



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

Comportamiento de la isla de calor urbana en noches calurosas de verano en el Área Metropolitana de Buenos Aires

Tesista: Ernesto Petino Zappala

Director: Dr. Marcos Adolfo Saucedo

A Romi y a mis viejos

A Marcos, por el aguante y las enseñanzas

A mis compañeros del SMN y del DCAO

A los chicos del Foro Gustfront, por convertir un pasatiempo en mi profesión

Índice

Resumen	1
Capítulo 1: Introducción	2
1.1 ¿Qué es la isla de calor urbana y cómo se genera?	2
1.2 Influencia de la meteorología de mesoescala y de escala sinóptica sobre la isla de calor	3
1.3 Sinergia entre isla de calor y olas de calor en verano	4
1.4 La isla de calor urbana en el Área Metropolitana de Buenos Aires	5
1.5 Objetivos y estructura	7
Capítulo 2: Datos y metodología	8
2.1 Datos de superficie	8
2.2 Tratamiento de las variables de superficie y obtención de variables derivadas	11
2.3 Clasificación de casos según temperatura urbana e intensidad de la isla de calor	12
2.4 Datos de reanálisis	13
2.5 Utilización de la técnica k-means a partir de datos de reanálisis para obtener campos típicos	16
Capítulo 3: Análisis estadístico de la isla de calor	17
3.1 Isla de calor en función de la temperatura en el área urbana	17
3.2 Efecto de la intensidad del viento sobre la isla de calor en noches calurosas	19
3.3 Efecto de la dirección del viento sobre la isla de calor en noches calurosas	22
3.4 Efecto de la nubosidad sobre la isla de calor en noches calurosas	26
3.5 Efecto de la precipitación sobre la isla de calor en noches calurosas	29
3.6 Resumen	30
Capítulo 4: Análisis sinóptico de la isla de calor	33

4.1 Campos sinópticos medios de las noches calurosas	33
4.2 Campos sinópticos típicos en noches calurosas: agrupación en clusters	35
4.3 Persistencia de los eventos de noches calurosas según cluster	45
4.4 Intensidad de la isla de calor según cluster	46
4.5 Características medias de variables de superficie según cluster y su vínculo con la isla de calor	49
4.6 Evolución temporal de la intensidad de la isla de calor según cluster	50
4.7 Resumen	52
 Capítulo 5: Conclusiones	54
5.1 Resultados destacados y análisis	54
5.2 Trabajo a futuro	58
 Bibliografía	60

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio estadístico y sinóptico sobre la magnitud y el comportamiento de la isla de calor urbana en el Área Metropolitana de Buenos Aires en noches calurosas de verano del período 2011-2020.

Los resultados hallados sugieren que si bien la isla de calor en la canopia urbana (ICUC) es más intensa en noches no calurosas de verano que en noches calurosas, la sinergia entre noches calurosas e isla de calor sería un fenómeno relativamente habitual.

Los resultados muestran que existe una relación inversa entre velocidad de viento e intensidad de la ICUC en noches calurosas, y que también incide la dirección del viento. Sin embargo, no se encontraron asociaciones significativas entre nubosidad e ICUC en noches calurosas, aunque sí están presentes en noches no calurosas. Tampoco se encontró una relación clara entre ICUC y precipitación.

En particular, para las noches calurosas se encontraron cinco patrones típicos de circulación de escala sinóptica, todos con una ICUC significativamente positiva aunque con fuertes diferencias de magnitud entre sí. Los patrones con un fuerte gradiente bórico en superficie sobre el AMBA presentaron islas de calor menores que aquellos patrones de gradiente bórico débil. Se encontraron algunos indicios de que los patrones asociados al inicio o al final de series de noches calurosas consecutivas son particularmente proclives a presentar islas de calor más intensas, aunque esta hipótesis debería ser corroborada por investigaciones adicionales. También se encontró que estos patrones típicos presentan formas de evolución temporal de la ICUC nocturna diferentes entre sí.

Capítulo 1

Introducción

1.1 - ¿Qué es la isla de calor urbana y cómo se genera?

La modificación del clima en las ciudades es una de las alteraciones involuntarias de las características atmosféricas en superficie que afectan a mayor cantidad de personas en el mundo. El cambio de una superficie natural o rural por materiales urbanos, así como el calor y los contaminantes producto de las actividades urbanas, modifican sustancialmente las características térmicas, hídricas, radiativas y aerodinámicas del suelo y tiene un impacto fuerte, aunque local, en la climatología. Muchas variables que constituyen el clima de una localidad (la temperatura, la humedad, la precipitación y el viento) se ven afectadas por el cambio del suelo al cual da lugar el desarrollo urbano.

Entre las características diferenciales del clima urbano, la primera en ser estudiada (Howard, 1833) y la más destacable por sus implicancias en el bienestar de los habitantes urbanos es la formación de una isla de calor respecto al entorno no urbano (rural o natural). Este calentamiento diferencial se observa por debajo de la superficie, en la superficie, en la canopia urbana (la capa entre el suelo y la altura media de los edificios) y en la capa límite atmosférica. Pueden, entonces, distinguirse al menos cuatro tipos de isla de calor urbana, contiguos y físicamente relacionados entre sí: subsuperficial, superficial, de canopia y de capa límite (Oke, 1995). Todas ellas se miden respecto a la diferencia de temperatura respecto a la registrada en el medio rural.

Si bien los forzantes que dan lugar a cada uno de estos tipos de isla de calor son distintos y los ciclos temporales de intensidad también lo son, se han propuesto a: las actividades antropogénicas, la forma de cañón de las calles urbanas (que puede aumentar la superficie expuesta a la radiación solar y dificultar el enfriamiento nocturno por emisión de radiación infrarroja), la impermeabilización del suelo (que impide que parte del calor de la superficie sea transferido a la atmósfera en forma de calor latente, aumentando el calentamiento de los materiales urbanos y del aire

sobre la ciudad) y la inhibición de la turbulencia cerca del suelo debido a la geometría urbana como factores determinantes (Oke, 1982).

Dentro de los subtipos de isla de calor urbana, la isla de calor urbana de canopia (en adelante ICUC) es de particular interés, ya que la canopia urbana es el lugar en donde los seres humanos de las ciudades desarrollan sus vidas y en donde el calentamiento urbano puede interferir con sus actividades y su bienestar general.

La ICUC es un fenómeno predominantemente nocturno (a diferencia de la isla de calor subsuperficial, superficial y de capa límite urbana), que se desarrolla en las primeras horas de la noche y disminuye lentamente hasta la hora del amanecer; además, alcanza su máxima magnitud en las zonas de urbanización más densa del centro de la ciudad y en noches despejadas y calmas o con viento débil (Oke, 1982; Oke, 2017). Si bien el almacenamiento de calor por parte de los materiales de construcción puede disminuir la intensidad de la ICUC diurna (lo cual no ocurre con la isla de calor de superficie, que presenta un máximo diurno), la liberación de este calor hace que la ciudad se enfríe más lentamente que el área rural circundante a partir del final de la tarde.

La ICUC suele verse favorecida por condiciones de escaso viento y nubosidad, las cuales inhiben la mezcla turbulenta del aire con los alrededores y con las capas de aire ubicadas lejos de la superficie. La estabilidad vertical de las capas más cercanas a la superficie también favorece la ICUC nocturna. (Oke 1982, Lee 1975).

Si bien las islas de calor son más intensas en las grandes ciudades, aumentando de forma linealmente correlacionada con el logaritmo de la población - tomada la población como una función aproximada del tamaño y la densidad de la ciudad - inclusive localidades tan pequeñas como asentamientos del orden de los mil habitantes pueden tener efecto de isla de calor (Oke, 1973).

1.2 - Influencia de la meteorología de mesoescala y de escala sinóptica sobre la isla de calor

Debido a que las condiciones de calma o viento débil, cielo despejado y estabilidad termodinámica desfavorecen la mezcla vertical y horizontal de aire y tienden a fortalecer las diferencias locales de temperatura, las condiciones sinópticas

anticiclónicas son las que tienden a favorecer en mayor medida condiciones de ICUC nocturna más intensa. Condiciones ciclónicas, asociadas generalmente a cielos con nubosidad abundante y vientos moderados a intensos, tienden a debilitar o incluso eliminar la ICUC. En verano, condiciones de bajas térmicas de superficie con anticiclones en altura pueden dar lugar a ICUC algo atenuadas respecto a condiciones anticiclónicas pero más intensas que en condiciones ciclónicas o de vientos bien definidos, según un estudio realizado en Madrid (Yagüe et al, 1991).

La presencia de topografía o costas cerca de la ciudad puede introducir modificaciones importantes debido a la influencia de efectos locales de brisa que interactúan con la superficie compleja del medio urbano. Una forma típica de cuantificar la ICUC es comparando la temperatura de los sitios más edificados con la del medio rural, y si los sitios edificados están cerca de la costa, esto puede llevar a distorsiones respecto a su magnitud real. En algunos casos la canopia urbana puede producir una dificultad en la penetración del aire más fresco asociado a la brisa costera (Oke, 2017). Análogamente, si bien la presencia de frentes fríos de escala sinóptica puede eliminar el efecto de la ICUC, en el caso de frentes fríos débiles puede darse un debilitamiento de la advección de aire frío cerca de la superficie de la ciudad.

La presencia de factores meteorológicos, tanto de escala sinóptica como local, pueden favorecer o desincentivar la ICUC de una forma notable. Además de la enorme variabilidad física entre ciudades y al interior de las ciudades, cada ciudad tiene un entorno particular y está sometida a fenómenos sinópticos determinados por la región donde pertenece, y a que los factores de escala local y sinóptica interactúan entre sí; esto dificulta extraer conclusiones generales sobre el comportamiento de la ICUC. De hecho, la climatología local en las ciudades es uno de los campos de las ciencias de la atmósfera donde más han proliferado los estudios de caso frente a los estudios generales (Oke, 1982).

1.3 - Sinergia entre isla de calor y olas de calor en verano

Las olas de calor están entre los fenómenos naturales más mortíferos. Un ejemplo clásico es el exceso de mortalidad calculado en 70 mil personas durante la ola de calor en Europa en agosto de 2003 (Robine et al, 2008). Dado que la

urbanización mundial va en continuo aumento y sabiendo que la isla de calor es un fenómeno observado en prácticamente todos los asentamientos urbanos (Oke, 1982) es esperable que la posibilidad de una sinergia entre olas de calor e ICUC haya suscitado interés entre los investigadores.

De acuerdo con Li et al. (2013), diversos efectos pueden influir en la intensidad de la ICUC durante episodios de olas de calor, ya sea amplificando o atenuando su magnitud. En ciudades costeras, la presencia de un cuerpo de agua relativamente fresco contiguo a la ciudad puede reforzar la brisa costera, inhibiendo la ICUC. Por otra parte, las olas de calor suelen estar asociadas a condiciones persistentes de alta presión en niveles altos, que en muchos casos están acompañadas de cielo despejado, estabilidad y viento débil. Además, las olas de calor suelen causar una elevada evapotranspiración, y dada la falta de disponibilidad de agua en la superficie del suelo urbano debida a la abundancia de superficies impermeables, esto podría favorecer la diferencia de temperatura entre el área urbana y el área rural.

Varios estudios de caso (Li et al, 2013; Kabistch et al, 2023) indican un fortalecimiento de la ICUC durante olas de calor. Sin embargo, un estudio realizado sobre un conjunto de ciudades en Estados Unidos, durante un período prolongado (2000-2015) y considerando varios eventos de ola de calor arroja resultados opuestos, con una ICUC de menor magnitud durante olas de calor (Scott et al, 2018). Los resultados que se desprenden de estudios sobre sinergia entre ICUC y olas de calor son, por consiguiente, ambiguos; esto aumenta el interés en realizar nuevos estudios de caso.

1.4 - La isla de calor urbana en el Área Metropolitana de Buenos Aires

El Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) constituye actualmente un área conurbana de más de 3000 km² y 11 millones de habitantes (INDEC, 2019; Lozada Montanari, 2019) localizada de forma paralela al Río de la Plata en su curso superior y medio. La isla de calor urbana asociada al AMBA, particularmente la de la canopia urbana, ha sido profundamente estudiada. Se ha utilizado frecuentemente como estimador de la magnitud de la ICUC en AMBA la diferencia de temperatura

entre estaciones rurales (principalmente Ezeiza Aero) y el Observatorio Central de Buenos Aires, estación urbana ubicada aproximadamente en el centro del AMBA (Rusticucci y Vargas, 1991; Camillioni y Barrucand, 2012). También se han realizado estudios basados en modelos geográficos, debido a la falta de datos provenientes de estaciones rurales antes de 1947 (Camillioni y Barros, 1994; Camillioni, 1995), aunque estos estudios proveen estimación solamente de la temperatura media anual y no permiten identificar casos diarios.

Entre 1947 y 1960 se observa un incremento lineal de la ICUC coincidiendo con un momento de gran crecimiento urbano y afluencia de población, alcanzando un máximo en la década de 1960 y disminuyendo a partir de entonces. Esto se observó a pesar de que tanto la población del AMBA como la extensión de superficie urbanizada continuaron incrementándose luego de 1960 (Camillioni y Barros, 1994). Camillioni y Barrucand (2012) identificaron una tendencia lineal negativa en la ICUC media anual de Buenos Aires entre 1959 y 2007 a pesar del crecimiento de la ciudad, que estaría asociada a la disminución en las condiciones de cielo claro y calma y a un aumento en la velocidad media del viento. En todas las estaciones del año la ICUC alcanza su máximo durante la noche, particularmente entre la medianoche y el amanecer (con valores entre $1,5$ y $2,5^{\circ}$ según la estación del año y el período de referencia) y su mínimo entre el mediodía y el atardecer (con valores entre $-0,3^{\circ}$ y $0,5^{\circ}$). La ICUC inversa es un fenómeno frecuente durante las tardes, particularmente en verano donde se observa en más del 50 % de los casos para el período 1976-2005 (Camillioni y Barrucand, 2012).

La ICUC nocturna, medida como diferencia de temperatura entre la estación rural de Ezeiza y la estación urbana Observatorio Central de la Ciudad de Buenos Aires, ha mostrado una tendencia a la disminución entre 1976 y 2017 particularmente acusada durante los meses de verano (Lozada Montanari, 2019). Si bien el promedio entre 1976 y 2017 ha mostrado una ICUC nocturna mayor en verano que en invierno, algo observado en otras ciudades de clima templado del mundo (Arnfield, 2003), la diferencia observada entre intensidad media de la ICUC nocturna en verano y en invierno era prácticamente nula la década de 2008-2017 (Lozada Montanari, 2019).

Se han realizado muy pocos estudios que vinculen la situación sinóptica o la masa de aire predominante y la ICUC, entre los que destacan el de Bejarán y Camillioni (2003) que analiza la intensidad media de la isla de calor dentro de la

canopia urbana según la masa de aire presente en el área rural en invierno. No se ha encontrado ningún estudio que relacione períodos cálidos u olas de calor con intensidad de la ICUC en el AMBA.

1.5 - Objetivos y estructura

El objetivo general de este trabajo es analizar estadísticamente la magnitud y el comportamiento de la ICUC respecto a variables de superficie y a la situación sinóptica, en noches calurosas de verano en el AMBA.

Los objetivos específicos son:

- Analizar el comportamiento de la ICUC en noches calurosas de verano en el Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA) respecto a las noches no calurosas. Esto incluye su magnitud media y la relación de la magnitud con la intensidad y dirección del viento, la nubosidad y la presencia de precipitación.
- Obtener una serie de patrones de circulación sinóptica y características de masa de aire típicos de noches calurosas de verano en el OCBA.
- Observar si existen diferencias en el comportamiento horario de la magnitud de la ICUC nocturna entre los distintos patrones sinóticos asociados a noches calurosas y si pueden establecerse causalidades evidentes entre este comportamiento y los patrones observados.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en el capítulo 2 se presenta un análisis de las estaciones utilizadas para obtener una estimación de la ICUC y una descripción de los datos obtenidos, tanto de superficie como provenientes de modelos numéricos (reanálisis). En el capítulo 3 se efectúa un análisis estadístico de la ICUC en función de la temperatura en el medio urbano y de su comportamiento en relación a diversas variables de superficie, tanto en noches calurosas en OCBA como no calurosas. En el capítulo 4 se analizan los patrones de circulación y masa de aire típicos de noches calurosas en OCBA y su influencia en la magnitud de la ICUC. El capítulo 5 presenta las conclusiones principales de la tesis y posibles trabajos a futuro.

Capítulo 2

Datos y metodología

2.1 - Datos de superficie

Para la realización del estudio estadístico de la ICUC en el AMBA se tomó como estimador de su magnitud la diferencia instantánea de temperatura entre una estación meteorológica de superficie representativa del área urbana y otra estación meteorológica de superficie representativa del área rural. Existen otras formas de medir la intensidad de la ICUC que dan una idea más precisa de su magnitud máxima y su distribución, como el estudio por transectas, pero que no están disponibles a lo largo de un período extenso de tiempo.

En este trabajo se utilizaron datos meteorológicos pertenecientes a las siguientes estaciones de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN): el Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA) y Ezeiza Aero (Ezeiza) como representativas de las condiciones meteorológicas del área urbana del AMBA y del área rural adyacente, respectivamente.

El período considerado fueron los meses de enero, febrero y diciembre del período 2011-2020, tomando como referencia el horario internacional estándar UTC al considerar la fecha y la hora. Si bien un período de diez años es demasiado breve como para establecer una climatología, la elección de un período más extenso podría haber introducido cambios en la intensidad de la ICUC, asociados a cambios en la urbanización de gran escala o en el entorno o instrumental de la estación de referencia.

Pueden verse la ubicación de las estaciones de OCBA y Ezeiza dentro del AMBA de Buenos Aires en la Figura 1. El entorno inmediato del OCBA se observa en la Figura 2 y el entorno de Ezeiza se puede ver en la Figura 3.

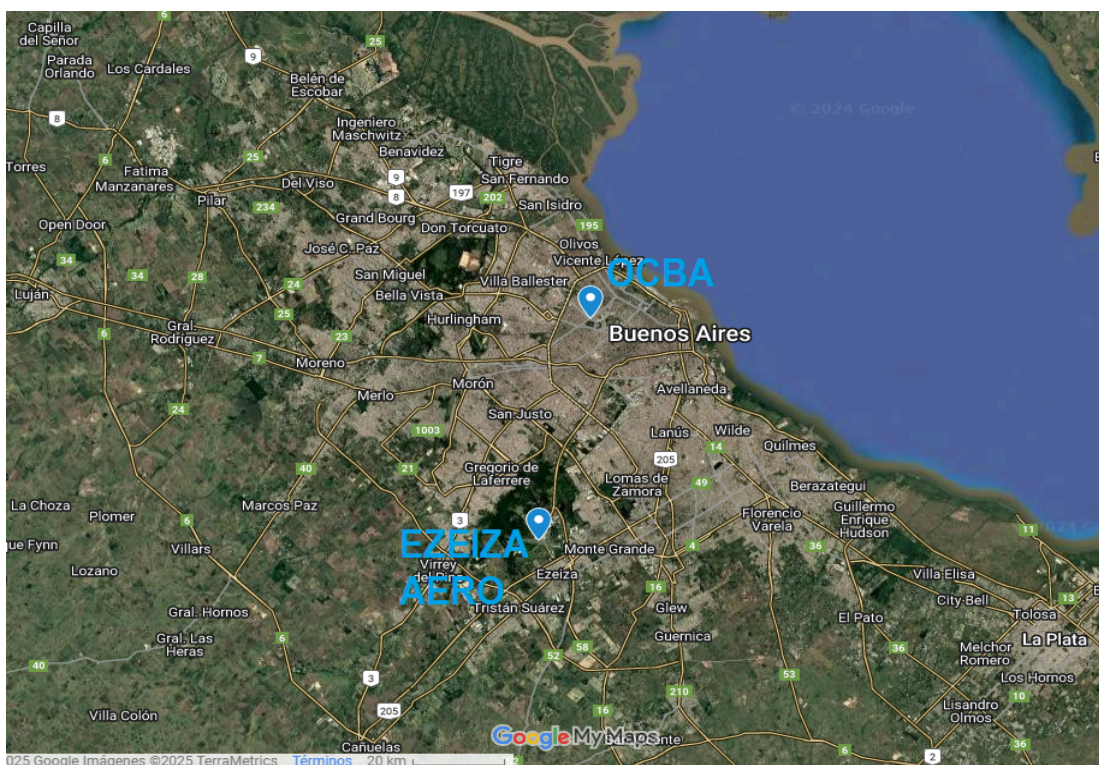


Figura 2.1 - Ubicación del Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA) y la Estación Meteorológica Ezeiza Aero (Ezeiza Aero). Dirección norte hacia el borde superior del cuadro. Imagen tomada de Google Maps.

