

EFFECTIVIDAD A FUTURO DE LAS ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVAS EN VIVIENDAS

FUTURE EFFECTIVENESS OF PASSIVE HOUSE DESIGN STRATEGIES

EFICÁCIA FUTURA DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO EM HABITAÇÃO

Gustavo Javier Barea Paci

Instituto de Ambiente Hábitat y Energía
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-5643-3206>
gbarea@mendoza-conicet.gob.ar

Carolina Ganem Karlen

Instituto de Ambiente Hábitat y Energía
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1431-1219>
cganem@mendoza-conicet.gob.ar

Maria Cecilia Molina

Instituto de Ambiente Hábitat y Energía
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0005-8847-5995>
arqmolina.maria@gmail.com

Pia Mateo

Centro Científico Tecnológico (CCT), Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0002-9069-1150>
mateo.pia@gmail.com



RESUMEN

Las estrategias de diseño arquitectónico pasivo han sido una respuesta efectiva a la crisis energética del siglo XX. En climas templados, su integración resulta en comportamientos térmicos en los que se combinan el confort interior y la eficiencia energética. Sin embargo, los escenarios de cambio climático proyectados a futuro no ofrecerán los mismos rendimientos, resultando dichas estrategias menos efectivas. El objetivo de este trabajo es la cuantificación del cambio relativo en la efectividad de las estrategias de diseño pasivas en viviendas para clima árido templado-frío (Bwk), tomando como ejemplo la ciudad de Mendoza (Argentina). Respecto de las proyecciones de clima futuro para clima árido cálido (Bwh), utilizando el escenario RCP8.5 del CMIP5, equivalente al escenario SSP85 del CMIP6 del IPCC, los resultados muestran una disminución del 20% en la cantidad de horas en confort anual, con un incremento del 24% en la necesidad de estrategias pasivas de verano.

Palabras clave

cambio climático, arquitectura sustentable, viviendas unifamiliares

ABSTRACT

Passive architectural design strategies have been an effective response to the energy crisis of the 20th century. In temperate climates, their integration results in thermal behaviors that combine indoor comfort and energy efficiency. However, projected future climate change scenarios will not offer the same performances, resulting in such strategies being less effective. The objective of this work is to quantify the relative change in the effectiveness of passive design strategies in dwellings for arid temperate-cold climates (Bwk), taking the city of Mendoza (Argentina) as an example. Regarding future climate projections for warm arid climates (Bwh), using the CMIP5's RCP8.5 scenario, equivalent to the IPCC's CMIP6 SSP85 scenario, the results show a 20% decrease in the number of hours in annual comfort, with a 24% increase in the need for passive summer strategies.

Keywords

climate change, sustainable architecture, single-family houses.

RESUMO

As estratégias de projeto arquitetônico passivo têm sido uma resposta eficaz à crise energética do século XX. Em climas temperados, sua integração resulta em comportamentos térmicos que combinam conforto interno e eficiência energética. No entanto, os cenários de mudanças climáticas projetados para o futuro não oferecerão os mesmos desempenhos, tornando essas estratégias menos eficazes. O objetivo deste trabalho é quantificar a mudança relativa na eficácia das estratégias de projeto passivo em habitações para clima árido temperado-frio (Bwk), tomando como exemplo a cidade de Mendoza (Argentina). Com relação às projeções climáticas futuras para o clima árido quente (Bwh), usando o cenário CMIP5 RCP8.5, equivalente ao cenário CMIP6 SSP85 do IPCC, os resultados mostram uma redução de 20% no número de horas de conforto anual, com um aumento de 24% na necessidade de estratégias passivas de verão.

Palavras-chave

mudanças climáticas, arquitetura sustentável, habitações unifamiliares.

INTRODUCCIÓN

En Argentina se han observado cambios desfavorables en el clima desde la segunda mitad del siglo pasado, los cuales, según las proyecciones de los modelos climáticos, se intensificarían en este siglo (Agosta et al., 2015) (Flores-Larsen et al., 2019). Producto de estos cambios, las olas de calor aumentaron su frecuencia en toda la región.

A mitad de diciembre de 2013 comenzó una intensa ola de calor, la más larga e intensa registrada hasta el 2021, que perduró hasta casi mitad de enero, y que geográficamente abarcó el centro de Argentina, incluyendo Buenos Aires, Córdoba y Mendoza; con temperaturas máximas por encima de 40 °C y mínimas mayores a 24 °C.

La distribución de energía eléctrica colapsó en muchos sectores del área metropolitana de Buenos Aires debido al récord de consumo por el intenso uso de los equipos de aire acondicionado. Más recientemente, entre diciembre de 2022 y febrero de 2023, se registraron 10 olas de calor en el territorio argentino, de las cuales 3 fueron particularmente intensas y prolongadas en el tiempo. La Figura 1 presenta los registros de dichas anomalías de temperatura.

El cambio climático está teniendo y tendrá grandes impactos en el consumo de energía de los edificios y el diseño de futuros edificios debería considerar esta situación. El sector edilicio, incluyendo los sectores residenciales y comerciales, es responsable de entre el 30% y el 40% de la demanda total de energía mundial y emite un tercio de las emisiones mundiales de GEI

(Bhamare et al., 2019). Asimismo, se espera que el uso de energía y las emisiones relacionadas se dupliquen, o incluso se tripliquen, para mediados del presente siglo debido a varias tendencias claves, sobre todo al aumentar los estándares de niveles de vida de la población. En este contexto, los edificios representan una pieza crítica para un futuro con bajo nivel de emisiones y, al mismo tiempo, un desafío global para la integración con el desarrollo sostenible (Barea, 2022; Flores-Larsen et al., 2019; Flores-Larsen et al., 2021; Ganem et al., 2021; Rubio et al., 2015; Ruiz et al., 2022; Sánchez et al., 2017).

Es importante destacar que la severidad del clima tiene una gran influencia en el diseño de los edificios. Por lo tanto, se requiere una revisión exhaustiva de los diseños arquitectónicos actuales y la adopción de nuevas estrategias adaptadas al Cambio Climático. El potencial de ahorro energético tanto en edificios nuevos como en los ya existentes oscila entre un 50% y un 90% (Chalmers, 2015).

Según Lacaze et al. (2021), dicho potencial de ahorro depende de la estrategia implementada en el edificio. Estos autores elaboraron una estimación del consumo energético e identificaron las alternativas más favorables al ahorro de consumo, emisiones de GEI y sus costos asociados. En la figura 2 se observan las estimaciones de ahorro implementando materiales eficientes, equipamientos certificados y dispositivos inteligentes, para Argentina.

