

PALABRAS CLAVE

Confort térmico,
Aulas ventiladas
naturalmente,
Estrategias bioclimáticas

KEYWORDS

Thermal comfort,
Naturally ventilated
classrooms,
Bioclimatic strategies

RECIBIDO

30 DE ABRIL 2021

ACEPTADO

10 DE JUNIO DE 2022



EL CONTENIDO DE ESTE ARTÍCULO
ESTÁ BAJO LICENCIA DE ACCESO
ABIERTO CC BY-NC-ND 2.5 AR

RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA DEFINIR LA SITUACIÓN DE CONFORT TÉRMICO EN AULAS ESCOLARES EN CLIMA CÁLIDO

DESIGN STRATEGIES TO DEFINE THERMAL COMFORT IN CLASSROOMS IN A WARM CLIMATE

> **OLGA LUCÍA MONTOYA FLÓREZ¹ Y GUSTAVO ALBERTO SAN JUAN²**

¹ Universidad de San Buenaventura Cali
Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño
Grupo de Investigación Arquitectura, Urbanismo y Estética
Colombia

² Universidad Nacional de la Plata
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido
Argentina

> **CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO (NORMAS APA):**

Montoya Flórez, O. L. y San Juan, G. A. (mayo-octubre 2022). Recomendaciones de diseño para definir la situación de confort térmico en aulas escolares en clima cálido. [Archivo PDF]. *AREA*, 28(2), pp. 1-20. Recuperado de https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2802/2802_montoya-florez_san-juan.pdf

RESUMEN

El presente trabajo expone una serie de recomendaciones de diseño en cuanto al confort térmico para aulas escolares localizadas en la ciudad de Cali, Colombia, ubicada en el trópico. Se expone el aporte conceptual de diversos autores; la aplicación de una metodología analítico-empírica, a partir de la aplicación de la técnica de Auditoría Ambiental de Percepción del Usuario (AAPU) para el análisis de la situación real y la verificación del desempeño térmico de las estrategias de diseño a partir de herramientas de simulación en estado transitorio. Entre los principales resultados resalta la baja correspondencia entre los modelos de confort térmico (analítico y adaptativo) y la situación medida, la expresada por los estudiantes, la relevada mediante equipamiento de precisión y la simulada.

ABSTRACT

This work presents some recommendations for the design of thermally comfortable school classrooms in the tropics. These recommendations are validated from a specific study developed in schools in Cali, Colombia. The conceptual contribution of various authors is exposed; the application of an analytical-empirical methodology, the User Perception Environmental Audit-AAPU technique (from Spanish Auditoria Ambiental de Percepción del Usuario) was applied for the analysis of real situation. For the verification of thermal performance was used tools in transitory state. The main results are low correspondence between the standardized thermal comfort models and the situation measured, that expressed by the students and that simulated. In addition to the final reflection on the need to incorporate bioclimatic strategies from the beginning of the design process, to provide the best building conditions.

> ACERCA DE LA AUTORA Y EL AUTOR

OLGA LUCÍA MONTROYA FLÓREZ. Doctora en Arquitectura y Urbanismo en el área de Hábitat, Energía y Ambiente por la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Magíster en Gestión Ambiental del Desarrollo Urbano-GADU por la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Arquitecta por la Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño de la Universidad de San Buenaventura Cali, Colombia. Docente a nivel de cursos de pregrado y posgrado en temas asociados con Arquitectura y Clima. Líder en proyectos de investigación y publicaciones en temas como calidad de vida, habitabilidad y confort.

✉ <olmontoy@usbcali.edu.co>

GUSTAVO ALBERTO SAN JUAN. Doctor en Ciencias. Magíster en Ambiente y Patología Ambiental por la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) y por la Universidad de Siena, Italia. Arquitecto por la UNLP. Profesor Titular, Facultad de Arquitectura y Urbanismo en la UNLP. Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Director del Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC, CONICET-UNLP, <https://iipac.unlp.edu.ar/>) y del Laboratorio de Modelos y Diseño Ambiental (LAMbDA). Su línea de trabajo se centra en la interacción, Hábitat-Energía-Ambiente, en la escala edilicia y urbana, habiendo realizado numerosas publicaciones, en los campos: diseño bioclimático y sostenible, eficiencia energética, mitigación del Cambio Climático, habitabilidad, confort, energías renovables, arquitectura escolar y tecnología para la producción social del hábitat. Ha desarrollado una amplia actividad profesional enlazando cuatro campos: docencia, investigación, extensión universitaria y práctica profesional.

✉ <gustavosanjuan@iipac.laplata-conicet.gov.ar>

RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA DEFINIR LA SITUACIÓN DE CONFORT TÉRMICO EN AULAS ESCOLARES EN CLIMA CÁLIDO. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN APLICADA EN ESTUDIOS DE CASO EN CALI, COLOMBIA

Introducción

La calidad de la arquitectura escolar, especialmente la del aula, es un tema de especial interés, dado el impacto social que tienen estos espacios en el proceso de formación de una sociedad y en la salud de los propios usuarios. La importancia radica en su significación funcional, su área construida, los requerimientos ambientales, en el potencial de diseño que tiene dicho espacio en su condición de repetición dentro de una infraestructura educativa y, especialmente, para que la relación enseñanza-aprendizaje se realice en condiciones óptimas.

Este espacio, destinado por excelencia a la educación ha pasado con el correr de los años, de constituirse en lugares improvisados, muchas veces sin las condiciones de salubridad adecuadas, a ser parte esencial de los edificios educativos. En los diseños contemporáneos, los espacios de enseñanza-aprendizaje se amplían a otros sectores como circulaciones, salones de usos múltiples o comedores, ámbitos de intercambio según el plan formativo del establecimiento, incorporando flexibilidad espacial y funcional.

La mirada sobre la calidad ambiental ha sufrido también una importante transformación, desde las primeras, centradas en las condiciones de salubridad y hacinamiento, hasta los últimos abordajes en cobertura educativa, confort y eficiencia en los recursos implicados en la actividad tales como el agua, la energía, los humanos y los didácticos; llegando a situaciones más actuales alrededor de la salud en espacios educativos ventilados naturalmente.

En el marco del diseño pasivo, bioclimático y sustentable, es que se sitúa en la actualidad –sobre todo habiendo atravesado una pandemia– la aplicación de criterios para lograr espacios para la enseñanza que no enfermen.

