

OLAS DE CALOR HISTÓRICAS Y FUTURAS EN LA CIUDAD DE SALTA. IMPACTO EN LOS AMBIENTES INTERIORES

Silvana Flores-Larsen¹ y Celina Filippin²

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) - Universidad Nacional de Salta – CONICET, Avenida Bolivia 5150, (4400) Salta, Argentina; seflores@unsa.edu.ar

²CONICET, CC302 Santa Rosa, (6300) La Pampa, Argentina; cfilippin@cpenet.com.ar

Recibido 05/2023; Aceptado 07/2023

RESUMEN.- Las olas de calor son cada vez más frecuentes e intensas y ocasionan sobrecalentamiento en los espacios interiores, problemas de salud, incrementos en el consumo energético y frecuentes cortes en el suministro eléctrico. El entorno construido brinda espacios interiores capaces de proteger a sus habitantes de estos extremos y reducir los impactos perjudiciales en la salud y en el confort térmico. Sin embargo, no todas las olas de calor impactan en los ambientes interiores de la misma manera, por lo que es importante poder clasificarlas de acuerdo a dicho impacto. Los tres objetivos de este trabajo son: describir las olas de calor históricas (1991-2020) y futuras (2021-2100) en la ciudad de Salta Capital obtenidas de datos observados y del modelo climático regional REMO2015-MPI-ESM-LR, clasificar su impacto en viviendas (impacto moderado, fuerte o extremo) a través del índice IOD (grado de sobrecalentamiento interior) y determinar olas “representativas” que puedan ser utilizadas para estudios del comportamiento térmico, resiliencia y consumo energético de edificios bajo eventos extremos de calor. Se encontró que las olas históricas (1991-2020) muestran una frecuencia de ocurrencia de 12.2 olas/década. En el futuro, se observa un crecimiento constante de la cantidad de olas en los años posteriores a 2020 y una notoria aceleración desde 2040 hasta el final del siglo. En 2031-2060 dicha cantidad se multiplicará por 4 y en 2071-2100 ocurrirán 10 veces más olas que en el periodo actual. En cuanto al impacto en ambientes interiores, se observa que, para el periodo histórico 1991-2020, el 13% fueron olas moderadas, 75% olas fuertes y 13% olas extremas, es decir, prevalecieron las olas con impacto en el rango intermedio. Esta distribución se modificará hacia fines de siglo, con el 55% de las olas clasificadas como extremas y sólo un 10% como moderadas.

Palabras clave: eventos extremos, olas de calor, resiliencia térmica, modelos climáticos regionales

FALTA TITULO EN INGLES

ABSTRACT.- High temperatures and heat waves are becoming more frequent and intense. These events can cause overheating in indoor spaces, health problems, increases in energy consumption and frequent power outages. The built environment provides interior spaces capable of protecting its inhabitants from these extremes and reducing detrimental impacts on health and thermal comfort. However, heatwaves impact indoor environments in different levels, so it is important to classify them according to their impact. The three objectives of this work are: to describe the historical (1991-2020) and future (2021-2100) heat waves in the city of Salta Capital obtained from observed data and the regional climate model REMO2015-MPI-ESM-LR, classify their impact on housing (moderate impact, strong or extreme) through the IOD index (degree of interior overheating), and determine “representative” heatwaves that can be used for studies of thermal behavior, resilience and energy consumption of buildings under extreme heat events. It was found that the historical heatwaves (1991-2020) show a frequency of occurrence of 12.2 heatwaves/decade. In the future, a steady growth in the number of waves in the years after 2020 and a marked acceleration from 2040 to the end of the century, were found. In 2031-2060 the number of heatwaves will be 4 times the historical value, while in 2071-2100 it will be 10 times. Regarding the impact on indoor environments, it can be seen that, for the historical period 1991-2020, 13% were moderate waves, 75% strong waves and 13% extreme waves, that is, heatwaves with an impact in the intermediate range prevailed. This distribution will change towards the end of the century, with 55% of the waves classified as extreme and only 10% as moderate.

Keywords: extreme heat events, heatwaves, thermal resilience, regional climate models

1. INTRODUCCIÓN

Los extremos climáticos son cada vez más intensos y frecuentes y están causando impactos sin precedentes en los sistemas humanos y naturales. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2022) advierte que estos extremos serán cada vez más severos debido al peligroso incremento de temperatura global de 0.2°C/

década (WMO, 2022). Entre ellos, los eventos de calor extremo están provocando una enorme tensión en la infraestructura, como la red eléctrica, los impactos en la salud humana y los incendios forestales. Argentina viene sufriendo el impacto de olas de calor cada vez más extensas, con cortes de suministro eléctrico que dejan a las personas en situación de extrema vulnerabilidad. En marzo de 2023 la ola de calor en Buenos Aires registró la temperatura más

alta en 117 años y el verano más caluroso históricamente registrado, con sensaciones térmicas entre 39 y 44°C (Diario Perfil, 2023; SMN, 2023a). Durante dicha ola de calor, se produjeron récords de demanda de energía eléctrica a nivel nacional, por encima de 28 500 MW. El 1 de marzo, ocurrió un apagón masivo que afectó a más de 6 millones de usuarios en el norte y centro del país, afectando a la mitad del país (Infobae, 2023). Un año antes, la ola de calor de enero 2022 que se inició en el extremo sur del país y se extendió gradualmente hacia el norte, desencadenó un evento de gran extensión territorial (69 localidades registraron el fenómeno), destacándose su duración (hasta 14 días) y su intensidad (decenas de récords históricos y varias jornadas agobiantes con más de 40°C) (SMN, 2022). Una de las principales características de esta ola fue su intensidad ya que teniendo en cuenta los registros desde 1961, se alcanzaron récords de temperatura máxima más alta anual en 25 estaciones y mínima más alta en 19 estaciones. La Figura 1 muestra la alta frecuencia de días con más de 40°C que afectó a varias zonas del país. Las localidades de Las Lomitas y Rivadavia (Salta) registraron la máxima frecuencia con 19 y 18 días, respectivamente, en todo el mes de enero marcando también un récord desde al menos el año 1961. En cuanto a la distribución espacial de las temperaturas máximas absolutas, se observan valores superiores a 42°C (isoterma resaltada en verde) en el este de Salta, Catamarca y La Rioja, Tucumán, Formosa, Chaco, Corrientes, Santiago del Estero, norte de Santa Fe y Córdoba, San Luis, este de Mendoza, este y sur de Buenos Aires, este de Río Negro. Se alcanzaron temperaturas máximas de 46.5°C en Rivadavia, 45.6°C en Santiago del Estero, 45.3°C en Rapelli (Tucumán) y 44.9°C en San Juan. Esta ola se dio en simultáneo con la ola de calor en Australia, en donde se registró la temperatura más alta de la historia en el hemisferio sur, con 50.7°C en la ciudad de Onslow, al Oeste del continente australiano (La Nación, 2022).

