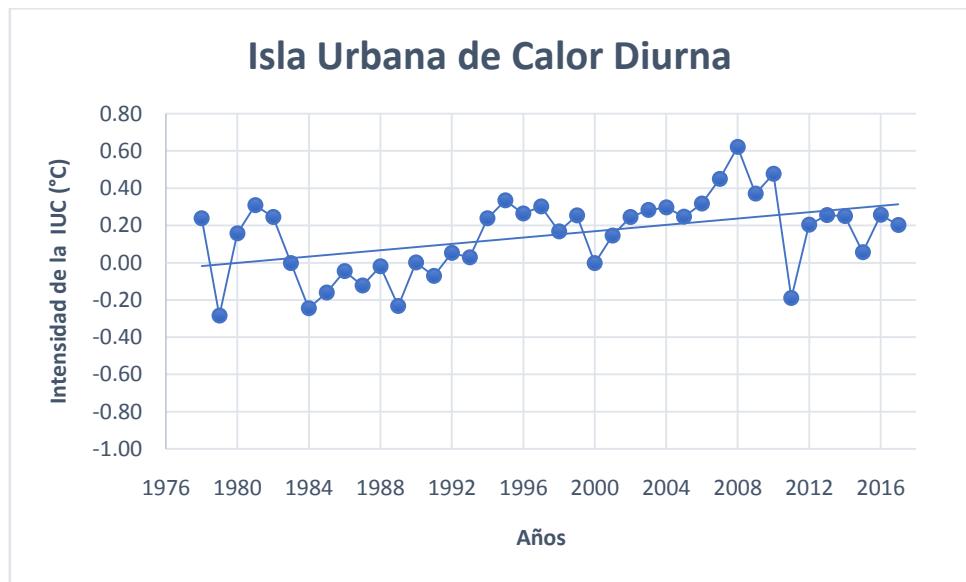


Figura 4.7: Variabilidad interanual de la intensidad de la IUC diurna ($^{\circ}\text{C}$).

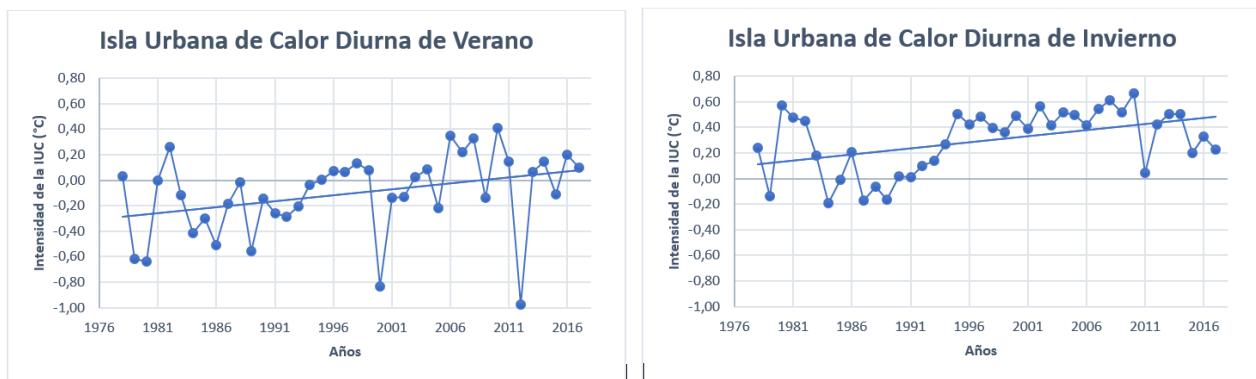


Figura 4.8: Variabilidad interanual de la intensidad de la IUC diurna de verano e invierno ($^{\circ}\text{C}$).

La evolución de la intensidad máxima de la IUC nocturna registrada cada año se presenta en la Figura 4.9. En este caso no se identifica una tendencia significativa. En el periodo de 40 abarcado en este estudio (1978-2017) se encuentran valores máximos de contraste urbano/rural que oscilan entre 6.1°C y 9.4°C .

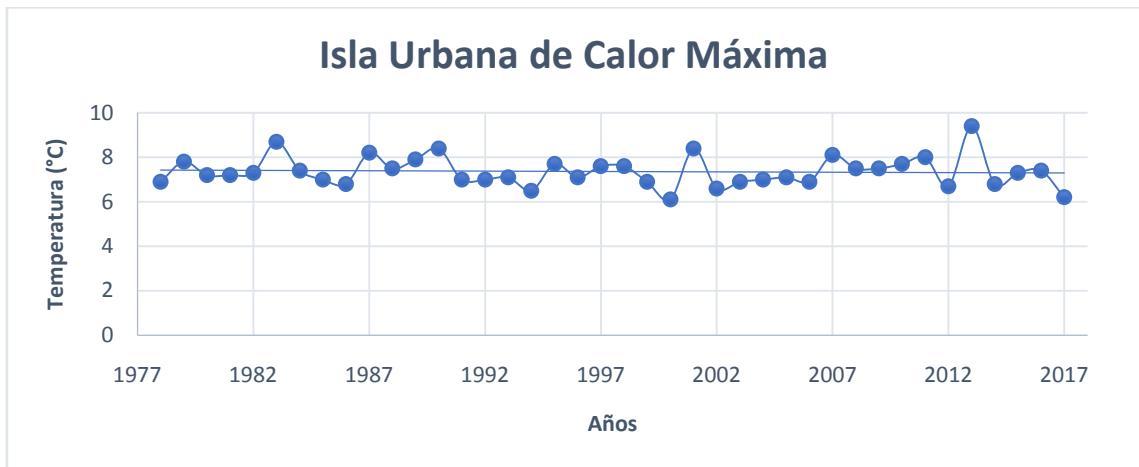


Figura 4.9: Intensidad máxima de la IUC nocturna (°C)

4.5 Variabilidad decadal

En esta sección se analiza la variabilidad temporal de la magnitud de la IUC considerando las décadas 1978-1987, 1988-1997, 1998-2007 y 2008-2017. Las Figuras 4.10 y 4.11 presentan el ciclo diario para cada una de ellas promediado anualmente y para cada estación del año. En todos los casos se encuentra un progresivo decaimiento en la intensidad de la IUC durante la noche mientras que en el día se observa el comportamiento inverso dando como resultado una reducción en la amplitud diaria. Asimismo, se identifica en las dos últimas décadas un corrimiento en la hora de ocurrencia de la intensidad mínima desde el mediodía hacia las 17 a 19 horas según la época del año.

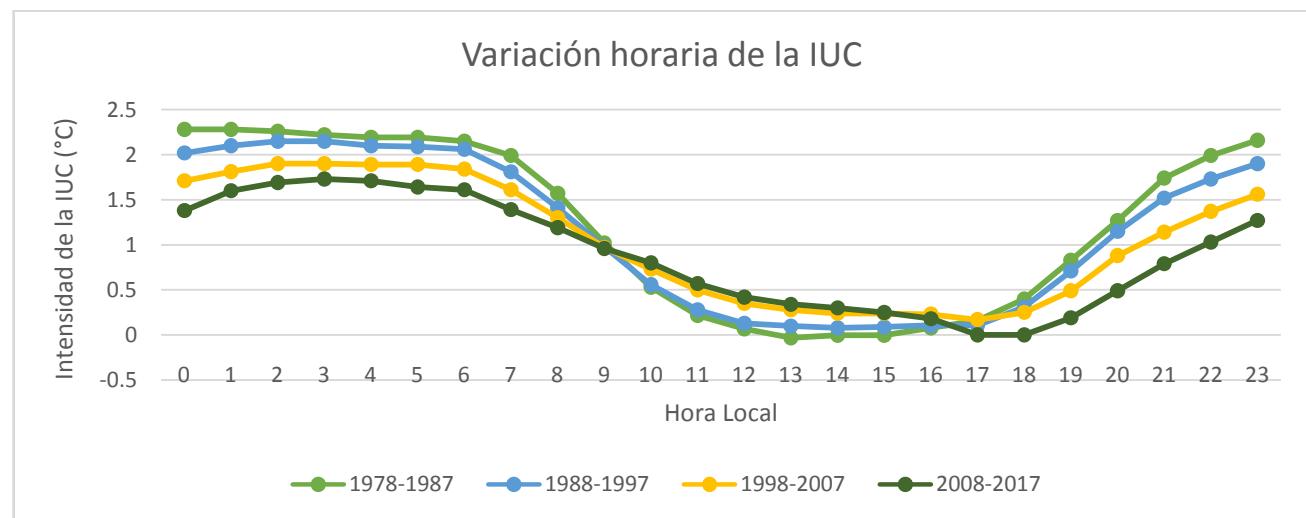


Figura 4.10: Variabilidad decadal del ciclo diario de la intensidad de la IUC (°C).

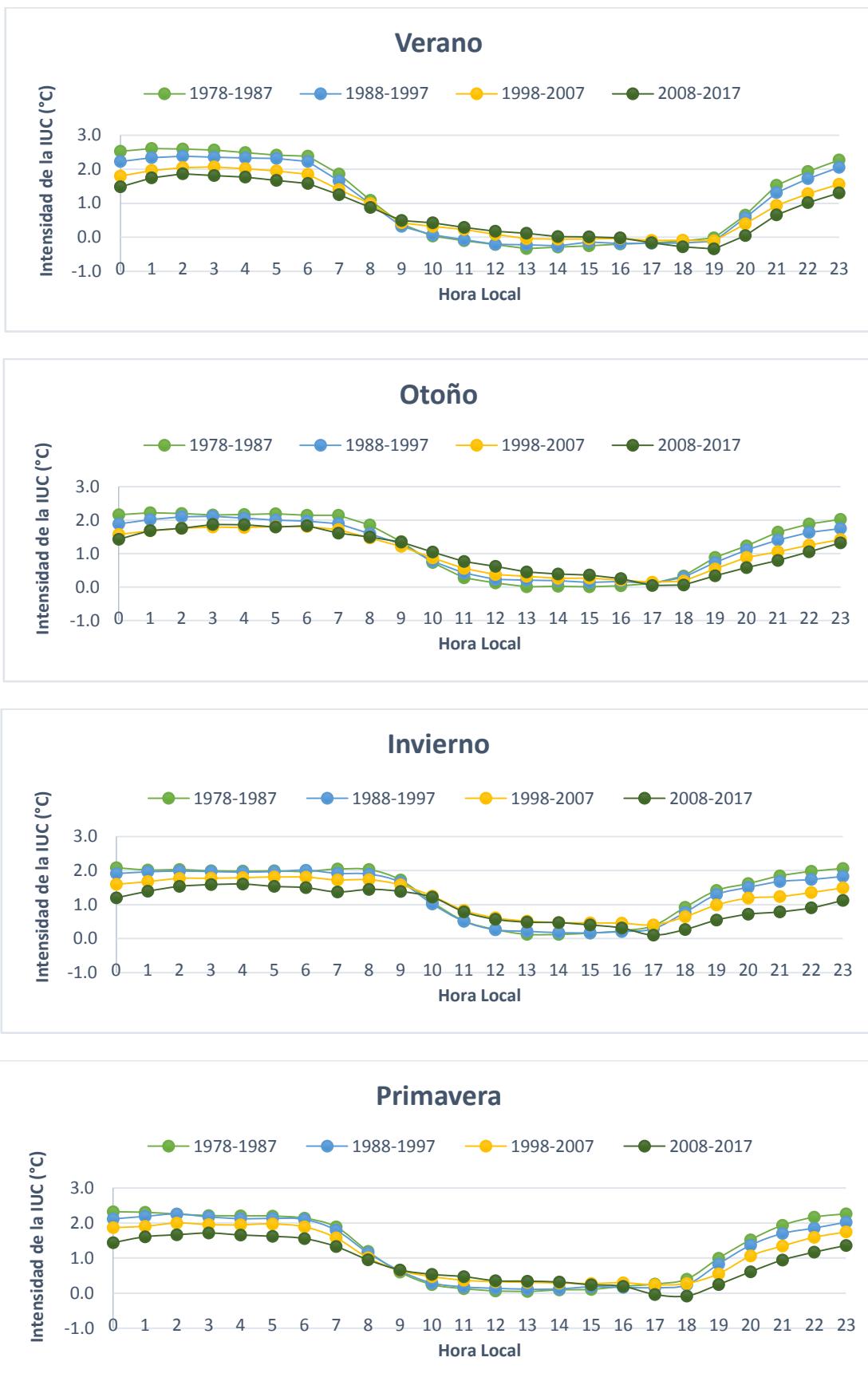


Figura 4.6: Variabilidad decadal del ciclo medio diario de la intensidad de la IUC (°C) para las cuatro estaciones del año.

La Tabla 4.1 presenta las intensidades medias máxima y mínima de la IUC y la amplitud anual para cada década y estación del año y para el promedio anual. Se observa la tendencia a la reducción de la intensidad máxima en casi todos los casos, las únicas excepciones son para las dos primeras décadas en el verano donde hay un pequeño aumento, las dos últimas del otoño y en la primavera donde se mantiene constante. En la intensidad mínima media se encuentra mayor variabilidad entre décadas pero que en la mayoría de los casos conducen a una reducción en la amplitud diaria.

Décadas	IUC Máxima (°C)	IUC Mínima (°C)	Amplitud (°C)
	ANUAL		
1978-1987	2.3	0.0	2.3
1988-1997	2.2	0.1	2.1
1998-2007	1.9	0.2	1.7
2008-2017	1.7	0.0	1.7
	VERANO		
1978-1987	2.3	-0.3	2.6
1988-1997	2.4	-0.2	2.6
1998-2007	2.1	-0.1	2.2
2008-2017	1.9	-0.3	2.2
	OTOÑO		
1978-1987	2.2	0.0	2.2
1988-1997	2.1	0.1	2.0
1998-2007	1.8	0.1	1.7
2008-2017	1.9	0.0	1.9
	INVIERNO		
1978-1987	2.1	0.1	2.0
1988-1997	2.0	0.2	1.8
1998-2007	1.8	0.4	1.4
2008-2017	1.6	0.1	1.5
	PRIMAVERA		
1978-1987	2.3	0.1	2.2
1988-1997	2.3	0.1	2.2
1998-2007	2.0	0.2	1.8
2008-2017	1.7	-0.1	1.8

Tabla 4.1: Intensidades máxima y mínima medias de la IUC (°C) para cada década y estación del año y para el promedio anual.

Las Figuras 4.7 a 4.9 presentan los valores medios decadales de la intensidad de la IUC total, nocturna y diurna respectivamente. Tanto para la IUC media (Figura 4.7) como para la nocturna (Figura 4.8) se identifica un progresivo decrecimiento en la magnitud década a

década que alcanza a 0.32°C y 0.50°C respectivamente si se comparan la primera y la última. Estas reducciones significan una atenuación en la intensidad del fenómeno de IUC de 26% (IUC total) y 23% (IUC nocturna). La IUC diurna presenta una tendencia opuesta y lo hace de una mayor manera respecto a cómo decrece la nocturna (Figura 4.9). Entre 1978-1987 y 1988-1997 aumentó 9 veces su valor y luego de la década 1988-1997 a 1998-2007 aumentó 2.5 veces para mantenerse prácticamente en el mismo valor en el período 2008-2017.

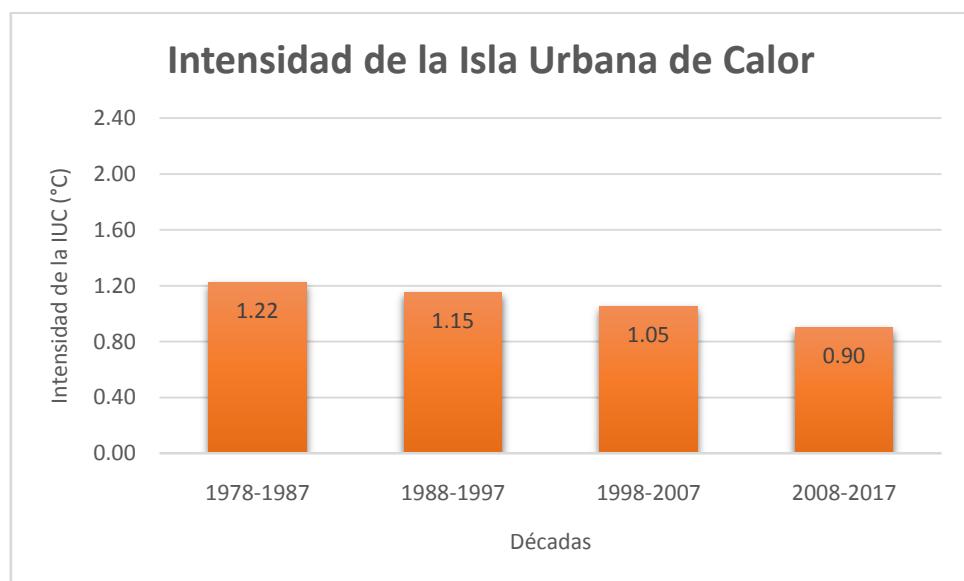


Figura 4.7: Variación decadal del valor medio de la intensidad de la IUC ($^{\circ}\text{C}$).

