Validación de modelos estadísticos univariados para la predicción de la temperatura interior en envolventes simples

Validation of univariate statistical models for predicting indoor temperature in simple envelopes

DOI: https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i18.298

ALBA RAMOS SANZ
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. ORCID: 0000-0003-4069-4740
Correo electrónico: aramossanz@faud.unsj.edu.ar

Recepción: 21 de junio de 2024. Aceptación: 27 de mayo de 2025

RESUMEN

El presente trabajo persigue determinar la validez de los resultados en el empleo de modelos estadísticos univariados para la predicción de la temperatura interior de una envolvente afectada principalmente por la conducción térmica. Para dar respuesta al objetivo general planteado, se aborda una investigación concluyente de tipo descriptivo cuyo gran volumen de datos cuantitativos demanda el empleo de técnicas estadísticas para su análisis. La investigación alcanza una instancia concluyente de tipo causal en cuanto permite verificar hipótesis operativas en dos instancias del procedimiento. Los resultados de la investigación indican que la estabilidad térmica del recinto podría ser un indicador del empleo exitoso de modelos estadísticos univariados en la predicción de la temperatura interior; de esta manera se evita el empleo de otras técnicas y modelos más complejos para la estimación de dicha variable de interés en el área de la eficiencia energética, el confort térmico y la sustentabilidad de las edificaciones.

Palabras clave: modelos empíricos, modelos estadísticos, edificaciones, temperatura interior

ABSTRACT

The present work aims to determine the validity of the results in the use of univariate statistical models for the interior temperature prediction of an envelope mainly affected by thermal conduction. In order to respond to the general objective, a conclusive descriptive research is undertaken whose large volume of quantitative data requires the use of statistical techniques for its analysis. The work reaches a conclusive stage of causal research in that it allows the verification of operational hypotheses in two instances of the procedure. The results of the research indicate that the thermal stability of the enclosure could be an indicator of the successful use of univariate statistical models in the prediction of indoor temperature, avoiding the use of other techniques and more complex models for the estimation of this variable of interest in energy efficiency, thermal comfort and sustainability in buildings.

Keywords: empirical models, statistical models, buildings, inside temperature

http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que las envolventes arquitectónicas son responsables de entre el 30% y el 40% del consumo de energía primaria, emisión de gases de efecto invernadero y generación de desechos (Organización de las Naciones Unidas, ONU, 2007), resulta fundamental hallar métodos de diagnóstico termo-energético para hallar las oportunidades de mejora en la edilicia. La investigación en optimización energética de los edificios data de los años 70, cuando aparecen las primeras publicaciones sobre la temática (Wilson y Templeman, 1976). Sin embargo, la gran mayoría de las publicaciones científicas del área se presentan a partir del año 2000, cuyo número ascendió rápidamente en solo cinco años (Nguyen, Reiter y Rigo, 2014), debido al interés que despertó entre los investigadores, quienes recurrían entonces a herramientas de cálculo mediante el empleo de gráficos. Esta línea de investigación marca una tendencia en áreas de Arquitectura y Construcción (Santos, Costa y Grilo, 2017), la cual señala la mayor indagación en temas de eficiencia energética y arquitectura sustentable bajo las temáticas de *net zero energy buildings, near zero energy buildings, passive buildings*, etc. A lo largo de los últimos veinte años, las editoriales internacionales de revistas de alto impacto han dado cuenta de la relevancia en la búsqueda de mejoras a la envolvente arquitectónica, para optimizar su desempeño termo-energético (Ham y Golparvar-Fard, 2013; Ramos Sanz, 2019). Asimismo, los esfuerzos implicados en introducir los conceptos y proporcionar las especificaciones técnicas de los aspectos que componen un edificio pasivo se ven plasmados en normativas europeas como el *Energy Performance Buildings Directive* (EPBD, *en* Shady *et al.,* 2017). En Argentina, dichos esfuerzos provienen de los años noventa, cuando se emitió un conjunto de normativas desde el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM, 2019), las cuales trabajan en línea con normativas internacionales como las de la *International Organization for Standarization* (ISO, 2019). Las citadas normas analizan aspectos de la envolvente arquitectónica sobre los cuales es posible accionar para obtener reducción de la demanda energética en los edificios. Entre las especificaciones de estas normativas, las IRAM 11605 (1996) indican valores de transmitancia térmica (K o U) mínima y máxima admisible para envolventes verticales y horizontales localizadas en diversas zonas bioclimáticas (IRAM 11603,1996). Para el cálculo de la transmitancia térmica en régimen estacionario se establecen los procedimientos y modelos analíticos utilizados en la norma IRAM 11601 (2002). En la actualidad, las normativas relacionadas con la eficiencia energética en edificios parecen inclinarse hacia la obligatoriedad del cumplimiento de sus estándares, a diferencia de lo que sucede en Estados Unidos, donde cada estado considera dicho cumplimiento como una opción (*International Energy Agency*, IEA, 2019). De la misma manera sucede en países de América Latina en los cuales las normas existen, pero su aplicación es voluntaria. Por otra parte, en Argentina la necesaria implementación de las normativas IRAM, como sucede en otros países de la región, se halla con la competencia nacida en el discurso político mediante el cual se emiten manuales de eficiencia energética y sustentabilidad carentes de sustento técnico-científico (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). Sean obligatorias u optativas, la aplicación de los modelos provistos por las normativas vigentes asiste a técnicos e investigadores en la aproximación relativamente sencilla sobre situaciones de transferencia de calor que podrían ser más complejas. Sin embargo, estos modelos sugeridos por las regulaciones no limitan el desarrollo de modelos nacidos a partir de datos empíricos o de complejos programas de simulación.

Las normas IRAM se enfocan en establecer métodos regulados para la determinación del nivel de desempeño térmico de las envolventes, sin profundizar demasiado en una segunda instancia, como podrían ser los tecnicismos propios del desarrollo de estrategias de optimización pasiva. Varias investigaciones señalan el empleo de estrategias pasivas alcanzadas con diversas técnicas, pero enmarcadas en los estándares de

transmitancia térmica de las envolventes (paredes, techos y pisos). Este *benchmarking* estructurado a partir de modelos sencillos y regulados consigue contribuir significativamente en la reducción de la demanda energética (Li, Yang y Lam, 2013). Sin embargo, el peso de la eficiencia sobre las edificaciones inclina con frecuencia la balanza hacia los sistemas activos, observado en publicaciones en las cuales los equipos mecánicos (Liu *et al.,* 2019) son adaptados a envolventes que presentan un desempeño energéticamente ineficiente; de esta manera se mantienen sin optimizar (Noris *et al.,* 2014).