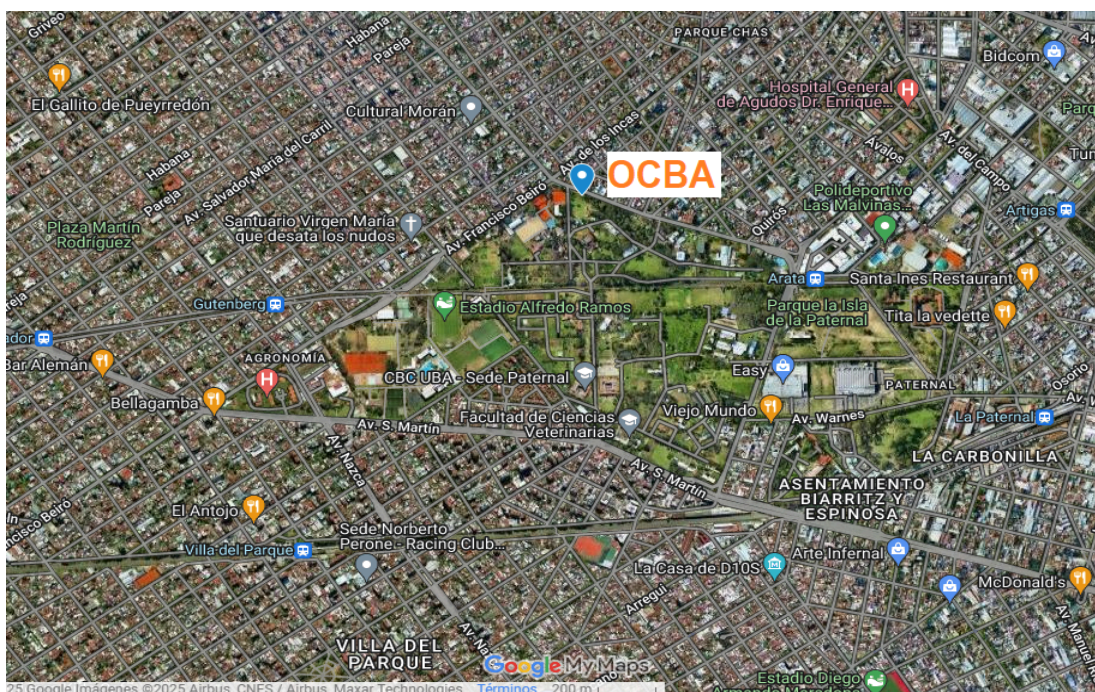


Figura 2.2 - Ubicación del Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA). Detalle de zona. Dirección norte hacia el borde superior del cuadro. Imagen tomada de Google Maps.

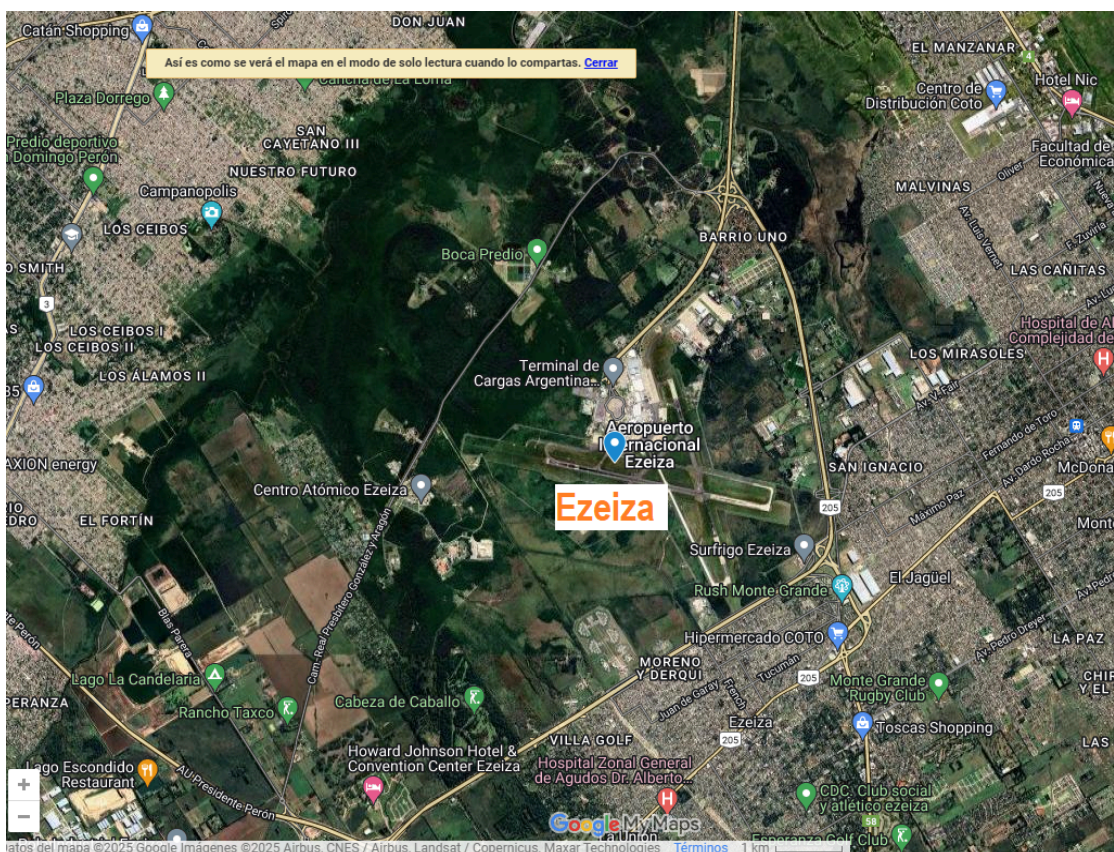


Figura 2.3 - Ubicación de la Estación Meteorológica Ezeiza Aero (Ezeiza). Detalle de zona. Dirección norte hacia el borde superior del cuadro. Imagen tomada de Google Maps.

La elección de las estaciones se basa fundamentalmente en su largo historial (OCBA se encuentra activa desde 1906 y Ezeiza Aero desde 1946), en la escasa cantidad de datos faltantes y en el hecho de que han sido las estaciones más utilizadas en los estudios sobre la ICUC en el AMBA (Bejarán y Camillioni, 2003; Figuerola y Mazzeo, 1998; Camillioni y Barrucand, 2012).

Los principales problemas a los que da lugar la elección de OCBA como localidad representativa del medio urbano son: 1 - su ubicación sobre el borde del Parque de Agronomía, que puede dar lugar a una relativa isla fría dentro de la ICUC (Oke 1982; Oke 2017) y 2 - el hecho de que no está ubicada en la zona de máxima urbanización del AMBA (Figuerola y Mazzeo, 1998). Ambos factores pueden llevar a una subestimación de la ICUC, particularmente en condiciones en la que esta es máxima. Asimismo, la elección de Ezeiza como localidad representativa del medio rural puede encontrar un problema en el hecho de que ha sufrido un acercamiento

del borde de la mancha urbana del AMBA en las últimas dos décadas, si bien la urbanización en esta zona ha sido de baja intensidad.

Estos factores pueden causar una subestimación de la ICUC al tomar la diferencia de temperatura entre OCBA y Ezeiza Aero como estimador de la misma, particularmente cuando el viento sopla desde la ciudad. Además, la diferencia de temperatura entre ambas estaciones puede verse influida por factores ajenos a la ICUC como pasaje de frentes fríos o frentes de ráfagas asociadas a convección, la influencia del Río de la Plata o la ocurrencia de lluvia en alguna de las estaciones en el momento de la observación. Este problema de todos modos es difícil de soslayar, a menos que se trabaje con una red muy amplia de estaciones urbanas y rurales.

Se analizaron datos pertenecientes a las siguientes variables horarias:

- Temperatura de bulbo seco entre las 0 y las 9 UTC (OCBA y Ezeiza)
- Viento medio a las 6 UTC (Ezeiza)
- Dirección del viento a las 6 UTC (Ezeiza)
- Nubosidad total a las 6 UTC (Ezeiza)
- Ocurrencia de precipitación entre las 0 y las 6 UTC (OCBA y Ezeiza)

No existen datos faltantes de ninguna de las variables estudiadas dentro del período considerado. Los datos de viento y nubosidad media de OCBA no fueron tomados en cuenta para el estudio. Se consideró que el viento podía ser excesivamente influenciado por la rugosidad del entorno inmediato en su dirección e intensidad, y la medición de la nubosidad también puede verse alterada por la limitación del horizonte que impone el entorno urbano.

2.2 - Tratamiento de las variables de superficie y obtención de variables derivadas

La magnitud de la ICUC en el AMBA se estimó en base a la diferencia instantánea de la temperatura de bulbo seco en OCBA y en Ezeiza. Las tres variables (temperatura en OCBA, temperatura en Ezeiza e ICUC) están medidas en grados Celsius. Puede escribirse:

$$ICUC = T_{OCBA} - T_{Ezeiza} \quad (1)$$

La ICUC será positiva/negativa si la temperatura en la estación urbana (OCBA) es mayor/menor que en la estación rural (Ezeiza).

La nubosidad total se midió en octavos de cielo nublado, variando entre 0 y 8. No se distinguió entre tipos de nubosidad o entre nubosidad alta, media o baja. Los casos de cielo invisible, que se codifican como 9, fueron tomados como 8 en el estudio.

El viento medio consiste en la velocidad escalar media del viento en los diez minutos anteriores a la observación horaria. Originalmente medido en nudos, fue convertido a metros sobre segundo (m/s) en este estudio.

La dirección prevalente del viento medio fue observada originalmente en 16 direcciones, pero para este estudio fue convertida a ocho direcciones: norte (N), noreste (NE), este (E), sudeste (SE), sur (S), sudoeste (SO), oeste (O) y noroeste (NO). Los casos de calma y viento de direcciones variables fueron agrupados en una única categoría aparte (C-DV). Los casos de viento no ubicados en los octantes definidos se repartieron entre los octantes vecinos, atribuyendo medio caso a cada uno: por ejemplo, un caso de viento NNE fue tomado como 0,5 casos de viento N y 0,5 casos de viento NE.

La ocurrencia de precipitación entre las 0 y las 6 UTC se tomó como una variable binaria, considerándose como caso positivo si hubo alguna precipitación observada en el período y como caso negativo si no la hubo, independientemente de la cantidad de precipitación y de si esta precipitación fue medible o no por pluviómetro. No se hizo distinción si hubo precipitación en el momento exacto de la observación a las 6 UTC o no.

2.3 - Clasificación de casos según temperatura en el área urbana e intensidad de la isla de calor

A fines estadísticos, las noches del período considerado fueron clasificadas en:

- Calurosas: temperatura en OCBA a las 6 UTC en el tercil superior, tomando en cuenta el período considerado.

- No calurosas: temperatura en OCBA a las 6 UTC en los terciles medio e inferior, tomando en cuenta el período considerado.

Según la intensidad de la ICUC, fueron clasificadas de la siguiente forma:

- ICUC inversa: ICUC a las 6 UTC menor a 0°.
- ICUC débil: ICUC a las 6 UTC entre 0 y 1,9°.
- ICUC fuerte: ICUC a las 6 UTC entre 2 y 3,9°.
- ICUC extrema: ICUC a las 6 UTC mayor o igual a 4°.

La utilización de la hora 6 UTC para la clasificación de casos se debe a que suele ser una de las horas de mayor intensidad de la ICUC en OCBA (ver Camillioni y Barrucand, 2012).

2.4 - Datos de reanálisis

Para el estudio de patrones sinópticos asociados a noches calurosas (sección 2.3) se utilizaron datos de reanálisis provenientes de ERA-Interim, con resolución 0,25° x 0,25°. Se obtuvieron las siguientes variables para la hora 0 UTC del período considerado:

- Viento zonal y meridional en 850 hPa (área: 25 a 45°S, 45 a 65°O)
- Temperatura en 850 hPa (área: 25 a 45°S, 45 a 65°O)
- Humedad absoluta (q) en 850 hPa (área: 25 a 45°S, 45 a 65°O)
- Presión a nivel del mar (área: 25 a 45°S, 45 a 65°O)
- Altura geopotencial en 500 hPa (área: 20 a 60°S, 90 a 30°O)

El dominio espacial utilizado para el análisis de las variables en los niveles de 850 hPa y superficie se muestra en la Figura 2.4, mientras que el dominio considerado para el nivel de 500 hPa se muestra en la Figura 2.5.

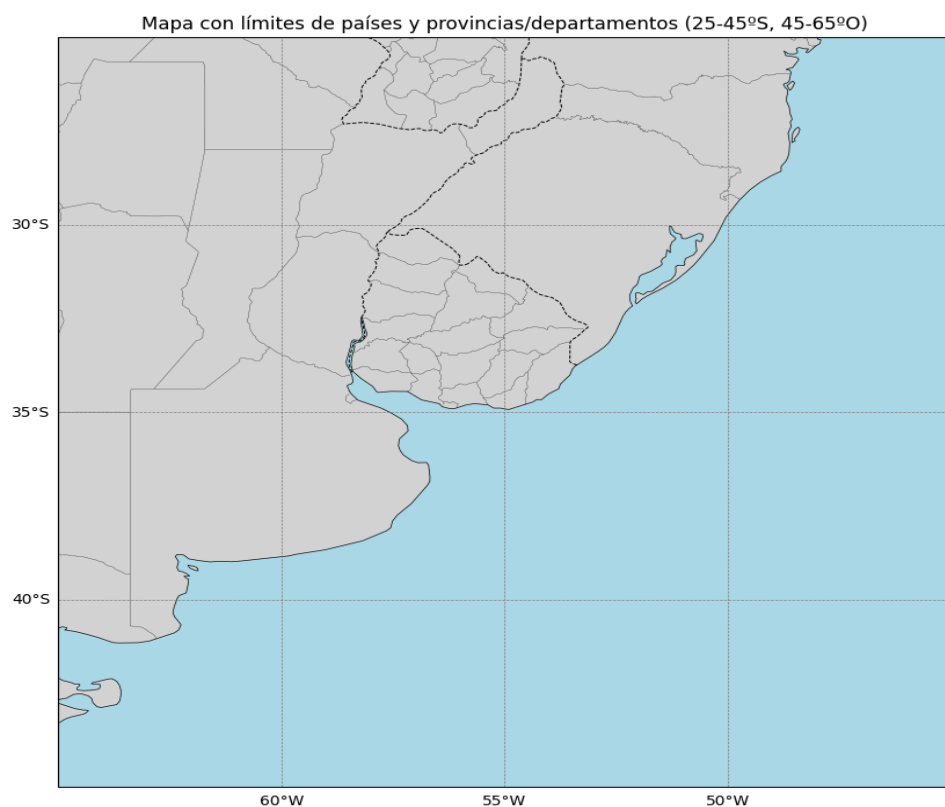


Figura 2.4 - Dominio espacial utilizado para las variables asociadas a los niveles de 850 hPa y superficie.

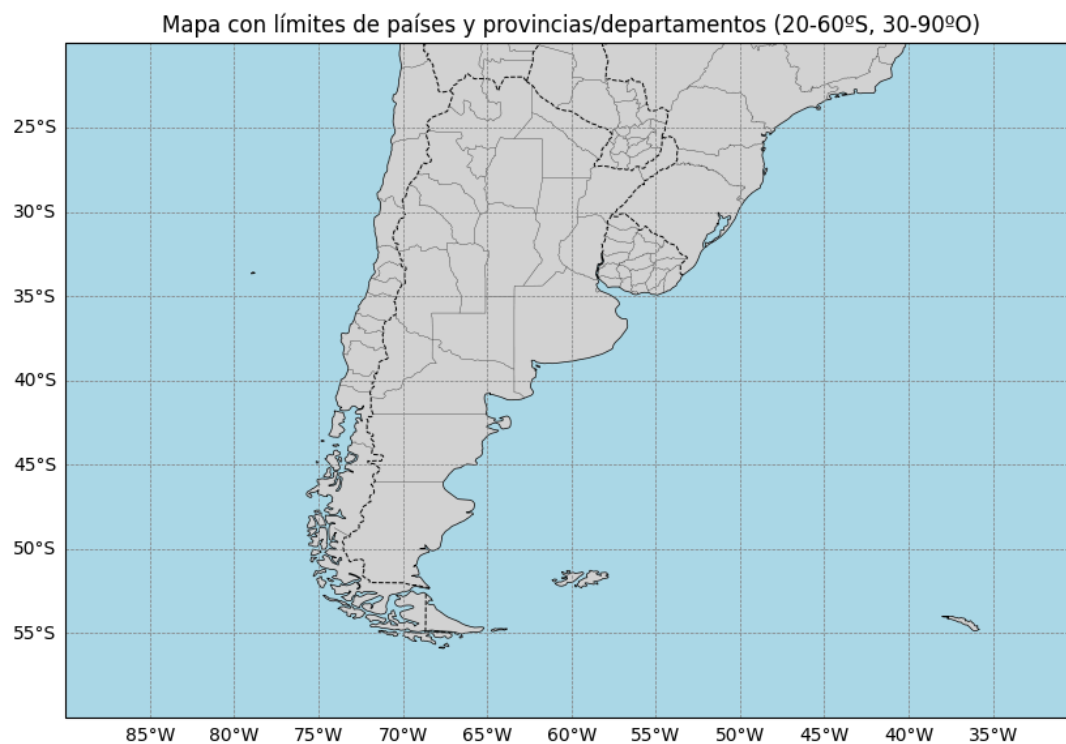


Figura 2.5 - Dominio espacial utilizado para las variables asociadas al nivel de 500 hPa

A partir de la temperatura y la humedad absoluta en 850 hPa se calculó la variable derivada tita-e, utilizando la fórmula simplificada de Stull (1988):

$$\theta_e = T_e \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\kappa_d} \simeq \left(T + \frac{L_v}{c_{pd}} r \right) \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{c_{pd}}} \quad (2)$$

Donde:

- T es la temperatura en grados Kelvin
- L_v es el calor latente de evaporación. Varía entre 2.406.000 J/kg a una temperatura de 40°C y 2.501.000 J/kg a una temperatura de 0°C. Para calcularlo con menor dificultad, fue tomado como constante 2.450.000 KJ/kg para todos los cálculos.
- c_{pd} es el calor específico del aire seco a presión constante (1005,7 J/(kg.K))
- r es la relación de mezcla de masa de vapor de agua respecto a la masa total. En este estudio se tomó $r = q/(1-q)$ siendo q la humedad absoluta.
- p_0 es la presión de referencia utilizada para la reducción (1000 hPa) y p es la presión del nivel analizado (en este caso 850 hPa).
- R_d es la constante de gas específica para el aire (287,04 J/(kg.K))

La variable theta-e fue utilizada como representativa de las características de la masa de aire en capas bajas, ya que es una cantidad conservativa ante movimientos de ascenso o descenso. El nivel de 850 hPa como representativo de la situación sinóptica en lo que refiere a viento y temperatura potencial se usa para minimizar la influencia de fenómenos de superficie de escala inferior a la sinóptica, y se utiliza también para identificar zonas frontales.