Elias (2017) y Brager y de Dear (1998) han sugerido que, para diseñar los edificios y optimizar su confort térmico

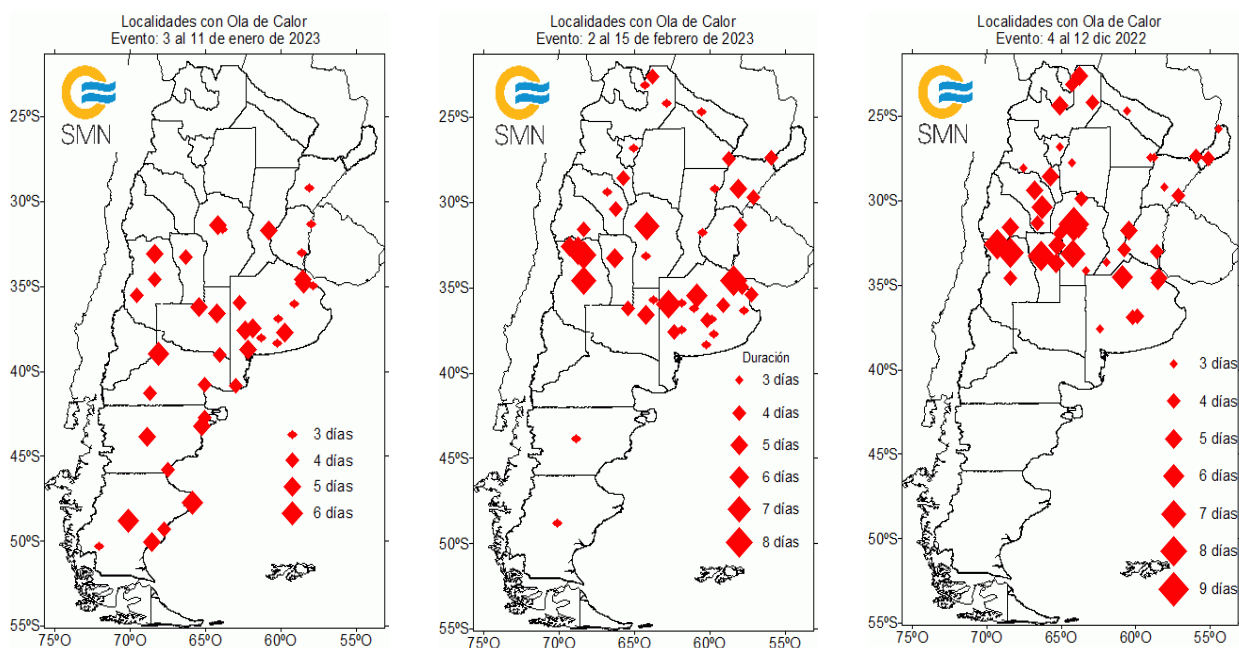
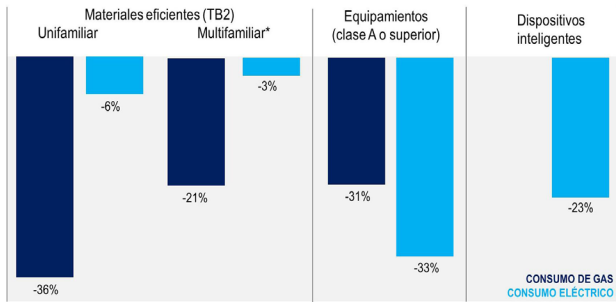


Figura 1. Olas de calor registradas en el territorio argentino durante el período estival 2022-2023. De izquierda a derecha: a) del 4 al 12 de diciembre del 2022; b) del 3 al 11 de enero del 2023 y c) del 2 al 15 de febrero del 2023. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2022, 2023a y 2023b)



(*) Comprende nuevos proyectos y también ejecución de reformas en unidades existentes.
 Fuente: elaboración propia con base en Tejani et al. (2011) y Darhanpé et al. (2021)

Figura 2. Estimación de porcentaje de ahorro según modelo y estrategia de intervención. Fuente: Lacaze et al., 2022

en los próximos años, sin cargar el ecosistema con una mayor degradación ambiental, se deben conocer las predicciones sobre las condiciones climáticas futuras en diferentes ciudades. De este modo, se puede anticipar cualquier cambio y contrarrestar sus efectos mediante la eficiencia energética, un mejor diseño y, en última instancia, el ahorro de energía (Li et al., 2012).

En Argentina, el Centro de Investigaciones Marinas y Atmosféricas (CIMA) elaboró un informe sobre las tendencias climáticas (segunda mitad del siglo XX) y una proyección del clima futuro (siglo XXI) como parte de los estudios de referencia para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (3CN Cima, 2022). El estudio se centra en las tendencias observadas y proyectadas

de la temperatura y las precipitaciones en superficie y en algunos de los índices extremos que pueden causar impactos relevantes.

En función de lo expresado, el objetivo principal de este trabajo es cuantificar el cambio relativo en la efectividad de las estrategias pasivas de diseño en viviendas, en un clima árido templado-frío (Bwk), tomando como caso a la ciudad de Mendoza (Argentina).

Esto permitirá identificar qué medidas de diseño ganarán o perderán importancia debido al calentamiento climático y la correlación entre la eficacia de los sistemas pasivos analizados. Los resultados del análisis serán directamente aplicables a los diseñadores de edificios. Así también, este trabajo intenta aportar al desarrollo de metodologías para la elaboración de archivos de cambio climático para la simulación dinámica de edificios.

METODOLOGÍA

En una primera instancia, se analizó el potencial bioclimático de un clima templado continental de Argentina (Mendoza, -33° 9' LS, 69° 15' LO) mediante la herramienta BcChart (Košir, 2018).