Una de las dificultades metodológicas al momento de determinar el desempeño termo-energético de una envolvente es su abordaje desde el método científico. El estudio experimental de las envolventes se complejiza dados algunos factores, entre los cuales se pueden citar sus dimensiones espaciales, el gran número de materiales constructivos que las componen, la incidencia del usuario en el espacio analizado, el destino del edificio, etc. En una línea imaginaria de tiempo, se observa una búsqueda en el desarrollo de herramientas que, en un principio, surgen a partir de la incorporación de sencillos modelos de cálculo cuyos resultados se contrastan con los valores de referencia proporcionados por las normativas existentes (Fernández y Garzón, 2024; Mazzocco *et al.,* 2018); con la llegada de mejores capacidades informáticas y técnicas, los esfuerzos por estimar la demanda energética de un edificio y su temperatura interior conducen a métodos de cálculo en régimen variable basados en el empleo de herramientas de simulación cuyo fundamento se encuentra en funciones matemáticas más complejas, como es el caso de *Energy Plus*. El dominio de los programas de simulación energética requiere preparación técnica; a fin de superar esta barrera, algunos softwares conservan el motor de cálculo y entregan por defecto *in-puts* que, en un principio, eran provistos por el usuario. De esta forma —en la búsqueda de simplificación—, programas como *Design Builder* reproducen los resultados de simulaciones energéticas en una agradable interfaz gráfica, lo que exige una menor preparación técnica al usuario. El uso de la estadística en las investigaciones tiene implicancias similares; proporciona técnicas para la construcción de modelos que, con el auge de las ciencias de datos, reclaman cada vez más una capacitación en la materia. Este avance en el empleo de técnicas estadísticas en estudios de eficiencia energética muestra con frecuencia un dominio de técnicas cada vez más complejas para la obtención de modelos. En la actualidad existe una gran oferta de herramientas de simulación termo-energética; algunos softwares de uso común y mayor difundidos en el área son *Energy Plus*, *Ecotect*, *Design Builder* (*Arquitectura y Sostenibilidad*, 2024). No obstante, dichos programas demandan conocimiento previo sobre transferencia de calor y de masa. Véase el caso del uso frecuente de *Energy Plus* (Flores Larsen, Filippín, Barea, 2018) en los objetos de estudio de sencillas geometrías, como la de vivienda social, abordados con herramientas de considerable complejidad.

MARCO TEÓRICO

Podrían identificarse dos aproximaciones a la metodología de análisis energético de las edificaciones. La primera de ellas se basa en la construcción de objetos virtuales de casos reales, en donde las características geométricas de la edilicia, las propiedades térmicas de los materiales y la serie de datos climáticos son fundamentales. Esta primera aproximación se conoce como *Building Energy Modelling* (BEM; Bastos *et al.,* 2021). La segunda aproximación consiste en el estudio empírico del objeto real mediante la obtención de series de datos de parámetros ambientales de interés, como puede ser la temperatura interior (Schwartz *et al.,* 2021). Las diferencias técnicas entre ambas aproximaciones son relevantes; en el primer caso se trata de la construcción virtual de un caso real mediante el empleo de herramientas informáticas como las mencionadas en la introducción, mientras que en el segundo caso se accede al caso real, extrayendo de él los datos

de interés mediante el uso de instrumental para mediciones *in situ*.

La segunda aproximación metodológica al análisis energético de una envolvente puede estimarse con el registro de datos (Szagri *et al.*, 2022). Cuando el potencial de lectura de los instrumentos de medición lo permite, es posible alcanzar un gran volumen de información, cuya técnica de procesamiento más frecuente pertenece al campo de la estadística descriptiva e inferencial. No obstante, las técnicas estadísticas no son exclusividad de la segunda aproximación, fundada en el relevamiento de datos, pues son necesarias también para tratar las salidas de las simulaciones energéticas obtenidas en la primera aproximación metodológica, que para un año de mediciones horarias alcanzan los 8,760 datos por variable.

Las diferencias entre las aproximaciones sugeridas se pueden observar en la naturaleza de la información que sustenta sus modelos. Algunos de los parámetros que podrían introducir ruido en la simulación son los de propiedades de los materiales —conductividad térmica, difusividad térmica, etcétera— así como también los datos climáticos sintetizados en un archivo tipo *Energy Plus Weather file* (EPW), los cuales se obtienen de las mediciones originales provenientes de estaciones meteorológicas (Cozza *et al.*, 2021). Metodológicamente, los datos referidos a las propiedades térmicas de los materiales, así como la información climática, constituyen fuentes secundarias, ya que el investigador desconoce la técnica con la cual los parámetros fueron relevados y el nivel de precisión y alcance del instrumental con el cual se recoge la información. De esta manera, la confiabilidad de los resultados en ambas aproximaciones es distinta; en la primera aproximación existe una debilidad al momento de predecir el comportamiento energético de una envolvente a partir de modelos estadísticos construidos sobre la base de datos de salida de la simulación. En este caso el error que se suma con cada variable utilizada en el modelo podría verse afectado por el empleo de fuentes secundarias. En la segunda aproximación es posible obtener salidas más confiables, ya que el modelo se construye con datos de origen primario. En esta situación el investigador conoce el procedimiento de recolección de los datos y la precisión de los instrumentos de medición, con lo cual tiene dominio sobre los hechos y puede estimar el margen de error del estudio de campo que realiza (O'Rourke *et al.*, 2005).

Los modelos, como representación de la realidad en general pueden ser más o menos complejos según el propósito de la investigación, y esta complejidad condiciona a su vez el número de variables explicativas funcionales a la predicción del comportamiento térmico de la envolvente. En este contexto, un modelo estadístico univariado podría considerarse el más sencillo, debido a que se basa en datos de un único parámetro de entrada (Damasceno, 2020). Estos modelos univariados aún pueden simplificarse más evitando abordar su componente estocástica en la búsqueda de un modelo determinístico (Oddi y Garibaldi, 2024).

METODOLOGÍA

El presente trabajo se propone responder a la siguiente pregunta de investigación:

> ¿Qué validez tiene el empleo de modelos estadísticos univariados para la predicción de la temperatura interior en envolventes simples, caracterizadas por la conducción como modo principal de intercambio térmico?

A fin de dar respuesta a la pregunta planteada sobre la eficacia de una simplificación estadística de los análisis energéticos de las envolventes (Pajek y Kosir, 2017), mediante el empleo de datos primarios, se propone un estudio comparativo sobre casos reales de geometrías puras cuya variable destino o uso se neutraliza al abordar espacios ausentes de usuarios, a fin de observar la interacción entre la envolvente y el entorno climático, reduciendo también los modos de intercambio térmico a la conducción térmica predominantemente.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la validez de los resultados en el empleo de modelos estadísticos univariados para la predicción de la temperatura interior de un espacio contenido en una envolvente simple, afectada principalmente por la conducción térmica con el medio exterior.

Para dar respuesta a la pregunta y el objetivo general planteados, se aborda una investigación concluyente de tipo descriptivo cuyo gran volumen de datos cuantitativos demanda el empleo de técnicas estadísticas para su análisis. El trabajo alcanza una instancia de investigación concluyente de tipo causal, en cuanto permite verificar hipótesis operativas en dos instancias del procedimiento. En la primera instancia se contrastan los datos empíricos de los registros de temperatura interior (registro 1) con los datos obtenidos con la función estadística, mientras que en la segunda instancia se ejercita el modelo estadístico validado con un nuevo registro de datos de temperatura interior (registro 2), extraído de los mismos casos en un período posterior (figura 3). Este segundo registro es funcional a la validación de las funciones matemáticas que responden al modelo estadístico, mientras que el primer registro de datos es útil para la construcción de dichos modelos.

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La zona donde se asientan los casos de envolventes analizadas se ubica en los límites de lo que la norma IRAM 11601(1996) define como zona bioclimática IIIa, caracterizada en estación de invierno por temperaturas promedio mínimas de 0.3°C y máximas de 18°C, mientras que en la estación de verano los valores promedio mínimos son de 18.4°C y máximos de 3.6°C. Es notable que, en ambas estaciones del año, la dispersión es de entre 15 K y 17.7 K, propio de un clima árido, de gran amplitud térmica.

