





Recibido 30/08/2021
Aceptado 25/11/2021

EL ROL ACTIVO DEL USUARIO EN LA BÚSQUEDA DE CONFORT TÉRMICO DE VIVIENDAS EN CLIMA TEMPLADO ÁRIDO

THE ACTIVE ROLE OF THE USER IN THE SEARCH FOR THERMAL
COMFORT OF DWELLINGS IN A TEMPERATE ARID CLIMATE

SOLEDAD ELISA ANDREONI-TRENTACOSTE

Magíster en Energías Renovables
Becaria Doctoral

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) - Centro
Científico Tecnológico (CCT) - Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Mendoza, Argentina

<https://orcid.org/0000-0002-2298-7649>
sandreoni@mendoza-conicet.gob.ar

CAROLINA GANEM-KARLEN

Doctora en Arquitectura
Investigadora Independiente

Instituto de Ambiente Hábitat y Energía (INAHE) -
Centro Científico Tecnológico (CCT) - Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Mendoza, Argentina

<https://orcid.org/0000-0002-1431-1219>
cganem@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El comportamiento del usuario es uno de los principales factores de incertidumbre en el desempeño térmico de una vivienda. El presente estudio contribuye a identificar variables que influyen en la conducta del usuario y, a su vez, en cómo ésta afecta el desempeño térmico de viviendas en la ciudad de Mendoza. En ese sentido, se realizó una auditoría térmica de una vivienda representativa, en verano e invierno, elaborando en forma paralela un registro de uso y gestión de los habitantes. Se concluye que, en verano, una correcta gestión de la envolvente mediante la ventilación nocturna favorece el logro de confort interior en un 89% de los datos registrados; y, en invierno, un correcto aprovechamiento de la ganancia solar directa favorece el logro de confort en un 60% de dichos datos. Se evalúan, finalmente, alternativas de mejora edilicia para la estación más desfavorable.

Palabras clave

uso y gestión, ocupación, comportamiento del usuario, confort térmico, estrategias bioclimáticas

ABSTRACT

User behavior is one of the main factors of uncertainty in the thermal performance of a dwelling. This study contributes to identifying variables that would influence the user behavior and, in turn, how these affect the thermal performance of houses located in the city of Mendoza. For this, a thermal audit of a representative dwelling was made in summer and winter, while also recording occupancy and occupant actions. It was concluded that, in summer, correct management of the envelope through night cooling favors reaching indoor comfort in 89% of the recorded data. In winter, the correct use of direct solar gain favors reaching comfort in 60% of the recorded data. Finally, alternatives for building improvements are evaluated for the most unfavorable season.

Keywords

use and management, occupancy, occupant behavior, thermal comfort, bioclimatic strategies

INTRODUCCIÓN

Los impactos del incremento en el calentamiento global afectan tanto la salud humana como a los ecosistemas. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y los consumos energéticos en el sector edilicio es, por ende, primordial. Sin embargo, estos valores se han incrementado en los últimos años. Los edificios son responsables del 36% del consumo de energía final (7% más que en 2010) y del 39% de las emisiones (Agencia Internacional de la Energía [IEA] y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [UNEP], 2019). Se estima que las actividades humanas son responsables del incremento de 1°C en el calentamiento global, por encima de los niveles pre-industriales (Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC], 2018). En el último reporte del IPCC (2021) se expone que la temperatura de la superficie global continuará aumentando hasta al menos mediados de siglo bajo todos los escenarios de emisiones estudiados. El calentamiento global de 1.5°C y 2°C por encima de los niveles pre industriales será superado durante el siglo XXI, a menos que se produzcan reducciones profundas en las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en las próximas décadas.

Efectivamente,

El confort térmico del ser humano en el entorno construido es directamente relevante para los principales problemas contemporáneos del cambio climático, siendo la principal causa de aumentos desmedidos en los consumos energéticos. Un fenómeno representativo de la variabilidad climática en las ciudades es la presencia de islas de calor, es decir, el aumento de las temperaturas en sectores de la ciudad en comparación con los alrededores periurbanos y el área rural. Lo que repercute en un aumento en el consumo energético para enfriamiento de casas-habitación y de instalaciones de servicios y, por consiguiente, las emisiones de gases de efecto invernadero también se incrementan. (Martínez Peralta, 2016, p. 355)

A lo anterior se suma que “el usuario promedio exige con el paso del tiempo espacios interiores mejor climatizados y tiene menos tolerancia a la incomodidad térmica” (Arrieta, 2020, p. 64). La creciente demanda de confort térmico en ambientes residenciales busca respuestas desde la arquitectura. Diversos estudios (Roaf, 2018; Invidiata y Ghisi, 2016; Palme, Carrasco y Gálvez, 2016; Silva, Almeida y Ghisi, 2016; Diulio, Netto, Berardi y Czajkowski, 2016) demuestran que el uso de estrategias bioclimáticas pasivas es esencial para incrementar el confort térmico interior en viviendas favoreciendo, a su vez, la reducción de los consumos energéticos. Aunque resulta importante considerar que algunas estrategias pasivas que se utilizan actualmente serán menos eficientes en el futuro, a raíz del calentamiento global (Flores-Larsen, Filippin y Barea, 2019).

En ese contexto, “se plantea para los arquitectos un escenario futuro que hace ineludible una arquitectura más sostenible, lo que requiere de una definición del perfil

del arquitecto en comunicación con el medio y con los usuarios” (Pérez, 2016, p. 33). Ello representa, por tanto, el compromiso de proveer confort a los usuarios de los proyectos mediante posibilidades de adaptación concebidas desde el diseño. Incorporar en los edificios oportunidades de adaptación, colabora en la tarea de incrementar su eficiencia energética en relación a su función principal de proporcionar un entorno térmico aceptable e, incluso, agradable. Según Susan Roaf (2018), el logro del confort térmico, sin la utilización de equipos de climatización que utilicen energía auxiliar, es la clave del éxito y la resiliencia de un edificio.

El equilibrio de las ciudades, en particular las que se encuentran en un clima árido templado continental, como es el caso de la ciudad de Mendoza, Argentina, depende de un adecuado y apropiado uso de sus recursos y de sus potencialidades. El usuario toma decisiones que pueden contribuir positivamente a la sustentabilidad urbana, o bien, perjudicarla, dado que el consumo de energía está directamente relacionado a las actividades humanas. Una conducta activa del usuario se ha vuelto un punto clave para la reducción de consumos energéticos y emisión de gases de efecto invernadero en el sector edilicio (Andreoni Trentacoste y Ganem Karlen, 2017; D’Amanzo, Mercado y Ganem Karlen, 2020).

Los estudios realizados sobre el análisis de conductas del usuario se enfocan, mayoritariamente, en tipologías no residenciales (Deuble y de Dear, 2012; Alonso-Frank y Kuchen, 2016; Antoniadou y Papadopoulos, 2017; Ö. Göçer, Candido, Thomas y K. Göçer, 2019). Las viviendas se caracterizan por conductas de uso y actividades muy variadas, lo que representa una mayor complejidad a la hora de analizar las conductas de los usuarios y su influencia en el desempeño térmico edilicio. El diseño de viviendas que cuenten con sistemas eficientes energéticamente y de envolventes que permitan al usuario adaptar las condiciones de confort interior a su preferencia, puede perfeccionarse en base a información confiable derivada del estudio empírico de las necesidades y comportamiento de los usuarios. Variadas investigaciones (Hong, Yan, D’Oca y Chen, 2016; Lopes, Antunes, Reis y Martins, 2017; Balvedi, Ghisi y Lamberts, 2018; Li, Yu, Haghghat y Zhang, 2019; Carlucci et al., 2020) evidencian la importancia del análisis del comportamiento del usuario en relación al uso y gestión de viviendas para la predicción del desempeño térmico edilicio mediante modelos de simulación, entendiendo por “uso” a todas aquellas prácticas o costumbres relacionadas con la ocupación de la vivienda por parte del usuario. Tanto el número de ocupantes y los horarios en que hacen uso del espacio interior, como las actividades y los elementos o equipamiento que utiliza en el desarrollo de la vida diaria. La noción de “gestión”, en cambio, apunta a la administración de los sistemas y recursos activos o pasivos de la vivienda con el fin de resolver las necesidades de confort del usuario, garantizando la habitabilidad.

