

Evaluación de materiales translúcidos para techos en centros comerciales Evaluation of translucent insulating materials for roofs in shopping centers

S. P. Bastida-Rojano ^{a,*}, M. G. Valdés-Barrón ^b

^a PMDA Campo de Conocimiento Tecnologías, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

^b Instituto de Geofísica, Radiación Solar, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

Resumen

Los materiales aislantes translúcidos utilizados en cubiertas de gran claro y estructura curva, tienen el potencial de disminuir el consumo energético entre un 20 y 30 por ciento aproximadamente. Asimismo, son considerados una estrategia de ahorro energético en edificios que destinan consumo de energía a sistemas para el confort térmico y visual. Este estudio propuso desarrollar un método experimental, para analizar el comportamiento térmico, lumínico y de humedad relativa de dos materiales no convencionales (el aerogel y el politetrafluoroetileno (PTFE)) y un elemento comparativo (el policloruro de vinilo (PVC)) en tres módulos tipo, ubicados en la ZMCM. Se evaluó la tasa de cambio, la ganancia y la iluminancia promedio con el objetivo de identificar el material de mayor eficiencia energética. El PTFE presentó los valores más altos de iluminancia, a partir de los resultados del análisis de datos, durante los tres tipos de cielo en verano (o estación caliente-húmedo) con una diferencia promedio de 3 296.80 luxes respecto al PVC.

Palabras Clave: Materiales aislantes translúcidos, aerogel, modelos experimentales, análisis térmico, análisis lumínico.

Abstract

The translucent insulating materials used in roofs of large clearing and curved structure, have the potential to reduce energy consumption by approximately 20 to 30 percent. They are also considered an energy saving strategy in buildings that allocate energy consumption to systems for thermal and visual comfort. This study proposed to develop an experimental method to analyze the thermal, light and relative humidity behavior of two unconventional materials (aerogel and polytetrafluoroethylene (PTFE)) and a comparative element (polyvinyl chloride (PVC)) in three type modules, located in the ZMCM. The exchange rate, gain and average illuminance were evaluated with the aim of identifying the most energy-efficient material. The PTFE presented the highest illuminance values, based on the results of the data analysis, during the three types of sky in summer (or hot-humid season) with an average difference of 3 296.80 lux with respect to PVC.

Keywords: Translucent insulating materials, aerogel, experimental models, thermal analysis, light analysis.

1. Introducción

Las cubiertas de gran claro y estructura curva son utilizadas para proporcionar iluminación natural al interior de un espacio, por medio de materiales translúcidos o transparentes. De esta manera, satisface simultáneamente requerimientos arquitectónicos, estructurales y energéticos. Sin embargo, la interacción entre el material de una cubierta y la radiación solar puede ocasionar una menor o mayor ganancia/pérdida de energía térmica, influyendo en el consumo energético de un edificio. Además, la decoloración de la superficie del material puede modificar la distribución de la luz natural en el interior y el deterioro de la cubierta (Comité Español de Iluminación (CEI) et al., 2005; Guillén Guillén et al., 2018; Lechner, 2015; Molina, 2011).

Los centros comerciales son edificios que utilizan cubiertas de gran claro por la configuración de espacios de uso comercial, habitacional y/o de oficinas. En México, el 60 por ciento de las personas acude a los centros comerciales por los espacios de convivencia y recreación que forman parte de nuestro tiempo de ocio, en consecuencia, se acentúa la necesidad de ofrecer un entorno confortable (Navarrete, 2019; TES POWER, 2019).

En el 2018 se registraron 645 centros comerciales dentro del territorio mexicano, de los cuales 338 forman parte de la Ciudad de México. Los edificios de uso comercial superan los ocho millones de m² de Superficie Bruta Alquilable (GLA), de los cuales el 79 % tiene más de 8 000 m² de GLA. Además, se estima la apertura de diecisiete nuevos complejos comerciales

*Autor para la correspondencia: paulina_210495@comunidad.unam.mx

Correo electrónico: paulina_210495@comunidad.unam.mx (Sandra Paulina Bastida-Rojano), mauro@igeofisica.unam.mx (Mauro Germán Valdés Barrón)

en la ZMCM, durante el periodo 2021-2022 (Edificios de México, 2020; Tinsa México, 2020).

Un centro comercial consume anualmente entre 150 y 350 kWh/m², aproximadamente, el 50 % de la energía es destinado a la iluminación artificial, el 40 % a equipos de aire acondicionado y el 10 % a equipos mecánicos, tales como bombas, sistemas de refrigeración y motores. Sin embargo, el consumo energético anual total puede aumentar hasta un 20 % en temporadas de invierno, debido a la reducción de horas de sol por día, a las festividades que exigen decoraciones por medio de iluminación artificial, y las bajas temperaturas que tienen que ser reguladas por sistemas de calefacción (Chatellier Lorentzen & McNeil, 2019; Lizan & En Nuestro País, 2018; Santillana Ramos, 2018).

En 1979, Thierry de Montbrial elaboró una investigación para conocer el grado de conciencia de la población sobre una posible crisis energética inminente, influyendo en las estrategias energéticas de las edificaciones a nivel mundial. En consecuencia, los materiales de alto desempeño tuvieron relevancia por las consideraciones de sustentabilidad en la construcción. Grandes ahorros de energía se podrían derivar de la implementación de programas de ahorro, uso eficiente de la energía y aplicación de tecnologías en el sector comercial (Alonso et al., 2013; Torres Casique, 2017).

En 2011, la comunidad de Madrid publicó una guía sobre materiales aislantes y eficiencia energética, como una estrategia de ahorro energético para España. En 2019, la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) menciona que el consumo eléctrico de edificios del sector de servicios es casi el triple de lo que se estima en el Balance Nacional de Energía. El economista Dr. Joshua D. Kneifel publicó un artículo sobre el potencial ahorro energético por medio de tecnologías, como materiales aislantes, voladizos en ventanas y protecciones solares. Las nuevas construcciones de uso comercial pueden disminuir el uso de sistemas de climatización hasta un 20 y 30 %, y en algunos tipos de edificios y localizaciones se puede incrementar hasta un 40 % (Chatellier Lorentzen & McNeil, 2019; Fenercom, 2012; Kneifel, 2010).

Es importante estudiar aquellos materiales con el potencial de obtener un alto rendimiento energético para aminorar el uso de sistemas de bloqueo solar o elementos adicionales y promover la aplicación de tecnologías. La utilización de materiales aislantes translúcidos en las cubiertas, de gran claro y estructura curva, pueden modificar el comportamiento térmico y lumínico para aminorar el consumo energético en el interior de los espacios, en comparación a los materiales convencionales (Buratti & Moretti, 2011b; Dowson et al., 2011).