CARACTERIZACIÓN DE LOS CASOS

Los casos de estudio se seleccionan por conveniencia; constituyen datos primarios de investigaciones realizadas en años anteriores, con finalidades distintas a la propuesta en el trabajo. Estos datos, secundarios para la actual investigación, han sido extraídos de casos identificados a partir de:

- envolventes conformadas por geometrías sencillas,
- recintos con escasa o nulo intercambio convectivo,
- recintos con escasa o nula irradiancia solar directa sobre la envolvente,
- recintos pertenecientes a una única zona térmica,
- envolventes gobernadas por un modo de transferencia de calor predominante basado en la conducción térmica a través de los elementos constructivos (piso, techo, muro),
- envolventes representativas de la construcción tradicional, basadas en el empleo de materiales tales como mampuestos de ladrillo o adobe y hormigón armado,
- envolventes representativas de la construcción tradicional, basadas en el empleo de estructuras de encadenado en vigas y columnas, así como de losas macizas armadas.

Entre las variables donde difieren los casos se pueden mencionar:

- la composición de los elementos constructivos,
- la capacidad volumétrica del espacio interior,
- la proporción o superficie expuesta al entorno climático.

Las envolventes seleccionadas se diferencian en su composición material más o menos compleja: algunas de ellas contienen capas simples y, otras, capas múltiples. Entre las envolventes monocapa se mencionan las unidades materializadas en hormigón armado. Entre las envolventes multicapa hallamos casos constituidos por mampostería de ladrillo cerámico, estructura encadenada en hormigón armado, capas de revoque grueso y fino hacia el interior y revestimiento en mármol travertino hacia el exterior. No obstante,

estas envolventes multicapa no contienen cámaras de aire o elementos adiabáticos que limiten la transferencia de calor por conducción térmica. Las formas de las unidades observadas, en línea con la sencillez del estudio, y como se indica, consisten en geometrías simples. Algunas de estas son cuerpos geométricos cilíndricos, y otras son paralelepípedos, con factores de forma que se definen en un rango que va desde 0.85 hasta 2.20 (tabla 1). Los volúmenes de los espacios interiores encerrados en las envolventes construidas son diferentes también: desde 233 m^3 y hasta 25 m^3. En consecuencia, las superficies de las envolventes son significativamente distintas en cada caso analizado.

Para la caracterización teórica de la conducción térmica de los casos se realiza un cálculo simplificado de la transmitancia térmica en régimen estacionario. El método de cálculo es determinístico, y no considera la aleatoriedad de la variable temperatura exterior, en función del tiempo, sino emplea datos promedios de la zona bioclimática de inserción (ver *Caracterización climática*). Para su estimación, la transmitancia térmica de un elemento constructivo se define por medio del indicador K o *U-valor*, que representa el resultado de la inversa de la resistencia térmica del material de la envolvente, cuando esta es monocapa. Cuando se trata de un elemento constructivo de tipo multicapa, se recurre al método de cálculo de la analogía eléctrica, en el cual la resistencia se entiende como la suma de las resistencias térmicas de cada una de las capas que componen la envolvente de dicho elemento (R_{total}) y de las resistencias superficiales interiores y exteriores (R_{si} y R_{se}, respectivamente). Las resistencias superficiales exteriores e interiores caracterizan el intercambio térmico por conducción, convección y radiación sobre la capa laminar que se adhiere a la envolvente superficial. De esta manera, la expresión de la transmitancia térmica K se considera:

$$K = \frac{1}{Rse} + \frac{1}{Rtotal} + \frac{1}{Rsi} \quad (W/m^2K) \qquad (1)$$

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (m^2K/W) \qquad (2)$$

TRABAJO DE CAMPO

El relevamiento de los casos es polietápico: se distribuye en dos instancias que abordan el registro de los datos de la materialidad de la envolvente y el registro de las temperaturas interior y exterior a lo largo de un espacio temporal, llevado a cabo en dos instancias diferentes denominadas registro 1 (2011) y registro 2 (2021).

A- RELEVAMIENTO DE DATOS DE LA ENVOLVENTE:

Para registro 1 se lleva a cabo una inspección ocular y el levantamiento de los datos visibles sobre las características de la envolvente, tales como materiales, superficies, volúmenes y espesores. También se observa la relación de cada caso con su entorno: aisladas, adosadas, apiladas, de localización de nivel superficial (+0.00 m) o subterránea (-0.00 m), etc. Los materiales constitutivos de las envolventes se extraen de documentación técnica específica a partir de planos oficiales de estructura y arquitectura. La información reunida en el registro 1 es objetivo de una investigación previa, con fines diferentes al actual, cuyos resultados se publican en Ramos Sanz (2017).

FIGURA 1

Espacio interior de una envolvente homogénea, construida en hormigón armado, (ASHVF3; tablas 1 y 2).

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2

Imagen superior del fondo de un interior de envolvente heterogénea, construida c
on mampuestos de ladrillo con revoque cementicio (ESSLVC1, tablas 1 y 2).

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 1

Caracterización de las envolventes analizadas en el trabajo

	MATERIAL						
	Ladrillón			Adobe	Hormigón armado		
Caso	■ATSlVc3	■ESSlVc1	■ESSlVc2	■ETSaVc1	●ESHVf2	●ASHVf3	■ESHVc2
Factor de forma	1.06	2.08	1.51	2.22	1.12	0.85	1.26
Volumen (m^3)	233	25	89	25	162	387	115
Forma geométrica	Paralelepípedo				Cilindro		Paralelepípedo

TABLA 2

Descripción de las nomenclaturas utilizadas para la denominación de cada caso de envolvente

Relación entorno	A	aislada
	E	entre envolventes
Nivel	S	sobre rasante
	T	subsuelo
Material	Sl	sillería o mampostería de ladrillón
	Sa	sillería o mampostería de adobe
	SH	sillería o mampostería de hormigón
Capacidad (m^3)	1	hasta 90
	2	entre 90 y 150
	3	más de 150

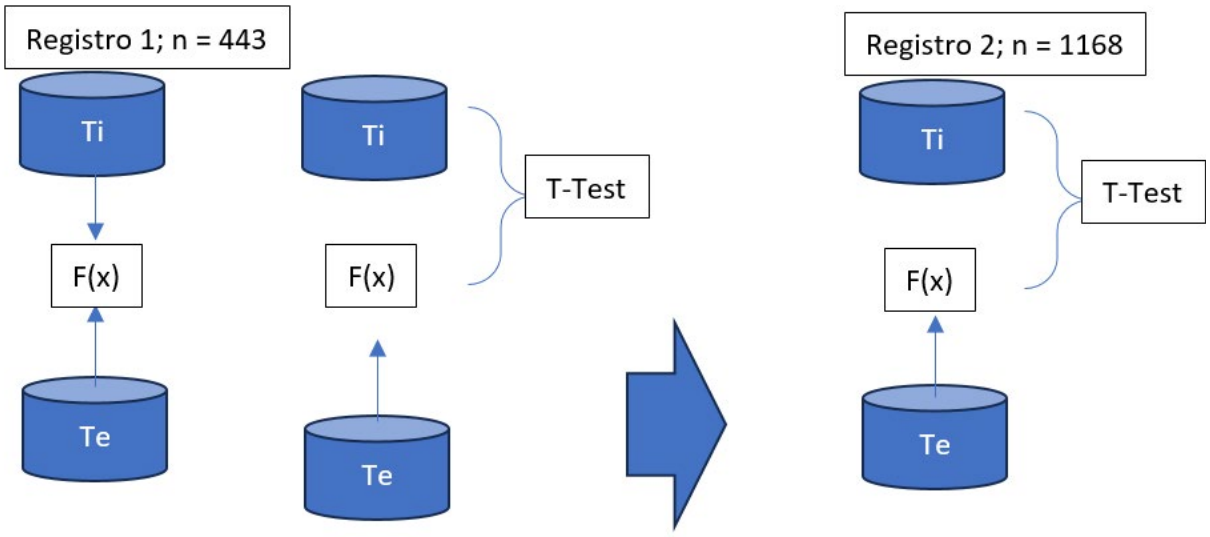
Fuente: Elaboración propia (ref. autor).

