

Rendimiento térmico y geometría de cubiertas en iglesias de San José de Cúcuta, Colombia

Thermal performance and roof geometry in churches of San José de Cúcuta, Colombia

Andrea Paola Colmenares Uribe 

Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. andreapaolacu@ufps.edu.co

Carmen Xiomara Díaz Fuentes 

Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. carmenxiomaradf@ufps.edu.co

Yannette Díaz Umaña 

Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Yannettedu@ufps.edu.co

Received 2023-10-30

Accepted 2024-04-04



To cite this article: Colmenares Uribe, Andrea Paola, Carmen Xiomara Díaz Fuentes, and Yannette Díaz Umaña. "Thermal performance and roof geometry in churches of San José de Cúcuta, Colombia." *VLC arquitectura* 11, no. 1 (April 2024): 119-138. ISSN: 2341-3050. <https://doi.org/10.4995/vlc.2024.20612>



Resumen: La comprensión del rendimiento térmico de las envolventes arquitectónicas es de vital importancia debido a sus repercusiones ambientales, económicas, sociales y políticas en todo el mundo. Este estudio investiga el impacto de la geometría de las cubiertas en el rendimiento térmico de tres iglesias en San José de Cúcuta, Colombia: la Catedral de San José, la Iglesia de Nuestra Señora de la Candelaria y la Iglesia de Nuestra Señora del Carmen. La metodología se divide en cuatro partes: configuración de variables de simulación, ejecución de simulaciones, análisis de datos y caracterización térmica de diferentes tipologías de envolventes de cubierta. La realización de simulaciones de transferencia de calor en ANSYS está basada en investigaciones previas sobre incidencia solar y transferencia de calor en superficies de cubierta de iglesias. Los resultados destacan la importancia de la geometría en la mitigación de las temperaturas exteriores e interiores en climas cálidos como el de San José de Cúcuta. Esto ofrece información valiosa para los arquitectos y diseñadores, permitiéndoles tomar decisiones informadas para optimizar la eficiencia térmica de los edificios y mejorar la comodidad de los ocupantes, lo que hace que esta investigación sea valiosa para la práctica arquitectónica.

Palabras clave: cubiertas; geometría; rendimiento térmico; simulaciones; transferencia de calor.

Abstract: Understanding the thermal performance of architectural enclosures is fundamental due to its environmental, economic, social, and political implications worldwide. This study investigates the impact of roof geometry on the thermal performance of three churches in San José de Cúcuta, Colombia: The Cathedral of San José, the Church of Our Lady of Candelaria, and the Church of Our Lady of Carmen. The methodology is divided into four parts: configuration of simulation variables, simulation execution, data analysis, and thermal characterization of different types of roof enclosures. Conducting heat transfer simulations in ANSYS is based on previous research on solar incidence and heat transfer on church roof surfaces. The results highlight the importance of geometry in mitigating exterior and interior temperatures in warm climates such as that of San José de Cúcuta. This provides valuable information for architects and designers, enabling them to make informed decisions to optimize building thermal efficiency and improve occupant comfort, making this research valuable for architectural practice.

Keywords: geometry; heat transfer; roof; thermal performance; simulations.

INTRODUCCIÓN: EL IMPACTO DE LA ENVOLVENTE EN EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA EDIFICACIÓN

La comprensión del rendimiento térmico de envolventes arquitectónicas es una preocupación ambiental, económica, social y política que afecta el habitar de la población mundial.¹ No obstante, en algunas regiones del mundo se mantiene la negligencia respecto al tema porque no existen compromisos reales por una construcción sostenible.²

Es importante partir del hecho de que es un campo de conocimiento con muchos tecnicismos y componentes teóricos complejos que requieren estudios especializados para llegar a resultados aterrizados a la realidad y que, a su vez, generen impacto y conciencia en los procesos de diseño con estrategias pasiva.

Sin embargo, el poder de la arquitectura tiene a favor el sentido común y el aprovechamiento de recursos a través de estrategias pasivas como el diseño.³ Existen casos que demuestra que el simple cambio de un sistema de mampostería en un muro por un panel de madera mejora el confort hasta un 21% y,⁴ por otra parte, que la variación de la geometría de la superficie de cubierta reduce entre un 33% y un 36% la incidencia solar.⁵

En este orden de ideas, el diseño de la envolvente arquitectónica condiciona a favor o en contra del comportamiento energético de la edificación. Por ende, no solo es importante reconocer las necesidades climáticas del contexto físico y social de un proyecto, sino es fundamental accionar desde las estrategias pasivas que se proveen desde el diseño para el control térmico, evitar incidencia solar extrema y reducir la demanda energética.⁶ En pocas palabras, aprovechar el recurso más tangible en el proyecto arquitectónico: la forma.⁷

Y así como la función lleva a la forma, la forma lleva a la geometría.⁸ Dicho esto, entender la forma en función de la geometría es un punto de partida para analizar el impacto térmico estimado frente a condiciones climáticas aproximadas. Aunque, en muchos casos el estudio

INTRODUCTION: THE IMPACT OF THE ENCLOSURE ON BUILDING THERMAL PERFORMANCE

Understanding the thermal performance of architectural enclosures is an environmental, economic, social, and political concern that affects the living conditions of the global population.¹ Nevertheless, in some regions of the world, negligence persists regarding this issue due to a lack of genuine commitment to sustainable construction.²

It is important to consider that this field of knowledge is replete with technicalities and complex theoretical components that require specialized studies to yield results that are grounded in reality and, concurrently, foster awareness and impact in design processes with passive strategies.

However, the power of architecture benefits from common sense and the application of resources through passive strategies such as design.³ There are cases that demonstrate that the simple replacement of a masonry system in a wall with a wooden panel improves comfort levels by up to 21%,⁴ and, on the other hand, that varying the geometry of the roof surface reduces solar incidence by 33% to 36%.⁵

In this line of thought, the design of the architectural enclosure can potentially either favor or hinder the energy performance of the building. Therefore, it is not only important to recognize the climatic needs of the physical and social context of a project but also crucial to act upon passive strategies provided by design for thermal control, to prevent extreme solar incidence, and to reduce energy demand.⁶ In short, leveraging the most tangible resource in architectural projects: form.⁷

Just as function leads to form, form leads to geometry.⁸ With that said, understanding form in terms of geometry is a starting point for analyzing the estimated thermal impact under approximate climatic conditions. Although, in many cases, the

de la geometría de grandes superficies de cubierta ha sido abordado con propósitos principalmente estructurales, la estética y la configuración espacial también abren espacio para profundizar los alcances de un componente tan básico como la geometría, que tiene significaciones de gran alcance en el habitar.⁹

Por tanto, el propósito de esta investigación aborda la evaluación del impacto térmico a partir de las geometrías de la Catedral de San José de Cúcuta (CAT),¹⁰ la Iglesia de Nuestra Señora de la Candelaria (CAN)¹³ y la Iglesia de Nuestra Señora del Carmen (CAR)¹¹ ubicadas en San José de Cúcuta, Colombia, a través de simulaciones de transferencia de calor para determinar la distribución de temperaturas en ANSYS Fluent, teniendo en cuenta investigaciones previas "Estudio de incidencia solar sobre geometrías de superficies de cubierta de iglesias de San José de Cúcuta, Colombia"¹² y "Análisis de la transferencia de calor en superficies geométricas de cubiertas de iglesias de San José de Cúcuta",¹³ enmarcadas en el macro proyecto "Estrategia de transversalidad e integralidad en el proceso de enseñanza de la arquitectura ETIPEA"¹⁴ de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta.

METODOLOGÍA: LAS SIMULACIONES COMO EJERCICIO EXPERIMENTAL PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Continuando el enfoque metodológico de las investigaciones previas sobre irradiancia y flujos de calor, el estudio térmico de las geometrías de superficies de cubierta de iglesias de San José de Cúcuta plantea una metodología estructuralista experimental bajo el método lógico inductivo analítico.¹⁵ En otras palabras, la metodología de la investigación busca relacionar todas las implicaciones de la geometría de las superficies de cubierta en el rendimiento térmico.

La metodología se divide en 5 partes: selección de iglesias, configuración de variables de simulaciones, ejecución de simulaciones, análisis de datos y caracterización térmica de tipologías geométricas de envolvente de cubierta.

study of the geometry of large roof surfaces has been approached primarily for structural purposes, aesthetics and spatial configuration also provide opportunities to delve into the extents of such a basic component as geometry, which holds significant implications for habitation.⁹

Therefore, the purpose of this research addresses the evaluation of thermal impact based on the geometries of the Cathedral of San José de Cúcuta (CAT),¹⁰ the Church of Our Lady of Candelaria (CAN), and the Church of Our Lady of Carmen (CAR),¹¹ located in San José de Cúcuta, Colombia, through heat transfer simulations to determine temperature distribution in ANSYS Fluent. This analysis considers previous studies such as "Study of solar incidence on roof surface geometries of churches in San José de Cúcuta, Colombia"¹² and "Analysis of heat transfer on geometric surfaces of church roofs in San José de Cúcuta"¹³ framed within the larger project "Strategy of transversality and integrality in the teaching process of architecture (ETIPEA)"¹⁴ at the Francisco de Paula Santander University, Cúcuta.

METHODOLOGY: SIMULATIONS AS AN EXPERIMENTAL EXERCISE FOR HEAT TRANSFER ESTIMATION

Continuing the methodological approach of previous research on irradiance and heat fluxes, the thermal study of roof surface geometries of churches in San José de Cúcuta proposes an experimental structuralist system under the logical inductive analytical method.¹⁵ In other words, the research methodology seeks to relate all implications of the geometry of roof surfaces to thermal performance.

The process is divided into 5 parts: selection of churches, configuration of simulation variables, simulation execution, data analysis, and thermal characterization of geometric typologies of roof enclosure.

