

INTERVENCIONES EN CASAS-MUSEO EN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN: SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y ANÁLISIS COMPARATIVO

María del Milagro Rougès Forcada^{1,2}, Raúl Fernando Ajmat^{1,2}, María Silvana Zamora¹

¹Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (ILAV) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Universidad Nacional de Tucumán (UNT) - Av. Independencia 1701 – San Miguel de Tucumán – C.P. 4000 – Tucumán.

²Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional de Tucumán (FAU – UNT) – Av. Néstor Kirchner 1800 – San Miguel de Tucumán - C.P. 4000 – Tucumán
Tel. 0381 436-1936 – e-mail: mmrougesforcada@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: La rehabilitación energética de casas-museos plantea desafíos particulares para conservar su integridad material y garantizar condiciones ambientales adecuadas para las colecciones. Este trabajo evalúa el impacto de intervenciones pasivas, reversibles y de gestión sobre el comportamiento térmico de dos salas de exposición en casas-museo ubicadas en San Miguel de Tucumán, Argentina: el Museo Arquidiocesano de Arte Sacro (MAS) y la Casa Histórica de la Independencia (CHI). Se realizaron mediciones in situ de temperatura y humedad relativa que permitieron validar los modelos de simulación energética dinámica en OpenStudio–EnergyPlus. Se analizaron escenarios como la incorporación de aislantes térmicos en cubiertas y en carpinterías, y el control de ganancias térmicas internas. El desempeño se evaluó con indicadores como el porcentaje de tiempo fuera del rango recomendado para conservación ($T=15-25\text{ }^{\circ}\text{C}$), el índice de riesgo microclimático (HMR-T) y las fluctuaciones diarias de temperatura. Los resultados muestran reducciones de hasta un 80% en las fluctuaciones de verano en CHI y un 75% en el tiempo fuera de rango en MAS, con mejoras acumuladas cuando las estrategias se aplican de forma combinada para ambos casos. Se concluye que, en contextos de recursos limitados, estas medidas deben priorizarse por su viabilidad técnica, aplicabilidad y compatibilidad con la conservación preventiva del patrimonio.

Palabras clave: casas-museo, conservación preventiva, simulación energética, rehabilitación energética.

INTRODUCCIÓN

Los museos son espacios de gran valor cultural, donde la preservación de las colecciones y del propio edificio posee un rol sustancial. En particular, las denominadas casas-museo ubicadas en el Noroeste Argentino, ocupan inmuebles históricos de alto valor simbólico y arquitectónico, no concebidos originalmente para este uso. Por ello, los conservadores deben adaptar las colecciones a las condiciones higrotérmicas de sus salas para minimizar posibles daños (Zamora y O'Donnell, 2020). Esta situación plantea desafíos significativos en términos de control ambiental interior, afectando directamente las condiciones de conservación preventiva y de confort térmico para los visitantes.

Esta condición particular de las casas-museo trae como consecuencia condiciones interiores que se ven altamente influenciadas por las fluctuaciones climáticas externas generando escenarios de riesgo para los objetos expuestos. Entre los desafíos que derivan de las características edilicias propias de estos casos de estudio, se identifican diversos agentes de deterioro, como las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa que favorecen procesos de deformación, fisuración, oxidación y biodeterioro en materiales como madera, textiles, papel y metal (De Guichen, 1987; Thomson, 1986). En el caso de las casas-museos de Tucumán esto se ve exacerbado por la climatología propia del lugar. A ello se suman las restricciones que impone el patrimonio construido, donde las intervenciones deben ser de carácter



reversible y sostenible. Por estos motivos, resulta indispensable identificar estrategias pasivas y de bajo impacto que puedan aplicarse sin comprometer los valores patrimoniales, pero que al mismo tiempo permitan una mejora efectiva del comportamiento térmico interior

El concepto de conservación preventiva hace referencia a la anticipación del deterioro de las colecciones a través del control de variables ambientales sin intervenir en primera instancia en los objetos (ICCROM, 2016). En este sentido, las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad relativa, resultan de importancia y es por ello que diversas recomendaciones internacionales fijan rangos de valores tanto de temperatura y de humedad relativa como de sus fluctuaciones que deberían considerarse para los interiores de los museos a fin de contribuir a la conservación del patrimonio (ASHRAE, 2019).

Diversos estudios han abordado la problemática del control ambiental en edificios patrimoniales destinados a albergar colecciones culturales, enfatizando la influencia de las condiciones interiores sobre la conservación preventiva. Bonora et al. (2019) propusieron el índice *Heritage Indoor Microclimate Risk* (HMR) para evaluar el riesgo de deterioro de bienes culturales mediante simulaciones. En trabajos posteriores aplicaron este enfoque en el Palacio de Venaria Reale (Italia), comparando escenarios con y sin climatización artificial. Los resultados evidenciaron la importancia de la envolvente edilicia en la estabilidad del microclima interior (Bonora et al., 2021).

En el Museo de Silesia (Polonia), se desarrolló un estudio de monitoreo continuo de temperatura, humedad relativa y CO², destacando la relevancia de la zonificación arquitectónica y el control pasivo como herramientas para preservar las colecciones (Ferdyn, 2016). En la misma línea otros autores propusieron un enfoque multiobjetivo para museos históricos en Pisa, demostrando que ajustes mínimos en los sistemas de climatización permiten mejorar simultáneamente el confort térmico, la eficiencia energética y la conservación (Schito et al., 2018). Otro estudio en Italia, desarrolló una matriz de evaluación para seleccionar materiales aislantes compatibles con edificios patrimoniales, priorizando criterios energéticos y de conservación (Annibaldi et al., 2020).