La propuesta –producto de una investigación realizada en el marco del doctorado de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata en el año 2020– consiste en aplicar un diseño integral, basado en el confort higrotérmico, lumínico y acústico a partir de la estabilización de los parámetros ambientales y los factores de confort del usuario (Serra, 1999), en función de la

experiencia adquirida en numerosos estudios, y en la normativa nacional e internacional en la materia (Yannas, 1994).

Problema

La relevancia del tema de la comodidad o el confort en el edificio escolar, radica en que la educación, además de ser un derecho humano básico y habilitante para ejercer el resto de los derechos, es condición esencial para el bienestar humano de los hombres y mujeres, así como para el desarrollo integral y sostenible de los pueblos (Bruni Celli, Aguirre Ledezma, Murillo Torrecilla, Díaz Díaz, Fernández Ludeña y Barrios Yaselli, 2008). Como sostiene Francisco Ramírez Potes (2009), el edificio escolar por su función social, ha tenido un efecto catalizador en el desarrollo de la arquitectura y ha permitido transmitir no solo los fundamentos pedagógicos que lo soportan, sino también, el espíritu de la época.

Particularmente, el aula es uno de los espacios con mayor relevancia pedagógica –en su sentido amplio–, donde los niños y jóvenes pasan la mayor parte de su día, aspecto que cobra aún mayor importancia si además se tiene en cuenta que ese espacio representa la posibilidad de estar seguros y, posiblemente, en lugares de calidad superior a la de sus propios hogares.

Durante la reciente pandemia, los espacios educativos han desempeñado un papel vital en la salud y la sostenibilidad de las comunidades urbanas de todo el mundo, lo que hace pensar en la definición y aplicación de medidas que si bien no son nuevas y recuerdan modelos tipológicos como el *open air school* (Wu y Ng, 2003) –para conectar al alumno con el exterior, promover el contacto con el sol directo y evitar enfermedades–, deben adecuarse a los estándares de la contemporaneidad en situaciones de crisis (UNESCO, 2021).

En general las aulas de los colegios en el trópico presentan deficientes condiciones de confort higrotérmico, visual y auditivo. En cuanto al higrotérmico, se registra: 1) temperatura ambiente fuera del rango de confort en gran parte de la jornada escolar; 2) fachadas totalmente permeables sin posibilidad de adaptar la condición ambiental interior; 3) materiales de la envolvente edilicia con alta transmitancia térmica; 4) bajos niveles de ventilación interior.

En el visual: 1) deficiencia en el ambiente lumínico, bien sea por exceso de iluminancia en algunas zonas del salón –especialmente en las cercanas a las ventanas–, o por

insuficiencia; 2) altos contrastes, por falta de uniformidad; 3) deslumbramiento excesivo; 4) materiales superficiales que poco aportan en la calidad visual; 5) necesidad de iluminación artificial en gran parte de la jornada escolar. Y en el auditivo: 1) niveles de ruido excesivos; 2) presencia de ecos por reverberación y como consecuencia; 3) insuficiencia en la inteligibilidad de la palabra, con consecuencias en el proceso de aprendizaje y en la salud de los docentes (San Juan, Hoses y Martini, 2014; Montoya Flórez, 2020).

En cada uno de los temas del confort, la configuración arquitectónica tiene un papel relevante, dado que la selección de las estrategias, los componentes y los materiales adecuados puede contribuir o, por el contrario, acentuar o generar problemas derivados de un bajo confort. Los criterios de diseño que empobrecen las condiciones de confort, reflejan baja exploración bioclimática en el proceso de diseño tradicional, implicando consecuencias tales como, aumento innecesario del consumo de energía para proveer condiciones de climatización e iluminación adecuada y problemas en la salud de estudiantes y docentes al estar expuestos a largas jornadas de trabajo en ambientes inadecuados (Zapata Rueda et al., 2018).

Entre los orígenes de este problema se resalta la débil implicancia de los temas técnicos del confort en el proceso de diseño, debido a: 1) la falta de integración multidisciplinaria, entre campos de la Ingeniería y la Arquitectura para la resolución de problemas conjuntos; 2) la falta de abordajes de diseño, hacia la resolución pasiva de las condiciones de confort en climas tropicales, y 3) al limitado soporte técnico en los procesos de diseño tradicionales.

Es por ello que la investigación aborda la cuestión del confort integral en búsqueda de producir herramientas para el diseño de este tipo de espacios; en el presente trabajo, específicamente, se exponen aquellas conclusiones vinculadas a las recomendaciones en cuanto al confort térmico en aulas escolares.

Estado de la cuestión

La Arquitectura bioclimática, verde o sostenible, corresponde a diferentes formas de expresar el hecho de proyectar con la naturaleza de un modo consciente (Yeang, 2000). Autores como Gabriel Gómez-Azpeitia, Gonzalo Bojorquéz Morales y Raúl Pável Ruíz Torres (2013), o Richard de Dear y Gael Schiller Brager (1998), enfocan su

reflexión en el diseño arquitectónico y cómo la toma de decisiones en el proceso proyectual puede mejorar las condiciones de confort y promover ahorros energéticos en las diferentes fases del diseño.

Decisiones proyectuales como, la adecuada orientación, el correcto diseño de las aberturas para optimizar la ventilación e iluminación natural, la selección de los materiales de construcción de acuerdo a la región y al clima, o aquellas sobre la envolvente edilicia, son estrategias que contribuyen a alcanzar el confort y a racionalizar el uso de luminarias y elementos de climatización mecánica, con el consecuente ahorro energético, promoviendo además, el uso adecuado de los recursos naturales (Krüger y Zannin, 2004).

