COMPARACIÓN DE LA TEMPERATURA RADIANTE MEDIDA Y CALCULADA POR SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Leonel Fernando Ardila (1) , Daniel Arrubla (2), Laura Sofía Rojas (3) Ronald Chavarria (4), Lucas Muñetón (5), Luis Fernando García (6), Esperanza Caro (7), Jose Daniel Muñoz (8);

(1) Físico, estudiante M.Sc. en Física, lfardilap@unal.edu.co
(2) M.Sc. en Arquitectura, daarrublao@unal.edu.co,
(3) Estudiante de Arquitectura, lsrojasv@unal.edu.co,
(4) Estudiante de Arquitectura, rschavarriag@unal.edu.co,
(5) Estudiante de Arquitectura, lrmunetonm@unal.edu.co,
(6) Ing. Mecánico, Tropical Building Physics SAS,, lfgarciag@unal.edu.co
(7) Ph.D. Prof. de Arquitectura, ecaror@unal.edu.co,
(8) Ph.D, Profesor de Física, jdmunozc@unal.edu.co ,

Escuela de Arquitectura y Urbanismo (2,3,4,5) y Departamento de Física (1,8), Universidad Nacional de Colombia, Cra 45 #26-85, Bogotá D.C., Colombia , (57) 3194425520.

RESUMEN

La temperatura radiante es una de las variables que más influyen para establecer confort dentro de un espacio arquitectónico, y lo ideal es poder predecirla desde la etapa de diseño. Para ello se utilizan diversas herramientas computacionales, pero no siempre se pueden validar las predicciones contra los valores medidos en la edificación. Este trabajo simula un entorno arquitectónico utilizando las herramientas LadyBugTools y compara las predicciones de la temperatura radiante con las medidas en la construcción, utilizando una de las aulas del Observatorio Astronómico Nacional en el Campus de Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. Como resultados preliminares se han identificado algunos elementos mínimos que permiten predecir correctamente la temperatura dentro de un espacio, así como los mecanismos físicos que reproducen la temperatura radiante en ciertas zonas dentro del entorno simulado. La investigación no sólo busca identificar los elementos más importantes a tener en cuenta para predecir la temperatura correctamente, sino brindar guías y procedimientos para proyectar la edificación utilizando herramientas al alcance de los diseñadores que los acerquen a los conceptos de los fenómenos térmicos en Arquitectura.

Palabras clave: Temperatura radiante, Confort térmico, simulación computacional, arquitetura bioclimática.

ABSTRACT

Radiant temperature is one of the most relevant variables to determine comfort inside architectural space, and the optimal procedure would be to be able to predict it from the design stage. Many computational tools are usually employed for that purpose, but their predictions are not always compared with in situ measurements of the building. This work creates a computational model of an architectural space by using the LadyBugTools package, and compares its predictions with the radiant temperature measured inside the real space (namely one of the classrooms of the National Astronomical Observatory in the Campus of the National University of Colombia, Bogota). As preliminary results, some minimal elements have been identified allowing correct predictions, as well as the physical mechanisms that fit the radiant temperature in certain areas within the simulated environment. This research not only seeks to identify the most important elements to take into account for a correct prediction, but also to provide guides and procedures to project the building using the tools available for designers that bring them closer to the thermal phenomena concepts in architecture.

Keywords: radiant temperature, thermal comfort, computational simulation, bioclimatic architecture.

1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda del confort interior, la bioclimática brinda al diseño arquitectónico estrategias de adaptación al clima energéticamente eficientes a través de métodos pasivos que combinan las propiedades físicas de los materiales (FERNÁNDEZ 2012), las características del entorno (JONES HUDSON, 1998), los mecanismos de transferencia de calor (CARLSON, 1988) y las variables climáticas (GALLO, 1994). Estos elementos permiten establecer criterios de diseño que usan los principios físicos de la termodinámica, la dinámica de fluidos y la astronomía para producir arquitecturas bioclimáticas confortables (PENDER, LEMIEUX 2020).