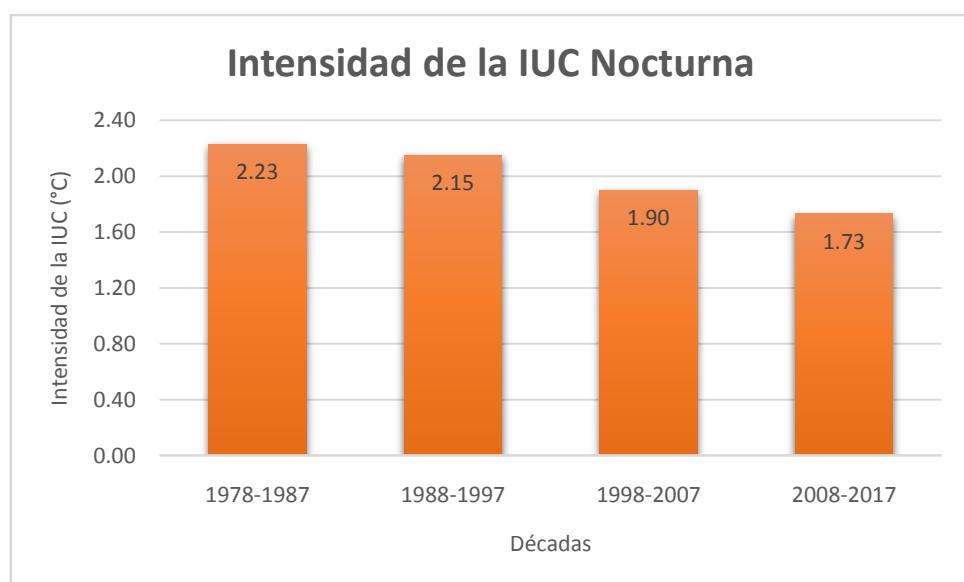


Figura 4.8: Variación decadal del valor medio de la intensidad de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$).

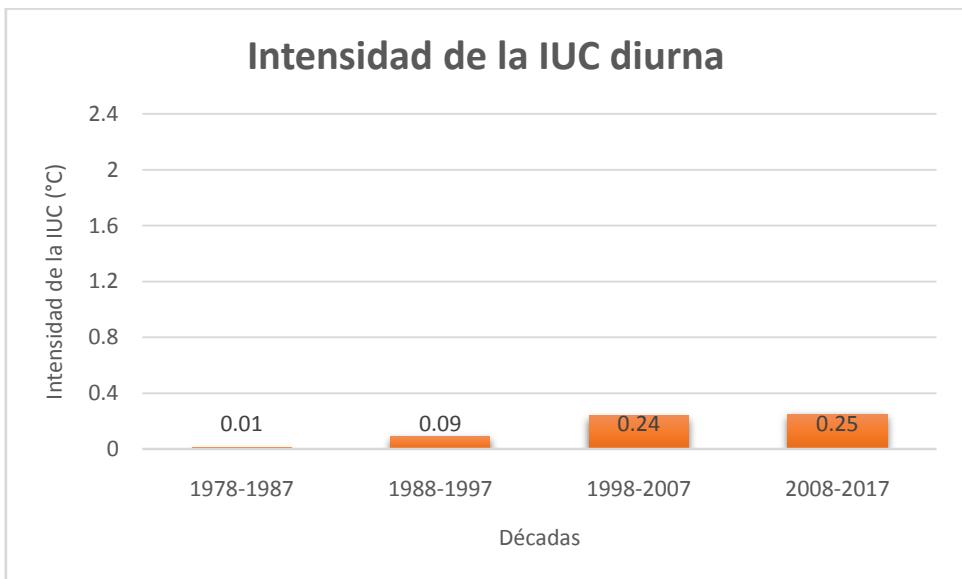


Figura 4.9: Variación decadal del valor medio de la intensidad de la IUC diurna (°C).

4.6 Conclusiones

El ciclo diario de la IUC de Buenos Aires, calculada a partir del contraste entre la temperatura de la estación OCBA considerada representativa del área urbana y la temperatura de Ezeiza como indicadora del área suburbana/rural, resultó marcado alcanzando en el promedio anual los mayores valores durante la noche (2°C) y mostrando valores nulos o levemente negativos (-0.1°C) en algunas horas del día. La magnitud media de la IUC varía según la época del año siendo máxima durante horas de la noche con valores de 2.4°C en verano y 1.5°C en invierno. Este comportamiento donde la IUC nocturna de verano superó a la de invierno es semejante al encontrado en otras ciudades de clima templado del mundo (Arnfield, 2003). El ciclo anual de la IUC diurna difirió significativamente de la nocturna ya que fue máxima durante el invierno y mínima en el verano con magnitud media es de 0.2°C, bastante inferior a los 2°C de la nocturna.

La IUC nocturna mostró una tendencia a la reducción durante el período de estudio tanto a nivel anual como durante el verano e invierno. Las tendencias encontradas -0.17°C/década (anual), -0.24°C/década (verano) y -0.15°C/década (invierno) son significativas estadísticamente. Estos resultados son coincidentes con los hallados previamente por Camilloni y Barros (1997) y Camilloni y Barrucand (2012) para Buenos Aires y con los encontrados en otras ciudades del mundo (Scott y otros, 2018). Los motivos de estas reducciones fueron asociados a cambios en las condiciones 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 IUC nocturna máxima registrada cada año osciló entre 6.1°C y 9.4°C pero no presentó una tendencia significativa durante el período analizado. La IUC diurna muestra un comportamiento opuesto a la nocturna con tendencias positivas significativas, aunque de menor magnitud.

La IUC presentó una variabilidad decadal en su ciclo diario mostrando una progresiva reducción en su intensidad nocturna y un aumento en la diurna coincidiendo con las tendencias halladas a nivel anual. Estos cambios se identificaron también en el análisis a nivel estacional. La evolución del promedio decadal de la IUC muestra un comportamiento inverso cuando se comparan la primer y última década para el caso diurno y nocturno. En la IUC nocturna se detectó un decrecimiento a lo largo del tiempo mientras que en la diurna se observó un aumento.

Capítulo 5

Intensidad de la IUC y su relación con factores meteorológicos

5.1 Introducción

Como se señaló en el Capítulo 1, diversos estudios han relacionado la intensidad de la IUC con otros factores meteorológicos como nubosidad, velocidad del viento y humedad. Las mayores intensidades de la IUC suelen estar asociadas a condiciones de cielo claro y viento débil o en calma por lo cual la nubosidad y la velocidad del viento suelen tener una correlación negativa respecto a la magnitud de la IUC. En este capítulo se presenta el análisis de la relación de la nubosidad, intensidad del viento y humedad relativa con la intensidad de la IUC nocturna de la ciudad de Buenos Aires para las estaciones de verano e invierno. Para ello, se trabajó con información horaria de estos parámetros de la estación meteorológica OCBA para el período 1991-2017. Este lapso fue seleccionado por ser el que presenta el registro más largo de información horaria de ellos.

5.2 Metodología

Para el cálculo de la magnitud de la IUC nocturna se eligió el período de tiempo que abarca desde dos horas después de la puesta de sol hasta dos horas antes del amanecer. Como estas horas cambian según la época año, se buscaron datos provenientes de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de la Plata de la salida y puesta de sol para cada día del año en los últimos años. Con esta información se definió como horas nocturnas para el verano el período entre las 22 y las 04 y para el invierno entre las 20 y las 05.

Para establecer la relación entre cada variable meteorológica y la intensidad de la IUC, se realizó un análisis de regresión donde el predictando es la intensidad de la IUC nocturna, ($\Delta Tu-r$) de verano e invierno y X representa cada una de las variables meteorológicas:

$$\Delta Tu-r = a X + b \quad (5.1)$$

Asimismo, se calculó la varianza explicada por cada regresión y la significancia de la pendiente de acuerdo con un t-test de dos colas.

5.3 Relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la nubosidad

Las Figuras 5.1 y 5.2 presentan la relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la nubosidad para los trimestres de verano e invierno respectivamente. Se indica además en cada caso la recta de regresión. Se encuentra una relación inversa entre ambas variables que indican que el efecto de calentamiento urbano es máximo bajo condiciones de cielo claro o baja nubosidad en las dos épocas del año. Las nubes absorben y emiten radiación de onda larga que reduce la variación de la temperatura diurna (Oke, 1987). Además, reducen la radiación de onda corta entrante y, por lo tanto, la cantidad de calor almacenado en materiales urbanos (Kawai y Kanda, 2010).

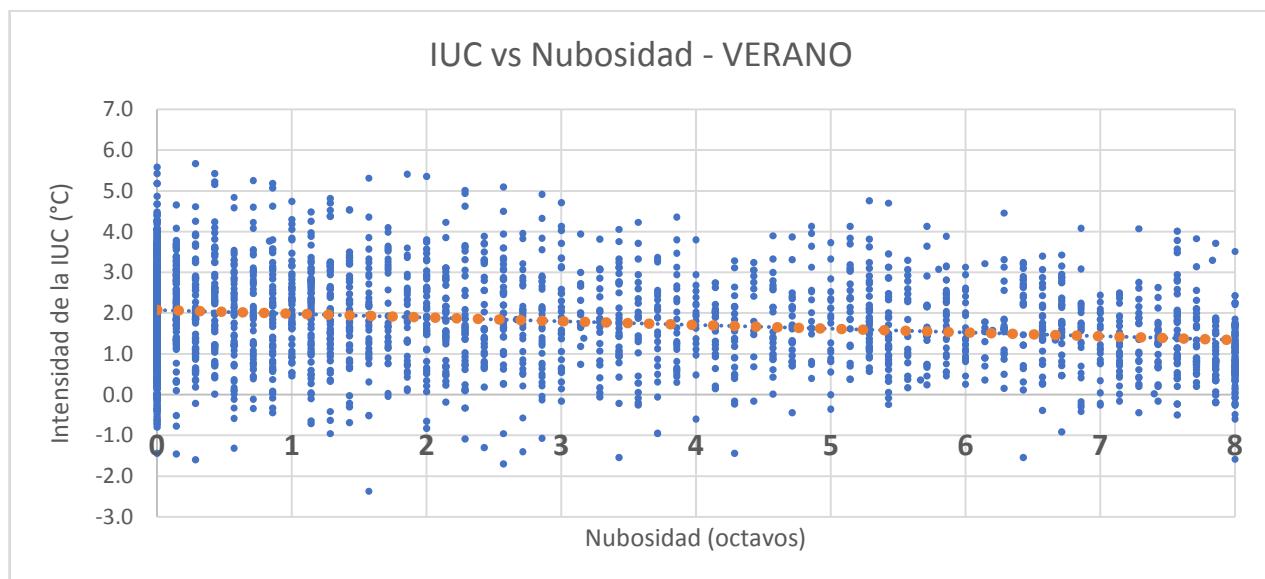


Figura 5.1: Intensidad de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$) en función de la nubosidad (octavos) para verano. La línea punteada naranja indica la línea de regresión.

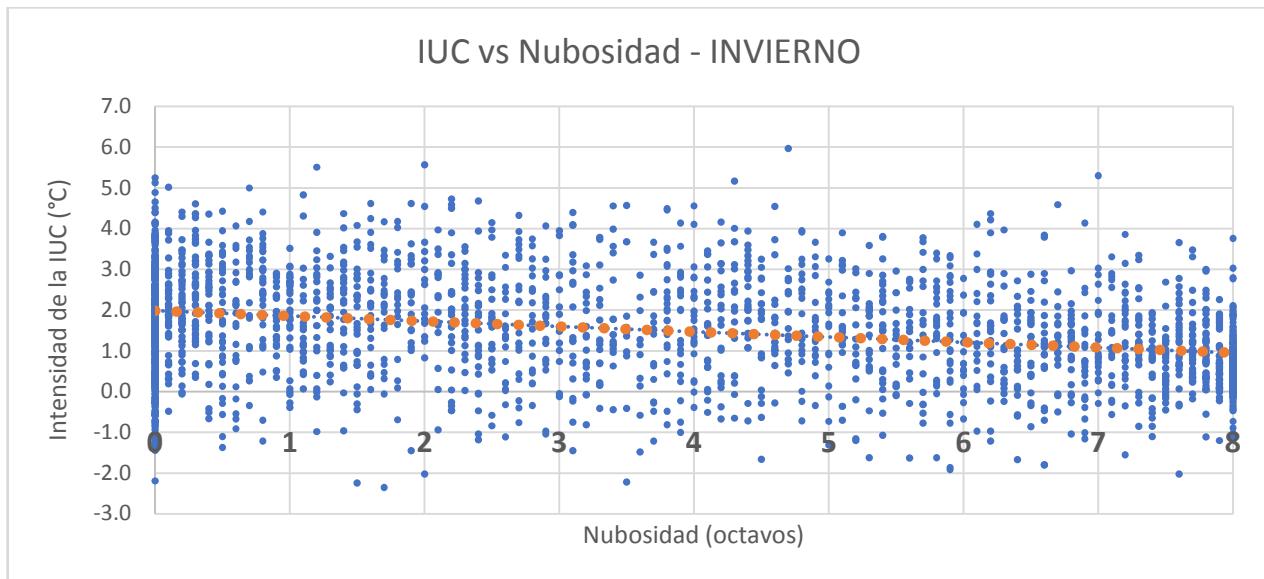


Figura 5.2: Intensidad de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$) en función de la nubosidad (octavos) para invierno. La línea punteada naranja indica la línea de regresión.

5.4 Relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la velocidad del viento

En las Figuras 5.3 y 5.4 se presenta la relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la velocidad del viento para los trimestres de verano e invierno respectivamente. El flujo de aire a nivel regional afecta el desarrollo y la magnitud de la IUC. Los mayores contrastes de temperatura urbana-rural se encuentran en general bajo condiciones de viento en calma o baja velocidad mientras que cuando el flujo es intenso inhibe el desarrollo de la IUC. Debido al aumento de la advección térmica y la actividad turbulenta que reducen el contraste de temperatura entre las zonas urbanas y rurales. Oke y Hannell (1970) y Oke (1976) definieron una "velocidad del viento límite" en la que la intensidad de la intensidad de la IUC se vuelve nula. Esta velocidad es variable y toma diferentes valores en cada ciudad pero se han reportado velocidades límites que oscilan entre 6 y 10 m/s (Kim y Baik, 2002; Alonso y otros, 2007; Camilloni y Barrucand, 2012; Lee y otros, 2014, Oke y otros, 2017). En el caso de Buenos Aires, Camilloni y Barrucand hallaron que para la IUC anual la velocidad límite para la desaparición de la IUC es de 10 m/s.

Para la ciudad de Buenos Aires no se observa una relación clara entre la intensidad de la IUC y el viento durante el verano (Figura 5.3) mientras que en invierno se identifica una relación inversa (Figura 5.4) coincidente con lo hallado para diversas ciudades del mundo. En este caso, durante el invierno la IUC tendería a anularse para velocidades del viento de aproximadamente 8 m/s (ver Tabla 5.1).

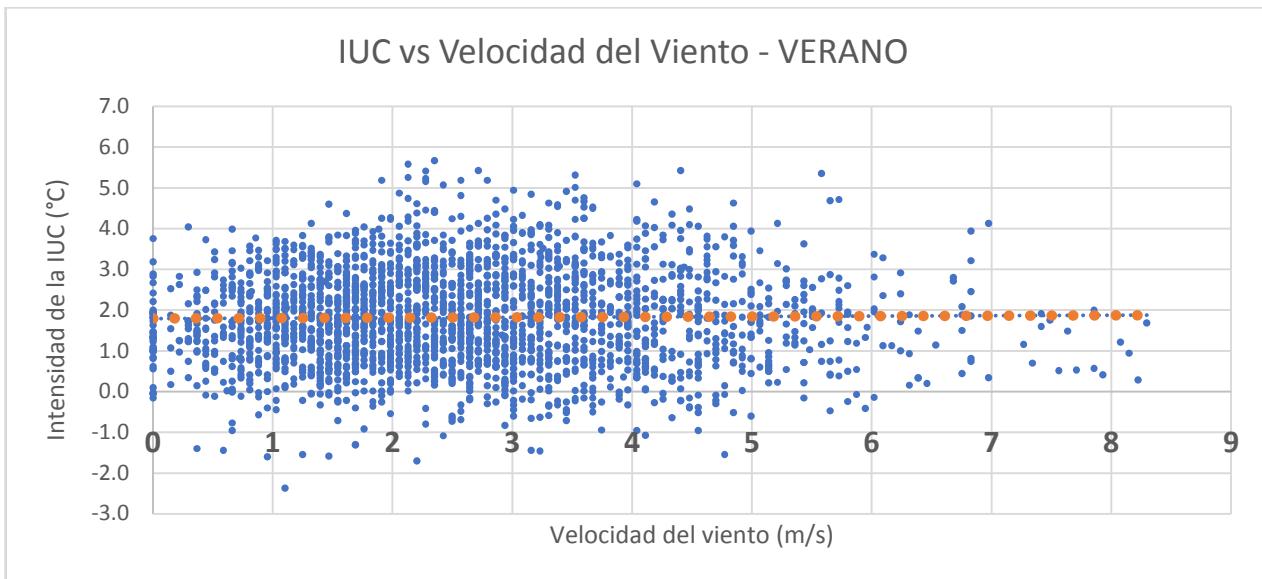


Figura 5.3: Intensidad de la IUC nocturna (°C) en función de la velocidad del viento (m/s) para verano. La línea punteada naranja indica la línea de regresión.