El diseño pasivo frente al diseño tradicional

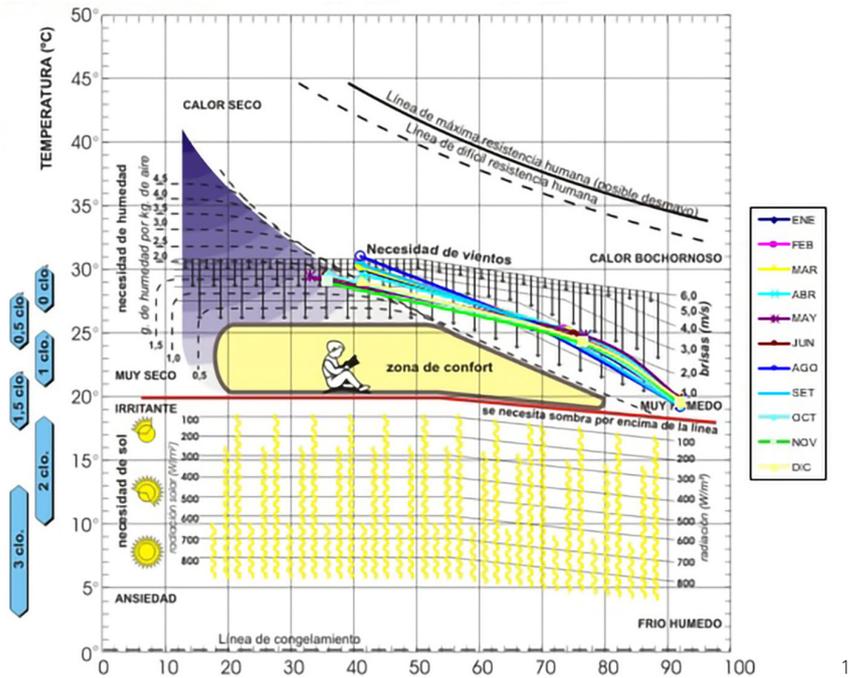
El proyecto arquitectónico es la síntesis de diversos aspectos: estético, sociotécnico, socioeconómico, climático, energético, sociocultural, ambiental. En este breve y complejo marco, el proceso de diseño ha sido tradicionalmente de una sola vía. Un primer momento en donde el arquitecto toma las decisiones fundamentales del proyecto a partir de su conocimiento, tendencia arquitectónica, sitio de implantación y preferencias del cliente, para luego pasar a un proceso de complementación desde la ingeniería civil, hidro-sanitaria, eléctrica y mecánica, o sea, una reflexión y producción cultural, interdisciplinaria (Trebilcock, 2009).

Gustavo San Juan (2013), en trabajos anteriores, ha considerado que la metodología para considerar temas como la eficiencia energética y el confort, en el marco del Diseño Bioclimático y Sustentable –desde el inicio del proceso de diseño–, implica abordar cuatro etapas básicas: 1) análisis bioclimático general; 2) dimensionamiento inicial (pre-cálculo) en la etapa de anteproyecto, estudiando variantes proyectuales; 3) dimensionamiento final, en la etapa de proyecto; las que configuran la fase pre-ocupacional o de diseño, y 4) la auditoría ambiental (objetiva y subjetiva), con la cual verificar las decisiones tomadas en función de contrastar las hipótesis proyectuales con el funcionamiento real, definiendo la fase pos-ocupacional.

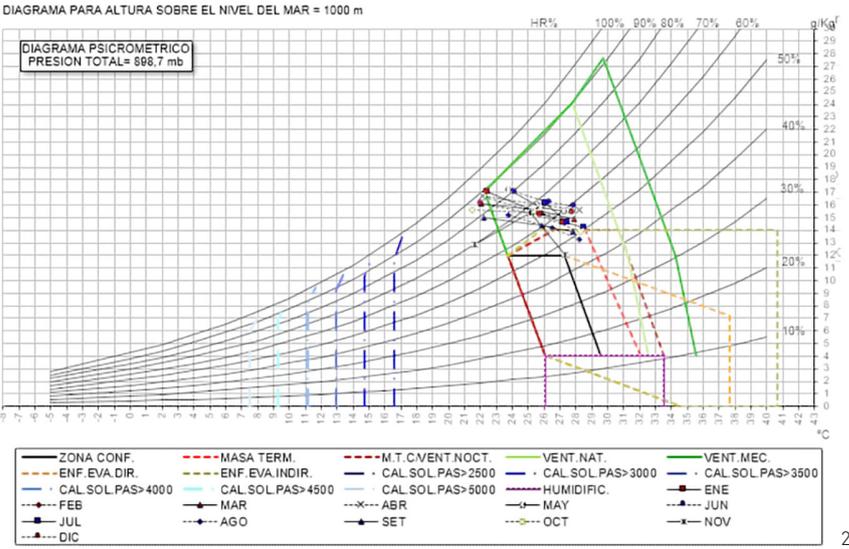
Recomendaciones generales de diseño para clima cálido

En la literatura especializada en cuanto al par arquitectura y clima, contamos con variedad de recomendaciones que, desde la concepción bioclimática, implican tanto

al diseño, como también al proceso o metodología para el logro de un proyecto bioclimático. En primer lugar, se encuentran las recomendaciones de diseño a nivel general basadas en condiciones climáticas de cada sitio en las que se recomienda tener en cuenta aspectos como ventilación natural y radiación solar, como aprovechamiento o protección según el caso. La mayoría de estos estudios corresponden a contextos con estaciones climáticas (verano, otoño, invierno y primavera), en donde hay situaciones extremas de calor y frío (Serra, 1999). Entre los autores bioclimáticos emblemáticos se encuentra Víctor Olgyay (1963), quien desarrolla un estudio sobre las prácticas tradicionales como proceso de depuración de materiales, estrategias y técnicas constructivas y bioclimáticas. Para ciudades tropicales con las características climáticas propias de clima cálido seco, sin estaciones climáticas (lluvioso, seco), el rango de confort propuesto por Olgyay es de temperaturas que varían entre 20 °C y 25 °C y de humedad relativa entre 20% y 55%, con velocidad de aire menor a 1 m/s. El rango de confort abarca hasta el 80% dependiendo de la presencia de mayor velocidad de aire. La tolerancia a mayores temperaturas está dada por la posibilidad de mayor humedad en el aire. Para lograr el confort higrotérmico se recurre a estrategias pasivas como reducir el clo¹ a 0,5 y a la utilización de elementos arquitectónicos para proveer sombreado, equilibrio térmico por materiales (masa térmica), radiación de onda larga de baja temperatura y enfriamiento evaporativo. Nótese además en la Figura 1 que, en los momentos de ocurrencia de las mayores temperaturas anuales, se deberá recurrir a la climatización por medios mecánicos. A partir del análisis climático desarrollado por Olgyay para Cali, la zona de confort que se identificó es de 21,2 °C a 26,8 °C, con temperaturas promedio de 24 °C (Olgyay, 1963) y varios momentos en el día en confort. Sin embargo, en la elaboración de la Figura 1, basada en 12 días del mes de agosto, con temperatura promedio (Ta) más elevada (26,4 °C), se muestra que las temperaturas diarias no alcanzan a entrar en confort. En segundo lugar, en el análisis basado en el climograma propuesto Baruch Givoni (1998), se observa en la Figura 2 que al igual que Olgyay ante las situaciones de máxima temperatura, las medidas pasivas son insuficientes, recomendando ventilación mecánica. Para Givoni, la masa térmica a la que alude Olgyay no alcanza a proveer confort. Las situaciones mínimas y medias presentadas en horas



1



2

Figura 1
Diagrama de Victor Olgyay.
Fuente: elaborado por los autores a partir del software desarrollado por Guillermo Gonzalo (2003).