En el contexto argentino, particularmente en el noroeste del país, se han desarrollado en la última década diversos estudios centrados en casas-museo, con énfasis en el diagnóstico ambiental y el análisis de la envolvente edilicia. En el Museo Casa Histórica de la Independencia, en Tucumán, se identificaron valores higrotérmicos inadecuados tanto en salas de exposición como en espacios de reserva, destacando la necesidad de limitar el ingreso de visitantes y mejorar la gestión de la envolvente (Zamora et al, 2016). Estudios complementarios realizados en el Museo Histórico Nicolás Avellaneda confirmaron estos hallazgos, observando inestabilidad higrotérmica y proponiendo la aplicación de estrategias pasivas de regulación ambiental (Zamora et al, 2020; Bazán, 2020). En el Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, se aplicó la metodología ICOM-CC para el análisis de riesgos, reconociendo como principales amenazas las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa, los contaminantes y la apertura frecuente de puertas y ventanas (Zamora, 2019).

Estos antecedentes refuerzan la necesidad de considerar intervenciones no invasivas de bajo impacto y compatibles con el valor patrimonial de los inmuebles, como parte de una estrategia integral de conservación preventiva. A su vez, consolidan el valor de la simulación energética como herramienta para predecir el comportamiento ambiental y optimizar el diseño de intervenciones adaptadas a contextos patrimoniales. En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto de estrategias pasivas sobre el comportamiento térmico interior en salas de exposición permanente de dos casas-museo en San Miguel de Tucumán, mediante simulaciones energéticas dinámicas. Para ello, se analizan las condiciones térmicas interiores actuales mediante simulaciones validadas in situ. Se diseñan y simulan alternativas de mejora de la envolvente edilicia compatibles con los valores patrimoniales. Complementariamente, se incorporan estrategias de gestión museográfica y control de cargas internas. Asimismo, se evalúa el desempeño térmico de cada alternativa mediante la correlación con recomendaciones de conservación, así como medir el efecto combinado de la aplicación de estrategias pasivas en simultáneo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de los casos de estudio

La investigación se desarrolló en dos museos ubicados en San Miguel de Tucumán: el Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia (CHI) y el Museo Arquidiocesano de Arte Sacro (MAS) seleccionados por valor histórico y arquitectónico, así como por las particularidades de su envolvente edilicia y exigencias patrimoniales. Esta elección busca garantizar un análisis comparativo que abarque edificios con exigentes restricciones patrimoniales tanto como aquellos con una mayor flexibilidad para mejoras físicas.

El Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia, fue sede del Congreso General donde se declaró la Independencia de las Provincias Unidas del Sur el 9 de julio de 1816. Es un edificio de alto valor patrimonial, declarado Monumento Histórico Nacional en 1941. La casa sufrió diversas modificaciones, siendo reconstruida en 1941. Alberga la Sala de la Jura (SJ) que conserva gran parte de su configuración original donde se exhiben pinturas al óleo del siglo XIX y principios del XX. La misma fue seleccionada para esta investigación por su gran valor histórico y simbólico (Figura 1- a).



(a)

(b)

Figura 1: fotografía interior de Sala de la Jura (CHI) (a), fotografía interior Sala de los Obispos (MAS) (b).

El Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, constituye un caso singular por emplazamiento en un entorno urbano patrimonial. Este edificio sufrió modificaciones, conservando sus muros originales de ladrillo cocido, pero se han reemplazado pisos y cubierta. Dentro de este museo se seleccionó la denominada Sala de los Obispos (SO), por contar con antecedentes de monitoreo y ser la que presenta mayor superficie de envolvente vinculada al exterior. En la misma se exponen textiles, bulas, báculos y otros objetos pertenecientes a Obispos de Tucumán (Figura 1 – b).

Campaña de monitoreo in-situ

El monitoreo de las condiciones interiores de temperatura, humedad relativa e iluminancia se llevó a cabo mediante dataloggers autónomos HOBO Onset U12, previamente calibrados. En el MAS, el período de muestreo comprendió un año calendario (2024). En CHI, la campaña se inició en abril 2025 y se encuentra en curso al momento de la investigación. La frecuencia de registro fue horaria y continua,

con el objetivo de analizar las fluctuaciones higrotérmicas y validar la simulación computacional. Los dataloggers se ubicaron en lugares protegidos de la radiación solar directa y de corrientes de aire.

Simulación computacional

Para estimar el comportamiento higrotérmico de las salas seleccionadas, se empleó una metodología basada en simulación energética dinámica con el motor EnergyPlus, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Esta herramienta permite predecir la respuesta térmica interior frente a distintas configuraciones constructivas y estrategias de uso, considerando variables como geometría, materialidad, condiciones climáticas y cargas internas. El modelado geométrico se realizó mediante el software SketchUp Pro, utilizando el plugin OpenStudio para la definición física de la envolvente y perfiles de uso.

En cada caso de estudio se partió de un modelo base, correspondiente al estado actual del edificio, validado con mediciones in situ, sobre el cual se simularon distintas estrategias pasivas de rehabilitación energética, compatibles con el valor patrimonial del inmueble. Las intervenciones propuestas se orientan a mejorar la estabilidad térmica interior sin comprometer valores patrimoniales, atendiendo a los principios de conservación preventiva que priorizan la reducción de riesgos ambientales frente a la aplicación de sistemas de climatización activa.