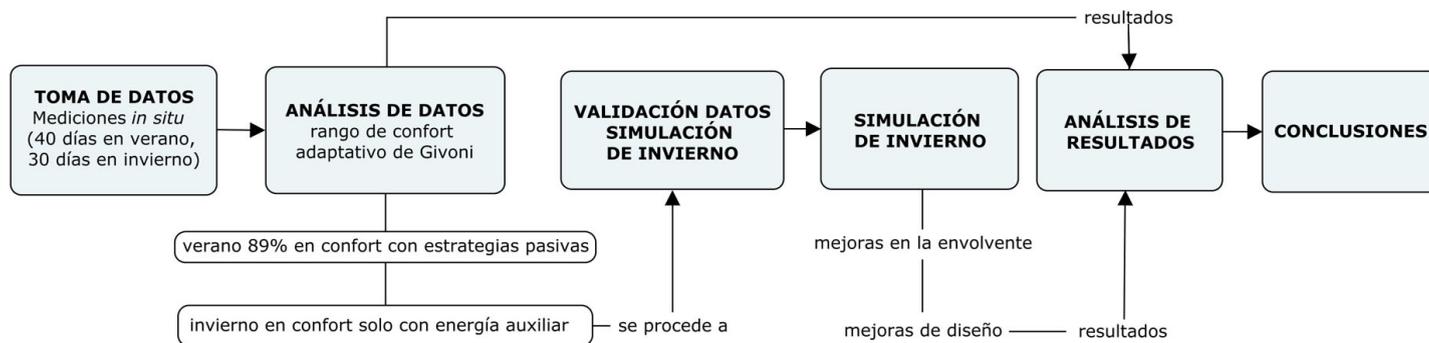


Figura 1. Mapa de flujos del proceso metodológico. Fuente: Elaboración de las autoras en software CmapTools.

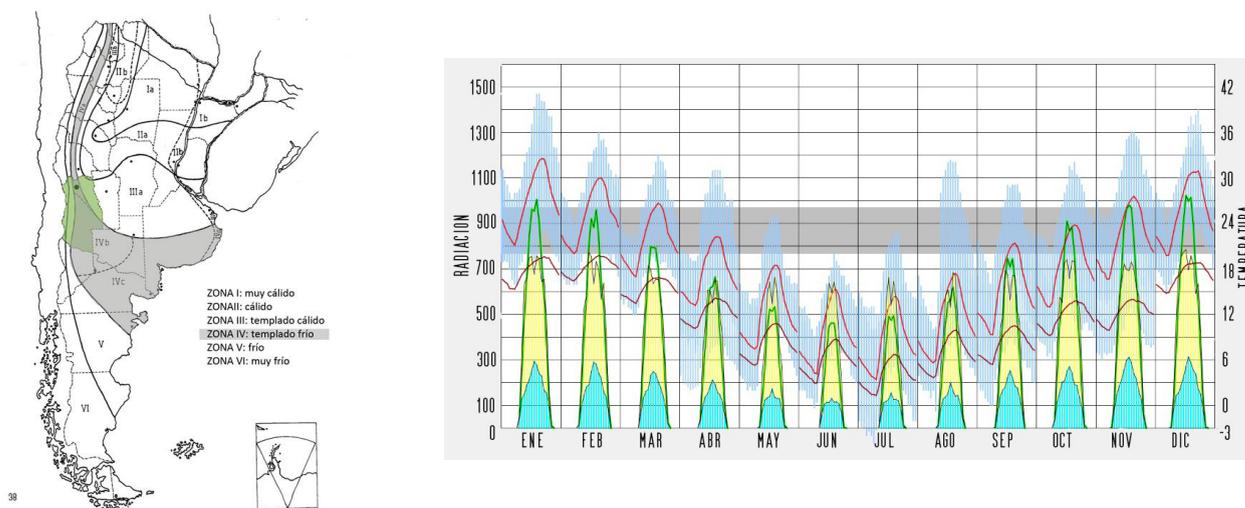


Figura 2. a) Zonas bioambientales de Argentina. b) Promedios diarios mensuales de temperatura y radiación solar de la ciudad de Mendoza. Fuente: Adaptación de las autoras en base a Norma IRAM 11603 y gráfico realizado por las autoras en Climate Consultant 5.0, archivo climático EPW en <http://climate.onebuilding.org/>

El comportamiento del usuario es uno de los principales factores de incertidumbre en el desempeño térmico de una vivienda (Andersen, Fabi y Corgnati, 2016; Cuerda Guerra-Santin y Neila González, 2017; Wagner y O'Brien, 2018) y varía en relación al clima y las costumbres. Es por esto fundamental analizar las variables que influyen en su conducta y, a su vez, la forma en que dicha conducta afecta el desempeño térmico edilicio, para poder así delinear las pautas a seguir a futuro en el diseño y rehabilitación de las viviendas de la ciudad de Mendoza.

El objetivo del trabajo expuesto es comprender y cuantificar el comportamiento de uso y gestión de los habitantes de viviendas en la ciudad de Mendoza. Se busca identificar patrones de comportamiento del usuario y la influencia de estos en el logro del confort térmico interior en las estaciones de verano e invierno, mediante el uso de estrategias de diseño bioclimático. La relación de estas variables proporciona las bases empíricas para la representación del comportamiento del usuario en modelos de simulación edilicia.

METODOLOGÍA

En la presente investigación se utilizó un diseño convergente paralelo de toma de datos, para estudiar el comportamiento de los ocupantes de una vivienda caso de estudio en la ciudad de Mendoza, Argentina. Los diseños convergentes de investigación paralela permiten a los investigadores cuantificar las acciones de los ocupantes y obtener una mejor comprensión de la causa y el efecto (Wagner y O'Brien, 2018). Un diagrama de flujos del proceso metodológico se muestra en la Figura 1:

CASO DE ESTUDIO

La ciudad de Mendoza se encuentra situada en el límite oeste de Argentina a 32° 40' latitud sur y 68° 51' longitud oeste; y a 750 msnm. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf y Rubel, 2006),

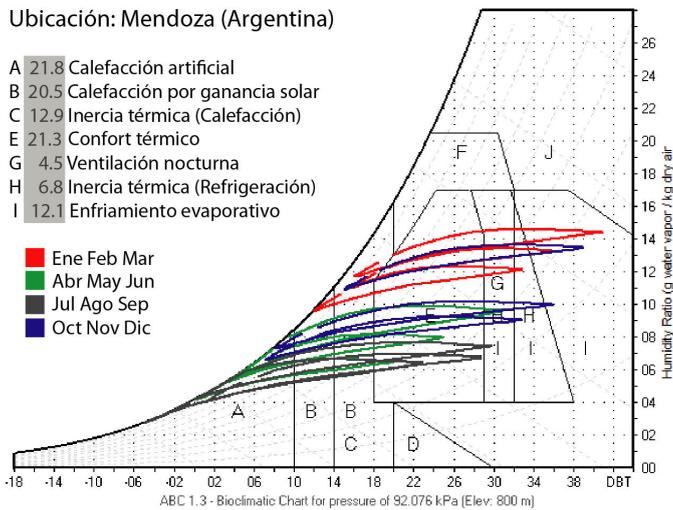


Figura 3. Carta psicrométrica para Mendoza. Fuente: Elaboración y adaptación de las autoras en base al gráfico elaborado en software ABC.

la caracterización climática responde a la de BWk, lo que corresponde a clima árido con veranos calurosos e inviernos fríos secos. Según la norma IRAM 11603 (Figura 2a), pertenece a la zona bioambiental IVa, templado frío. Este clima se caracteriza por grandes amplitudes térmicas diarias y estacionales, presenta temperaturas absolutas que varían entre -6°C en invierno y 39°C en verano, con variaciones diarias de aproximadamente 10°C a 20°C y con baja humedad relativa (promedio anual de 54,7%). Para la ciudad de Mendoza, los grados día de calefacción (base 18°) son de 1384°C día /año y la temperatura mínima de diseño es de -1.9°C . La ciudad presenta un promedio anual de precipitaciones de 218 mm, con un elevado índice de radiación solar y una alta heliofanía (Figura 2b).