Para estudiar estos eventos, se requiere de una definición de ola de calor que permita detectarla y cuantificarla. Curiosamente, no existe una definición rigurosa y universalmente aceptada para la ola de calor (Parker *et al.*, 2014; Perkins and Alexander, 2013; Kanti *et al.*, 2022). Si bien la enorme mayoría de definiciones de ola de calor se basa en la temperatura y no considera la humedad del aire, en climas húmedos, no considerarla podría subestimar la

severidad de estos eventos (Russo *et al.* 2017) y ya hay algunos estudios que comienzan a incluirla en la definición (Coronato, 2022; Sherwood y Huber, 2010). Esta carencia de una definición universal de ola de calor ocasiona que cada país adopte definiciones propias con variantes para la cantidad mínima de días (entre 3 y 5) y con distintos umbrales. Por ejemplo, en el Reino Unido (Met Office, 2023) se define ola de calor como un periodo de al menos 3 días en los que la temperatura máxima excede un determinado umbral que varía de acuerdo a la localidad (originalmente calculado para 1961-1990 y recientemente actualizado para incluir el periodo 1991-2020). En Bélgica, Luxemburgo y los Países Bajos, se define como ola de calor a un periodo de como mínimo 5 días consecutivos en los que la temperatura máxima en la ciudad de supera los 25°C y por lo menos tres de esos días supera los 30°C. En Grecia, se define como un periodo de al menos 3 días consecutivos en los que la máxima temperatura excede 39°C y la mínima excede 26°C (HNMS, 2023). En Argentina, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) define la ocurrencia de una ola de calor cuando las temperaturas máximas y mínimas superan o igualan, por lo menos durante 3 días consecutivos y en forma simultánea, los valores umbrales que dependen de cada localidad (percentil 90 del semestre cálido octubre-marzo). El mismo organismo informa de dichos umbrales para cada localidad, los cuales están calculados para el periodo 1961-2010 (SMN, 2023b).

La definición de ola de calor del SMN de Argentina es muy útil para detectar este tipo de eventos y para los sistemas de alerta temprana, pero no es la más adecuada para su aplicación en el estudio de ambientes interiores, puesto que pasa por alto muchos eventos que tienen impacto significativo en las temperaturas de las viviendas y que no son clasificadas estrictamente como olas de calor. Un trabajo previo realizado por los autores (Flores Larsen *et al.*, 2022) y en el que se basa el presente estudio, analizó tres modelos que se utilizan actualmente para detectar y caracterizar olas de calor y propuso un nuevo método para detectar las de mayor impacto sobre los ambientes interiores. Los modelos estudiados son los que se utilizan en Francia, Australia y Argentina (SMN). Se analizó un periodo de 15 años (2006-2020) para la ciudad de Buenos Aires y se cuantificó el impacto de las olas en el sobrecalentamiento interior de una vivienda social a través de

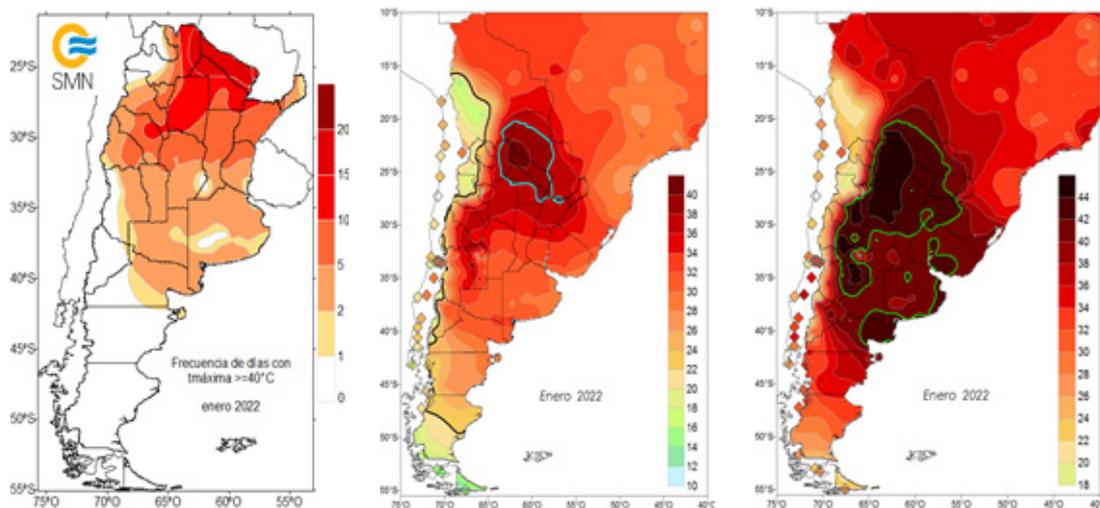


Fig. 1. Número de días con temperatura máxima mayor a 40°C (izquierda), temperaturas máximas medias (centro) y temperaturas máximas absolutas (derecha) del mes de enero 2022. La isoterma resaltada en celeste (centro) muestra la zona en donde la temperatura máxima media fue igual o superior a 38°C. La isoterma en verde (derecha) muestra las zonas con máximas absolutas iguales o mayores a 42°C.

un indicador horario denominado Grados de Sobre calentamiento Interior (IOD – Indoor Overheating Degree), calculado a partir de simulaciones térmicas horarias multi-anales utilizando EnergyPlus. Se encontró que, de los tres métodos analizados, el método de Ouzeau (Francia) fue el más adecuado para detectar olas de calor con impacto en edificios. Por esta razón, se lo utiliza en el presente estudio. Se encontró además que el impacto de una ola de calor en los ambientes interiores depende más de su severidad que de su duración, y que existe una relación lineal entre el indicador IOD y las variables características de la ola, la cual se obtiene mediante una correlación múltiple. Esta relación depende además del edificio estudiado (geometría, materiales, orientación, uso, etc.) y de las características particulares del clima, por lo que debe determinarse para cada localidad y aplicación en particular. Una vez obtenida la correlación, será posible clasificar el impacto que tendría una ola de calor determinada en el ambiente interior en tres categorías (impacto moderado, fuerte o extremo), sin necesidad de realizar una simulación computacional detallada del comportamiento del edificio bajo este evento de calor particular.

El presente trabajo estudia las olas de calor ocurridas en Salta capital en el pasado (1991-2020) y las que ocurrirán el futuro (2023-2100) de acuerdo a las predicciones de los modelos climáticos regionales disponibles en la base de datos CORDEX. Se utiliza el método de Ouzeau para detectar y clasificar las olas de calor según su duración y severidad, y el método previamente descrito (Flores Larsen et al., 2022) para categorizar su impacto en viviendas (impacto moderado, fuerte o extremo). En este trabajo, se seleccionan además olas de calor “representativas” de dichos impactos a través de la mediana de la distribución histórica, de forma de contar con tres eventos de calor específicos (de impacto moderado, fuerte o extremo) que puedan ser utilizados para estudios del comportamiento térmico de edificios y resiliencia térmica ante estos eventos de calor.

2. MATERIALES Y MÉTODO

La localidad seleccionada para el estudio es Salta Capital (24°47'18"S 65°24'38"O, 1152m s.n.m.). La metodología de análisis consta de cuatro etapas. En la primera etapa, se obtienen los datos meteorológicos diarios de temperatura máxima y mínima para el periodo de interés (1991-2100). En este caso, se utilizan los datos observados por el Servicio Meteorológico Nacional para el periodo 1991-2022 y los datos simulados por modelos climáticos regionales disponibles en CORDEX, con corrección de bias, para el periodo 2023-2100. En la segunda etapa, se aplica el método de Ouzeau para detectar y caracterizar las olas de calor que ocurren en el periodo de interés (severidad, duración y temperatura máxima alcanzada). Para simplificar el análisis de los datos, se toman tres periodos: histórico (1991-2020), futuro cercano (2031–2060) y futuro lejano (2071–2100). En la tercera etapa, se clasifican las olas de calor detectadas de acuerdo a su impacto en el ambiente interior

(moderado, fuerte y severo) utilizando la metodología descrita en Flores Larsen *et al.* (2022). Finalmente, en base a la clasificación anterior, se selecciona la ola “representativa” de cada nivel de impacto en el ambiente interior.