2.5 - Utilización de la técnica k-means a partir de datos de reanálisis para obtener campos típicos

Para el análisis de los patrones de circulación típicos se utilizó la técnica k-means (para más información ver Tan et al, 2006) sobre los campos de 850 hPa de viento zonal, viento meridional y tita-e dentro del dominio mencionado en 2.4 para obtener patrones sinópticos característicos de las noches calurosas en OCBA y analizar la posible influencia de cada uno de ellos sobre la ICUC. Las tres variables fueron procesadas de forma conjunta.

Previamente los datos fueron normalizados respecto al promedio y desvío standard de los meses estivales 2011-2020 para cada variable y punto de grilla. Como paso siguiente, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) para aislar las componentes principales responsables de al menos un 80 % de la varianza temporal total, de forma de disminuir la cantidad de dimensiones y mejorar la calidad del algoritmo K-means. Por último, se aplicó el método K-means sobre las componentes principales obtenidas. El número de clusters se determinó mediante el estadístico de Davies-Bouldin, el cual relaciona el cociente entre la dispersión al interior de los clusters y la separación entre clusters (Davies y Bouldin, 1979).

Capítulo 3

Análisis estadístico de la isla de calor

En este capítulo analizaremos el comportamiento de la ICUC a las 6 UTC (medida según se especifica en el apartado 2.2) en función de las variables de superficie mencionadas en el Capítulo 2: la temperatura urbana (OCBA), la intensidad y dirección del viento, la nubosidad y la ocurrencia de precipitación.

3.1 - Isla de calor en función de la temperatura en el área urbana

Al comparar la temperatura en OCBA y la intensidad de la ICUC a las 6 UTC en el conjunto de casos considerados, la observación más notable es que la ICUC tiende a volverse menor en las noches más cálidas, y mayor en las noches más frías. Puede obtenerse una regresión lineal con un coeficiente R de Pearson de -0,24, significativamente distinto de cero con un grado de confianza del 95 % utilizando un test t-Student de dos colas. En la Figura 3.1 puede verse la relación entre ambas y la línea de tendencia.

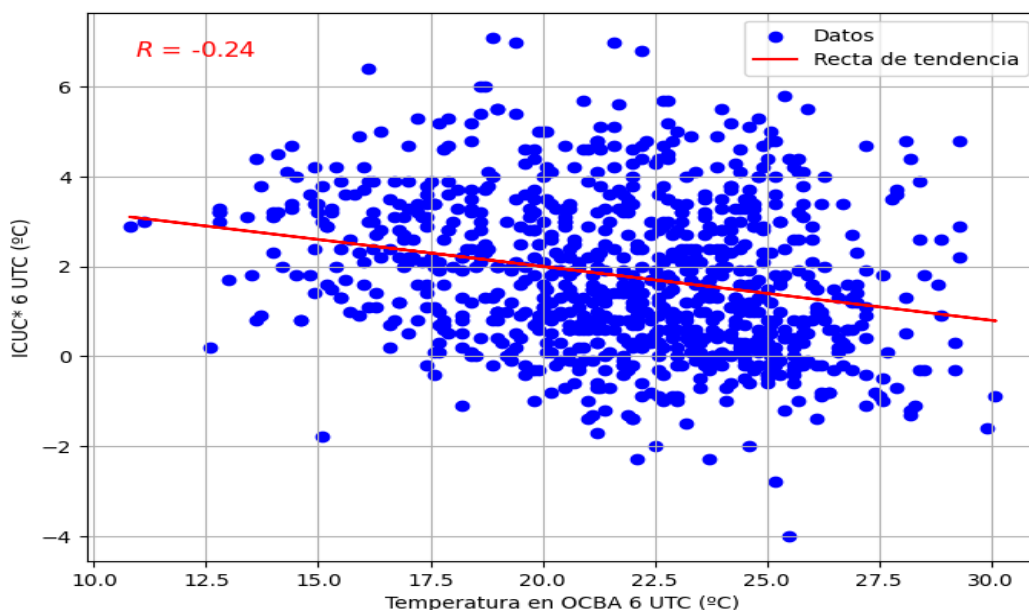


Figura 3.1 - ICUC en función de la temperatura en OCBA a las 6 UTC. Meses de enero, febrero y diciembre, 2011-2020.

Aunque la intensidad de la ICUC tiende a decrecer de manera clara con la temperatura en OCBA, la misma tiende a mantenerse positiva en promedio y a presentar desvíos standard elevados aun para intervalos de temperatura ubicados en el extremo superior de la distribución. Esto sugeriría que aun dentro de las noches más cálidas de verano pueden encontrarse una proporción importante de casos muy por encima de los valores promedio de ICUC para los intervalos de temperatura superiores. Esto puede observarse de manera gráfica en la Figura 3.1 y los parámetros medios por intervalo de temperatura en la Tabla 3.1

Temperatura OCBA (°C)	Cantidad de casos	ICUC*	
		Media	Desvío
Hasta 16	59	2,64	1,27
16 a 17,9	86	2,47	1,43
18 a 19,9	110	2,24	1,76
20 a 21,9	183	1,71	1,64
22 a 23,9	198	1,55	1,68
24 a 25,9	181	1,62	1,80
26 o más	86	1,04	1,59

Tabla 3.1 - ICUC media y desvío standard en función de la temperatura en OCBA, por intervalos

Es de interés efectuar una división entre noches calurosas y no calurosas en el OCBA a efectos de realizar comparaciones estadísticas de manera sencilla. Tomamos como límite el segundo tercil de temperatura en OCBA, que es de 23,6°. Las noches en donde la temperatura en OCBA es igual o superior a 23,6° a las 6 UTC se consideran como noches calurosas, y aquellas noches en donde la temperatura sea inferior a 23,6° se clasifican como noches no calurosas.

En la tabla 3.2 puede observarse que la ICUC media para las noches calurosas es de 1,42 mientras que para noches no calurosas es de 1,87. Al aplicar un test de t-Student de una cola, puede afirmarse que la ICUC media de las noches no calurosas es significativamente más alta que la ICUC media de las noches calurosas en OCBA.

Casos	Número	T media OCBA	T media Ezeiza	ICU media	ICU desvío standard
Noches calurosas	305	25,40	23,98	1,42	1,72
Noches no calurosas	598	19,90	17,92	1,87	1,75

Tabla 3.2 - Temperatura media en OCBA, Ezeiza, ICUC media y desvío standard en noches calurosas y no calurosas

Un 34 % de las noches calurosas poseen de hecho islas de calor fuertes o extremas mientras que menos del 22 % poseen islas inversas. Si bien la proporción de islas inversas es mayor que en noches no calurosas y la proporción de islas fuertes o extremas es menor (en noches no calurosas las islas fuertes o extremas constituyen un 48 % del total) puede observarse que la ICUC es un fenómeno presente y en muchos casos importante dentro de las noches calurosas, aunque su intensidad media sea menor que en noches no calurosas. Los resultados detallados pueden verse en la Tabla 3.3

Intensidad ICUC*	Noches no calurosas (%)	Noches calurosas (%)
Menor a 0º (inversa)	9,9	21,6
0 a 1,9º (débil)	41,8	44,3
2 a 3,9º (fuerte)	35,8	23,9
4º o más (extrema)	12,5	10,2

Tabla 3.3 - Porcentaje del total de noches no calurosas y noches calurosas por intervalo de ICUC

3.2 - Efecto de la intensidad del viento sobre la isla de calor en noches calurosas

La intensidad del viento se asocia generalmente a una disminución de la ICUC, ya que las advecciones y el transporte turbulento generados por el viento tienden a mezclar el aire cerca de la superficie de la ciudad con el de los alrededores, tanto horizontal como verticalmente (Oke, 2017). Diversos estudios han dado cuenta de este fenómeno en ciudades del mundo (Morris et al, 2001; Hoffman et al, 2012; Cuadrat et al, 2021). En el AMBA el análisis de Lozada Montanari (2019)

para el período 1991-2017 muestra una relación inversa significativa entre ICUC nocturna y viento en la estación urbana para el invierno, pero no para el verano.

Utilizando los datos del presente estudio, puede observarse en la Figura 3.2 y 3.3 que existe una correlación lineal significativa (tomando test t-student de dos colas) y negativa entre la intensidad del viento en Ezeiza y la intensidad de la ICUC en el AMBA en verano, tanto en noches no calurosas como en noches calurosas, y que la ICUC tiende a anularse para velocidades del viento entre 5 y 6 m/s en noches calurosas; y en torno a 7 m/s en noches no calurosas.

Este resultado de velocidad del viento límite para la desaparición de la ICUC (Oke, 1976) en noches calurosas de verano es menor al encontrado para la ICUC nocturna media (1978-2005) por Camillioni y Barrucand (2012), que está en torno a los 10 m/s. El resultado difiere del encontrado por Lozada Montanari (2019) aunque esto puede deberse a diferencias entre la estación de referencia (se tomó la estación rural de Ezeiza para el viento en este estudio, y no la estación urbana de OCBA) o al período de medición utilizado (2011-2020 en este trabajo).

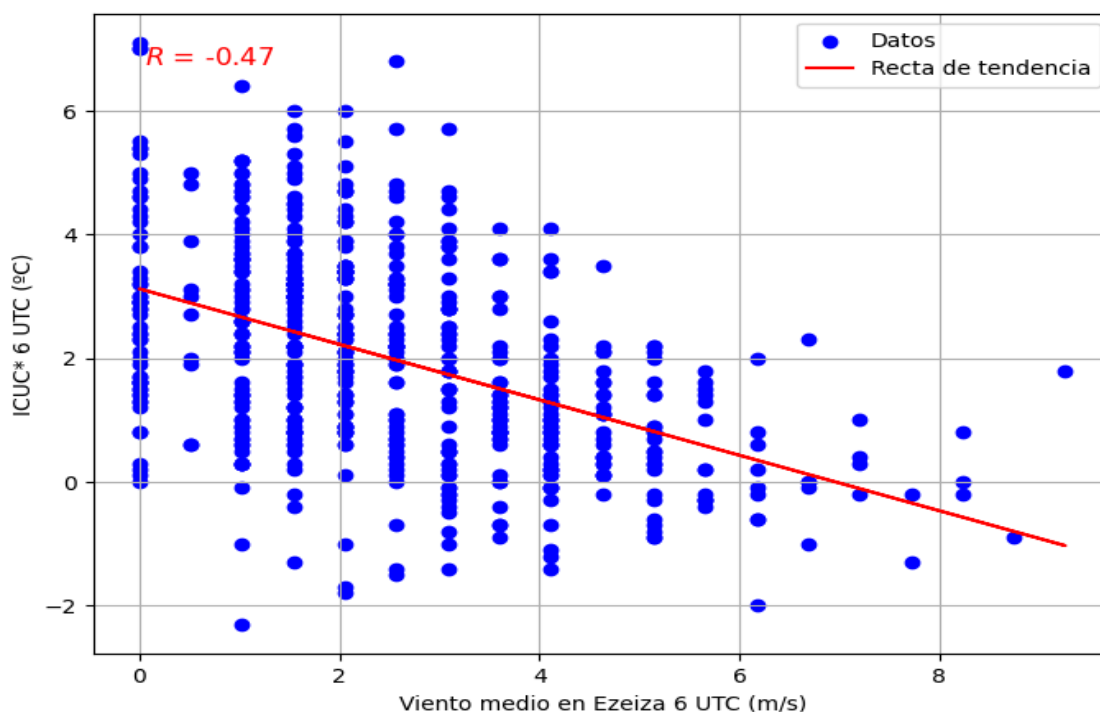


Figura 3.2 - ICUC en función del viento medio en Ezeiza (noches no calurosas)

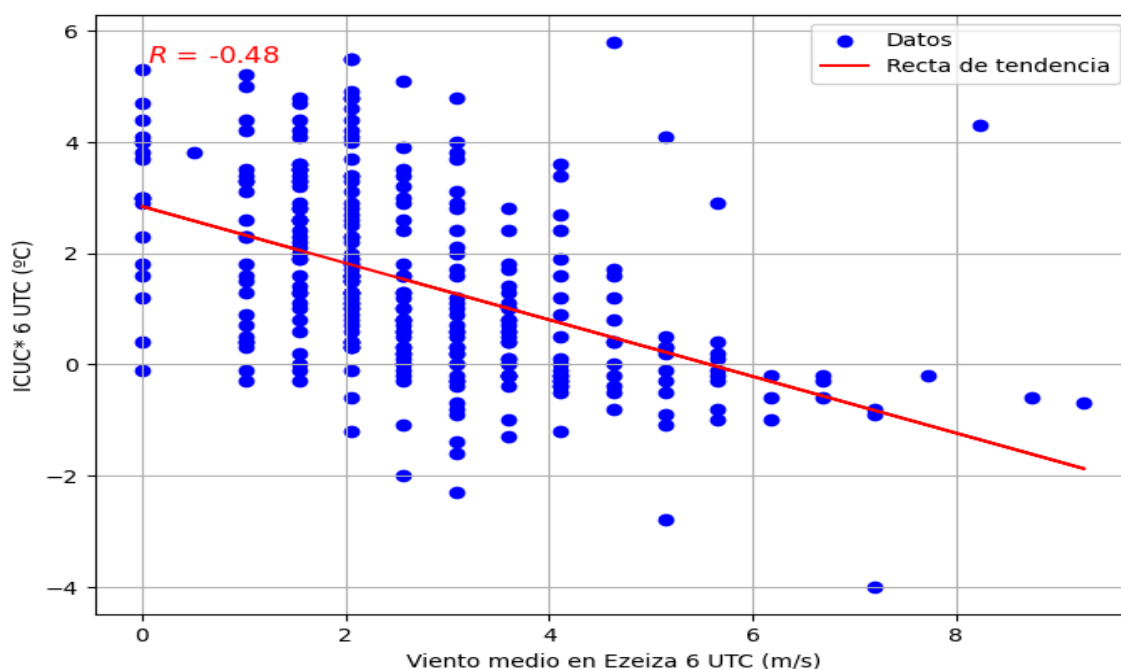


Figura 3.3 - ICUC en función del viento medio en Ezeiza (noches calurosas)

Los resultados de la tabla 3.4 se condicen con lo observado en el gráfico. Para los casos de viento menor a 2 m/s en Ezeiza la ICUC es casi el doble ($2,46^{\circ}$) que para los casos de viento entre 2 y 3,9 m/s ($1,34^{\circ}$). Por encima de 4 m/s la ICUC media es inferior a 1° , inclusive inversa en noches calurosas para viento medio de más de 6 m/s. Otro aspecto a observar es la disminución del desvío standard de la ICUC en noches no calurosas cuando la intensidad del viento aumenta, que se ve en otros estudios sobre islas de calor en otras partes del mundo (Cuadrat, 2021) pero que sin embargo no se ve en noches calurosas.

Es interesante la comparación con el comportamiento de la ICUC en función del viento en noches no calurosas (tabla 3.4b). En noches no calurosas, para los mismos intervalos de velocidad de viento la ICUC es mayor que en las noches calurosas, particularmente para velocidades de viento mayor a 2 m/s. La diferencia entre ICUC media sólo es significativa (a un nivel de confianza del 95 %) entre noches calurosas y no calurosas para el intervalo de viento entre 2 y 3,9 m/s, pero este intervalo es el que posee el máximo de casos en noches calurosas. La tabla 3.4 sugiere una distribución diferente de los casos de intensidad del viento entre noches calurosas y no calurosas. Las noches calurosas muestran un fuerte predominio de viento entre 2 a 3,9 m/s mientras que las noches no calurosas tienen, en relación,

más noches de viento menor a 2 m/s que las noches calurosas (un 39 % de los casos en noches no calurosas contra un 27 % en noches calurosas). Si bien el viento medio es algo mayor en noches calurosas que en noches no calurosas, no puede afirmarse que las medias en noches calurosas y en noches no calurosas sean significativamente distintas entre sí, según un test t-student de dos colas con un nivel de significancia del 95 % (ver tabla 3.5).

Viento	Casos	ICU media	ICU desvío
0 a 1,9 m/s	82	2,46	1,48
2 a 3,9 m/s	158	1,34	1,58
4 a 5,9 m/s	52	0,49	1,50
6 m/s o más	13	-0,45	1,67

Tabla 3.4a - ICUC media (°C) y desvío standard en función de intervalos de intensidad de viento en Ezeiza, noches calurosas

Viento	Casos	ICU media	ICU desvío
0 a 1,9 m/s	234	2,68	1,61
2 a 3,9 m/s	231	1,99	1,58
4 a 5,9 m/s	108	0,86	1,06
6 m/s o más	25	0,11	0,97

Tabla 3.4b - ICUC media (°C) y desvío standard en función de intervalos de intensidad de viento en Ezeiza, noches no calurosas

Tipo de noche	Casos	Viento (m/s)	
		Medio	Desvío
No calurosas	598	2,55	1,77
Calurosas	305	2,78	1,63

Tabla 3.5 - Viento medio y desvío standard en noches no calurosas y en noches calurosas

3.3 - Efecto de la dirección del viento sobre la isla de calor en noches calurosas

Evaluando la proporción de casos por dirección de viento (ver apartado 2.2 de Metodología) se encuentran diferencias notables en la dirección de viento a las 6

UTC entre noches calurosas y no calurosas. Las direcciones de viento N y NE son mucho más frecuentes proporcionalmente (entre el doble y el triple) en noches calurosas que en noches no calurosas, la dirección E es algo más frecuente en noches calurosas. La dirección S tiene casi el triple de prevalencia relativa en noches no calurosas que en noches calurosas, mientras que las direcciones SE y SO tienen entre 1,5 y 2 veces más prevalencia en noches no calurosas que en noches calurosas. Las calmas son casi el doble de frecuentes en noches no calurosas que en noches calurosas. Las direcciones oeste y sudoeste tienen escasa representación en ambos grupos. Estas diferencias son esperables, dado que se esperaría una mayor frecuencia de componente sur vinculada a advección fría en noches no calurosas. Los resultados detallados se encuentran en la tabla 3.6.

Dirección	% de casos sobre noches NC	% de casos sobre noches C
N	5,9	15,9
NE	13,8	27,5
E	10,9	16,9
SE	20,2	13,0
S	18,1	6,9
SO	8,0	4,9
O	5,6	4,4
NO	6,8	4,3
VAR-C	10,7	6,2

Tabla 3.6 - Dirección de viento en noches no calurosas y en noches calurosas (porcentaje sobre el total). Total noches no calurosas: 598. Total noches calurosas: 305.

Una forma sencilla de evaluar la influencia de la dirección del viento sobre la ICUC es tomar un umbral fijo de intensidad de la ICUC fijo que separe dos grupos representativos. Por lo tanto, separamos las noches calurosas en noches con ICUC fuertes y extremas (mayores o iguales a 2°) de las noches con ICUC débiles e inversas (menores a 2°). El porcentaje de dirección de viento dentro de las noches calurosas así divididas puede verse en la tabla 3.7.

Los casos de ICUC débil o inversa tienen una prevalencia muchísimo mayor de viento del N y NE que los casos de ICUC fuerte o extrema, mientras que las direcciones SE, S, SO y O tienen frecuencia muchas veces mayor en las noches de

ICUC fuerte o extrema que en las noches de ICUC débil o inversa. Las calmas y vientos de direcciones variables también son mucho más frecuentes en las noches de ICUC fuerte o extrema. El patrón de distribución por dirección de viento de las noches calurosas de ICUC fuerte o extrema es, de hecho, similar al patrón de noches no calurosas, aunque con menor proporción de viento del NE y mayor proporción de viento del SE.