Para la arquitectura de este clima, varios autores (Olgyay, 1998; Givoni, 1992; Serra Florensa y Coch Roura, 1991) han estudiado y propuesto estrategias bioclimáticas adecuadas, incorporando todas ellas, como factor común, el principio de ser sistemas flexibles, es decir, elementos o conjuntos de elementos que pueden cambiar fácilmente su acción ambiental a partir de las circunstancias climáticas. Se consideran, aquí, los rangos de confort sugeridos por Givoni (1992), de $18^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$, en invierno, y $20^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}$, en verano. Las estrategias recomendadas para el clima de Mendoza, según se analiza en la carta psicrométrica (Figura 3) propuesta por el mismo autor, son principalmente las de acondicionamiento solar pasivo, efecto de masa térmica y ventilación natural nocturna. Es importante señalar que las medidas posibles de implementar en este clima podrían lograr confort en verano solamente con el aprovechamiento de las estrategias pasivas. Sin embargo, en invierno se observa claramente que las estrategias pasivas no son suficientes para conseguir el confort interior en los días más fríos, siendo necesario el aporte de calefacción auxiliar.

La ciudad de Mendoza forma parte del conglomerado denominado Gran Mendoza o Área Metropolitana de Mendoza (AMM), que es el núcleo de mayor densidad poblacional de la provincia, albergando al 64% de la población. La estructura urbana se caracteriza por su trama en damero, con arbolado en alineación; asimismo, la disposición de los lotes muestra el predominio de viviendas de tipo adosadas, entre medianeras (Stocco, Cantón y Correa, 2013; Sosa, Correa y Cantón, 2016). El 87.5% de las viviendas del AMM son del tipo viviendas unifamiliares de baja altura (DEIE, 2019). Al ser esta la tipología residencial más representativa, en el presente trabajo se seleccionó como caso de estudio una vivienda unifamiliar ubicada en el centro urbano de la ciudad, construida entre medianeras (Figuras 4a, 4b y 4c). La tecnología constructiva de la misma es de tipo tradicional para Mendoza, con muros de ladrillo macizo revocados en ambas caras, sin aislación térmica ($K=2.59\text{W}/\text{m}^2\text{k}$). Las carpinterías son metálicas, de chapa plegada y vidrio simple de 4mm ($K=5.7\text{W}/\text{m}^2\text{k}$). Posee techos inclinados de madera, los cuales cuentan con aislación térmica de poliestireno expandido de 5 cm de espesor; y, por último, la terminación exterior es de tejas cerámicas ($K=0.93\text{W}/\text{m}^2\text{k}$). Cabe mencionar que la vivienda no posee sistemas de refrigeración en ninguno de sus ambientes, solo dispone de un ventilador de techo en el dormitorio sur y un ventilador de pie en planta baja. El sistema de calefacción se compone de dos estufas a gas natural, una localizada en el dormitorio sur y la otra, en planta baja, en el espacio del estar-comedor.

TOMA Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Se midieron datos *in situ* de temperatura y humedad relativa, por medio de la colocación de cuatro micro-adquisidores de datos HOBO U10: uno, en el exterior (protegido de la radiación solar directa) y tres, en distintos espacios en el interior de la vivienda (Figura 4a). Todos fueron dispuestos de manera que quedaron suspendidos en el centro de cada habitación, a alturas equivalentes (aproximadamente a 2m del nivel del piso), para mantenerlos alejados de la influencia de elementos constructivos con masa. En este estudio se trabajó con el estar comedor (Figura 4c), por lo que solo se consideraron los datos del micro-adquisidor colocado en dicho ambiente y el del exterior. Las mediciones interiores restantes fueron utilizadas para los fines correspondientes al ajuste del modelo.

Se tomaron dos periodos de medición: uno de 40 días y otro de 30 días, en los meses de enero y febrero, y entre julio y agosto de 2017 (estaciones de verano e invierno, respectivamente, para el hemisferio sur). El intervalo para la toma de datos se fijó en 15 minutos y se procesó la información con los programas HOBOWare pro, Excel y R studio. Paralelamente, se realizó el registro de las acciones de uso y gestión implementando

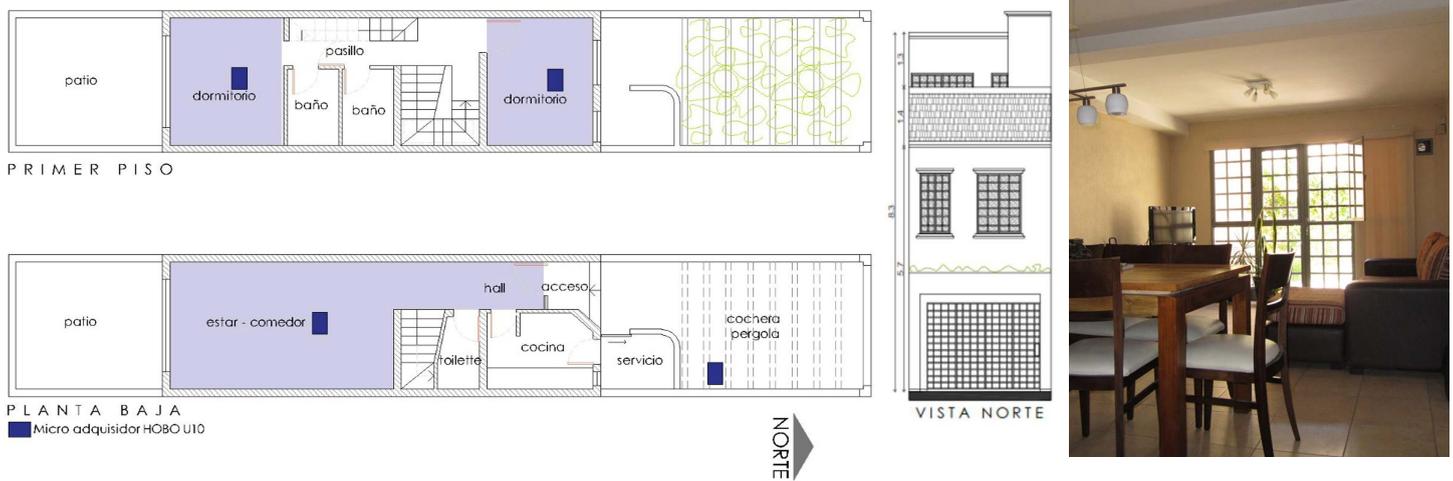


Figura 4. a) Planos de planta con ubicación de los micro-adquisidores HOBO U10. b) Plano de vista frontal de la vivienda. c) Fotografía del ambiente en estudio. Fuente: Elaboración de las autoras.

la metodología de recolección de datos de encuestas de monitoreo en forma de “diario” (De Simone, Carpino, Mora, Gauthier, Aragon y Harputlugil, 2018), la cual consiste en planillas de auto-completado con entradas estructuradas, también llamadas “encuestas de uso del tiempo” (TUS, por sus siglas en inglés). Esta metodología tiene la ventaja de ser comparable y replicable siempre que se utilice la misma estructura de planilla. En ellas se consideraron: fecha, temperaturas pronosticadas diarias, lluvia, heliofanía, condición de uso controlada, horario de ocupación, cierre de aberturas, apertura de aberturas, uso de ventilador, sensación de confort diurno y nocturno de acuerdo a la escala de sensación térmica entre +3 y -3 (ASHRAE, 2008), velocidad del aire exterior según Escala de Beufort (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2018) y observaciones.