El objetivo general de la investigación es identificar el material translúcido con el mayor comportamiento térmico y lumínico de dos materiales no convencionales (el aerogel y el politetrafluoroetileno (PTFE)) y un elemento comparativo (el policloruro de vinilo (PVC)), por medio del análisis térmico y lumínico, aplicados en cubiertas de gran claro y estructura curva. Por lo tanto, se diseñaron tres modelos experimentales con sensores para medir iluminancia, temperatura y humedad relativa en el interior. Posteriormente, se identificaron los días de estudio a partir del contraste de las mediciones exteriores para estimar el comportamiento térmico y lumínico interior de cada módulo experimental. Finalmente, se interpretó el desempeño de las tres cubiertas translúcidas por medio del

análisis de la tasa de cambio, la ganancia térmica y la iluminancia promedio, para identificar el material translúcido con el mayor desempeño térmico y lumínico.

1.1. Materiales aislantes translúcidos

Los materiales aislantes translúcidos transmiten menor energía térmica en comparación a un material usual, sin comprometer la transmisión de la luz natural al interior de un espacio. En 2007, los autores Wong, Eams y Perera elaboraron una clasificación de materiales aislantes translúcidos por medio de la capacidad de absorción de radiación solar en la estructura del material. El entendimiento y la selección adecuada de los materiales, para una construcción en específico, depende del conocimiento de las propiedades térmicas y ópticas (Atawa H et al., 2015; Dowson et al., 2011; Wong et al., 2007).

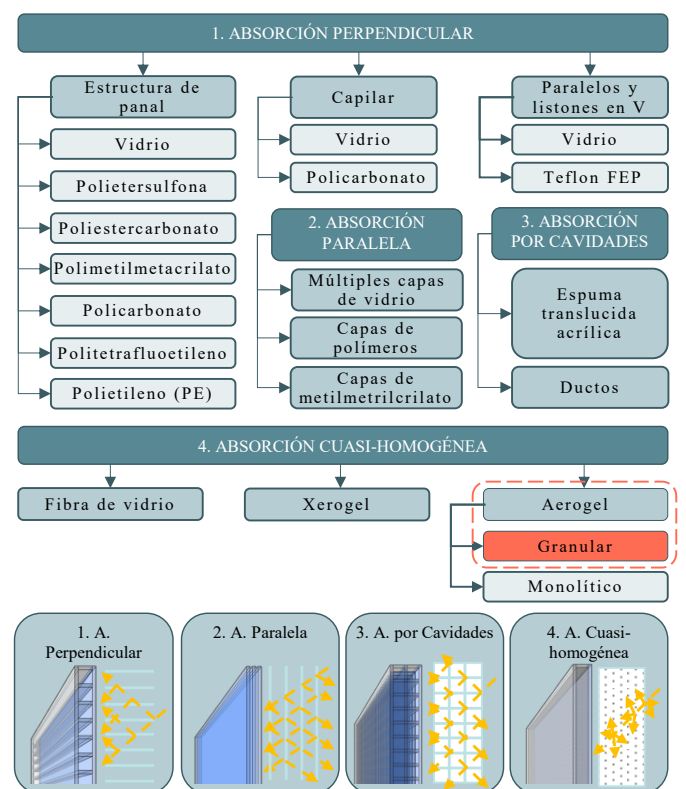


Figura 1. Clasificación de materiales aislantes translúcidos. Elaboración propia con datos de los autores Wong, Eams y Perera (2007).

Los materiales aislantes translúcidos disponibles en el mercado utilizan plásticos, vidrios y aerogeles para su producción y se clasifican en cuatro maneras de absorber la radiación solar (Figura 1). Los materiales de estructura panel, capilar o paralelos y listones en V pertenecen a la categoría de *absorción perpendicular* (Figura 1 (1)), debido a las superficies perpendiculares que conforman la estructura del material. En consecuencia, la estructura disminuye la reflexión de la radiación solar al exterior y la transmisión en el interior aumenta, es decir, las pérdidas de reflexión óptica disminuyen.

La *absorción paralela* (Figura 1 (2)) consiste en materiales de múltiples capas de vidrio, polímeros o metilmetrilcrilato que reflejan la radiación solar en cada superficie. Por lo tanto, la pérdida de radiación solar por reflexión aumenta y la transmisión en el interior disminuye. Asimismo, el incremento de capas en la estructura del material puede disminuir las

pérdidas térmicas de un espacio. La *absorción por cavidades* (Figura 1 (3)) integra las dos categorías anteriores. La conformación de una estructura con superficies paralelas y perpendiculares permite disminuir las pérdidas térmicas por convección y la iluminación natural en el interior.

Los materiales de estructura porosa, como la fibra de vidrio, el xerogel y aerogel, pertenecen a la *absorción cuasi-homogénea* (Figura 1 (4)). La categoría se caracteriza por absorber y dispersar de manera uniforme la radiación solar dentro del material, influyendo en la disminución de deslumbramientos y altos contrastes de luz (Sun et al., 2018; Wong et al., 2007).

En 1931, Samuel Stephens Kistler, de la Universidad del Pacífico en Stockton, California descubrió el aerogel de sílice (Kistler, 1931). El aerogel es un material de nueva tecnología con estructura porosa y ligera, debido a una alta densidad de moléculas de hidrógeno (99 %) y baja densidad de sílice (0-1 %). La dimensión del aerogel granular es de 0.3-2 nm aproximadamente, considerándose como un nanomaterial derivado del silicio (Reim et al., 2005; Xunta de Galicia, 2017).

Los países que producen el aerogel son Suecia, Alemania, Rusia, Japón, China y Estados Unidos de América (Alison Aerogel, 2009; Buratti & Moretti, 2011a; Riffat & Qiu, 2013). Sin embargo, México no ha comercializado el material para su aplicación en construcciones. Los formatos disponibles del aerogel en el mercado son monolitos (láminas o bloques sólidos), granular (partículas o polvo) y mantas en rollo o paneles (rígidos o semirrígidos) (Aerogel Technologies, 2004; Casini, 2016).

2. Materiales y método

Se evaluaron dos materiales aislantes translucidos no convencionales y un elemento de control, por medio del diseño de tres modelos experimentales con sensores de iluminancia, temperatura y humedad relativa en el interior de cada uno y sensores de temperatura sobre la superficie del material. Posteriormente, se elaboraron gráficas para contrastar datos de la estación meteorológica elaborada en sitio para definir los días de estudio. Finalmente, se elaboró un análisis térmico y lumínico a los días representativos de cada tipo de cielo en verano (o estación caliente-húmedo) para estimar el comportamiento general de cada material.