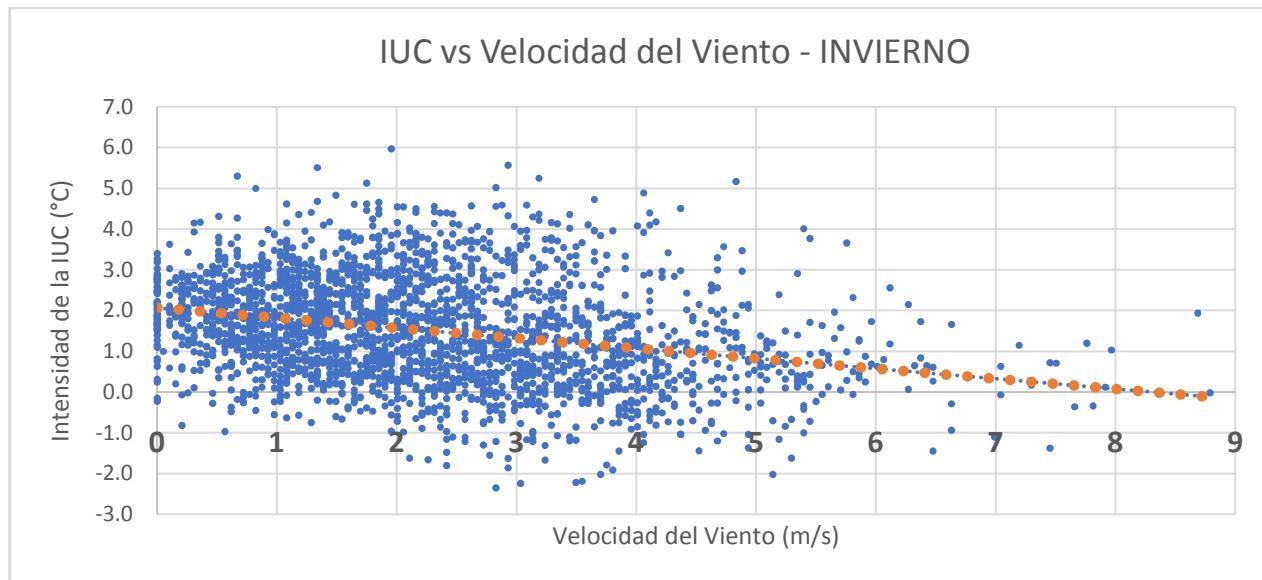


Figura 5.4: Intensidad de la IUC nocturna (°C) en función de la velocidad del viento (m/s) para invierno. La línea punteada naranja indica la línea de regresión.

5.5 Relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la humedad relativa

Las Figuras 5.5 y 5.6 presentan la relación entre la intensidad de la IUC nocturna y la humedad relativa para los trimestres de verano e invierno respectivamente. En ambos casos se observa una relación inversa que también fue hallada por diversos autores en otras ciudades del mundo como Seúl (Kim y Baik, 2002) y Hamburgo (Hoffmann, 2012).

Este comportamiento podría deberse a que cuando se produce evaporación desde la superficie urbana, la temperatura del aire disminuye debido al enfriamiento por evaporación, y en consecuencia la humedad relativa aumenta por el incremento en la presión de vapor y la disminución en la presión de saturación. Por lo tanto, la intensidad de la IUC tiende a disminuir a medida que aumenta la humedad relativa.

La correlación negativa entre la intensidad de la IUC y la humedad relativa también podría ser consecuencia de la liberación de calor latente debido a la condensación. Cuanto más alta es la humedad relativa, más probable es que el aire alcance la saturación. El calor liberado por la condensación calienta el aire y como las superficies rurales tienden a enfriarse más rápido por la noche que las urbanas, el proceso de condensación comienza antes en las zonas rurales dando como resultado una reducción en el contraste de temperatura urbana-rural. Asimismo, los valores altos de humedad relativa también pueden conducir al desarrollo de niebla nocturna reduciendo la pérdida de calor desde la superficie.

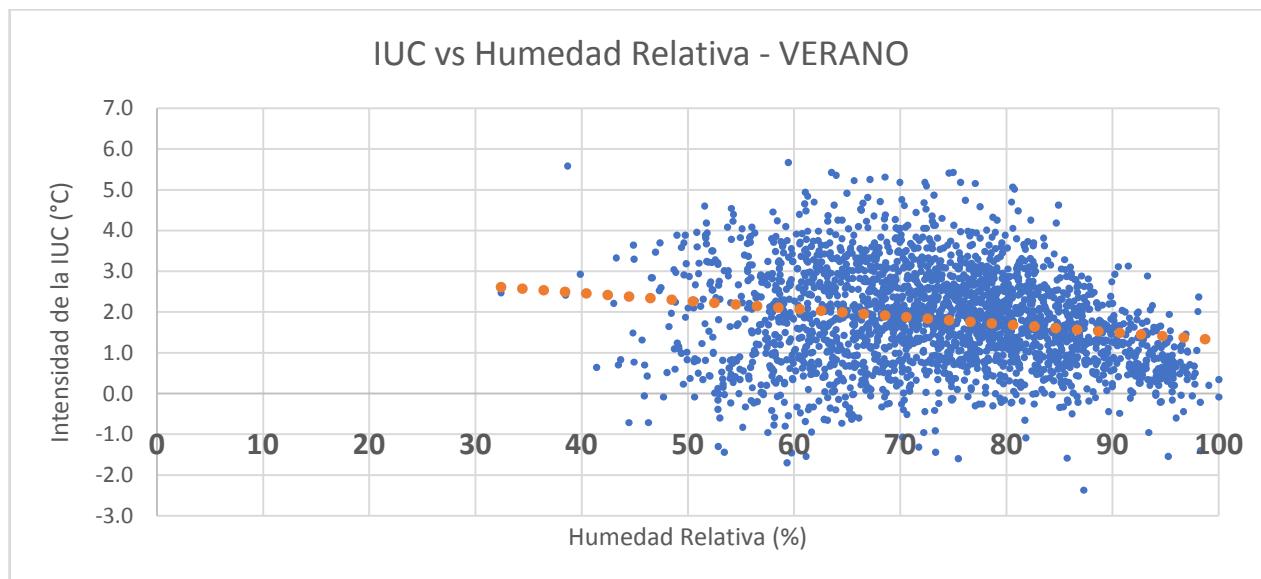


Figura 5.5: Intensidad de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$) en función de la humedad relativa (%) para verano. La línea punteada naranja indica la línea de regresión.

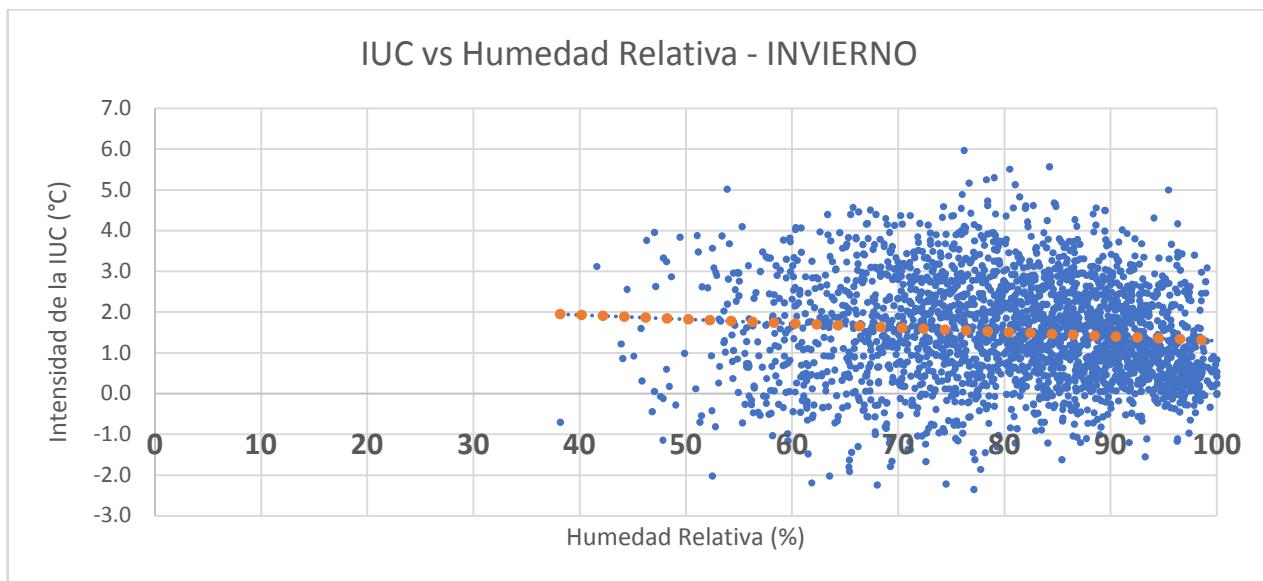


Figura 5.5: Intensidad de la IUC nocturna ($^{\circ}\text{C}$) en función de la humedad relativa (%) para invierno. La línea punteada naranja indica la línea de regresión.

5.6 Análisis de regresión entre la intensidad de la IUC nocturna y parámetros meteorológicos

La Tabla 5.1 presenta los coeficientes de regresión lineal hallados de acuerdo con la ecuación (5.1). Se encuentra una relación inversa entre la intensidad de la IUC y la nubosidad tanto para verano como invierno. Esta regresión además es la que explica la mayor proporción de varianza cuando se la compara con la humedad relativa y la velocidad del viento. El análisis de las pendientes (a) da como resultado valores significativos en todos los casos excepto para la velocidad del viento en verano.

Verano			
Parámetro meteorológico	a	B	R^2
Nubosidad	*-0.09	2.07	4.55
Humedad Relativa	*-0.02	3.24	3.51
Velocidad del Viento	0.01	1.79	0.01
Invierno			
Parámetro meteorológico	a	B	R^2
Nubosidad	*-0.13	1.99	9.12
Humedad Relativa	*-0.01	2.35	0.97
Velocidad del Viento	*-0.25	2.07	7.44

Tabla 5.1: Coeficientes de regresión lineal y varianza explicada (R^2) entre la intensidad de la IUC nocturna y parámetros meteorológicos para los trimestres de verano e invierno (* indica significancia de la pendiente de acuerdo con un t-test).

5.7. Conclusiones

En este capítulo se analizó la relación entre la magnitud de la IUC nocturna de las estaciones verano e invierno y tres parámetros meteorológicos: nubosidad total, humedad relativa y velocidad del viento en la estación urbana OCBA para el período 1991-2017. La nubosidad resultó ser la variable que, con una relación inversa, explicó la mayor proporción de varianza en ambas épocas del año. Esto podría deberse a que la modificación en el balance radiación como consecuencia de la presencia de nubes tiende a atenuar el efecto de calentamiento diferencial del ambiente urbano. La humedad relativa y la velocidad de viento mostraron también relaciones inversas con la intensidad de la IUC nocturna en ambas épocas del año, aunque sin significancia para el viento durante el verano. En el invierno se encontró que la velocidad límite para la desaparición de la IUC es de 8.3 m/s de acuerdo con la recta de regresión de la Tabla 5.1, valor que se encuentra en el mismo orden de magnitud del hallado para otras ciudades del mundo. Las relaciones obtenidas entre la IUC y los parámetros meteorológicos analizados permitirán en un trabajo futuro avanzar en el desarrollo de un modelo estadístico de la IUC para Buenos Aires.

Capítulo 6

Isla Urbana de Calor Superficial de Buenos Aires y su comparación con otras ciudades argentinas

6.1 Introducción

La temperatura superficial es de vital importancia ya que condiciona y modula la temperatura del aire en las capas más bajas de la atmósfera urbana. Asimismo, es fundamental para estimar los balances energéticos, determinar las condiciones bioclimáticas en el interior de los edificios, y los intercambios de calor con el entorno que afectan al confort de los habitantes de una ciudad. Para obtener la temperatura superficial se utilizan esencialmente sensores remotos, los cuales registran los valores de temperatura de emisión de las cubiertas de suelo permitiendo así conocer su distribución espacial y, en las áreas urbanas, estimar la isla urbana de calor superficial (IUC-S) (Oke y Voogt, 2003; Roth, 2013; Oke y otros, 2017).

En este capítulo se analiza la evolución temporal y espacial de la IUC-S de Buenos Aires y los siguientes tres aglomerados más importantes de Argentina en términos de población: Rosario, Córdoba y Mendoza en el período 2003-2017. La información utilizada fue obtenida a través de la aplicación *Global Surface UHI Explorer* de la Universidad de Yale. La magnitud de la IUC-S en cada caso es estimada a partir de la diferencia entre la temperatura superficial media del área urbana y la del área rural circundante. Asimismo se comparan las intensidad de la IUC-S con la IUC de canopia obtenida en los capítulos previos.

6.2 IUC-S de Buenos Aires

La Figura 6.1 presenta la imagen satelital del aglomerado urbano Buenos Aires donde es posible apreciar la extensión de la mancha urbana. Las Figuras 6.2 y 6.3 muestran la evolución de la IUC-S media anual diurna y nocturna, respectivamente. La IUC-S diurna (Figura 6.2) presenta valores negativos o cercanos a cero indicando la presencia de una isla fría que es máxima en el ámbito de la ciudad de Buenos Aires y en la franja costera con el Río de la Plata para todo el AMBA. El año 2008 se destaca por mostrar la isla fría ocupando prácticamente la totalidad del área urbana. A partir de 2014, la mayor parte del

territorio urbano muestra una IUC-S positiva con valores que se ubican mayormente en el rango 0°C-1.5°C y donde el efecto de isla fría queda limitado a la ciudad de Buenos Aires y una estrecha franja costera con valores que pueden ser inferiores a -1.5°C. La IUC-S nocturna (Figura 6.3) muestra valores positivos en prácticamente todo el territorio urbano superando 4°C en algunos años en el ámbito de la ciudad de Buenos Aires. En este caso la variación interanual es menos evidente que para la IUC-S diurna.

Las Figuras 6.4 y 6.5 presentan la evolución anual de la IUC-S nocturna para los trimestres de verano e invierno respectivamente. Se observa que en el verano (Figura 6.4) la IUC-S es positiva en casi todo el territorio alcanzando valores máximos que superan 4°C en casi la mitad de la superficie urbana en la mayor parte de los años. Durante el invierno (Figura 6.5) se observan también valores positivos pero cuya intensidad es menor a la de verano ya que en promedio está entre 1°C y 2°C. En esta estación los valores máximos cercanos a 4°C quedan restringidos a una porción de la ciudad de Buenos Aires. Asimismo, no se identifica una variabilidad interanual significativa.



Figura 6.1: Imagen satelital del aglomerado urbano Buenos Aires.

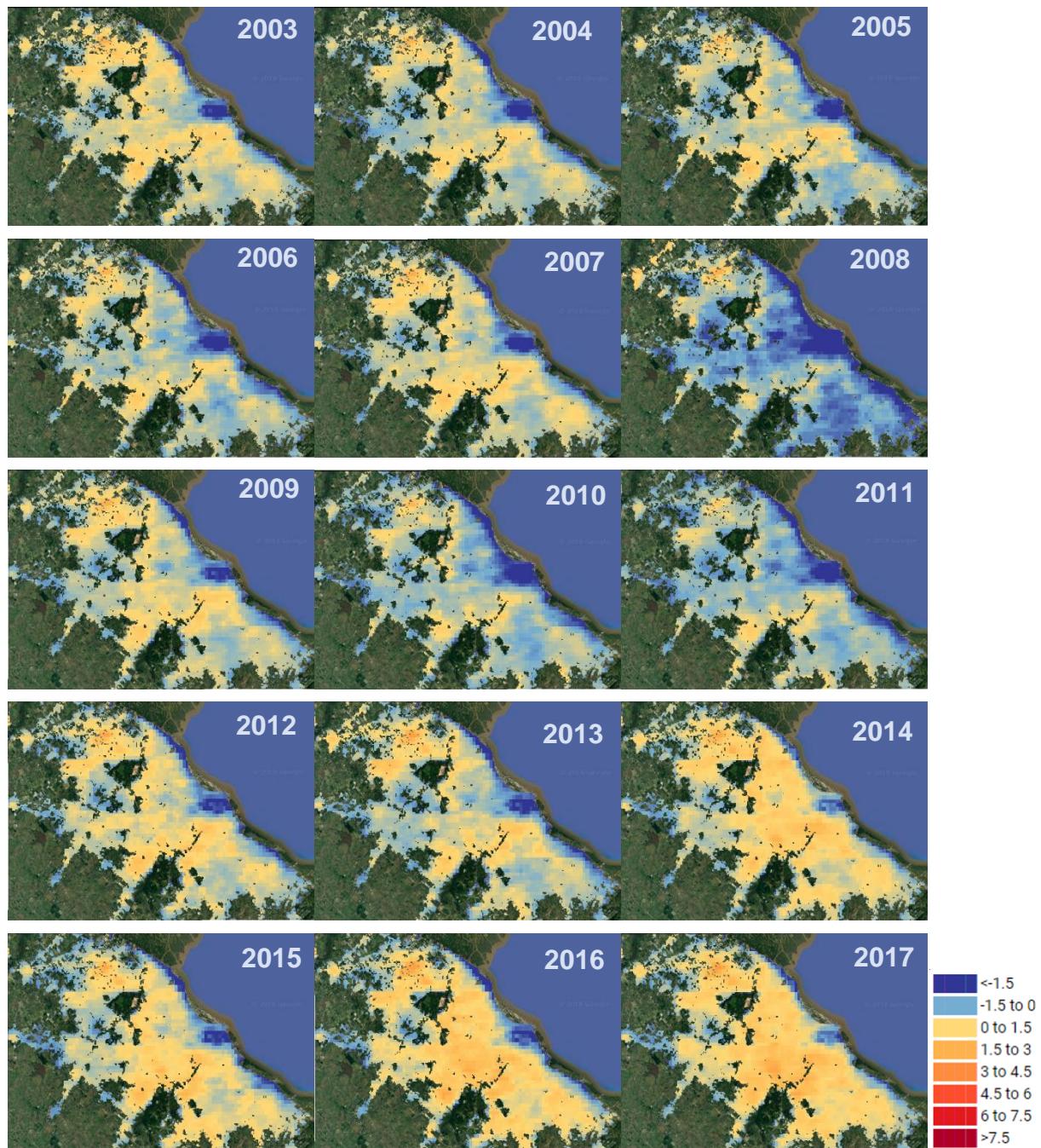


Figura 6.2: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S diurna ($^{\circ}\text{C}$) de Buenos Aires en el período 2003-2017.