Las planillas TUS se presentaron al usuario en forma de cuadros de doble entrada de auto-completado, donde el mismo completa los ítems solicitados de acuerdo a su percepción u observación. Para su correcta ejecución, se establece previamente una escala pre-armada de las variables consideradas, las cuales luego se cotejan con las mediciones obtenidas en el centro de investigaciones ubicado a menos de 2 km.

Así, se registraron datos bajo condiciones controladas probando distintas oportunidades de interacción de los usuarios con la envolvente y los sistemas de la vivienda. Dentro del primer periodo de 40 días, los datos se diferenciaron en ciclos de entre 10 a 15 días cada uno. Durante el primer ciclo los usuarios promovieron la gestión de la envolvente para posibilitar la ventilación nocturna de la vivienda. De igual modo, durante el segundo ciclo mantuvieron las ventanas abiertas durante el día y la noche, conservando fija esta variable, y adaptándose al ambiente mediante el uso de sistemas (ventiladores). Durante la quincena de ausencia por vacaciones, se tomaron los registros de los días sin gestión de la envolvente. Si bien en

los casos ventilados pudo aparecer un aporte de ventilación desde otras habitaciones, se consideró que los resultados obtenidos eran válidos para el análisis del comportamiento del usuario y la relación con la adaptación al entorno térmico interior de verano planteado en los objetivos.

En invierno, dentro del periodo de 30 días auditado, se analizó tanto la influencia de la calefacción auxiliar en los días con ocupación como el desempeño térmico de la vivienda en los días sin ocupación. Estos últimos facilitaron el ajuste del modelo teórico de simulación orientado al aprovechamiento de la ganancia solar directa.

SIMULACIÓN TÉRMICA

Llegado a este punto, se llevó a cabo una simulación del caso de referencia auditado con el programa Energy Plus versión 8.8 (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2017). Se construyó la maqueta con el *plugin* para Sketchup, dividiendo la vivienda en 5 zonas térmicas y se supuso una tasa de infiltración constante de 1 renovación de aire por hora para todas las zonas en contacto con el exterior. Se elaboró un archivo de clima .epw con los datos climáticos medidos en el microclima exterior de la vivienda. La simulación se lanzó contemplando 10 días previos a las fechas seleccionadas, para permitir que el modelo entrara en régimen antes de la fecha a evaluar. A fin de disminuir la cantidad de variables involucradas, se utilizó un periodo de medición sin energía auxiliar y sin ocupación de la vivienda. Se procedió, entonces, a ajustar el modelo de simulación mediante el ajuste de los datos simulados con los datos medidos. Se logró obtener un modelo validado con el propósito de estudiar en simulaciones posteriores el desempeño térmico de la vivienda en escenarios no factibles de ser monitoreados *in situ*.

La Figura 5 muestra el ajuste obtenido para el ambiente en estudio: las temperaturas horarias medias medidas y simuladas ajustan en un promedio de 1°C, lo que se

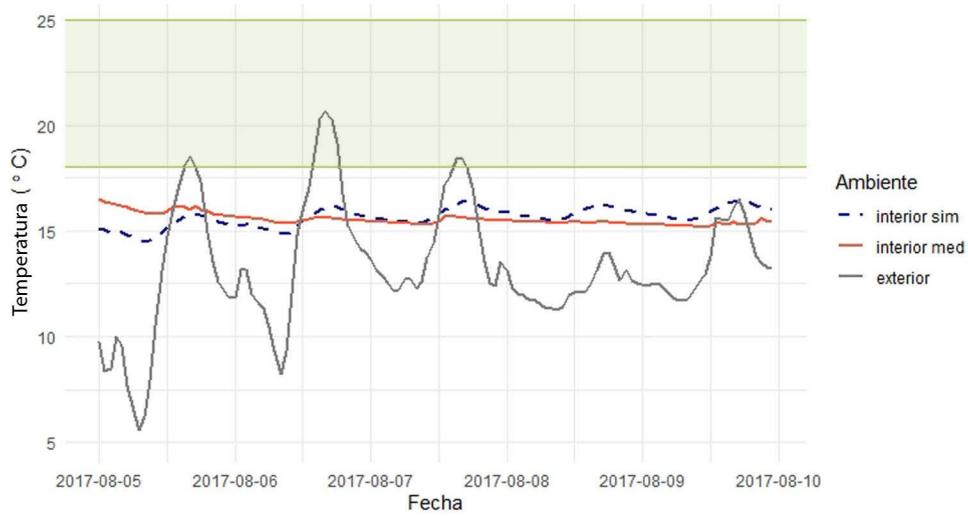


Figura 5. Ajuste del modelo de simulación. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

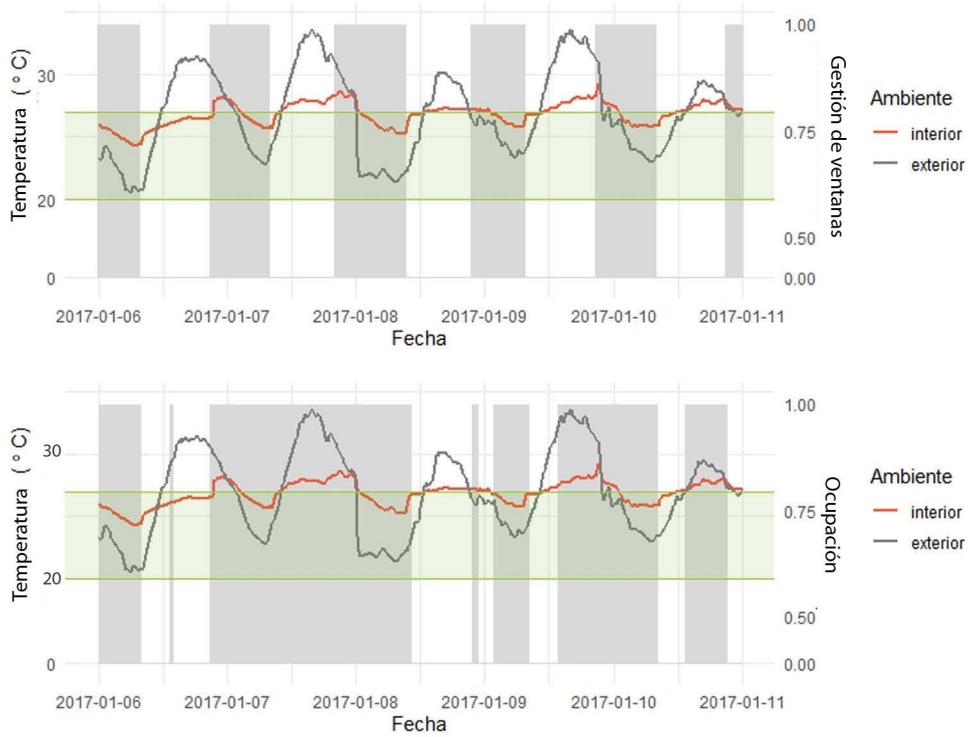


Figura 6. a) Temperatura exterior e interior de verano y gestión de ventanas para ventilación nocturna. b) Temperatura exterior e interior de verano ocupación. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

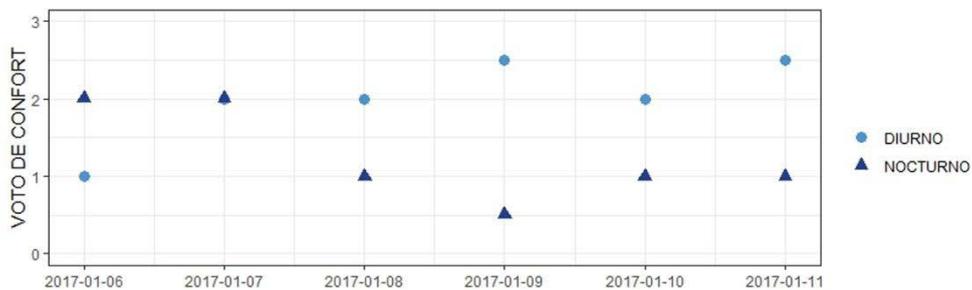


Figura 7. Datos de voto de sensación de confort térmico. Periodo gestión de ventanas para ventilación natural nocturna. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

consideró suficiente para la obtención de un modelo validado (Filippín y Larsen, 2005).