Figura 2
Promedios de temperatura y humedad relativa, de 12 días de un mes típico, en climograma de Givoni.
Fuente: elaborado por los autores a partir del software desarrollado por Guillermo Gonzalo (2003).

1. El clo es una unidad de medida que define el aislamiento térmico proporcionado por una determinada vestimenta, siendo para una determinada mayoría de personas una situación cómoda en condiciones ambientales consideradas normales, 20 °C a 22 °C, con aire en movimiento ligero y sin influjo de la radiación solar.
 $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \times \text{K/W} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$.

de la madrugada, final de la tarde y noche, requieren ventilación natural. Según el autor, no se alcanza a estar en confort en ningún momento del día. Las principales estrategias recomendadas son: ventilación cruzada (azul claro), ventilación mecánica (azul oscuro) y enfriamiento evaporativo indirecto (fucsia). Carl Mahoney, en conjunto con Otto Königsberger y Martin Evans (Koenigsberger, Mahoney y Evans, 1970), desarrollaron, entre 1968 y 1971, la herramienta conocida como las "Tablas de Mahoney" basadas en estudios realizados por el autor en Nigeria. La propuesta se basa en identificar los momentos del día en bienestar, en función de una secuencia de análisis del clima a partir de parámetros específicos como la temperatura, la humedad relativa y las precipitaciones. Finalmente, se recomiendan estrategias específicas de diseño como, orientación, ubicación de los espacios dependiendo de la necesidad climática, ventilación, tamaño de aberturas, sombreado, materialidad en muros y techos, y algunas indicaciones sobre espacios al exterior. Autores como Allan Konya (1980) en su libro *Diseño en climas cálidos*, centran el análisis en las recomendaciones propias para este clima con diferentes variaciones. Konya presenta las condiciones de los materiales, no solo desde sus características térmicas, sino también considerando la disponibilidad y durabilidad, aspectos importantes en este tipo de clima. Las recomendaciones incluyen además de los materiales, sistemas de cimentación y uso de energía solar a partir de criterios generales. Específicamente para el clima cálido seco y húmedo recomienda medidas referidas a una adecuada distribución y forma de los edificios para promover el flujo del aire. También hace alusión a la localización de los espacios de permanencia y galerías en relación con la radiación solar, enfatizando

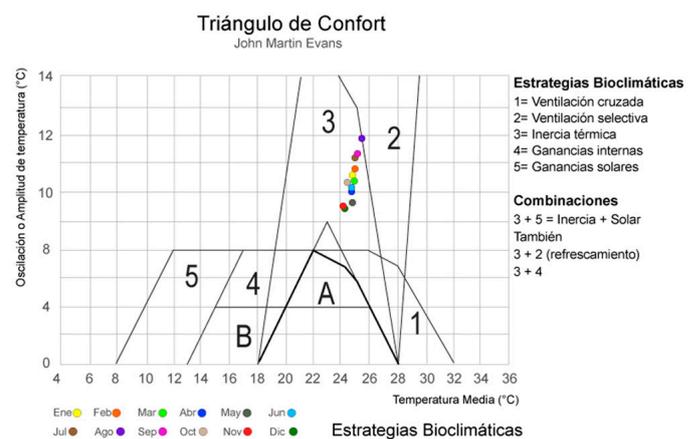
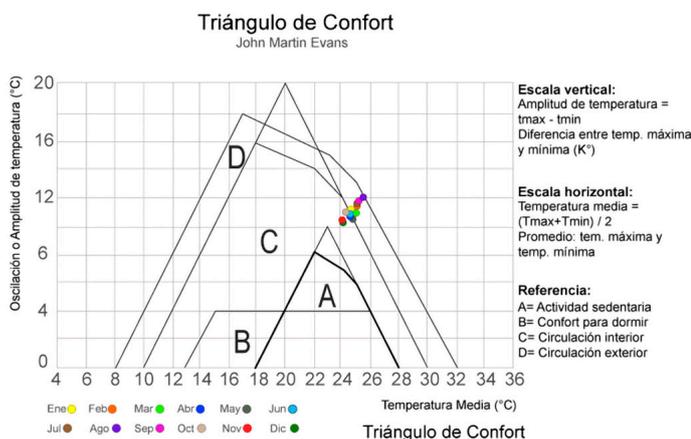
en todas, la necesidad de proveer sombra a la envolvente y a las superficies expuestas. Por otro lado, el proceso de diseño propuesto por Martin Evans y Silvia de Schiller (1994) está basado fundamentalmente en el aprovechamiento y protección frente al sol, en función del cálculo de los ángulos solares, a través de los diagramas solares y de sombras. Como parte del diseño bioambiental, la herramienta de los triángulos de confort incorpora la amplitud térmica para el acondicionamiento interior de los edificios (Evans, 2007), superando la visión estática del confort bajo la temperatura media. Para actividades sedentarias, el rango permisible se encuentra entre 18 °C y 28 °C. En la Figura 3, el eje horizontal corresponde a la temperatura media y el eje vertical a la amplitud (diferencia) térmica mensual, cuyo resultado es una serie de puntos en los que se estará a lo largo del año. En la Figura 4 se presentan las estrategias recomendadas de diseño. A partir del análisis de la situación de Cali con la herramienta de los triángulos de confort con 24,8 °C de temperatura media anual y una amplitud térmica entre 10 °C y 12 °C (media máxima de 31 °C y mínima media de 19 °C), se obtiene confort para zonas de circulación al exterior e interior, pero no de permanencia (Figura 3). Según Evans (2007) la estrategia bioclimática principal es la inercia térmica a través de la cual se puede reducir la amplitud al interior hasta una tercera parte y algo de ventilación selectiva con la cual se logran hasta 3 °C menos al interior con respecto al exterior, y la combinación de estas dos estrategias indicadas como refrescamiento, como se presenta en la Figura 4. Desde las propuestas generales como las de Olgay basadas en la ventilación, radiación y humedad, hasta las detalladas por Evans y de Schiller (1994) y también por

Figura 3

lqz.: triángulos de confort.
Fuente: redibujado con datos climáticos de Cali a partir de Evans (2007).

Figura 4

Der.: estrategias bioclimáticas.
Fuente: redibujado con datos climáticos de Cali a partir de Evans (2007).