B- RELEVAMIENTO DE DATOS DE TEMPERATURA:

Por tratarse de una zona bioclimática árido cálida, en este estudio la variable humedad no se considera, pues tiene un efecto despreciable en el intercambio térmico. Los modelos se estructuran sobre la base de dos conjuntos de datos empíricos, llamado el primero registro 1 (2011), pero se validan mediante el empleo de un nuevo registro de datos de entrada de temperatura exterior y datos comparativos de temperatura interior del caso real, efectuados en simultáneo, y denominado registro 2 (2021). Estos relevamientos polietápicos se efectúan con el empleo de equipamiento constituido por sensores HOBO U12 con los cuales se obtienen en caso del registro 1,443 datos de temperatura interior y exterior por cada caso analizado, distanciados temporalmente cada 30 minutos. Los sensores HOBO U12 presentan un error de precisión de +/- 0,35 K, y los datos almacenados en el *datalogger* se descargan en HOBO Ware, para luego procesarse mediante el software SPSS® de IBM. El dato que el sensor registra es la temperatura del aire, a la sombra. Espaciadas en el tiempo, en el año 2021 se relevan nuevamente las mismas envolventes para construir el registro 2, con un alcance de 1,168 datos. El registro 1 comprende los datos de temperatura interior con los cuales se construyen los modelos estadísticos univariados de cada caso de envolvente, mientras que los datos de temperatura del registro 2 se destinan a la validación del modelo estadístico univariado, introduciendo como variable independiente el registro 2 de la temperatura exterior, y utilizando los datos de temperatura interior del mismo registro para validar la precisión del modelo obtenido con la información del registro 1 (figura 3).

FIGURA 3

Síntesis gráfica del procedimiento de validación de las funciones estadísticas univariadas de predicción de los datos de temperatura interior en las envolventes simples consideradas.



Fuente: Elaboración propia.

PRUEBAS DE HIPÓTESIS

En el trabajo se emplea la técnica estadística del test de hipótesis para dos instancias; una de ellas corresponde al test de normalidad de los datos y la otra al test de diferencia de medias. Para ambas pruebas de hipótesis se definen:

- Error tipo I α=0.05 (dos colas)
- Intervalo de confianza IC = 95%

A - TEST DE NORMALIDAD

Para recurrir a una técnica adecuada de test de hipótesis se debe conocer a qué tipo de distribución pertenecen los datos registrados. Se determina en principio la naturaleza de la distribución de los datos empíricos registrados con sensores HOBO (registro 1 y registro 2) y también se procede posteriormente a analizar la naturaleza de los datos de salida provenientes del modelo estadístico univariado. Dichos datos son puestos a prueba en el test de normalidad de *Kolmorogov-Smirnov* (García Ferrando, 1989; Moore, 2000a) para una muestra, instrumentado por medio del empleo del software IBM SPSS Statistics (2024). Las hipótesis operativas que plantea el test de hipótesis son las siguientes:

H_0 = distribución normal	$H_1 \neq$ distribución normal

B - TEST DE DIFERENCIA DE MEDIAS

Los datos registrados con sensores de temperatura interior del registro 1 se comparan con los datos de salida de temperatura interior, provistos por el modelo estadístico univariado. Como hipótesis nula se plantea que la diferencia entre ambos datos es igual a cero;

$H_0 = 0$	$H_1 \neq 0$

Con el empleo de la hipótesis nula (H_0) se respalda el supuesto planteado, mientras que mediante la utilización de la hipótesis alternativa H_1 se estima que entre los datos existen diferencias. Las hipótesis propuestas se ponen a prueba con un error aceptable del 5% de α. El número de observaciones para los datos empíricos correspondientes a las mediciones con sensores es de n = 443 para el registro 1 y de n = 1168 para el registro 2.

RESULTADOS

CONDUCCIÓN TÉRMICA

Como se señala anteriormente, los casos analizados se caracterizan por transferencia de calor predominante por medio de la conducción térmica a través de la materialidad constructiva de la envolvente. Para todos los casos analizados se estiman analíticamente los valores característicos de la conducción térmica (tabla 3), la transmitancia térmica (U o K) y la resistencia térmica (R) de cada elemento de la envolvente, a partir de las expresiones (1) y (2). Luego se promedian sus valores, a fin de obtener una referencia unitaria (por m²).

TABLA 3

Coeficientes de resistencia (R) y transmitancia térmica (K) promedios para los diferentes casos, organizados según su material predominante

	Material predominante						
	Ladrillón			Adobe	Hormigón armado		
Caso	■$ATSIV_{c3}$	■$ESSIV_{c1}$	■$ESSIV_{c2}$	■$ETSaV_{c1}$	●$ESHV_{f2}$	●$ASHV_{f3}$	■$ESHV_{c2}$
R medio (m^2K/W)	1.56	1.27	0.93	1.69	0.99	1.16	1.20
K medio (W/m^2K)	0.64	0.79	1.08	0.59	1.01	0.86	0.83

Fuente: Elaboración propia.

SUPUESTO DE DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA INTERIOR RESPECTO DE LA TEMPERATURA EXTERIOR

Para la conducción térmica a través de una envolvente, el salto térmico temperatura exterior/temperatura interior (T_i-T_e) es el impulso que le da fuerza a la transferencia de calor. En esta sección interesa conocer la relevancia de la variación térmica en el interior de las envolventes abordadas cuando se manifiesta una variación de la temperatura exterior, suponiendo una dependencia entre ellas. Para identificar la fuerza de

la dependencia se recurre al empleo de un indicador estadístico de correlación univariada, el coeficiente de Pearson. Los resultados de la tabla 4 señalan que las correlaciones T_i-T_e en todos los casos son moderadas, aunque se observa la mayor correlación en las envolventes materializadas en ladrillón, seguidas de la envolvente de adobe y finalmente las construidas en hormigón armado. Estos resultados reflejan una dependencia moderada del cambio de la temperatura interior ante un cambio en la temperatura exterior, lo cual indica que existen, además de la variable independiente temperatura exterior, otros factores no considerados en este estudio, y que evidentemente inciden significativamente en la variación de la temperatura interior de las envolventes.

TABLA 4

Coeficientes de correlación entre temperatura interior y temperatura exterior para los diferentes casos, organizados según su material predominante

	Material						
	Ladrillón			Adobe	Hormigón Armado		
Caso	■$ATSIV_{c3}$	■$ESSIV_{c1}$	■$ESSIV_{c2}$	■$ETSaV_{c1}$	●$ESHV_{f2}$	●$ASHV_{f3}$	■$ESHV_{c2}$
Coeficiente de Correlación r T_i/T_e	0.58	0.47	0.49	0.48	0.39	0.40	0.28

Fuente: Elaboración propia.