Una vez validado el modelo fue posible realizar cambios en la materialidad de la envolvente y de diseño, lográndose, en consecuencia, simular el desempeño térmico de la vivienda en escenarios no factibles de ser monitoreados *in situ*.

Para poder conocer el potencial de mejora pasiva en invierno, se simuló el modelo contemplando la incorporación de mejoras en la resistencia térmica de la envolvente edilicia. A continuación, se realizó una nueva simulación adicionando también cambios en la orientación de la fachada colectora del ambiente en estudio, la que fue orientada hacia el norte (hacia el Ecuador en el hemisferio sur).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan, en seguida, los resultados del análisis de los datos obtenidos en forma paralela, tanto de la medición de temperatura y humedad en la vivienda caso de estudio, como del registro de las conductas de los usuarios en planillas TUS. Los datos corresponden a ciclos representativos dentro de los periodos de estudio realizados en el ambiente "estar-comedor" de la vivienda caso de estudio y en el exterior de la misma. Dichos datos se organizan en dos grupos:

Verano:

- a. Auditoría con ocupación. Gestión de ventanas para favorecer la estrategia de ventilación natural nocturna.
- b. Auditoría con ocupación. Gestión de ventanas poco comprometida y uso de ventilador.

Invierno:

- a. Auditoría con ocupación y aporte de energía auxiliar.
- b. Auditoría sin energía auxiliar. Validación de modelo de simulación.
- c. Simulación sin ocupación, con mejoras en la envolvente.
- d. Simulación sin ocupación, con mejoras de diseño y en la envolvente.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VERANO

En las Figuras 6 se exponen los resultados del primer ciclo de análisis de verano. En la Figura 6a, se expresa la gestión de ventanas y en la Figura 6b, los patrones de ocupación; ambos gráficos se elaboraron en relación al desempeño térmico de la vivienda.

Se observa en los citados gráficos una relación entre la acción de abrir y cerrar ventanas, y el compromiso de favorecer la

ventilación natural nocturna, para una mejor sensación de confort interior. Los datos del registro de ocupación y gestión de aberturas graficado en barras grises (barra llena = abierto/con ocupación; barra vacía=cerrado/sin ocupación), muestra coincidencia entre el horario de salida de los usuarios por la mañana, para ir a trabajar, y el de cierre de las ventanas en la mayoría de los casos. Por otro lado, el registro de apertura de ventanas no coincide con los horarios de ocupación, lo que indicaría que esta acción está asociada, en mayor medida, a la gestión consciente de la envolvente en la búsqueda por lograr confort.

Se advierte en los gráficos 6a y 6b que la temperatura exterior (línea gris) varía entre 21.5°C y 33.5°C, marcando una amplitud térmica de 12°C en promedio para este periodo. Las temperaturas interiores (línea roja) se encuentran dentro del rango de confort en prácticamente todo el periodo observado, superando los 27°C en menos de 1°C los días 07 y 09.

Al comparar los datos de medición con el registro de uso y gestión, se distingue que los días en los cuales la temperatura supera el rango de confort corresponden a una apertura anticipada de las aberturas (barras grises), que no coincide con el descenso de temperatura en el exterior. Este efecto se pudo constatar claramente el día 06/01, cuando los usuarios retornaron a la vivienda, a las 21h, horario en que la temperatura exterior superaba a la interior en 4°C. Al abrir inmediatamente las ventanas, suponiendo un horario correcto (nocturno) de ventilación, la temperatura interior se vio incrementada de manera brusca, para empezar a descender pasadas las 24h. Los usuarios manifestaron, efectivamente, encontrar la casa más fresca al momento de llegar.

Los registros de voto de confort (Figura 7) revelan que, si bien los usuarios no se encontraron dentro del rango aceptable (>-5 y <+5) de la escala de sensación térmica de confort (ASHRAE, 2008), este valor fue cercano, sobre todo, por la noche al realizar la apertura de ventanas y permitir el ingreso de aire fresco y el refrescamiento de la masa térmica.

En la Figura 8 se indican los resultados del segundo ciclo de análisis de verano. Se analizaron patrones de ocupación y de uso de ventiladores en relación al desempeño térmico de la vivienda. Los usuarios mantuvieron las ventanas abiertas durante todo el día y la noche.

A partir de los gráficos es posible identificar una variación de la temperatura del ambiente interior (entre los 23 y 33.5°C.), influida directamente por la variación de temperaturas en el exterior de la vivienda (entre 21.5°C y 37°C), al encontrarse las ventanas abiertas de forma permanente. Las horas de ventilación nocturnas son insuficientes para acondicionar el ambiente interior, dada la acumulación de temperatura en el interior y

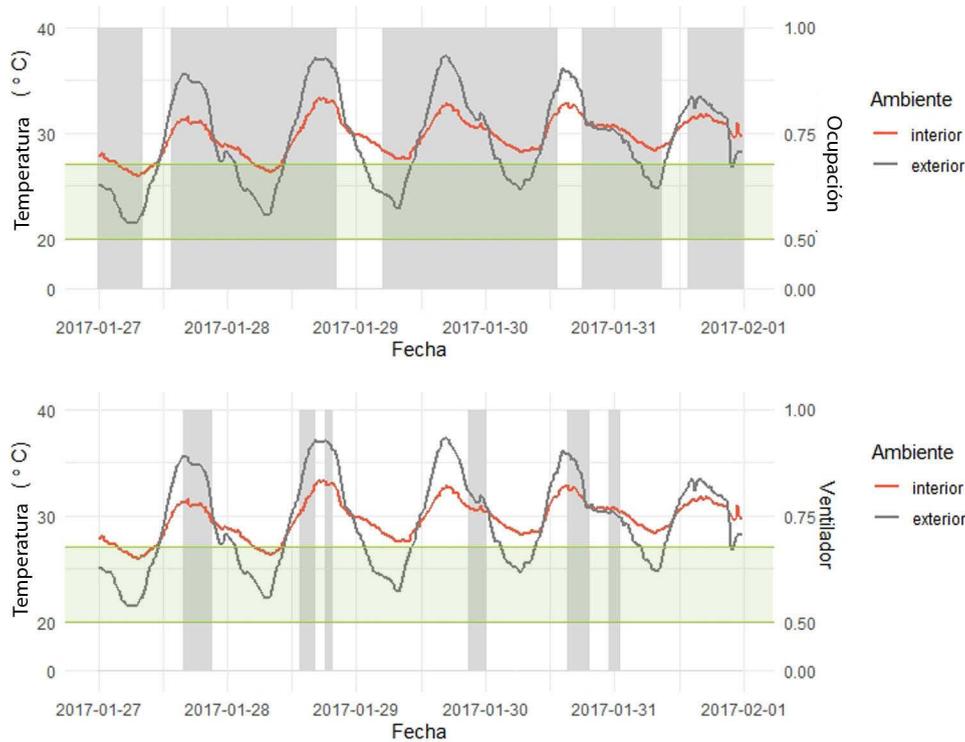


Figura 8. a) Temperaturas exterior e interior de verano, ventanas siempre abiertas, gestión de ventilador. b) Temperaturas exterior e interior de verano y registro de ocupación. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

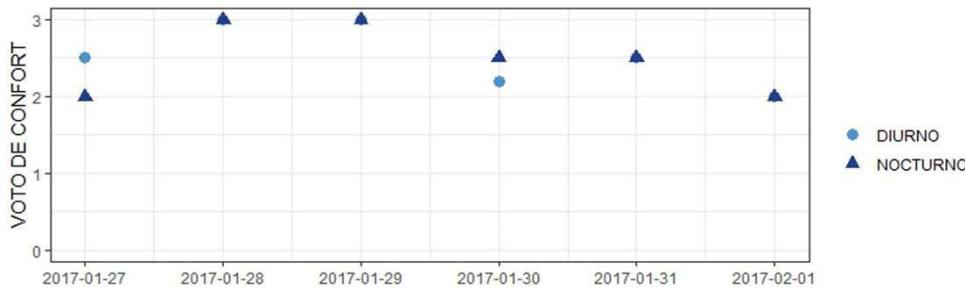


Figura 9. Datos de voto de sensación de confort térmico. Periodo de ventanas siempre abiertas. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

en los materiales mäsicos durante las horas de ingreso de aire caliente en el día, que no llega a ser disipado con la ventilación natural nocturna.