A continuación, se describe en detalle cada una de estas etapas y los métodos involucrados.

2.1. Datos meteorológicos diarios utilizados

2.1.1. Datos históricos observados (1961-2022)

Las máximas y mínimas diarias del periodo 1961-2022 fueron previstas por el Servicio Meteorológico Nacional para la estación Salta Aero (N° 870470, 24°51'S 65°30'O, 1221m s.n.m.) y ubicada en el Aeropuerto Martín Miguel de Güemes, a 10 km del centro de la ciudad. En el caso de datos faltantes (11 días en total en el periodo 1961-2000), se los completó utilizando la base de datos gratuita de CIMA – Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET- Universidad de Buenos Aires) (CIMA 3CN, 2023). Estos datos grillados de temperaturas máximas y mínimas se obtuvieron a partir de observaciones diarias de estaciones meteorológicas en el Proyecto CLARIS-LPB, utilizando métodos de interpolación (kriging y thin-plate splines). Previamente, se realizó una comparación entre los datos de CIMA 3CN con los registros in situ proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina para el periodo 1961-2000, obteniéndose buenas correlaciones entre ambos ($R^2=0.93$ para la temperatura máxima y $R^2=0.88$ para la mínima).

2.1.2. Datos futuros (2023-2100)

Las máximas y mínimas diarias proyectadas para el periodo 2023-2100 se obtuvieron de modelos climáticos regionales (RCM) para la región SAM (Sudamérica) disponibles en la base de datos CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment, <https://cordex.org/>) (Giorgi and Gutowski, 2015). CORDEX es una iniciativa del WCRP (World Climate Research Programme, <https://www.wcrp-climate.org>) para coordinar el downscaling de los resultados de las simulaciones CMIP5 producidos para el IPCC/AR5 (WDC, 2023). Los RCM utilizan como condiciones de borde e iniciales las de los modelos de circulación global (GCM), que tienen una grilla de mayor tamaño. Para la región SAM, los experimentos disponibles se muestran en la figura 2. No todos los experimentos entregan como resultado todas las variables o varias escalas temporales o escenarios de emisión, por lo que deben seleccionarse de acuerdo a la necesidad de cada aplicación en particular. En este trabajo, la selección de los RCMs se basó en la disponibilidad de datos diarios de temperatura máxima y mínima, para el periodo 1991-2100 (es decir, datos históricos y datos futuros). Se seleccionó un escenario de emisiones RCP 8.5, que se considera el más adecuado para la simulación energética de edificios (escenario “business-as-usual”).

Resolution	Regional Climate Models	Driving Global Coupled Models										Evaluation		
		HadGEM2-ES(MOHC)	EC-EARTH(CHEC)	NorESM1-M(NCC)	MPI-ESM-LR(MPI)	MPI-ESM-MR(MPI)	IPSL-CM5A-MR(IPSL)	M-CM5(CNRM-CERFA)	CanESM2(CCSma)	MIROCS(MIROC)	SIRO-Mk3-6-0(QCCCCEFDL-ESM2M(NOAA))			
0.20°	Eta (INPE)													
0.22°	REGMO2015 (GERICS)													
	RegCM4-7 (ICTP)													
0.44°	RegCM4-3 (ICTP)													
	REGMO2009 (MPI-CSC)													
	RCM4 (SMHI)													
	WRF3411 (UCAN)													

Fig. 2. Experimentos disponibles para la región SAM (Sudamérica) en la base de datos CORDEX, para resoluciones espaciales de 0.20°, 0.22° y 0.44°.

Fuente: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CORDEX%3A+Regional+climate+projections>

Por otra parte, lo usual es trabajar con un conjunto de modelos RCM anidados en distintos GCM para evitar resultados sesgados hacia un modelo en particular (Coronato, 2022). Sin embargo, dado que para el análisis de olas de calor se requiere analizar archivos año por año del periodo de estudio, para simplificar dicho análisis y en una primera aproximación, se seleccionó en este trabajo un único GCM, denominado MPI-ESM-LR. Se seleccionó este modelo porque es considerado en la literatura como el modelo global más conservativo y con resultados más cercanos al promedio del conjunto de modelos disponibles. Para este GCM, CORDEX dispone de tres posibles RCM con dos resoluciones espaciales (ver Fig. 2): REMO2015 (con resolución de 0.22° , de aproximadamente 25 km) y REMO2009 y RegCM4-3 (con resolución de 0.44° , de aproximadamente 50 km). Dado que la ciudad de Salta se encuentra en una zona de valles, con orografía y microclimas cambiantes, se optó por seleccionar el RCM con mejor resolución espacial disponible, es decir, REMO2015-MPI-ESM-LR. Los resultados para dicho modelo se descargaron de <https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/>.

2.1.3. Corrección del bias

Los modelos climáticos presentan errores sistemáticos (bias) debido a la resolución espacial limitada, la física y modelos termodinámicos simplificados, los métodos numéricos empleados, el conocimiento incompleto de los procesos del clima o errores derivados del modelo RCM y las condiciones iniciales y de borde del GCM utilizado (Maraun, 2013). Para corregir estos errores existen varios métodos, como la corrección de bias, el método de cambio o el mapeo de cuantiles (CCAFS, 2023). Los dos primeros son útiles para variables no estocásticas (como la temperatura), mientras que el tercero se utiliza para variables estocásticas (como la precipitación o la radiación solar). Existen otros métodos estadísticos y no hay consenso completo sobre cuál método es el más adecuado (ISIMIP, 2023; Hawkins *et al.*, 2013). En este trabajo se utilizó el método más sencillo de corrección de bias, a través de una herramienta desarrollada por la Universidad de Wageningen (Países Bajos) y distribuida por Copernicus (2023). El método se basa en suponer que la variabilidad diaria tiene la misma magnitud en el periodo de referencia que en el futuro, por lo que la temperatura diaria del modelo climático se corrige con los datos observados utilizando la expresión:

$$T_{bias-corr} = T_{RCM} - (\overline{T_{RCM,REF}} - \overline{T_{obs,REF}}) \quad (1)$$

en donde T_{RCM} es el dato (crudo) del modelo RCM y el offset ($T_{RCM,REF} - T_{obs,REF}$) se calcula como la diferencia entre el promedio de la temperatura diaria proyectada por el RCM en el periodo de referencia ($\overline{T_{RCM,REF}}$) y el promedio de la temperatura observada en el periodo de referencia ($\overline{T_{obs,REF}}$). El periodo de referencia en este caso corresponde al histórico (1991-2020), para el cual se tienen los datos observados del Servicio Meteorológico Nacional y los datos simulados por el RCM. Se calcula un offset diferente para cada mes del año, con lo que dependiendo del mes la corrección será diferente. Este procedimiento se realiza tanto para la temperatura máxima diaria como para la mínima diaria.