El análisis del potencial bioclimático correlaciona las características climáticas esenciales, como la temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación solar, con la capacidad de lograr el confort de los ocupantes del edificio a través de los sistemas solares pasivos de

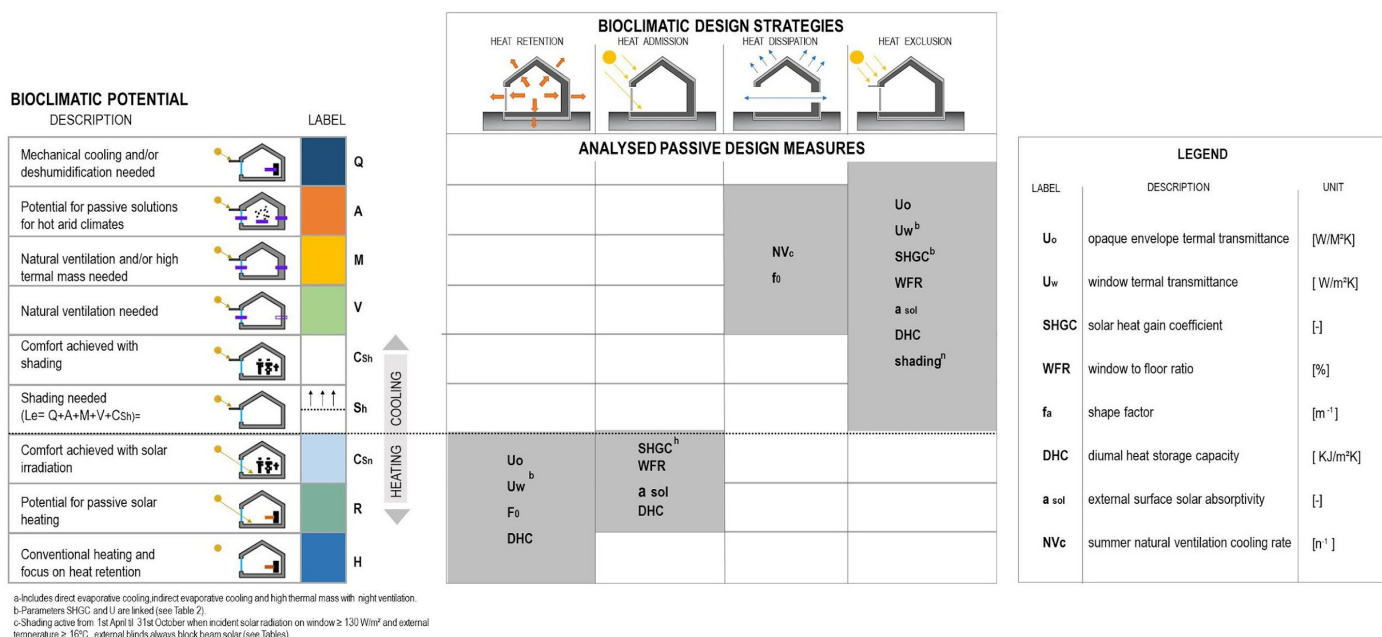


Figura 3. Medidas de potencial bioclimático calculadas por BcChart y medidas de diseño pasivo analizadas. Fuente: Košir et al., 2017; Košir, 2019

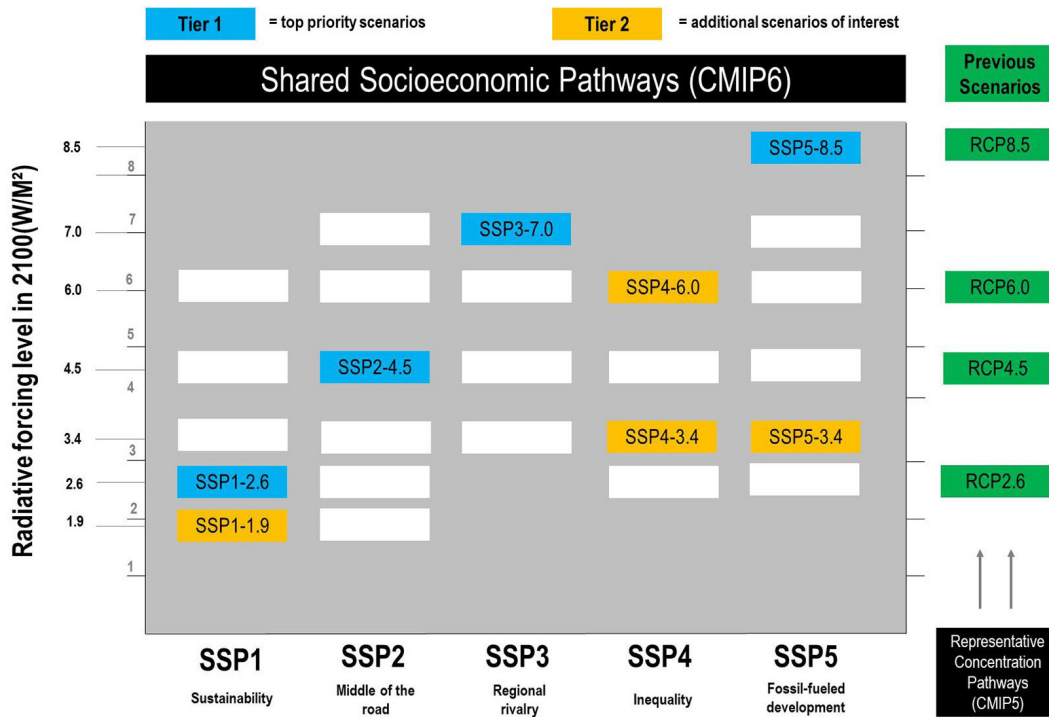


Figura 4. Vías socioeconómicas compartidas y combinaciones de forzamiento radiativo del año 2100 utilizadas en Scenarío MIP.
 Fuente: O'Neill et al., 2016

edificios. Este estudio permite representar, a través del potencial pasivo, la adaptación climática de los edificios para el clima estudiado. Los cálculos se basan en la teoría de gráficos bioclimáticos de Olgyay (1963), utilizando la temperatura del aire, la humedad relativa (RH) y la radiación solar global. La zona de confort se define entre 21 y 27 °C y entre 20 y 80 % RH.

Las combinaciones de las variables climáticas determinarán si se pueden usar ciertas soluciones pasivas para lograr el confort térmico, o si se necesitarán sistemas activos (refrigeración mecánica, calefacción convencional)

En la Figura 3 se presentan las definiciones de cada potencial bioclimático determinado por BcChart. La relación entre el potencial bioclimático y las medidas de diseño pasivo analizadas está indicado siempre que se pueda utilizar una determinada medida de diseño para facilitar una mejor respuesta térmica pasiva de un edificio y, en consecuencia, una mayor eficiencia energética.