Las temperaturas interiores del ambiente en estudio (línea roja) se hallan por encima del rango de confort en todo el periodo estudiado, con excepción de algunos horarios nocturnos. El patrón de uso del ventilador, se observa coincidente con las máximas temperaturas diurnas y a primera hora de la tarde.

Se evidencia en este caso la falta de confort manifestada por los usuarios en todo el periodo (Figura 9) con valores que llegan a +3 (muy caluroso) en la escala de confort (ASHRAE, 2008) y en el uso intensivo de ventilador, principalmente en los horarios donde la temperatura alcanzó las máximas diarias (Figura 8b).

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE INVIERNO

A continuación, se presentan los resultados de la auditoría realizada en un periodo de invierno con presencia de los usuarios y aporte de energía auxiliar para calefacción.

Pese a que el registro de ocupación de toda la vivienda (Figura 10) no muestra relación con el encendido y apagado de estufa a gas presente en el espacio estudiado, el uso de la misma coincide con la ocupación de este ambiente. Se destaca especialmente la coincidencia del horario en que los ocupantes de la vivienda se acuestan a dormir por la noche, ya que, al trasladarse al dormitorio principal ubicado en planta alta, estos apagan la calefacción del ambiente de planta baja (en estudio), para encenderla en la mañana, temprano, al levantarse a desayunar.

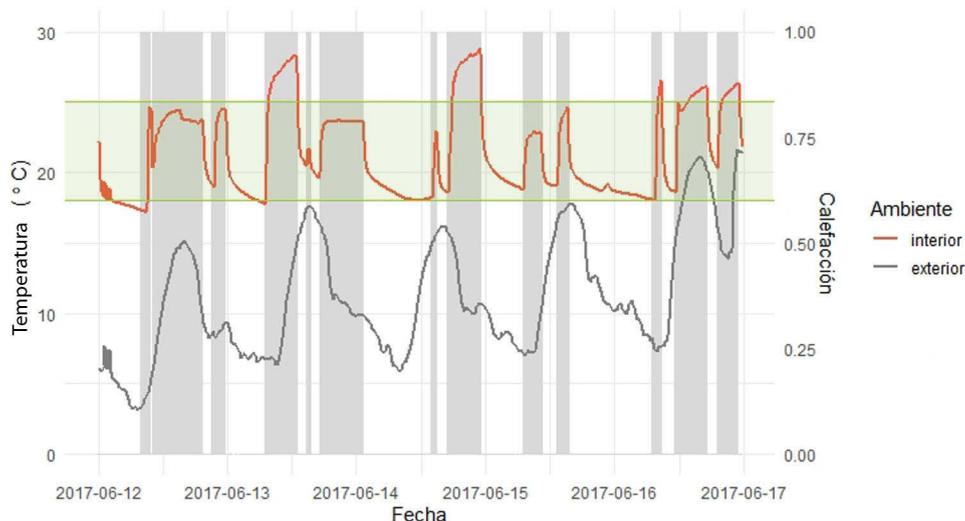


Figura 10. Temperaturas exterior e interior de invierno y uso de calefacción. Fuente: Elaboración de las autoras en R.



Figura 11. Temperaturas exterior e interior en invierno, sin ocupación. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

Es evidente la baja calidad de la envolvente y la escasa posibilidad de aprovechamiento del recurso solar que presenta la vivienda, lo que imposibilita el aprovechamiento de las estrategias pasivas recomendadas para este clima en invierno. La rápida pérdida de temperatura al apagar la estufa, suponen reducciones importantes en el aporte de energía auxiliar para calefacción si se incorporan mejoras en la envolvente edilicia.

En la Figura 11 se presentan los resultados del periodo de análisis de invierno sin energía auxiliar, el cual fue utilizado previamente para la validación del modelo a simular. En este gráfico se advierte que la temperatura interior del ambiente en estudio se mantiene muy por debajo de la zona de confort, desaprovechando la amplitud térmica exterior y el recurso solar.

La Figura 12 ilustra los resultados del primer periodo de simulación de invierno. Se proponen mejoras en la calidad de la envolvente, adicionando 5 cm de aislamiento térmico exterior en muros (poliestireno expandido de 5 cm de espesor), a partir de lo cual se consigue un valor de transmitancia térmica de $K=0.63W/m^2k$, y modificando las carpinterías existentes de chapa plegada y simple vidrio por unas de aluminio con doble vidrio de 4mm DVH ($K=4W/m^2k$). En igual sentido, se plantea la posibilidad de cerrar la conexión mediante la escalera de la planta baja con la planta alta para evitar un intercambio de temperatura entre la planta baja y la planta alta por efecto de la estratificación. Se reduce la superficie de abertura en la fachada sur del ambiente analizado en un 38%, de modo que esta termina midiendo $3.36 m^2$.

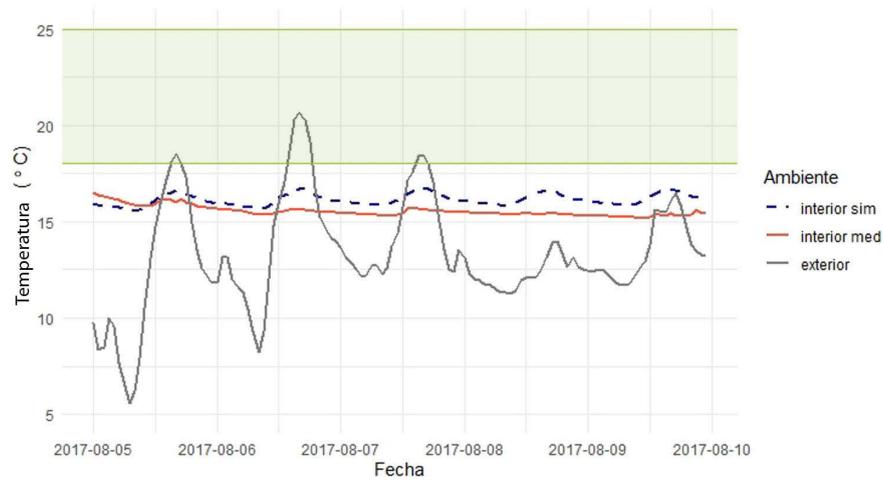


Figura 12. Temperaturas exterior e interior en invierno, simuladas, sin ocupación, con mejoras en la envolvente. Fuente: Elaboración de las autoras en R.



Figura 13. Temperaturas exterior e interior en invierno, simuladas, sin ocupación, con mejoras en la envolvente y diseño. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

Como se aprecia, a pesar de las mejoras propuestas, la temperatura interior simulada (línea azul segmentada) sólo se elevó por sobre la monitoreada (línea roja continua) en 1°C en horas de la noche y 2°C durante el día, quedando por debajo del rango de confort durante todo el periodo de simulación.