Una de las medidas más relevantes para establecer si hay confort térmico en un espacio arquitectónico es la temperatura radiante, que estima la cantidad de radiación (infrarroja y visible) que una esfera puede recibir en un punto de dicho espacio. Cada superficie (pared, piso o techo) emite radiación infrarroja con una potencia que crece con su temperatura, y las superficies transparentes como las ventanas dejan pasar luz visible que, directa o reflejada, impacta también sobre la esfera. A estas se suman la radiación generada por cuerpos calientes como chimeneas, hornillas, computadores o personas, y la luz visible de fuentes de luz artificial. Toda esta radiación calienta la esfera, hasta llegar a una temperatura en la cual la potencia infrarroja que emite es igual a la potencia total que recibe. Esa es la temperatura radiante. Esta cantidad se mide con un globo negro, que representa aproximadamente la cabeza humana, dentro del cual se coloca una termocupla. La temperatura radiante evidencia si el cuerpo encuentra una sensación térmica dentro del rango de confort sin necesidad de esforzarse para calentarse o enfriarse. La temperatura radiante es, por lo tanto, una de las medidas más importantes para establecer si hay confort térmico.

El estudio de esta y otras variables térmicas se suele hacer de manera computacional, pues las condiciones de frontera complejas, los parámetros ambientales cambiantes y las leyes no lineales de la dinámica de fluidos hacen imposible una solución analítica. Las herramientas de software que simulan estos procesos se han comenzado a usar de manera regular en Colombia. Para la revisión de diseños se utilizan referentes internacionales como ASHRAE 62.1[1] , ASHRAE 90.1[2] y ASHRAE 55[3] (OLESEN 2004) y el USGBC[4], que son una aproximación diferente a la de este estudio. Sin embargo, los resultados obtenidos raramente son validados en Colombia, comparando las predicciones con las mediciones obtenidas en el entorno simulado una vez construido. El problema radica en que los resultados dependen fuertemente de qué elementos se modelan, de los parámetros elegidos para describir los materiales empleados y las variables ambientales del entorno, y, aunque algunos se pueden obtener de tablas, nada garantiza que correspondan a los del entorno local.

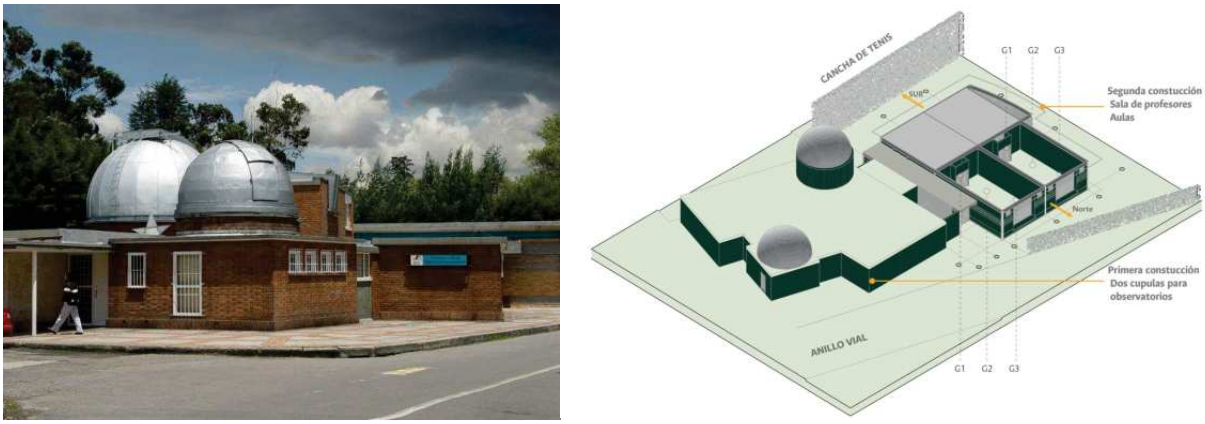


Fig 1. Edificio 413 - Observatorio Astronómico Nacional (izq). Distribución del edificio 413 (der).