Posteriormente, se analiza cómo el potencial bioclimático del clima estudiado se modificaría a hacia el año 2100. La elección de ese año específico responde a las siguientes hipótesis: En primer lugar, es importante aclarar que, aunque el ciclo de vida promedio de un edificio es de aproximadamente 50 años, algunos edificios están diseñados y construidos para durar más tiempo. Por otro lado, se espera que, para ese momento, los efectos del cambio climático sean más evidentes y puedan tener un impacto significativo en el comportamiento y la eficiencia energética de los edificios.

Para ello, se utilizaron datos de escenario climáticos futuros del IPCC. El Quinto Informe de Evaluación del IPCC ha definido cuatro nuevos escenarios de emisiones, las denominadas Vías de Concentración Representativas (RCP), que tienen en cuenta los efectos de las políticas del siglo XX en la mitigación del cambio climático.

El forzamiento radiativo (FR) total previsto para el año 2100 oscila entre 2,6 y 8,5 W/m². Los cuatro RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos de mitigación conducen a un nivel muy bajo de forzamiento (RCP 2,6), dos escenarios de estabilización (RCP 4,5 y RCP 6,0) y un escenario (RCP 8,5) con un nivel muy alto de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero).

Es importante señalar que, hasta mediados del siglo XXI, las diferencias en los resultados entre los RCP son muy pequeñas, debido a que el sistema climático responde con relativa lentitud a los cambios en la concentración de GEI. Por ello, se ha tomado el escenario RCP 8.5 para los análisis posteriores, ya que proporciona un calentamiento mucho más rápido y cambios más pronunciados en indicadores importantes como el caudal de los ríos, la temperatura y las precipitaciones.

El sexto informe de evaluación del IPCC (AR6), se ha alimentado con el desarrollo de un nuevo conjunto de escenarios, denominado SSP, el cual se conforma a través del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 6 (CMIP6) del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP), el cual actualiza los RCP

del CMIP5. Los nuevos escenarios representan diferentes desarrollos socioeconómicos, así como diferentes vías de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Falco et al., 2019; López-Franca et al., 2016).

La Figura 4 muestra una matriz que representa todas las combinaciones posibles de SSP y forzamiento radiativo (RCP), las cuales se encuentran codificadas por colores para mostrar la prioridad de cada escenario. Los escenarios de nivel 1, o prioridad máxima, son SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (color azul). Tres de los cuatro escenarios de Nivel 1 son versiones actualizadas de escenarios RCP de CMIP5 anteriores (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5) para facilitar la comparación entre las proyecciones de CMIP5 y CMIP6. Los escenarios de nivel 2 son SSP1-1.9, SSP4-6.0, SSP4-3.4 y SSP5-3.4 (color naranja). Todas las demás combinaciones de forzamiento radiativo y SSP no son viables o no están designadas como una prioridad por ScenarioMIP (O'Neill et al., 2016). Como se observa en la figura 4, el escenario RCP8.5 del CMIP5, que es el que se ha utilizado en este trabajo, equivale a un escenario SSP85 del CMIP6, con una prioridad 1.

La metodología utilizada para generar los datos horarios futuros se conoce como *morphing* (Jentsch et al., 2008), que es un método que utiliza tanto un archivo meteorológico en tiempo real como predicciones de datos medios mensuales futuros de la variable de interés. Mediante transformaciones matemáticas de "desplazamiento" y "estiramiento" basadas en las medias mensuales presentes y futuras de las variables, un archivo meteorológico en tiempo presente se transforma en un archivo meteorológico futuro. La naturaleza de las transformaciones garantiza que la relación entre las variables meteorológicas se mantenga en el archivo meteorológico futuro. De este artículo, los datos horarios de tiempo presente fueron los del Año Meteorológico Típico (TMYx) basados en las medias del periodo 2007-2020.

Para las predicciones futuras, se ajustó el modelo ACCESS 1-3¹ RCP8.5, *rliipl* (con una grilla de 1.875 por 1.25 grados; o 68.7km por 111.1 km), con datos observacionales de reanálisis CRU TS4.05, para corroborar la bondad de predicción en el área de estudio. Se tomaron datos desde 1901 hasta 2021.

Es importante señalar que el modelo ACCESS 1-3 ha sido utilizado en otros estudios para simular el clima en regiones de climas templados continentales similares al caso de estudio tomado (Bi et al., 2020; Lorenz et al., 2014; Stone et al., 2016; Ziehn et al., 2020).

Para la cuantificación de la concordancia entre los datos de reanálisis y el modelo futuro (datos medios anuales), se utilizaron los siguientes indicadores estadísticos calculados ampliamente utilizados: *d* (Ecuación 1), MAE (Ecuación 2), RMSE (Ecuación 3) y BIAS (Ecuación 4):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|sim_i - obs| + |obs_i - obs|)^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |sim_i - obs_i| \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

d = Concordancia o índice de Willmott

MAE = Error medio absoluto

RMSE = Error cuadrático medio.

BIAS = Error medio

simi = Datos del modelo futuro

obsi = Datos de reanálisis medidos

obs = Datos medios de reanálisis medidos

n = Tamaño de la muestra

Luego, se analizaron anomalías por períodos de 50 años hasta el 2100 y se armaron los EPW futuros. Los datos se descargaron del sitio Climate Explorer del KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut), para Mendoza, Argentina.

Cabe destacar que, como limitante de estudio y también para este trabajo, se tomó la variable temperatura terrestre cada 3hs (del modelo ACCESS 1-3 RCP8.5, o *rliipl*). Posteriormente, se interpolaron para obtener datos horarios. Las demás variables climáticas fueron extraídas del TMYx original. Se utilizó el software Weather converter de Energy Plus para armar el EPW futuro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio se presentan en dos secciones. La primera parte presenta el análisis bioclimático de la localidad estudiada (Mendoza) con el clima actual, TMY. A continuación, se muestra la influencia del cambio climático en las estrategias bioclimáticas.

¹ ACCESS 1-3 es un modelo climático global desarrollado por el Centro de Investigación de CSIRO en Australia y el Centro de Investigación Conjunta de la Comisión Europea. Es utilizado en estudios de cambio climático y proyecciones climáticas para el futuro ya que puede simular cambios en las temperaturas superficiales, la precipitación, el viento, la nubosidad, el nivel del mar y otros factores climáticos.