2.1. Descripción del caso de estudio

El sitio de estudio se ubicó en la ZMCM, en el municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México. (Figura 2) La ubicación del proyecto se encuentra en la Plazuela 5 de Avenida de las 3 culturas en la colonia plazas de Aragón, en las coordenadas 19.481488 N, 99.032190 W, a una altitud de 2236 msnm (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, 2009)

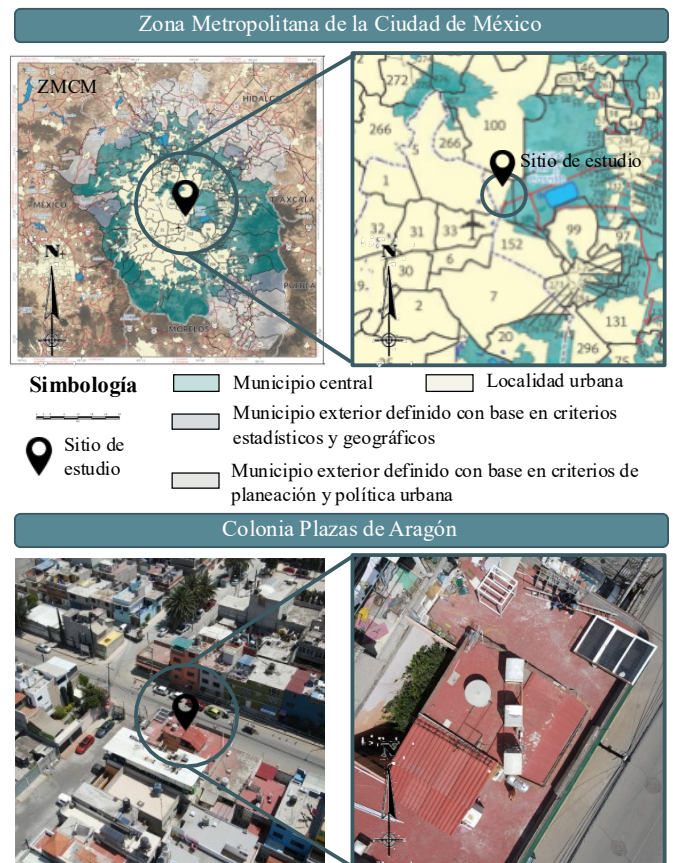


Figura 2. Localización del sitio de estudio en la ZMCM. Elaboración propia con datos de SEDATU, CONAPO e INEGI (2018) y fotografías de Bastida R., Sandra P.

Los modelos experimentales presentaron las mismas condiciones ambientales y arquitectónicas, para obtener una mayor confiabilidad de las mediciones. Por ende, se utilizó el programa AutoCAD, versión 2020, para evaluar el emplazamiento adecuado de los modelos experimentales. Se calculó una proyección estereográfica del año 2021, para analizar los ángulos de sombra del sitio. La distancia entre cada modelo evitó áreas sombreadas de edificios o elementos circundantes. El área de emplazamiento se ubicó en el nivel con mayor altura en la construcción y se elaboraron bases de madera de un metro para cada modelo. El periodo de estudio fue de un año, para analizar la interacción entre el clima y la envolvente de los modelos (Rodríguez-Muñoz et al., 2018).

2.2. Materiales de estudio

La localización, orientación y distribución de espacios son estrategias de diseño para el ahorro energético en construcciones. Sin embargo, las propiedades térmicas y ópticas de los materiales son parámetros relevantes para aminorar el consumo energético en diferentes tipos de construcciones. La adecuada selección de un material aislante translúcido o transparente conlleva a un diseño térmico y lumínico exitoso. (Lechner, 2015; Rodríguez-Muñoz et al., 2018) Debido a lo anterior, la presente investigación propuso evaluar dos materiales no convencionales con propiedades de absorción solar de tipo *cuasi-homogénea* (el aerogel de forma granular) y *perpendicular* (el PTFE).

El aerogel es considerado como un material *superaislante*. Lo anterior se refiere a materiales con una conductividad térmica menor a 0.02 W/ (m K) (Cuze et al., 2014). El material

dispersa de manera uniforme la radiación solar, aminora las pérdidas térmicas y la transmitancia en el interior de un espacio. El PTFE es un termoplástico de estructura de panel, que permite absorber la radiación solar de forma perpendicular. En consecuencia, las pérdidas de reflectancia óptica disminuyen y la transmitancia y pérdidas térmicas aumentan. (Schultz et al., 2005; Wong et al., 2007) El material se caracteriza por resistir temperaturas extremas, a la exposición de agentes químicos y solventes (Lonas Lorenzo, 2017).

El PVC se seleccionó como elemento de control para comparar las mediciones y analizar el comportamiento de los materiales no convencionales. Por lo tanto, la investigación analizó tres materiales translúcidos utilizados en cubiertas translúcidas de estructura curva y gran claro, para construcciones pertenecientes al sector comercial. A continuación, la Tabla 1 indica las propiedades mecánicas, térmicas y ópticas de los materiales.

Tabla 1. Propiedades mecánicas, térmicas y ópticas de los materiales de estudio. (Aerogel Technologies, 2004; Birdair, 2014; Cerdá Talón, 2019)

Parámetros	PVC	PTFE	Aerogel
Proveedor	Mercado libre - LonaFlex	Jiangsu VEIK Technology & Materials Co.,Ltd	Aerogel Technologies, Cabot
País de origen	Hidalgo, México	Jiangsu, China	EEUUAA
Costo por m ²	350/m ²	50 USD/m ²	140 USD/ pieza
Formato		membrana	manta
Espesor del material (e) mm	0.54	0.3 ± 0.05mm	3.5
Densidad g/m ³	500 - 950	50 ± 500	4,882.43
Conductividad térmica (k) W/mK	0.12 - 0.25	0.25	0.023
Calor específico (Cp) KJ/Kg°C	1000 - 1500	-	1900
Transmitancia (%)	10 - 15	30	20% a 8mm
Reflectancia (%)	-	70 ± 10	-
Resistencia a tracción de trama/urdimbre (kN/m)	800 / 950	-	-
Resistencia a desgarre de trama/urdimbre (kN/m)	115 / 100	-	-
Expectativa de vida (años)	15 -20	30	25