Selección de iglesias

Como se mencionó anteriormente, esta investigación es la continuación de un análisis de incidencia solar¹⁶ y flujos de calor¹⁷ de geometrías de cubierta de iglesias en Cúcuta, Colombia. Por ende, la selección fue condicionada por conveniencia debido a la información previa. No obstante, es importante mencionar las características principales de la forma de las superficies que son objeto de análisis con el fin de contextualizar las zonas seleccionadas. La Figura 1 expone las tres tipologías de iglesias junto con la clasificación de las zonas analizadas en la investigación.

Las características principales de las superficies de cubierta de la Catedral de San José de Cúcuta son la cúpula semiesférica y los planos inclinados de las naves central y laterales,¹⁸ tradicionales de la religión católica. Por otro lado, el elemento principal de la Iglesia de Nuestra Señora de la Candelaria (CAN) es la curva catenaria invertida escalonada que transforma la cruz latina en una única nave influenciada por la arquitectura moderna.¹⁹ Bajo esta misma corriente arquitectónica, la Iglesia de Nuestra Señora del Carmen (CAR) se caracteriza por el sistema de plegaduras radiales que simulan un abanico y dan la forma de una planta libre semiradial.²⁰ Asimismo, resaltan otros elementos como la torre y se consideran otros elementos como las cubiertas planas sin ningún tipo de afectación en la geometría.

Configuración de simulaciones

Las simulaciones para determinar la distribución de temperaturas en superficies de cubierta se realizaron en el software ANSYS Fluent a través del método de elementos finitos (FEM). De acuerdo a los requerimientos del programa y el tipo de resultados que se esperan, es necesario contar con la información de la Figura 2 para proyectar el escenario virtual del contexto a analizar.

En primer lugar, las características propias del material que conforma la envolvente arquitectónica también son imprescindibles para la configuración de las

Church Selection

As previously mentioned, this research is a continuation of an analysis of solar incidence¹⁶ and heat fluxes¹⁷ of church roof geometries in Cúcuta, Colombia. Therefore, the selection was driven by convenience due to the prior information available. Nevertheless, it is important to mention the main characteristics of the shape of the surfaces that are the subject of analysis in order to contextualize the selected areas. Figure 1 presents the three typologies of churches along with the classification of the zones analyzed in the research.

The main characteristics of the roof surfaces of the Cathedral of San José de Cúcuta include the semi-spherical dome and the inclined planes of the transept and lateral naves,¹⁸ which are traditional features of Catholic religion. On the other hand, the main element of the Church of Our Lady of Candelaria is the stepped inverted catenary curve that transforms the Latin cross into a single nave influenced by modern architecture.¹⁹ Following the same architectural trend, the Church of Our Lady of Carmen is characterized by a system of radial folds that simulate a folding fan and give the shape of a semi-radial free plan.²⁰ Additionally, other elements such as the tower are highlighted, and flat roofs without any type of alteration in the geometry are considered.

Simulation setup

Simulations to determine the temperature distribution on roof surfaces were conducted using the ANSYS Fluent software through the Finite Element Method (FEM). According to the requirements of the software and the type of results expected, it is necessary to have the information from Figure 2 to project the virtual scenario of the context under analysis.

Firstly, the inherent characteristics of the material forming the architectural enclosure are also essential for the configuration of the simulations.

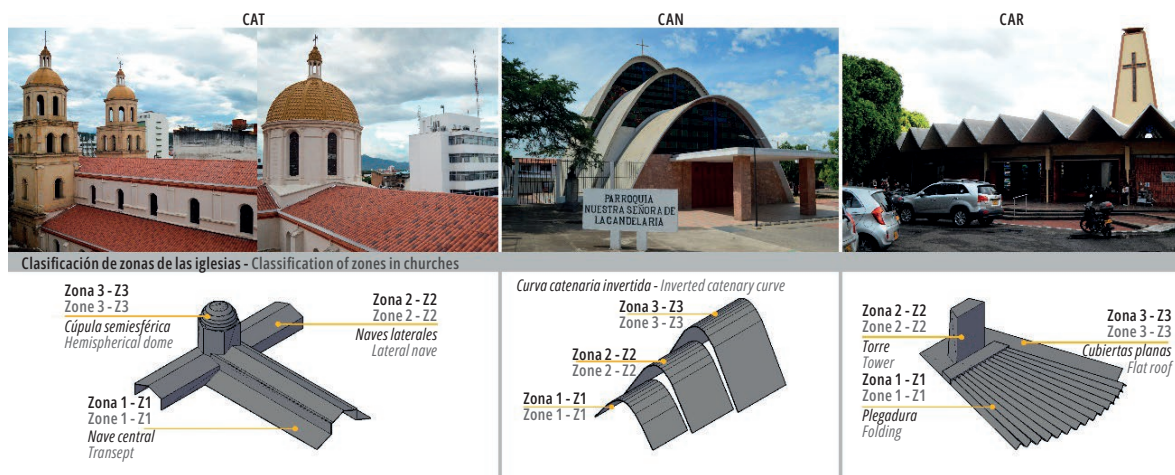


Figura 1. Fotografías y clasificación de zonas de geometrías de la Catedral de San José de Cúcuta (CAT), la Iglesia de Nuestra Señora de la Candelaria (CAN) y la Iglesia de Nuestra Señora del Carmen (CAR) ubicadas en San José de Cúcuta, Colombia.

Figure 1. Photographs and classification of zones of geometries of the Cathedral of San José de Cúcuta (CAT), the Church of Our Lady of Candelaria (CAN), and the Church of Our Lady of Carmen (CAR) located in San José de Cúcuta, Colombia.

simulaciones. Debido a que las propiedades térmicas del material y el espesor del cerramiento influyen en la distribución de temperaturas, esta investigación se enfoca en analizar la relación entre la geometría de las superficies de cubiertas de las iglesias seleccionadas y el registro de temperaturas exteriores e interiores. Por tanto, es necesario controlar variables como material, espesor y conductividad del cerramiento con el fin de limitar el análisis de los resultados a la variable de la geometría.²¹

Since the thermal properties of the material and the thickness of the enclosure influence the temperature distribution, this research focuses on analyzing the relationship between the geometry of the roof surfaces of the selected churches and the recording of exterior and interior temperatures. Therefore, it is necessary to control variables such as material, thickness, and conductivity of the enclosure in order to limit the analysis of the results to the geometry variable.²¹

En segundo lugar, las condiciones climáticas seleccionadas corresponden a la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia donde se encuentran ubicadas las iglesias. De acuerdo al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), es una ciudad caracterizada por un clima cálido con vientos provenientes principalmente del sur.²² Asimismo, la Figura 3 indica los valores de radiación solar aplicados sobre las superficies de los planos que componen las cubiertas de CAT, CAN y CAR,²³ debido a que está demostrado que la variación de estos valores con relación al tipo de inclinación del plano, afecta los flujos de calor y, por ende, la distribución de temperaturas.²⁴

Next, the selected weather conditions correspond to the city of San José de Cúcuta, Colombia, where the churches are located. According to the Institute of Hydrology, Meteorology, and Environmental Studies (IDEAM), it is characterized by a warm climate with winds mainly coming from the south.²² Additionally, Figure 3 indicates the values of solar radiation applied to the surfaces of the planes comprising the roofs of CAT, CAN, and CAR.²³ It has been demonstrated that the variation of these values with respect to the type of plane inclination affects heat flows and, consequently, temperature distribution.²⁴

Condiciones climáticas		Cerramiento	
Variable	Valor	Variable	Valor
Temperatura	34 °C ²⁵	Material	Concreto pesado
Viento	3,5 m/s ²⁶	Espesor	12 cm ²⁷
Radiación	Ver Figura 3	Conductividad	1,75 W/mK ²⁸

Figure 2. Configuración de variables de las simulaciones de flujos de calor.

Weather conditions		Enclosure	
Variable	Value	Variable	Value
Temperature	34 °C ²⁵	Material	Heavy concrete
Wind	3.5 m/s ²⁶	Thickness	12 cm ²⁷
Radiation	See Figure 3	Conductivity	1.75 W/mK ²⁸

Figure 2. Configuration of variables for heat flow simulations.

Variable	Plano	CAT			CAN			CAR		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Irradiancia ¹²	1	490	630	700	375	375	375	511	700	700
	2	560	210	630	440	440	440	385	259	700
	3	490	-	490	505	505	505	-	322	196
	4	560	-	420	505	505	505	-	133	259
	5	420	-	350	635	635	700	-	196	133
	6	210	-	210	635	635	700	-	-	259
	7	-	-	210	635	635	700	-	-	259
	8	-	-	420	570	570	635	-	-	-
	9	-	-	-	570	570	570	-	-	-
	10	-	-	-	505	505	505	-	-	-
Flujos de calor ¹³	1	170,27	218,91	237,37	125,34	125,34	125,34	104,72-167,04	230,49	230,26-342,16
	2	216,28	72,97	213,65	147,36	125,39	147,08	135,83-199,7	105,22	71,45
	3	170,27	-	164,61	169,09	162,34	144,15	-	105,22	86,65
	4	194,59	-	167,88	167,84	168,89	230,94	-	43,7	42,88
	5	145,94	-	141,13	213,1	212,42	231,66	-	64,548	83,21
	6	72,96	-	92,52	211,43	230,03	231,95	-	-	85,51
	7	-	-	0,72-72,97	212,42	190,47	230,94	-	-	167,8
	8	-	-	146,46-217,46	190,52	190,36	213,52	-	-	-
	9	-	-	-	190,47	185,52	213,52	-	-	-
	10	-	-	-	169,25	168,8	168,8	-	-	-

Figura 3. Irradiancia solar (Wh/m²) y flujos de calor (W/m²) promedio de las superficies de cubierta de CAT, CAN y CAR en condiciones climáticas del mediodía en un día tipo de septiembre en San José de Cúcuta, caracterizadas por registrar los valores más altos.