Dirección	% de casos sobre noches C (ICUC débil o inversa)	% de casos sobre noches C (ICUC fuerte o extrema)
N	21,9	4,3
NE	40,0	3,4
E	19,2	12,5
SE	5,2	27,9
S	1,0	18,3
SO	1,7	11,1
O	2,2	8,7
NO	5,7	1,4
VAR-C	3,0	12,5

Tabla 3.7 - Dirección de viento en noches calurosas para casos de ICUC menor a 2° (inversa o débil) y para ICUC mayor o igual a 2° (fuerte o extrema). Porcentaje sobre el total. Total noches calurosas con ICUC débil o inversa: 201. Total noches calurosas con ICUC fuerte o extrema: 104.

Existe la posibilidad de que la intensidad del viento tenga un sesgo por dirección (por ejemplo, que haya más casos de isla débil o inversa con viento N o NE que con viento de componente sur debido a que el viento medio cuando se presentan estas direcciones sea mayor). Para disminuir lo más posible este sesgo, se efectuó un nuevo análisis similar al que se observa en la Tabla 3.7, en donde se dejaron de lado los casos de viento mayor o igual a 3 m/s dentro de las noches calurosas. Los resultados son similares al del estudio realizado sin limitaciones en la intensidad del viento (ver Tabla 3.8). El predominio de dirección N y NE en noches de ICUC menor a 2° es algo menos marcado que en el estudio presentado en la Tabla 3.7 pero sigue siendo muy evidente, y además se le agrega la dirección E. También

sigue siendo muy pronunciado el predominio de viento SE, S, SO y O en noches de ICUC intensa. Esto sugeriría que efectivamente existe una preferencia direccional que favorece ICUC de mayor o menor intensidad dentro de las noches calurosas.

Dirección	% de casos sobre noches C (ICUC débil o inversa y V < 3 m/s)	% de casos sobre noches C (ICUC fuerte o extrema y V < 3 m/s)
N	21,7	5,4
NE	27,7	3,0
E	21,7	11,9
SE	8,7	23,2
S	0,5	19,0
SO	3,8	11,9
O	2,7	8,9
NO	6,5	1,2
VAR-C	6,5	15,5

Tabla 3.8 - Dirección de viento en noches calurosas con viento menor a 3 m/s para casos de ICUC menor a 2° (inversa o débil) y para ICUC mayor o igual a 2° (fuerte o extrema). Porcentaje sobre el total. Total noches calurosas con viento menor a 3 m/s con ICUC débil o inversa: 92. Ídem para ICUC fuerte o extrema: 84.

Realizando un estudio análogo tomando los casos por dirección para las noches no calurosas con viento inferior a 3 m/s, se observan diferencias entre noches con ICUC débil o inversa e islas de calor fuertes o extremas, aunque no tan marcadas como en las noches calurosas. En general los casos de ICUC mayores o iguales a 2° se asocian fuertemente a vientos del SE, S, SO y calmas, mientras que los casos de islas de calor menor a 2° tienen direcciones de viento más heterogéneas.

Dirección	% de casos sobre noches NC (ICUC débil o inversa y $V < 3$ m/s)	% de casos sobre noches NC (ICUC fuerte o extrema y $V < 3$ m/s)
N	11,9	3,2
NE	15,6	1,1
E	9,6	8,9
SE	9,3	28,4
S	12,2	17,4
SO	5,2	10,8
O	8,1	6,6
NO	13,3	5,1
VAR-C	14,8	18,6

*Total noches no calurosas con viento menor a 3 m/s con ICUC débil o inversa: 135.
Ídem para ICUC fuerte o extrema: 236.*

3.4 - Efecto de la nubosidad sobre la isla de calor en noches calurosas

La mayoría de los estudios sobre ICUC en el mundo muestran una relación inversa entre nubosidad e ICUC nocturna (Morris et al, 2001; Hoffman, 2012). Lozada Montanari (2019) encuentra en AMBA una relación lineal inversa significativa entre la ICUC nocturna y la nubosidad tanto en verano como en invierno.

En las figura 3.4 puede observarse que existe una relación lineal inversa significativa entre nubosidad e ICUC en noches no calurosas. En noches calurosas, en cambio, no puede rechazarse la hipótesis nula de que R de Pearson sea distinto de cero, con lo cual no puede afirmarse que exista una relación lineal entre nubosidad e ICUC (figura 3.5) según un test de t-student de dos colas con un nivel de confianza del 95 %. Aplicando un test de ANOVA, tampoco puede afirmarse que exista diferencia entre promedios de ICUC según nubosidad con un intervalo de confianza del 95 % (ver Tabla 3.9a). No parece existir tampoco una relación inversa entre nubosidad y viento medio que explique esta falta de asociación entre viento e intensidad de ICUC.

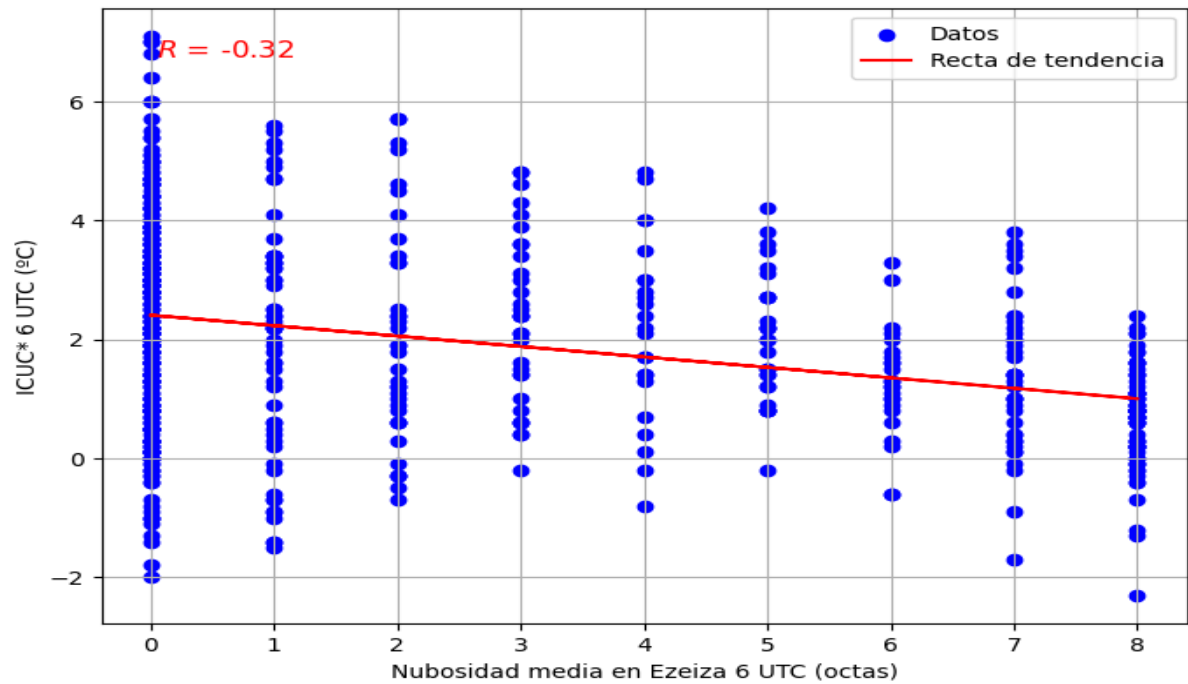


Figura 3.4 - ICUC en función de la nubosidad en Ezeiza (noches no calurosas)

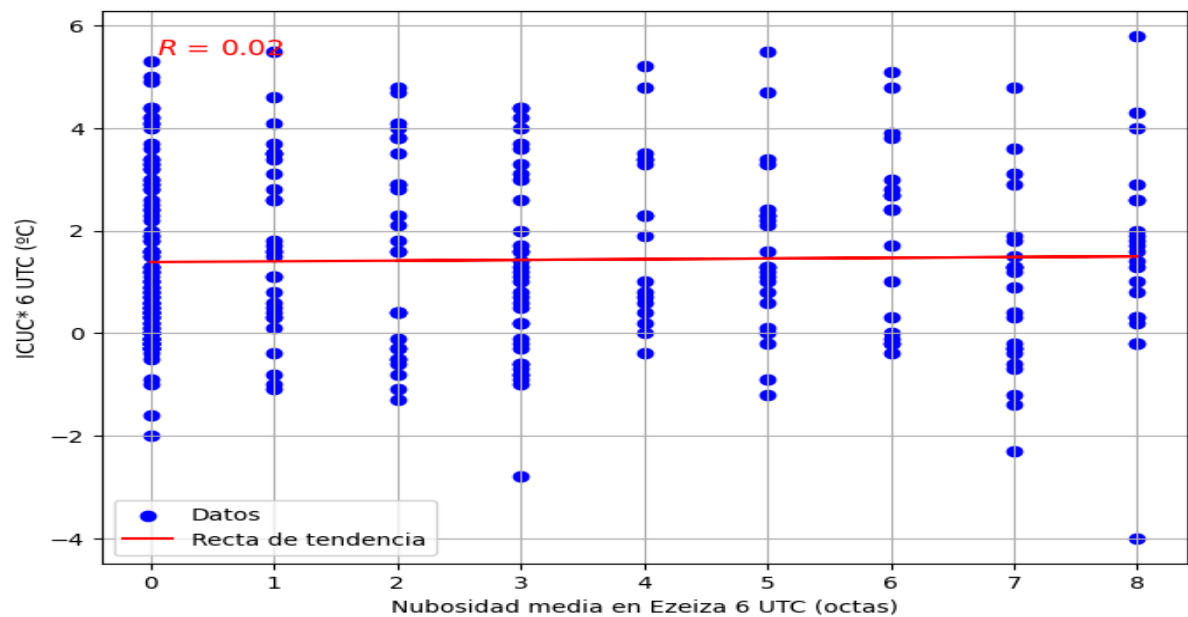


Figura 3.5 - ICUC en función de la nubosidad en Ezeiza (noches calurosas)

Nubosidad	Casos	ICUC* media	ICUC* desvío	V medio (m/s)
0 octas	111	1,26	1,55	2,7
1 o 2 octas	57	1,67	1,82	2,6
3 o 4 octas	53	1,45	1,80	2,8
5 o 6 octas	40	1,77	1,69	2,8
7 u 8 octas	44	1,16	1,84	3,4

Tabla 3.9a - ICUC media (°C) y desvío standard en función de intervalos de nubosidad en Ezeiza, noches calurosas. Viento medio por intervalo (m/s).

Como observación comparativa, en noches no calurosas sí existen medias de ICUC significativamente distintas según intervalo de nubosidad tomando ANOVA con un intervalo de confianza del 95 %. Aunque los intervalos entre 0 y 4 octas no muestran diferencias significativas entre sí según análisis post hoc de Tukey, sí las noches con entre 5-6 octas tienen una ICUC media menor que las noches con 0 octas, 1-2 octas y 3-4 octas; y las noches de 7-8 octas tienen una ICUC media menor a todos los demás grupos. Es posible que este resultado esté al menos en parte explicado por una mayor velocidad de viento medio en los dos intervalos de mayor nubosidad, como puede verse en la tabla 3.9b

Nubosidad	Casos	ICUC* media	ICUC* desvío	V medio (m/s)
0 octas	285	2,38	1,73	2,1
1 o 2 octas	94	2,03	1,90	2,6
3 o 4 octas	55	2,26	1,44	2,4
5 o 6 octas	52	1,67	1,06	2,9
7 u 8 octas	112	0,93	1,04	3,5

Tabla 3.9b - ICUC media (°C) y desvío standard en función de intervalos de nubosidad en Ezeiza, noches no calurosas. Viento medio por intervalo (m/s).

La nubosidad media es ligeramente más alta en noches calurosas que en no calurosas, aunque no puede decirse que la media sea significativamente distinta aplicando un test t-student de dos colas con 95 % de confianza (ver tabla 3.10). Nuevamente comparando datos de las tablas 3.9a y 3.9b, puede verse que los casos de cielo despejado (0 octas) tienen una ICUC media mucho menor en noches no calurosas (1,26°) que en noches no calurosas (2,38°), siendo esta diferencia estadísticamente significativa con un intervalo de confianza del 95 %. Esto no ocurre

en noches de nubosidad abundante (7-8 octas) donde no se encuentra una diferencia significativa entre ambas medias.

Tipo de noche	Casos	Nubosidad (octas)	
		Media	Desvío
No calurosas	598	2,44	3,02
Calurosas	305	2,65	2,73

Tabla 3.10 - Nubosidad y desvío standard en noches no calurosas y en noches calurosas

3.5 - Efectos de la precipitación sobre la isla de calor en noches calurosas

No se observan diferencias significativas en la ICUC media entre noches con presencia de lluvia en ambas estaciones y noches sin presencia de lluvia, resultado que se observa tanto en noches calurosas como en no calurosas. Si bien a primera vista la ICUC media en noches no calurosas es mucho más alta en noches sin lluvia ($2,16^{\circ}$) que en noches donde se registran lluvias en ambas estaciones ($0,91^{\circ}$), no puede rechazarse la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas entre ellas. Este resultado tal vez se vincule a lo disímil del tamaño de las poblaciones. En noches calurosas, la escasa cantidad de casos donde llueve en ambas estaciones a la vez impide realizar inferencias estadísticas, aunque la diferencia de ICUC media entre casos sin lluvia y casos con lluvia en ambas estaciones parece a primera vista ser muy pequeña.

Puede destacarse la existencia de una ICUC media intensa en casos donde se ha registrado lluvia solamente en Ezeiza, tanto en noches calurosas como en noches no calurosas (posiblemente, islas de calor espurias debido a la lluvia en la estación rural). Los resultados se observan en la tabla 3.11.

		Casos	ICUC*	
			Media	Desvío
Noches no calurosas	Ninguna estación con lluvia	501	2,16	1,70
	Lluvia sólo OCBA	8	1,06	0,70
	Lluvia sólo Ezeiza	7	2,57	1,40
	Lluvia ambas estaciones	82	0,91	1,00
Noches calurosas	Ninguna estación con lluvia	277	1,34	1,66
	Lluvia sólo OCBA	2	3,25	0,35
	Lluvia sólo Ezeiza	9	3,17	1,78
	Lluvia ambas estaciones	17	1,59	2,10

Tabla 3.11 - ICUC según precipitación en noches no calurosas y noches calurosas

3.6 - Resumen

A pesar de que en las noches de verano en AMBA para 2011-2020 existe una correlación lineal negativa significativa entre la temperatura de la estación urbana (OCBA) y la ICUC, y de que el promedio de intensidad de la ICUC es significativamente mayor en noches no calurosas que en noches calurosas, la ICUC en noches calurosas es en promedio positiva y superior a 1° (1,42°). Un 34 % de las noches calurosas poseen ICUC superior a 2° a las 6 UTC, mientras que apenas un 22 % poseen una ICUC inferior a 0°. Por lo tanto, si bien puede afirmarse que la ICUC es menor en noches calurosas que en noches no calurosas, la sinergia entre noches calurosas e ICUC sería un fenómeno habitual según los resultados obtenidos.

Existe una correlación lineal inversa y estadísticamente significativa entre la velocidad de viento en la estación rural (Ezeiza) y la intensidad de la ICUC a las 6 UTC tanto en noches calurosas como en no calurosas. Estos resultados difieren con los encontrados para el verano por Lozada Montanari (2019), cuyo estudio no encontró una tendencia significativa entre la ICUC nocturna y la intensidad de viento en verano; aunque esto puede explicarse por la diferencia en el período temporal seleccionado y/o por la estación de referencia utilizada para medir el viento. La ICUC tiende a anularse a velocidades del viento menores en noches no calurosas que en noches calurosas, y además las noches no calurosas registran ICUC más altas que las noches calurosas para los mismos intervalos de viento. Por otra parte, existe una mayor proporción de noches de viento menor a 2 m/s - que favorecen fuertemente el

desarrollo de la ICUC - en noches no calurosas que en noches calurosas. Sin embargo, no existen diferencias significativas en el viento medio entre noches calurosas y noches no calurosas.

La dirección del viento influiría notablemente en la intensidad de la ICUC en noches calurosas. Mientras que direcciones del N o NE prevalecen fuertemente en noches con ICUC débil o inversa (menor a 2°), direcciones del SE, S y SO prevalecen en noches con ICUC fuerte (mayor a 2°). Esto se ve aun cuando se consideran solamente los casos de viento menor a 3 m/s, observándose además en este caso una mayor prevalencia de viento del E en noches con ICUC menor a 2°. En noches no calurosas se observa que las direcciones SE, S y SO son las más frecuentes en noches con ICUC fuerte, mientras que en noches con ICUC débil no existe un predominio claro de una dirección por sobre el resto. Estos resultados son consistentes con lo hallado por Camillioni y Barrucand (2012) y Figuerola y Mazzeo (1998), que asocian los vientos del N y NE a una menor intensidad de la ICUC, atribuida al efecto de la advección de viento ribereño sobre el AMBA y tal vez a la afectación de la estación rural debido a la pluma urbana.

Mientras que no existe una asociación lineal significativa entre nubosidad y viento en noches calurosas, sí existe una relación lineal inversa significativa entre ambas variables en noches no calurosas. Lozada Montanari (2019) encontró una relación lineal inversa y significativa entre nubosidad e ICUC en noches de verano. Cabe destacar que en este trabajo no se ha investigado el tipo o altura de nubes, factor que tiene una importancia similar en los intercambios de radiación de onda larga (que favorecen en mayor medida el enfriamiento del medio rural respecto al urbano cuando la salida de radiación de onda larga se ve favorecida) que la cobertura nubosa. La nubosidad media no es significativamente distinta en noches calurosas que en noches calurosas. Para casos de cielo despejado la ICUC media es significativamente menos intensa en noches calurosas que en noches no calurosas, mientras que para casos de cielo cubierto no se observan diferencias significativas.

Por otra parte, debe mencionarse que no existe una relación entre intensidad del viento y nubosidad en noches calurosas, pero sí existe una relación directa entre ambas variables en noches no calurosas.

Por último, las noches con precipitación en las seis horas previas tanto en Ezeiza como en OCBA tienen una ICUC menor que las que no registraron

precipitación en ninguna de ambas estaciones en noches no calurosas, y mayor en noches calurosas, aunque por el tamaño de las muestras no puede decirse que esta diferencia sea estadísticamente significativa. Notablemente las noches con precipitación en Ezeiza muestran ICUC muy intensa en promedio, siendo muy probablemente un resultado espurio debido a la presencia de precipitación solamente en la estación rural.

Capítulo 4

Análisis sinóptico de la isla de calor

En este capítulo se busca obtener una caracterización de los patrones de circulación y características de la masa de aire presente en las noches calurosas, y estudiar su relación con las variables de superficie medidas y su impacto sobre la magnitud de la isla de calor urbana.

Se consideraron para el análisis: presión a nivel del mar en el área entre 25-45°S y 65-45°O (para analizar la circulación en superficie), temperatura potencial equivalente (θ_e) y viento vectorial en 850 hPa en la misma área (para caracterizar la masa de aire en niveles bajos), y anomalías de geopotencial en 500 hPa en el área entre 20-60°S y 90-30°O (que nos permite observar la situación sinóptica en niveles medios y a una escala espacial mayor; particularmente la posición de ejes de cuña o de vaguada nos permite evaluar de manera aproximada zonas de estabilidad o inestabilidad atmosférica). Estas variables fueron analizadas para caracterizar la situación sinóptica asociada a la ICUC en los diferentes casos.