La Sala de la Jura (SJ) ubicada en CHI, conserva muros originales de tierra cruda, con ambas caras revocadas a la cal y pintadas de blanco, alcanzando un espesor promedio de 1m. La cubierta mantiene la estructura de madera y las tejas cerámicas de época, conformando un paquete constructivo integrado por tejas asentadas sobre mezcla de tierra y cemento y éstas, a su vez, sobre un cañizo (actual) que da hacia el interior del recinto. Las carpinterías incluyen puertas de cedro, de 2” de espesor, pintadas de azul y ventanas con vidrio simple y postigos de madera (Marinsalda, 2016). La sala no dispone de sistemas activos de climatización y permanece abierta a la libre circulación del público durante el horario de apertura del museo. La simulación se configuró bajo los siguientes parámetros:

- Archivo climático: EPW – Tucumán-Matienco, 2007-2023.
- Perfiles de uso: Horarios abierto al público: de 9 a 13 y de 15 a 19 horas de martes a domingo y se incluyeron los lunes de julio, con ocupación promedio de 0.2 personas/m² (contemplando el 40% de superficie efectiva debido a la restricción de acceso mediante cordones). El nivel de actividad fue de 83.9W correspondiente a una caminata suave.
- Iluminación artificial: potencia de 2.3W/m²
- Infiltración: 1 ACH y 0.2 ACH mientras permanece cerrado.
- Paso temporal de cálculo: 1 hora

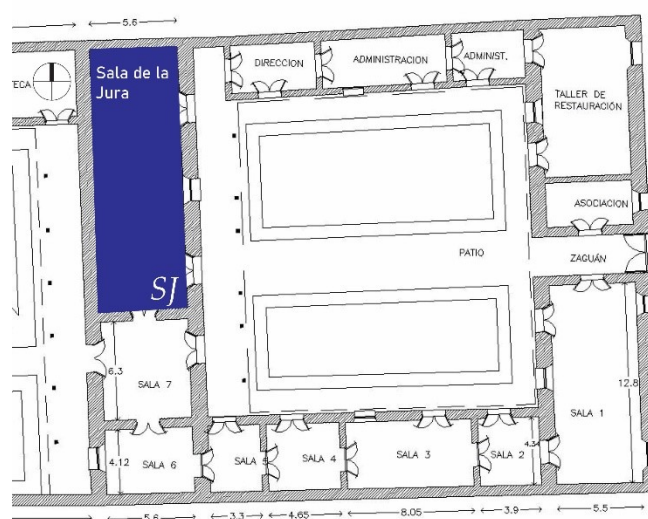


Figura 2: planimetría CHI

Se plantearon tres estrategias de rehabilitación simuladas bajo dos criterios generales: 1. la incorporación de aislantes térmicos en la envolvente edilicia (alternativa 1 y 2) y 2. la gestión del acceso a visitantes (alternativa 3). En la alternativa 1 se propuso la instalación de un “falso cielorraso” desmontable que reproduce visualmente al actual, compuesto por un panel rígido de poliuretano de 25 mm de espesor separado del cielorraso actual por una cámara de aire de 50 mm de espesor. Bajo el panel de poliuretano se incorporan cañizos y falsas vigas secundarias realizadas en WPC (Wood Plastic Composite). La selección de estos materiales responde a su aplicabilidad, bajo peso por m² (18kg/m²) y baja conductividad térmica (Tabla 1), lo que permite sujetar la nueva estructura mediante grampas sin comprometer la cubierta original (Figura 3). La alternativa 2 plantea la mejora de las carpinterías mediante la instalación de un doble vidrioado hermético (DVH) en el lado exterior, conservando las carpinterías originales. Asimismo, se adiciona una puerta vidriada con apertura automática en el acceso a la sala. La alternativa 3, se centra en la gestión del flujo de visitantes, limitando el ingreso a un máximo de 10 personas en simultáneo (0.1 persona/ m²). La propuesta final simula la combinación de las tres estrategias para evaluar su efecto sobre el comportamiento térmico de la sala.

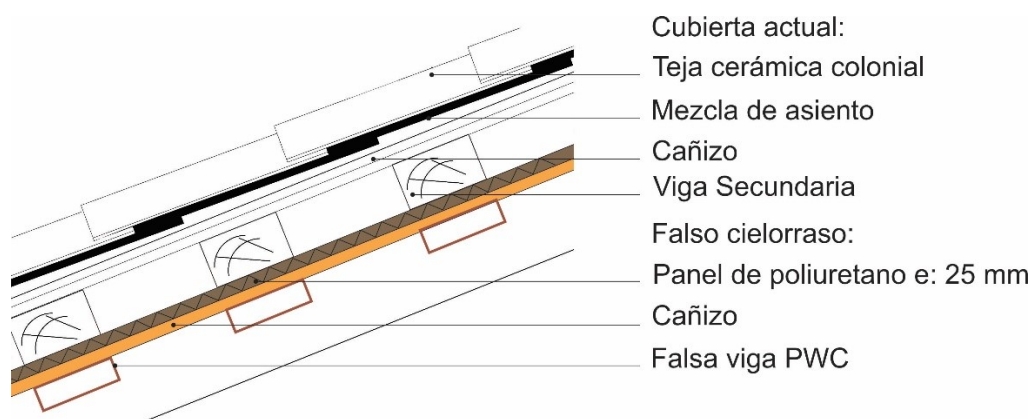


Figura 3: esquema constructivo de cubierta CHI

Tabla 1: CHI Propiedades termo-físicas de la envolvente. Parámetros de simulación

Elemento constructivo	Caso base (U-value: W/m ² K)	Alternativa (U-value: W/m ² K)	Observaciones
Cubierta	2.65	0.53	Reducción 80%
Carpinterías	3.15	1.47	Reducción 53%

La Sala de los Obispos (SO - MAS), se sitúa entre un patio y una galería exterior, lo que la expone a intercambios térmicos significativos con el ambiente exterior (Figura 4). Su envolvente está compuesta por muros de ladrillos de tierra cocida de gran espesor (0.80 m), cubierta de chapa con cielorraso suspendido de yeso con aislación térmica (lana de vidrio 2”), carpinterías hacia el exterior cegadas con paneles de MDF de 28 mm y pisos de granito. La iluminación artificial actual combina lámparas de tecnología LED y halógenas. La simulación se configuró bajo los siguientes parámetros:

- Archivo climático: EPW – Tucumán-Matienco, 2007-2023.
- Perfiles de uso: Horarios abierto al público: de 9 a 19 horas de lunes a viernes y sábados de 9 a 13 hs., con ocupación promedio de 0.53 personas/m². El nivel de actividad fue de 83.9W correspondiente a una caminata suave.
- Iluminación artificial: potencia de 12.59 W/m²
- Infiltración: 1 ACH en horarios de funcionamiento y 0.2 ACH mientras permanece cerrado.
- Paso temporal de cálculo: 1 hora
- Sin equipos de climatización artificial activos

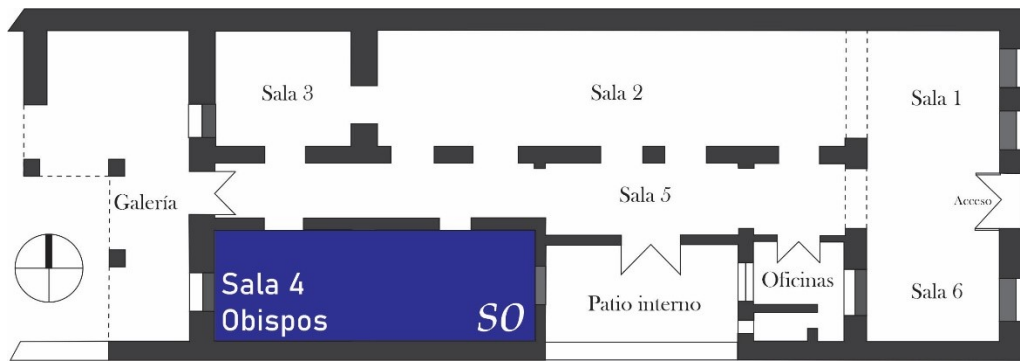


Figura 4: planimetría del Museo de Arte Sacro

Para la simulación se plantearon 3 alternativas. La alternativa 1 consistió en la incorporación de doble material aislante (lana de vidrio de 4") sobre el cielorraso y bajo la chapa (Tabla 2). La alternativa 2, consiste en la incorporación de aislación térmica en las ventanas cegadas mediante la aplicación de un panel compuesto por 2 placas de MDF y en medio una plancha de poliestireno expandido (EPS) de 50 mm de espesor. Esta intervención no visible, refuerza la función de sellado de vanos reduciendo infiltración y transmitancia térmica (Tabla 2). La alternativa 3 consistió en el control de la iluminación mediante sensores de movimiento a fin de reducir las cargas térmicas interiores por iluminación, configurando un perfil horario representativo según los datos otorgados por el personal del museo. Esta estrategia no solo mejora el comportamiento térmico, sino que además reduce la sobreexposición a la radiación luminosa de las obras allí expuestas, en línea con las recomendaciones del International Commission on Illumination (CIE, 2004). La simulación final combina en simultáneo las alternativas 1, 2 y 3.

Tabla 2: MAS Propiedades termo-físicas de la envolvente. Parámetros de simulación

Elemento constructivo	Caso base (U-value: W/m ² K)	Alternativa (U-value: W/m ² K)	Observaciones
Cubierta	0.43	0.18	Reducción 58%
Carpinterías	2.80	0.53	Reducción 81%

Validación de simulación

Para evaluar la precisión de los valores simulados de temperatura, frente a los datos medidos in situ, se emplearon dos indicadores: el Coeficiente de Variación de Error Cuadrático Medio (CV(RMSE)), donde se establece que valores inferiores al 30% son válidos para simulación; y el coeficiente de correlación de Pearson (r), considerando una correlación buena a valores superiores a 0.7 (ASHRAE, 2014).

Tabla 3: Validación simulación

Museo /Sala	CV (RMSE) %	R (PEARSON)	VALIDACIÓN
MAS – SO	21.34	0.75	< 30% verifica – >0.7 buena correlación
CHI - SJ	17.88	0.43	< 30% verifica – <0.7 Correlación media

Para el MAS se verifican ambos parámetros, lo que confirma una adecuada precisión y buena correlación del modelo. En el CHI, con un período de muestreo reducido (tres meses y medio de otoño-invierno 2025), se obtuvo un CV(RMSE) adecuado para simulación, pero un Coeficiente de Pearson de correlación media (r), inferior a lo recomendado (Tabla 3). Esta diferencia es atribuible a la limitada representatividad temporal y a la discrepancia entre el archivo climático de referencia (EPW, Benjamín Matienzo, 2007-2023) y las condiciones puntuales del período de medición (invierno atípico). Si bien no verifica plenamente (r), ello no invalida la utilidad del modelo para el análisis de estrategias de rehabilitación (Tabla 3).

Criterios para el diagnóstico ambiental

El análisis ambiental de los resultados simulados se organiza en torno a indicadores vinculados a la conservación preventiva. Como referencia se adoptaron los rangos de temperatura (T) recomendados por ASHRAE (2019) para salas de exposición en casas-museos (valores de T entre 15°C y 25°C) y fluctuaciones diarias de temperatura máximas de 5°C. Para evaluar cuantitativamente el desempeño de cada estrategia, se aplicó una adaptación del índice HMR (Heritage Microclimate Risk) propuesto por Bonora et al. (2019). Este indicador permite estimar el riesgo microclimático asociado a una variable ambiental, a partir del tiempo que ésta se encuentra fuera del rango recomendado. En el presente estudio, el HMR se calculó exclusivamente para la variable de temperatura, considerando el porcentaje de horas del período analizado en las que los valores superan los límites recomendados. El índice se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{HMR (T)} = \sum_j^h \frac{(>25^{\circ}\text{C} + h < 15^{\circ}\text{C})}{h_{\text{total}}} * 100 \quad (1)$$

donde:

h = horas con T fuera del rango recomendado

h total = horas totales del período de análisis.