Variable	Plane	CAT			CAN			CAR		
		Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Irradiancia ¹²	1	490	630	700	375	375	375	511	700	700
	2	560	210	630	440	440	440	385	259	700
	3	490	-	490	505	505	505	-	322	196
	4	560	-	420	505	505	505	-	133	259
	5	420	-	350	635	635	700	-	196	133
	6	210	-	210	635	635	700	-	-	259
	7	-	-	210	635	635	700	-	-	259
	8	-	-	420	570	570	635	-	-	-
	9	-	-	-	570	570	570	-	-	-
	10	-	-	-	505	505	505	-	-	-
Heat flux ¹³	1	170.27	218.91	237.37	125.34	125.34	125.34	104.72-167.04	230.49	230.26-342.16
	2	216.28	72.97	213.65	147.36	125.39	147.08	135.83-199.7	105.22	71.45
	3	170.27	-	164.61	169.09	162.34	144.15	-	105.22	86.65
	4	194.59	-	167.88	167.84	168.89	230.94	-	43.7	42.88
	5	145.94	-	141.13	213.1	212.42	231.66	-	64.548	83.21
	6	72.96	-	92.52	211.43	230.03	231.95	-	-	85.51
	7	-	-	0.72-72.97	212.42	190.47	230.94	-	-	167.8
	8	-	-	146.46-217.46	190.52	190.36	213.52	-	-	-
	9	-	-	-	190.47	185.52	213.52	-	-	-
	10	-	-	-	169.25	168.8	168.8	-	-	-

Figure 3. Solar Irradiance (Wh/m²) and Heat Fluxes (W/m²) average of the roof surfaces of CAT, CAN, and CAR under midday weather conditions on a typical day in September in San José de Cúcuta, characterized by recording the highest values.

Ejecución de simulaciones

Para la ejecución de simulaciones, es necesario contar con el modelado en 3 dimensiones de las superficies de cubierta en el formato *Initial Graphics Exchange Specification* (IGES), una vista previa en la Figura 4. De esta manera, es posible aplicar las propiedades del material, los flujos de radiación solar en los planos exteriores y configurar los demás valores del entorno a simular.

Análisis de datos y caracterización térmica de tipologías geométricas de envolvente de cubierta

El análisis de datos estudia la distribución de temperaturas exteriores e interiores con el fin de identificar en cada tipología de cubierta los planos de mayor y menor valor comparados con los planos que no tienen inclinaciones. Asimismo, calcula la variación de temperaturas entre el exterior e interior durante una hora de transferencia de calor para identificar el impacto de la geometría de la superficie en el rendimiento térmico con el fin de proveer nuevos datos que aporten a la caracterización térmica de tipologías de envolvente de cubierta.

Hasta aquí, la caracterización térmica de las tipologías de envolvente de cubierta recopila los datos de irradiancia, flujos de calor, reducción de temperatura y retraso térmico en función de las características formales relacionadas al ángulo de inclinación.

RESULTADOS: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

La distribución de temperaturas de CAT, CAN y CAR se exponen en la Figura 5, donde se observa el gradiente de colores cálidos (rojo, naranja, amarillo) hacia colores fríos (verde, turquesa, azul) para indicar los valores de temperatura más altos y bajos, respectivamente. Asimismo, la Figura 6 recopila los valores promedios exteriores e interiores registrados en los planos de las superficies de cubierta de las iglesias con el fin de corroborar la información con los gráficos de las simulaciones.

Simulation execution

For the simulation execution, it is necessary to have the three-dimensional modeling of the roof surfaces in the Initial Graphics Exchange Specification (IGES) format, as shown in the preview in Figure 4. This enables the application of material properties, solar radiation fluxes on the outer planes, and configuration of other environmental values to simulate.

Data Analysis and Thermal Characterization of Geometric Roof Envelope Typologies

The data analysis examines the distribution of exterior and interior temperatures to identify, within each roof type, the planes with the highest and lowest values compared to the planes without inclinations. It also calculates the temperature variation between the exterior and interior during one hour of heat transfer to identify the impact of the surface geometry on thermal performance, aiming to provide new data that contribute to the thermal characterization of roof enclosure typologies.

Thus far, the thermal characterization of the roof enclosure typologies collects data on irradiance, heat fluxes, temperature reduction, and thermal delay based on formal characteristics related to the angle of inclination.

RESULTS: TEMPERATURE DISTRIBUTION

The temperature distribution of CAT, CAN, and CAR is illustrated in Figure 5, where the gradient of warm colors (red, orange, yellow) towards cool colors (green, turquoise, blue) indicates the highest and lowest temperature values, respectively. Additionally, Figure 6 compiles the average exterior and interior values recorded on the planes of the roof surfaces of the churches to corroborate the information with the simulation graphics.

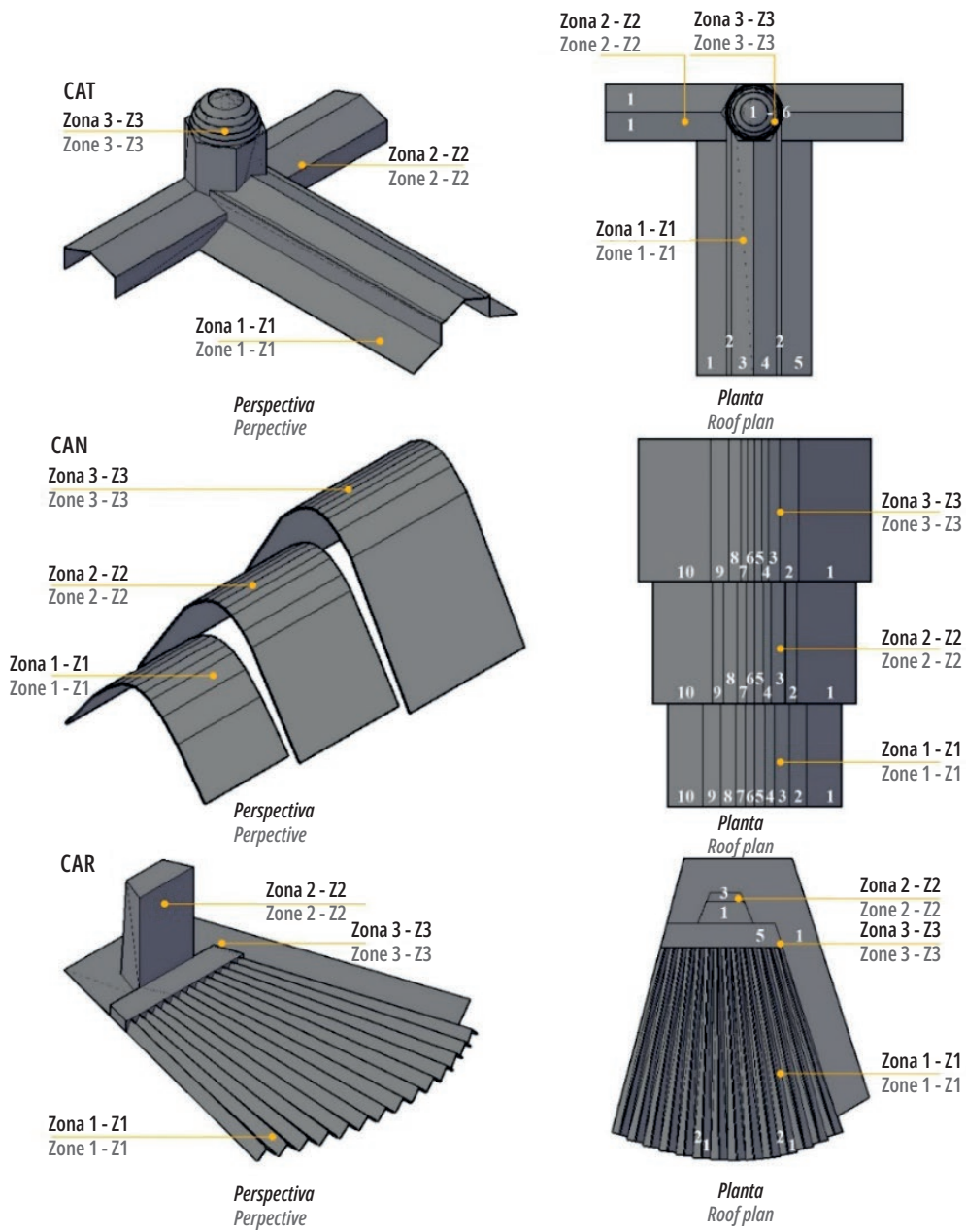


Figura 4. Modelos tridimensionales de la extracción de geometrías de las superficies de cubierta CAT, CAN y CAR.

Figure 4. Three-dimensional models of the extracted geometries of the roof surfaces CAT, CAN, and CAR.