4.1 - Campos sinópticos medios de las noches calurosas

En la Figura 4.1, en el nivel de 850 hPa, se identifica una circulación anticiclónica débil centrada en el Atlántico Sur, acompañada de vientos predominantes del norte sobre la región central de Argentina, que aumentan en intensidad hacia el oeste. Además, se observa una advección cálida y húmeda sobre el sur de la provincia de Buenos Aires, La Pampa y Córdoba. En superficie, el campo de presión muestra el anticiclón semipermanente sobre el Atlántico con una intensidad superior a 1016 hPa y bajas presiones relativas en el continente inferior a 1006 hPa. Sobre el AMBA se observan presiones medias en torno a 1009 hPa. La configuración resultante daría lugar a un viento con componente del norte o noreste entre 25 y 40°S. En niveles medios (500 hPa), se presentan anomalías positivas de geopotencial sobre el este de la región pampeana y el Atlántico adyacente, con un

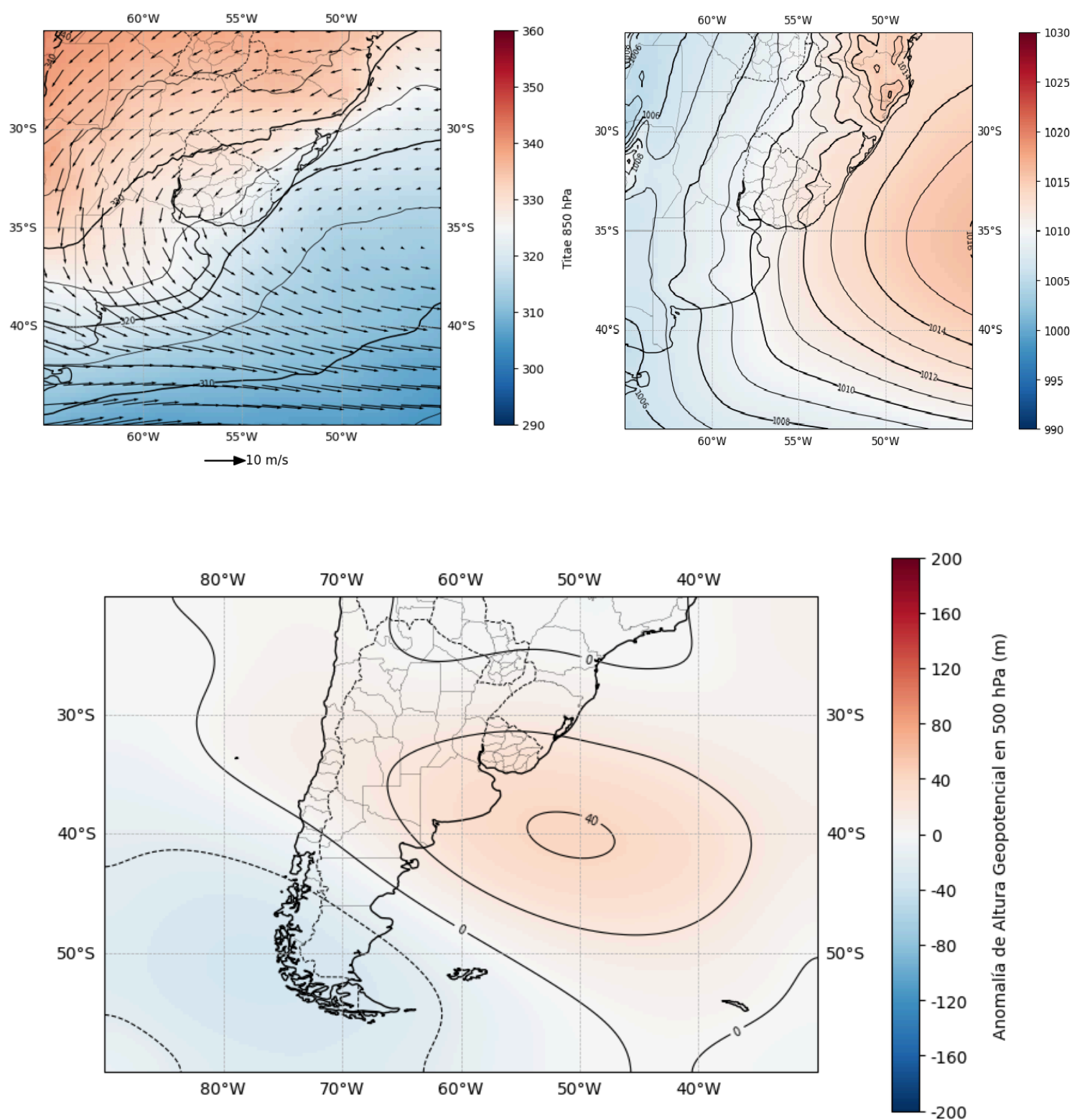


Gráfico 4.1 - Theta-e y viento medio 850 hPa (arriba, izquierda), presión a nivel del mar (arriba, derecha), anomalía de geopotencial en 500 hPa (abajo). Campo medio, noches calurosas.

máximo que supera los 40 metros geopotenciales al sureste de la provincia de Buenos Aires. Por su parte, en el sur de la Patagonia se observan anomalías negativas débiles de geopotencial en 500 hPa, con valores entre 20 y 40 metros. Por consiguiente, se observa un patrón de cuña en el Atlántico y una vaguada ingresando a la Patagonia desde el Pacífico.

4.2 - Campos sinópticos típicos en noches calurosas: agrupación en clusters

Una vez analizado el campo promedio, se buscó separar las noches calurosas en clusters de casos similares entre sí y lo suficientemente alejados de otros clusters para observar qué tipo de situaciones se encuentran dentro del conjunto de casos estudiado, considerando las características de la masa de aire y la circulación en el nivel de 850 hPa. La metodología se detalla en la sección 5 del capítulo 2. El estadístico de Davies-Bouldin evaluado entre un número de 2 y 10 casos arroja un óptimo de 5, por lo cual se obtuvieron cinco clusters (ver Gráfico 4.2, donde el mínimo valor del índice indica el número óptimo de clusters). Al haber estudiado solamente las noches calurosas en OCBA, necesariamente se introduce un límite en los patrones de gran escala y por lo tanto en la cantidad de grupos, pero esto permite observar en más detalle lo que sucede en estas situaciones que revisten mayor interés por ser noches calurosas.

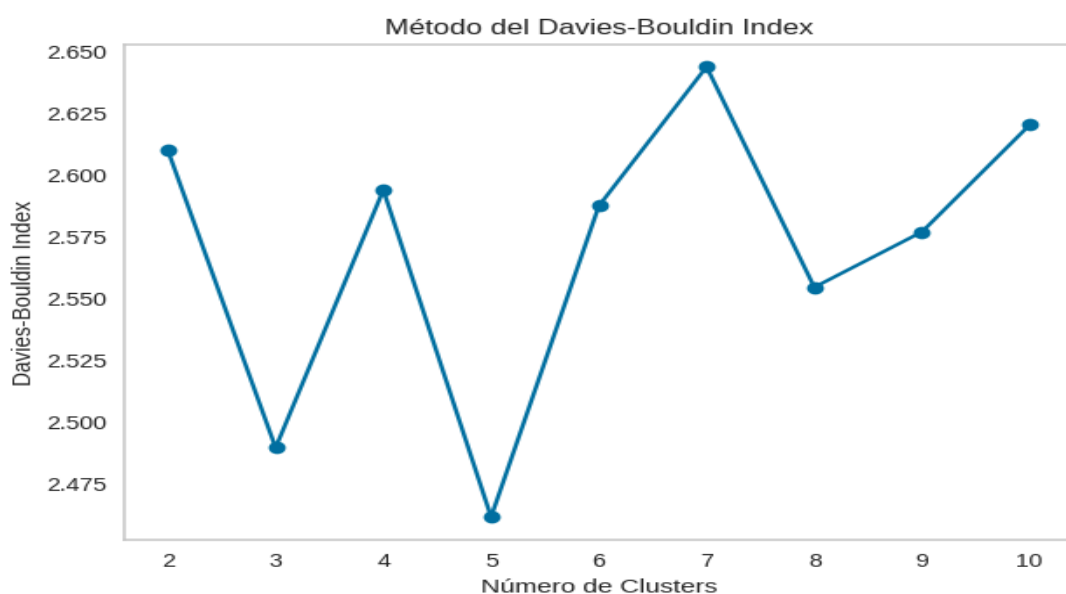


Figura 4.2 - Davies-Bouldin Index en función del número de clusters seleccionados

A continuación se enumeran y describen los clusters obtenidos.

Cluster 1 (74 casos): según lo que se observa en la figura 4.3, existe una circulación anticiclónica cerrada centrada en el Atlántico Sur en 850 hPa, viento prevaleciente del NE sobre el AMBA superior a 5 m/s (esta intensidad es superior a la del promedio de las noches calurosas), con θ_e entre 320 y 325 K en el mismo nivel (por debajo del promedio), sin advecciones significativas de θ_e . El patrón de circulación sugerido por el campo de presión en superficie es similar al que se observa en 850 hPa. La presión media sobre el Atlántico supera los 1020 hPa y es de alrededor de 1008 hPa en el centro del continente, ubicándose alrededor de 1012 hPa sobre el AMBA con un gradiente bórico oeste-este intenso sobre esta zona; con esta configuración se esperarían vientos del NE en superficie la zona del AMBA. Tanto la presión como el gradiente bórico son mayores que en el campo medio de todas las noches calurosas. Se ven anomalías positivas de geopotencial en 500 hPa en el Atlántico Sur y en el Cono Sur superiores a 120 mvp muy por encima de las del campo medio del conjunto de noches calurosas y ubicadas más al sur, junto con anomalías negativas (débiles) en el sur del Pacífico. El AMBA se ubicaría bajo un profundo eje de cuña en niveles medios, más intenso que en el campo promedio. La masa de aire es relativamente estable sobre el AMBA y no demasiado húmeda en capas bajas (θ_e bajo), y en superficie se observa un flujo cuasigeostrófico del norte o noreste entre la baja térmica al oeste y el anticiclón al este.

Cluster 2 (67 casos): este patrón se caracteriza por una circulación anticiclónica retirada hacia el este en 850 hPa, viento muy débil (alrededor de 2 m/s) del N o NE en AMBA con θ_e cercano a 330 K en el mismo nivel, advección cálida débil (Figura 4.4). El viento en 850 hPa es más débil que en el campo medio y θ_e es mayor. En superficie el anticiclón atlántico alcanza valores de 1016 hPa al este y el continente tiene valores en torno a 1008 hPa, pero la zona de gradiente bórico está desplazada hacia el este respecto al promedio de las noches calurosas. Sobre AMBA la presión media es de 1009 hPa y el gradiente bórico oeste-este es débil, lo cual daría lugar a una circulación sinóptica poco marcada. Las anomalías positivas de geopotencial en 500 hPa en el Atlántico y en el este del Cono Sur son más débiles que en el Cluster 1 (80 mvp) y ubicadas algo más al norte, en una posición

similar al del campo promedio de noches calurosas. Se observa un débil frente estacionario al sur de la Provincia de Buenos Aires. La situación es de una masa de aire muy cálida y húmeda sobre el centro y norte argentino - incluyendo el AMBA - dinámicamente estable (frente en superficie alejado y cuña en niveles medios).

Cluster 3 (64 casos): se observa una circulación anticiclónica sobre el este del Cono Sur, centrada sobre el AMBA en 850 hPa y sobre las costas del sur de Brasil en superficie (Figura 4.5). Theta-e entre 320 y 325 K en AMBA, sin advecciones sobre esa zona. El viento medio es prácticamente nulo sobre el AMBA en el nivel de 850 hPa ya que allí se ubica el centro del anticiclón, y theta-e es inferior al campo medio. Sobre el sudeste de Brasil se observa una zona frontal con advección fría de theta-e. En superficie se observa que el anticiclón está desplazado hacia el noreste respecto a 850 hPa, con su centro ubicado sobre las costas del sudeste de Brasil con un máximo promedio poco intenso de 1013 hPa; sobre el continente los mínimos son de 1008 hPa. El gradiente bórico es muy débil sobre AMBA. En 500 hPa se ven anomalías negativas de geopotencial sobre el Atlántico Sur de hasta 80 mpg y positivas (más débiles, en torno a los 40 mpg) sobre el Cono Sur. En este caso el AMBA se ubica en una delantera de cuña en niveles medios, predominando movimientos de subsidencia consistentes con el anticiclón y los valores de theta-e relativamente bajos en el nivel de 850 hPa. El campo se asocia al pasaje de un frente frío débil en latitudes medias, típicamente posterior al pasaje de un frente frío uno o dos días antes por el AMBA, aunque ya con advección cálida en el centro de Argentina. El viento cuasigeostrófico sobre AMBA es muy débil, ya que se ubica entre un débil anticiclón postfrontal y una baja térmica sobre el continente no demasiado profunda.

Cluster 4 (58 casos): viento en torno a los 5 m/s del norte en el centro y norte del Cono Sur, theta-e en torno a 330 K sobre el AMBA con advección cálida débil o moderada (Figura 4.6). El viento es similar en magnitud al del campo medio y theta-e es mayor. Se observa un frente frío débil sobre el Atlántico al sudeste de la Provincia de Buenos Aires, tanto en 850 hPa como en el campo de presión en superficie. Este frente muestra una tendencia a estacionarse o desplazarse algo hacia el Atlántico ya que predomina un eje de cuña sobre el sur de Brasil, con lo cual el frente no tiene un gran apoyo dinámico para progresar hacia el norte. En superficie se observa el

anticiclón centrado sobre el este de Brasil con presiones máximas en torno a los 1013 hPa y una profunda baja en el centro de Argentina, por debajo de 1005 hPa. El gradiente bórico sobre el AMBA es débil, observándose una presión media de 1007 hPa. En 500 hPa se observan anomalías negativas de geopotencial en Patagonia y el Atlántico sur superiores a los 100 mgp, muy superiores a las que se observan en el campo medio de las noches calurosas, y se ven anomalías positivas más débiles sobre el centro del país y el Atlántico al este de Brasil, de magnitud similar al campo medio de las noches calurosas pero situadas más al norte. Las isolíneas de anomalía de geopotencial tienen una orientación zonal. Además, se observa un eje de vaguada alejado pero intenso sobre el Pacífico extendiéndose hasta la latitud de 35°S e inclinado NE-SO. Bajo este patrón de circulación el flujo es de origen más bien continental, favorable para condiciones de altas temperaturas. El campo se asemeja al de la noche previa al pasaje de un frente frío de progresión lenta hacia el norte en el centro de Argentina, donde predomina una masa de aire muy cálida y húmeda. El viento cuasigeostrófico en superficie es débil en la región central, observándose bajas presiones en el interior (de origen térmico o bien dinámico, asociadas al eje de vaguada sobre el Pacífico) y el anticiclón del Atlántico muy retirado hacia el noreste respecto a su posición habitual.

Cluster 5 (42 casos): se observa en 850 hPa circulación anticiclónica en el Atlántico y un mínimo de presión asociado al avance de un frente frío sobre el noreste patagónico, también visible en superficie y con una fuerte advección cálida de theta-e por delante del mismo (Figura 4.7). Sobre el AMBA viento del norte del orden de los 10 m/s con theta-e de 325 K, se observa una fuerte advección de aire cálido y húmedo con un máximo de intensidad al oeste del AMBA. En superficie se observa un gradiente bórico muy intenso sobre el AMBA, con una presión media en superficie de aproximadamente 1008 hPa, sobre el Atlántico se observa un anticiclón muy elongado meridionalmente con máximos de 1017 hPa y en el continente una profunda baja térmica de menos de 1005 hPa. En 500 hPa se observan anomalías positivas de geopotencial en el Atlántico sur y en el centro del Cono Sur y anomalías negativas en el Pacífico y en la Patagonia; en este caso las isolíneas de anomalía de geopotencial se orientan NO-SE con una componente meridional mucho mayor que en el cluster 4 y ubicándose sobre el continente, más cerca del AMBA. Se ve una delantera de vaguada en altura sobre la Patagonia, con anomalías similares al

cluster 4 y muy superiores al campo medio, de hasta 140 mgp. Sobre el este de la Provincia de Buenos Aires y el Atlántico se observan anomalías de cuña del orden de los 40 mgp. El campo parece asociarse a la situación previa al pasaje de un frente frío intenso por delante de una masa de aire relativamente cálida y húmeda. El flujo cuasigeostrófico del norte en superficie es mucho más marcado que en el cluster 4, con una baja térmica en el centro del país pero con un anticiclón atlántico mucho más fortalecido y cercano al continente.

Una breve descripción de los clusters puede verse en la tabla 4.1:

Cluster	Condiciones en 850 hPa
1	Condiciones anticiclónicas en el Atlántico. Viento del NE más intenso que en el campo medio y theta-e relativamente bajo en AMBA.
2	Débil frente estacionario al sur de la PBA, anticiclón atlántico retirado. Viento del N más débil que en campo medio y theta-e elevado en AMBA.
3	Anticiclón centrado en AMBA. Viento casi nulo y theta-e más bajo que el promedio en AMBA.
4	Frente frío o estacionario al sur de PBA. Viento N/NO de intensidad similar a la del campo medio y advección cálida en AMBA.
5	Frente frío intenso al SO de la PBA. Viento mucho más intenso que en campo medio y theta-e similar al campo medio en AMBA con fuerte advección cálida prefrontal.
Cluster	Condiciones en 500 hPa
1	Eje de cuña en niveles medios sobre AMBA, anomalías positivas muy fuertes de geopotencial sobre el Atlántico/Cono Sur
2	Anomalías de geopotencial ubicadas más al este sobre el Atlántico y más débiles que en Cluster 1
3	Delantera de cuña en niveles medios sobre AMBA. Vaguada sobre el Atlántico.
4	Vaguada en Patagonia, con eje extendido hacia el Pacífico con orientación más bien zonal. Eje de cuña sobre el sur de Brasil.
5	Delantera de vaguada sobre AMBA con orientación más meridional que en 4.
Cluster	Condiciones en superficie
1	Anticiclón atlántico más intenso que en el campo medio, fuerte gradiente bórico sobre AMBA.
2	Anticiclón atlántico desplazado al este, presión baja y gradiente bórico relativamente débil sobre AMBA.
3	Anticiclón centrado sobre el sur de Brasil, PNM más alta de lo normal sobre AMBA y gradiente bórico débil.
4	Anticiclón atlántico desplazado al norte, frente frío sobre el Atlántico Sur, PNM baja y gradiente bórico débil sobre AMBA.
5	Anticiclón atlántico más intenso que en el campo medio y baja presión asociada a un frente frío en el continente, fuerte gradiente bórico sobre AMBA.