Modelo estadístico univariado T_i-T_e

La función estadística que define el comportamiento de una variable dependiente (T_i) respecto de una variable independiente (T_e) bajo el supuesto de dependencia se expresa;

$$T_i = \beta_0 + \beta_1 T_e + \mu \qquad [K] \qquad (3)$$

Cuando el coeficiente $\beta_1\beta_1$ sea distinto de cero y con una significancia elevada, la función (3) puede emplearse para predecir el desempeño de la envolvente similar, siempre que se conozca el valor de la variable explicativa T_e. El coeficiente $\beta_0\beta_0$ es denominado intercepto, y representa el valor medio base desde el cual se lleva a cabo la razón de cambio $(\beta_1)\beta_1)$ en T_i respecto de T_e (Moore, 2000b). Finalmente, el coeficiente $\mu\ \mu$ se conoce como residuo o error, en el sentido de que representa la componente exógena al modelo; es decir, aquella información que no se puede explicar por la interacción de las variables explicada y explicativa consideradas para este modelo. No es objetivo del presente trabajo establecer la magnitud del coeficiente $\mu\ \mu$ ni su origen, sino que el modelo es válido para $\mu\mu$=0. Es decir, la instancia estocástica del modelo estadístico no se considera, sino el estudio comprende una construcción simplificada en un tipo de modelo determinístico. A partir de los 443 datos del registro 1 de cada envolvente relevada, se construyen los parámetros $\beta_1\beta_1$ y $\beta_0\beta_0$ (tabla 5), los cuales constituyen la función del modelo estadístico univariado, con el cual se espera efectuar proyecciones.

TABLA 5

Parámetros del supuesto de dependencia, valores de determinación estadística (R^2) para el modelo y valores de $\beta_{o\,y}\ \beta_1$

Parámetros	Material						
	Ladrillón			Adobe	Hormigón armado		
T_e	■$ATSIV_{c3}$	■$ESSIV_{c1}$	■$ESSIV_{c2}$	■$ETSaV_{c1}$	●$ESHV_{f2}$	●$ASHV_{f3}$	■$ESHV_{c2}$
R^2	0.33	0.22	0.24	0.23	0.15	0.16	0.08
β_0	11.80	21.13	16.64	19.72	22.67	20.76	21.28
β_1	0.55	0.08	0.15	0.18	0.23	0.10	0.08

Fuente: Elaboración propia.

Si se observa el valor R^2 del modelo se puede comprender la capacidad de predicción de este, cuando se conoce el valor de los parámetros β_0 y β_1. En general, todos los modelos estadísticos obtenidos para los distintos casos podrían predecir moderadamente la T_i cuando se conoce T_e, siendo los más desacertados aquellos pertenecientes al grupo de las envolventes construidas en hormigón armado.

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS ESTADÍSTICOS UNIVARIADOS

A - TEST DE NORMALIDAD

La tabla 6 reúne los resultados de la prueba de Kolmorogov-Smirnov (K-S), e indica la falta de normalidad de los datos, para todos los casos de envolventes analizadas, con una confiabilidad superior al 99% —menos de un 1% de error—. A fin de diferenciar el caso real del modelo estadístico, se modifica levemente la nomenclatura, como se representa en la tabla.

TABLA 6

Resultados del test de hipótesis de normalidad K-S obtenidos con el empleo del software IBM Statistics

Nomenclaturas		Test de hipótesis		
Caso	Modelo estadístico	Prueba	Significancia	Decisión
■$ATSlV_{c3}$	ATSL3	K-S	0.000	Rechazo
■$ESSlV_{c1}$	ESSL1			
■$ESSlV_{c2}$	ESSL2			
■$ETSaV_{c1}$	ETSa1			
●$ESHV_{f2}$	ESH2a			
●$ASHV_{f3}$	ASH3			
■$ESHV_{c2}$	ESH2			

Fuente: Elaboración propia.

B- TEST DE DIFERENCIA DE MEDIAS UTILIZANDO EL REGISTRO 1

Los resultados del test de normalidad señalan que los datos de salida del modelo no se ajustan a una distribución normal. Se realiza un test de diferencia de medias entre los datos de temperatura interior (registro 1; n = 443) y los datos de temperatura interior obtenidos con el modelo estadístico univariado. Para el procedimiento mencionado se recurre al empleo del test de Student (T-test), debido a su robustez en cuanto a su aplicación en distribuciones con falta de normalidad.

La prueba de hipótesis rechaza el supuesto de que no existen diferencias (H_o = 0, tabla 7) entre los datos de temperatura interior de los casos reales analizados (registro 1) y los resultados del modelo estadístico univariado. De los siete casos modelados estadísticamente, dos de las siete medias entre caso real y modelo estadístico presentan diferencias cercanas a cero, con un 5% de error. La cercanía de las diferencias de medias al valor cero indica la proximidad al no rechazo de la hipótesis nula (H_o), lo cual respalda que las diferencias de medias son distintas de cero, pero muy cercanas a dicho valor.

En los diagramas de caja de la temperatura interior de los casos reales (registro1; figura 4) y la temperatura modelada con técnicas estadísticas se confirman los resultados de la tabla 7 en que se destaca gráficamente el caso $ESSL_1$ por la coincidencia de temperaturas interiores medias dentro de ambas cajas. Si se observa con mayor detenimiento, la proyección de las líneas que representan el valor promedio de temperatura interior (registro 1) caen dentro del área de la caja de valores de la temperatura interior estadísticamente modelada, y viceversa. En la figura. 5 se puede observar el comportamiento de la temperatura interior para el caso real y el modelo estadístico univariado.

TABLA 7

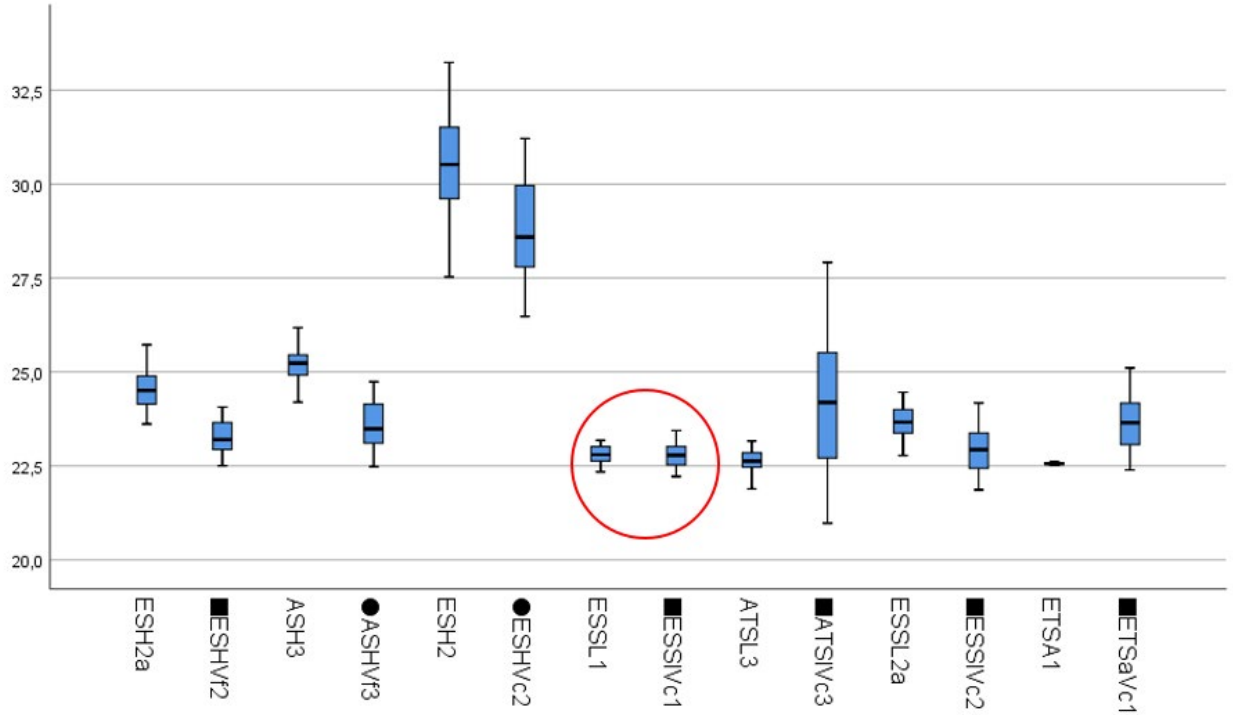
Síntesis del T-test, donde el prefijo DIF identifica las diferencias entre el caso real perteneciente al registro 1 y el modelado, t indica el valor del test para el caso y gl indica los grados de libertad