2.3. Construcción de los modelos experimentales

El modelo experimento es el instrumento de medición para realizar el análisis de los datos del aerogel, PTFE y PVC en cubiertas de estructura curva. Se incorporaron sensores interiores, exteriores y sobre la superficie de los materiales de estudio, para registrar mediciones de temperatura, iluminancia y humedad relativa. El objetivo consistió analizar, evaluar e identificar el material translúcido con el mayor comportamiento térmico y lumínico. (Liliana G. Torres Fernández, 2010)

Se elaboró un estudio sobre módulos experimentales y espacios con cubiertas de estructura curva para identificar la geometría tipo y los criterios mínimos. (Alonso et al., 2013; Benítez, 2017; Buratti & Moretti, 2012; Chen et al., 2018) Las condiciones del espacio experimental consiste en simular un espacio arquitectónico tipo y una cubierta de estructura curva,

fabricado con materiales de construcción (Figura 3). El diseño del módulo se desarrolló en cinco etapas: la construcción de la estructura, la aplicación del aislante en pisos y muros, el confinamiento de los muros, la elaboración de ventanas y el montaje de los materiales de estudio en cada cubierta.



Figura 3. Condiciones del espacio experimental. Elaboración propia con fotografías obtenidas de Alonso et al. (2013) (imagen izquierda) y Noticias (2013) (imagen intermedia).

El proceso de construcción se diseñó en el software SketchUp Pro, versión 2020, y AutoCAD, versión 2020. La dimensión de los módulos es 60x70cm (ancho y longitud) y una altura total de 62cm (Figura 4). Los materiales que se seleccionaron para construir el módulo tipo se muestran en la Tabla 2. La orientación de los modelos es norte-sur, el vano con dirección al norte para evitar la incidencia de la radiación solar al interior y los sensores.

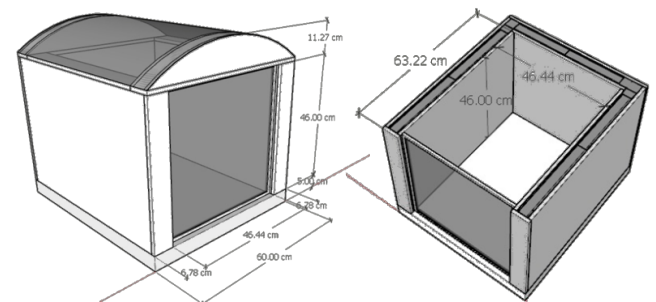


Figura 4. Diseño del módulo tipo y cuantificación de materiales para su construcción. Elaboración propia.



Tabla 2. Cuantificación de materiales para la construcción de los modelos experimentales. Elaboración propia.

Producto	Unidad	Cantidad
Tablamiento marca USG DUROCK	pz	4
Canales metálicos USG	pz	6
Postes metálicos USG	pz	7
Malla de fibra de vidrio USG	m	6.50
Tornillo tipo Tek Broca de 1"	Pz	42
Tornillos tipo DS de 1 ¼"	Pz	60
Tornillos tipo Tek Plano	Pz	21
Compuesto para juntas REDIMIX	Cubeta	1
Cinta de refuerzo marca PERFACINTA	Rollo	1
Pintura blanca COMEX	L	1

2.4. Instrumentación del modelo y parámetros de medición

Los parámetros de medición que se consideran para cada material seleccionado son la iluminancia interior (luxes), humedad relativa interior (%), temperatura interior y del material (°C). El diseño del instrumento de medición parte de los requerimientos mínimos del experimento. Debido a lo anterior, se identificó el tiempo mínimo entre muestras, el valor máximo y mínimo que puede alcanzar cada parámetro en el medio ambiente. La ubicación de los sensores se realizó conforme a la NOM-025-STPS-2008 e indica que los aparatos de medición se deben ubicar en el centro del espacio a analizar. Los sensores propuestos en la Tabla 3 son los adecuados para el experimento, ya que cumplen con los requisitos mínimos de rango de medición, resolución y precisión.

Tabla 3. Especificación de instrumentación

	MAX44009 ESP32 I2C	DHT22 (AM2302)	
	Sensor de iluminancia	Sensor de temperatura y humedad relativa	
Rango de medición	0.045 lux - 188,000 lux	0 - 100% RH	-40°C - 80 °C
Resolución	.0448 lx	0.1% RH	0.1° C
Precisión	-	2% RH	< ± 0.5 °C
Comunicación	IC	Digital	
Microcontrolador ATmega 328= transmite			
Tiempo	1 minuto entre muestras		
# de sensores	4	4	7
Instrumento de referencia	Li-250A	UT333 21-0340	
Certificado	Instituto de Geofísica	Laboratorio particular	
NOM-025-STPS-2008 Requerimientos para instrumentos de medición			
			

Los sensores MAX44009 (mediciones en luxes) y DHT22 (mediciones en °C y % HR) se calibraron con respecto a un instrumento de referencia, certificado por organizaciones especializadas. Se implementó un código para identificar los sensores ubicados el exterior (M-0), los sensores del interior (M-1) y los sensores sobre la superficie del material (M-1.1). El diagrama de la Figura 5 indica la distribución de los sensores en el interior y exterior del módulo tipo. Las mediciones son recopiladas en un microcontrolador ATmega 328 (módulo de adquisición de datos) el cual transmite ondas de radiofrecuencia para almacenarse en un módulo con una memoria SD. La base de datos se recopila en un archivo formato .txt y se procesa en el programa Excel. El módulo de adquisición de datos almacena una medición cada minuto del día, durante 365 días. Por lo tanto, cada sensor recopila un total de 525 600 datos durante un año.

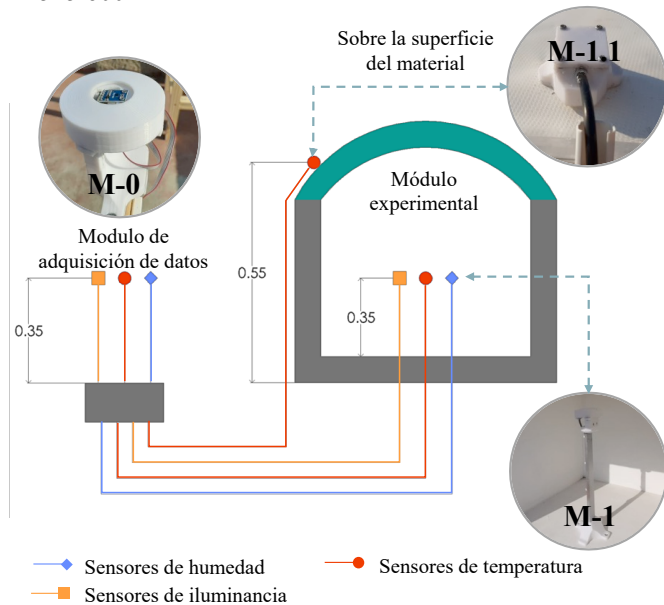


Figura 5. Diagrama de la distribución de sensores en el modelo experimental tipo. Elaboración propia.