Tabla 4.1 - Descripción breve de los cinco clusters pertenecientes a noches calurosas

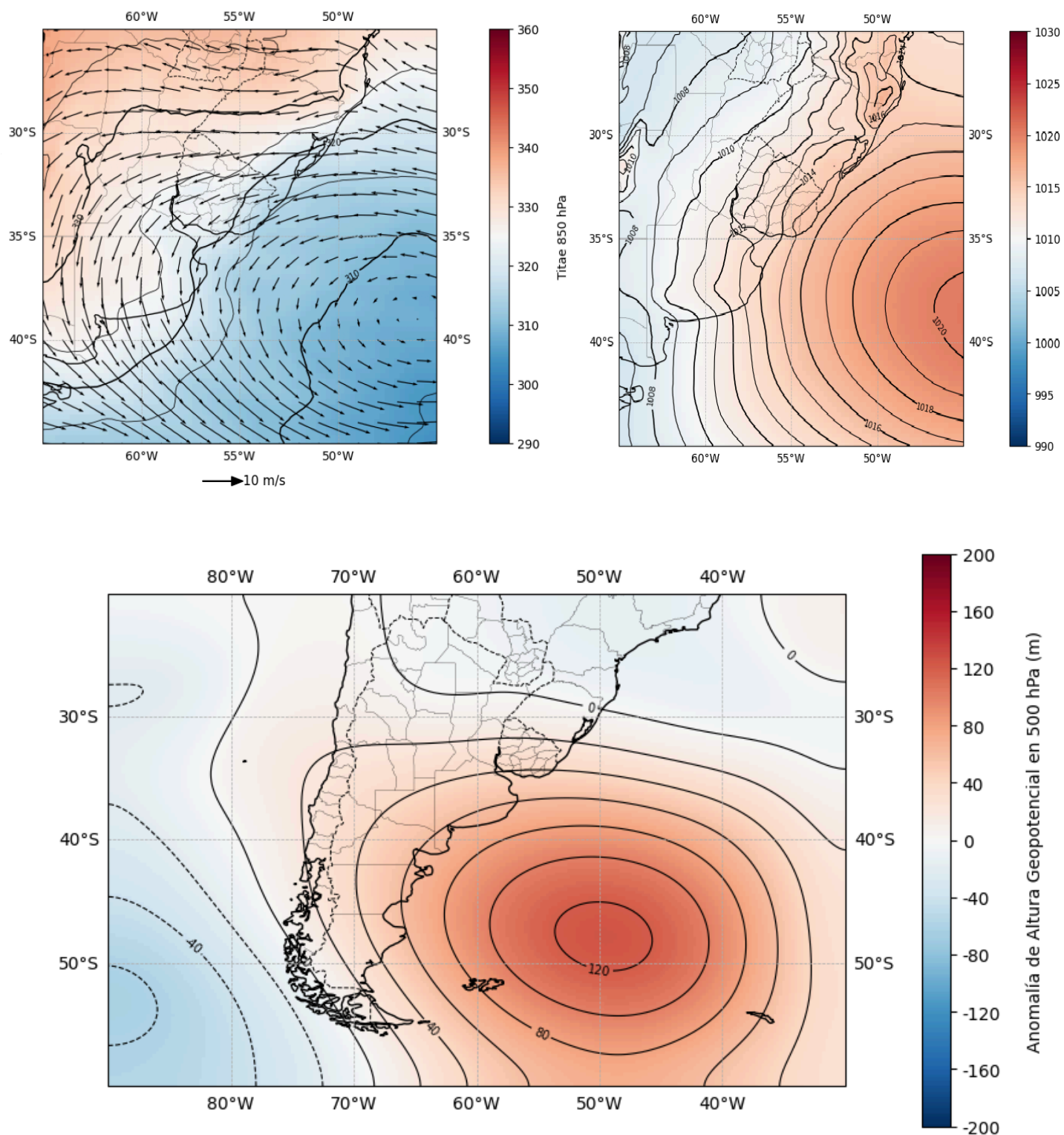


Gráfico 4.3 - $\theta_{e,850}$ y viento medio 850 hPa (arriba, izquierda), presión a nivel del mar (arriba, derecha), anomalía de geopotencial en 500 hPa (abajo). Campo medio, Cluster 1.

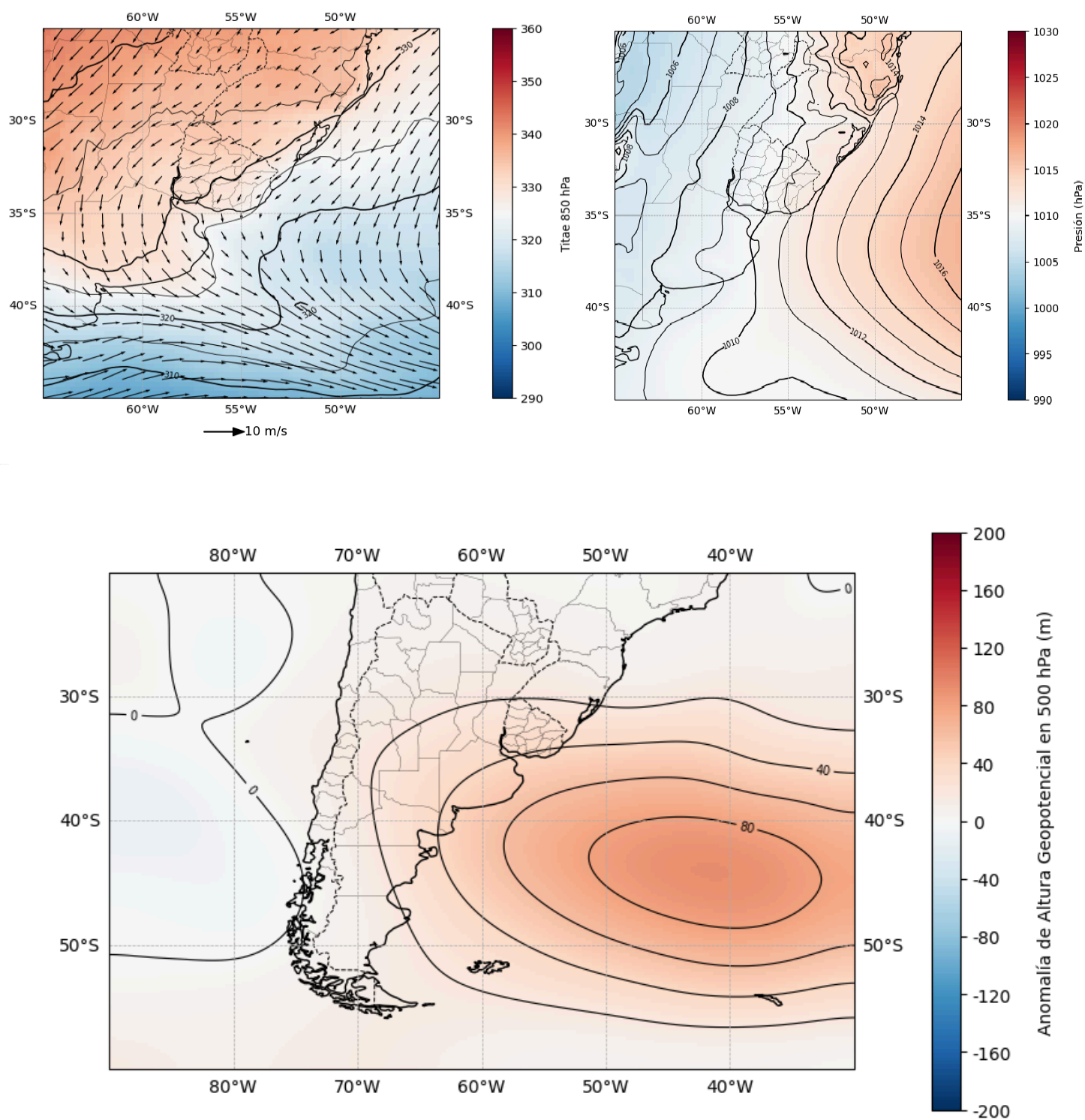


Gráfico 4.4 - Theta-e y viento medio 850 hPa (arriba, izquierda), presión a nivel del mar (arriba, derecha), anomalía de geopotencial en 500 hPa (abajo). Campo medio, Cluster 2.

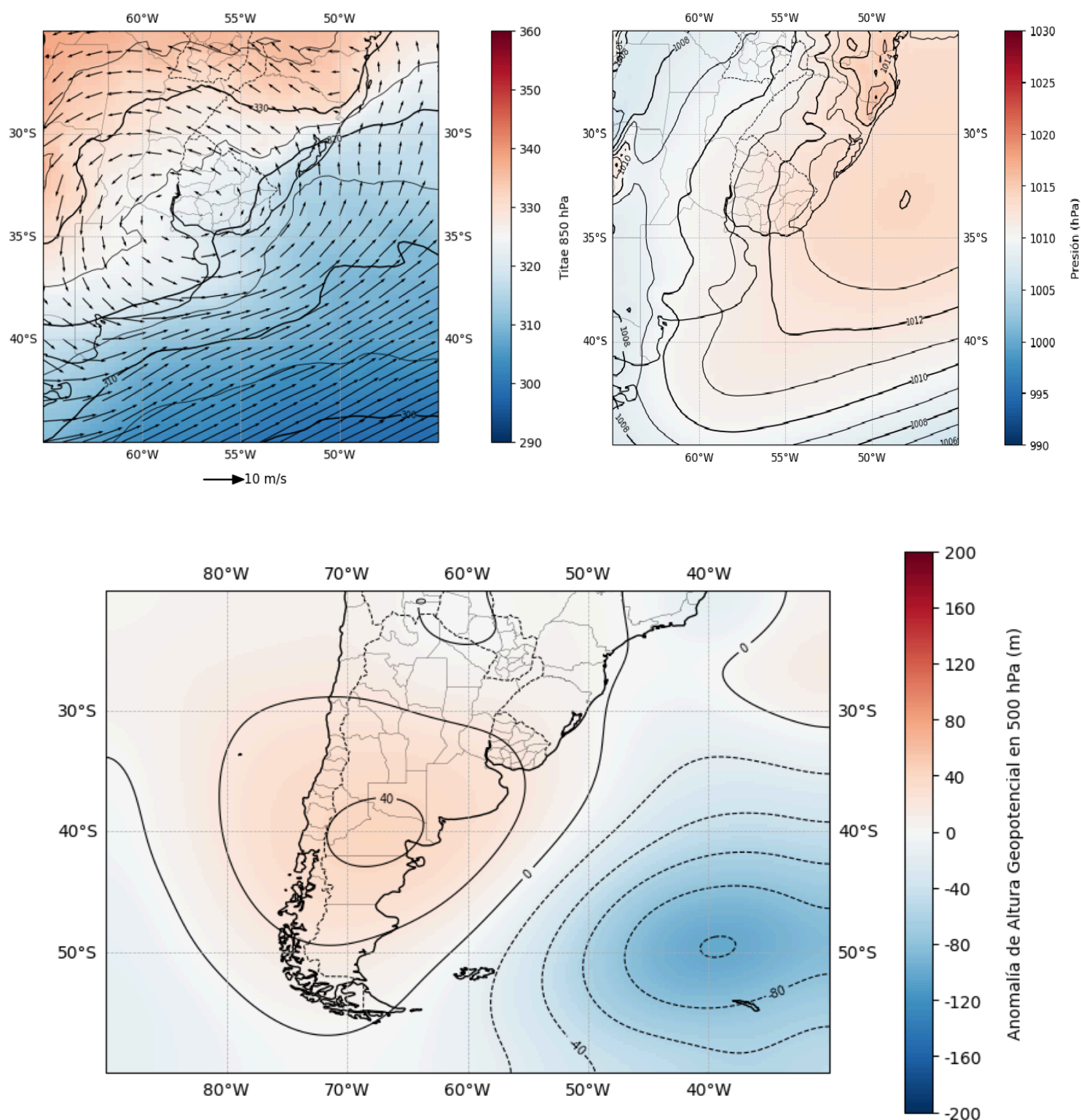


Gráfico 4.5 - Theta-e y viento medio 850 hPa (arriba, izquierda), presión a nivel del mar (arriba, derecha), anomalía de geopotencial en 500 hPa (abajo). Campo medio, Cluster 3.

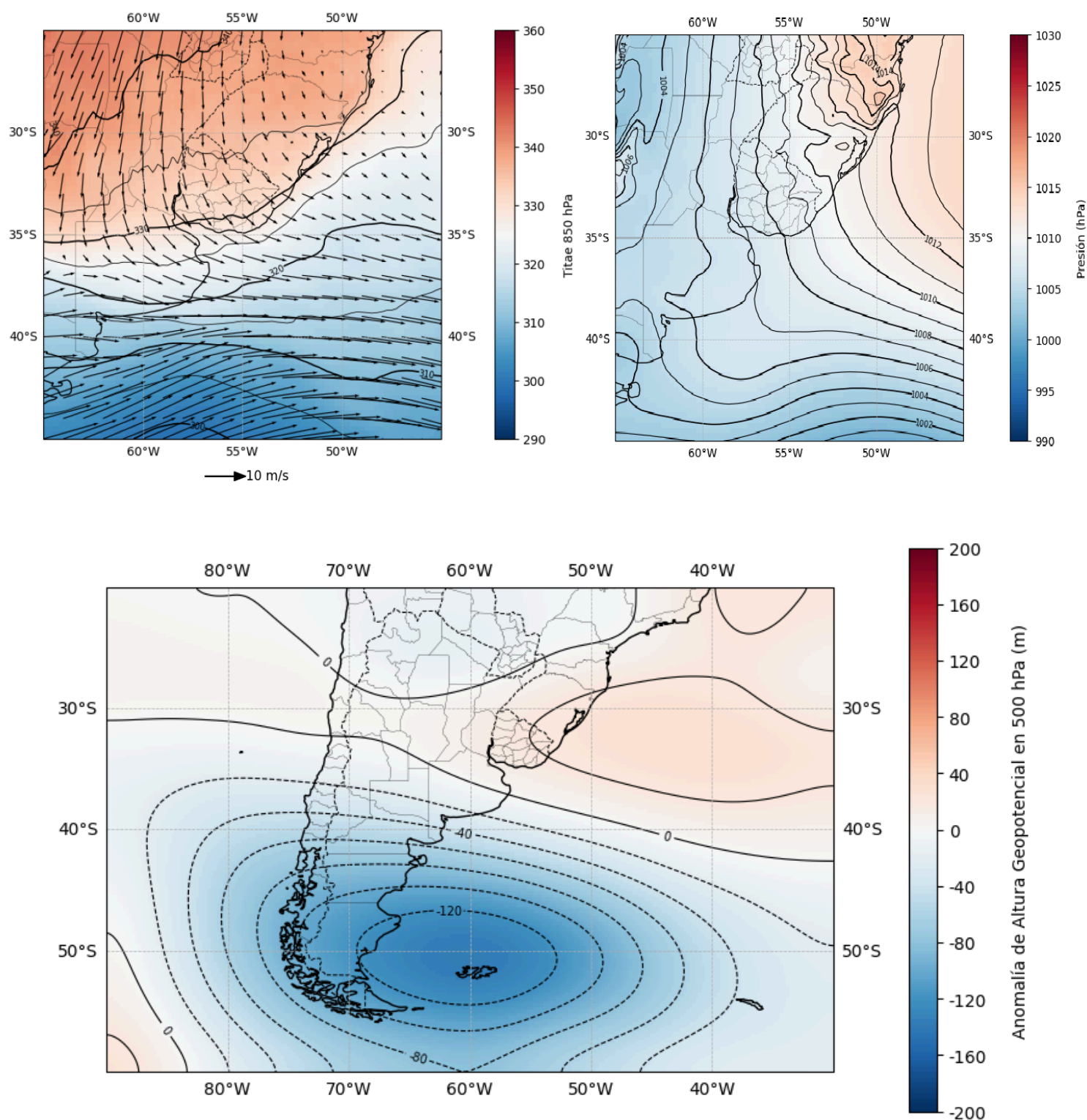


Gráfico 4.6 - Theta-e y viento medio 850 hPa (arriba, izquierda), presión a nivel del mar (arriba, derecha), anomalía de geopotencial en 500 hPa (abajo). Campo medio, Cluster 4.

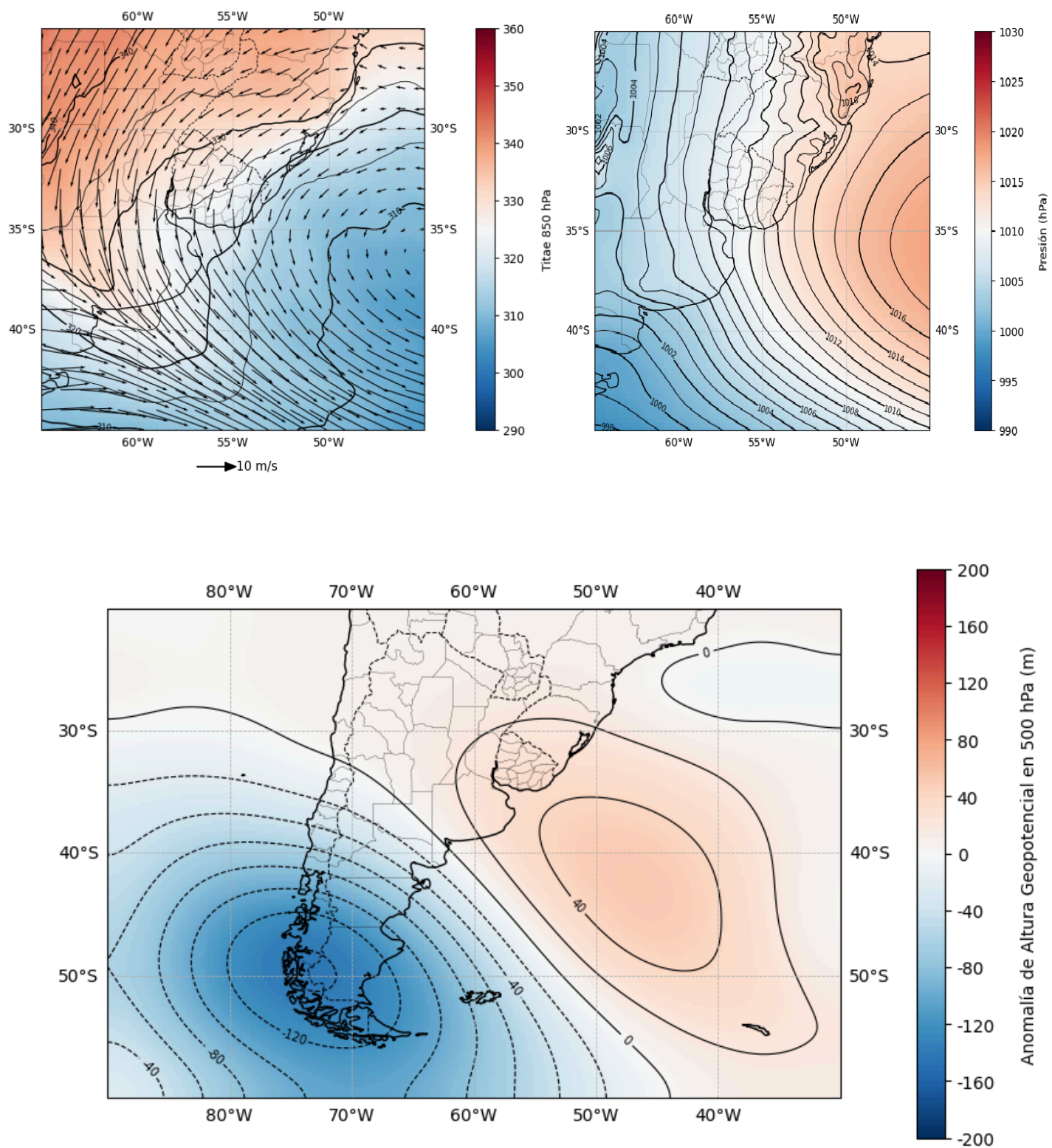


Gráfico 4.7 - Theta-e y viento medio 850 hPa (arriba, izquierda), presión a nivel del mar (arriba, derecha), anomalía de geopotencial en 500 hPa (abajo). Campo medio, Cluster 5.

4.3 - Persistencia de los eventos de noches calurosas según cluster

La mayoría de los casos de noches calurosas se asocian a la ocurrencia de otras noches calurosas el día anterior, posterior o ambos. De 305 casos, solamente 54 fueron casos aislados en donde la noche anterior y posterior fueron noches no calurosas, en tanto 115 fueron anteceditos y precedidos por noches calurosas y 136 se trataron del principio o del final de una serie de noches calurosas de dos o más días. Esto quiere decir que difícilmente se tratan de situaciones de un día de duración, y frecuentemente se trata de situaciones en que las noches calurosas se suceden durante tres días o más; existe una tendencia a que las noches calurosas se sucedan en el tiempo.