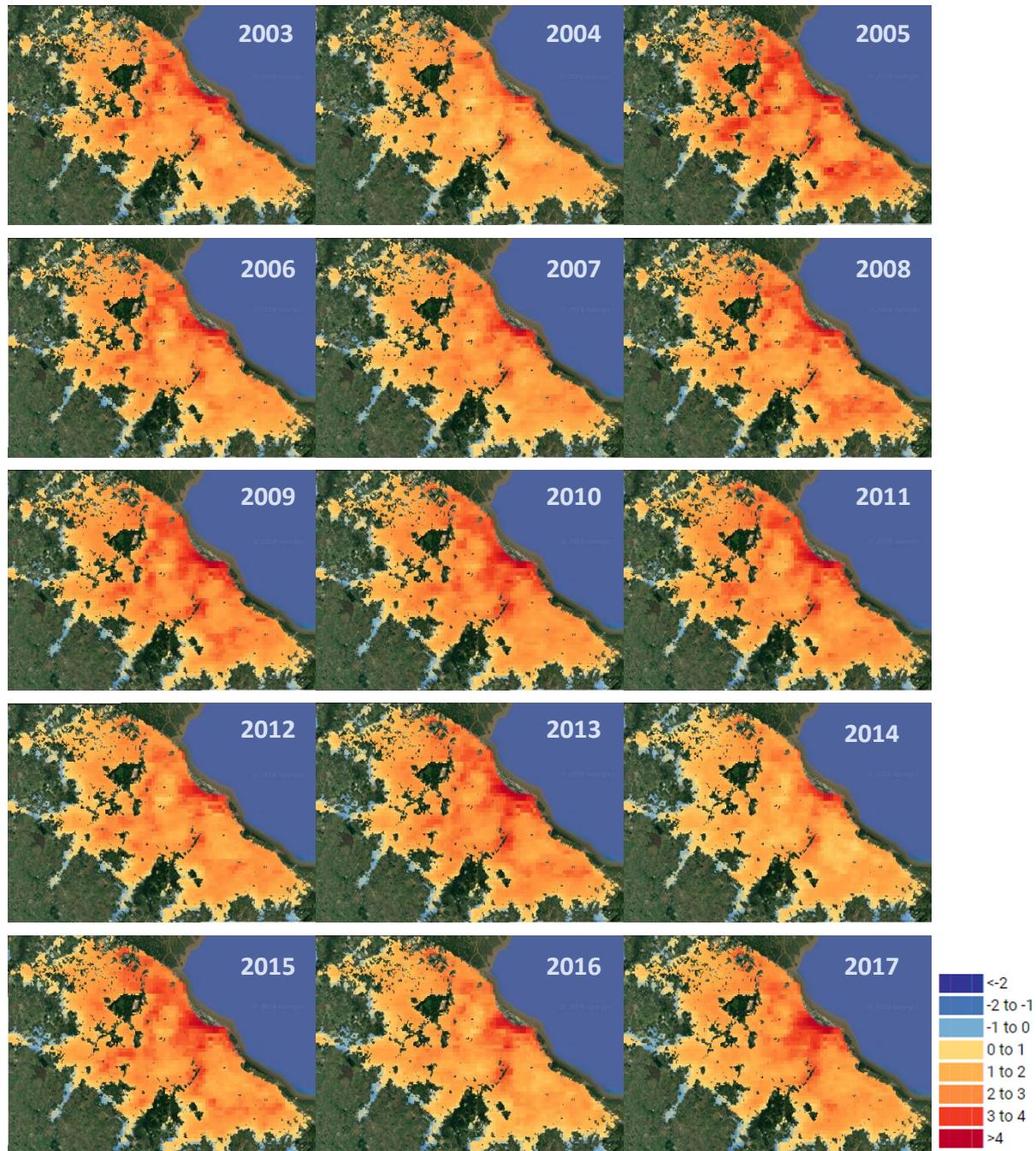


Figura 6.3: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna (°C) de Buenos Aires en el período 2003-2017.

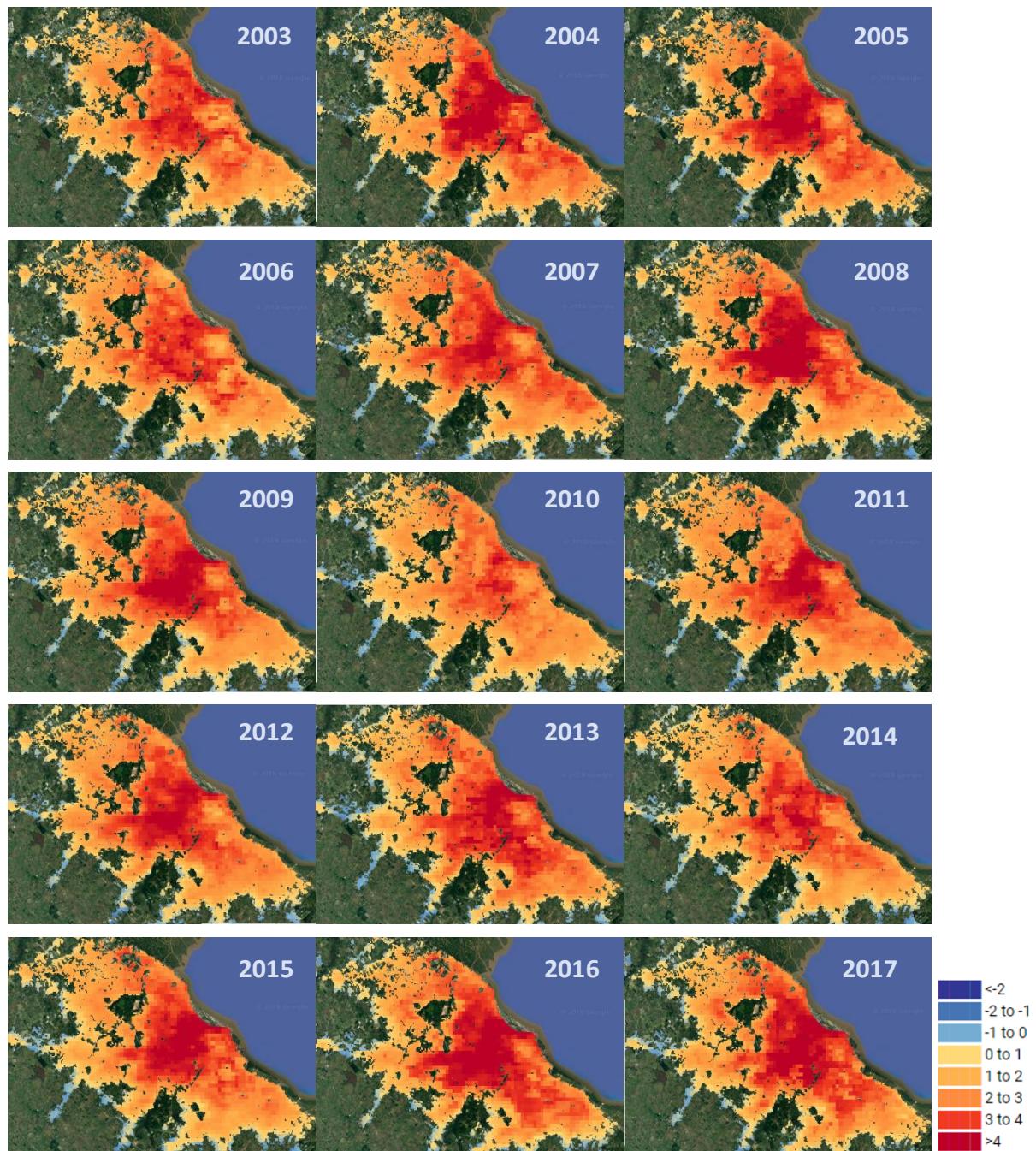


Figura 6.4: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de verano ($^{\circ}\text{C}$) de Buenos Aires en el período 2003-2017.

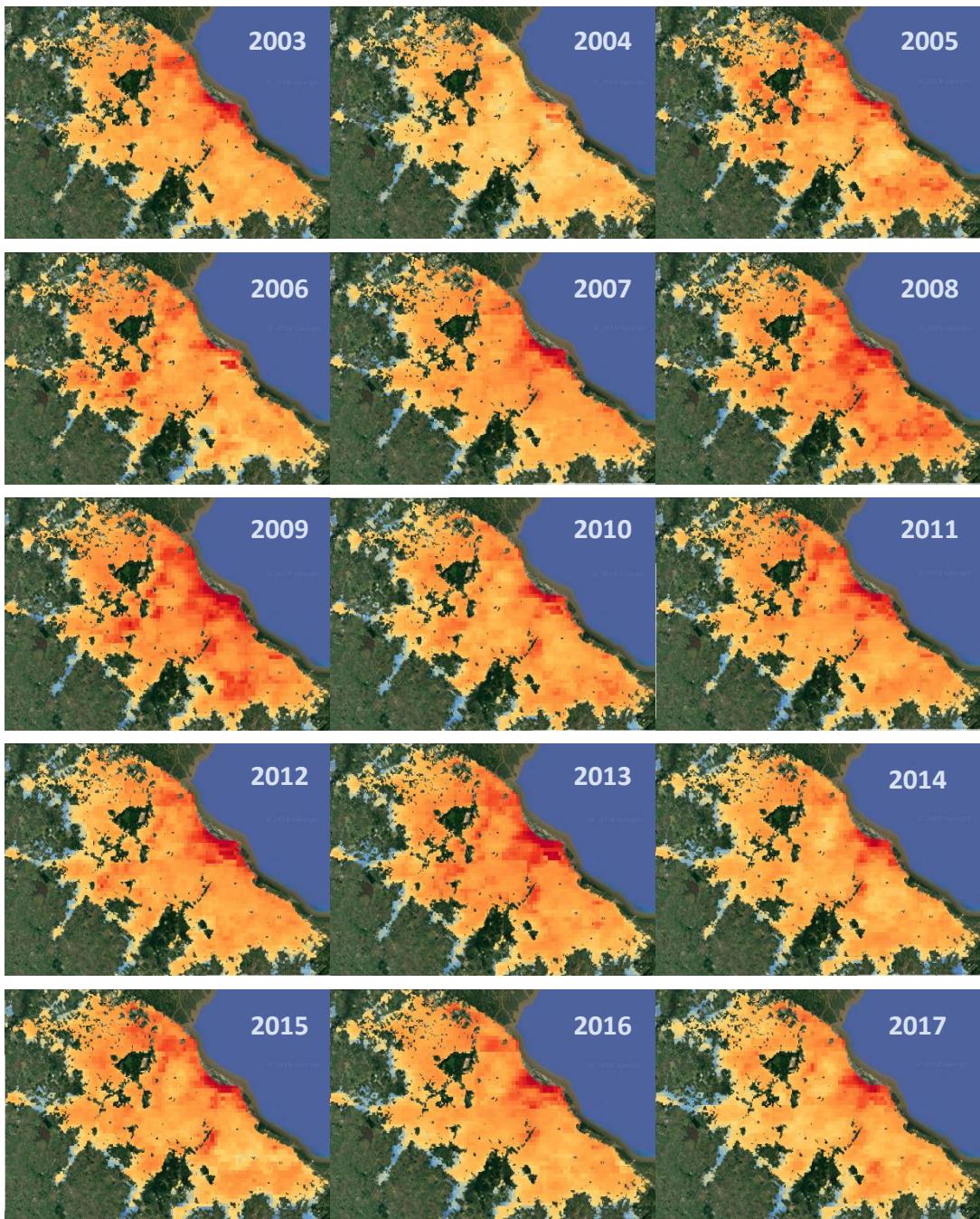


Figura 6.5: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de invierno ($^{\circ}\text{C}$) de Buenos Aires en el período 2003-2017.

6.3 IUC-S de Rosario

La Figura 6.6 muestra la imagen satelital del aglomerado urbano Rosario mientras que las Figuras 6.7 y 6.8 presentan la evolución de la IUC-S media anual diurna y nocturna, respectivamente. Al igual que lo que sucede en Buenos Aires, la IUC-S diurna (Figura 6.7) es predominantemente negativa tomando valores inferiores a -1.5°C . Se identifica una marcada variabilidad interanual siendo los años 2008, 2009 y 2013 donde se alcanzan los

mínimos valores. La IUC-S nocturna (Figura 6.8) es positiva en toda el área tomando valores mayoritariamente en el rango entre 1°C y 3°C. En este caso la variabilidad interanual es menor que para el caso diurno. La IUC-S nocturna durante el trimestre de verano (Figura 6.9) es positiva y su distribución espacial y magnitud se asemejan a la media anual (Figura 6.8). En el trimestre de invierno se observa la máxima magnitud (Figura 6.10) que en algunas zonas y años puede superar 4°C.



Figura 6.6: Imagen satelital del aglomerado urbano Rosario.

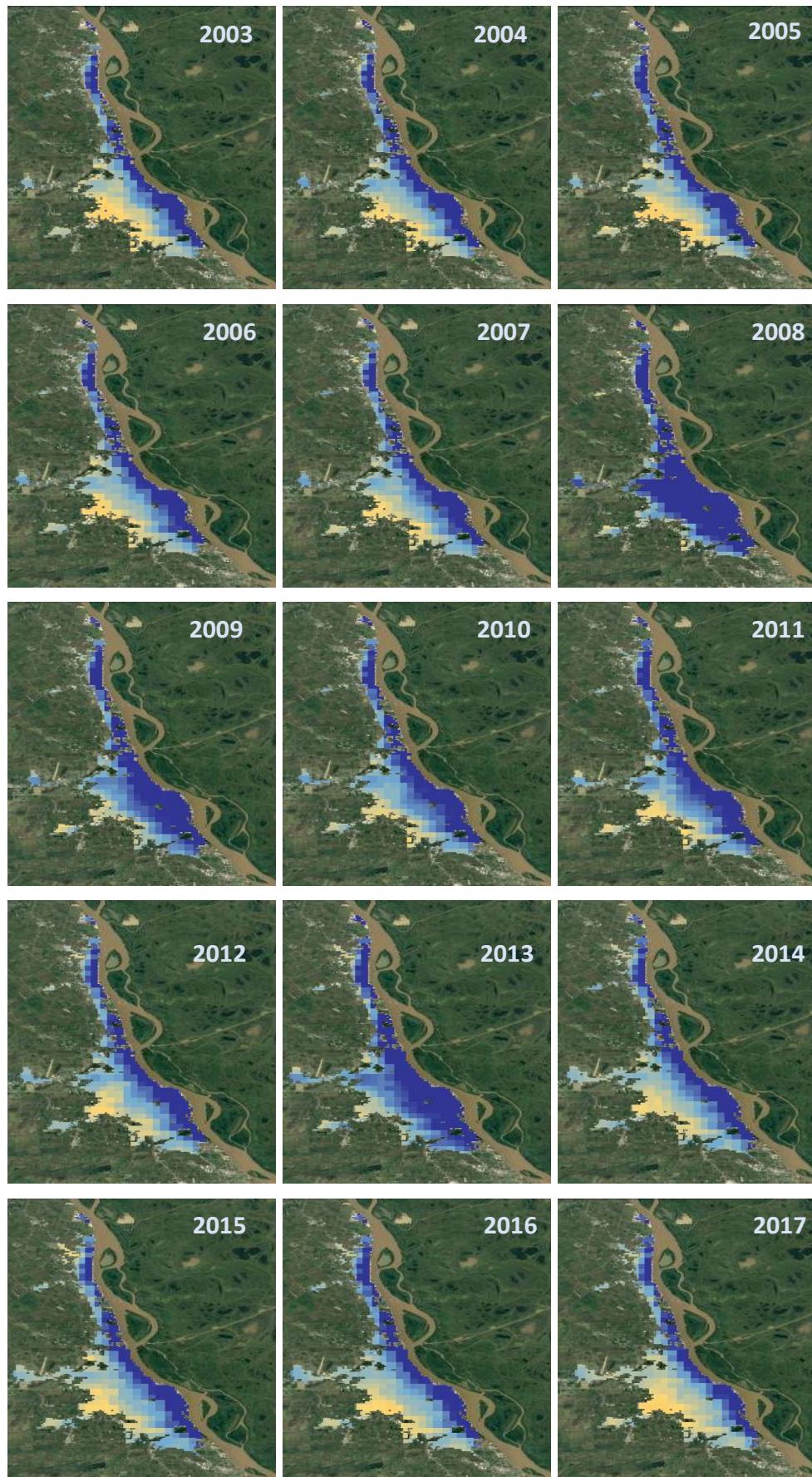


Figura 6.7: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S diurna ($^{\circ}\text{C}$) de Rosario en el período 2003-2017.