La figura 3 muestra el offset mensual calculado para las temperaturas máxima y mínima, que se utilizará para corregir los resultados del modelo RCM para todo el periodo 2021-2100. Se observa que, para todos los meses, el offset es positivo, indicando que el modelo RCM predice mayor temperatura mínima y máxima que la observada ($0.25-4.44^\circ\text{C}$ para la mínima y $0.27-2.74^\circ\text{C}$ para la máxima). Durante los meses en los que ocurren las olas de calor (Octubre a Marzo), las diferencias entre el modelo y el observado son las menores de todo el año, con diferencias $< 1.5^\circ\text{C}$ (en la

temperatura máxima) y $< 1.0^\circ\text{C}$ (en la temperatura mínima). Si bien no se analiza en este trabajo la época invernal, es importante destacar que hay desviaciones importantes en los meses de mayo a agosto, con 4.5°C de diferencia en la temperatura mínima y 2.7°C en la máxima del mes de julio. Estos desvíos demuestran la importancia de corregir el bias antes de analizar las series de temperatura futuras.

2.2. Método de Ouzeau para detección de olas de calor

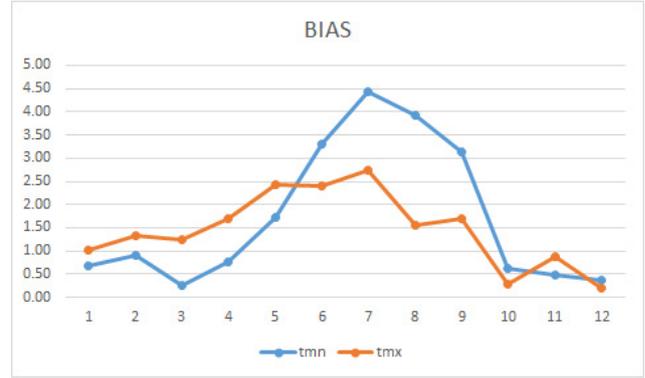


Fig. 3. Offset mensual ($T_{RCM,REF} - T_{obs,REF}$) utilizado para la corrección de bias de la Eq. (1). Los valores muestran la diferencia promedio entre las temperaturas (máxima y mínima diarias) proyectadas por el modelo RCM y las temperaturas observadas.

El método fue propuesto por Ouzeau *et al.* (2016) en base al trabajo de Soubeyrou *et al.* (2016) y permite detectar y comparar la duración, temperatura máxima e intensidad de los eventos de olas de calor a partir de un análisis de la temperatura media diaria y tres umbrales que se definen en los siguientes párrafos. Es el método que utiliza actualmente el Servicio Meteorológico de Francia (Météo-France) y, si bien se desarrolló originalmente para el clima y ciudades de dicho país en función de los datos de mortalidad en olas de calor, fue extendido para su aplicación en otros climas.

El método se basa en el análisis de la temperatura media diaria. Define tres parámetros: el umbral de temperatura para el cual se detecta un evento de calor (S_{pic}); el umbral que define el inicio y el final de la ola de calor (S_{deb}); y el umbral de interrupción (S_{int}) para la fusión de dos episodios consecutivos sin descenso significativo de la temperatura. Los parámetros S_{pic} , S_{deb} y S_{int} se calculan como los percentiles 99.5, 97.5 y 95, respectivamente, de la distribución de la temperatura media diaria del lugar de interés durante 30 años. Una ola de calor se define entonces como un periodo de al menos tres días consecutivos con la temperatura media diaria por encima del umbral inicial S_{deb} , con al menos un día con la temperatura media diaria superando el umbral de calor máximo S_{pic} (Soubeyrou *et al.*, 2016). La ola finaliza si la temperatura media cae por debajo de S_{int} incluso durante un solo día.

El método caracteriza a una ola de calor por su duración (número de días), intensidad (la máxima temperatura media diaria alcanzada durante el evento) y severidad (la sumatoria de las diferencias positivas entre la temperatura media diaria y un umbral S_{deb}). Se define además la severidad global (adimensional) como el cociente entre la severidad y la diferencia ($S_{pic} - S_{deb}$). Esta definición permite caracterizar la severidad de la ola en relación a los umbrales climáticos del lugar (Soubeyrou *et al.*, 2016):

$$Global\ Severity = \frac{\sum(T_m - S_{deb})^+}{S_{pic} - S_{deb}} \quad (2)$$

Para comparar las diferentes olas de calor se utiliza un gráfico de burbujas, en donde la severidad global de la ola se representa por el tamaño de la burbuja, mientras que su duración y temperatura máxima se representan con la posición del centro de la burbuja en los ejes horizontal y vertical, respectivamente. Como se verá en los resultados, esta manera de representar las olas permite una detección visual rápida de las olas más severas (las burbujas de mayor tamaño) o de las más largas (las ubicadas más hacia la derecha del eje vertical). El método de Ouzeau es útil para evaluar tanto las olas ocurridas en el pasado como las olas futuras predichas por los distintos modelos climáticos. Por ejemplo, recientemente este método se empleó para detectar futuras olas de calor en París (Machard *et al.*, 2020) y para estudiar olas de calor históricas en Buenos Aires (Flores Larsen *et al.*, 2022) y en La Pampa (Flores Larsen *et al.*, 2023), mediante la implementación del método en lenguaje Python. Este mismo procedimiento fue utilizado en este trabajo.

Para la detección de olas de calor con el método de Ouzeau es necesario contar con las temperaturas medias diarias del periodo a estudiar. Como se describió previamente, los datos disponibles corresponden a la temperatura máxima diaria (TMX) y mínima diaria (TMN), por lo que para obtener la temperatura media diaria (TM) se calculó el promedio aritmético de dichos valores, es decir, $TM = (TMX + TMN) / 2$.

2.3. Clasificación de las olas de calor en base a su impacto en los ambientes interiores

Para clasificar las olas de calor en base a su impacto en ambientes interiores se utiliza la metodología desarrollada en Flores Larsen *et al.* (2022). Dicha metodología permite categorizarlas en impacto moderado, fuerte o extremo, de acuerdo a cuánto sobrecalentamiento interior producen mediante el indicador *IOD* (Indoor Overheating Degree o Grados de Sobrecalentamiento Interior). Este indicador fue propuesto por Hamdy *et al.* (2017) y estima, para cada zona y durante su periodo de ocupación, cuánto excede la temperatura operativa interior una cierta temperatura límite de confort. En base al valor obtenido para *IOD*, se caracteriza el impacto de la ola de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} IOD \leq 0.5^{\circ}\text{C} & \quad \text{ola de impacto moderado} \\ 0.5^{\circ}\text{C} < IOD \leq 2^{\circ}\text{C} & \quad \text{ola de impacto fuerte} \\ IOD \geq 2^{\circ}\text{C} & \quad \text{ola de impacto extremo} \end{aligned} \quad (3)$$

Este índice se obtiene por simulación computacional para un conjunto de olas de calor (por ejemplo, para las olas históricas) y para un tipo determinado de edificios (por ejemplo, para vivienda social) en la localidad de interés. Una vez obtenido este conjunto de datos, la metodología demuestra que existe una relación lineal entre este índice y dos características de las olas: su severidad y la temperatura máxima alcanzada durante la ola. De esta forma, la relación se expresa como:

$$IOD = A + B \times Severidad + C \times TMX_{ola} \quad (4)$$

en donde los coeficientes *A, B, C* se determinan mediante regresión multivariada. Es decir, una vez que se tienen estos coeficientes, simplemente con conocer la severidad y temperatura máxima de una ola es posible calcular el *IOD* y determinar su impacto (moderado, fuerte o extremo). La ventaja de contar con esta relación lineal radica en que, para otras olas de calor (por ejemplo, olas futuras), ya no es necesario simular la vivienda para obtener el *IOD* sino que la misma relación permite estimar

el índice y clasificar la ola según su impacto en el ambiente interior. En Flores Larsen *et al.* (2022) se ejemplifica la metodología con su aplicación a una vivienda social unifamiliar en Buenos Aires. En el caso de Salta, se trabaja en base a la misma vivienda, cuya descripción completa puede encontrarse en el mencionado trabajo.