[1] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Standard 62.2-2019, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings.
[2] ASHRAE Standard 90.1-2019 -- Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.
[3] ASHRAE Standard 55 - 2020 -- Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy
[4] U.S. Green Building Council (USGBC)

2. OBJETIVO

Validar con mediciones en sitio las predicciones de temperatura radiante de la herramienta computacional **LadybugTools (**SADEGHIPOUR, PARK, SMITH, GILL, 2013**)** e identificar los procedimientos y parámetros para obtener pronósticos correctos, usando como entorno de estudio el auditorio del Observatorio Astronómico Nacional (Ed.413) ubicado en el campus de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

3. MÉTODO

El objeto de estudio es el Observatorio Astronómico Nacional - OAN - (**Fig 1**), que se encuentra en un clima templado - frío a 2650 m de altura y 4°25’56’’ de latitud norte. El edificio se puede comprender a partir de dos volúmenes: el primero, una construcción de 1952 con dos cúpulas para la observación astronómica, y el segundo, una edificación del año 2002 que incluye la sala de profesores, los baños y dos aulas. Este segundo volumen es una construcción con estructura metálica, muros en mampostería y cubierta de placa de concreto sobre una lámina colaborante (steel deck) que cuenta además con manto asfáltico en la parte exterior. El antepecho es en hormigón, los pisos, en baldosa o madera laminada y los vidrios tienen montantes en aluminio.

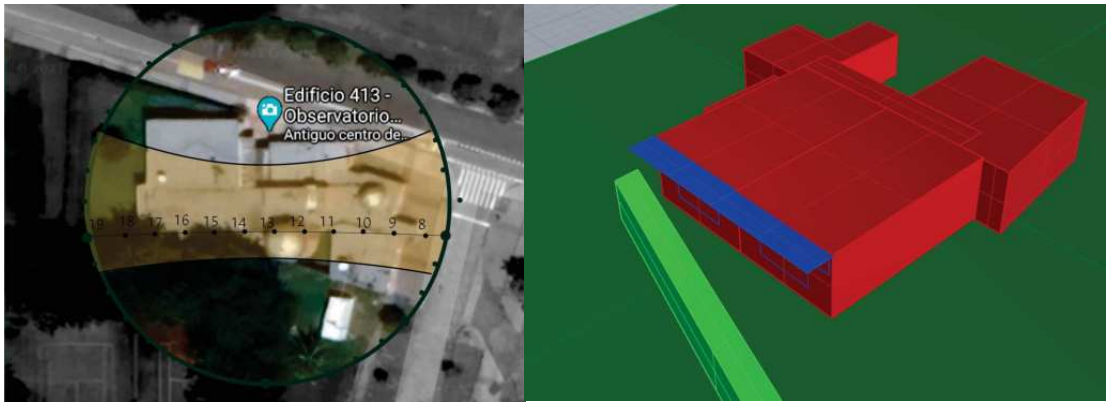


Fig 2. Orientación astronómica (izq). Modelo computacional del bloque nuevo (der), que incluye también el pasto (verde oscuro) el voladizo sobre las ventanas (azul) y el seto frente a ellas (verde claro).

El estudio se centra en el aula 116, uno de los dos salones con dimensiones de 5.85m x 9.50 m ubicado en el costado noroccidental del edificio. Los recintos en sí están orientados hacia los puntos cardinales, con los muros hacia el oriente y occidente, y no reciben incidencia directa del Sol. Las únicas ventanas se orientan hacia el norte - lugar en que el Sol en Bogotá tiene menos impacto - y cuentan con rejillas cuadradas de ventilación hacia el exterior (**Fig.2,** izquierda). Estos son los espacios que tienen mayor afluencia de personas en el edificio, pues son usados para clases y conferencias, y - cuando el aforo es grande - se unen al retraer un biombo de madera que los divide para crear un auditorio (**Fig.3**). Los usuarios describen este lugar como un aula donde hace bastante calor en las horas de la tarde, lo que afecta el desarrollo de las clases, por lo que los encargados han optado por usar unidades de aire acondicionado portátiles.