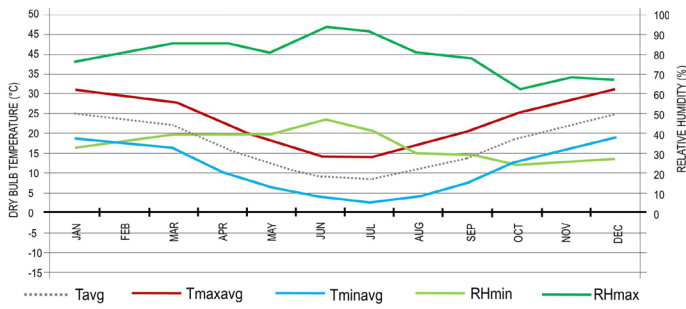


Figura 5. Temperaturas y Humedad relativas de Mendoza.
 Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

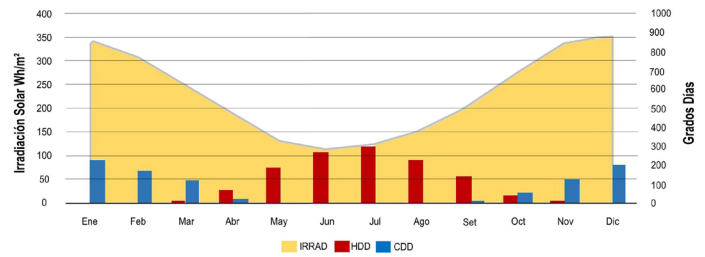


Figura 6. HDD y CDD función de la irradiancia solar.
 Fuente: Elaboración de los autores.

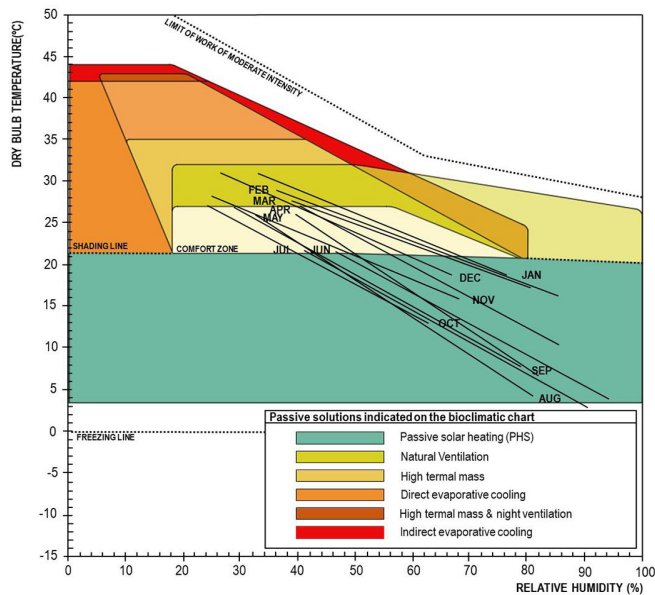


Figura 7. Gráfica de Givoni modificada por Košir et al. (2017), con datos actuales para Mendoza, Argentina. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

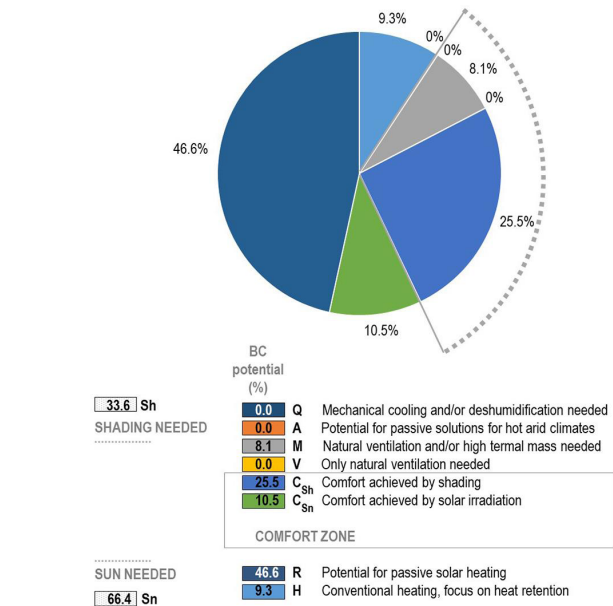


Figura 8. Potencial bioclimático con clima actual. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

POTENCIAL BIOCLIMÁTICO CON CLIMA ACTUAL

Mendoza tiene un clima desértico frío templado continental con importantes variaciones diarias y anuales. Según la clasificación de Koeppen (Kottek et al., 2006), corresponde a la nomenclatura climática Bwk. La letra "B" define un clima seco, la letra "w" hace referencia precipitaciones por debajo de los 250 mm anuales, y la letra "k" está relacionada con temperaturas medias anuales por debajo de los 18°C. Por lo tanto, la nomenclatura Bwk hace referencia a un clima árido-templado-frío. La figura 5 muestra las temperaturas máxima, mínima y media mensual, junto con la humedad relativa mínima y máxima mensual. La temperatura media anual es de 17.2 °C, siendo para enero (verano) la temperatura media mensual de 24.8 °C. y para julio (invierno) la temperatura media mensual de 8.2 °C.

Los HDD anuales (Heating Degree-Days, base 18.3) son de 1231 HDD, mientras que los CDD (Cooling degree-days, base 18.3), son de 911 CDD (Figura 6). Esto nos indica la necesidad mensual de calefacción y refrigeración.

El potencial bioclimático puede ser un punto de partida práctico para la definición de estrategias de diseño edilicias apropiadas al clima. En la figura 7 y figura 8 se muestran las posibles soluciones bioclimáticas con los datos climáticos actuales. En la figura 7, que corresponde a la gráfica de Olgyay (1963), se muestran los datos mensuales sobre las estrategias pasivas. Los autores de la herramienta agregan la influencia de la irradiancia solar diaria media y máxima recibida, lo que modifica la gráfica original (Košir & Pajek, 2017).

La mayor parte de los datos se encuentran sobre la estrategia de calefacción solar pasiva y, en un porcentaje

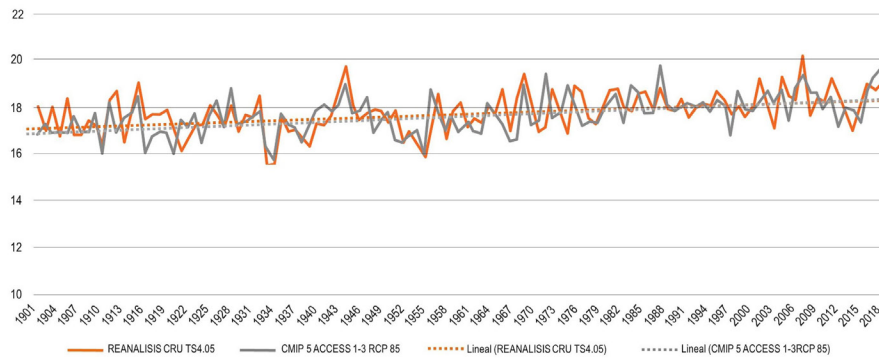


Figura 9. Comparación de temperaturas medias anuales desde 1901 hasta 2020 de: CRU TS4.05 y el modelo de simulación climática ACCESS 1-3. Fuente: Elaboración de los autores.

menor en los meses intermedios y de verano, ventilación natural combinado con masa térmica interior.