Este indicador resulta particularmente útil para comparar el grado de adecuación térmica de las distintas estrategias con respecto al caso base permitiendo integrar en un solo valor la magnitud de las desviaciones térmicas. Además, su uso en contextos patrimoniales facilita la interpretación de las variables relacionadas al riesgo de las colecciones y del propio edificio a las condiciones ambientales.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de simulaciones energéticas para ambas salas de exposición, con foco en la variable de temperatura interior. Se analizan los porcentajes por fuera del rango recomendado y las fluctuaciones térmicas diarias, por estación, así como el comportamiento térmico en los días pico (día más cálido y día más frío). Como referencia se adoptan los criterios establecidos por ASHRAE (2019) para conservación preventiva y el HMR(T) para evaluar las diferentes estrategias.

Museo Casa Histórica de la Independencia (CHI)

La simulación del caso base de la SJ evidenció un comportamiento térmico poco favorable para la conservación preventiva. Se observó un alto porcentaje de horas por encima del límite superior de temperatura (25°C) en períodos de verano (31,07%) y primavera (26,88%), así como una frecuencia considerable de días con fluctuaciones térmicas que superan los 5 °C a lo largo del año, superando el 65% en todas las estaciones (Tablas 4 y 5, gráficos 1 y 2). Según la clasificación cualitativa del índice HMR, las condiciones de microclima interior, bajo la variable de temperatura presenta un riesgo moderado (25%-50%) para los bienes culturales en estaciones cálidas.

La alternativa 1, que incorpora panel aislante de poliuretano en un falso cielorraso, mostró mejoras significativas: redujo el tiempo fuera del rango en todas las estaciones (Tabla 4), situándose según la clasificación de HMR en “riesgo bajo”. Se observa una notable disminución de las fluctuaciones diarias de T, con una reducción del 22% en verano y más del 60% en otoño (Tabla 5).

La alternativa 2 (colocación de DVH sellado, en aberturas al exterior) aportó mejoras más leves especialmente en primavera e invierno. Por su parte la alternativa 3 (control de acceso de visitantes) tuvo un efecto menor sobre el comportamiento térmico (Tablas 4 y 5).

Tabla 4: Resumen porcentaje de tiempo fuera del rango de T recomendada – CHI

HMR - T° >25°C	CHI caso base	CHI Alt. 1	CHI Alt. 2	CHI Alt. 3	CHI 1+2+3
VERANO	31,07	21,89	29,85	31,00	11,76
OTOÑO	3,13	0,72	2,26	3,10	0,18
INVIERNO	2,54	0,54	2,52	2,52	0,00

PRIMAVERA	26,88	16,39	24,40	26,82	8,97
HMR - T° <15°C	CHI caso base	CHI Alt. 1	CHI Alt. 2	CHI Alt. 3	CHI 1+2+3
OTOÑO	1,77	0,09	1,18	1,72	0,00
INVIERNO	11,46	0,27	5,57	11,40	0,00

Riesgo moderado
 Bajo Riesgo

Tabla 5: Resumen de las fluctuaciones de T - CHI

% días - $\Delta T^\circ > 5^\circ\text{C}$	CHI caso base	CHI Alt. 1	CHI Alt. 2	CHI Alt. 3	CHI 1+2+3
VERANO	73,42	56,96	69,62	73,40	8,86
OTOÑO	53,26	19,57	51,09	53,23	0,00
INVIERNO	77,17	46,48	77,17	77,21	14,13
PRIMAVERA	65,93	50,55	64,84	65,90	24,18

La combinación de las tres estrategias (Alt 1+2+3) resultó ser la opción más eficiente (Gráfico 1 y 2). En verano, el porcentaje de período de tiempo en condiciones fuera de los rangos recomendados se reduce de 31,07% caso base a 11,76% (una mejora del 62%), suponiendo un riesgo bajo (<25%). En invierno, el porcentaje de tiempo con temperaturas inferiores a los 15°C llega a cero. En cuanto a las fluctuaciones térmicas, las reducciones alcanzaron el 88% en verano, 100% en otoño, 82% en invierno y 63% en primavera (Gráfico 1 y 2).