Fig 3. Interior del aula 116 del auditorio del Observatorio Astronómico Nacional (fotografía tomada por los autores).

Las mediciones se realizaron a lo largo del 24 de febrero de 2020. La temperatura radiante se midió con una estación de confort interna TESTO 400 en los sitios de ocupación más utilizados: el punto G1, justo al frente de la entrada del aulas; el punto G2, frente al centro del biombo, y el punto G3 justo frente a la ventana (**Fig 4**), todas a una altura de 1.5m. Las temperaturas de las superficies internas y externas se midieron con un termómetro digital infrarrojo con forma de pistola térmica OAKTON INFRAPRO, usando para las paredes la misma altura de 1.5m. Los datos de irradiancia global se tomaron de una estación meteorológica cercana ubicada en el Centro de Alto Rendimiento (a 2.19 km). La irradiancia difusa (que no es reportada por esta estación) se estimó calculando la razón entre las irradiancias total y difusa reportadas por la estación del Aeropuerto El Dorado (a 9,64 km) para cada hora de ese día y aplicando esas mismas razones a los datos de la estación cercana. Además, se tomaron medidas, fotografías y videos que sirvieron para precisar el modelo arquitectónico.

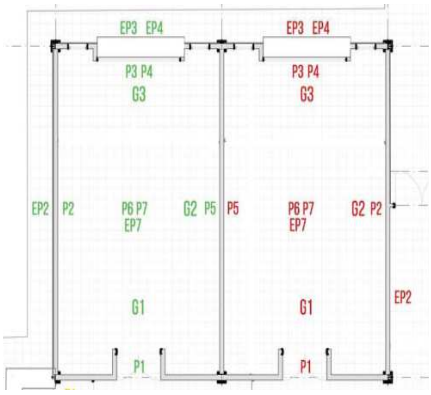


Fig. 4 Puntos de medición G1, G2 Y G3
P: Puntos de medición de temperatura en superficie con pistola térmica
EP: Puntos de medición de temperatura en superficie exterior con pistola térmica

El modelo arquitectónico detallado del Observatorio se construyó con el software **Archicad**, y con base en él se armó con **Rhinoceros** un modelo simplificado que se descompone en superficies: paredes, ventanas, rejillas, puertas, techo, voladizos, grama, seto, etc. (**Fig.2,** derecha). Luego, con el software **HoneyBee** se establecen las propiedades físicas de los materiales de cada superficie, tomadas de tablas (BREGMAN, 2011). Las superficies, los materiales y sus propiedades se enlazan en el entorno de programación gráfico **Grasshopper** para formar el modelo de simulación. En el entorno gráfico también se incluyen los datos ambientales de la estación meteorológica, la orientación astronómica y la descripción de los puntos espaciales e intervalos de tiempo para los cuales se calcularán las temperaturas, que se obtienen usando el software **EnergyPlus** como motor de simulación. Paralelamente, se desarrolló un programa en **Python** que calcula la temperatura radiante a partir de las temperaturas medidas de las superficies internas del salón y de la radiación visible que impacta en el globo a través de la ventana, usando para ello las leyes físicas que gobiernan la radiación: la ley de Stefan-Boltzmann, para las emisiones en infrarrojo de las paredes internas, y la radiación solar difusa, la reflectancia de las superficies externas y la transmitancia del vidrio, para la luz visible. Los factores de forma, que establecen qué porción de la radiación emitida por cada superficie llega al globo de medida, se calculan con métodos de integración por Monte Carlo. Finalmente, las temperaturas predichas por **LadybugTools (LB)** y las calculadas con el programa en **Python (MC)** se compararon contra las mediciones de temperatura obtenidas en campo. En especial, se estudió el efecto de quitar o añadir diversos elementos del modelo arquitectónico y de su entorno. El proceso permitió establecer parámetros y procedimientos de simulación que logran hacer concordar la temperatura simulada con la temperatura medida, ajustados a la realidad colombiana.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Las **Fig. 5 y 6** comparan las medidas experimentales de la temperatura interna del techo y la temperatura radiante en los puntos de medición G2 y G3 del aula 116, con los resultados de las simulaciones realizadas con **LadyBugsTools** (que llamamos **LB** por **LadyBugs**) y con nuestro programa en **Python** que calcula los factores de forma por Monte Carlo (que llamamos **MC** por **Monte Carlo**).