Prueba para una muestra						
Caso de estudio	Valor de prueba = 0					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias (°C)	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior (°C)	Superior (°C)
DIF_ESH2a	41.48	442	0.000	1.32	1.25	1.38
DIF_ESH2	32.49	442	0.000	2.14	2.01	2.27
DIF_ASH3	53.75	442	0.000	1.61	1.55	1.67
DIF_ESSL1	32.41	442	0.000	0.31	0.29	0.32
DIF_ESSL2	35.07	442	0.000	0.82	0.78	0.87
DIF_ETSa1	35.19	442	0.000	1.09	1.03	1.16
DIF_ATSL3	29.92	442	0.000	1.91	1.78	2.03

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4

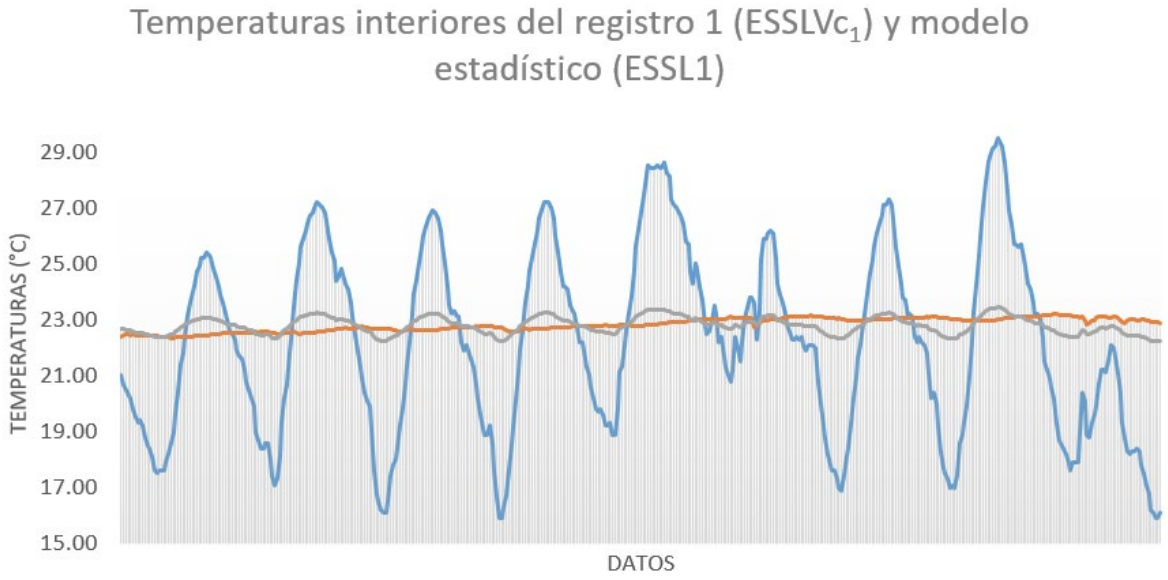
Diagrama de cajas de las temperaturas interiores de los casos reales (registro 1) y los casos modelados estadísticamente.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 5

Diagrama de líneas de una serie de tiempos de la temperatura exterior (en azul) y las temperaturas interiores del registro 1 (en naranja) y del modelo estadístico univariado (en color gris).



Fuente: Elaboración propia.

C- TEST DEL MODELO UTILIZANDO EL REGISTRO 2:

De los siete casos analizados, solo ESSL1 supera el test de hipótesis de diferencia de medias. Ahora interesa validar el modelo estadístico univariado de este caso al emplear datos de temperatura exterior e interior distintos a aquellos con los cuales se construyó. Los 1,168 datos de temperatura interior pertenecientes al registro 2 se comparan contra los 1,168 datos de temperatura interior obtenidos con el modelo estadístico univariado, construido sobre la base de los 443 datos de temperatura del registro 1, cuya variable de entrada (T_e) comprende también 1,168 datos. El procedimiento se repite mediante un test de medias y se resume a continuación en la Tabla 8:

TABLA 8

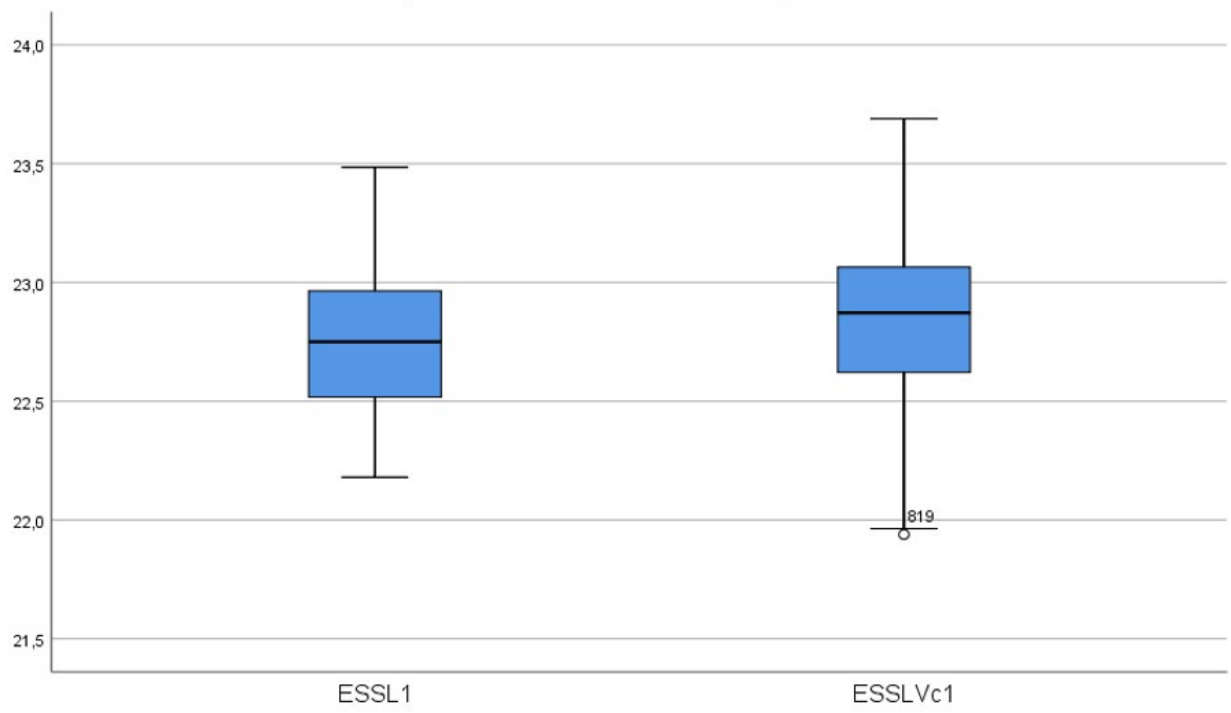
Resultados del t-test para los datos de temperatura interior pertenecientes al Registro 2 ($ESSLVC_1$) y los datos de temperatura interior proporcionados por el modelo estadístico univariado (ESSL1) con datos de entrada de temperatura exterior reunidos en el registro 2

Prueba para una muestra						
	Valor de prueba = 0					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
$ESSLVC_1$	2033.592	1167	0.000	22.809912	22.78790	22.83192
$ESSL_1$	2652.296	1167	0.000	22.753448	22.73662	22.77028

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 6

Diagrama de cajas y bigotes de los datos de temperatura interior para el caso (ESSLVc$_1$) y el modelo estadístico univariado (ESSL1).