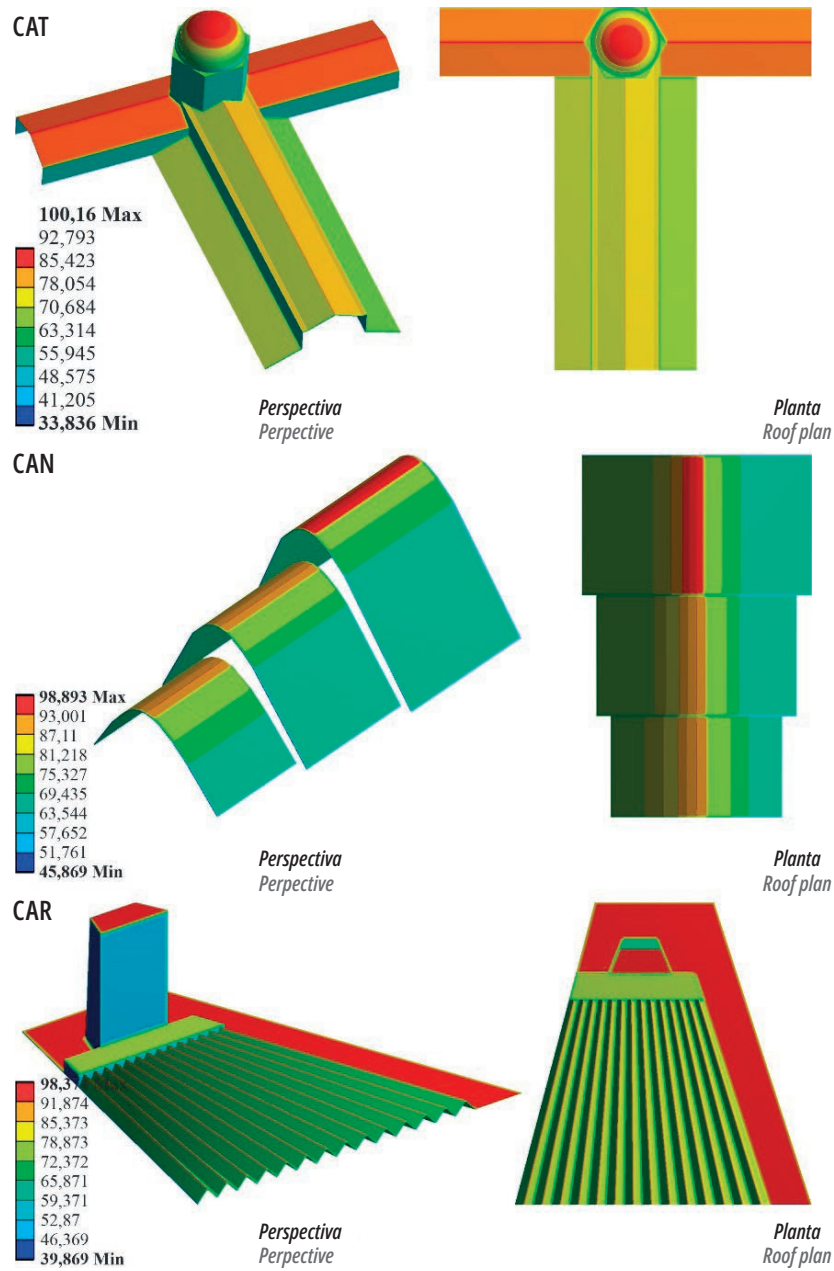


Figura 5. Distribución de temperaturas (°C) promedio de las superficies exteriores de cubierta de CAT, CAN y CAR en condiciones climáticas del mediodía en un día tipo de septiembre en San José de Cúcuta.

Figure 5. Average temperature distribution (°C) of the exterior roof surfaces of CAT, CAN, and CAR under midday weather conditions on a typical day in September in San José de Cúcuta.

Sección	Plano	CAT		CAN		CAR	
		Temp. exterior	Temp. interior	Temp. exterior	Temp. interior	Temp. exterior	Temp. interior
Z1	1	79,73	63,19	67,66	59,01	79,80-85,88	67,75-69,92
	2	89,14	72,45	73,49	63,41	68,39-70,92	48,20-58,85
	3	80,96	72,92	79,33	67,58	-	-
	4	86,26	68,05	80,60	69,80	-	-
	5	73,20	68,05	91,57	76,94	-	-
	6	53,60	44,89	91,57	77,28	-	-
	7	-	-	91,22	73,42	-	-
	8	-	-	85,28	72,11	-	-
	9	-	-	80,84	71,41	-	-
	10	-	-	79,33	67,76	-	-
Z2	1	92,79	77,78	67,66	59,07	95,90	80,10
	2	53,60	44,89	73,52	59,07	56,91	51,06
	3	-	-	79,33	67,74	63,15	59,37
	4	-	-	80,21	67,76	45,76	39,87
	5	-	-	90,80	76,83	51,34	46,91
	6	-	-	92,01	77,40	-	-
	7	-	-	91,83	77,40	-	-
	8	-	-	81,22	72,13	-	-
	9	-	-	79,34	72,12	-	-
	10	-	-	79,33	67,75	-	-
Z3	1	100,16	83,53	67,66	59,07	95,89	80,11
	2	93,56	78,60	73,50	63,35	55,24	46,37
	3	80,28	65,85	79,42	67,63	56,98	46,37
	4	73,52	63,62	80,01	68,18	46,31	39,87
	5	67,18	56,05	98,84	79,41	57,42	46,37
	6	54,14	41,35	97,51	81,20	57,55	46,37
	7	73,16	63,41	97,20	80,47	79,02	67,48
	8	53,60	44,89	91,02	75,32	-	-
	9	-	-	85,19	72,14	-	-
	10	-	-	79,33	67,76	-	-

Figura 6. Distribución de temperaturas (°C) exteriores e interiores promedio de las superficies de cubierta de CAT, CAN y CAR en condiciones climáticas del mediodía en un día tipo de septiembre en San José de Cúcuta.

Zone	Plane	CAT		CAN		CAR	
		Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior
Z1	1	79.73	63.19	67.66	59.01	79.80-85.88	67.75-69.92
	2	89.14	72.45	73.49	63.41	68.39-70.92	48.20-58.85
	3	80.96	72.92	79.33	67.58	-	-
	4	86.26	68.05	80.60	69.80	-	-
	5	73.20	68.05	91.57	76.94	-	-
	6	53.60	44.89	91.57	77.28	-	-
	7	-	-	91.22	73.42	-	-
	8	-	-	85.28	72.11	-	-
	9	-	-	80.84	71.41	-	-
	10	-	-	79.33	67.76	-	-
Z2	1	92.79	77.78	67.66	59.07	95.90	80.10
	2	53.60	44.89	73.52	59.07	56.91	51.06
	3	-	-	79.33	67.74	63.15	59.37
	4	-	-	80.21	67.76	45.76	39.87
	5	-	-	90.80	76.83	51.34	46.91
	6	-	-	92.01	77.40	-	-
	7	-	-	91.83	77.40	-	-
	8	-	-	81.22	72.13	-	-
	9	-	-	79.34	72.12	-	-
	10	-	-	79.33	67.75	-	-
Z3	1	100.16	83.53	67.66	59.07	95.89	80.11
	2	93.56	78.60	73.50	63.35	55.24	46.37
	3	80.28	65.85	79.42	67.63	56.98	46.37
	4	73.52	63.62	80.01	68.18	46.31	39.87
	5	67.18	56.05	98.84	79.41	57.42	46.37
	6	54.14	41.35	97.51	81.20	57.55	46.37
	7	73.16	63.41	97.20	80.47	79.02	67.48
	8	53.60	44.89	91.02	75.32	-	-
	9	-	-	85.19	72.14	-	-
	10	-	-	79.33	67.76	-	-

Figure 6. Average exterior and interior temperature distribution (°C) of the roof surfaces of CAT, CAN, and CAR under midday weather conditions on a typical day in September in San José de Cúcuta.

La variación de temperaturas entre el exterior e interior de la envolvente arquitectónica es la diferencia entre la temperatura de la superficie exterior e interior. Las Figuras 7, 8 y 9 representan de forma gráfica la variación de valores entre la temperatura exterior e interior a lo largo de la superficie de

The temperature variation between the exterior and interior of the architectural enclosure is the difference between the temperature of the exterior and interior surfaces. Figures 7, 8, and 9 graph the variation in values between exterior and interior temperatures along the roof

cubierta, teniendo en cuenta las características formales de los planos determinadas por los ángulos de inclinación.

Catedral de San José de Cúcuta

A partir del análisis de las Figuras 6 y 7, los picos de temperatura exterior de CAT se registran en los planos horizontales de la nave central, lateral y cúspide de la cúpula semiesférica, donde alcanzan temperaturas exteriores desde 79,73 °C hasta 100,16 °C y temperaturas interiores desde 63,18 °C hasta 83,53 °C.

A pesar de que la cúspide de la cúpula de CAT registra altas temperaturas, los valores se reducen a medida que los planos se disponen de manera vertical, es decir que disminuyen de 80,20 °C a 54,14 °C en la superficie exterior y de 65,85 °C a 41,35 °C en la superficie interior, en los planos verticales con ángulos de inclinación entre 50° hasta 130°.

Los valores de temperatura más bajos de CAT se registran en los planos verticales entre 85° y 95° ubicados en la base de la cúpula semiesférica y muros de las naves (central y lateral), con registros entre 53,59 °C y 54,13 °C en las superficies exteriores, así como entre 41,35 °C y 44,89 en las superficies interiores.

Los beneficios de los planos inclinados se demuestran en la disminución de temperaturas según el ángulo de inclinación. Un ejemplo para iniciar, la cúspide de CAT registra la temperatura más alta en esta tipología, es decir que el valor más alto está ubicado en posición horizontal (0°). Sin embargo, a medida que los planos de la cúpula se disponen en posición vertical disminuye entre 6,60 °C y 46,02 °C. Caso contrario a los planos horizontales de las naves central y lateral que tan solo disminuyen entre 5,14 °C y 16,54 °C.

La Figura 7 muestra una variación uniforme entre el exterior e interior del cerramiento en todos los planos. Los datos demuestran que los planos con mayor temperatura, es decir los planos horizontales de la

surface, taking into account the formal characteristics of the planes determined by the angles of inclination.

Cathedral of San José de Cúcuta

Based on the analysis of Figures 6 and 7, the peaks of exterior temperature for CAT are recorded on the horizontal planes of the transept, lateral nave, and the apex of the semi-spherical dome, where exterior temperatures range from 79.73 °C to 100.16 °C, with interior temperatures ranging from 63.18 °C to 83.53 °C.

Although the apex of CAT's dome registers high temperatures, the values decrease as the planes are arranged vertically. In other words, they decrease from 80.20 °C to 54.14 °C on the exterior surface and from 65.85 °C to 41.35 °C on the interior surface on the vertical planes with angles of inclination between 50° to 130°.