En la figura 8 se puede apreciar que los requerimientos de estrategias pasivas se dividen en dos grupos: Necesidades de Sombra – Nh, y Necesidades de Sol – Sn. Las estrategias para disipar el calor (SH) tiene un potencial de 33.6% (8.1% de ventilación natural con masa térmica, y un 25.5% por el uso de sombras). Nótese que las estrategias para climas cálidos áridos están en 0%, debido a que Mendoza es un clima árido-templado-frío, en el que la combinación de ventilación y sombras son suficientes para el logro del confort mediante estrategias pasivas de acondicionamiento natural. Por otro lado, las estrategias para la recolección de radiación solar (Sn) tienen un potencial del 66.4% (46.6% por calefacción solar pasiva, 9.3% por calefacción auxiliar y un 10.5% en confort por el uso de radiación solar directa).

INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE VIVIENDAS

Como se anticipó en el apartado de metodología, para el armado de los archivos EPW futuros se eligió un modelo del CMIP5 (ACCESS 1-3) y se ajustó con datos medidos de reanálisis (CRU TS4.05). El período analizado fue desde 1901 hasta 2020. En la figura 9 se muestra el ajuste de las temperaturas medias anuales de ambos modelos.

Los resultados de los indicadores estadísticos, de acuerdo con lo que se aprecia en la tabla 1, muestran errores aceptables de acuerdo con ASHRAE Guidline 14 (Clarke et al., 1993). El BIAS o el sesgo entre los datos resulta de 0.099 °C. El error medio absoluto MAE, descartando los valores atípicos, resulta de 0.68°C en promedio. Cuando se analiza el coeficiente de concordancia *d*, resulta del 72%. Finalmente, la desviación estándar de los valores residuales RMSE es de 0.88°C.

Tabla 1. Indicadores estadísticos del ajuste entre los datos de reanálisis CRU TS4.05 y el modelo ACCESS 1-3 para el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración de los autores.

INDICADORES	CRU TS4.05 vs ACCESS 1-3 RCP8.5
<i>d</i>	0.72
MAE (°C)	0.68
RMSE (°C)	0.88
BIAS (°C)	0.099

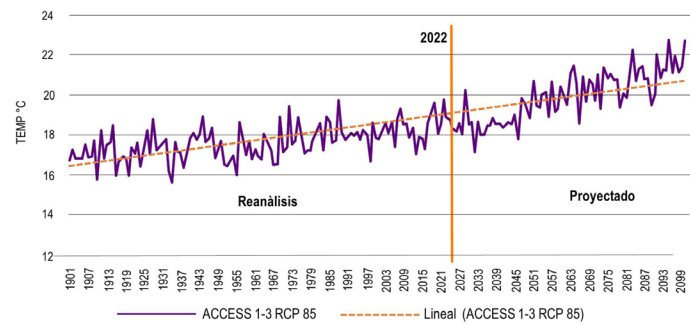


Figura 10. Temperaturas medias anuales, RCP8.5. Fuente: Elaboración de los autores.

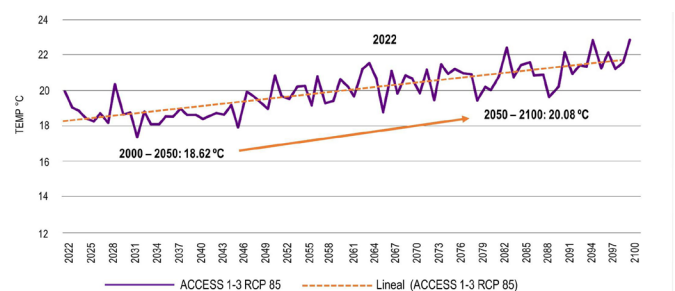


Figura 11. Temperaturas medias anuales para el escenario RCP8.5, período futuro, 2022-2100. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 2. Comparación de los cambios observados en períodos de 50 años. Fuente: Elaboración de los autores.

	ACCESS 1-3	Diferencia al período base 1900-1950
1900-1950	17.37	
1950-2000	17.77	0.40
2000-2050	18.62	0.85
2050-2100	20.80	2.18

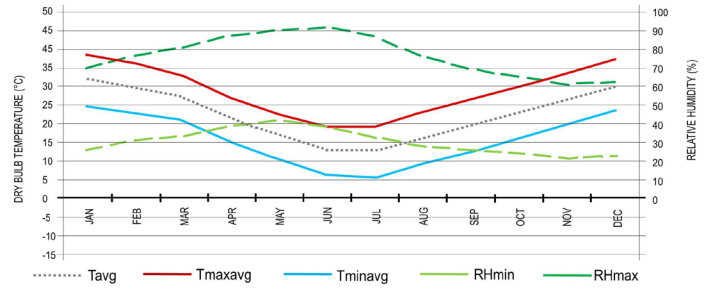


Figura 12. Temperaturas y Humedad relativas, año 2100 para Mendoza. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

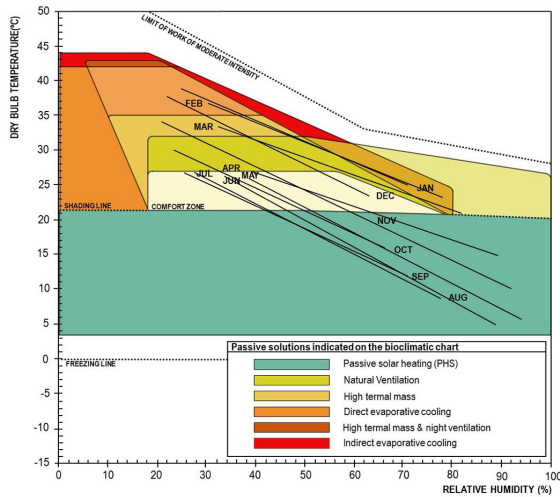


Figura 13. Temperaturas y Humedad relativas, año 2100. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

En la figura 10 se muestran las temperaturas medias anuales del modelo calibrado, desde 1901 hasta el 2100, para el escenario RCP 8.5.