Finalmente, para elegir una ola representativa para cada categoría de impacto en el ambiente interior (moderado, fuerte o extremo), se calcula la mediana de cada grupo de olas. Seleccionar la ola representativa de cada categoría permite contar con un evento característico para estudiar el comportamiento térmico de viviendas y edificios y su resiliencia térmica bajo condiciones de olas de calor con diferente impacto en los ambientes interiores.

3. RESULTADOS

3.1. Olas de calor históricas (1991-2020) detectadas con el método de Ouzeau

Para Salta Aero, los percentiles 99,5, 97,5 y 95 de la distribución de la temperatura media diaria durante 30 años (1991-2020) que definen los umbrales del método de Ouzeau son 24°C (S_{int}), 24.7°C (S_{deb}) y 26.2°C (S_{pic}). Esto significa que se detecta una ola de calor cuando la temperatura media supera los 24.7°C durante al menos 3 días, excediendo en uno de ellos los 26.2°C . La figura 4 muestra las 39 olas de calor detectadas en el periodo 1991-2022 (y listadas en el Anexo 1) utilizando este método. En dicha figura, las olas ubicadas hacia la derecha son las más largas, las ubicadas hacia arriba son las que presentaron temperaturas máximas diarias más altas y las burbujas de mayor diámetro muestran las olas las que fueron más severas (una combinación entre temperaturas máximas y duración). La ola de calor más larga (13 días) y más severa (22.1) fue la del 17/11/2009. Sin embargo, la que presentó la mayor temperatura máxima fue una ola de 4 días de severidad 4.4 (27/10/2019). Es decir, no siempre la ola más severa es la que presenta la mayor temperatura máxima, sino que interviene también su duración. Por otra parte, es interesante observar la gran cantidad de olas de corta duración: el 74% de las olas detectadas duraron entre 3 y 4 días.

La figura 5 muestra las temperaturas máximas, las máximas de las mínimas diarias, las máximas de las medias diarias y la severidad global en las olas de calor detectadas. En cuanto a la frecuencia de ocurrencia, se tienen 12.2 olas/década, con temperaturas máximas que oscilan entre 33 y 39.3°C y mínimas entre 17.6 y 21.5°C . Con excepción de la ola de 2009, las severidades oscilaron entre 1.3 y 9. La mayoría de las olas ocurrió en Diciembre (36%), seguida de Noviembre (21%).

3.2. Olas de calor futuras en Salta

Las figuras 6 a 9 muestran los resultados obtenidos para las futuras olas de calor predichas con el modelo REMO2015-MPI-ESM-LR. La Fig. 6 muestra el crecimiento rápido del número de olas de calor detectados por el método de Ouzeau para años futuros. Se incluyeron las olas de calor observadas en el periodo 1991-2022 como referencia. Es interesante notar que la cantidad de olas de calor se mantiene relativamente constante al inicio, con un incremento creciente que se agudiza hacia finales de siglo. Por ejemplo, para el periodo 1991-2020 se detectaron 37 olas, mientras que en 2031-2060 este valor se incrementa a 148 (4 veces más olas que en el periodo actual) y en 2071-2100 a 362 (casi 10 veces más olas que en el periodo actual).

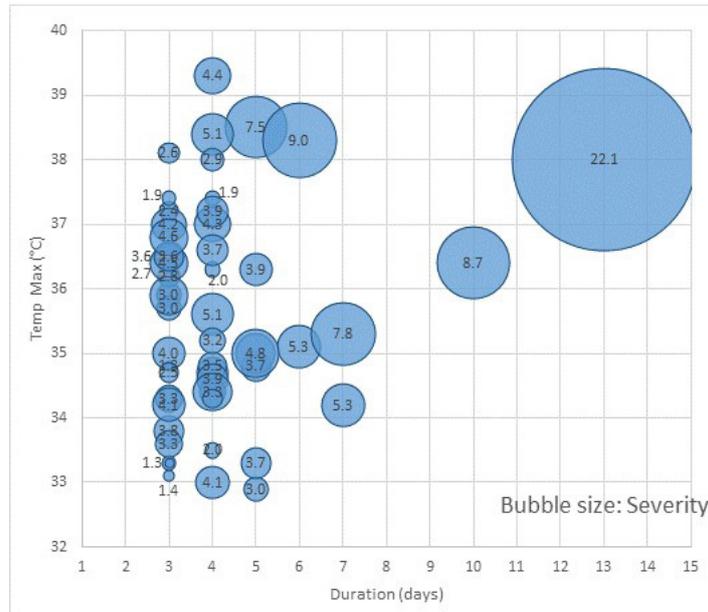


Fig. 4. Olas de calor detectadas por el método de Ouzeau para Salta Aero, periodo 1991-2022.

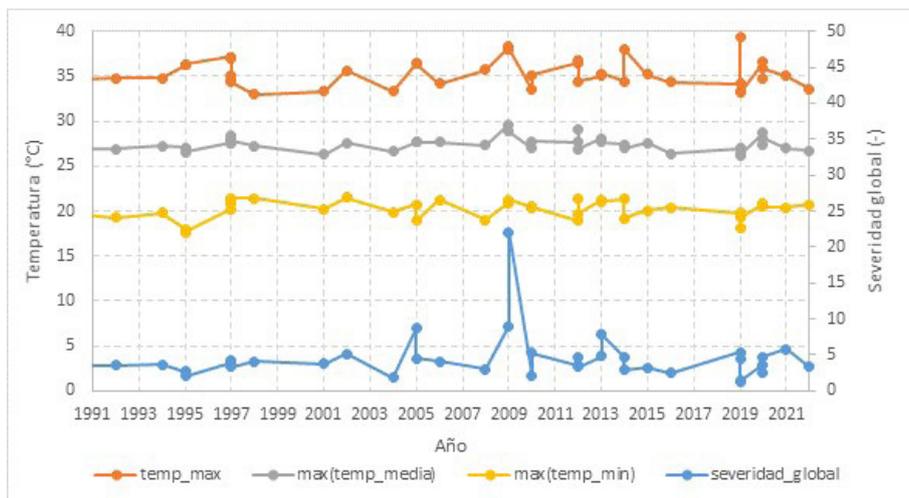


Fig. 5. Para cada ola de calor en el periodo 1991-2022 se muestra la temperatura máxima alcanzada durante la ola, la mínima más alta, la temperatura media más alta y la severidad global del evento, para Salta Aero.