Igualmente, en el periodo simulado, las temperaturas interiores se aproximaron al rango de confort solamente en una pequeña franja horaria entre las 14h y las 18h, no logrando superar los 18°C, lo que manifiesta una escasa ganancia solar diurna.

En la Figura 13 se expresan los resultados del mismo periodo de simulación. En este caso, se propone evaluar el resultado que se obtendría al orientar la fachada del estar comedor hacia el norte (hacia el Ecuador en el hemisferio sur), permitiendo una mayor ganancia solar directa. Se conserva en este análisis el tamaño original de las aberturas

de la vivienda, como también las mejoras propuestas en la simulación antes expuesta.

Aquí es posible notar que la temperatura interior simulada se elevó por sobre la monitoreada en 2°C en horas de la noche y hasta en 4.5°C durante el día. Así, al hacer un mejor aprovechamiento de la ganancia solar directa, se logran temperaturas dentro del rango de confort en todo el periodo de análisis.

El aumento de las temperaturas interiores durante la franja horaria que va desde las 12 h p.m. a las 18h demuestra un mejor aprovechamiento de la ganancia solar directa en comparación a la simulación anterior. La diferencia entre las temperaturas interiores y exteriores nocturnas es en promedio de 11°C, lo cual evidencia el efecto de una mejor calidad de envolvente, que impide pérdidas térmicas. Se constata también la importancia del diseño basado en estrategias bioclimáticas para un mejor desempeño térmico.

CONCLUSIÓN

El estudio detallado de patrones de conductas de los usuarios de viviendas en la ciudad de Mendoza es abordado en esta investigación. Los resultados de ella indican que las conductas de los usuarios en relación con el uso y gestión, así como las características térmicas de la envolvente, son parámetros que afectan significativamente el desempeño térmico de viviendas en ciudades de clima templado de gran amplitud térmica diaria y estacional.

El caso estudiado se considera representativo de la tipología y materialidad de las viviendas edificadas y en construcción en Mendoza. El presente trabajo hace visible la importancia de contemplar la implementación de mejoras en la materialidad de la envolvente de viviendas en la ciudad de Mendoza, como son: la aislación térmica en muros y techos, la incorporación de doble vidriado hermético en aberturas, las protecciones solares en las aberturas norte para sombreadamiento, las protecciones nocturnas en aberturas al sur, entre otras.

La comparación de los resultados del análisis en periodo estival (Figura 14) demuestra que una buena gestión de la envolvente mediante la ventilación nocturna permite al usuario adaptar el ambiente interior a las condiciones de confort adecuadas sin el consumo de energía auxiliar. Es posible conservar temperaturas inferiores a los 27°C, favoreciendo el logro de confort interior en un 89% de los datos registrados y teniendo en cuenta el total de las horas auditadas independientemente de los periodos, con o sin ocupación.

La percepción térmica del usuario está directamente relacionada con las acciones de apertura y cierre de ventanas. Esta se observa en los días en que el usuario abre las ventanas antes de que la temperatura exterior haya descendido lo suficiente con respecto a la interior, haciendo aumentar esta última. Asimismo, se detectan casos en los que el usuario cierra las ventanas cuando todavía las temperaturas exteriores favorecen la ventilación de la masa térmica.

Por otro lado, acciones menos favorables, como son la apertura constante de ventanas, derivan en la disminución del confort, experimentándose temperaturas por sobre los 33°C. Si se realiza una gestión poco comprometida de ventanas, en la que se deja estas abiertas durante el día y la noche, solo el 22% de los datos registrados presenta temperaturas dentro del rango de confort, por lo que se requiere de sistemas de acondicionamiento auxiliar. Si bien el usuario intenta aplacar el calor mediante el uso de artefactos eléctricos, como lo es el ventilador, la falta de confort en los espacios interiores persiste.

La adecuada utilización de la estrategia de ventilación natural nocturna en la vivienda supone un compromiso constante del usuario en la búsqueda de su estado de confort. La apertura y cierre de las aberturas en los horarios más favorables, sumado al aprovechamiento de la inercia térmica de los materiales constructivos, permite la conservación de temperaturas agradables en el ambiente interior.

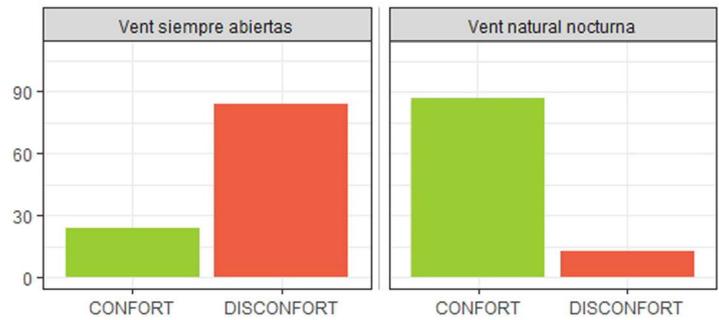


Figura 14. Porcentajes de confort en verano. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

En cuanto a la situación en invierno, es notable la falta de confort en el ambiente estudiado. Esto se podría mejorar incorporando alternativas de diseño pasivo como mejoras en la calidad de la envolvente y mayor superficie de ganancia solar directa. Al simular estas mejoras, se consiguen temperaturas interiores de hasta 19.5°C durante el día, y se conserva una diferencia de 1.5°C entre el día y la noche, sin el uso de sistemas auxiliares de calefacción. Estas medidas permiten una temperatura de confort casi constante, por lo que se requiere un mínimo aporte de calefacción auxiliar. Comparando los resultados de los datos de la auditoría de la vivienda de referencia y las simulaciones realizadas, se concluye (Figura 15) que una buena calidad de envolvente edilicia acompañada de un adecuado diseño de orientaciones favorables para el aprovechamiento de la ganancia solar directa, contribuyen al logro de confort interior en un 60% de los datos registrados. Por otra parte, es evidente en los datos extraídos de la medición *in situ*, que la vivienda de referencia tiene un bajo desempeño térmico en invierno, donde la calefacción auxiliar no es suficiente dado que la baja calidad de envolvente implica grandes pérdidas de temperatura, lo que a su vez repercute en el consumo energético.

Teniendo en cuenta esta evidencia, es inminente que las normativas de edificación locales exijan la incorporación de aspectos técnicos que determinan la calidad de la envolvente. Contemplar los mismos desde el inicio de la etapa de diseño y construcción de viviendas es fundamental para evitar los altos costos asociados a las remodelaciones edilicias.

La metodología aplicada en el análisis expuesto, basada en la aplicación de encuestas de uso del tiempo (cualitativa) y la medición de datos *in situ* (cuantitativa), permite cuantificar las acciones de los ocupantes y obtener una mejor comprensión de la causa y el efecto del fenómeno estudiado. El uso del mencionado método, en conjunto con métodos de análisis estadístico permitiría integrar datos en la variable de conducta del usuario en modelos de simulación edilicia, capaces de optimizar la precisión en la predicción del desempeño térmico y energético en próximos estudios.