El periodo de estudio de los modelos de experimentación tiene una duración de un año, para evaluar el comportamiento de la temperatura, humedad relativa e iluminancia en las cuatro estaciones del año. Sin embargo, se elaboró un análisis de

artículos y libros que elaboran cálculos térmicos y lumínicos para determinar los periodos y días de estudio. Por lo tanto, se determinó que los meses con temperaturas más bajas (diciembre y enero) y los meses con temperatura más altas (abril y mayo) son los periodos de estudio. Asimismo, se propone elaborar el análisis considerando tres tipos de cielo, como es el despejado, parcialmente nublado y nublado. Por lo tanto, se identificarán dos días para cada tipo de cielo para la temporada seca y fría, es decir, doce días de estudio para cada material. (Buratti & Moretti, 2012; Chen et al., 2018; Hegazy, 2019)



Figura 6. Fotografía de los modelos experimentales en sitio.

3. Discusión y resultados

El presente trabajo analizó la primera etapa de la investigación, es decir, la temporada caliente-húmeda. El primer paso consistió en identificar un día representativo para cada tipo de cielo en el mes de abril y, posteriormente, los días representativos de mayo. Debido a lo anterior, se elaboró una tabla con el valor promedio del mes de abril, con el objetivo de identificar los días más calurosos para cada tipo de cielo. La Tabla 4 se elaboró en el programa Excel, con valores promedio para cada día de abril, con la finalidad de identificar el comportamiento térmico y lumínico de cada material con respecto a las mediciones del exterior. El 11 de abril de 2021 representa el día despejado para el mes de abril, el 17 de abril de 2021 indica el día parcialmente nublado y el 26 de abril de 2021 representa el día nublado más caluroso.

Tabla 4. Método para identificar los días de estudio, por medio de los valores promedio de cada día de abril. Elaboración propia

	PERIODO DE ESTUDIO				
	Exterior	Aerogel	PVC	PTFE	
	M-0	M-1	M-2	M-3	
ABRIL	01/04/2021	826.05	171.40	302.14	588.63
	02/04/2021	15889.36	1654.27	2849.62	5664.18
	03/04/2021	25564.77	2101.76	3360.32	7911.40
	04/04/2021	25636.96	2093.12	3333.00	7821.87
	05/04/2021	20255.77	1720.47	2783.54	6160.97
	06/04/2021	18034.11	1520.22	2492.62	5423.35
	07/04/2021	26128.88	2240.58	3722.88	8533.33
	08/04/2021	11037.26	971.68	1678.13	3492.15
	09/04/2021	20741.54	1770.73	2986.80	6593.53
	10/04/2021	22991.17	2196.88	3154.50	7195.13
	11/04/2021	22137.02	2163.52	3158.23	6932.72
	12/04/2021	20303.76	1968.58	2956.93	6256.68
	13/04/2021	17725.44	1669.62	2757.09	5586.45
	14/04/2021	18642.24	1799.38	2799.60	5756.45
	15/04/2021	21674.81	2074.10	3170.86	6682.92
	16/04/2021	17549.42	1728.14	2646.27	5501.59
	17/04/2021	20863.33	1969.78	3041.87	6349.81
	18/04/2021	23902.91	2200.55	3252.06	7211.25
	19/04/2021	23616.57	2181.91	3227.45	7145.55

20/04/2021	22368.08	2060.58	3174.74	6684.03
21/04/2021	20673.08	1957.32	3081.84	6300.05
22/04/2021	15073.67	1479.70	2461.33	4728.66
23/04/2021	15203.17	1461.35	2411.90	4721.95
24/04/2021	20046.15	1864.84	2985.57	6128.09
25/04/2021	20667.33	1844.44	2987.83	6193.82
26/04/2021	19074.73	1669.77	2754.43	5562.40
27/04/2021	16282.72	1413.67	2297.01	4616.35
28/04/2021	18682.58	1617.61	2677.65	5367.86
29/04/2021	16455.48	1365.12	2245.89	4690.77
30/04/2021	13098.83	1183.39	1959.72	3923.65

Los rectángulos con tonalidades azules simbolizan los dos días de estudio para cada tipo de cielo. Los días de estudio se caracterizan por tener un promedio de temperatura elevada. Las líneas con tonalidades azules indican los valores promedio por día de temperatura y las líneas con tonalidades amarillas

indican los valores promedio por día de iluminancia interior y exterior de los módulos (Figura 7).

La Figura 7 mostró que el comportamiento del material PTFE tiene una mayor eficiencia lumínica en el interior del módulo experimental con respecto al material aislante translucido aerogel y el elemento comparativo (PVC), durante abril. Las mediciones de temperatura demostraron que los materiales se comportan como un sistema de invernadero, debido a que existe un aumento de temperatura en el interior de cada módulo experimental. Debido a lo anterior, se elaboró un gráfico para analizar el comportamiento de la temperatura y la iluminancia en el interior de los módulos experimentales, durante los días representativos para cada tipo de cielo en el mes de abril.