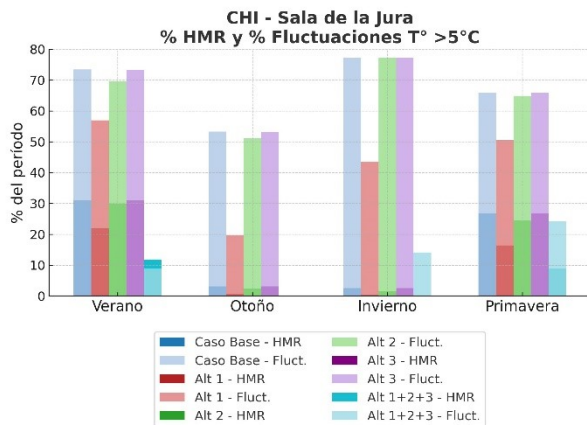


Gráfico 1

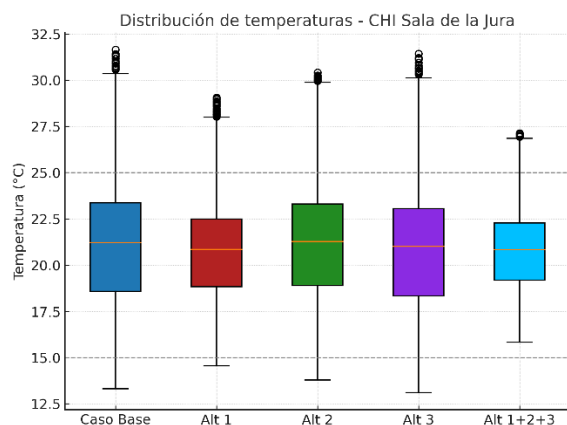
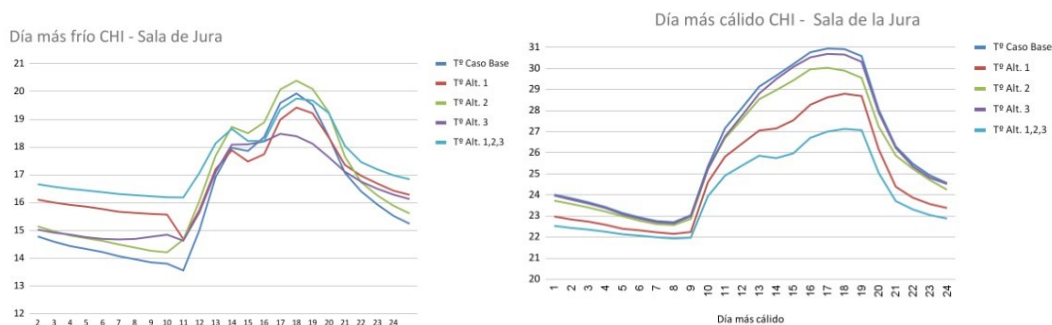


Gráfico 2

El análisis de los días pico (día más frío: 27 de junio, día más cálido: 29 de enero) permitió observar el comportamiento horario en condiciones extremas (Gráfico 3). La alternativa 1 y la combinación de las tres estrategias mostraron un efecto positivo al reducir picos térmicos y suavizar la curva de fluctuación y mantener las temperaturas dentro de rangos más estables.



(a)

(b)

Gráfico 3: CHI - SJ - día más frío, (a) 27 de junio, día más cálido (b) 29 de enero.

Museo Arquidiocesano de Arte Sacro (MAS)

En la sala de los obispos (SO), la simulación computacional del caso base reveló un índice de riesgo bajo (HMR). Durante el verano, el 22,31% de las horas se ubicaron por encima del umbral de 25°C, y en primavera esta cifra alcanzó el 17,45%. Similar al CHI, se observan en las 4 estaciones un porcentaje elevado que supera el 50% de días con fluctuaciones de T por sobre el valor límite (Tablas 6, 7 y Gráfico 4).

Tabla 6: Resumen porcentaje de tiempo fuera del rango de T recomendada – MAS

HMR - T° >25°C	MAS caso base	MAS Alt. 1	MAS Alt. 2	MAS Alt. 3	MAS 1+2+3
VERANO	22,31	16,19	21,62	13,77	5,59
OTOÑO	1,81	0,05	1,45	0,18	0,00
INVIERNO	1,00	0,36	0,41	0,00	0,00
PRIMAVERA	17,45	11,45	16,30	7,19	3,53

Bajo Riesgo

Tabla 7: Resumen de las fluctuaciones de T - MAS

% días - ΔT° >5°C	MAS caso base	MAS Alt. 1	MAS Alt. 2	MAS Alt. 3	MAS 1+2+3
VERANO	64,56	48,10	54,43	21,52	5,06
OTOÑO	46,74	21,74	44,57	1,09	0,00
INVIERNO	65,22	46,74	66,30	35,87	5,43
PRIMAVERA	54,95	48,35	56,04	21,98	3,53

La alternativa 1 (aislamiento doble en cubierta) logró los mejores resultados individuales reduciendo significativamente los porcentajes de tiempo fuera de los rangos (Gráfico 5) y disminuyendo las fluctuaciones térmicas en todas las estaciones (Gráfico 4). La alternativa 2 (aislación en carpinterías cegadas), también mostró mejoras, aunque más discretas. La alternativa 3 (control de iluminación por sensores de movimiento), fue especialmente eficaz para reducir las ganancias de calor interno en verano y primavera. Por ejemplo, logró reducir el tiempo fuera del rango en primavera de 17,45% a 7,19% y las fluctuaciones en verano de 64,56% a 21,52% (Gráficos 4 y 5). La combinación de las tres estrategias (Alt 1+2+3) mostró un impacto contundente: en verano, el porcentaje de horas fuera de rango disminuyó un 75% respecto al caso base en verano, y en primavera un 81%. Las fluctuaciones también se redujeron drásticamente alcanzando un 92% de mejora en verano (64,56% caso base, frente a 5,06%) y eliminando completamente las fluctuaciones térmicas en otoño (Tabla 7 y Gráfico 4).