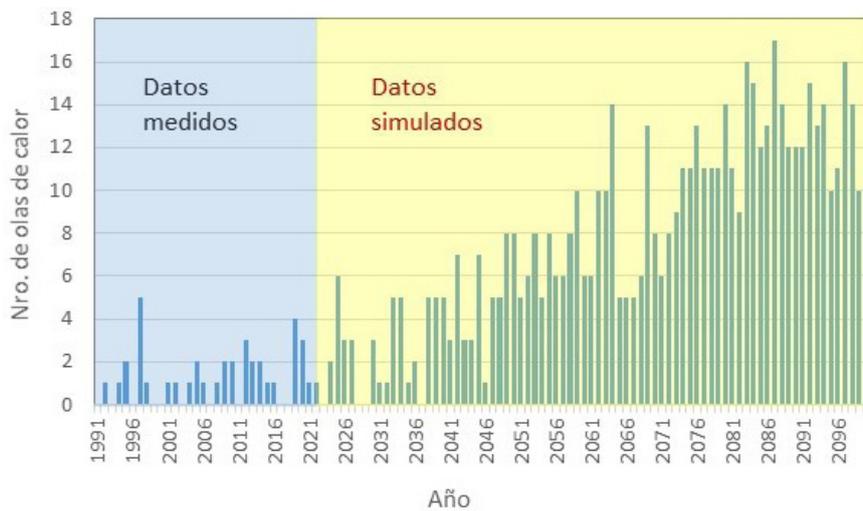


Fig. 6. Número de olas de calor observadas (1991-2022) y predichas (2023-2100) con el modelo REMO2015-MPI-ESM-LR (con corrección de bias), para Salta.

La figura 7 muestra con mayor detalle que no sólo se incrementará la cantidad de olas de calor en el futuro, sino también sus temperaturas máximas y su severidad. Se observa un crecimiento exponencial de la severidad, con una aceleración importante a partir de 2040. Por ejemplo, la ola de calor de noviembre de 2009 que fue un evento completamente excepcional (una vez en 30 años) será menos infrecuente en 2031-2060 (cuatro veces cada 30 años). Hacia finales de siglo eventos como el de noviembre de 2009 serán habituales (32 cada 30 años) e incluso muchas de las olas de calor tendrán el doble de severidad y temperaturas máximas que superarán ampliamente los 40°C. También es notorio el incremento de las temperaturas mínimas, con valores que pasarán de alrededor de 20°C (periodo actual) a superar los 25°C en el futuro lejano. Estos aumentos de temperatura mínima implican, en los edificios, que la ventilación nocturna será cada vez menos efectiva.

Finalmente, la figura 8 muestra la duración de las olas de calor detectadas a lo largo de los años (izquierda) y la distribución de las olas de calor de acuerdo a su duración para los tres periodos estudiados (derecha). Se observa un incremento importante en las duraciones de las olas de calor a lo largo de los años: si bien las olas de 3 y 4 días seguirán siendo las más frecuentes, olas de más

de una semana de duración no serán infrecuentes. De esta forma, el total de días por año en los que hay olas de calor pasa de 5 días/año (actual) a 26 días/año (2031-2060) y, en el futuro lejano, 77 días/año (2071-2100). Este último valor es alarmante, pues indicaría que casi 1 de cada 5 días del año sería clasificado como ola de calor de acuerdo a la definición actual.

3.3. Clasificación de las olas de calor en base a su impacto en los ambientes interiores

La clasificación de todas las olas de calor históricas (1991-2020) detectadas de acuerdo a su impacto en el sobrecalentamiento interior se incluyó en el Anexo 1. Se observa que, para el periodo histórico, ocurrieron 5 olas moderadas, 29 olas fuertes y 5 olas extremas, es decir, prevalecen las olas con impacto en el rango intermedio y son menos frecuentes las olas moderadas y las extremas. Como se verá en los párrafos siguientes, esta distribución se modificará hacia fines de siglo. La ola de mayor impacto en el ambiente interior en este periodo de 30 años fue la de noviembre de 2009, que registró también la de mayor duración y severidad. La Tabla 1 incluye la información de cada grupo y los rangos de duración, severidad y temperatura máxima alcanzada. Es interesante observar que una ola de calor de cuatro días

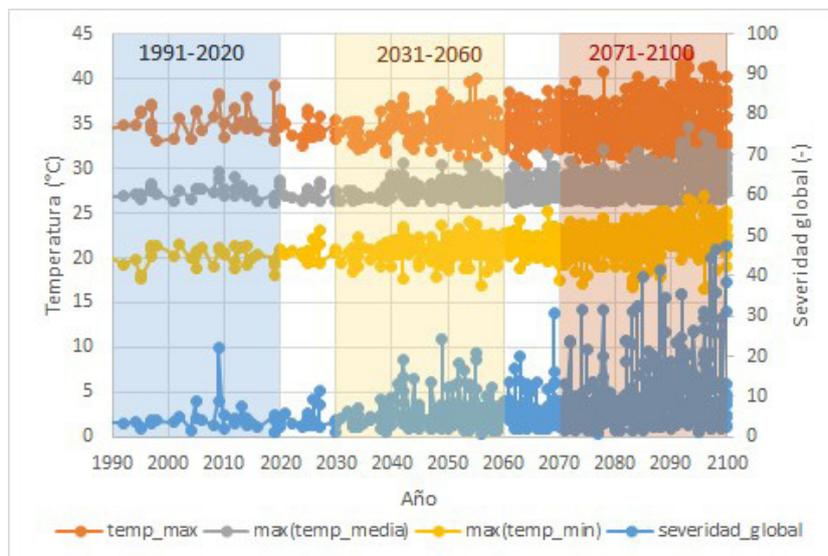


Fig. 7. Para cada ola de calor en el periodo 1991-2100 se muestra la temperatura máxima alcanzada durante la ola, la mínima más alta, la temperatura media más alta y la severidad global del evento, para Salta.

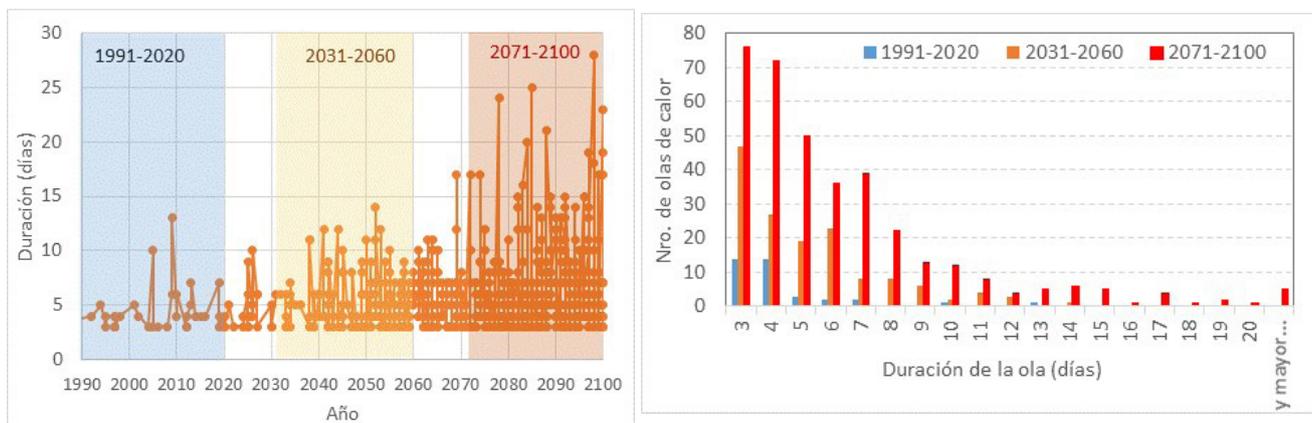


Fig. 8. Duración de las olas de calor (izquierda) y distribución de dichas olas según su duración para los periodos 1991-2020 (datos observados para Salta Aero), 2031-2060 y 2071-2100 (datos predichos con el modelo REMO2015-MPI-ESM-LR).

puede tener impacto moderado, fuerte o extremo, dependiendo de las temperaturas máximas y la severidad. Por otra parte, la duración de las olas moderadas fue de entre 3 y 4 días, mientras que duraciones de más de una semana corresponden a olas con un impacto extremo en el ambiente interior.