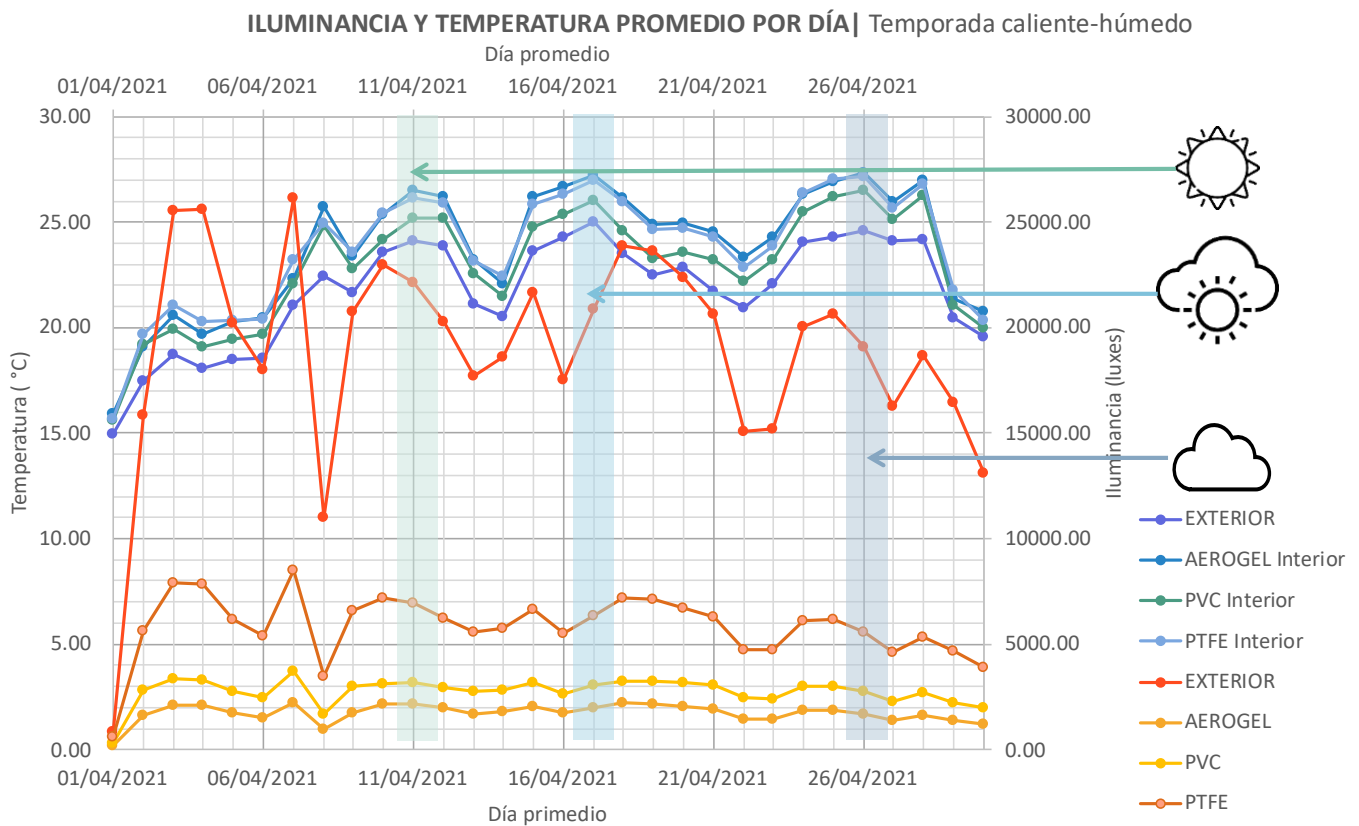


Figura 7. Representación gráfica de la iluminancia y temperatura promedio por día, para la temporada seca, de cada material con respecto a mediciones exteriores. Elaboración propia.

El día despejado, representativo del mes (11 de abril), obtuvo una temperatura promedio de 24.2 °C, una máxima de 36.3 °C, una mínima de 12.1 °C y una oscilación térmica de 24.2 °C. La temperatura promedio, considerando las mediciones de los materiales y el exterior, tuvo un valor de 25.6 °C y una temperatura máxima promedio de 43.4 °C. Las mediciones más altas se presentaron durante las 11:00 horas, debido a la posición del sol y el porcentaje de nubosidad. La iluminancia promedio durante el 11 de abril fue de 22 136.9 luxes y una medición máxima de 77 926.3 luxes durante las 12:00 y 13:00 horas del día.

El día parcialmente nublado, representativo del mes (17 de abril), obtuvo una temperatura promedio de 24.9 °C, una máxima de 38 °C, una mínima de 14.2 °C y una oscilación térmica de 24.3 °C. La temperatura máxima exterior fue registrada a las 13:00 horas, a pesar de las variaciones de

iluminancia y cobertura de nubes durante el día. El promedio de las mediciones de iluminancia fue de 20 864.4 luxes y la medición máxima de 71 688.9 luxes, el cual fue registrado a las 12:00 horas.

El día nublado, representativo del mes (26 de abril), tuvo un registro de temperatura promedio de 24.63 °C, un valor máximo de 40.4 °C y un valor mínimo de 13.90 °C. Cabe destacar que el día nublado no presentó variaciones de iluminancia, sin embargo, obtuvo la menor cantidad de luxes promedio durante el día (19 074.73 luxes) y un valor máximo de 69 615.9 luxes.

La Figura 8 representa el comportamiento térmico y lumínico de cada módulo experimental. El módulo experimental con el aerogel tiene una máxima de 9 824 luxes, lo que representa el valor mínimo con respecto al PTFE y PVC. El material comparativo, es decir el PVC, tiene

mediciones de iluminancia mayores que el material aislante traslucido aerogel, sin embargo, la tasa de cambio de iluminancia en el interior es mayor que el aerogel, pero menor que el PTFE.

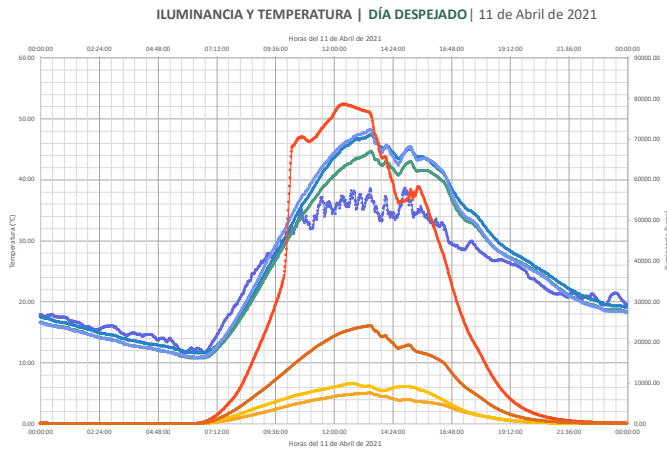


Figura 8. Representación gráfica de la iluminancia y temperatura del día despejado para el mes de abril. Elaboración propia.

La Figura 9 indica que el material PTFE tiene mayores valores de iluminancia que el aerogel y el PVC, sin embargo, la variación de la luz natural en el interior es mayor. Por lo tanto, el aerogel es un material que funciona como difusor de luz natural y, en consecuencia, los valores de iluminancia disminuyen considerablemente. Referente a la temperatura, el PTFE es el material con mayores valores de temperatura, con una diferencia de 0.50°C . La temperatura del exterior tiene un valor máximo de 38.10°C durante el día parcialmente nublado, mientras que el PTFE tiene un valor máximo de 48.10°C , es decir, una diferencia de 10°C .