Guillermo Gonzalo (2003), se presentan una variedad de alternativas a aplicar, en las que –con excepción de algunos casos puntuales– queda indeterminado si se alcanza el confort o no con la estrategia aplicada, o cuántos grados centígrados se logra reducir en los momentos más críticos del día. Desde las primeras propuestas metodológicas y de recomendaciones realizadas por Olgyay y Givoni, ha sido necesario acompañar el proceso de diseño con herramientas no exclusivas del universo formal y compositivo de la arquitectura, las cuales son necesarias para la toma de decisiones proyectuales, acertadas y verificadas para el correcto desempeño de la edificación. Todo lo anterior evidencia la inquietud y complejidad en las recomendaciones de diseño bioclimático, en este caso, para climas cálidos y la necesidad de que en forma progresiva se incorporen en el proceso de diseño criterios ajustados a normativas específicas, así como simulaciones en estado estacionario y dinámico.

Normativa para evaluar el confort térmico

Respecto al método denominado *Análítico* o *Estático* (ASHRAE, 2013), uno de los autores con mayor difusión en el tema es Povl Ole Fanger, quien retoma la escala térmica presentada en ASHRAE (2005) y a partir de una serie de investigaciones con voluntarios de diversas partes del mundo, propone un modelo para predecir el confort térmico a partir de parámetros ambientales como, las dimensiones del aula, la temperatura media radiante (T_{mr}), la humedad relativa (HR), la velocidad del aire (V_s) y aquellos parámetros en relación con los ocupantes, como el aislamiento de la ropa (clo) y la actividad metabólica (met), entre otros (Fanger, 1972). Este modelo propuesto por Fanger se basa en el balance del flujo de calor entre el ambiente y el cuerpo, y el calor requerido para un confort óptimo en una actividad específica. El modelo propone dos índices: el voto medio estimado (PMV, del inglés *Predicted Mean Vote*), el cual permite predecir el PMV en el que se pueden encontrar los ocupantes de un espacio a partir de la escala de sensación térmica de siete puntos, para tomar decisiones de diseño. Para la norma, el rango de PMV en confort se encuentra entre -0,5 y +0,5. El porcentaje estimado de insatisfechos (PPD, del inglés *Predicted Percentage of Dissatisfied*), es un índice que se establece a partir de los votos en confort

del PMV, asumiendo que los votos (+3, +2, -3 y -2) por fuera de los valores -1, 0, +1 se encuentran fuera del confort. El método desarrollado por Fanger, es el que ha tenido mayor desarrollo en la norma ASHRAE y por ende en las ISO (Organismo Internacional de Normalización) y NTC (Norma Técnica Colombia), las cuales basan sus indicaciones en la primera.

En el modelo *Adaptativo*, basado en el estudio denominado ASHRAE RP-884, cuyo objetivo fue verificar la real aceptabilidad de ambientes térmicos en relación directa con su contexto –específicamente edificios ventilados naturalmente–, se tiene en cuenta el comportamiento de los usuarios y sus expectativas, y se concluye que existe una relación en la que la temperatura de neutralidad térmica se incrementa a medida que incrementa la temperatura exterior. Este modelo se basa en la temperatura promedio exterior, la cual incide en el balance térmico de las personas (Fanger y Toftum, 2002). Puede ser aplicado en ambientes con ausencia de medios mecánicos para la refrigeración, en donde los ocupantes se encuentren con una Tasa Metabólica entre 1 y 1,3 met, con nivel de aislamiento de ropa entre 0,5 y 1,0 clo, o con la capacidad de adaptarse en este rango y bajo condiciones de temperatura exterior por debajo de 33,5 °C. (ASHRAE, 2017, p. 40). Para el análisis de estos modelos e índices existe una serie de ecuaciones que los sustentan presentadas en detalle en la norma ASHRAE. En la actualidad hay diversas herramientas que permiten hallar estos valores de manera inmediata y gráfica a partir de los datos del clima local, entre las cuales se encuentra la *CBS Comfort Tool* (Tartarini, Schiavon, Cheung y Hoyt, 2020) y la *CBE Thermal Comfort Tool*, avalada por ASHRAE (2013).

La *Norma colombiana NTC 4595* (Ingeniería Civil y Arquitectura, Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares) tiene por objetivo establecer los requisitos para el planeamiento y diseño físico-espacial de nuevas instalaciones escolares y para la evaluación y adaptación de infraestructuras existentes, que permitan mejorar la calidad de la educación. Esta norma se estructura en la clasificación de los ambientes, requisitos de accesibilidad, instalaciones técnicas, comodidad y seguridad.

La estrategia central de la investigación, se basa en el estudio de diferentes casos de aulas de colegios públicos localizados en la ciudad de Cali, Colombia. Se recurrió a la técnica de Auditoría Ambiental de Percepción

del Usuario (AAPU) aplicada con anterioridad en colegios en Latinoamérica (San Juan, Hoses y Martini, 2014), y se aplica la validación de las recomendaciones de diseño a través de herramientas de simulación. Estos son los puntos centrales:

1. El estudio se realiza en la ciudad de Cali en situación tropical, a 3° 25' latitud norte, 76° 30' longitud oeste, entre 950 y 1.100 m s.n.m., identificada como ciudad con clima cálido seco con temperatura media anual de 24,8 °C, (máxima de 29,9 °C y mínima de 19,4 °C); humedad relativa promedio de 72,2%.
2. Las ocho aulas de los cuatro colegios públicos construidos después de la norma NTC 4595, en la ciudad de Cali, cumplen con las características fundamentales para constituirse en estudios de caso, como lo indican Linda Groat y David Wang (2013). Fueron estudiadas en su contexto real, para explicar vínculos causales, evidenciándose la importancia de la teoría en la fase de diseño de la investigación y la necesidad de recurrir a múltiples fuentes para recabar la evidencia, con la posibilidad de ir de lo particular del caso estudiado a la teoría. Las aulas son características de espacios situados en clima cálido, con fachadas permeables a través de bloques calados, rejas y persianas para la ventilación constante. A continuación, se presenta el tipo de aula de cada colegio (Fotografías 1 a 4, en la página siguiente).
3. Aplicación de la AAPU, técnica de relevamiento y procesamiento de información, que involucra dos componentes: el objetivo (a partir de la medición de los parámetros ambientales de las aulas, con equipo específico); y el subjetivo (a partir de la percepción de confort del usuario, reflejado en encuestas de opinión, en este caso de los estudiantes).
 - a. Estudio y adopción de los parámetros ambientales, en los diferentes períodos anuales (lluvioso y seco): temperatura ambiente y humedad relativa, exterior e interior, y en simultáneo con la encuesta: temperatura superficial interior y velocidad de aire, utilizando equipos especializados.
 - b. Encuesta realizada a 535 estudiantes en aulas, cinco de secundaria y seis de bachillerato, implementada a través de un taller participativo. Para el componente térmico se indagó por la sensación térmica: muy caluroso (+3), caluroso (+2), ligeramente caluroso

(+1), neutro (0), ligeramente fresco (-1), fresco (-2) y frío (-3) (ASRHA, 2005); por la percepción de la ventilación, y por las estrategias para adaptarse a las condiciones térmicas, como cerrar ventanas, quitar o ponerse ropa, cambiarse de puesto y tomar agua.