The lowest temperature values for CAT are recorded on the vertical planes between 85° and 95° located at the base of the semi-spherical dome and the walls of the central and lateral naves, with temperatures ranging from 53.59 °C to 54.13 °C on the exterior surfaces and 41.35 °C to 44.89 °C on the interior surfaces.

The benefits of inclined planes are demonstrated in the decrease of temperatures according to the angle of inclination. For instance, the apex of CAT registers the highest temperature in this typology, meaning the highest value is located in a horizontal position (0°). Notwithstanding, as the planes of the dome are arranged in a vertical position, the temperature decreases by 6.60 °C to 46.02 °C. Conversely, the horizontal planes of the central and lateral naves only decrease by 5.14 °C to 16.54 °C.

Figure 7 depicts a uniform variation between the exterior and interior of the enclosure across all planes. The data demonstrates that the planes with higher temperatures, namely the horizontal

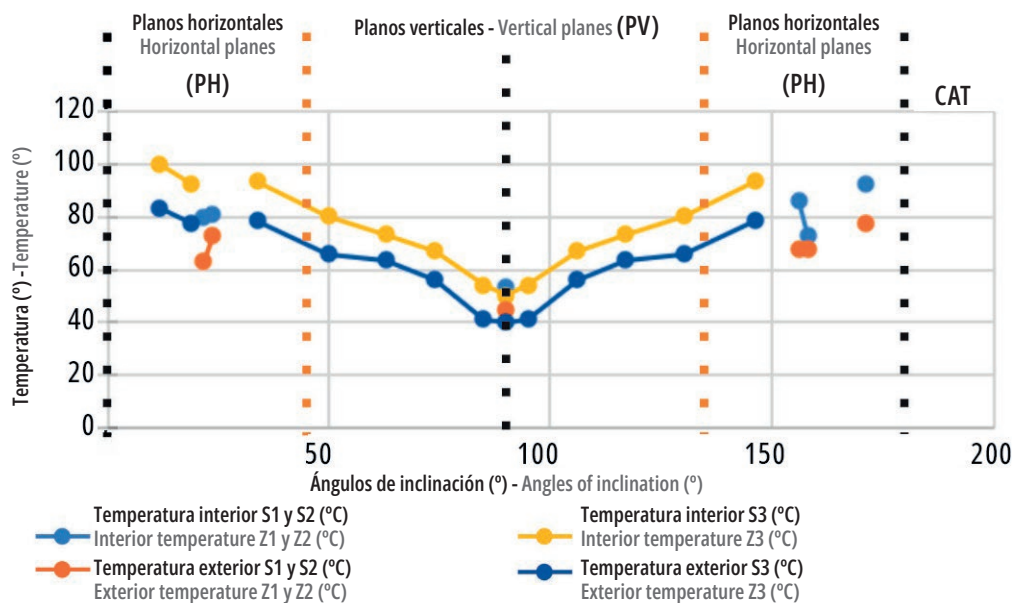


Figura 7. Variación entre temperaturas exteriores e interiores de los planos de las superficies de cubierta de CAT en condiciones climáticas del mediodía en un día tipo de septiembre en San José de Cúcuta.

Figure 7. Horizontal planes between exterior and interior temperatures of the planes of the roof surfaces of CAT under midday weather conditions on a typical day in September in San José de Cúcuta.

nave central, lateral y cúspide de la cúpula, registran las variaciones más altas entre 14,97 °C y 18,20 °C, mientras que los planos verticales presentan variaciones menores entre 5,14 °C y 14,43 °C. La variación de temperaturas de la cúpula no es significativa, los valores van desde 11,13 °C (base de la cúpula) hasta 16,62 °C (cúspide).

planes of the transept, lateral nave, and apex of the dome, record the highest variations ranging from 14.97 °C to 18.20 °C, while the vertical planes show lower variations ranging from 5.14 °C to 14.43 °C. The temperature variation of the dome is not significant, ranging from 11.13 °C (base of the dome) to 16.62 °C (apex).

Iglesia de Nuestra Señora de la Candelaria

Church of Our Lady of Candelaria

El segundo análisis corresponde a CAN que al igual que CAT, registra los valores de temperatura más altos en los planos horizontales entre 7° - 24° y 171° - 173° (90,80 °C - 98,84 °C), seguido por los planos inclinados entre 33° - 37° y 143° - 161° (79,33 °C - 85,28 °C en el exterior); y los más bajos en los planos verticales inclinados entre 46°-47° y 119° - 134° (67,66 °C - 73,34 °C en el exterior).

The second analysis corresponds to CAN, which, like CAT, records the highest temperature values on the horizontal planes between 7° - 24° and 171° - 173° (90.80 °C - 98.84 °C), followed by the inclined planes between 33° - 37° and 143° - 161° (79.33 °C - 85.28 °C on the exterior); and the lowest on the inclined vertical planes between 46° - 47° and 119° - 134° (67.66 °C - 73.34 °C on the exterior).

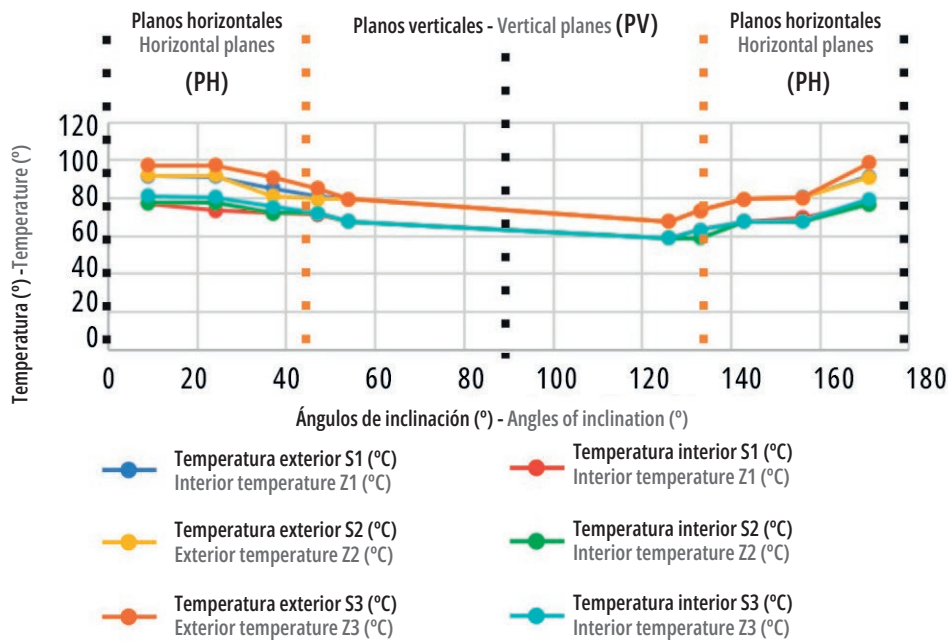


Figura 8. Variación entre temperaturas exteriores e interiores de los planos de las superficies de cubierta de CAN en condiciones climáticas del mediodía en un día tipo de septiembre en San José de Cúcuta.

Figure 8. Horizontal variation between exterior and interior temperatures of the planes of the roof surfaces of CAN under midday weather conditions on a typical day in September in San José de Cúcuta.

Sin embargo, la tipología formal de CAN es una composición de planos horizontales y verticales inclinados que conforman la curva catenaria invertida en diferentes alturas. Por tanto, ningún plano está a 0° y/o 90°. De acuerdo a la Figura 6, la disposición de planos verticales con ángulos de inclinación desde 46° hasta 61° y 119° hasta 134° tienen el potencial de reducir las temperaturas entre 6,29 °C y 18,17 °C en orientaciones críticas (suroeste), mientras que en condiciones óptimas (noreste) alcanzan mejoras entre 10,95 °C y 26,84 °C respecto a los valores más altos ubicados en las alturas máximas de cada zona.

The formal typology of CAN is a composition of inclined horizontal and vertical planes that form the inverted catenary curve at different heights. Therefore, no plane is at 0° or 90°. According to Figure 6, the arrangement of vertical planes with angles of inclination between 46° to 61° and 119° to 134° has the potential to reduce temperatures between 6.29°C to 18.17 °C in critical orientations (southwest), while under optimal conditions (northeast), they achieve improvements between 10.95 °C to 26.84 °C compared to the highest values located at the maximum heights of each zone.

En cuanto a la variación de las curvas catenarias invertidas de CAN (Figura 8) va desde 11,74 °C hasta 19,43 °C en los planos horizontales con temperaturas más altas, mientras que la variación de las temperaturas disminuye en los planos verticales entre 7,22 °C

Regarding the variation of the inverted catenary curves of CAN (Figure 8), it ranges from 11.74 °C to 19.43 °C on the horizontal planes with the highest temperatures, while the temperature variation decreases on the vertical planes

y 11,58 °C orientadas en posiciones críticas (suroeste) y entre 8,59 °C y 14,45 °C en orientaciones óptimas (noreste).

Iglesia de Nuestra Señora del Carmen

El último caso de estudio es CAR, especialmente el sistema de plegadura conformado por los planos inclinados entre 46° - 64° y 116° - 134° versus el plano horizontal sin inclinación. Así como CAT y CAN, CAR registra los picos de temperaturas en las superficies de los planos horizontales, los cuales alcanzan hasta 95,90 °C en el exterior y 80,10 °C en el interior. Además, los planos del sistema de plegadura también alcanzan valores altos comparados con aquellos 100% verticales (muros). Sin embargo, los planos inclinados 116° y 134° reducen entre 10,02 °C y 16,10 °C, teniendo en cuenta su orientación crítica (noroeste), mientras que aquellos mejor orientados e inclinados a 46° y 64° (sureste) reducen entre 21,25 °C y 31,90 °C comparados con los planos horizontales (0°).