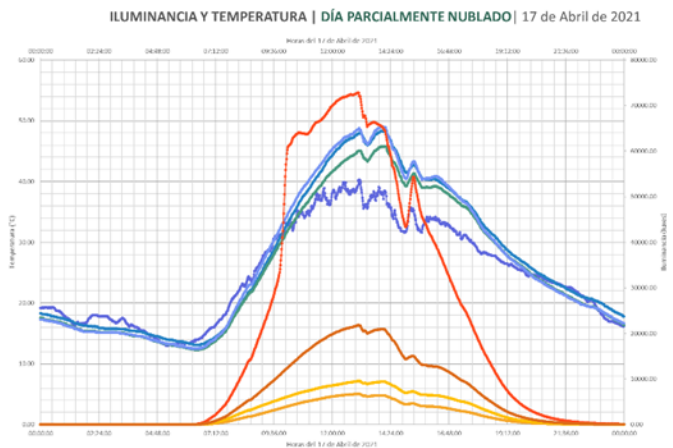


Figura 9. Representación gráfica de la iluminancia y temperatura del día parcialmente nublado para el mes de abril. Elaboración propia

La Figura 10 indica que los materiales continúan elevando la temperatura del interior durante un día nublado, por lo que el material con menor eficiencia térmica es el PTFE. Sin embargo, el PTFE continúa demostrando mayores mediciones de iluminancia que los materiales PVC y aerogel. Los resultados anteriores indican que el PTFE tiene mayores valores de iluminancia durante los tres tipos de cielo en el mes de abril, por lo que es un material adecuado para transmitir la luz natural al interior de manera más eficiente, sin embargo, las variaciones de iluminancia se evidencian con mayor claridad que el aerogel o el PVC. Por el contrario, el PTFE

tiene los valores de temperatura más elevados, considerando las mediciones del exterior, por lo que funciona como un sistema de invernadero

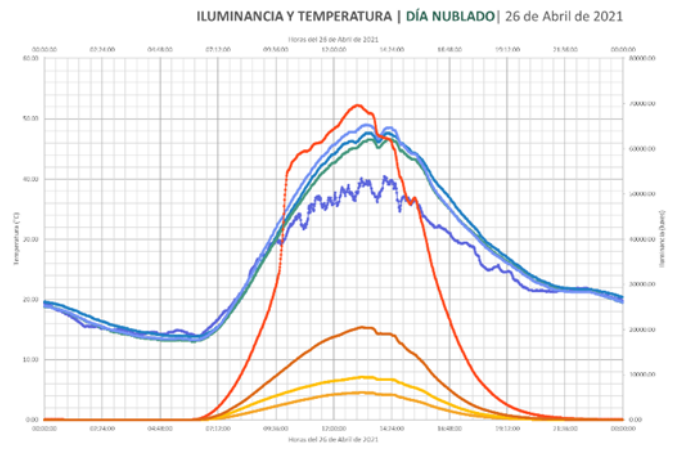


Figura 10. Representación gráfica de la iluminancia y temperatura del día nublado para el mes de abril. Elaboración propia.

Las ventajas de utilizar el PTFE en cubiertas de estructura curva y gran claro fueron la cantidad de luxes que alcanzó durante la temporada caliente-húmeda en los días representativos de cada tipo de cielo y la disminución de variaciones lumínicas en el interior durante días parcialmente nublados. Por el contrario, el aerogel obtuvo una mayor uniformidad lumínica en el interior, lo que significa un mayor confort lumínico para los usuarios de los espacios.

4. Conclusiones

Es importante mencionar que la instrumentación de los modelos experimentales permitió obtener mediciones en tiempo real de temperatura, iluminancia y humedad relativa del sitio. El método experimental exigió una mayor cantidad de tiempo para supervisar el adecuado funcionamiento de los sensores, la intervención de señales por radiofrecuencia, la presencia de animales sobre los materiales de estudio y el deterioro de la instrumentación.

La presente investigación analizó el rendimiento de dos materiales aislantes translúcidos para cubiertas de estructura curva y gran claro, energéticamente eficientes, en un centro comercial, durante dos temporadas del año en tres tipos de cielo. El análisis lumínico indica que el aerogel es el material con la tasa de cambio más baja con respecto a los otros materiales, por lo que tiene mediciones más bajas de iluminancia durante los tres tipos de cielo, con un promedio de 1,934.36 luxes.

El PTFE, es el material con una tasa de cambio mayor, lo que ocasiona que las mediciones sean las más altas, sin embargo, las variaciones de las mediciones con respecto al tiempo pueden generar mayor desconfort visual en los usuarios. Además, el PTFE tiene los valores más altos con respecto al PVC, con una diferencia promedio de 3,296.80 luxes. Para el análisis térmico, el aerogel tiene un incremento promedio de 1.10°C con respecto al PVC, por lo que el PTFE tiene un incremento promedio menor, es decir, 0.87°C con respecto al PVC, sin embargo, el PTFE es el material que obtuvo los valores más altos durante los tres días de estudio, con un promedio de 48.5°C . Esto quiere decir que los tres

materiales de estudio tuvieron mediciones mayores a la temperatura ambiente.

En conclusión, se confirma que los materiales aislantes traslucidos pueden mejorar las condiciones lumínicas interiores con respecto a un material convencional. Como trabajo a futuro, se propone comprobar la posible disminución en el consumo energético por la iluminación artificial. Sin embargo, se comprobó que el modelo experimental no es un método adecuado para evaluar el comportamiento de temperatura de un edificio, debido a que los resultados preliminares pueden indicar un aumento en el consumo energético por los sistemas de climatización.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) y la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). Agradecemos el apoyo del Instituto de Geofísica y al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, quienes proporcionaron el equipo para la investigación.