- c. Definición del rango de confort adaptativo, acorde con la ecuación propuesta para tal fin (Nicol, Humphreys y Roaf, 2012):

$$T_{acep} = 0,31 * 26,2 \text{ °C} + 17,8 \pm 3,5 \text{ °C}$$

Ecuación 1

En donde:
 T_{acep} = Temperatura
 $T_{(pma(out))}$ = Temperatura promedio exterior mensual
 T_{lim} = 2,5 °C para 90° de aceptabilidad y 3,5 °C para 80% de aceptabilidad

- d. La temperatura operativa (T_o), se calcula mediante la ecuación (ASHRAE, 2017):

$$T_o = A * T_a + (1 - A)T_{mr}$$

Ecuación 2

En donde:
 T_o = Temperatura operativa
 T_a = Temperatura del aire
 T_{mr} = Temperatura media radiante
 A = 0,5 (<0,2m/s); =
 (valor en función de la velocidad del aire) 0,6 (0,2 a 0,6 m/s); =
 0,7 (0,6 a 1,0 m/s).

4. Determinación, de las alternativas de diseño según las recomendaciones de la Norma Técnica Colombiana-NTC 4595: 1) Dimensiones de ventanas, zementos de protección solar en fachada, 3) materiales de la envolvente, 4) orientaciones y 5) elementos del contexto inmediato (Tabla 1, en la página siguiente).
5. Construcción de un modelo experimental de un aula “típica” sin tratamiento especial en la envolvente en, bloque estructural de concreto de 20 cm de espesor, con fachada principal orientada al sur, cubierta tipo sándwich. El modelo a partir de simulación permitió validar los comportamientos anuales de su dimensión térmica y la determinación del confort integral (Figura 5, en la página siguiente).

En el presente trabajo se expone el análisis y propuestas sobre el confort térmico, en un período anual, a partir de la aplicación de software de simulación especializado, en este caso se utilizó el *EnergyPlus*



1



2



3



4

Fotografía 1

Aulas colegio 1

Fuente: registro fotográfico de la investigación.

Fotografía 2

Aulas colegio 2

Fuente: registro fotográfico de la investigación.

Fotografía 3

Aulas colegio 3

Fuente: registro fotográfico de la investigación.

Fotografía 4

Aulas colegio 4

Fuente: registro fotográfico de la investigación.

Tabla 1. Alternativas de diseño según las recomendaciones de la Norma NTC 4595

N°	TEMA	ALTERNATIVA DE DISEÑO
1	ABERTURAS	Relación con la superficie del aula 1/6 m; 1/9 m
2	PROTECCIÓN RADIACION	Aleros y persianas en fachadas, orientación solar distinta al eje norte-sur
3	MATERIALES	Alternativas desde el Factor de Ganancia Solar
		Materiales con masa térmica de 0,15 m
		Cubierta de placa delgada más cielorraso
4	ORIENTACIÓN	Superficies de fachada expuesta hacia el eje norte-sur
		Orientación a 45°, para aprovechar los vientos
5	CONTEXTO	Ventilación desde el exterior

Fuente: elaborado para la investigación.

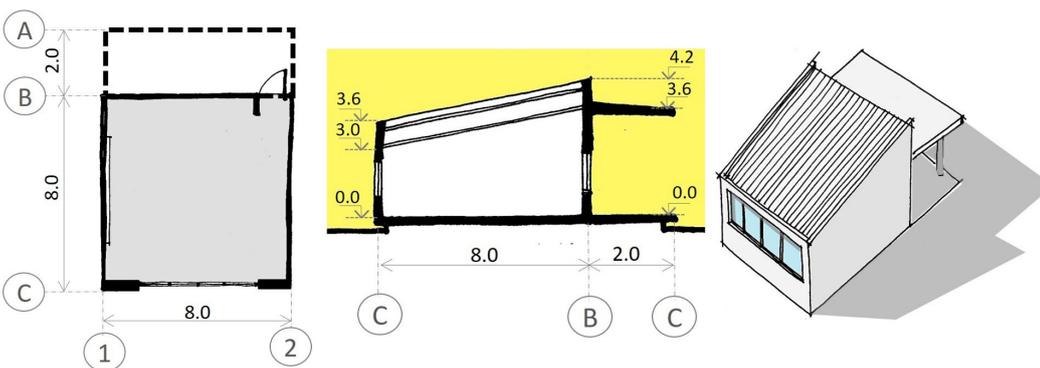


Figura 5

Caso base.

Fuente: elaborado para la investigación.

(Oficina de Tecnologías de Construcción (BTO) del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). Las alternativas que fueron simuladas se presentan en detalle en la Tabla 2.

6. A partir del estudio del comportamiento térmico y los datos objetivos y subjetivos adquiridos, se calcularon los modelos Adaptativo y Analítico, según norma ASHRAE-55-2017 y la norma NTC 4595.
7. Determinación de las recomendaciones generales de diseño en clima cálido.
8. Validación el desempeño térmico alcanzado en las estrategias de diseño adoptadas, revisando y observando la normativa básica en Colombia, con lo cual proponer pautas de diseño, para climas tropicales.