Aunque los planos verticales con inclinaciones de 90° clasifican como muros, no forman parte del objetivo del estudio. Es importante mencionar que el impacto de la perpendicularidad con relación a la incidencia solar reduce entre 11,82 °C y 50,14 °C las temperaturas de las superficies exteriores e interiores, comparados con los planos a 0°.

Por último, el caso de CAR concuerda con CAT y CAN en que la principal variación entre temperatura exterior e interior está registrada en los planos horizontales o aquellos con altas temperaturas (Figura 9). Los principales elementos de esta tipología de cubierta son el sistema de plegaduras y la cubierta plana posterior. Como es de esperar, la variación más alta es de 15,18 °C en la cubierta plana, seguido por los planos verticales orientados al sureste (12,07 °C y 20,19 °C) y los planos orientados hacia el noroeste (12,07 °C y 16,96 °C) del sistema de plegaduras. Finalmente, la variación de los diferentes planos verticales clasificados como muros (90°) es menor y registra diferencia entre 3,79 °C y 11,18 °C.

between 7.22 °C to 11.58 °C oriented in critical positions (southwest) and between 8.59 °C to 14.45 °C in optimal orientations (northeast).

Church of Our Lady of Carmen

The last case study is CAR, especially the folding system formed by the inclined planes between 46° - 64° and 116° - 134° versus the horizontal plane without inclination. Like CAT and CAN, CAR records temperature peaks on the surfaces of the horizontal planes, reaching up to 95.90 °C on the exterior and 80.10 °C on the interior. Furthermore, the planes of the folding system also reach high values compared to those that are 100% vertical (walls). However, the inclined planes at 116° and 134° reduce between 10.02 °C and 16.10 °C, considering their critical orientation (northwest), while those better oriented and inclined at 46° and 64° (southeast) reduce between 21.25 °C and 31.90 °C compared to the horizontal planes (0°).

Although the vertical planes with inclinations of 90° classify as walls, they are not part of the study's focus. It is important to mention that the impact of perpendicularity with respect to solar incidence reduces temperatures of exterior and interior surfaces between 11.82 °C and 50.14 °C compared to the planes at 0°.

Lastly, the case of CAR aligns with CAT and CAN in that the main variation between exterior and interior temperatures is recorded on the horizontal planes or those with high temperatures (Figure 9). The main elements of this roof typology are the folding system and the flat rear roof. As expected, the highest variation is 15.18 °C on the flat roof, followed by the vertical planes oriented southeast (12.07 °C and 20.19 °C) and northwest (12.07 °C and 16.96 °C) of the folding system. Finally, the variation of the different vertical planes classified as walls (90°) is lower and records differences between 3.79 °C and 11.18 °C.

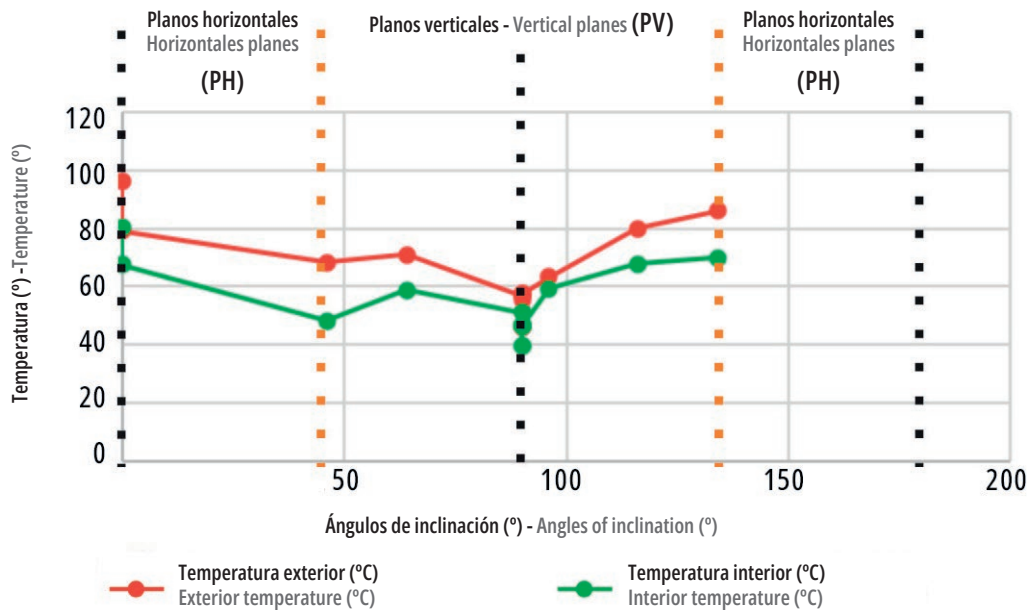


Figura 9. Variación entre temperaturas exteriores e interiores de los planos de las superficies de cubierta de CAR en condiciones climáticas del mediodía en un día tipo de septiembre en San José de Cúcuta.

Figure 9. Horizontal variation between exterior and interior temperatures of the planes of the roof surfaces of CAR under midday weather conditions on a typical day in September in San José de Cúcuta.

Caracterización térmica de tipologías geométricas de envolvente de cubierta

La caracterización térmica sintetiza las variaciones de irradiancia, flujos de calor y temperaturas según las tipologías de cubierta y sus ángulos de inclinación, con el fin de proveer información sobre el impacto del diseño en la eficiencia energética de la envolvente arquitectónica (Figura 10).²⁹

CONCLUSIONES

El estudio revela que la geometría de envolventes arquitectónicas desempeña un papel esencial en la mitigación de las temperaturas exteriores e interiores en las iglesias de San José de Cúcuta.

Thermal characterization of roof envelope geometric typologies

The thermal characterization synthesizes the variations in irradiance, heat flux, and temperatures according to the roof typologies and their angles of inclination, aiming to provide information about the design's impact on the energy efficiency of the architectural envelope (Figure 10).²⁹

CONCLUSIONS

The study reveals that the geometry of architectural enclosure serves an essential role in mitigating exterior and interior temperatures in the churches of San José de Cúcuta.

Tipología de cubierta	Angulo de inclinación ¹²	Irradiancia ¹²	Flujo de calor por tipología ¹³ (en 212,8 m ²)	Reducción de temperaturas	Variación entre exterior e interior
		Wh/m ²	W/m ²	°C	°C
Plano horizontal - 0°	0°	700	48.999,33	No obtiene mejoras	15,79
Nave central Planos horizontales	24° - 156°	490 - 560	39.980,08	13,90 - 19,20 Exterior 10,62 - 15,48 Interior	8,04 - 18,21
Naves laterales Planos horizontales	9° - 171°	630	46.584,05	7,37 exterior 5,75 interior	15
Cúpula semiesférica	12° - 168°	700	36.604,50	6,60 - 46,02 Exterior 4,94 - 42,18 Interior	11,13 - 16,63
	34° - 146°	630			
	50° - 130°	490			
	63° - 117°	420			
	74° - 106°	350			
85° - 95°	210				
Curva catenaria invertida Baja	9° - 54°	505 - 635	35.272,41	13,49	12,22
	126° - 171°	375 - 635			
Curva catenaria invertida Media	9° - 58°	505 - 635	33.390,60	14,78	11,79
	122° - 171°	375 - 635			
Curva catenaria invertida Alta	7° - 61°	505 - 700	33.335,44	18,03	13,51
	119° - 173°	375 - 700			
Plegadura	46° - 64°	385	32.516,75	10,02 - 27,51 exterior 10,18 - 31,90 interior	12,05 - 20,19
	116° - 134°	511			

Figura 10. Caracterización térmica de tipologías de cubierta.

Los planos horizontales de las iglesias CAT, CAN y CAR muestran picos de temperatura exterior elevados, entre 79.73 °C y 100.16 °C, mientras que los planos dispuestos verticalmente presentan reducciones sustanciales tanto en el exterior como interior. Los planos inclinados, especialmente entre 46° y 134°, muestran un potencial significativo para reducir las temperaturas en condiciones críticas y óptimas de orientación solar.

Roof typology	Angle of Inclination ¹²	Irradiance ¹²	Heat flux by roof typology ¹³ (en 212.8 m ²)	Temperature benefits	Variation between exterior and interior
		Wh/m ²	W/m ²	°C	°C
Horizontal plane - 0°	0°	700	48,999.33	No improvement	15.79
Transept Horizontal plane	24° - 156°	490 - 560	39,980.08	13.90 - 19.20 Exterior 10.62 - 15.48 Interior	8.04 - 18.21
Lateral naves Horizontal plane	9° - 171°	630	46,584.05	7.37 exterior 5.75 interior	15
Hemispherical dome	12° - 168°	700	36,604.50	6.60 - 46.02 Exterior 4.94 - 42.18 Interior	11.13 - 16.63
	34° - 146°	630			
	50° - 130°	490			
	63° - 117°	420			
	74° - 106°	350			
85° - 95°	210				
Inverted catenary curve Low	9° - 54°	505 - 635	35,272.41	13.49	12.22
	126° - 171°	375 - 635			
Inverted catenary curve Medium	9° - 58°	505 - 635	33,390.60	14.78	11.79
	122° - 171°	375 - 635			
Inverted catenary curve High	7° - 61°	505 - 700	33,335.44	18.03	13.51
	119° - 173°	375 - 700			
Folding	46° - 64°	385	32,516.75	10.02 - 27.51 exterior 10.18 - 31.90 interior	12.05 - 20.19
	116° - 134°	511			

Figura 10. Thermal characterization of roof typologies.

The horizontal planes of the churches CAT, CAN, and CAR show high peaks of exterior temperature, ranging from 79.73 °C to 100.16 °C, while vertically arranged planes show substantial reductions both on the exterior and interior. The inclined planes, especially between 46° and 134°, demonstrate significant potential for reducing temperatures under critical and optimal solar orientation conditions.