Referencias

- Aerogel Technologies. (2004). *BuyAerogel.com | Planet Earth's Source for Aerogel™*. <http://www.buyaerogel.com/>
- Alison Aerogel. (2009). *Guangdong Alison High-tech Co., Ltd.* <https://www.ydalison.com/EN/>
- Alonso, L., Bedoya, C., Lauret, B., & Alonso, F. (2013, febrero). F2 TE3 : sistema de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas que permite el diseño con formas libres F 2 TE 3 : Free-Form Transparent Energy Efficient Envelope. *Informes de la Construcción*, 65, 443-456. <https://doi.org/10.3989/ic.12.068>
- Atawa H, M., Al-Kattan, A., & Elwan, A. (2015). Research Article Towards Nano Architecture : Nanomaterial in Architecture - a Review of Functions and Applications. *International Journal of Recent Scientific Research*, 6(4), 3551-3564. <http://www.recentscientific.com>
- Benítez, R. S. (2017). *DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE ESPACIOS EXPERIMENTALES MÓDULO DE EXPERIMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA*. UNAM.
- Birdair. (2014). Insulated Tensioned Membrane. *Tensile Architectural Structures*, 4. www.birdair.com
- Buratti, C., & Moretti, E. (2011a). Lighting and Energetic Characteristics of Transparent Insulating Materials: Experimental Data and Calculation. *Indoor Built Environ*, 20(4), 400-411. <https://doi.org/10.1177/1420326X11409470>
- Buratti, C., & Moretti, E. (2011b). Transparent insulating materials for buildings energy saving: experimental results and performance evaluation. *Third International Conference on Applied Energy*, May, 1421-1432.
- Buratti, C., & Moretti, E. (2012). Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems. *Applied Energy*, 97, 430-437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.055>
- Casini, M. (2016). Advanced insulating materials. En *Smart Buildings*. New York: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100635-1.00004-6>
- Cerdá Talón, M. (2019). *Membranas para estructuras superficiales tensadas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chatellier Lorentzen, D., & McNeil, M. (2019). Consumo de electricidad de edificios no residenciales en México: la importancia del sector de servicios. *Cuaderno de la CONUEE*, 3(1), 13. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/455552/cuaderno3nvciclo_2.pdf
- Chen, Y., Xiao, Y., Zheng, S., Liu, Y., & Li, Y. (2018). Dynamic heat transfer model and applicability evaluation of aerogel glazing system in various climates of China. *Energy*, 163, 1115-1124. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.158>
- Comité Español de Iluminación (CEI), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), & Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España (CSCAE). (2005, mayo). Guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios. *Informes IDAE*, 1, 177. www.idae.es
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 34, pp. 273-299). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
- Dowson, M., Harrison, D., Craig, S., & Gill, Z. (2011). Improving the thermal performance of single-glazed windows using translucent granular aerogel. *International Journal of Sustainable Engineering*, 4(3), 266-280. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.558931>
- Edificios de México. (2020, abril 1). *Centros comerciales que cerraron sus puertas por la emergencia sanitaria*. Edificios de México. <https://www.edemx.com/site/2020/04/01/centros-comerciales-que-cerraron-sus-puertas-por-la-emergencia-sanitaria/>
- Fenercom. (2012). *Guía sobre Materiales Aislantes y Eficiencia Energética*. <https://www.fenercom.com/publicacion/guia-sobre-materiales-aislantes-y-eficiencia-energetica-2012/>
- Guillén Guillén, C. A., Muciño Vélez, A., Santa Ana Lozada, P., & Verduzco Chirino, G. (2018). Análisis de las propiedades térmicas del Arundo Donax (carrizo) y Zea Mays (caña maíz) para su uso como material aislante de cubiertas. *Academia XXII*, 9(18), 90. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252xp.2018.18.67947>
- Hegazy, I. R. (2019). Toward energy-efficient governmental buildings in Egypt: Investigating the impact of nano aerogel glazing on energy performance. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(1), 17-24. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz052>
- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, U. (2009, enero 21). *Atlas Climático Digital de México*. Atlas Climático Digital de México. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx:8080/ACDM/servmapas>
- Kistler, S. S. (1931). Coherent Expanded Aerogels and Jellies. *Nature* 1931 127:3211, 127(3211), 741-741. <https://doi.org/10.1038/127741a0>
- Kneifel, J. (2010). Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy and Buildings*, 42(3), 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>
- Lechner, N. (2015). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects* (4.ª ed.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. <https://www.wiley.com/en-mx/9781118582428>
- Liliana G. Torres Fernández. (2010, abril 12). *Instrumentos de medición*. Slideshare. <https://es.slideshare.net/liliagtorres/instrumentos-de-medicion-3705238>
- Lizan, J., & En Nuestro País. (2018). Centros Comerciales, fenómeno urbano que se afianza en México. *El economista Valores y Dinero*, 1-2. www.atkearney.com.mx
- Lonas Lorenzo. (2017). *Big Span structure*. Lonas Lorenzo. <https://lonaslorenz.com.mx/productos/>
- Molina, C. G. (2011). Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos. *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid*, 387.
- Navarrete, F. (2019, octubre 23). *Destaca México por mayor afluencia en centros comerciales*. Centrourbano Inmobiliario. <https://centrourbano.com/2019/08/23/destaca-mexico-mayor-afluencia-centros-comerciales/>
- Noticias, fotografías y videos de tu P. M. (2013). *Manuel Castro Romero Tercer Informe de Gobierno*. Municipio de Tepechitlán Zacatecas H. Ayuntamiento 2010-2013. <https://tepechitlan.wordpress.com/>
- Reim, M., Körner, W., Manara, J., Korder, S., Arduini-Schuster, M., Ebert, H. P., & Fricke, J. (2005). Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting. *Solar Energy*, 79(2), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.032>
- Riffat, S. B., & Qiu, G. (2013). A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(April 2012), 1-6. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts001>
- Rodríguez-Muñoz, N. A., Nájera-Trejo, M., & Martín-Domínguez, I. R. (2018). Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19(3), 281-291. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2018.19n3.024>
- Santillana Ramos, C. (2018). Lo que gasta un centro comercial. *Energy Management Magazine*, 25. https://issuu.com/puntualmedia/docs/re_web_nov_dic-compressed
- Schultz, J. M., Jensen, K. I., & Kristiansen, F. H. (2005). Super insulating aerogel glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2-3), 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.016>
- Sun, Y., Wilson, R., & Wu, Y. (2018). A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort. *Applied Energy*, 226, 713-729. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy>

- .2018.05.094
- TES POWER. (2019). *Centros Comerciales y energía eficiente*. TES POWER. <https://tespower.com.mx/centros-comerciales-y-energia-eficiente/>
- Tinsa México. (2020). *Mall Analytics | Plazas Comerciales*. Passion For Data. <http://www.plazascomerciales.com.mx/mall-analytics/>
- Torres Casique, J. L. (2017). El Club de Roma, aportes para el desarrollo. Una historiografía de su obra publicada. *Trienal de investigación FAU UCV*, 1-15. <http://trienal.fau.ucv.ve>
- Wong, I. L., Eames, P. C., & Perera, R. S. (2007). A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. En *Solar Energy* (Vol. 81, Número 9, pp. 1058-1071). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.004>
- Xunta de Galicia. (2017). Estado del Arte de Materiales Inteligentes. *Oportunidades Industria 4.0 en Galicia*.