En la figura 11 se recortan los datos predichos a futuro en el rango que va entre 2022-2100. Aquí se puede observar la tendencia del aumento de temperatura hacia el 2100. Si comparamos las anomalías en períodos de 50 años desde 1900, la temperatura hacia el año 2100 podría aumentar en el orden de los 2.18°C en relación con el período pre-industrial para el clima estudiado, como se aprecia en la tabla 2.

Con el modelo ACCESS1-3 ajustado, se utilizaron los datos para armar el EPW y simular en BcChart el efecto proyectado del cambio climático en el potencial bioclimático para Mendoza (Figura 12). La temperatura media anual para el 2100 se espera que sea de 22.50°C (5°C más que el TMY actual), mientras que para enero de ese año la temperatura media mensual sea de 31.88°C (7°C mayor que el actual), se espera que en julio la

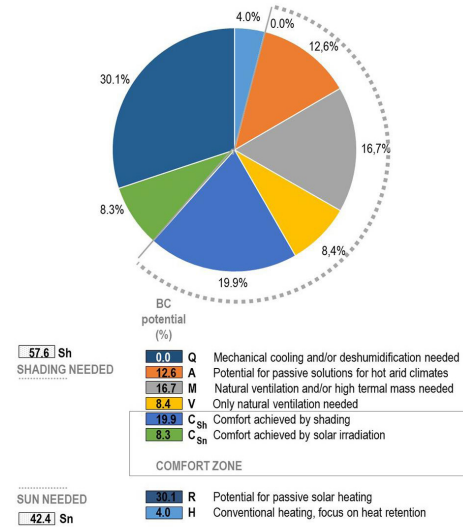


Figura 14. Potencial bioclimático futuro, año 2100. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

temperatura media mensual supere a la actual en 4.4°C (12.7°C).

Los resultados de la figura 13 y figura 14 muestran claramente que se espera que el potencial bioclimático se desplace hacia las estrategias de disipación de calor.

Si observamos la figura 14, las necesidades de Sombra *Sh* se calculan en un 57.6%, o sea, un 24% más que el clima actual. Dentro de este porcentaje hubo un aumento considerable (de 0% a 12.6%) en la estrategia A, que se refiere a un conjunto de soluciones pasivas para climas áridos y cálidos, que incluye Refrigeración evaporativa directa e indirecta y uso de masa térmica con ventilación natural. La necesidad de integrar, en el diseño, estrategias pasivas que corresponden a climas áridos cálidos, refiere a que la temperatura media anual se estima para el año 2100 por sobre los 18°C. El clima que hoy se clasifica como *Bwk* pasará a ser *Bwh*, es decir, clima árido cálido, con precipitaciones por debajo de los 250 mm, por lo que es posible el uso de refrigeración evaporativa. La

zona de confort, por el uso de sombras, se estima que descienda de 25.5% a 19.9%.

Para las estrategias de invierno S_n se prevé una disminución de su potencial de 66.4% a 42.4%, lo cual conlleva a que disminuyan todas las estrategias inherentes a la recolección de radiación solar y calor térmico. El potencial de calefacción pasiva pasará de un 46.6% a 30.1% y la calefacción auxiliar de un 10.5% a un 4%.

CONCLUSIÓN

Este trabajo aborda el impacto del cambio climático sobre la efectividad de las estrategias pasivas y las oportunidades de adaptación de los edificios en diferentes condiciones futuras extremas según el escenario RCP8.5 del CMIP5, equivalente al escenario SSP85 del CMIP6 del IPCC, en un clima hoy árido-templado-frío (Bwk) y en el futuro árido-cálido (Bwh), con importantes variaciones diarias y anuales.

Se trata de una contribución a una cuestión relevante en la arquitectura pasiva y de bajo consumo energético: ¿Seguiría estando el diseño actual optimizado energéticamente en los futuros escenarios de emisiones?

El diseño arquitectónico se enfrenta a un doble reto: por un lado, los edificios deben funcionar bien hoy logrando el confort térmico con consumos cercanos a cero. Por otro lado, deberán ser capaces de adaptarse a futuros escenarios climáticos, por lo que es muy importante reconocer las principales tendencias y tener en cuenta el panorama general.

El trabajo realiza un aporte al desarrollo metodológico en la elaboración de archivos de clima futuro de acuerdo con proyecciones de cambio climático (IPCC) para la simulación dinámica de edificios con alcance específico a la temperatura terrestre. Para el armado de los archivos EPW futuros, se elige un modelo del CMIP5 (en este caso ACCESS 1-3 RCP8.5) y se ajusta con datos medidos de reanálisis (CRU TS4.05). La elección de este modelo está fundamentada en su alto grado de ajuste y en la disponibilidad de datos para la región. Por lo tanto, este trabajo limita sus resultados, discusiones y conclusiones a los escenarios calculados con dicho modelo.

La simulación dinámica de edificios con archivos climáticos de elaboración propia, ajustados y validados tanto para la situación actual como futura, se consolida como una herramienta indispensable para valorar decisiones de diseño desde una mirada holística, lo cual garantiza el buen funcionamiento de nuestros edificios a lo largo de su vida útil. La transferencia de los resultados obtenidos a los diseñadores de edificios hace posible conocer qué estrategias pasivas ganarán o perderán importancia debido al calentamiento climático y la magnitud relativa a este cambio.

Para el caso de aplicación que se presenta en Mendoza (Argentina), las temperaturas medias anuales podrían incrementarse en 5°C para el 2100, con aumentos de 7°C en las medias mensuales de verano y de 4.4°C en las medias mensuales de invierno. Los resultados muestran una disminución del 20% en la cantidad de horas en confort con un incremento del 24% en la necesidad de estrategias pasivas de verano.