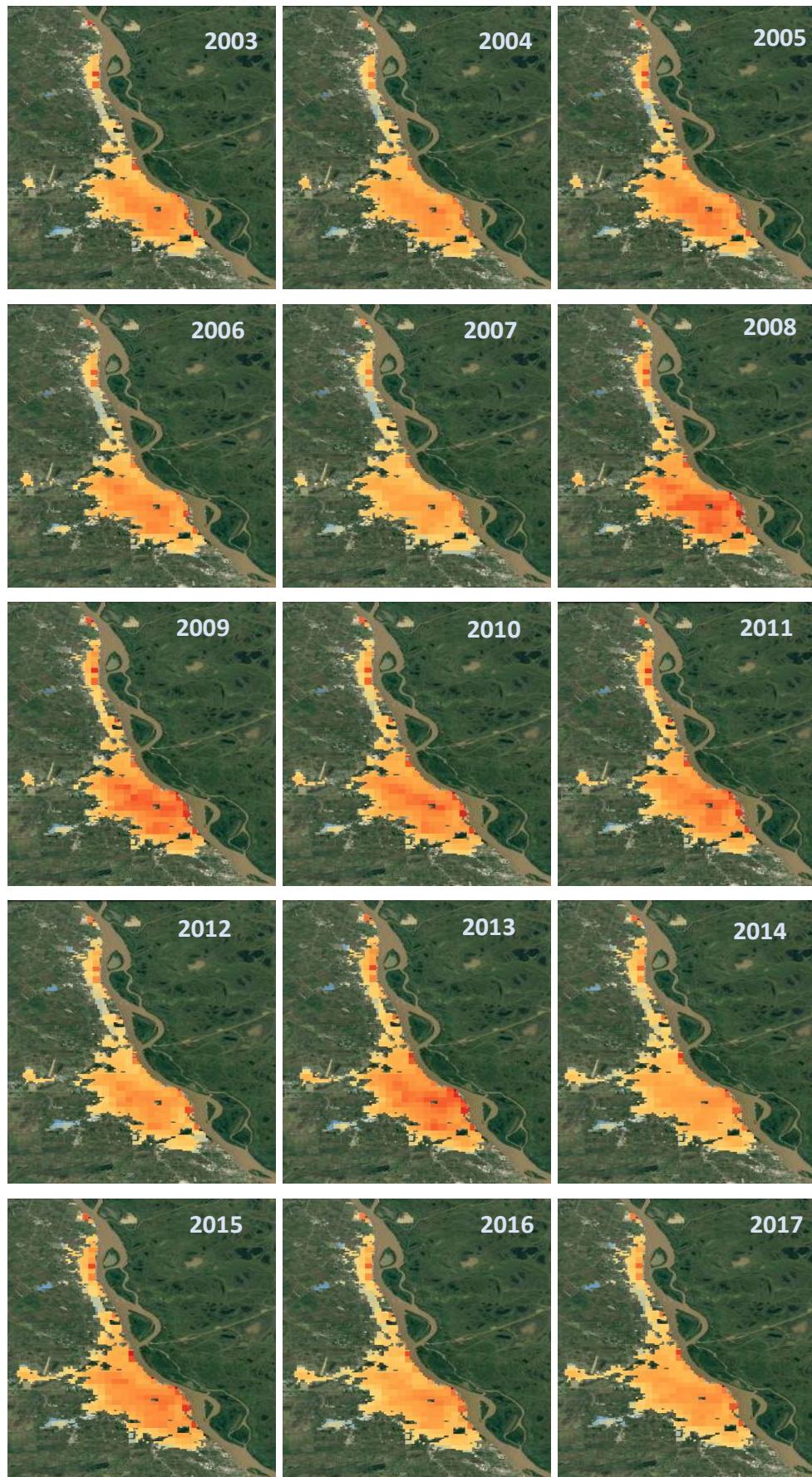


Figura 6.8: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna ($^{\circ}\text{C}$) de Rosario en el período 2003-2017.

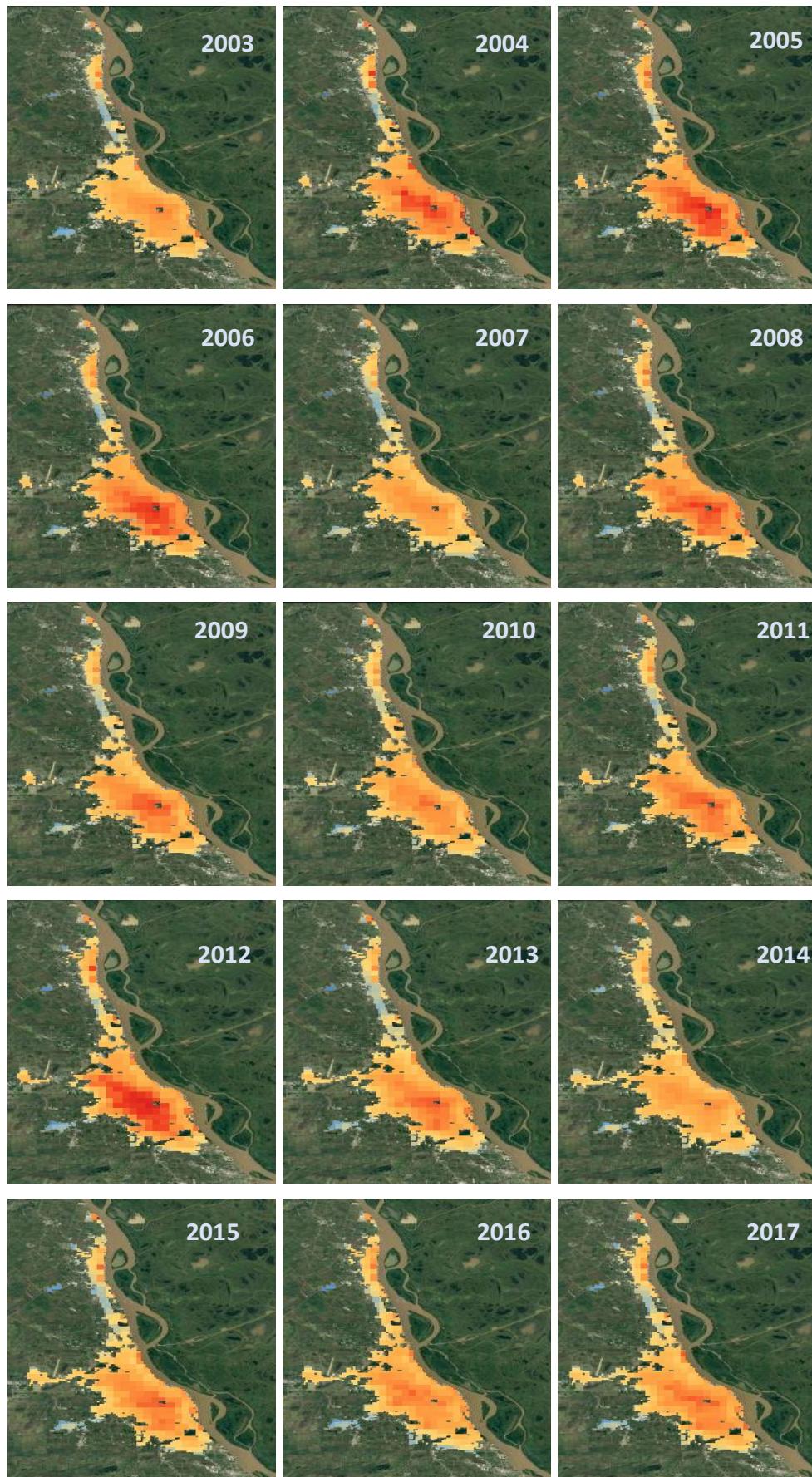


Figura 6.9: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de verano ($^{\circ}\text{C}$) de Rosario en el período 2003-2017.

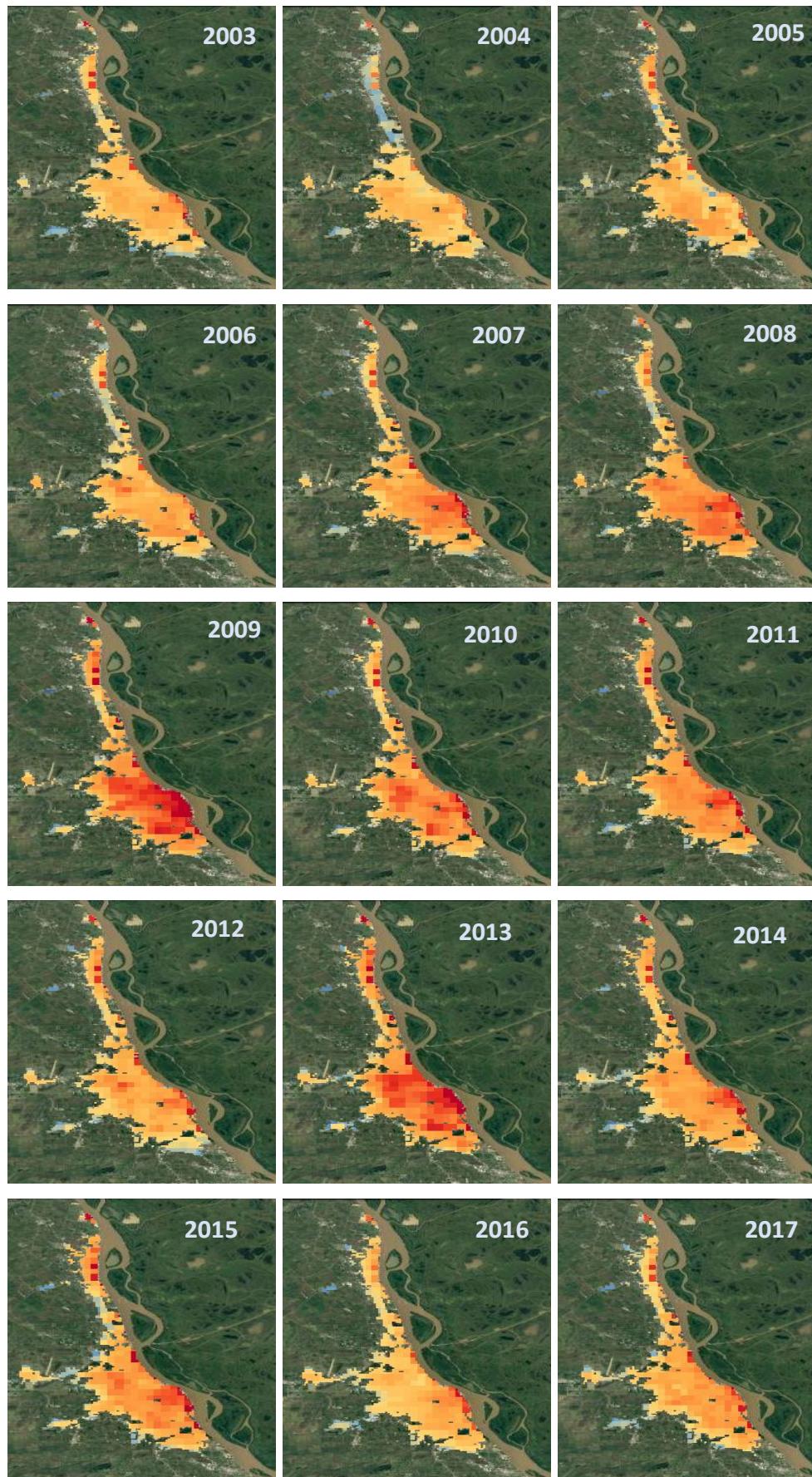


Figura 6.10: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de invierno ($^{\circ}\text{C}$) de Rosario en el período 2003-2017.

6.4 IUC-S de Córdoba

La Figura 6.11 presenta la imagen satelital del aglomerado Córdoba. Las Figuras 6.12 y 6.13 muestran la evolución de la IUC-S media anual diurna y nocturna, respectivamente. Los valores diurnos (Figura 6.12) son mayormente negativos aunque en los últimos 3 años (2015 a 2017) esta isla fría parecería debilitarse en parte del área urbana. En el caso nocturno (Figura 6.13) los valores son positivos en casi toda la región con una configuración concéntrica: máximos en el centro del área y disminución radialmente.

Durante el período nocturno de verano (Figura 6.14), la IUC-S alcanza valores mayores que en el promedio anual acompañados de una marcada variabilidad interanual.

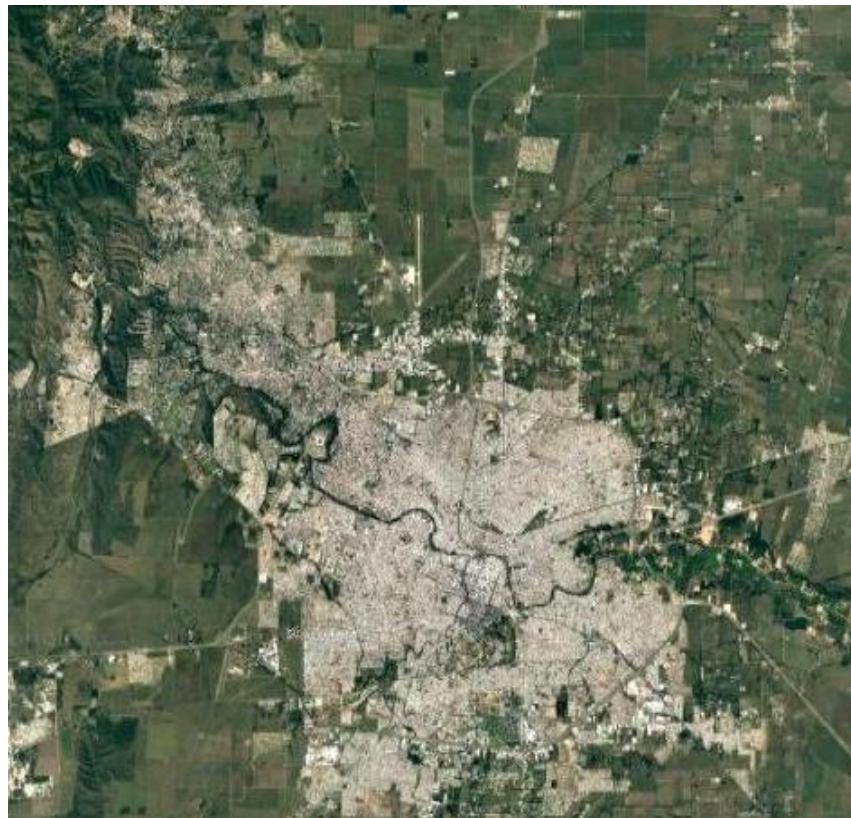


Figura 6.11: Imagen satelital del aglomerado urbano Córdoba.

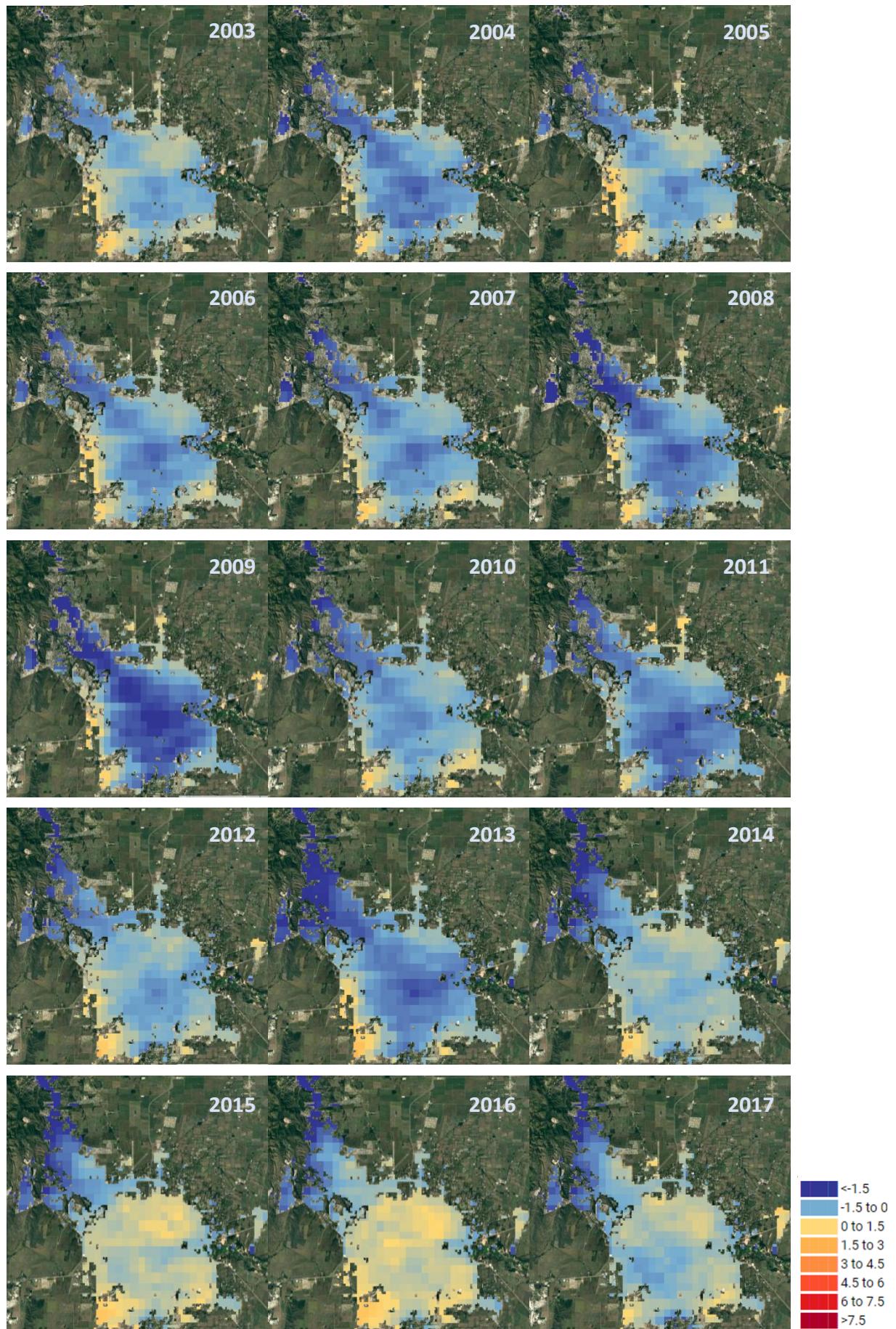


Figura 6.12: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S diurna (°C) de Córdoba en el período 2003-2017.