La **Fig. 5** presenta los datos de temperatura radiante para el punto G2 (**izquierda**) y de temperatura interna del techo (**derecha**) obtenidos a lo largo del día, junto con la irradiancia total utilizada para los cálculos, tomada de la estación del Centro de Alto Rendimiento (C.A. rend), a 2.19 km del sitio de medición (**inserto inferior, izquierda**). Los resultados para el punto G2 evidencian que la temperaturas radiante lejos de la ventana se pueden calcular muy bien a partir de la radiación infrarroja de las paredes, techo y piso del recinto solamente, sin necesidad de modelar la ventana, y en esto coinciden tanto el software **LadyBugTools (LB)** como con nuestro programa en **Python (MC**). Lo mismo sucede con la temperatura interior del techo, que no se ve afectada por la luz visible que entra por la ventana. Sin embargo, esta sí se afecta grandemente por el grosor de la placa de concreto del techo, pues un valor de 10cm, usual en este tipo de construcciones, reproduce adecuadamente las medidas experimentales, mientras que una placa con grosor de 20cm (con mayor capacidad calorífica) habría ayudado a estabilizar las temperaturas, reduciendo de 12ºC a 3ºC la diferencia entre la máxima y mínima.

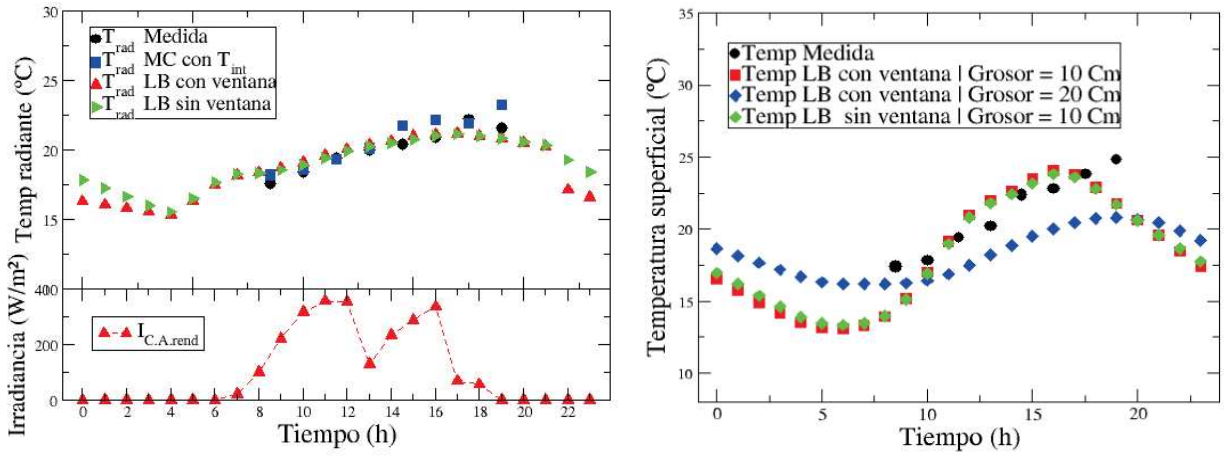


Fig 5. Temperatura radiante en el punto G2, frente al biombo (izq) y temperatura interior del techo (der). Las mediciones (círculos negros) fueron tomadas con globo, para G2, y con pistola térmica, para el techo. Las simulaciones fueron realizadas con LadyBugTools (LB) y con el programa en Python que calcula los factores de forma por Monte Carlo (MC) El inserto inferior izquierdo muestra la irradiancia solar global utilizada para los cálculos.