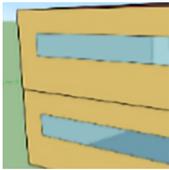
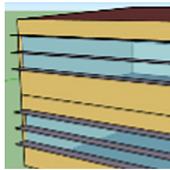
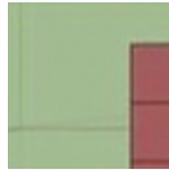
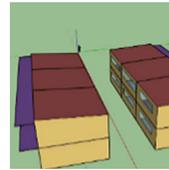
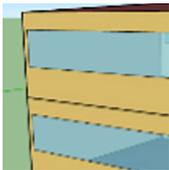
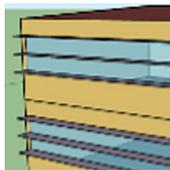
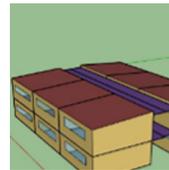
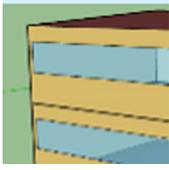
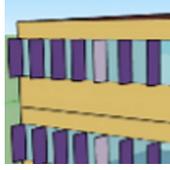
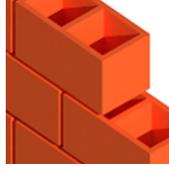
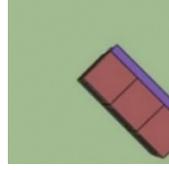
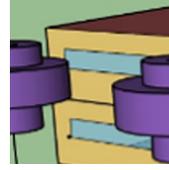
Resultados y discusión

Contexto climático y estrategias de diseño

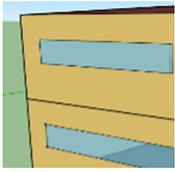
A partir de los datos climáticos de las temperaturas promedio, se identificó en Cali un comportamiento similar durante todo el año (Figura 6, en la página siguiente) y para definir las temperaturas de diseño, se analizó el comportamiento de las temperaturas medias máximas, a partir de cuartiles (Figura 7, en la página siguiente).

Para identificar las principales estrategias bioclimáticas consignadas en ASHRAE (2005) que proporcionan confort, se recurre al software *Climate Consultant*, el cual determina el 21% de las horas anuales en confort

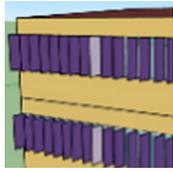
Tabla 2. Alternativas de diseño aplicadas al caso base

GRUPO 1: dimensión de ventanas	GRUPO 2: protección solar modelo 1/4	GRUPO 3: materiales de la envolvente del aula	GRUPO 4: alternativas de orientaciones	GRUPO 5: elementos del contexto inmediato
				
1/6 CB Relación 1/6 del área del salón.	PRO HO Protecciones horizontales.	1/6 CB Muro en bloque de concreto.	90°OE 90° hacia el Oeste.	PATIOS Patio de la altura del edificio.
				
1/4 Relación 1/4 del área del salón.	PRO HO+ Más protecciones horizontales.	MU PA+A+PA Muro en panel de yeso + cámara de aire + panel de yeso.	45° NOR E 45° hacia el Noreste.	EDIFICIO Galería cubierta entre edificios.
				
1/5 Relación 1/5 del área del salón.	PRO VE + Muchas más protecciones verticales.	MU BL CE Muro en bloque de ladrillo cerámico.	45° Sur O 45° hacia el Suroeste.	ÁRBOL Árbol como elementos de obstrucción.

GRUPO 1: dimensión de ventanas GRUPO 2: protección solar modelo 1/4 GRUPO 3: materiales de la envolvente del aula GRUPO 4: alternativas de orientaciones GRUPO 5: elementos del contexto inmediato



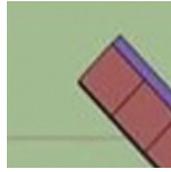
1/9
Relación 1/9 del área del salón.



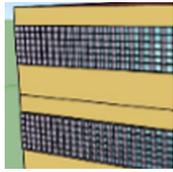
PRO VE ++
Muchas más protecciones verticales.



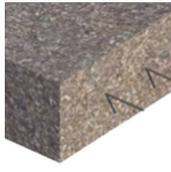
CU ME+CIE
Cubierta tipo sándwich + aislamiento térmico + cielo falso en panel yeso + cámara.



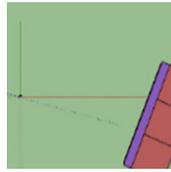
67,5° SUR O
67,5° hacia el Sur oeste.



PRO CA
Calados.



CU CO
Losa de concreto.



67,5° SUR E
67,5° hacia el Sur este.



MU BL CE
Losa de concreto + cielo en panel yeso + cámara de aire.

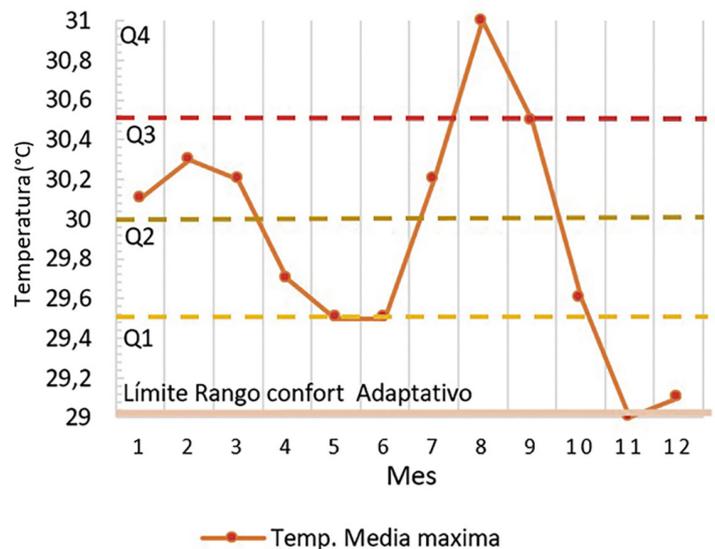
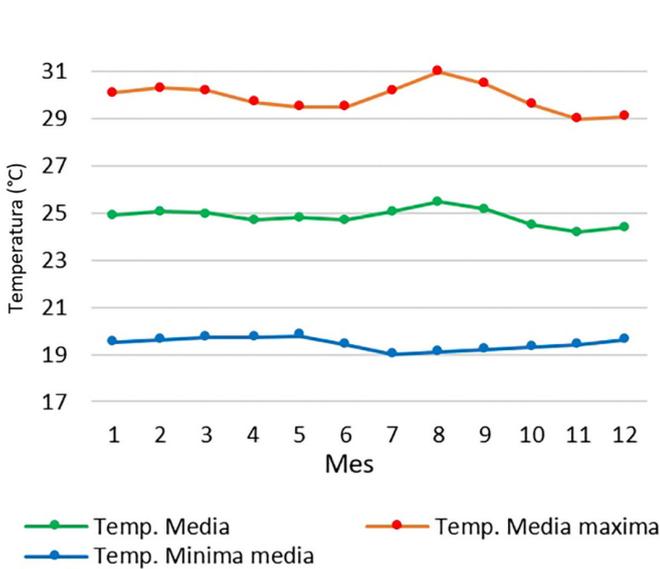
Figura 6

Izq.: temperatura anual.
Fuente: elaborado a partir de datos del IDEAM.