La ola representativa de cada grupo, estimada en base a su severidad, se calculó mediante la mediana y se muestra recuadrada en el Anexo 1. Debe destacarse que estas olas son representativas de sus grupos, con ubicación central en los mismos (no en sus extremos). La figura 9 muestra las temperaturas máxima, mínima y media diaria de cada una de las tres olas representativas de impacto moderado (Enero/2004, 3 días de duración, severidad 1.83), fuerte (Diciembre/1997, 4 días de duración, severidad 3.9) y extremo (Enero/2005, 10 días de duración, severidad 8.7). Estas olas específicas pueden utilizarse para analizar la resiliencia de viviendas y edificios a eventos extremos de calor.

Finalmente, la figura 10 muestra el número de olas de calor y porcentaje según la categoría de impacto sobre el ambiente in-

terior, para los periodos 1991-2020, 2031-2060 y 2071-2100. Se observa el crecimiento de la cantidad de olas extremas, que pasa de un 13% en el periodo actual a un 55% en el futuro lejano. Es importante notar que, para el futuro cercano, 4 de cada 5 olas de calor tendrán impacto fuerte y extremo en los ambientes interiores. Estos resultados confirman el hecho de que los edificios que se diseñen hoy deberán afrontar condiciones climáticas adversas en el futuro y que, por lo tanto, deben incorporar estrategias que les permitan ser resilientes frente a estos eventos extremos.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza las olas de calor históricas y futuras para la ciudad de Salta y su impacto en los ambientes interiores. Se observa un incremento en la duración, severidad y frecuencia con una aceleración importante a partir de 2040. Las olas históricas ocurridas en el pasado (1991-2020) muestran una frecuencia de ocurrencia de 12.2 olas/década, con temperaturas máximas que oscilan entre 33 y 39.3°C y mínimas entre 17.6 y 21.5°C. La mayoría de las olas ocurrió en Diciembre (36%), seguida de

Tabla 1. Características de las olas de calor detectadas en el periodo 1991-2020, agrupadas según su impacto en el ambiente interior.

	Impacto moderado	Impacto fuerte	Impacto extremo
Número de olas	5	29	5
Rango de duración (días)	3 - 4 días	3 - 7 días	4 - 13 días
Rango de severidad	1.27-2.47	2.0-5.3	4.4-22.1
Rango de temperaturas máximas	33.1-34.3°C	33.0-37.2 °C	35.3-39.3°C

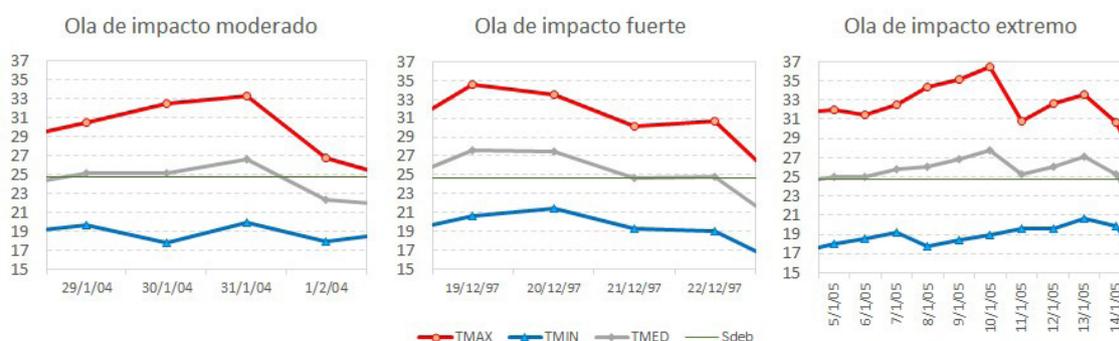


Fig. 9. Temperaturas máxima, mínima y media diaria de cada una de las tres olas representativas de impacto moderado (29/01/2004, 3 días de duración, severidad 1.83), fuerte (19/12/1997, 4 días de duración, severidad 3.9) y extremo (5/01/2005, 10 días de duración, severidad 8.7).

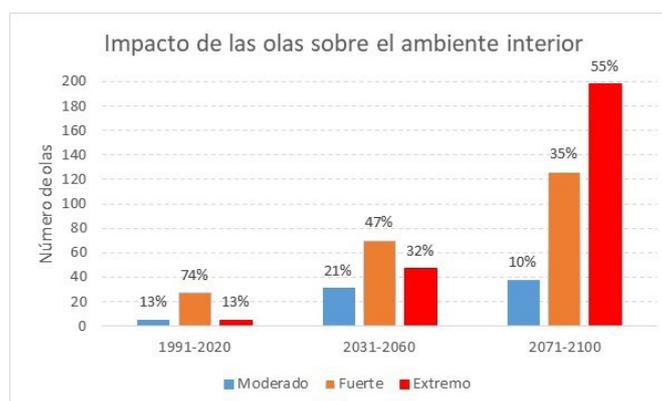


Fig. 10. Número de olas en cada categoría de impacto sobre el ambiente interior (moderado, fuerte y extremo) para los periodos 1991-2020, 2031-2060 y 2071-2100.

Noviembre (21%). En el futuro, el modelo regional REMO2015-MPI-ESM-LR muestra un crecimiento lento pero constante de la cantidad de olas en los años posteriores a 2020 y una notoria aceleración desde 2040 hasta el final del siglo. Por ejemplo, para el periodo histórico 1991-2020 se detectaron 37 olas, mientras que en 2031-2060 este valor se multiplicará por 4 y en 2071-2100 ocurrirán 10 veces más olas que en el periodo actual. La duración también sufrirá cambios significativos: olas de más de una semana de duración serán más habituales. De esta forma, el total de días por año en los que hay olas de calor pasa de 5 días/año (actual) a 26 días/año (2031-2060) y, en el futuro lejano, 77 días/año (2071-2100). Este último valor es alarmante, pues indicaría que casi 1 de cada 5 días del año sería clasificado como ola de calor de acuerdo a la definición actual.

En cuanto al impacto en ambientes interiores, se observa que, para el periodo histórico 1991-2020, el 13% fueron olas moderadas, 75% olas fuertes y 13% olas extremas, es decir, prevalecieron las olas con impacto en el rango intermedio y fueron menos frecuentes las olas moderadas y las extremas. Esta distribución se modificará hacia fines de siglo, con el 55% de las olas clasificadas como extremas y sólo un 10% como moderadas. El estudio permitió además seleccionar una ola “representativa” de los impactos en el ambiente interior, lo cual permite contar con un evento característico para estudiar el comportamiento térmico de viviendas y edificios, su resiliencia térmica y sus probables consumos energéticos durante olas de calor con diferente impacto en los ambientes interiores.

Una de las limitaciones del trabajo fue la utilización de un único modelo regional (REMO2015) anidado en el modelo global MPI-ESM-LR, el cual es considerado en la literatura como el modelo global más conservativo y con resultados más cercanos al promedio del conjunto de modelos disponibles. En el futuro, debería extenderse el análisis para incluir un conjunto más amplio de modelos RCM anidados en distintos GCM para evitar resultados sesgados hacia un modelo en particular. Esto permitiría además estudiar la variabilidad de las predicciones, como sugiere Coronato (2022). Una segunda limitación es la corrección de bias utilizada para la temperatura ambiente, la cual considera correcciones mensuales. En trabajos futuros podría estudiarse la efectividad de utilizar métodos estadísticos más sofisticados para realizar estas correcciones.