Los beneficios térmicos de los planos inclinados horizontales varían entre 5,75 °C y 19,20 °C, en comparación con las cubiertas planas sin ningún ángulo de inclinación. Mientras que los beneficios térmicos de la cúpula semiesférica aumentan entre 4,94 °C y 46,02 °C. Por otra parte, las variaciones de las curvas catenarias invertidas ofrecen mejoras entre 13,49 °C y 18,03 °C. Finalmente, el sistema de plegaduras alcanza reducciones entre 10,02 °C y 31,90 °C.

En síntesis, los planos horizontales con inclinación mínima no representan mejoras significativas comparada con los beneficios térmicos de la cúpula semiesférica, la curva catenaria invertida o el sistema de plegaduras. A pesar de que la cúpula alcanza el valor más alto de beneficio, el área con el registro más favorable no cubre en su totalidad el área de la planta arquitectónica, mientras que el sistema de plegaduras si lo hace. Por tanto, la geometría caracterizada por el abanico semiradial es la opción más eficiente para mitigar la irradiancia, flujos de calor y distribución de temperaturas de superficies de cubierta en clima cálido como Cúcuta, Colombia.

Notas y Referencias

- 1 Cecilia Fernández Martínez, "Rol del profesional de la construcción en el diseño energético sustentable de edificios," *Energía* 4, no. 47 (2012): 1-8.
- 2 Lides Leonardo Lerma-Bonilla, María Fernanda Serrano-Guzmán, y Diego Darío Pérez-Ruiz, "Importancia de la planeación en la gestión de vivienda social: caso Buenaventura (Colombia)," *Revista Lasallista de Investigación* 17, no. 2 (2020): 236-255, <https://dx.doi.org/10.22507/rli.v17n2a17>.
- 3 Amalita Fernández, Beatriz Silvia Garzón, y David Elsinger, "Incidencia de las estrategias pasivas de diseño arquitectónico en la etiqueta de eficiencia energética en Argentina," *Revista hábitat sustentable* 10, no. 1, (2020):56-67, <https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.07>; Herminia María Alías, y Guillermo José Jacobo, "Eficiencia energética en viviendas sociales. Incidencia de la envolvente en el consumo eléctrico para mantener el bienestar higrotérmico en los espacios interiores," *Arquisur Revista*, no. 1 (2011): 76-89, <https://dx.doi.org/10.14409/ar.v1i1.925>.
- 4 Alías, "Eficiencia energética," 76-89.
- 5 Marcos González Matías, y Juan Raymundo Mayorga Cervantes, *Morfología geométrica de envolvente arquitectónica como elemento de control térmico* (México: Instituto Politécnico Nacional, 2009).
- 6 John Martin Evans, y Silvia Schiller, "Rol de la Envolvente en la Edificación Sustentable," *Revista de la Construcción* 4, no. 1 (2005): 5-12.
- 7 Fernández, "estrategias pasivas," 56-67.
- 8 Schiller, "la envolvente en la edificación," 5-12.

The thermal benefits of the horizontal inclined planes vary from 5.75 °C to 19.20 °C, compared to flat roofs with no angle of inclination. Meanwhile, the thermal benefits of the semi-spherical dome increase from 4.94 °C to 46.02 °C. On the other hand, variations in inverted catenary curves offer improvements ranging from 13.49 °C to 18.03 °C. Finally, the folding system achieves reductions between 10.02 °C to 31.90 °C.

In summary, horizontally inclined planes with minimal inclination do not represent significant improvements compared to the thermal benefits of the semi-spherical dome, inverted catenary curve, or folding system. Although the dome achieves the highest benefit value, the area with the most favorable record does not cover the entire architectural floor area, unlike the folding system. Therefore, geometry characterized by the semi-radial fan shape is the most efficient option for mitigating irradiance, heat flux, and temperature distribution on roof surfaces in warm climates like Cúcuta, Colombia.

Notes and References

- 1 Cecilia Fernández Martínez, "Rol del profesional de la construcción en el diseño energético sustentable de edificios," *Energía* 4, no. 47 (2012): 1-8.
- 2 Lides Leonardo Lerma-Bonilla, María Fernanda Serrano-Guzmán, and Diego Darío Pérez-Ruiz, "Importancia de la planeación en la gestión de vivienda social: caso Buenaventura (Colombia)," *Revista Lasallista de Investigación* 17, no. 2 (2020): 236-255, <https://dx.doi.org/10.22507/rli.v17n2a17>.
- 3 Amalita Fernández, Beatriz Silvia Garzón, and David Elsinger, "Incidencia de las estrategias pasivas de diseño arquitectónico en la etiqueta de eficiencia energética en Argentina," *Revista hábitat sustentable* 10, no. 1, (2020):56-67, <https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.07>; Herminia María Alías, and Guillermo José Jacobo, "Eficiencia energética en viviendas sociales. Incidencia de la envolvente en el consumo eléctrico para mantener el bienestar higrotérmico en los espacios interiores," *Arquisur Revista*, no. 1 (2011): 76-89, <https://dx.doi.org/10.14409/ar.v1i1.925>.
- 4 Alías, "Eficiencia energética," 76-89.
- 5 Marcos González Matías, and Juan Raymundo Mayorga Cervantes, *Morfología geométrica de envolvente arquitectónica como elemento de control térmico* (México: Instituto Politécnico Nacional, 2009).
- 6 John Martin Evans, and Silvia Schiller, "Rol de la Envolvente en la Edificación Sustentable," *Revista de la Construcción* 4, no. 1 (2005): 5-12.
- 7 Fernández, "estrategias pasivas," 56-67.
- 8 Schiller, "la envolvente en la edificación," 5-12.

- ⁹ Francisco Javier Sanchis Sampedro, y Igor Fernández Plazaola, "La geometría en los edificios de la Ciutat de les Arts i Les Ciències de Valencia," *Revista de EGA*, no. 37 (2019): 168-181, <https://doi.org/10.4995/ega.2019.12681>; Federico Luis Del Blanco García, y Ismael García Ríos, "Fernando Higueras y Félix Candela en un retorno a la geometría de paraguas invertidos. Análisis y reconstitución gráfica del aeropuerto de Murcia, 1983," *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica* 23, no. 32 (2018): 232-243, <https://doi.org/10.4995/ega.2018.9813>; Mónica Martínez Martínez, y Ernesto Echeverría Valiente, "Las bóvedas cilíndricas y su evolución hasta las cáscaras cilíndricas largas de cubierta de Félix Candela. Análisis geométrico y mecánico," *EGA Expresión gráfica arquitectónica* 22, no. 30 (2017):160-169, <https://doi.org/10.4995/ega.2017.7846>; Jorge Luis García Valdecabres, "La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia," (Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2010), <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/8381>.
- ¹⁰ Yannette Díaz-Umaña, Mawency Vergel Ortega, y Julio Alfredo Delgado Rojas, *Entre las torres de san José-aproximaciones al arte, arquitectura y geometría de la catedral* (Bogotá: Ecoe Ediciones Limitada, 2021), <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/859>.
- ¹¹ Yannette Díaz-Umaña, Mawency Vergel Ortega, y Julio Alfredo Delgado Rojas, *La gracia de la sencillez interpretaciones de la arquitectura sagrada a través de dos iglesias modernas en frontera* (Bogotá: Ecoe Ediciones, 2022), <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6515>.
- ¹² Yannette Díaz-Umaña, A. Colmenares-Urbe, y C. Díaz-Fuentes, "Estudio de incidencia solar sobre geometrías de superficies de cubierta de iglesias de San José de Cúcuta, Colombia" (Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, 2023).
- ¹³ C. Díaz-Fuentes, Yannette Díaz-Umaña, y A. Colmenares-Urbe, "Análisis de la transferencia de calor en superficies geométricas de cubiertas de iglesias de San José de Cúcuta" (Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, 2023).
- ¹⁴ Yannette Díaz-Umaña, R. E. Galvis Centurión, y C. Díaz-Fuentes, "Estrategia de transversalidad e integralidad en el proceso de enseñanza de la arquitectura ETIPEA" (Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander, 2021)
- ¹⁵ Mario Docci "Il disegno come strumento per l'analisi grafica dell'architettura" (Conferencia en la Universitat Politècnica de València, 1995).
- ¹⁶ Díaz-Umaña, "incidencia solar."
- ¹⁷ Díaz-Fuentes, "Análisis de la transferencia."
- ¹⁸ Díaz-Umaña, *Entre las torres*.
- ¹⁹ Díaz-Umaña, *Entre las torres*.
- ²⁰ Díaz-Umaña, *Entre las torres*.
- ²¹ José Luis Arias Gonzáles, Mitsuo Covinos Gallardo, *Diseño y metodología de la investigación* (Arequipa: Enfoques Consulting EIRL, 2021), 66-78.
- ²² Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, "Promedio climatológico de Colombia 1981-2010" (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010); Jorge Sánchez Molina, Marlyn Stephanny Narváez Ortega, y Jessica Viviana Sánchez Zúñiga, *Cerámica constructiva envolventes verticales en la ciudad de Cúcuta* (Bogotá: Ecoe Ediciones, 2023).
- ²³ Díaz-Umaña, "incidencia solar."
- ²⁴ Díaz-Umaña, "incidencia solar"; Díaz-Fuentes, "Análisis de la transferencia."
- ²⁵ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, "Promedio climatológico de Colombia 1981-2010" (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010).
- ²⁶ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, "Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura (m/s): Septiembre" (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2015).
- ²⁷ Gonzalo N. Capra, and María D. Crespo, "Análisis del Comportamiento de una Estructura Plegada con Sección Transversal en Forma de Z," *Mecánica Computacional* 35, no. 37 (2017): 2051-2062.
- ⁹ Francisco Javier Sanchis Sampedro, and Igor Fernández Plazaola, "La geometría en los edificios de la Ciutat de les Arts i Les Ciències de Valencia," *Revista de EGA*, no. 37 (2019): 168-181, <https://doi.org/10.4995/ega.2019.12681>; Federico Luis Del Blanco García, and Ismael García Ríos, "Fernando Higueras y Félix Candela en un retorno a la geometría de paraguas invertidos. Análisis y reconstitución gráfica del aeropuerto de Murcia, 1983," *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica* 23, no. 32 (2018): 232-243, <https://doi.org/10.4995/ega.2018.9813>; Mónica Martínez Martínez, and Ernesto Echeverría Valiente, "Las bóvedas cilíndricas y su evolución hasta las cáscaras cilíndricas largas de cubierta de Félix Candela. Análisis geométrico y mecánico," *EGA Expresión gráfica arquitectónica* 22, no. 30 (2017):160-169, <https://doi.org/10.4995/ega.2017.7846>; Jorge Luis García Valdecabres, "La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia" (PhD diss., Universitat Politècnica de València, 2010), <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/8381>.
- ¹⁰ Yannette Díaz-Umaña, Mawency Vergel Ortega, and Julio Alfredo Delgado Rojas, *Entre las torres de san José-aproximaciones al arte, arquitectura y geometría de la catedral* (Bogotá: Ecoe Ediciones Limitada, 2021), <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/859>.
- ¹¹ Yannette Díaz-Umaña, Mawency Vergel Ortega, and Julio Alfredo Delgado Rojas, *La gracia de la sencillez interpretaciones de la arquitectura sagrada a través de dos iglesias modernas en frontera* (Bogotá: Ecoe Ediciones, 2022), <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6515>.
- ¹² Yannette Díaz-Umaña, A. Colmenares-Urbe, and C. Díaz-Fuentes, "Estudio de incidencia solar sobre geometrías de superficies de cubierta de iglesias de San José de Cúcuta, Colombia" (Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, 2023).
- ¹³ C. Díaz-Fuentes, Yannette Díaz-Umaña, and A. Colmenares-Urbe, "Análisis de la transferencia de calor en superficies geométricas de cubiertas de iglesias de San José de Cúcuta" (Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, 2023).
- ¹⁴ Yannette Díaz-Umaña, R. E. Galvis Centurión, and C. Díaz-Fuentes, "Estrategia de transversalidad e integralidad en el proceso de enseñanza de la arquitectura ETIPEA" (Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander, 2021)
- ¹⁵ Mario Docci "Il disegno come strumento per l'analisi grafica dell'architettura" (Conference at Universitat Politècnica de València, 1995).
- ¹⁶ Díaz-Umaña, «incidencia solar.»
- ¹⁷ Díaz-Fuentes, "Análisis de la transferencia."
- ¹⁸ Díaz-Umaña, *Entre las torres*.
- ¹⁹ Díaz-Umaña, *Entre las torres*.
- ²⁰ Díaz-Umaña, *Entre las torres*.
- ²¹ José Luis Arias Gonzáles, Mitsuo Covinos Gallardo, *Diseño y metodología de la investigación* (Arequipa: Enfoques Consulting EIRL, 2021), 66-78.
- ²² Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, "Promedio climatológico de Colombia 1981-2010" (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010); Jorge Sánchez Molina, Marlyn Stephanny Narváez Ortega, and Jessica Viviana Sánchez Zúñiga, *Cerámica constructiva envolventes verticales en la ciudad de Cúcuta* (Bogotá: Ecoe Ediciones, 2023).
- ²³ Díaz-Umaña, «incidencia solar.»
- ²⁴ Díaz-Umaña, «incidencia solar»; Díaz-Fuentes, "Análisis de la transferencia."
- ²⁵ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, "Promedio climatológico de Colombia 1981-2010" (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010).
- ²⁶ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, "Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura (m/s): Septiembre" (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2015).
- ²⁷ Gonzalo N. Capra, and María D. Crespo, "Análisis del Comportamiento de una Estructura Plegada con Sección Transversal en Forma de Z," *Mecánica Computacional* 35, no. 37 (2017): 2051-2062.