En ese contexto, también se identifican importantes potencialidades en las viviendas unifamiliares de la ciudad de Mendoza que permiten al usuario conseguir el confort

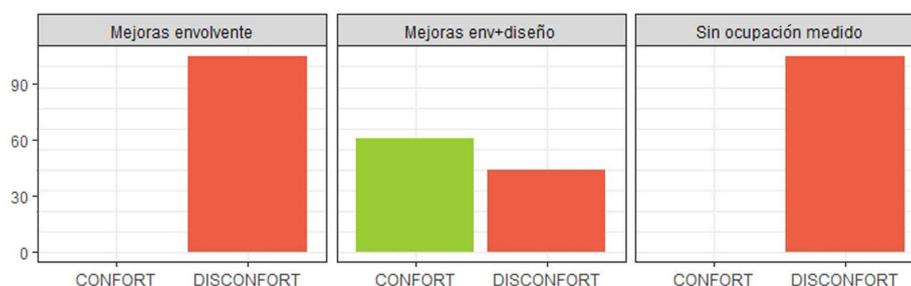


Figura 15. Porcentajes de confort en invierno. Fuente: Elaboración de las autoras en R.

en verano y en invierno mediante la correcta gestión de estrategias pasivas de acondicionamiento térmico edilicio. Cabe destacar, además, el rol activo del usuario y su potencial en relación al logro del confort térmico interior y el ahorro de consumos energéticos. Dicho rol se vincula directamente con la necesidad de comprender el funcionamiento de su vivienda y las acciones a su disposición capaces de modificar la relación interior – exterior de su vivienda, de acuerdo a su conveniencia. Esto repercutirá positivamente en la disminución de los requerimientos energéticos asociados al uso y la gestión.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Fuentes de financiamiento: ANPCYT FONCYT PICT INTERNACIONAL RAICES 2019-02752 (2021-2024). CONICET PIP 11220200101711CO (2021-2023).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso-Frank, A. de las P. y Kuchen, E. (2016). Desarrollo de una herramienta para validar la influencia del comportamiento del usuario sobre la eficiencia energética en edificios públicos de oficinas. *Hábitat Sustentable*, 6(2), 62–69. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2502>

Agencia Internacional de la Energía [IEA] y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [UNEP] (2019). Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. *UN Environment programme*, 224. Recuperado de <https://www.unep.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-construction-sector>

Andersen, R. K., Fabi, V. y Corgnati, S. P. (2016). Predicted and actual indoor environmental quality: Verification of occupants' behaviour models in residential buildings. *Energy & Buildings*, 127, 105–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.074>

Andreoni Trentacoste, S. E. y Ganem Karlen, C. (2017). Influencia del uso y gestión de la envolvente en el comportamiento térmico de verano de una vivienda en la ciudad de Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 7(2), 64–75. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.06>

Antoniadou, P. y Papadopoulos, A. M. (2017). Occupants' thermal comfort: State of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings. *Energy & Buildings*, 153, 136–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.001>

Arrieta, G. M. (2020). Valoraciones subjetivas y condiciones objetivas de confort térmico en viviendas. *Arquitecto*, (16), 57–66. DOI: <https://doi.org/10.30972/arq.0164553>

ASHRAE (2008). *ASHRAE. Proposed addendum d to Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy*. Recuperado de <http://www.ashrae.org>

Balvedi, B. F., Ghisi, E. y Lamberts, R. (2018). A review of occupant behaviour in residential buildings. *Energy and Buildings*, 174, 495–505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.049>

Carlucci, S., de Simone, M., Firth, S. K., Kjærgaard, M. B., Markovic, R., Rahaman, M. S., Annaqeeb, M. K., Biandrate, S., Das, A., Dziedzic, J. W., Fajilla, G., Favero, M., Ferrando, M., Hahn, J., Han, M., Peng, Y., Salim, F., Schlüter, A. y van Treeck, C. (2020). Modeling occupant behavior in buildings. *Building and Environment*, 174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106768>

Cuerda, E., Guerra-Santin, O. y Neila González, F. J. (2018). Definiendo patrones de ocupación mediante la monitorización de edificios existentes. *Informes de La Construcción*, 69(548). DOI: <https://doi.org/10.3989/id.53526>

D'Amanzo, M., Mercado, M. V. y Ganem Karlen, C. (2020). 10 preguntas de los edificios energía cero: revisión del estado del arte. *Hábitat Sustentable*, 10(2), 24–41. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.02>

De Simone, M., Carpino, C., Mora, D., Gauthier, S., Aragon, V. y Harputlugil, G. U. (2018). *Reference procedures for obtaining occupancy profiles in residential buildings* (Issue IEA EBC Annex 66 – Subtask A). Recuperado de <http://www.annex66.org/?q=Publication>

DEIE (2019). *Encuesta condiciones de vida. Informe anual*. Recuperado de <https://deie.mendoza.gov.ar/#!/repositorio-de-novedades/encuesta-de-condiciones-de-vida-informe-anual-2019-286>

Deuble, M. P. y de Dear, R. J. (2012). Green occupants for green buildings: The missing link? *Building and Environment*, 56, 21–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.029>

- Diulio, M. de la P., Netto, G. R., Berardi, R. y Czajkowski, J. D. (2016). Impacto de la envolvente en la demanda de energía en calefacción residencial de la región metropolitana de La Plata, tomando como caso testigo el reciclado energético de una vivienda. *Ambiente Construido*, 16(1), 55–70. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000100060>
- Filippín, C. y Larsen, S. F. (2005). Comportamiento termico de invierno de una vivienda convencional en condiciones reales de uso. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 67–72. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/82337>
- Flores-Larsen, S., Filippín, C. y 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>
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11–23. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- Göçer, Ö., Candido, C., Thomas, L. y Göçer, K. (2019). Differences in occupants' satisfaction and perceived productivity in high- and low-performance offices. *Buildings*, 9(9), 14–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings9090199>
- Hong, T., Yan, D., D'Oca, S. y Chen, C. (2017). Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. *Building and Environment*, 114, 518–530. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.006>
- Invidiata, A. y Ghisi, E. (2016). Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. *Energy and Buildings*, 130, 20–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. y 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>
- Li, J., Yu, Z., Haghghat, F. y Zhang, G. (2019). Development and improvement of occupant behavior models towards realistic building performance simulation: A review. *Sustainable Cities and Society*, 50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101685>
- Lopes, M. A. R., Antunes, C. H., Reis, A. y Martins, N. (2017). Estimating energy savings from behaviours using building performance simulations. *Building Research & Information*, 45(3), 303–319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1140000>
- Martínez Peralta, C. M. (2016). Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 25(47). DOI: <https://doi.org/10.24836/es.v25i47.321>
- National Renewable Energy Laboratory [NREL] (2017). *Energy Plus* (8.8). Recuperado de <https://energyplus.net/downloads>
- Olgay, V. (1998). *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Palme, M., Carrasco, C. y Gálvez, M. Á. (2016). Estimación del riesgo de sobrecalentamiento y del potencial de refrigeración por ventilación natural de viviendas unifamiliares en ciudades costeras de Chile. *Hábitat Sustentable*, 6(2), 52–61. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2621>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. [En prensa]. Recuperado de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report_smaller.pdf
- Pérez, M. (2016). Ecoinvolucrate: Alternativa para la sostenibilidad en la Arquitectura. *Estoa*, 11(V), 29–35. Recuperado de <http://192.188.48.56/ojs/index.php/estoa/article/view/619>
- Roaf, S. (2018). Building resilience in the built environment. En Trogal, K., Bauman, I., Lawrence, R. y Petrescu, D. (Eds.). *Architecture and Resilience. Interdisciplinary Dialogues* (pp. 143–157). New York: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315159478-11>
- Serra Florensa, R. y Coch Roura, H. (1991). *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: UPC.
- Servicio Meteorológico Nacional [SMN]. (2018) ¿Cómo clasificamos la intensidad del viento? Recuperado de <https://www.smn.gov.ar/noticias/¿cómo-clasificamos-la-intensidad-del-viento?fbclid=IwAR0jUzpuWyuO9CN7uEHhsXBXOeHV2y2eUlskVrypMupDdaWagNofGCzjgWs>
- Silva, A. S., Almeida, L. S. S. y Ghisi, E. (2016). Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. *Energy and Buildings*, 128, 270–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.084>
- Sosa, M. B., Correa, E. y Cantón, M. A. (2016). Morfología urbana y comportamiento térmico de canales viales. Desarrollo de un modelo predictivo para temperaturas máximas. *Urbano*, 19(33), 66–75. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/2358>
- Stocco, S., Cantón, M. y Correa, E. (2013). Evaluación de las condiciones térmicas de verano y eficiencia ambiental de distintos diseños de plazas urbanas en Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 3(2), 19–34. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/432>
- Wagner, A. y O'Brien, W. (2018). *Exploring Occupant Behavior in Buildings*. Springer International Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61464-9>