Chris Field, reconocido investigador sobre cambio climático del Stanford Woods Institute for the Environment de EEUU advierte: “estamos viendo breves períodos de temperaturas y humedad tan altas que incluso los humanos sanos no pueden sobrevivir a una exposición prolongada. Sabemos mucho sobre la relación entre las olas de calor y el calentamiento climático y sabemos mucho sobre los impactos de las olas de calor históricas, especialmente para los más vulnerables, pero ahora nos estamos moviendo hacia un mundo mayormente desconocido con temperaturas sin precedentes, persistencia, frecuencia, y distribución. En el futuro previsible necesitaremos vivir con calor y debemos ser inteligentes sobre la forma en que lo hacemos” (Field, 2022).

En diciembre de 2019 fue aprobada la ley N° 27520 de Presupuestos Mínimos de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático Global de Argentina, que estipula la elaboración del Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático, así como de los Planes de Respuestas Jurisdiccionales. La advertencia de que “debemos ser inteligentes” para afrontar las consecuencias de temperaturas más elevadas debería contemplar, en los planes de adaptación mencionados, el diseño de viviendas resilientes a estas condiciones extremas. En esta línea, el presente trabajo

busca aportar herramientas de análisis que permitan diseñar estas viviendas para que ofrezcan un ambiente seguro a sus habitantes bajo condiciones de calor extremo.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Universidad Nacional de Salta (Proyecto CIUNSA A2489), a la Fundación Williams y a la Red Iberoamericana De Eficiencia Y Salubridad En Edificios (IBERESE) de CYTED (<https://www.cyted.org/node/13398>) por el financiamiento y soporte a las actividades realizadas en este trabajo. También agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por la provisión de datos de temperatura en la estación Salta Aero y al World Climate Research Program por la provisión de datos de la base CORDEX.

REFERENCIAS

- CCAFA, 2023. “Bias-correction”. *Climate Change, Agriculture and Food Security*. Disponible en: <https://www.ccafs-climate.org/>
- CIMA 3CN, 2023. Base de Datos Climáticos para la 3° Comunicación Nacional. Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera (CIMA UBA/CONICET). Disponible en: <http://3cn.cima.fcen.uba.ar/>
- Copernicus, 2023. Copernicus Climate Change Service – Global Impacts. Disponible en: <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet7.pdf>
- Coronato T. (2022). *Olas de calor estivales en el centro-este de Argentina: de la física 685 a los impactos*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n7115_Coronato.pdf
- Diario Perfil, 2023. “Las temperaturas fueron tan altas en algunos puntos del país que el Servicio Meteorológico agregó un nuevo color”. 10 de Marzo de 2023. Disponible en: <https://www.perfil.com/noticias/actualidad/temperaturas-fueron-altas-algunos-puntos-pais-servicio-meteorologico-agrego-nuevo-color.phtml>
- Field C. (2022). Building Climate Resilience: The Case of Extreme Heat. Webinar - Julio 28, 2022. YouTube: @StanfordWoodsInstitute. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=X-r8osnA_Hs
- Flores-Larsen S., Bre F., and Hongn M. (2022). A performance-based method to detect and characterize heatwaves for building resilience analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167 (2022) 112795. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112795>
- Flores-Larsen S., Filippín C., Bre F., New metrics for thermal resilience of passive buildings during heat events, *Building and Environment* 230, 2023, 109990, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109990>
- Giorgi, F. and Gutowski, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1): 467–490. doi: 755 10.1146/annurev-environ-102014-021217
- Hamdy M, Carlucci S, Hoes PJ, Hensen JLM. The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study. *Build Environ* 2017; 122: 307–23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>

- Hawkins E., Osborne T.M., Ho C.K., Challinor A.J., Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe, *Agricultural and Forest Meteorology* 170 (2013), pp. 19-31, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.007>.
- HNMS, 2023. Hellenic National Meteorological Service. Disponible en: <http://www.emy.gr/emyl/el/>
- Infobae, 2023. Available at: <https://www.infobae.com/america/america-latina/2023/03/01/cerca-de-20-millones-de-personas-se-quedaron-sin-luz-en-argentina-por-un-gran-apagon/>
- IPCC, 2022. Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestedt, A. Reisinger (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930, doi:10.1017/9781009325844.029. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf
- ISIMIP, 2023. “Fact Sheet: Bias correction in the ISI-MIP”. *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project*. Disponible en: https://www.isimip.org/documents/16/Fact_Sheet_Bias_Correction.pdf
- Kanti F.S., Anna Alari, Basile Chaix, Tarik Benmarhnia, Comparison of various heat waves definitions and the burden of heat-related mortality in France: Implications for existing early warning systems, *Environmental Research*, Volume 215, Part 2, 2022, 114359, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114359>
- La Nación, 2022. “La ola de calor es global: ayer se registró en Australia la máxima temperatura histórica del hemisferio sur”. Disponible en: <https://www.lanacion.com.ar/el-mundo/la-ola-de-calor-es-global-ayer-se-registro-en-australia-la-maxima-temperatura-del-hemisferio-sur-nid14012022/>
- Machard A, Inard C, Alessandrini JM, Pelé C, Ribéron J. A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data. *Energies* 2020; 13:3424.
- Maraun, D. Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *J. Clim.* 26, 2137–2143 (2013). Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00821.1>
- MAYDS. 2021. Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4to%20Informe%20Bienal%20de%20la%20Rep%C3%ABblica%20Argentina.pdf>
- Met Office, 2023. “What is a heat wave?”. Met Office National Climate Information Centre. Disponible en: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/temperature/heatwave>
- Ouzeau G, Soubeyrou JM, Schneider M, Vautard R, Planton S. Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Service* 2016; 4: 1–12.
- J.-M. Soubeyrou, G. Ouzeau, M. Schneider, O. Cabanes, R. Koukou-Arnaud. Les vagues de chaleur en France : analyse de l’été 2015 et évolutions attendues en climat futur. *Meteorol.*, 8 (2016), p. 45, 10.4267/2042/60704
- Parker T, Berry G, Reeder M. The Structure and Evolution of Heat Waves in Southeastern Australia. *J Climate* 2014; 27: 5768-85. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00740.1>
- Perkins SE, Alexander LV. On the Measurement of Heat Waves. *J Climate* 2013; 26 (13): 4500-17. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- Russo, S., Sillmann, J. & Sterl, A. Humid heat waves at different warming levels. *Scientific Reports* 7, 7477 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07536-7>
- Sherwood, S. C. and Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21): 9552–9555. doi: 10.1073/pnas.0913352107.
- SMN, 2022a. Informe Especial N°3 por ola de calor – Temporada 2021/2022. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: https://www.smn.gov.ar/sites/default/files/Oladecalor_3_enero2022.pdf
- SMN, 2022b. Boletín climatológico Enero 2022. ISSN 2314-2332. Disponible en: https://www.smn.gov.ar/sites/default/files/Clim-Ene2022_0.pdf
- SMN, 2023a. Informe Especial N°9 por ola de calor / altas temperaturas - temporada 2022-2023. Disponible en: https://www.smn.gov.ar/sites/default/files/informe_oladecalor_2802a10703_2023.pdf
- SMN, 2023b. Características: Estadísticas de largo plazo. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: <https://www.smn.gov.ar/estadisticas>