Respecto de estas últimas, actualmente las principales estrategias pasivas recomendadas son la sombra o protección a la radiación y la ventilación natural en conjunto con la incorporación de masa térmica en la envolvente. Para poder hacer frente a los escenarios de cambio climático futuro, a estas estrategias será necesario incorporar la refrigeración evaporativa directa e indirecta. Esto responde a que el actual clima templado pasará a ser clima cálido con temperaturas medias anuales por sobre los 18°C y que, debido a la baja humedad relativa, las mismas presentaran un alto grado de efectividad. Si a esta situación se adiciona el territorio árido en el que la escasez de agua es una constante, la investigación relacionada con el correcto diseño de estrategias pasivas en viviendas adquiere una importancia creciente.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido financiado por el FONCYT PICT 2019-2752 y CONICET PIP 2021-2023 11220200101711CO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agosta, E., Araneo, D., Camilloni, I., Carril, A., Doyle, M., Frumento, O., Nuñez, M., Ortiz de Zárate, M., Penalba, O., Rusticucci, M., Saulo C., & Solman, S. (2015). Tendencias y Proyecciones: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). En *Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Barea, G., Mercado, M. V., Filippín, C., Monteoliva, J. M., & Villalba, A. (2022). New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments. *Energy and Buildings*, 266, 112100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112100>

Base de Datos Climáticos. (2022). *3ra Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (3CN CIMA)*. Recuperado de: <http://3cn.cima.fcen.uba.ar/>

Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>

- Bi, D., Dix, M., Marsland, S., O'Farrell, S., Sullivan, A., Bodman, R., Law, R., Harman, I., Srbinovsky, J., Rashid, H. A., Dobrohotoff, P., Mackallah, C., Yan, H., Hirst, A., Savita, A., Dias, F. B., Woodhouse, M., Fiedler, R., & Heerdegen, A. (2020). Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*, 70(1), 225–251. DOI: <https://doi.org/10.1071/es19040>
- Brager, G. S., & de Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27(1), 83–96. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(97)00053-4)
- Chalmers, P. (2015). Cambio climático: Implicaciones para los Edificios. Hallazgos claves del Quinto informe de evaluación del IPCC [Revisión del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático]. *University of Cambridge*.
- Clarke, J., Strachan, P., & Pernot, C. E. E. (1993). Approach to the calibration of building energy simulation models. En: ASHRAE Transactions 99, 13.
- Coronato, T., Carril, A. F., Zaninelli, P. G., Giles, J., Ruscica, R., Falco, M., Sörensson, A. A., Fita, L., Li, L. Z. X., & Menéndez, C. G. (2020). The impact of soil moisture–atmosphere coupling on daily maximum surface temperatures in Southeastern South America. *Climate Dynamics*, 55, 2543–2556. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05399-9>
- Elias, S. A. (2017). Editor's Note. En: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of the Anthropocene*, 1, 227–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.05958-9>
- Falco, M., Carril, A. F., Menéndez, C. G., Zaninelli, P. G., & Li, L. Z. X. (2019). Assessment of CORDEX simulations over South America: added value on seasonal climatology and resolution considerations. *Climate Dynamics*, 52, 4771–4786. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4412-z>
- Flores-Larsen, S., Filippín, C., & Barea, G. (2019). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings*, 184, 216–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>
- Flores-Larsen, S., & Filippín, C. (2021). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231, 110576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110576>
- Ganem, C., & Barea, G. (2021). A methodology for assessing the impact of climate change on building energy consumption. En: *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. Editorial Springer. ISBN 978-3-030-65420-7
- Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., & James, P. A. B. (2008). Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12), 2148–2168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- Košir, M., & Pajek, L. (2017). BcChart v2.0 – A Tool for Bioclimatic Potential Evaluation. *Proceedings of SWC2017/SHC2017*.
- Košir, M. (2018). BcChart v2.1. *University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering*.
- Košir, M. (2019). Climate Change and Its Implications for Bioclimatic Design. En: *Climate Adaptability of Buildings*, 197–236. Springer International Publishing.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Lacaze, Zampelli, Estayno, y Braude (2021). Tecnologías para la eficiencia energética residencial y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Criterios de política pública para su priorización y marco de propuestas para su desarrollo y adopción en el contexto argentino. *Documentos de Trabajo del CCE N° 14*. Consejo para el Cambio Estructural - Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación.
- Li, D. H. W., Yang, L., & Lam, J. C. (2012). Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones – A review. *Energy*, 42(1), 103–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.044>
- López-Franca, N., Zaninelli, P. G., Carril, A. F., Menéndez, C. G., & Sánchez, E. (2016). Changes in temperature extremes for 21st century scenarios over South America derived from a multi-model ensemble of regional climate models. *Climate Research*, 68(2–3), 151–167. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01393>
- Lorenz, R., Pitman, A. J., Donat, M. G., Hirsch, A. L., Kala, J., Kowalczyk, E. A., Law, R. M., & Srbinovsky, J. (2014). Representation of climate extreme indices in the ACCESS1.3b coupled atmosphere–land surface model. *Geoscientific Model Development*, 7(2), 545–567. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-545-2014>
- Naciones Unidas (ONU), *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (UNFCCC), 12 Diciembre 2015.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
- Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J. A., & Ureta-Gragera, M. (2015). Aplicabilidad de estrategias genéricas de diseño pasivo en edificaciones bajo la influencia del cambio climático en Concepción y Santiago, Chile. *Revista Hábitat Sustentable*, 5(2), 33–41. Recuperado de: <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2106>
- Ruiz-González, M. A., & Mack-Vergara, Y. L. (2022). Indicadores de resiliencia y sostenibilidad para la vivienda urbana panameña frente al cambio climático. *Revista Hábitat Sustentable*, 12(2), 08–25. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.02.01>

Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Marrero Meléndez, M., Guevara-García, F. J., & Canivell, J. (2017). El control adaptativo en instalaciones existentes y su potencial en el contexto del cambio climático. *Revista Hábitat Sustentable*, 7(2), 06–17. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.01>

Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2022). *Informe especial n°3 por ola de calor / altas temperaturas temporada 2022-2023*.

Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2023a). *Informe especial n°5 por ola de calor / altas temperaturas temporada 2022-2023*.

Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2023b). *Informe especial n°8 por ola de calor / altas temperaturas temporada 2022-2023*.

Stone, K. A., Morgenstern, O., Karoly, D. J., Klekociuk, A. R., French, W. J., Abraham, N. L., & Schofield, R. (2016). Evaluation of the ACCESS – chemistry–climate model for the Southern Hemisphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(4), 2401–2415. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-2401-2016>

V., R. (2020). Una apuesta por la renovación urbana. *Ediciones EL PAÍS S.L.* [29 septiembre]. Recuperado de: <https://elpais.com/economia/2020-09-29/una-apuesta-por-la-renovacion-urbana.html>

Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., Stevens, L., Wang, Y.-P., & Srbinovsky, J. (2020). The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*, 70(1), 193–214. DOI: <https://doi.org/10.1071/es19035>