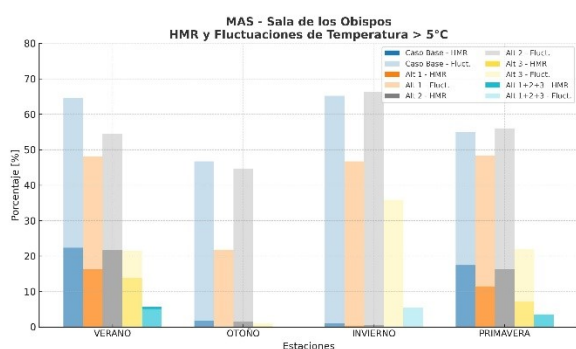


Gráfico 4

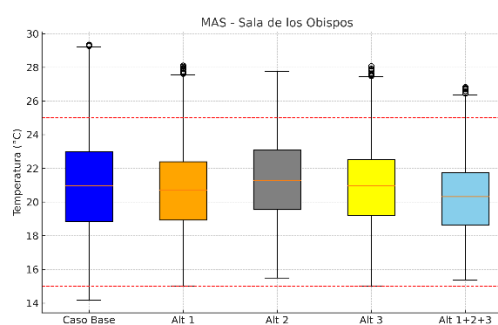
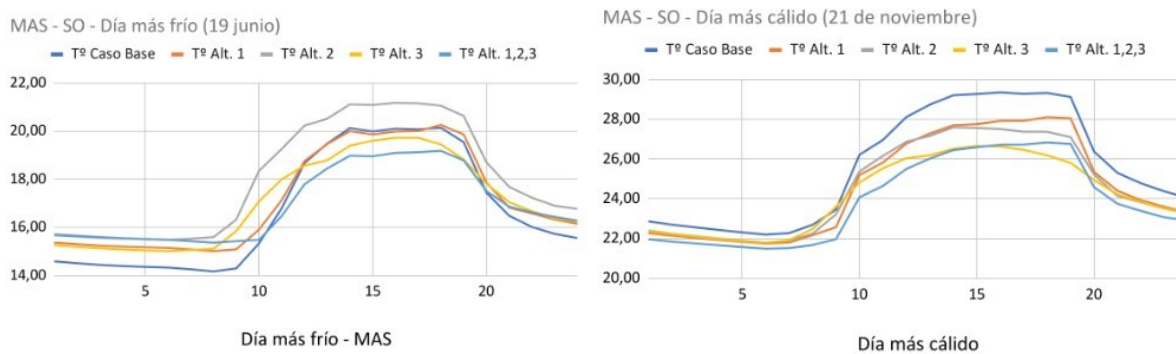


Gráfico 5

El análisis de los días con picos térmicos (día más frío: 19 de junio, día más cálido: 21 de noviembre) evidencia una atenuación de los extremos térmicos gracias a las estrategias pasivas sumadas. La curva térmica se mantiene más plana y controlada en las alternativas 1 y la combinada, consolidando el rol del aislamiento y el control de cargas internas como medidas capaces para mejorar la estabilidad ambiental interior (Gráfico 6).



(a) (b)
 Gráfico 6: MAS - SO - día más frío, (a) 19 de junio, día más cálido (b) 21 de noviembre

CONCLUSIONES

Las intervenciones propuestas se enmarcan en el enfoque de estrategias pasivas, ya que no requieren consumo energético adicional ni sistemas activos de climatización, sino que actúan sobre el diseño arquitectónico, la materialidad de la envolvente y la gestión interna del uso del espacio. Entre ellas se incluyen mejoras en techos, cielorrasos y carpinterías, así como regulaciones del uso del espacio y de las cargas internas (presencia de visitantes o iluminación artificial). Todas fueron seleccionadas por su bajo impacto visual y constructivo, de modo que resulten compatibles con el valor patrimonial de los edificios.

Como parte del diagnóstico ambiental, se aplicó el índice Heritage Microclimate Risk (HMR), que permitió cuantificar el riesgo horario para las colecciones expuestas en función de los desvíos térmicos respecto de los umbrales recomendados. Esta herramienta se valora como un insumo relevante en el análisis de riesgo y planificación de conservación preventiva, ya que sintetiza el impacto ambiental desde una perspectiva patrimonial.

Los resultados obtenidos mediante la simulación energética evidencian que, en su estado actual, las condiciones térmicas interiores en las salas seleccionadas en las casas-museo de San Miguel de Tucumán presentan un comportamiento poco favorable para la conservación preventiva especialmente por la amplitud térmica diaria interior. Según el indicador HMR(T), la Sala de la Jura se clasifica “riesgo moderado” y la Sala de los Obispos se clasifica en “riesgo bajo”; no obstante, este índice no incorpora las fluctuaciones térmicas diarias que resultaron significativas en ambas salas.

Las estrategias pasivas propuestas, cuidadosamente seleccionadas por su compatibilidad material, la reversibilidad y el bajo impacto con los edificios patrimoniales, demostraron mejoras sustanciales en el comportamiento térmico interior. En CHI, las intervenciones sobre la envolvente edilicia (aislamiento en cubierta y mejoras de carpinterías) fueron más eficaces que aquellas orientadas a la gestión interna (como el control de aforo de visitantes). En MAS, la reducción de cargas internas mediante el control de iluminación por sensores, reflejó un efecto especialmente positivo en las temperaturas interiores en las estaciones cálidas, evidenciando la necesidad de modernizar el sistema de iluminación poco eficiente que aún conservan algunas casas-museo de nuestra región.

Las alternativas combinadas, que integran medidas sobre la envolvente y sobre las cargas internas, lograron la mayor reducción de riesgo. En CHI, esta medida logró eliminar el tiempo con temperaturas inferiores a los 15°C en invierno y redujo hasta un 88% las fluctuaciones térmicas estivales. En MAS, las mejoras acumuladas superan el 75% respecto al caso base. Esto confirma que el aumento de hermeticidad y la mejora de la aislación en cubiertas y carpinterías, cuando se aplican de forma conjunta, incrementan el desacople térmico con el exterior y reducen de manera más efectiva las fluctuaciones diarias que las intervenciones aisladas.

En contextos patrimoniales, estos resultados, refuerzan el valor de las intervenciones pasivas, reversibles y de bajo impacto como parte de una estrategia de conservación preventiva, abordando una doble dimensión: por un lado, con estrategias de gestión del uso del museo y por otro con intervenciones físicas controladas. Además, destacan el potencial de la simulación energética como herramienta de diagnóstico y planificación, permitiendo anticipar escenarios y optimizar decisiones antes de ejecutar obras físicas.