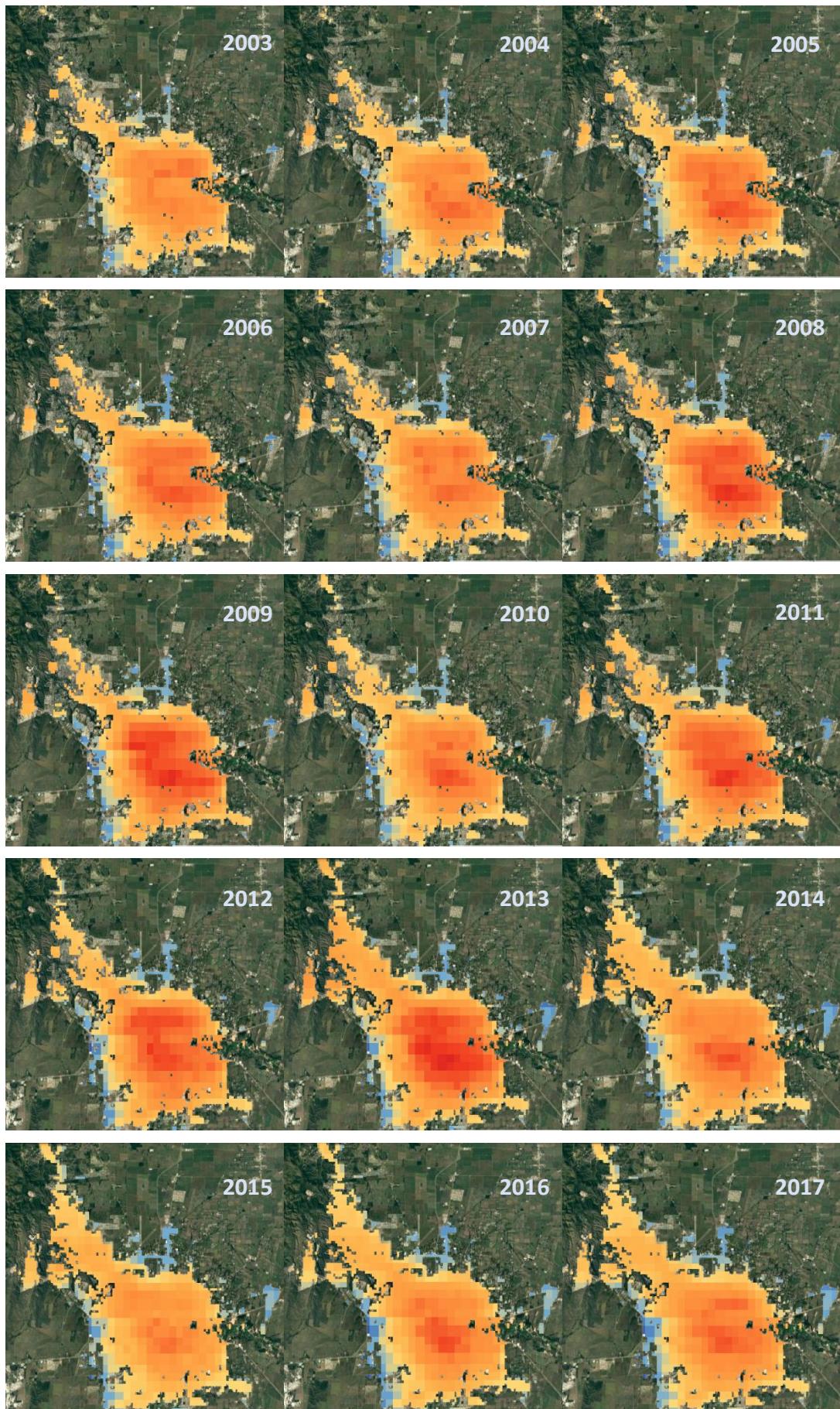


Figura 6.13: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna (°C) de Córdoba en el período 2003-2017.

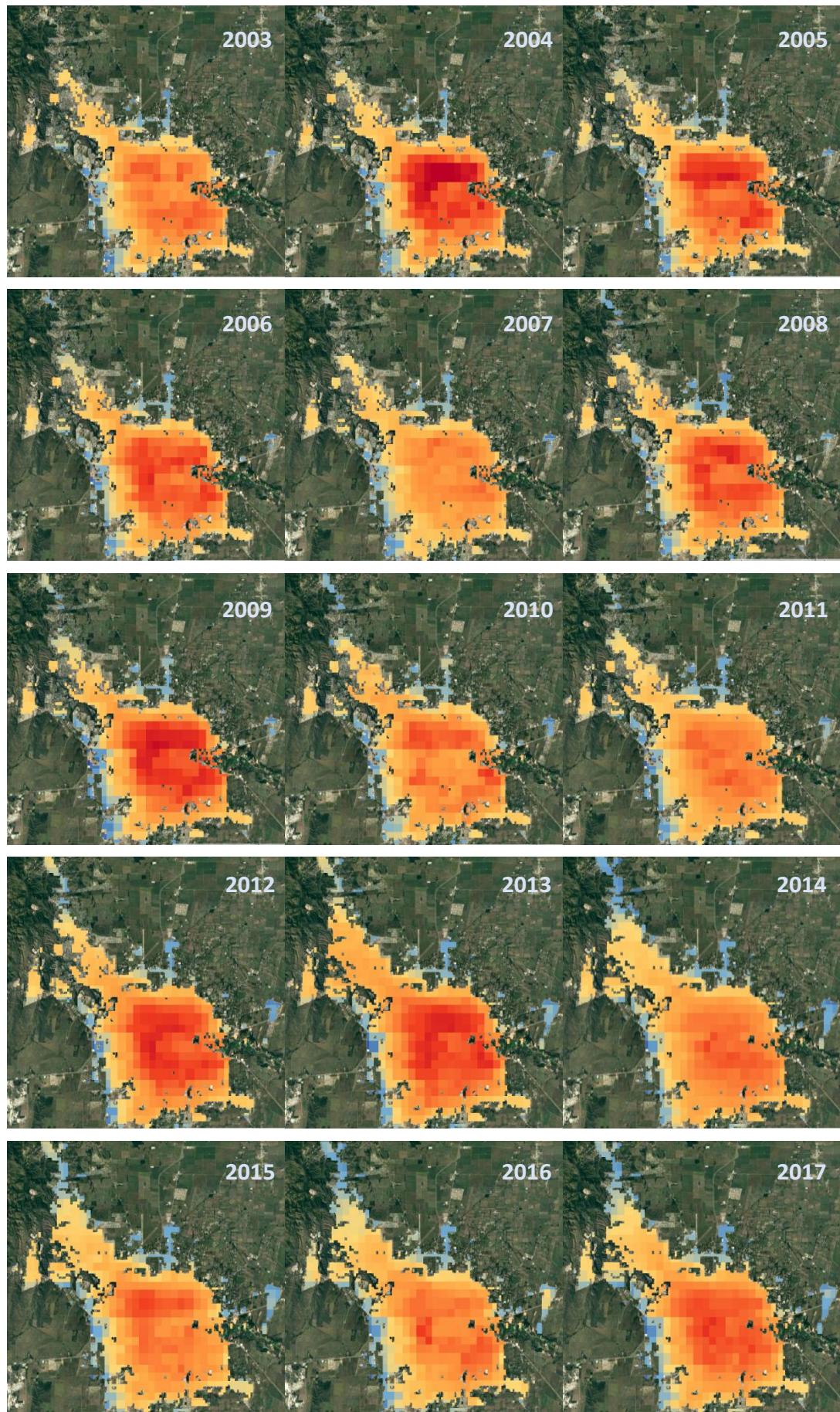


Figura 6.14: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de verano ($^{\circ}\text{C}$) de Córdoba en el período 2003-2017.

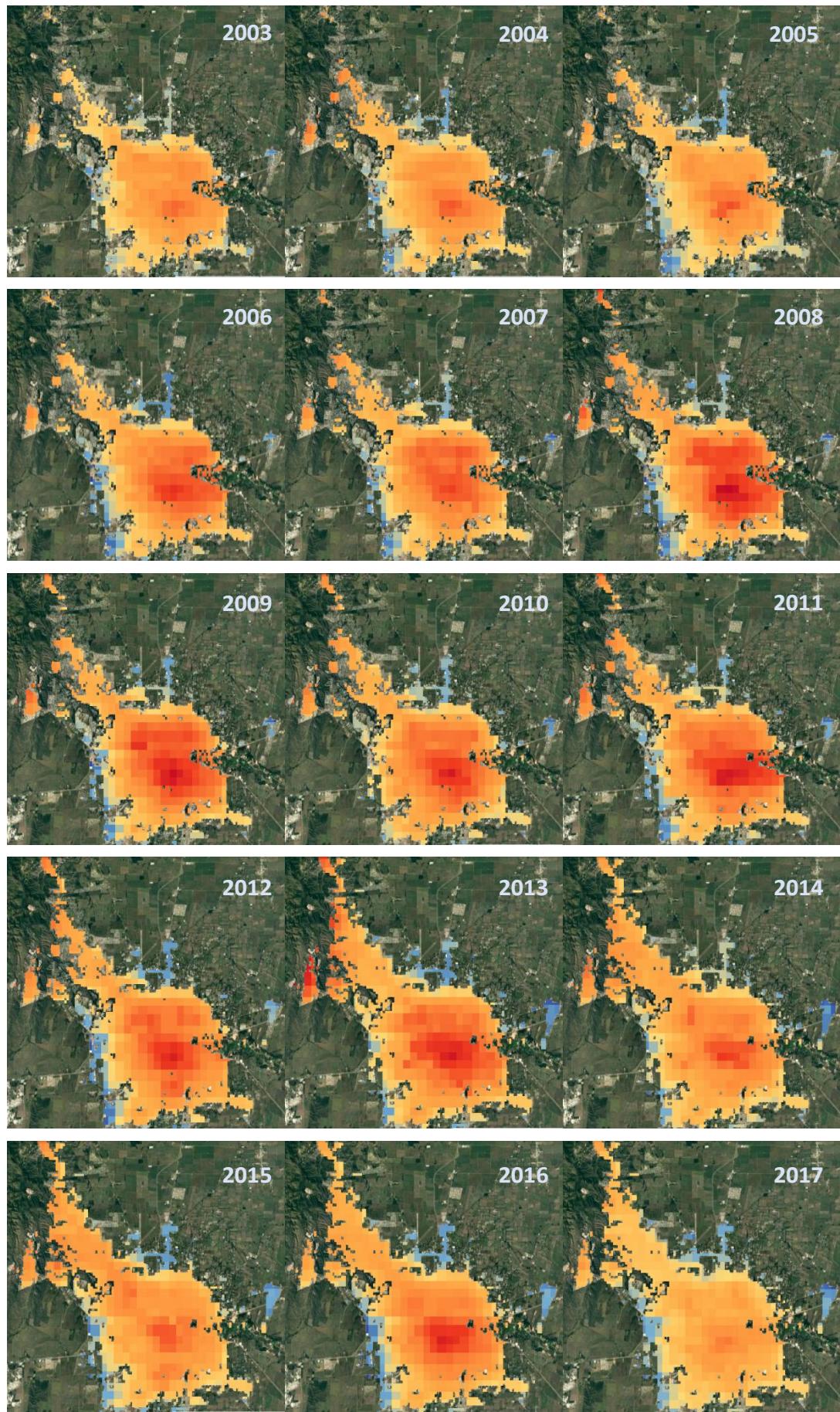


Figura 6.15: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de invierno($^{\circ}\text{C}$) de Córdoba en el período 2003-2017.

6.5 IUC-S de Mendoza

La Figura 6.16 muestra la imagen satelital del aglomerado urbano Mendoza mientras que las Figuras 6.17 y 6.18 presentan la evolución de la IUC-S media anual diurna y nocturna, respectivamente. Los valores diurnos medios anuales (Figura 6.17) son negativos para toda el área urbana y en todo el período siendo mayormente inferiores a -1.5°C . En el caso nocturno (Figura 6.18) se encuentran valores positivos y negativos, estando los positivos en el área más densamente construida de la ciudad. La variación de la IUC-S nocturna durante el verano e invierno se muestran en las Figuras 6.19 y 6.20. En el verano la distribución espacial es semenjante al promedio anual (Figura 6.19) mientras que en el invierno (Figura 6.20) se identifica en algunos años un incremento en la extensión del área con isla fría.



Figura 6.16: Imagen satelital del aglomerado urbano Mendoza.

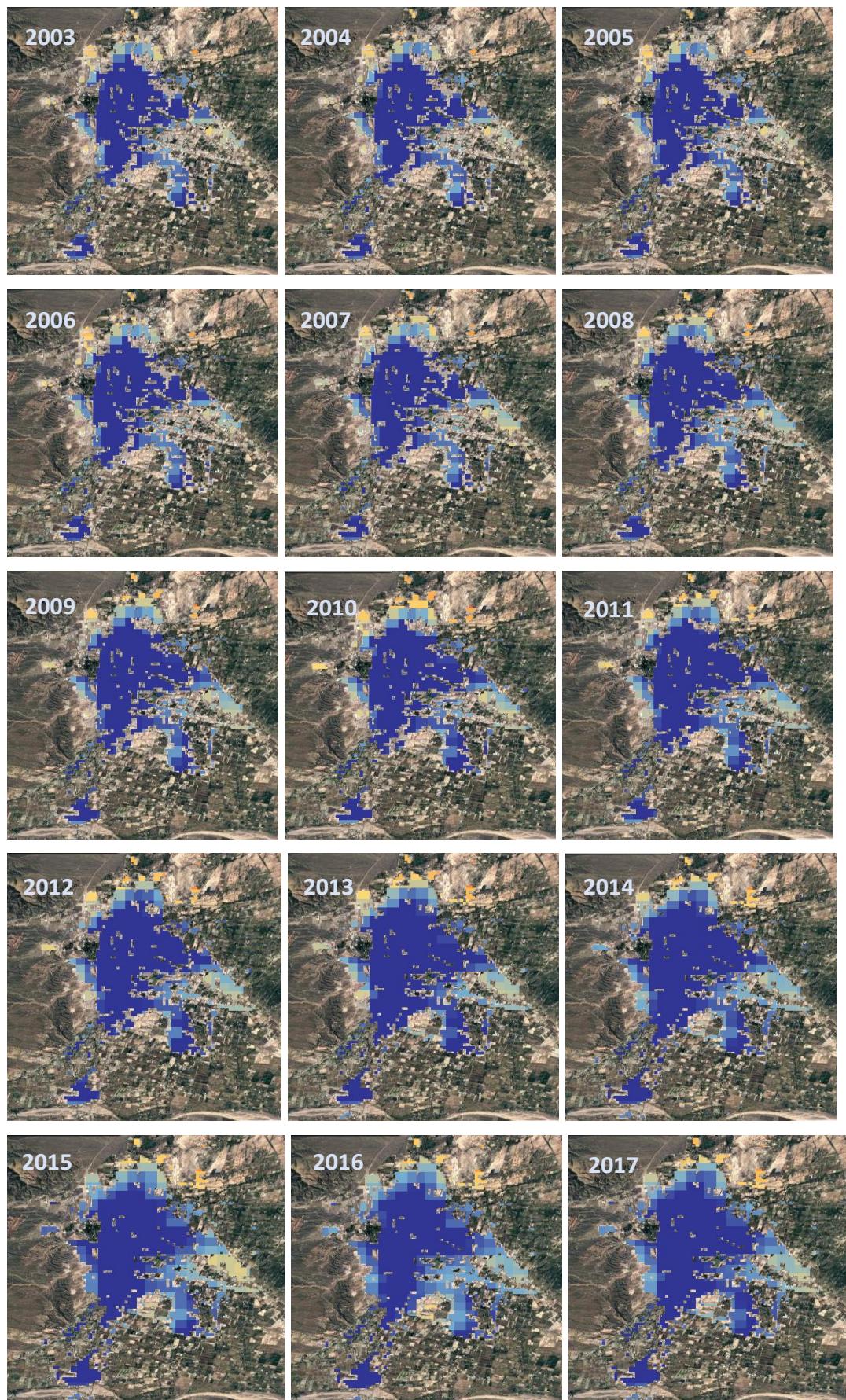


Figura 6.17: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S diurna ($^{\circ}\text{C}$) de Mendoza en el período 2003-2017.

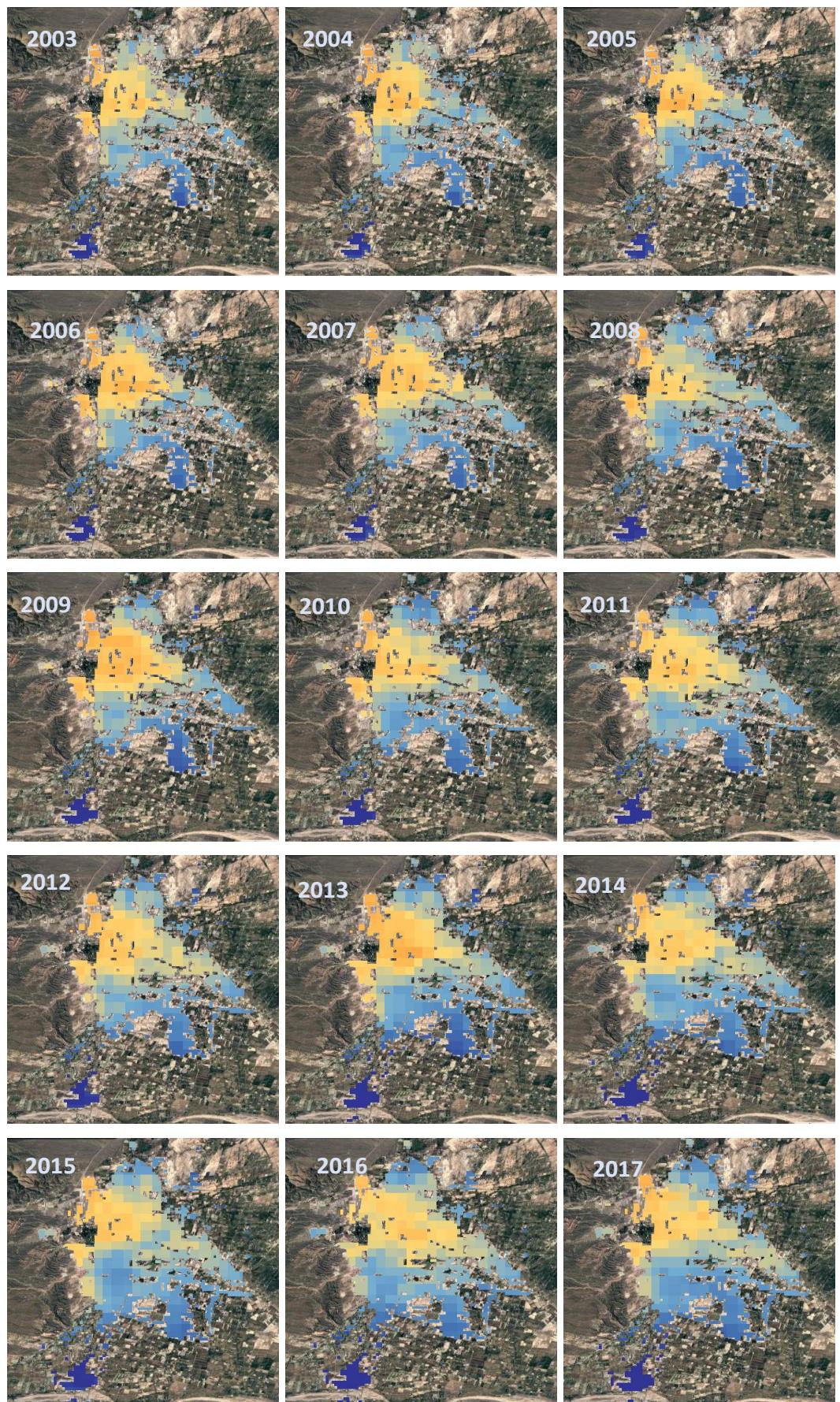


Figura 6.18: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna ($^{\circ}\text{C}$) de Mendoza en el período 2003-2017.