La **Fig. 6 izquierda** muestra la temperatura radiante medida en el punto G3, ubicado justo frente a la ventana, junto con la calculada por nuestro programa en **Python**. Observamos que para este punto de medida la sola radiación infrarroja emitida por las paredes, techo y piso no es suficiente, sino que es necesario incluir la radiación visible que entra por la ventana. Esta se calculó como la radiación solar total reflejada por el pasto del exterior que atraviesa el vidrio e incide sobre el globo. Vemos que se obtienen mejores resultados usando los datos de irradiancia del Centro de Alto Rendimiento (C.A. rend), a 2.19km del sitio de medición, que al usar los de la estación Carrera 7a (7ma), a 2.7km. La diferencia nos muestra la importancia de tener datos de irradiación solar en el sitio. Por su parte, la **Fig. 6 derecha** muestra las temperaturas calculadas con **LadyBugTools** al ir agregando elementos del entorno, como la ventana, el pasto exterior, el voladizo externo que da sombra al pasto y el seto que se interpone frente a ella. Vemos nuevamente que la ventana influye mucho en los resultados, y que el voladizo y el seto actúan reduciendo la temperatura, como se esperaba. Llama la atención que al incluir el pasto (con una reflectancia del 25%) arroja los mismos resultados que no incluirlo, como si **LadyBugTools** incluyese un valor similar por defecto para la reflectancia del entorno.