Utilizando una prueba de chi cuadrado con una significancia al 95 % y tomando como hipótesis nula que la distribución de casos de la tabla 4.2 es al azar, se observa que la distribución de los casos tiene frecuencias significativamente distintas a lo esperado en una distribución al azar.

Los resultados más destacados son los siguientes (ver Tabla 4.2):

- Las noches calurosas dentro del cluster 1 tiene una mayor proporción de lo esperable de estar antecedido y precedido por noches calurosas: un 54 % de los casos caen dentro de esta categoría frente a un 38 % dentro del conjunto de las noches calurosas. Además, es menos propenso a finalizar series de noches calurosas (noche anterior calurosa y posterior no calurosa): un 9 % de los casos frente al 22 % del conjunto de las noches calurosas.
- Las noches calurosas dentro del cluster 2 tienen una menor proporción de lo esperable de ser noches calurosas aisladas: apenas un 6 % del total del cluster, mientras que las noches calurosas aisladas constituyen un 18 % del total de los casos.
- El cluster 3 tiene la mayor frecuencia absoluta de inicio de series de noches calurosas (noche anterior no calurosa y posterior calurosa). Además, la frecuencia relativa es mayor que lo esperable: un 38 % de los casos de este cluster son de inicio de series de noches calurosas frente a un 22 % del conjunto de noches calurosas.

- El cluster 4 tiene la mayor frecuencia absoluta de finalización de series de noches calurosas (noche anterior calurosa y posterior no calurosa). La frecuencia relativa es mayor que lo esperable: un 36 % de los casos de este cluster son de finalización de series de noches calurosas frente a un 22 % del conjunto de noches calurosas.
- Por último, el cluster 5 tiene la mayor frecuencia absoluta de noches calurosas aisladas (noche anterior y posterior no calurosas) pese a ser el cluster con menor cantidad de casos. La frecuencia relativa es mayor de lo esperable: un 40 % de los casos del cluster 5 lo constituyen noches calurosas aisladas frente a un 18 % en el conjunto de noches calurosas. Este cluster además es menos propenso a estar antecedido y precedido por noches calurosas: un 12 % del total de los casos del cluster, frente a un 38 % del conjunto de las noches calurosas.

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Total
Noche anterior NC y posterior C	16	10	24	9	9	68
Noche anterior C y posterior NC	7	20	9	21	11	68
Noche anterior y posterior NC	11	4	8	14	17	54
Noche anterior y posterior C	40	33	23	14	5	115
Total	74	67	64	58	42	305

Tabla 4.2 - Asociación entre clusters y persistencia de condiciones calurosas. Datos destacables por una frecuencia mayor a lo esperable en rojo, frecuencia menor a lo esperable en verde.

4.4 - Intensidad de la isla de calor según cluster

En la tabla 4.3 se puede ver la intensidad de la ICUC media a las 6 UTC en cada cluster. Se observa que para los cinco grupos la ICUC media es superior a cero, y en cuatro de ellos (todos menos el cluster 5) la ICUC media es superior a 1°. La mínima ICUC se observa en el cluster 5, con un promedio de 0,57°; y la máxima ICUC se observa en el cluster 3, con un promedio de 1,91°.

Un test de ANOVA realizado sobre los datos pertenecientes a los cinco clusters permite afirmar que existen diferencias significativas entre las medias de

ICUC. Realizando un análisis post-hoc de Tukey, obtenemos que la media de ICUC perteneciente al Cluster 5 es significativamente menor que la de los Clusters 2, 3 y 4.

Cluster	Casos	ICUC (°C)	
		Media	Desvío estándar
1	74	1,16	1,51
2	67	1,48	1,68
3	64	1,91	1,44
4	58	1,77	1,92
5	42	0,57	1,84
Total	305	1,42	1,72

Tabla 4.3 - ICUC (°C) media y desvío standard 6 UTC, por cluster

Realizando un test de t-student de una cola sobre los casos de cada uno de los cinco clusters planteando la hipótesis nula de que ICUC es menor o igual a cero y la hipótesis alternativa de que ICUC es superior a cero, podemos rechazar la hipótesis nula con un 99 % de confianza para los clusters 1 a 4, y con un 95 % de confianza para el cluster 5. Es decir, los cinco patrones meteorológicos muestran en promedio una ICUC significativamente superior a cero. Esto sugeriría que si bien la ICUC puede ser influenciada por la circulación sinóptica, la misma tiene una influencia significativa bajo todos los patrones sinópticos.

Puede verse también un resumen gráfico de la ICUC por cluster en el gráfico 4.8. El Cluster 5 posee una distancia intercuartil relativamente pequeña además de ser el de menor ICUC media. El desvío estándar se explicaría mayormente por la presencia de algunos outliers fuera del rango intercuartil. Más información sobre la técnica boxplot puede ser encontrada en Tukey (1977).

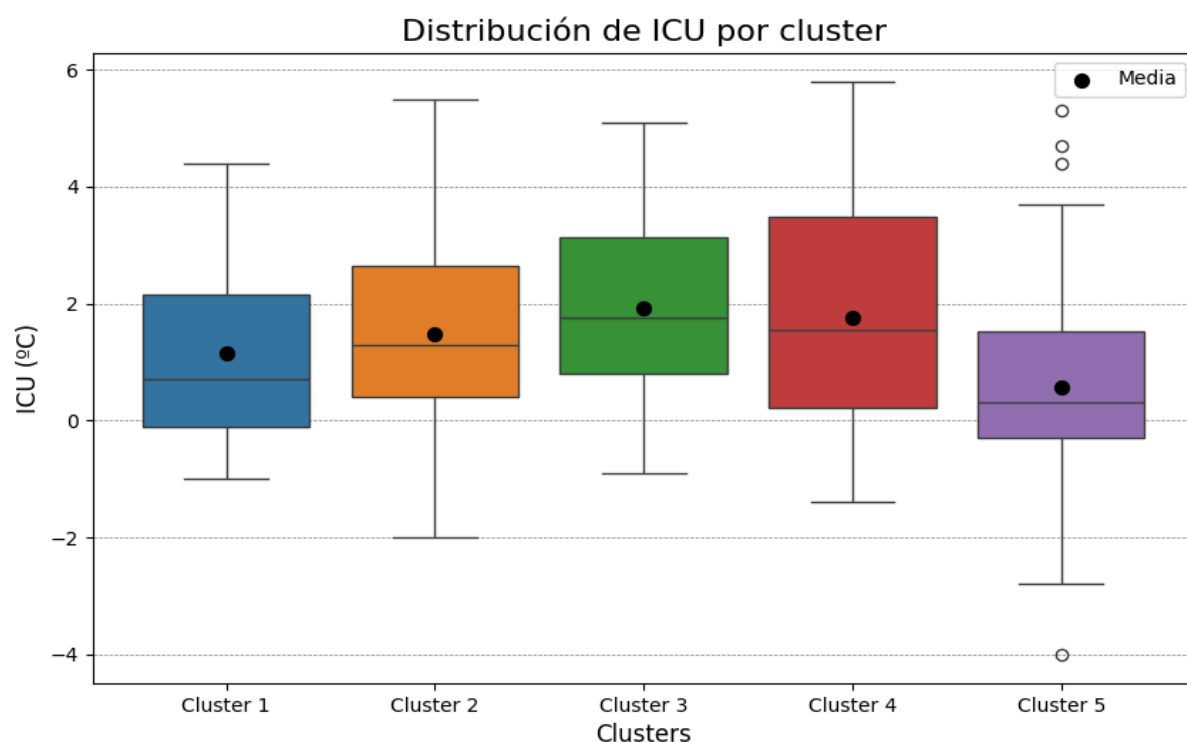


Figura 4.8 - Boxplot de ICUC por cluster.

En la Tabla 4.4 se observa que el porcentaje de islas inversas es mínimo en el Cluster 3 con apenas un 6,3 % de los casos y máximo en el Cluster 5 con un 38 % de los casos. La proporción de islas extremas (mayores a 4º) tiene un máximo pronunciado en el Cluster 4 (17,2 %) mientras que el resto de los clusters tienen un 7 a 11 % de islas extremas. La máxima proporción de ICUC mayores a 2º (fuertes a extremas) se da en el Cluster 3 con un 45 % de los casos, seguida del Cluster 4 con cerca de un 40 % de los casos; la mínima proporción se observa en el Cluster 5 con un 19%. El resto de los clusters muestran una proporción de islas fuertes o extremas entre el 25 y el 35 %.

Cluster	ICUC < 0º	ICUC 0 a 1,9º	ICUC 2 a 3,9º	ICUC ≥ 4º
1	27,0	45,9	18,9	8,1
2	19,4	44,8	25,4	10,4
3	6,3	48,4	37,5	7,8
4	22,4	37,9	22,4	17,2
5	38,1	42,9	11,9	7,1

Tabla 4.4 - Distribución de casos de ICUC (porcentaje por umbral de intensidad, respecto al total del cluster).

4.5 - Características medias de variables de superficie según cluster y su vínculo con la isla de calor

En la tabla 4.5 puede observarse que las temperaturas medias en OCBA a las 6 UTC son similares en todos los clusters, sin apartarse demasiado de la temperatura media de las noches calurosas. Al observar las temperaturas medias en Ezeiza, destacan el cluster 3 con una temperatura media algo por debajo del promedio de las noches calurosas en OCBA ($23,1^{\circ}$ contra una media de $24,0^{\circ}$) y el cluster 5 con una temperatura media por encima del promedio ($25,2^{\circ}$).

Dentro del cluster 1, la circulación de cuña en 500 hPa dan lugar a condiciones de cielo mayormente despejado, con una nubosidad media de 1,8 octas (la menor de los cinco clusters) y sin ningún caso de precipitación. La existencia de un gradiente bórico oeste-este intenso sobre el AMBA ubicado entre el fuerte anticiclón atlántico y la débil baja térmica del continente da lugar a vientos moderados en superficie (en promedio 3,4 m/s en Ezeiza a las 6 UTC). Este viento podría explicar una ICUC media algo más débil que el promedio a pesar de las condiciones anticiclónicas y los cielos mayormente despejados.

En el cluster 2 las anomalías de cuña en niveles medios son más débiles que en el cluster. El anticiclón en superficie está retirado al este y es más débil que en el cluster 1, lo cual da lugar a un gradiente bórico más débil en superficie sobre el AMBA, que se ubica más cerca de la baja térmica continental. Como resultado, si bien hay mayor nubosidad que en el cluster 1 (2,7 octas en Ezeiza) el viento medio es menor (2,3 m/s). La ICUC en este cluster es similar al promedio de las noches calurosas.

En el cluster 3, que es el de mayor ICUC media entre los clusters encontrados, las condiciones estables, con la circulación de un anticiclón postfrontal en superficie al sur de Brasil alcanzando el AMBA, se asocian a vientos débiles en superficie (2,5 m/s) y nubosidad relativamente baja, aunque más alta que el cluster 1 (2,3 octas).

En el cluster 4 el anticiclón del Atlántico se encuentra retirado hacia el noreste y sobre el AMBA predominan bajas presiones en superficie y un gradiente bórico también débil, con una masa de aire cálida y húmeda en niveles bajos. De esta forma, el viento en superficie es débil (2,5 m/s) pero presenta la nubosidad más

abundante entre los clusters analizados (3,9 octas) y la mayor proporción de casos de lluvia. Así y todo, presenta una ICUC elevada, que podría explicarse por el viento medio débil o en algunos casos por la presencia de islas de calor espurias debido a la presencia de lluvia o frentes de ráfagas en la estación rural.

En el cluster 5, el anticiclón atlántico profundo y cercano al continente y el acercamiento de un eje de bajas presiones asociado al frente frío dan lugar a un gradiente bórico muy marcado sobre el AMBA. Como resultado el viento es mayor que en los clusters 2, 3 y 4 y similar al del cluster 1 (3,3 m/s), y la nubosidad es algo mayor que el promedio (2,9 octas). La ICUC es la menor de los cinco grupos probablemente debido a la intensidad del viento, si bien es menos intensa que en el cluster 1.

Cluster	T media OCBA (°C)	T media Ezeiza (°C)	V medio Ezeiza (m/s)	N media Ezeiza (octas)	% casos PP Ezeiza	% casos PP OCBA
1	25,1	23,9	3,4	1,8	0,0	0,0
2	25,5	24,0	2,3	2,7	13,4	9,0
3	25,0	23,1	2,5	2,3	4,7	6,3
4	25,7	23,9	2,5	3,9	19,0	12,1
5	25,8	25,2	3,3	2,9	7,1	4,8
Total	25,4	24,0	2,8	2,6	8,5	6,2

Tabla 4.5- Variables medias por cluster, 6 UTC

4.6 - Evolución temporal de la intensidad de la isla de calor según cluster

Se estudió aquí la evolución de la intensidad de la ICUC a lo largo de la noche y sus posibles diferencias entre clusters. Se tomaron datos de ICUC media horaria entre las 0 y las 9 UTC.

Debe aclararse que durante el trimestre de verano la hora del amanecer en el AMBA varía entre las 8:35 y las 9:40 UTC y la hora del atardecer entre las 22:30 y las 23:10 UTC aproximadamente. A las 0 UTC ya han transcurrido entre 50 y 90 minutos de la puesta del sol, y puede establecerse este horario como el comienzo de la noche. A las 9 UTC el amanecer ya ha tenido lugar entre los días 1º de diciembre y 18 de enero, pero la radiación solar es muy débil. Entre el 18 de enero y finales de

febrero no ha amanecido a esta hora, pero faltan menos de 40 minutos para el amanecer.

El comportamiento horario típico de la ICUC en noches despejadas y con viento débil muestran un desarrollo de la ICUC desde el final del atardecer y durante las primeras horas de la noche, tendiendo a estancarse o a disminuir a partir de la mitad de la noche (Oke, 1982).

La evolución media de ICUC puede verse en el gráfico 4.9. En promedio, la ICUC a las 0 UTC (equivalente a las 9 de la noche en hora local) suele ser nula o inclusive inversa. Los clusters 2, 3 y 4 muestran un desarrollo gradual de la ICUC entre las 0 hasta las 6 UTC, mostrando un estancamiento o una disminución muy leve desde esta hora hasta la hora del amanecer (aproximadamente las 9 UTC). Los tres clusters muestran valores máximos medios de ICUC de al menos 1,5°; en el caso de los clusters 3 y 4 el máximo es de 1,9°. El cluster 1 exhibe un patrón horario muy distinto al de los clusters 2, 3 y 4, con un desarrollo horario muy rápido durante la primera parte de la noche (entre la 1 y las 5 UTC, cuando alcanza el máximo de 1,7°) disminuyendo rápidamente durante la segunda parte de la noche hasta alcanzar valores medios prácticamente nulos hacia el amanecer. Es posible que algún régimen de mesoescala como la brisa de río contribuya a este patrón anómalo. El cluster 5 muestra una ICUC que en promedio no llega a desarrollarse más allá de los 0,7°, permaneciendo en una meseta entre las 2 UTC y las 9 UTC.

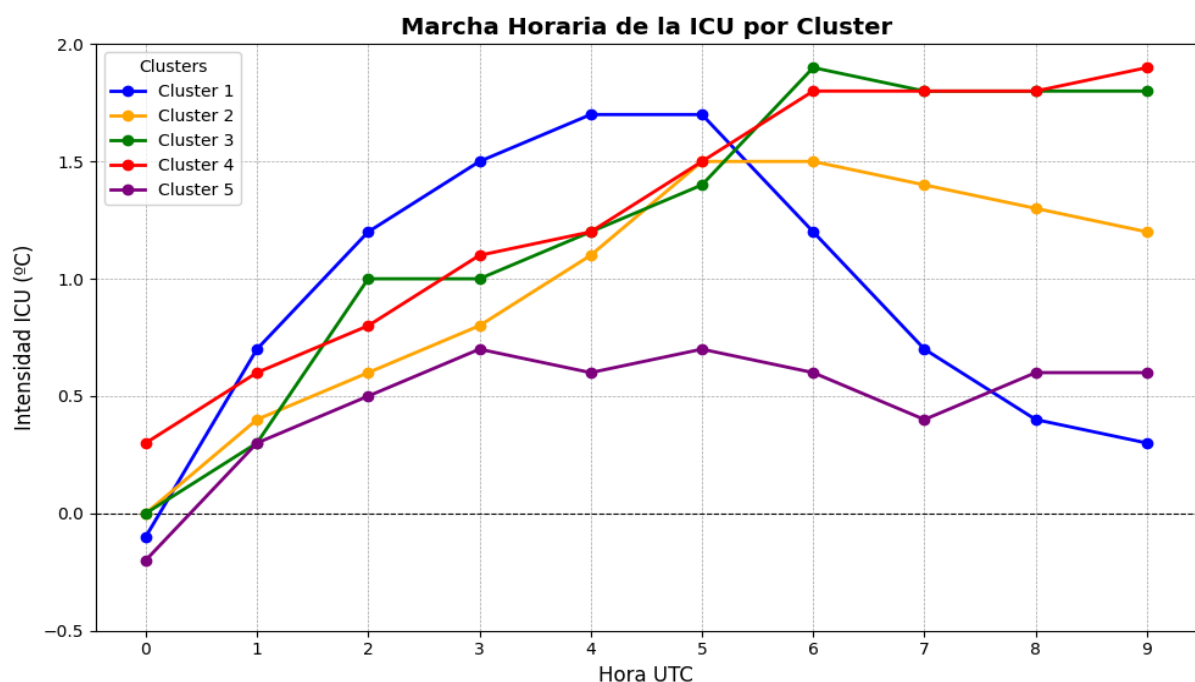


Figura 4.9 - Evolución horaria media de la ICUC por cluster

4.7 - Resumen

Pueden definirse cinco clusters según la masa de aire prevaleciente y la circulación sinóptica en 850 hPa en un entorno del AMBA, cuya descripción general se detalla en la tabla 4.1.

Los cinco clusters analizados presentan una ICUC significativamente superior a 0° según un test de t-student de una cola con un nivel de confianza del 95 % (para los clusters 2, 3, 4 y 5 el nivel de confianza es superior al 99 %). De ellos, cuatro (todos menos el cluster 5) tienen una ICUC media superior a 1° a las 6 UTC. Un test ANOVA de la varianza revela que existen diferencias significativas en la ICUC entre los clusters, mientras que un análisis post-hoc de Tukey muestra que los clusters 2, 3 y 4 tienen una ICUC significativamente más alta que el cluster 5. El Cluster 1 posee una ICUC más débil que la de los clusters 2, 3 y 4 y no es significativamente más alta que la del cluster 5.

Se observa que la ICUC es mayor cuanto menor es el gradiente bórico en superficie, que en todos los clusters tiende a tener una componente este-oeste. Los campos medios de presión de los clusters 2, 3 y 4 observan gradientes bóricos débiles. En el caso del cluster 2, por la presencia de una masa de aire cálida y húmeda con una cuña en altura y una baja térmica en superficie, con un anticiclón atlántico retirado hacia el este. En el cluster 3 por la presencia de un anticiclón postfrontal débil en todos los niveles sobre AMBA. En el cluster 4 por la retirada del anticiclón atlántico hacia el noreste y bajas presiones de origen térmico o dinámico en superficie afectando el centro-este argentino.