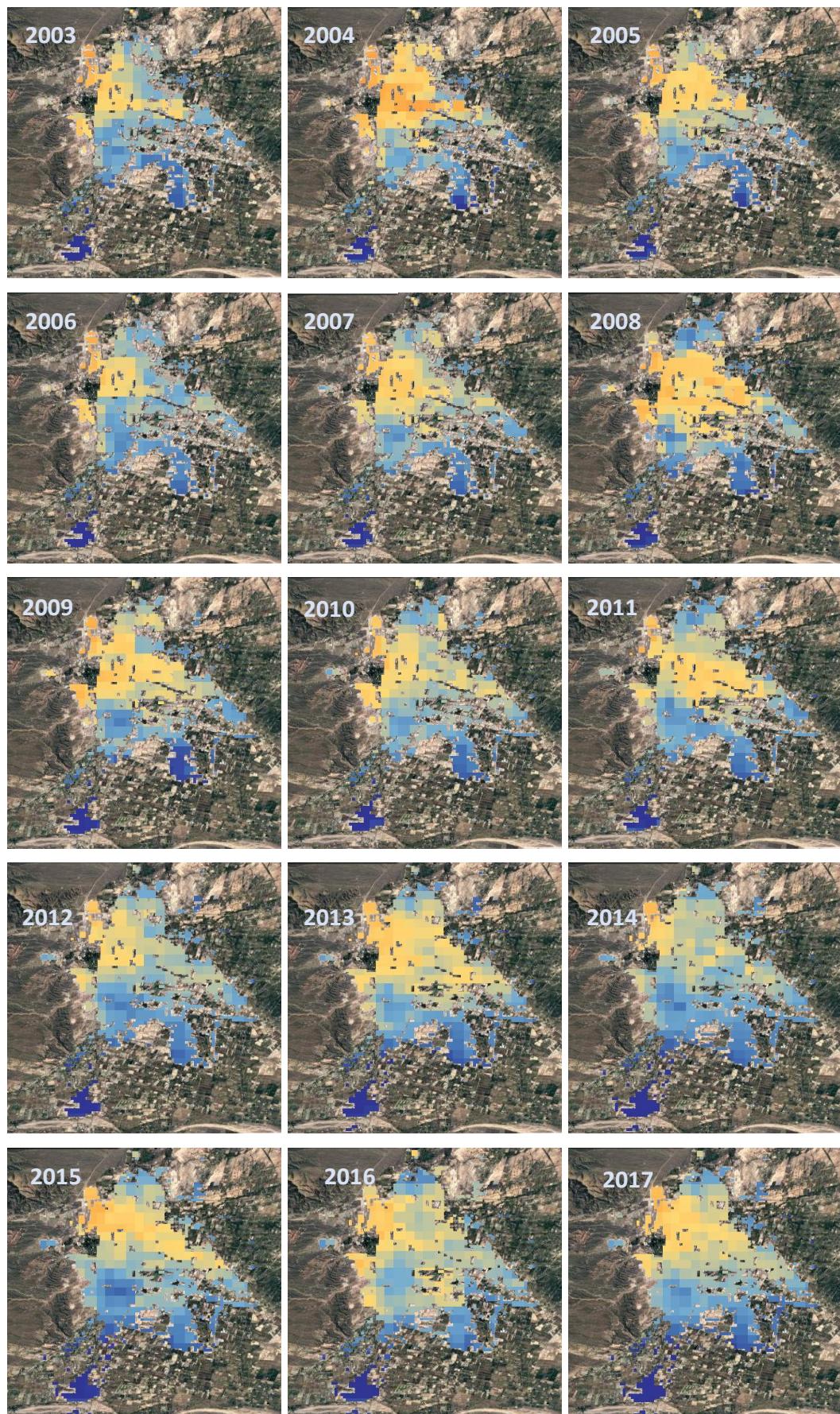


Figura 6.19: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de verano ($^{\circ}\text{C}$) de Mendoza en el período 2003-2017.

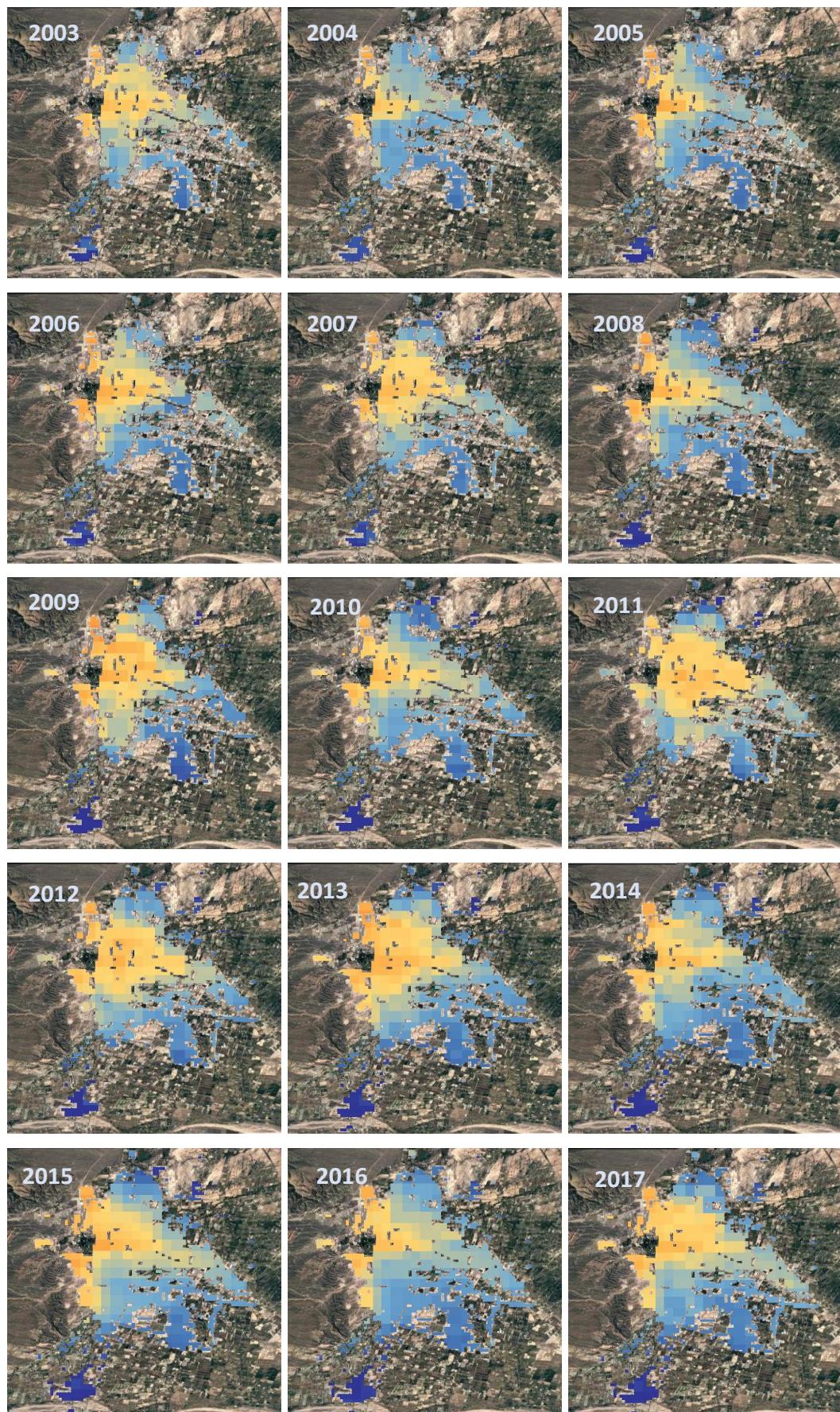


Figura 6.20: Evolución anual de la intensidad de la IUC-S nocturna de invierno ($^{\circ}\text{C}$) de Mendoza en el período 2003-2017.

6.6 Comparación entre las IUC-S de los aglomerados Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza

En esta sección se realiza una comparación de las IUC-S de las cuatro ciudades analizadas. Se toma como valor representativo de la intensidad de la IUC-S al valor medio de cada cluster urbano definido anualmente según el uso del suelo.

La Tabla 6.1 resume la intensidad media de la IUC-S diurna y nocturna a nivel anual y para verano e invierno para cada aglomerado urbano. Buenos Aires es quien presenta mayores valores de IUC-S diurna y la única ciudad que presenta una intensidad positiva a nivel anual. En el verano, Buenos Aires, Rosario y Córdoba tienen magnitudes positivas mientras que en el invierno las cuatro ciudades presentan el efecto de isla fría en los valores diurnos. Mendoza es la ciudad que presenta el efecto de isla frío más intenso a nivel anual y durante el verano mientras que Rosario lo es en el invierno. Se encuentra que la intensidad nocturna es positiva en todos los casos (con excepción de Mendoza) y supera a la diurna. La IUC-S nocturna más intensa se registra en Buenos Aires seguida de Córdoba y Rosario. En Mendoza el efecto es prácticamente nulo.

IUC-S DIURNA (°C)				
	Buenos Aires	Rosario	Córdoba	Mendoza
IUC-S Anual	0.4	-0.8	-0.2	-1.8
IUC-S de Verano	1.2	0.7	0.8	-2.0
IUC-S de Invierno	-0.4	-1.6	-1.2	-1.4
IUC-S NOCTURNA (°C)				
	Buenos Aires	Rosario	Córdoba	Mendoza
IUC-S Anual	1.7	1.4	1.5	0.0
IUC-S de Verano	2.0	1.4	1.6	-0.1
IUC-S de Invierno	1.5	1.5	1.5	-0.1

Tabla 6.1: Intensidad media (°C) de la IUC-S diurna y nocturna a nivel anual y para verano e invierno para cada aglomerado urbano.

La Figura 6.21 presenta el ciclo anual de la intensidad de la IUC-S diurna y nocturna de las ciudades de Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza. Se observa, que, con excepción de Mendoza, para el resto de las ciudades el ciclo anual de la IUC-S diurna es más marcado que el de la nocturna y muestra máximos en verano y mínimos en invierno. En todos los casos, durante el invierno la intensidad es negativa indicando que la superficie rural está más cálida que la urbana.



Figura 6.21: Ciclo anual la intensidad de la IUC-S diurna y nocturna ($^{\circ}\text{C}$) de las ciudades de Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza.

La Figura 6.22 muestra las series temporales de la IUC-S diurna y nocturna para cada aglomerado y para el período de análisis 2003-2017. En todos los casos se identifica que la IUC-S nocturna supera en magnitud a la diurna y que en el promedio anual es positiva con excepción de Mendoza donde algunos años toma valores levemente negativos. La variabilidad interanual es más marcada en la IUC-S diurna para las cuatro ciudades. La Tabla 6.2 presenta las tendencias de la IUC-S media diurna y nocturna para cada uno de los aglomerados. Se identifica un comportamiento similar en las cuatro ciudades: tendencias positivas en la IUC-S diurna (significativas en Buenos Aires y Mendoza) y negativas en la nocturna (significativa en Mendoza).

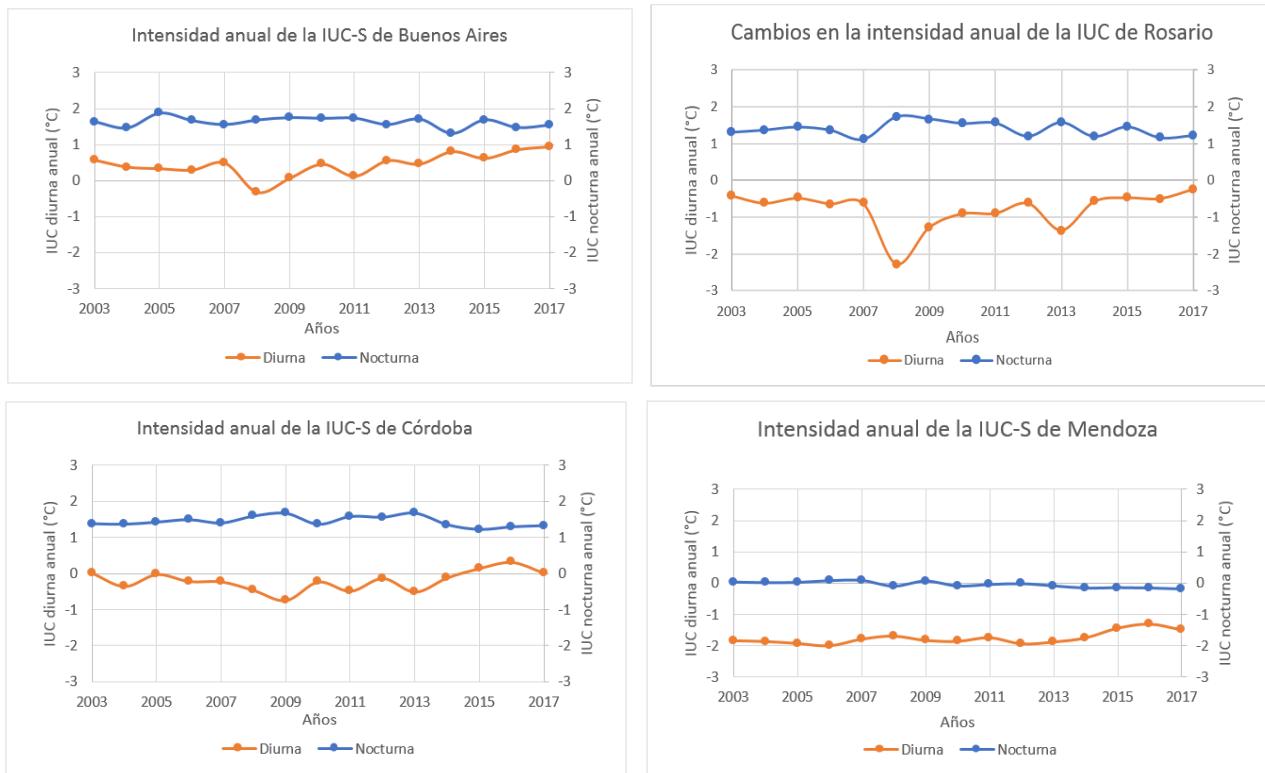


Figura 6.22: Variabilidad interanual de la intensidad de la IUC-S media diurna y nocturna (°C) de Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza para el período 2003-2017.

Tendencia de la IUC-S (°C/década)				
	Buenos Aires	Rosario	Córdoba	Mendoza
IUC-S Diurna	*+0.38	+0.14	+0.19	*+0.30
IUC-S Nocturna	-0.10	-0.08	-0.06	*-0.17

Tabla 6.2: Tendencia (°C/década) de la IUC-S media diurna y nocturna para cada uno de los aglomerados y su significancia estadística (* indica al 95%).

6.7 Comparación entre las islas de calor de superficie (IUC-S) y de canopia (IUC) de Buenos Aires

La Tabla 6.3 presenta la comparación entre la intensidad media anual, de verano e invierno que registran los dos tipos de IUC para el período 2003-2017. Ambas islas de calor muestran intensidades máximas y semejantes durante el período nocturno, así como valores más elevados en verano respecto del invierno. Con respecto a la IUC diurna, se encuentran mayores intensidades medias a nivel anual y para el verano para la IUC-S que para la IUC mientras que esta relación se invierte durante el invierno. Dado que la IUC-S se computa a partir de estimaciones de la temperatura de superficie es razonable que se

alcancen temperaturas superiores a las del aire durante el verano cuando los materiales urbanos de bajo albedo (hormigón, asfalto, cemento) absorben gran cantidad de calor durante las horas del día.

En la Tabla 6.4 se presentan las tendencias de la IUC e IUC-S diurna y nocturna para el período 2003-2017. Se encuentra que las tendencias nocturnas son negativas, aunque sólo tiene significancia estadística la computada a partir de la temperatura del aire (IUC). En el caso diurno, la tendencia es positiva y significativa para IUC-S mientras que para IUC es negativa y no significativa. Esta última tendencia difiere en signo de la obtenida en el Capítulo 4 como consecuencia de la diferencia en el período de tiempo considerado en ambos casos.

Intensidad de la isla de calor DIURNA (°C)		
	IUC-S	IUC
Anual	0.4	0.3
Verano	1.2	0.0
Invierno	-0.4	0.4
Intensidad de la isla de calor NOCTURNA (°C)		
	IUC-S	IUC
Anual	1.7	1.8
Verano	2.0	1.9
Invierno	1.5	1.7

Tabla 6.3: Intensidad media (°C) de las IUC-S e IUC diurna y nocturna a nivel anual y para verano e invierno para Buenos Aires

Tendencia (°C/década)		
	IUC-S	IUC
Diurna	*+0.38	-0.14
Nocturna	-0.10	*-0.40

Tabla 6.4: Tendencia (°C/década) de las IUC-S y la IUC medias nocturna y diurna para Buenos Aires (* indica significancia del 95%)

6.8 Conclusiones

El cambio en el uso del suelo causado por la urbanización es el principal factor que da origen al exceso de calentamiento urbano. El balance de energía de la superficie se ve

modificado como consecuencia de los materiales y geometría urbanos, la escasez de vegetación y el aumento de la rugosidad entre otros factores. La temperatura de superficie difiere de la que se mide en forma convencional en estaciones meteorológicas a 2 metros de altura de forma que, en general, la primera supera a la segunda durante el día y la relación se invierte durante la noche debido, principalmente, a una respuesta más rápida de las temperaturas de la superficie a la radiación solar.