Si bien las estrategias simuladas se enfocaron principalmente en la reducción de transferencia de calor sensible, la evaluación de humedad relativa (HR), no se incluye en esta instancia debido a que las validaciones con datos medidos in situ aún se encuentran en proceso. No obstante, se reconoce que algunas medidas propuestas, como el control de aforo, pueden influir indirectamente con las condiciones de HR (calor latente). Considerando que, según la bibliografía especializada, los daños derivados de valores inadecuados o fluctuaciones bruscas de HR suelen ser más severas que los asociados a la temperatura, se plantea incorporar este análisis en una etapa posterior, una vez completada su validación.

Los resultados de este trabajo se presentan como herramientas potenciales para la toma de decisiones y gestión de diversos museos de la provincia. Contribuyen a fortalecer las estrategias de conservación preventiva y promover la sostenibilidad de los recursos de las instituciones. Este estudio se enmarca en las actas acuerdo celebradas entre nuestros proyectos de investigación y El Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, la Dirección de Patrimonio de la Provincia de Tucumán y el Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia.

Como futura línea de investigación, se propone el desarrollo de nuevos índices que integren un nuevo marco de análisis, incluyendo la influencia de las diferentes configuraciones de la envolvente y el impacto de las cargas internas derivadas directamente de la gestión museográfica. Esta aproximación podría permitir vincular de manera precisa el desempeño térmico edilicio con estrategias operativas, fortaleciendo la capacidad de predicción y optimizando medidas de conservación preventiva en casas-museo.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Esta investigación contó con el financiamiento de una beca doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y del proyecto PIUNT B701 del Consejo de investigación de la Universidad Nacional de Tucumán (CIUNT).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a la Dirección y Secretaría del Museo Nacional Casa Histórica de la Independencia y al Consejo de Administración del Museo Arquidiocesano de Arte Sacro, por su valiosa colaboración y por facilitar el acceso necesario para la realización de los relevamientos y mediciones que sustentan esta investigación.

REFERENCIAS

- Annibaldi, V., Cucchiella, F., De Berardinis, P., Gastaldi, M., y Rotilio, M. (2020). An integrated sustainable and profitable approach of energy efficiency in heritage buildings. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119516>
- ASHRAE. (2014). Measurement of energy, demand, and water savings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2019). Museums, galleries, archives, and libraries. In Owen M (Ed.), *ASHRAE handbook: HVAC applications (SI edition)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Bazán, L. N. (2020). Influencia de las condiciones ambientales en museos en la satisfacción de los visitantes: Su evaluación (Doctoral dissertation, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)).

- Bonora, A., Fabbri, K., y Pretelli, M. (2019). Environmental microclimate management and risk in the unesco world heritage site of villa barbaro maser (Italy). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 269-276.
- Bonora, A., Fabbri, K. y Pretelli, M. (2021). Microclima interior histórico: el papel de la climatización en la restauración de edificios patrimoniales: El caso del Palacio de Venaria Reale. En *Journal of Physics: Conference Series* (vol. 2069, nº 1, p. 012078). IOP Publishing.
- CIE. (2004). Control of damage to museum objects by optical radiation. International Commission on Illumination.
- De Guichen, G. (1987). El Clima en los museos. ICCROM/PNUD/UNESCO.
- Ferdyn-Grygierek, J. (2016). Monitoring of indoor air parameters in large museum exhibition halls with and without air-conditioning systems. *Building and Environment*, 107, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.024>
- Marinsalda, J. C. (2016). La casa histórica de la independencia argentina (Disertación doctoral, Universidad de Sevilla).
- Schito, E., Conti, P., y Testi, D. (2018). Multi-objective optimization of microclimate in museums for concurrent reduction of energy needs, visitors' discomfort and artwork preservation risks. *Applied Energy*, 224, 147-159.
- Thomson, G. (1986). *The Museum Environment*. Amsterdam: Elsevier.
- Zamora, M. S., O'Donell, B. M., Ajmat, R. F., y Sandoval, J. D. (2016). Metodología para evaluar la calidad ambiental y de iluminación en espacios expositivos de casas-museos. *XIII Congreso Panamericano de Iluminación LUXAMÉRICA 2016*, La Serena, Chile.
- Zamora, M. S. (2019). *Museo Arquidiocesano de Arte Sacro de Tucumán: Informe general de condiciones ambientales y evaluación de riesgos – Junio 2019*. ILAV, CONICET–UNT.
- Zamora, M. S., O'Donell, B. M., y Ajmat, R. F. (2020). Development of a methodology for materials selection to control exhibition objects in House Museums. *International Journal of Conservation Science*, 11(3), 689-702.

INTERVENTIONS IN HOUSE MUSEUMS IN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN: ENERGY SIMULATION AND COMPARATIVE ANALYSIS

ABSTRACT

The energy rehabilitation of house-museums presents specific challenges in simultaneously preserving their material integrity while ensuring adequate environmental conditions for the collections. This study assesses the impact of passive, reversible, and management-oriented interventions on the thermal behavior of two exhibition rooms in house-museums located in San Miguel de Tucumán, Argentina: the Museo Arquidiocesano de Arte Sacro and the Casa Histórica de la Independencia. In situ measurements of temperature and relative humidity were carried out to validate the energy simulation model developed in OpenStudio–EnergyPlus. Scenarios analyzed included the incorporation of thermal insulation in roofs and window frames, as well as the control of internal heat gains. Performance was assessed through indicators such as the percentage of time within the recommended conservation range ($T = 15\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$), the Heritage Microclimate Risk index (HMR, T), and daily temperature fluctuations. Results show reductions of up to 80% in summer fluctuations at CHI and 75% in out-of-range conditions at MAS, with cumulative improvements when strategies are applied in combination for both cases. It is concluded that, in resource-limited contexts, these interventions should be prioritized for their technical feasibility, compatibility with heritage conservation, and ability to integrate into preventive conservation plans.

Keywords: house-museum, preventive conservation, energy simulation and energy rehabilitation.