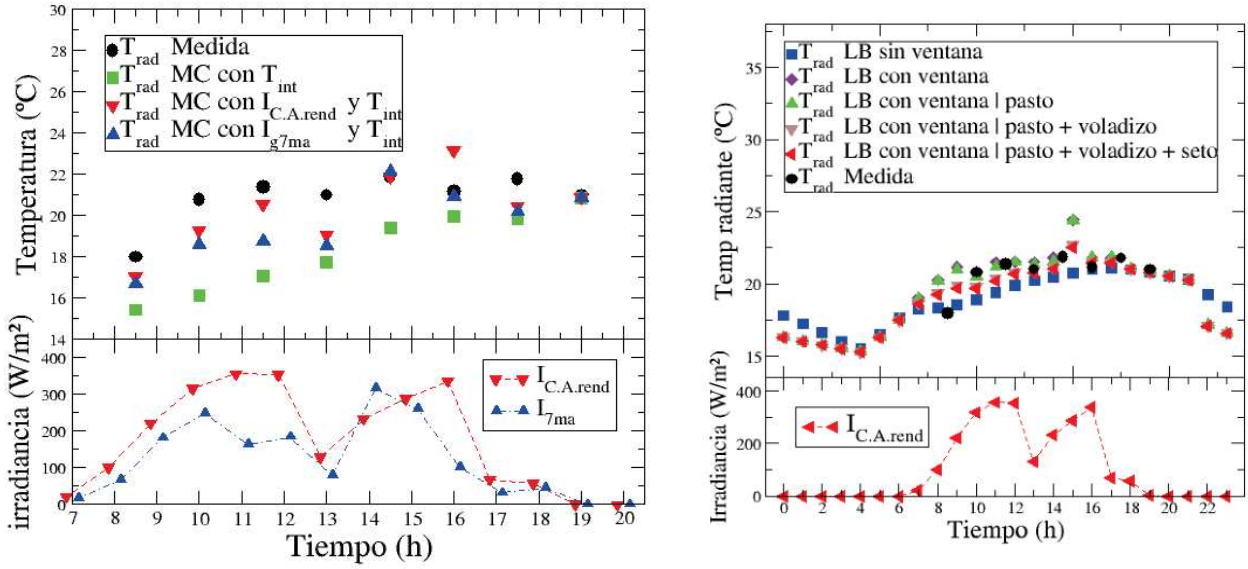


Fig 6. Temperatura radiante en el punto G3. Simulaciones Monte Carlo con la información de la irradiancia de estaciones meteorológicas distintas (izq). Resultados de LadyBugTools incorporando elementos en el entorno (der). Los insertos inferiores muestran la irradiancia solar global utilizada para los cálculos, tomadas de las estaciones metereológicas del Centro de Alto Rendimiento (C.A. rend) y Carrera Séptima (7ma).

5. CONSIDERACIONES FINALES O ETAPAS FUTURAS

El análisis del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional permitió identificar procedimientos y parámetros para predecir correctamente las condiciones térmicas desde la simulación. Estos incluyen: contar con datos confiables de irradiancia solar para el sitio (total y difusa), modificar los valores por defecto de ocupación y de iluminación artificial, y realizar una modelación correcta de los materiales y los espesores (en especial de las ventanas y del techo, que es la superficie dominante a la latitud de Colombia). En etapas futuras de la investigación se busca ampliar estos procedimientos estudiando el efecto de incluir la ocupación de personas y analizando otros lugares del campus con elementos arquitectónicos diferentes. Con esto en mente, el siguiente objeto de estudio es el Edificio de Enfermería de la misma universidad, diseñado por el arquitecto y profesor Leonardo Álvarez Yepes, cuya obra ganó la bienal de arquitectura de Colombia en el año 2016. Se analizarán dos oficinas del último nivel que son recintos cerrados con grandes superficies de vidrio protegidas de la radiación solar directa por quiebrasoles, que cuentan con lucernarios en el techo y que enfrentan fuertes corrientes de aire en su exterior. Nuestro interés es identificar cómo modelar correctamente los nuevos elementos y entender cómo en estas oficinas de un solo espacio se producen varias condiciones térmicas, tal como reportan sus usuarios. De esta manera esperamos contribuir a la comprensión y al manejo adecuado de las herramientas computacionales para el cálculo de confort térmico en Colombia.



Fig 7. Nuevo edificio para la facultad de enfermería (Fotografía tomada por los autores).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SADEGHIPOUR, Mostapha R. PARK, Michelle. SMITH, Adrian. GILL, Gordon. **Ladybug. A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design,** 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, France, 2013.

OLGYAY, Víctor; FRONTADO, Josefina. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**, Publishing house Gustavo Gili, Barcelona, 1998.

GALLO, Cettina. **Bioclimatic architecture. Renewable Energy**; World renewable energy congress; United Kingdom, vol. 5.,1994.

GONZALO, Guillermo Enrique; NOTA, Viviana N. **Manual de arquitetura Bioclimática.** Nobuko. Argentina. 2004.

JONES, David; HUDSON, Jennifer. **Architecture and the environment: bioclimatic building design.** London: Laurence King, 1998.

PENDER, Robyn; LEMIEUX, Daniel J. **The Road Not Taken: Building Physics, and Returning to First Principles in Sustainable Design.** Atmosphere, 2020.

OLESEN, Bjarne W.; BRAGER, Gail S. **A better way to predict comfort: The new ASHRAE standard 55.**, ASHRAE Journal,, EEUU, 2004.

CARLSON, Steven W. **Modeling of heat transfer in buildings using comprehensive room transfer functions**. Universidad Wisconsin-Madison, Tesis Doctoral, EEUU, 1988.

FERNANDEZ, John. **Material architecture: emergent materials and issues for innovative and responsible buildings**. Architectural press, EEUU, 2012.

BERGMAN, Theodore, INCROPERA Frank, DEWITT David, LAVINE AdrienneA. ***Fundamentals of heat and mass transfer*.** John Wiley & Sons, EEUU, 2011.