La disponibilidad de información satelital en las últimas décadas ha permitido realizar la definición más detallada de los límites de los *clusters* urbanos junto con la estimación de la temperatura superficial. De esta forma es posible realizar una estimación de la intensidad de la IUC-S basada en un contraste entre la temperatura de superficie media de la región categorizada urbana con la de la zona no-urbana próxima. Esta metodología permite además realizar una comparación de la intensidad de la IUC-S para diferentes ciudades.

En este capítulo se realizó por primera vez el estudio de la IUC-S para cuatro ciudades de Argentina (Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza) a partir del análisis de su distribución espacial, su magnitud para horas del día y la noche y las tendencias temporales. Buenos Aires registró las mayores magnitudes de IUC-S durante la noche tanto en el promedio anual como en el verano e invierno mientras que en Mendoza el efecto fue casi nulo a la noche. En el caso diurno, se encontró en el promedio anual y en invierno, temperaturas de superficie mayores en la zona rural que en la región urbana (IUC-S negativas) sólo con excepción de Buenos Aires en la media del año. Mendoza resultó la única ciudad donde el promedio anual y las dos estaciones analizadas presentaron valores negativos que fueron más extremos que en las otras ciudades.

Buenos Aires, Rosario y Córdoba mostraron una caracterización espacial de la IUC-S nocturna semejante con intensidades positivas en toda la zona urbana, así como con máximos valores en la región más densamente construida de cada aglomerado. Mendoza, por el contrario, presentó áreas urbanas con valores de IUC-S negativos que al ser promediados espacialmente condujeron a intensidades medias casi nulas. Con respecto a la variabilidad interanual, se encontraron tendencias negativas en la IUC-S nocturna de las cuatro ciudades (sólo con significancia estadística en Mendoza). En el caso diurno fueron siempre positivas siendo significativas en Buenos Aires y Mendoza. La comparación entre la IUC y la IUC-S de Buenos Aires para el lapso entre 2003 y 2017 resultó en tendencias del mismo signo (negativas) en el período nocturno (significativa en la IUC) y opuestas en el diurno (significativa en la IUC-S).

Capítulo 7

Conclusiones

7.1 Conclusiones

El objetivo general en el cual se enmarcó esta tesis fue avanzar en la caracterización del clima urbano del Área Metropolitana de Buenos Aires, haciendo énfasis en el fenómeno de Isla Urbana de Calor (IUC). Para esto, se utilizaron datos diarios de temperatura máxima y mínima, y la media derivada de ellas, en cinco estaciones: OCBA y Aeroparque dentro de los límites de la Ciudad de Buenos Aire y Ezeiza Aero, El Palomar Aero y Don Torcuato Aero en el área suburbana circundante. Debido a la disponibilidad, el análisis de la temperatura horaria se limitó a sólo tres de ellas (OCBA, Aeroparque y Ezeiza Aero). Para relacionar la IUC con factores atmosféricos se utilizaron datos horarios de nubosidad, humedad relativa e intensidad del viento de OCBA. Por último, se analizó la isla urbana de calor superficial (IUC-S) haciendo uso de imágenes satelitales derivadas del MODIS a través de una aplicación desarrollada por la Universidad de Yale.

Las tendencias de temperatura de las cinco estaciones estudiadas mostraron valores positivos y significativos a nivel anual en la temperatura máxima y media en OCBA y en la temperatura mínima en Ezeiza para el período de información simultánea y completa entre 1983 y 2005. Cuando se consideró el período 1959-2017 (el más prolongado posible con información de temperatura máxima y mínima sólo en Aeroparque, OCBA y Ezeiza), las tendencias resultaron positivas y significativas en ambas variables y en la temperatura media derivada de ellas con pendientes similares en todas las estaciones. Al realizar un análisis de temperatura media derivada de los datos horarios también se encontraron tendencias significativas con la correspondiente a Ezeiza superando a las de OCBA y Aeroparque.

La IUC de Buenos Aires fue calculada a partir del contraste entre la temperatura de OCBA, representativa del área urbana y la temperatura de Ezeiza, representativa del área suburbana/rural. El ciclo diario resultó marcado alcanzando en el promedio anual los mayores valores durante la noche (2°C) y siendo de magnitud nula o levemente negativa (-0.1°C) en algunas horas del día. La intensidad media de la IUC resultó variable según la época del año siendo máxima durante la noche con valores de 2.4°C en verano y 1.5°C en invierno. La IUC nocturna presentó una tendencia a la reducción significativa durante el

período de estudio tanto a nivel anual como para el verano y el invierno mientras que la IUC diurna presentó un comportamiento opuesto (también significativo) con tendencias positivas. El análisis de la variabilidad decadal de la IUC mostró, de la misma forma que el de la variabilidad interanual, una progresiva reducción en la intensidad nocturna y un aumento en la diurna. Estos resultados son coincidentes con los hallados previamente por Camilloni y Barros (1997) y Camilloni y Barrucand (2012) y los motivos de estos fueron asociados a cambios en las condiciones atmosféricas que favorecen el desarrollo de la IUC y a una menor variabilidad interanual de la temperatura urbana en comparación con las zonas rurales circundantes. La IUC nocturna máxima registrada cada año osciló entre 6.1°C y 9.4°C pero sin una tendencia significativa durante el período analizado.

Se evaluó la relación entre la intensidad de la IUC nocturna de verano e invierno con la nubosidad total, la humedad relativa y la intensidad del viento en la estación OCBA. Con los tres parámetros se obtuvo una relación negativa inversa consistente con lo hallado en trabajos previos para Buenos Aires y otras ciudades del mundo. En particular, la nubosidad explicó la mayor proporción de varianza en ambas épocas del año mostrando la importancia de los cambios en el balance de radiación por nubosidad en la atenuación del efecto de calentamiento diferencial del ambiente urbano. El viento, por su parte, solo presentó una relación significativa con la intensidad de la IUC en el invierno, donde la velocidad límite para la desaparición de la IUC resultó 8.3 m/s. La humedad relativa si bien presentó una relación significativa en ambas estaciones del año, la varianza explicada fue menor que para la nubosidad y la velocidad del viento.

El análisis de la IUC-S para cuatro ciudades de Argentina (Buenos Aires, Rosario, Córdoba y Mendoza) en el período 2003-2017 dio como resultado que las mayores magnitudes se registraron en Buenos Aires durante la noche tanto en el promedio anual como en el verano e invierno mientras que en Mendoza el efecto fue casi nulo a la noche. En el caso diurno, se encontró en el promedio anual y en invierno, temperaturas de superficie mayores en la zona rural que en la región urbana (IUC-S negativas). Mendoza fue la única ciudad donde el promedio anual y las dos estaciones analizadas presentaron los valores negativos más extremos.

Las características espaciales de la IUC-S fueron semejantes para Buenos Aires, Rosario y Córdoba durante las horas de la noche mostrando intensidades positivas en toda la zona urbana. En Mendoza, por el contrario, se identificaron zonas urbanas con valores de IUC-S negativos que al ser promediados espacialmente condujeron a intensidades medias casi nulas. En análisis de variabilidad interanual dio como resultado tendencias negativas en la

IUC-S nocturna de las cuatro ciudades (sólo con significancia estadística en Mendoza) y positivas en el caso diurno en todos los aglomerados siendo significativas sólo en Buenos Aires y Mendoza. La comparación entre la IUC y la IUC-S de Buenos Aires para el período 2003-2017 resultó en tendencias del mismo signo (negativas) en el período nocturno (significativa en la IUC) y opuestas en el diurno (significativa en la IUC-S).

7.2 Trabajo Futuro

Se prevé continuar con el estudio del clima urbano presente y futuro en distintos aglomerados de Argentina. En particular, se analizarán las modificaciones en la frecuencia de valores medios y extremos de la temperatura, de olas de calor y de la intensidad de la isla urbana de calor.

Las actividades futuras previstas incluyen:

- Análisis de información de temperatura máxima y mínima diaria derivada de simulaciones provistas por modelos climáticos globales.
- Selección de modelos climáticos de acuerdo con su habilidad para representar las condiciones térmicas estivales en Argentina a partir de métricas estadísticas.
- Cómputo de índices representativos de extremos térmicos para los modelos seleccionados y diferentes umbrales de calentamiento global para el trimestre de verano.
- Selección de aglomerados urbanos de Argentina para el cómputo a escala local de extremos térmicos bajo diferentes umbrales de calentamiento global.
- Generación de un modelo estadístico para calcular la intensidad de la IUC a partir de las relaciones halladas con otros parámetros atmosféricos.
- Análisis de escenarios futuros de intensidad de isla urbana de calor para los aglomerados seleccionados.

Referencias Bibliográficas

- Alonso M.S., Fidalgo M.R. and Labajo J.L. 2007. The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters. *Clim. Res.* 34, 39–46.
- Arnfield, A.J. 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. of Climatol.* 23, 1–26.
- Azevedo, J., Chapman, L. and Muller, C. 2016. Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. *Remote Sensing*, 8, 153
- Barros, V. and I.Camilloni. 1994. Urban-biased trends in Buenos Aires' mean temperature. *Clim.Res.* 4, 33-45.
- Bejarán, R. and I.Camilloni. 2003. Objective method for classifying air masses: an application to the analysis of the Buenos Aires' (Argentina) urban heat island intensity. *Theor. and Appl. Climatol.* 74, 93-103.
- Camilloni, I. 2015. Cambio Climático en la Ciudad de Buenos Aires: cambios observados y escenarios futuros. Buenos Aires: Plan de Acción frente al Cambio Climático. Disponible en http://cdn2.buenosaires.gob.ar/espaciopublico/apra/pacc_2020.pdf
- Camilloni, I. y Mazzeo, N. 1987. Algunas características térmicas de la atmósfera urbana de Buenos Aires. *Anales del II Congreso Interamericano y V Congreso Argentino de Meteorología*.
- Camilloni, I. and Barros.V. 1997. On the urban heat island effect dependence on temperature trends. *Climatic Change* 37, 665-681.
- Camilloni, I. and Barrucand, M. 2012: Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theor.and Appl. Climatol.* 107, 47-58.
- Chakraborty, T. and Lee, X. 2019. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 74, 269-280.
- Chakraborty, T., Sarangi, C. and Tripathi, S.N., 2016. Understanding diurnality and interseasonality of a sub-tropical urban heat island. *Boundary-Layer Meteorol.* 1–23.
- Comrie A.C. 2000. Mapping a wind-modified urban heat island in Tucson, Arizona (with comments on integrating research and undergraduate learning). *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 81:2417–2431.
- Cui, Y.Y. and De Foy, B., 2012. Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico city. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51 (5), 855–868.
- Deng, C.B. and Wu, C.S. 2013. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: a spectral unmixing and thermal mixing approach. *Remote Sens. Environ.*, 131,, 262-274.
- Du, H.Y., Wang, D.D., Wang, D.D., Zhao, X.L., Qin, F., Jiang, H. and Cai, Y.L. 2016. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta urban agglomeration *Sci. Total Environ.*, 571, 461-470.
- Figuerola, P. and Mazzeo, N. 1998. Urban-rural temperature differences in Buenos Aires. *Int.J.Climatol.* 18, 1709-1723.
- Gaffin S.R., Rosenzweig C., Khanbilvardi R., Parshall L., Mahani S., Glickman H., Goldberg R., Blake R., Slosberg R.B. and Hillel D.. 2008. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theor Appl Climatol* 94, 1–11.

- Gonçalves, A., Ornellas G., Castro Ribeiro, A. Maia; F. Rocha, A. and Feliciano, M. 2018. Urban Cold and Heat Island in the City of Bragança (Portugal). *Climate* 6, 70.
- Haasemi, S., Weng, Q.H., Darvishi, A. and Alavipanah, S.K.. 2016. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city. *Remote Sens.* 8, 17.
- Hoffmann, P., Kruegerb, O. and Heinke Schlünzen, K. 2012. A statistical model for the urban heat island and its application to a climate change scenario. *Int. J. Climatol.* 32, 1238–1248.
- Howard L. 1833. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it, vol 2. Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.
- INDEC, 2003. ¿Qué es el Gran Buenos Aires?, 12 pp.
- INDEC, 2019. Población: proyecciones y estimaciones. En https://www.indec.gob.ar/nivel3_default.asp?id_tema_1=2&id_tema_2=24 (último acceso febrero 2019)
- Kalkstein, L.S. and J.S., Greene 1997. An evaluation of climate/mortality relationships in large US cities and the possible impacts of a climate change. *Environmental Health Perspectives* 105 (1), 84–93.
- Kalnay E. and Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate *Nature* 423 528–31.
- Kawai T, Kanda M. 2010. Urban energy balance obtained from the comprehensive outdoor scale model experiment. Part I: Basic features of the surface energy balance. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49, 1341–1359.
- Kendall M.G, 1975. *Rank Correlation Measures*, London: Charles Griffin.
- Kim, Y.H. and Baik, J.J. 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *J. Appl. Meteorol.* 41, 651–659.
- Kim Y.H. and Baik J.J. 2004. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theoretical and Applied Climatology* 79, 151–164.
- Krüger, E. and Emmanuel. R. 2013. Accounting for atmospheric stability conditions in urban heat island studies: The case of Glasgow, UK. *Landscape and Urban Planning* 117, 112–121.
- Lee, D.O. 1975. Rural atmospheric stability and the intensity of London's heat island. *Weather*, 30, 102–109.
- Lee, T.W., Choi, H.S. and Lee, J. 2014. Generalized Scaling of Urban Heat Island Effect and Its Applications for Energy Consumption and Renewable Energy, *Advances in Meteorology*, vol. 2014, Article ID 948306.
- Li D. and Bou-Zeid E. 2013. Synergistic interactions between Urban heat Islands and heat waves: the impact in cities is larger than the sum of its parts *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 52 2051–64.
- Li D., Sun T., Liu M. F., Yang L., Wang L. L. and Gao Z. Q .2015. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves *Environ. Res. Lett.* 10 054009.
- Luber G. and McGeehin M. 2008. Climate change and extreme heat events *Am. J. Prev. Med.* 35 429–35.
- Llano, M.P. y Vargas, W. 2017. Características de las temperaturas extremas en Buenos Aires mediante registros centenarios: Estudio de las condiciones invernales. *Meteorologica*.42,43-58.
- Martínez A., Yagüe C. and Zurita E. 1991. Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmos. Environ.* 25, 327–332.
- Mihalakakou G., Flocas H.A., Santamouris M. and Helmis C.G. 2002. Application of neural networks to the simulation of the heat island over Athens, Greece, using synoptic types as a predictor. *J. Appl. Meteorol.* 41, 519–552.
- Morris C.J.G., Simmonds I. and Plummer N. 2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J. Appl. Meteorol.* 40, 169–182.

- Oke T.R. 1976. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere* 14:268–277.
- Oke,T.R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 108, 1-24.
- Oke T.R. 1987. Boundary layer climates, 2nd edn, Routledge, Taylor and Francis Group: Cambridge; p. 435.
- Oke T.R. and Hannell F.G. 1970. The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. *WMO Tech Note* 108:113–126.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. .2017. Urban Heat Island. In *Urban Climates* (pp. 197-237). Cambridge: Cambridge University Press.
- Peng, S., Piao, S. Ciais, P., Friedlingstein, P. Ottle, C., Bréon, F.M., Nan, H., Zhou, L. and Myneni, R.B. 2012. Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities. *Environmental Science & Technology* 46, 696-703
- Ramamurthy, P. and Bou-Zeid E. 2017. Heatwaves and urban heat islands: a comparative analysis of multiple cities *J. Geophys. Res.-Atmos.* 122 168–78.
- Ramamurthy P., Li D. and Bou-Zeid E. 2017. High-resolution simulation of heatwave events in New York City *Theor. Appl. Climatol.* 128 89–102.
- Rao, P.K., 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 53 , 647.
- Roth, M., 2013. Urban Heat Islands. In: *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, Volume Two, edited by Harindra Joseph Shermal Fernando, CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC.
- Runnalls K.E. and Oke T.R. 2000. Dynamics and controls of the near surface heat island of Vancouver, British Columbia. *Phys Geogr* 21:283–304.
- Rusticucci, M. y Vargas, W. 1991. Efecto de la ciudad y el río sobre la temperatura de superficie de Buenos Aires. *Geoacta* 18, 35-48.
- Schwarz, N., Lautenbach, S. and Seppelt, R. 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sens. Environ.*, 115, 3175-3186.
- Scott, A.A., Waugh, D.W. and Zaitchik, B.F. 2018. Reduced Urban Heat Island intensity under warmer conditions. *Environ. Res. Lett.* 13 ,064003.
- Souch, C. and Grimmond, S. 2006. Applied climatology: urban climate. *Progr. Phys. Geogr.* 30 (2), 270–279.
- Takebayashi, H. and Moriyama, M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Build. Environ.*, 42, 2971-2979.
- Voogt, J. and Oke, T.R. 2003. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370-384.
- WMO. 2014. *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate, and Water Extremes (1970–2012)* (Geneva: World Meteorological Organization).
- Xu, S.L. 2009. An approach to analyzing the intensity of the daytime surface urban heat island effect at a local scale. *Environ. Monit. Assess.*, 151, 289-300.
- Zhao L., Lee X., Smith R.B. and Oleson, K. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature* 511, 216–219.
- Zhao L., Oppenheimer M., Zhu Q., Baldwin J.W., Ebi K.L., Bou-Zeid E., Guan K. and Liu X. 2018. Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environ. Res. Lett.* 13 034003.