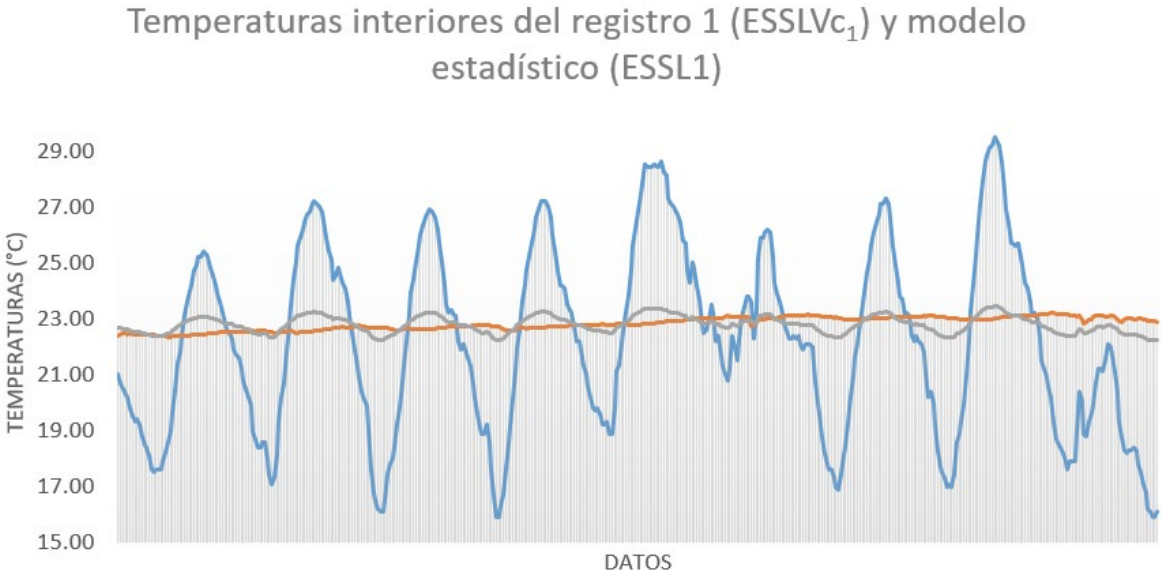
Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de cajas de la figura 6 indica que los valores medios de temperatura interior obtenidos con los datos de temperatura del registro 2 presentan un comportamiento similar a la temperatura interior del mismo registro. Para un 95% de confiabilidad, el intervalo de confianza del modelo estadístico univariado se extiende en un rango menor a 0.034°C. Los datos de temperatura interior de la envolvente, pertenecientes al registro 2, se caracterizan por moverse en un intervalo un poco más amplio, de 0.05°C. No obstante, los datos modelados y los datos registrados responden favorablemente al test de hipótesis, e indican que los valores pertenecerían a una misma muestra. Puede observarse en la figura 7 el comportamiento de la temperatura interior para el caso real y el modelo estadístico univariado, en función de datos provistos por el registro 2.

En la síntesis presentada en tabla 9 se observan las características consideradas en cuanto a la conducción térmica (K) de la envolvente, la relación de volumen y superficie de la envolvente (FF), la temperatura interior (media, variación y R^2) del recinto, así como los parámetros del modelo (β_o y β_1), y la verificación de hipótesis. Respecto de este último aspecto, solo el caso ESSLVc$_1$ verifica su hipótesis de igualdad de medias. Esta envolvente se distingue de los demás casos en cuanto a la variación térmica de la temperatura en el interior del recinto se refiere, identificada como la desviación estándar de la T_i media. Dicha variación térmica es la menor de todas las relevadas en el registro 1 para las diversas envolventes y es la más cercana al valor cero. Asimismo, la T_i del caso ESSLVc$_1$ es la más baja de las temperaturas relevadas en el registro 1. No obstante, la desviación estándar en ESSLVc$_1$ es significativamente diferente de la observada en los demás casos, en tanto la T_i media no se diferencia considerablemente del resto de las T_i.

FIGURA 7

Diagrama de líneas de las temperaturas exteriores e interiores
de caso real (Registro 2) y modelo estadístico univariado.



Fuente: Elaboración propia.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

TABLA 9

Síntesis descriptiva de las características físicas y estadísticas de los casos relevados
y los resultados de los test de hipótesis considerando los dos registros de datos relevados
con sensores. N/A indica que no aplica el segundo test, dado que no pasó el primero

Valor	Material						
	Ladrillón			Adobe	Hormigón armado		
Caso	■ATSLVc$_3$	■ESSLVC$_1$	■ESSLVC$_2$	■ETSaVc$_1$	●ESHVf$_2$	●ASHVf$_3$	■ESHVc$_2$
R medio (m^{2}K/W)	1.56	1.27	0.93	1.69	0.99	1.16	1.20
Factor de forma (FF; a)	1.06	2.08	1.51	2.22	1.12	1.26	0.85
T_i Media (°C)	24.11	22.79	22.96	23.84	30.53	23.24	27.89
T_i DesVest (K)	4.66	0.77	1.48	1.86	1.25	1.74	3.77
C. Pearson $R^2 T_e/T_i$	0.33	0.22	0.24	0.23	0.15	0.40	0.08
β_0 (°C)	11.80	21.13	16.64	19.72	22.67	20.76	21.28
β_1	0.55	0.08	0.15	0.18	0.23	0.10	0.08
$H_0 = 0$ Registro 1 (n = 443)	No	Si	No	No	No	No	No
$H_0 = 0$ Registro 2 (n = 1168)	N/A	Si	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El presente trabajo se propuso responder a la siguiente pregunta:

> ¿Qué validez tiene el empleo de modelos estadísticos univariados para la predicción de la temperatura interior en envolventes simples, caracterizadas por la conducción como modo principal de intercambio térmico?

Además, se estableció como objetivo general determinar la validez de los resultados en el empleo de modelos estadísticos univariados para la predicción de la temperatura interior de un espacio contenido en una envolvente simple, afectada principalmente por la conducción térmica con el medio exterior.

En respuesta a la pregunta planteada y al objetivo de investigación propuesto se puede concluir que aun simplificando los modos de transferencia de calor a uno predominante (la conducción térmica), la materialidad de la envolvente y su morfología, y considerando una única variable independiente (T_e), los resultados del modelo estadístico univariado se aproximan a la realidad en eventuales ocasiones y casos (14%, tabla 9), como se verifica con el empleo de los test de hipótesis. Sobre la base de lo analizado hasta acá, se puede confirmar que la función estadística univariada utilizada para la predicción de la temperatura interior de una envolvente simple, con reducida incidencia de simultáneos fenómenos de transferencia de calor, es una técnica insuficiente para obtener resultados cercanos a la realidad. En este sentido, es recomendable sobre la base de lo analizado, que aun en envolventes simples la temperatura interior sea estimada a partir de la utilización de técnicas distintas a la proporcionada en este trabajo.