²⁸ Eduardo Manuel González Cruz, "Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática," (Maracaibo: Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD) Universidad del Zulia, 2004).

²⁹ Díaz-Umaña, "la gracia de la sencillez," Díaz-Umaña, "incidencia solar."

²⁸ Eduardo Manuel González Cruz, "Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática," (Maracaibo: Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD) Universidad del Zulia, 2004).

²⁹ Díaz-Umaña, "la gracia de la sencillez"; Díaz-Umaña, "incidencia solar."

BIBLIOGRAPHY

- Alías, Herminia María, and Guillermo José Jacobo. "Eficiencia energética en viviendas sociales. Incidencia de la envolvente en el consumo eléctrico para mantener el bienestar higrotérmico en los espacios interiores." *Arquisur Revista*, no. 1 (2011): 76-89. <https://dx.doi.org/10.14409/ar.v1i1.925>.
- Aravena, Alejandro, and A. Aravena. "My architectural philosophy? Bring the community into the process." TEDGlobal 2014, October 2014 *TED Talks*. (2014). https://www.ted.com/talks/alejandro_aravena_my_architectural_philosophy_bring_the_community_into_the_process?utm_campaign=tedsread&utm_medium=referral&utm_source=tedcomshare.
- Arias Gonzáles, José Luí, and Mitsuo Covinos Gallardo "Diseño y metodología de la investigación." *Enfoques Consulting EIRL*, vol. 1, (2021): 66-78.
- Capra, Gonzalo N., and María D. Crespo. "Análisis del Comportamiento de una Estructura Plegada con Sección Transversal en Forma de Z." *Mecánica Computacional* 35, no. 37 (2017): 2051-2062.
- Del Blanco García, Federico Luis, and Ismael García Ríos. "Fernando Higueras y Félix Candela en un retorno a la geometría de paraguas invertidos. Análisis y reconstitución gráfica del aeropuerto de Murcia, 1983." *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica* 23, no. 32 (2018): 232-243, <https://doi.org/10.4995/ega.2018.9813>.
- Díaz Umaña, Yannette, Mawency Vergel Ortega, and Julio Alfredo Delgado Rojas. *La gracia de la sencillez interpretaciones de la arquitectura sagrada a través de dos iglesias modernas en frontera*. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2022. <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6515>.
- Díaz-Fuentes, C., Yannette Díaz-Umaña, and A. Colmenares-Urbe. "Análisis de la transferencia de calor en superficies geométricas de cubiertas de iglesias de San José de Cúcuta." Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, 2023.
- Díaz-Umaña, Yannette, A. Colmenares-Urbe, and C. Díaz-Fuentes. "Estudio de incidencia solar sobre geometrías de superficies de cubierta de iglesias de San José de Cúcuta, Colombia." Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, 2023.
- Díaz-Umaña, Yannette, Mawency Vergel Ortega, and Julio Alfredo Delgado Rojas. *Entre las torres de san José-aproximaciones al arte, arquitectura y geometría de la catedral*. Bogotá: Ecoe Ediciones Limitada, 2021. <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/859>.
- Díaz-Umaña, Yannette, R.E. Galvis Centurión, and C. Díaz-Fuentes. "Estrategia de transversalidad e integralidad en el proceso de enseñanza de la arquitectura ETIPEA." Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander, 2021.
- Docci, Mario. "Il disegno come strumento per l'analisi grafica dell'architettura." Conference at Universitat Politècnica de València, 1995.
- Fernández Martínez, Cecilia. "Rol del profesional de la construcción en el diseño energético sustentable de edificios." *Energía* 4, no. 47 (2012): 1-8.
- Fernández, Amalita, Beatriz Silvia Garzón, and David Elsinger. "Incidencia de las estrategias pasivas de diseño arquitectónico en la etiqueta de eficiencia energética en Argentina." *Revista hábitat sustentable* 10, no. 1, (2020):56-67.
- González Cruz, Eduardo Manuel. "Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática." Maracaibo: Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD) Universidad del Zulia, 2004.
- González Matías, Marcos, and Juan Raymundo Mayorga Cervantes. *Morfología geométrica de envolvente arquitectónica como elemento de control térmico*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. "Promedio climatológico de Colombia 1981-2010." Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. "Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura (m/s): Septiembre." Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2015.
- John Martin Evans, and Silvia Schiller. "Rol de la Envolvente en la Edificación Sustentable." *Revista de la Construcción* 4, no. 1 (2005): 5-12.
- Jorge Luís García Valldecabres. "La métrica y las trazas en la iglesia de San Juan del Hospital de Valencia." PhD diss., Universitat Politècnica de València, 2010, <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/8381>.
- Lerma-Bonilla, Lides Leonardo, María Fernanda Serrano-Guzmán, and Diego Darío Pérez-Ruíz. "Importancia de la planeación en la gestión de vivienda social: caso Buenaventura (Colombia)." *Revista Lasallista de Investigación* 17, no. 2 (2020): 236-255, <https://doi.org/10.22507/rli.v17n2a17>.
- Mónica Martínez Martínez, and Ernesto Echeverría Valiente. "Las bóvedas cilíndricas y su evolución hasta las cáscaras cilíndricas largas de cubierta de Félix Candela. Análisis geométrico y mecánico." *EGA Expresión gráfica arquitectónica* 22, no. 30 (2017):160-169, <https://doi.org/10.4995/ega.2017.7846>
- Sánchez Molina, Jorge, Marlyn Stephanny Narváez Ortega, and Jessica Viviana Sánchez Zúñiga. *Cerámica constructiva envolventes verticales en la ciudad de Cúcuta*. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2023.
- Sanchis Sampedro, Francisco Javier, and Igor Fernández Plazaola. "La geometría en los edificios de la Ciutat de les Arts i Les Ciències de Valencia." *Revista de EGA*, no. 37 (2019): 168-181. <https://doi.org/10.4995/ega.2019.12681>.

Images source

1-10. Images and tables by the authors, 2021.