Los campos medios de presión de los clusters 1 y 4, en cambio, tienen fuertes gradientes bóricos sobre el AMBA. El cluster 1, con un anticiclón atlántico muy intenso y relativamente cercano al continente y con una baja térmica débil. En el campo medio del cluster 5, el AMBA se encuentra entre un mínimo de presión asociado a un intenso frente frío en el sudoeste de la región pampeana y un anticiclón atlántico profundo y cercano al continente. Este vínculo entre gradientes bóricos fuertes e ICUC debilitadas es consistente con lo encontrado en el Capítulo 3, donde se observaba un vínculo entre una ICUC debilitada con el aumento del viento.

Yagüe et al (1991) asocian condiciones de ICUC intensas a los casos de bajas térmicas de superficie en verano en Madrid, si bien menores a los casos de

anticiclones, y disminuidas en caso de condiciones ciclónicas o de vientos persistentes. La ICUC en los cluster 2 y 4 puede asociarse a zonas de baja presión en superficie sobre el AMBA o cercanas a la misma, coexistiendo con cuñas en altura, y en el cluster 3 a un anticiclón débil en superficie y una cuña en altura. El cluster 4 debe extrapolarse con precaución, ya que en algunos casos podría verse asociado al pasaje de frentes fríos débiles hacia la mitad o el final de la noche o a la ocurrencia de precipitaciones que creen islas espurias.

Se observa que las noches calurosas tienden a asociarse en series temporales de dos o más noches calurosas consecutivas, pero este comportamiento es diferencial según el cluster sinóptico de pertenencia. Es destacable que el Cluster 5, que tiene una mayor tendencia que los demás clusters a presentar noches calurosas aisladas (y no series de noches calurosas) sea el que posee una ICUC menos intensa. El resto de los clusters, que tienen islas de calor más intensas, suelen pertenecer a rachas de noches calurosas de dos o más días consecutivos sea en su comienzo, desarrollo o final.

Los cinco clusters muestran un desarrollo horario tardío de la ICUC respecto al comportamiento teórico esperable (máximo desarrollo durante la primera mitad de la noche y disminución posterior, ver Oke 1982). La ICUC, en el presente estudio, es en promedio débil o negativa al comienzo de la noche y los máximos siempre se alcanzan posteriormente a las 3 UTC, después de la medianoche local. Se ven fuertes diferencias de comportamiento entre clusters. Los clusters 2, 3 y 4 muestran un desarrollo de la ICUC continuado hasta las 5 UTC y un posterior amesetamiento o disminución leve. El cluster 1 muestra un desarrollo rápido de la ICUC hasta las 5 UTC y un fuerte decaimiento luego, llegando a prácticamente desaparecer durante las últimas horas de la noche. Esto podría deberse a un aumento de viento a lo largo de la noche o a un cambio de dirección del mismo, ya que la nubosidad suele ser muy baja en este cluster. Por último, el cluster 5 muestra un desarrollo de la ICUC más débil que el de los demás clusters entre las 0 y las 3 UTC, seguido de un amesetamiento hasta el final de la noche.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 - Resultados destacados y análisis

En el presente trabajo se plantearon como objetivos realizar un análisis estadístico y un análisis sinóptico de la ICUC en noches calurosas de verano en el Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA) para el período 2011-2020, que son aquellas donde la misma puede tener un impacto en la salud de la población y en el consumo energético. Se utilizaron como referencia datos de superficie de la estación Ezeiza Aero (ubicada en un entorno rural) y del OCBA (ubicada cerca del borde de un parque cercano al centro geográfico del AMBA). También se utilizaron datos de reanálisis del modelo ERA-5 Interim de viento, temperatura y humedad en 850 hPa, geopotencial en 500 hPa y presión en superficie.

Del análisis estadístico realizado en el capítulo 3 se desprende que las noches calurosas en OCBA tienden a tener una ICUC menor que las noches frías o templadas, existiendo una correlación negativa significativa entre temperatura en OCBA e intensidad de la ICUC a las 6 UTC. Sin embargo, la ICUC durante noches calurosas de verano (pertenecientes al tercil superior de temperatura a las 6 UTC) es en promedio positiva, con una temperatura en promedio 1,4° más alta en la estación urbana de referencia (OCBA) que en la estación rural (Ezeiza Aero). Dentro del mismo conjunto, un 34 % de las noches de verano presenta ICUC igual o superior a 2° a las 6 UTC (un 10 %, iguales o superiores a 4°) mientras que un 21 % de las noches presenta una ICUC inversa. Por lo tanto, puede decirse que la isla de calor urbana es un factor a considerar dentro de las noches calurosas en el OCBA, pese a su menor magnitud promedio que la registrada en noches no calurosas.

Se observa una relación lineal inversa significativa entre intensidad del viento en la estación rural y la intensidad de la ICUC en noches calurosas. Es un resultado esperable debido al efecto de mezcla turbulenta del aire generado por el viento, que tiende a disminuir las disparidades generadas por efectos locales como la ICUC. Esta relación inversa también se observa en noches no calurosas. Cabe destacar

que no hay una diferencia significativa entre el viento medio a las 6 UTC en noches calurosas y noches no calurosas que pudiera explicar la menor intensidad media de la ICUC en noches calurosas. Sin embargo, la ICUC media es mayor para las mismas intensidades de viento en noches no calurosas que en noches calurosas. Además, los casos de viento débil (que suelen asociarse a las ICUC de mayor magnitud) Estos factores podrían explicar, al menos en parte, la mayor intensidad de la ICUC en noches no calurosas que en noches calurosas, pese a la inexistencia de una diferencia significativa en el viento medio entre noches no calurosas y noches calurosas.

La presencia de viento del N y NE en la estación rural se asocia, en noches calurosas en OCBA, a una mayor frecuencia de islas de calor débiles y a una menor proporción de islas de calor fuertes. Por el contrario, las direcciones SE, S, SO y O se asocian a islas de calor intensas. Al excluir los casos de viento mayor o igual a 3 m/s, sigue observándose una preferencia direccional fuerte, observándose una ICUC disminuida también con dirección E además de N y NE. En noches no calurosas se observa un predominio mayor de viento del SE, S y SO y una proporción mucho menor de viento del NO, N y NE en noches de ICUC fuerte que en noches de ICUC débil.

Estos resultados podrían deberse a la ubicación de la estación de Ezeiza Aero sobre el borde sudoeste de la mancha urbana, con las direcciones N, NE y E asociadas a una advección de aire urbano cálido sobre la estación rural, particularmente en aquellas noches de viento débil donde el efecto de mezcla del viento no es tan intenso. El viento del río sobre la estación urbana de OCBA podría influir provocando un refrescamiento en el caso de vientos del N, NE y E y una consiguiente disminución en la ICUC, particularmente en noches calurosas en donde el río permanezca más frío que la masa de aire prevalente en superficie. Se puede especular con que advecciones de aire frío se asocien a una ICUC más intensa y advecciones de aire cálido a una ICUC más débil o inversa (lo cual explicaría la disminución de la ICUC media en noches calurosas), pero esta hipótesis debería someterse a investigaciones futuras. Por otra parte, es posible que la presencia de frentes fríos débiles o frentes de ráfagas asociados a convección cercana penetren en la ciudad de forma más débil que en el medio rural, dando lugar a que la ciudad se enfríe menos que el medio rural ante pasajes de frentes fríos débiles (Oke, 2017). Esta hipótesis también requeriría investigaciones adicionales.

No se observa una relación lineal significativa entre intensidad de la ICUC en noches calurosas y nubosidad total. Esto no puede ser explicado por una asociación lineal entre viento y nubosidad en noches calurosas, que está ausente. En noches no calurosas sí existe una relación lineal significativa e inversa entre nubosidad e intensidad de la ICUC. Si bien la nubosidad media no es significativamente distinta en noches calurosas que en noches no calurosas, para casos de cielo despejado la ICUC es significativamente más baja en noches no calurosas que en noches calurosas. La falta de información disponible sobre tipo de nubosidad también es un limitante importante para interpretar este resultado, ya que puede ser tan importante como la cobertura nubosa a la hora de modelar la intensidad de la ICUC (Oke, 2017).

La presencia de precipitación en ambas estaciones (urbana y rural) no introduce diferencias significativas en noches calurosas ni en noches no calurosas respecto a casos donde no se registra precipitación. Cabe destacar que en noches donde sólo Ezeiza recibe precipitación y no OCBA, se registran intensidades de ICUC medias muy intensas (mayores a $2,5^{\circ}$) tanto en noches calurosas como no calurosas, lo cual podría indicar la presencia de islas espurias debido a la influencia de lluvia o frentes de ráfagas afectando la estación rural. De todos modos, los casos son muy pocos como para realizar un análisis estadístico al respecto.

Se encontraron cinco patrones sinópticos asociados a noches calurosas en el OCBA. Los cinco poseen ICUC positivas - mayores a 0 - estadísticamente significativas, aunque con fuertes diferencias de intensidad. Las islas de calor más débiles (de $0,6$ grados en promedio) se asocian a una delantera de vaguada sobre el AMBA en niveles altos, un frente avanzando desde el SO de la PBA y una intensa advección cálida en niveles bajos por delante del mismo sobre el AMBA con un fuerte flujo del norte visible en el campo de superficie (cluster 5). Condiciones de cuña sobre el AMBA y el Atlántico en niveles medios junto con un anticiclón atlántico fortalecido y flujo del NE en niveles bajos y superficie, sin advección cálida, se asocian a islas de calor de $1,2$ grados en promedio (cluster 1). Condiciones de cuña algo más débiles pero con un anticiclón atlántico retirado hacia el este, viento del norte débil sobre el AMBA con un frente semiestacionario al sur de la PBA y aire más cálido y húmedo (θ_e más elevado) (cluster 2); la presencia de una vaguada en Patagonia combinada con un eje de cuña en el sur de Brasil, con condiciones cálidas y húmedas y advección cálida por delante de un frente frío o estacionario en niveles

bajos (cluster 4) y la presencia de un eje de cuña en el Cono Sur y un eje de vaguada en el Atlántico junto con un anticiclón posterior al pasaje de un frente frío débil en niveles bajos y ubicado al SE de Brasil en superficie (cluster 3), resultan en islas de calor de 1,4 a 1,9 grados.

En líneas generales, la presencia de gradientes béricos débiles (sea por la presencia de anticiclones postfrontales o de bajas térmicas) favorece islas cálidas más intensas, mientras que patrones de viento más regular como el bloqueo anticiclónico o las situaciones previas al pasaje de grandes frentes fríos favorecen islas cálidas positivas en promedio, pero menos intensas.

El cluster 3 (anticiclón centrado en AMBA) tiende a iniciar series de noches calurosas con mayor frecuencia que los demás, mientras que el cluster 4 (frente parcialmente bloqueado por un eje de cuña al sur de Brasil) tiende a finalizarlas con mayor frecuencia que los demás. Los casos del cluster 5 (eje de vaguada sobre el AMBA, que posee la menor afectación por la ICUC) suelen presentar una mayor frecuencia que el resto a constituir noches calurosas aisladas antes que series de noches calurosas consecutivas. Esto podría indicar que la ICUC podría tener una incidencia importante en series de noches calurosas, contribuyendo a un mayor calentamiento de la ciudad que el entorno particularmente al inicio y al final de períodos cálidos, aunque se requieren estudios más detallados al respecto. Las condiciones anticiclónicas del cluster 3 son ideales para el fortalecimiento de la ICUC, mientras que el cluster 4 podría asociarse en algunos casos al pasaje de frentes fríos débiles o frentes de ráfagas asociados a convección hacia la mitad o el final de la noche, que podrían verse retrasados por la mayor fricción de la ciudad conduciendo a noches más cálidas que en el entorno (Oke, 2007).

Por último, se estudió la intensidad promedio de la ICUC entre las 0 y las 9 UTC por cada cluster sinóptico. Todos los clusters tienen una ICUC débil o inversa al comienzo de la noche (0 UTC) y experimentan un crecimiento posterior de su magnitud, pero difieren fuertemente en su comportamiento. Los clusters 2, 3 y 4 (asociados a condiciones de cuña o a la previa de frentes fríos débiles, y que observaron la mayor intensidad de ICUC a las 6 UTC) poseen un desarrollo continuo a lo largo de gran parte de la noche, amesetándose a partir de las 6 UTC. En el caso del cluster 4 se observa incluso un aumento hasta la hora del amanecer; este caso se corresponde con el avance de un frente frío sobre la Provincia de Buenos Aires por delante de una masa de aire calurosa y húmeda. Este comportamiento podría

darse debido al avance de dicho frente sobre el AMBA, con menor afectación sobre la ciudad que en la zona rural, aunque harían falta estudios complementarios para corroborar la hipótesis. El cluster 1 (caracterizado por un fuerte anticiclón sobre el Atlántico y viento medio más intenso que los clusters 2, 3 y 4) posee una ICUC máxima entre las 4 y las 5 UTC (de $1,7^\circ$) que disminuye rápidamente a partir de las 6 UTC hasta llegar a valores cercanos a cero hacia las 9 UTC, hora cercana al amanecer. Este resultado es curioso, tal vez relacionado con una intensificación del viento a lo largo de la noche bajo este patrón sinóptico. Finalmente, el cluster 5 (delantera de vaguada sobre el AMBA) muestra un desarrollo débil de la ICUC que se frena de manera temprana hacia las 3 UTC, permaneciendo entre $0,4$ y $0,7$ grados desde esta hora hasta las 9 UTC, hora cercana al amanecer.

5.2 - Trabajo a futuro

Si bien se ha comprobado un calentamiento en el OCBA entre las décadas de 1930 y 1950 vinculado a la urbanización circundante, su ubicación dentro de un parque relativamente grande puede llevar a la prevalencia de efectos locales que lleven a una subestimación de la intensidad de la ICUC. Sin embargo, la falta de otras estaciones de referencia de período suficientemente grande y controles de calidad han llevado a que sea elegida como estación de referencia del medio urbano. Por otra parte la estación de Ezeiza ha experimentado un progresivo acercamiento del borde urbano, si bien de urbanización de baja densidad. Otras estaciones del AMBA, sin embargo, se ubican dentro de la mancha urbana, con lo cual se ha decidido tomarla como estación de referencia rural. La posible existencia de islas de calor espurias debido al pasaje de frentes fríos sobre la estación de Ezeiza (ubicada al sudoeste de OCBA) es un factor asimismo a considerar.

En el futuro se podrían realizar investigaciones análogas con estaciones urbanas ubicadas en parques más pequeños o bien con sensores en ubicaciones no estándar, en la parte superior de la canopia urbana, que pueden disminuir los efectos locales de la ubicación de estaciones convencionales (Oke, 2017). También podrían utilizarse estaciones de otros organismos ubicadas dentro del AMBA, previo analizar la calidad de sus datos. Estas alternativas tendrían costos económicos elevados y

llevarían mucho tiempo, pero pueden proponerse como planes de investigación a futuro.

Muchos datos detallados sobre nubosidad se encuentran en las libretas meteorológicas. El tipo de nubosidad es un factor crucial a la hora de modular la ICUC. Un estudio más detallado sobre esta variable podría hacerse a futuro utilizando datos sobre tipo de nubosidad provenientes de libretas meteorológicas, o bien utilizando imágenes satelitales. La interrelación entre intensidad del viento y nubosidad es otro factor que, por limitaciones temporales, no fue suficientemente estudiado en este trabajo.

La estabilidad vertical es un factor importante para el desarrollo de la ICUC nocturna y no ha sido tenido en cuenta en este estudio, la misma podría ser crucial para explicar la disminución observada de la ICUC en noches calurosas respecto a noches no calurosas. Esta característica podría estudiarse mediante sondeos verticales, pero la utilización de sondeos atmosféricos in situ tiene la limitación de que solamente se dispone de sondeos nocturnos en Ezeiza para un período muy limitado de tiempo. Sin embargo, podrían utilizarse para estudios de caso. Una alternativa es utilizar reconstrucciones de sondeos provenientes de modelado numérico para realizar estudios en un marco temporal más prolongado.

Otro factor no tenido en cuenta ha sido la insolación del día anterior a cada noche calurosa. Este tiene su importancia en el hecho de que los materiales urbanos tienden a almacenar calor durante el día y a liberarlo a la atmósfera de forma gradual a partir del anochecer (Oke, 1982). Sin embargo, las mediciones de heliofanía en OCBA están muy limitadas por la pérdida de horizonte urbano. Es posible que la utilización de imágenes satelitales pueda suplir esta limitación en investigaciones futuras, así como en la observación de la nubosidad nocturna.

Por último, para comprender mejor el comportamiento horario de la ICUC según el patrón meteorológico, es necesario realizar un estudio pormenorizado de casos pertenecientes a cada cluster sinóptico encontrado en el Capítulo 4, que incluya información horaria detallada de variables de superficie en la región. De esta manera podremos tener información adicional sobre los mecanismos que modulan la ICUC bajo diferentes regímenes sinópticos.

Bibliografía

- Arnfield, A.J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*. 23, 1-26.
- Bejarán, R. y Camillioni, I. (2003). Objective method for classifying air masses: an application to the analysis of Buenos Aires' (Argentina) urban heat island intensity. *Theor Appl Climatol* 74:93–103
- Camillioni, I. y Barros, V. (1994). Urban-biased trends in Buenos Aires' mean temperature. *Climate research* 4(1): 33-45.
- Camillioni, I. (1995). Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones climáticas. Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Buenos Aires.
- Camillioni, I. y Barrucand, M. (2012). Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina urban heat island. *Theor Appl Climatol* 107: 47-58.
- Cuadrat, J.; Serrano-Notivoli, R; Barrao, S.; Saz, M.; Tejedor, E. (2021). Variabilidad temporal de la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza (España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 48: 97-110.
- Davies, D. L.; Bouldin, D. W. (1979). "A Cluster Separation Measure". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. PAMI-1 (2): 224–227
- Figuerola P.I., Mazzeo N.A. (1998). Urban–rural temperature differences in Buenos Aires. *Int J Climatol* 18:1709–1723.
- Hoffmann, P.; Kruegerb, O.; 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). *Climate of London deduced from meteorological observations*. 3rd edn. Harvey and Darton, London.
- INDEC, Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (2022)
- Kabisch, N.; Remahne, F.; Ilseemann, C. (2023). The urban heat island under extreme heat conditions: a case study of Hannover, Germany. *Sci Rep* 13, 23017
- Lee, D.O. (1975). Rural atmospheric stability and the intensity of London's Heat Island. *Weather*, 30:102–109.

- Li, D. y 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. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 2051–2064.
- Lozada Montanari, M. (2019). Caracterización de la isla urbana de calor de la Ciudad de Buenos Aires. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Buenos Aires.
- Morris, C.J.G.; Simmonds, I.; Plummer, N. (2001). Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a great city. *Journal of Applied Meteorology*. 40:169-182.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmos Environ* 7:769-779.
- Oke, T.R. (1976). The distinction between canopy and boundary layer urban heat island. *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. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In: *Wind Climate in Cities*. Cermak, J.E., Davenport, A.G. Plate, E.J. and Viegas, D.X. (eds.), Kluwer Academic, 81-102.
- Oke, T. R.; Mills, G.; Christen, A.; y Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Robine, J. M.; Cheung, S. L. K.; Le Roy, S.; Van Oyen, H.; Griffiths, C.; Michel, J.P.; Herrmann, F.R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biol.*, 331, 171–178
- Rusticucci, M.M. y Vargas, W.M. (1991). Efecto de la ciudad y el río sobre la temperatura de superficie en Buenos Aires. *Geoacila* 18: 35-48.
- Stull, R.B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic (§13.1 p. 546)
- Tan, P. N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). *Cluster analysis: Basic concepts and algorithms*. En P. N. Tan, M. Steinbach, & V. Kumar (Eds.), *Introduction to Data Mining* (pp. 496-514). Pearson.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Yagüe, C.; Zurita, E.; Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment*, Vol 25B, No.3: 327-332.