En la introducción se señala que existen dos aproximaciones a los análisis energéticos de las envolventes: la primera se basa en la construcción de objetos virtuales basada en casos reales, y la segunda opción recurre al estudio empírico del objeto real mediante la obtención de registros de datos. En el presente trabajo se analizaron los resultados de recurrir a la segunda opción, como alternativa a la compleja elaboración de modelos de simulación. Los resultados de la investigación indican que, a pesar de que en la mayoría de los casos observados existen diferencias significativas en los datos, es probable que la estabilidad térmica del recinto sea un indicador del empleo exitoso de modelos estadísticos univariados en la predicción de la temperatura interior. Es decir, si bien en la mayoría de los casos abordados en este análisis el modelo estadístico univariado no tuvo éxito en función de los métodos de validación utilizados, lo tuvo en el único caso que presentaba una muy reducida variación térmica interior, reflejada en la desviación estándar de la temperatura media del interior del recinto (tabla 9).

Finalmente, cabe aclarar que será objetivo de futuras investigaciones validar los resultados de la estimación de la temperatura interior de envolventes simples con técnicas estadísticas multivariadas u otras de diversa complejidad, como pueden ser las nacidas en el empleo de herramientas de simulación, usualmente basadas en métodos matemáticos de complejidad variable.

REFERENCIAS

Arquitectura y sostenibilidad (2024). *Herramientas informáticas*. Disponible en: http://arquitecturaysostenibilidad.com/profesionales/herramientas-informaticas/. Consultado: 19 de mayo de 2024.

Bastos, G.; del Valle, K.; Sánchez, A.; Fernández, C. (2021). *Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM)* Appl. Sci. 2021, 11(5), 2167. Disponible en: https://DOI.org/10.3390/app11052167

Cozza, S.; Chambers, J.; Brambilla, A.; Patel, M. (2021). *In Search of Optimal Consumption: A Review of Causes and Solutions to the Energy Performance Gap in Residential Buildings*. Energy and Buildings 249 (2021)111253. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.enbuild.2021.111253

Damasceno, B. (2020). *Research on Cognition Disorders: Theoretical and Methodological Issues*. Springer Nature.

Fernández, A.; Garzón, B. (2024). *Rehabilitación térmica de la envolvente de viviendas en altura. Un caso en Tucumán.* Pensum 2024; 10: 147-162. Disponible en: https://DOI.org/10.59047/2469.0724.v10.n12.41711

Flores, Larsen; Filippìn, C.; Barea, G. (2018). *Impact of Climate Change on Energy Use and Bioclimatic Design of Residential Buildings in the 21st Century in Argentina*. Energy & Buildings 2018; 184: 216-229. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015

García Ferrando, M. (1989). *Socioestadística. Introducción a la estadística en sociología.* Alianza Editorial.

Ham, Y. y Golparvar-Fard, M. (2013). *EPAR: Energy Performance Augmented Reality Models for Identification of Building Energy Performance Deviations between Actual Measurements and Simulation Results*. Energy and Buildings, 63, 15-28. Disponible en : http://dx.DOI.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.054

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM (1996). *IRAM 11603:1996*, pp. 1-45.

——— (1996). *IRAM 11605:1996*, pp. 1-27.

——— (2002). *IRAM 11601:2002*, pp. 1-48.

——— (2019). *Normas*. Disponible en: http://www.iram.org.ar/. Consultado: 19 de julio de 2019.

International Business Machines Corporation (2024). *IBM SPSS Statistics 25*. . Disponible en: https://www.ibm.com/es-es/spss. Consultado: 31 de mayo de 2024.

International Energy Agency (IEA) (2019). *IEA Building Energy Efficiency Policies Database*. Disponible en: https://www.iea.org/statistics/. Consultado: 10 de mayo de 2019.

International Organization for Standarization (ISO) (2019). *Standards*. Disponible en https://www.iso.org/home.html. Consultado: 12 de julio de 2019.

Li, D. H. W.; Yang, L; Lam, J. C. (2013). *Zero Energy Buildings Sustainable Development Implications. A Review*. Energy 2013; 54:1-10. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.energy.2013.01.070

Liu Z. et al. (2019). *Application and Sustanability Analysis of the Technologies in Nearly Zero Energy Buildings in China*. Renew Sustain Energy Rev (2019); 101: 329-345. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.rser.2018.11.023

Mazzocco, M.; Filippín, S.; Sulaiman, H.; Flores Larsen, S. (2018). *Performance energética de una vivienda social en Argentina y su rehabilitación basada en simulación térmica*. Ambiente Construido (2018); 4: 215-235. Disponible en: https://DOI.org/10.1590/s1678-86212018000400302

Moore, D. (2000). *Estadística aplicada básica*. Antoni Bosch.

Nguyen, A. T., S. Reiter y P. Rigo (2014). *A Review on Simulation-based Optimization Methods Applied to building Performance Analysis.* Applied Energy (2014); 113: 1043 1058. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061

Noris, F. et al. (2014) *Implications of Weighting Factors on Technology Preference in Net Zero Energy Buildings.* Energy Build (2014); 82: 250-262. https://DOI.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.004

Oddi, F. y Garibaldi, L. (2024). *Modelos lineales generales en R. Aplicaciones en ciencias agronómicas y ambientales*. UNRN.

Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2007). *Buildings and Climate Change: Status, Challenges and Opportunities*. Disponible en: https://www.un.org/es/. Consultado: 1 de febrero de 2019.

O'Rourke, N.; Hatcher, L.; Stepanski, E. (2005). *A Step-by-Step Approach to Using SAS for Univariate & Multivariate Statistics*. Editorial Wiley and Sons.

Pajek, L.; Kosir, M. (2017). *Can building Energy Performance be Predicted by a Bioclimatic Potential Analysis? Case Study of the Alpine-Adriatic Region.* Energy and Buildings (2017); 139: 160-173. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.035

Ramos Sanz, Alba (2017). *Potencial de demanda energética cero en envolventes industriales*. Revista Internacional Hábitat Sustentable (2017), pp. 41-49. Disponible en: https://DOI.org/10.22320/07190700.2017.07.02.04

——— (2019). *Transformación de la construcción y la arquitectura en los últimos 20 años: prospectivas y perspectivas. Análisis bibliométrico de los tópicos más desarrollados en revistas internacionales de alto impacto*. Revista Arquitecturas del Sur (2019), pp.106-125. Disponible en: https://DOI.org/10.22320/07196466.2019.37.055.07

Santos, R.; Costa, A. y Grilo, A. (2017). *Bibliometric Analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015*. Automation in Construction (2017); 80: 118-136. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.autcon.2017.03.005

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2019). *Manual de vivienda sustentable.* Disponible en Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/ambiente/sustentabilidad/innovacion-para-el-desarrollo/vivienda. Consultado: 9 de febrero de 2019.

Schwartz, Y.; Korolija, I.; Symonds, P.; Godoy-Shimizu, D.; Dong, J.; Hong, S.; Mavrogianni, A.; Grassie, D. y Mumovic, D. (2021). Indoor Air Quality and Overheating in UK Classrooms – an Archetype Stock Modelling Approach. Journal of Physics Conference Series (2021), 2069 (1): 012175. Disponible en: https://DOI.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012175

Shady Attia et al. (2017). *Overview and Future Challenges of Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) design in Southern Europe.* Energy and Buildings (2017), 155: 439-458. Disponible en: https://DOI.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043

Szagri, D.; Dobszay, B.; Nagy, B.; Szalay, Z. *Wireless Temperature, Relative Humidity and Occupancy Monitoring System for Investigating Overheating in Buildings*. Sensors 2022, 22, 8638. Disponible en: https://DOI.org/10.3390/s22228638

Wilson, A. y A. Templeman (1976). *An Approach to the Optimum Thermal Design of Office Buildings.* Building and Environment (1976), 11: 39-50. https://DOI.org/10.1016/0360-1323(76)90018-4

Ramos Sanz, Alba. (2015). Omitido por protección de identidad para evaluación por pares.