Figura 7

Der.: temperatura media máxima anual.
Fuente: elaborado a partir de datos del IDEAM.

Fuente: elaborado para la investigación.



y arroja las siguientes recomendaciones para las situaciones de desconfort: sombreado en las ventanas (31,3%), enfriamiento por ventilación (27,6%); des-humidificación en la madrugada (35,6%), masa térmica y ventilación selectiva (18,8%) (Figura 8).

En el contexto de Cali, el principal parámetro al que se debe responder con el diseño es, fundamentalmente, el de la amplitud térmica en un día promedio (hasta de 11,6 °C), lo que implica momentos por debajo, en situación de frío (madrugada) y otros que exceden el confort (medio día), con las siguientes características:

- > Bajas temperaturas del ambiente con alta velocidad y baja temperatura del aire, en horas de la madrugada.
- > Altas temperaturas del ambiente, baja velocidad y alta temperatura del aire, en el horario de uso de los espacios educativos.

Resultados de la AAPU

Acorde el clima en región tropical en condiciones climáticas sin estaciones, se presentan los resultados de las mediciones en el mes lluvioso, siendo similares a las condiciones del mes seco. Las T_a promedio de todos los colegios es 24,6 °C y al aplicar la ecuación propuesta por el modelo Adaptativo (ver en el apartado Normativa para evaluar el confort térmico) se obtiene un rango entre 22 °C y 29 °C (Figura 9). Bajo la hipótesis de este modelo, aproximadamente el 88% de las horas del día se encuentran dentro del rango de confort, particularmente las horas de la mañana, la noche y la madrugada, mientras que las horas fuera de confort se concentran desde el mediodía hasta final de la tarde. La Figura 10 muestra la evolución de la HR, durante el período de medición tanto del ambiente exterior como de las aulas analizadas en función

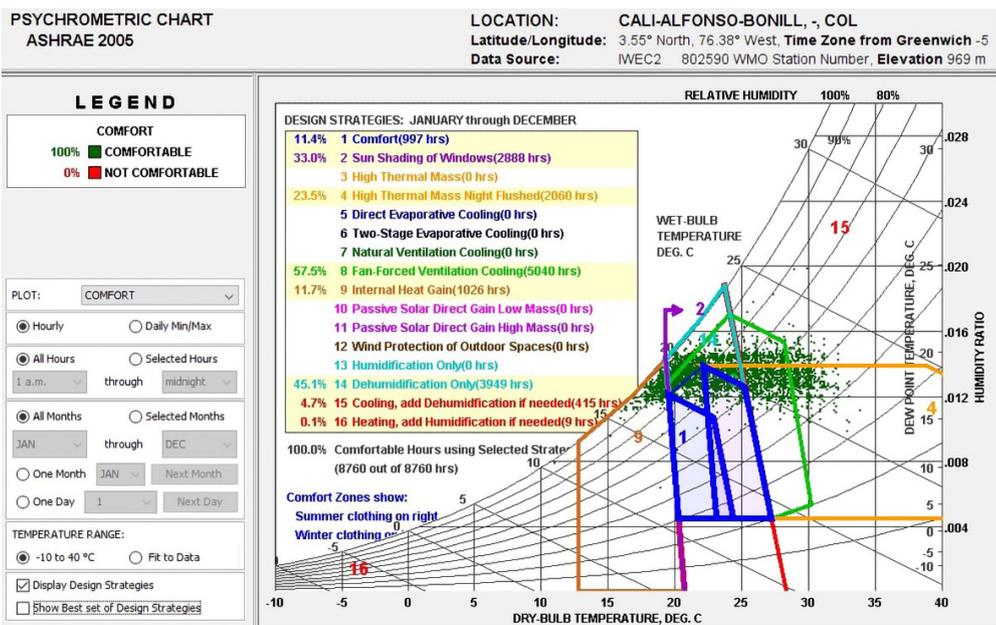


Figura 8

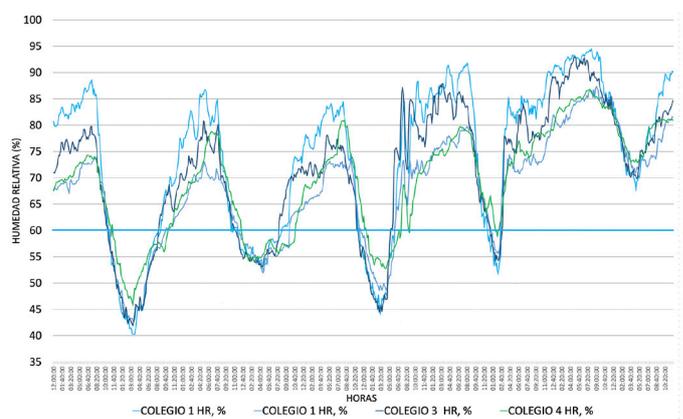
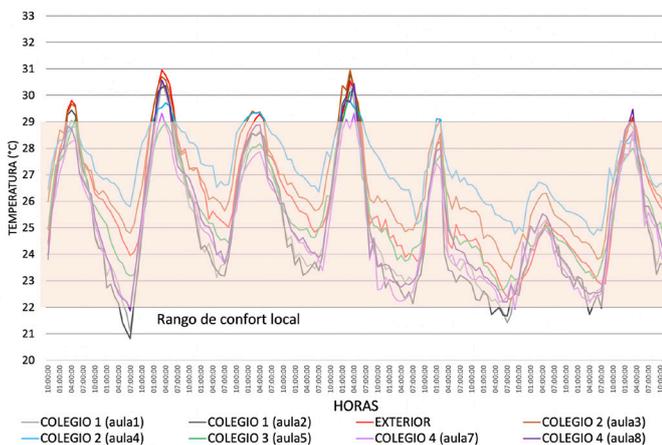
Estrategias de diseño basadas en ASHRAE. Fuente: *Climate Consultant*, versión 5-3.

Figura 9

Izq.: temperatura exterior e interior de las aulas. Fuente: elaborado para la investigación.

Figura 10

Der.: humedad relativa promedio en las aulas de cada colegio. Fuente: elaborado por los autores.



del 60% que propone la Norma, registrándose valores máximos entre 83% y 95%, con un promedio de 73,5%. Esto implica una diferencia *-distancia-* entre lo propuesto por la normativa y la situación real.

En la Tabla 3 se detallan los valores ambientales registrados con los equipos, los valores calculados y los votos de sensación térmica (VST) expresados por los estudiantes en la encuesta. Estos últimos resultan distribuidos en la escala (49% en las tres categorías centrales, 32% hacia el frío y 24% hacia calor), y no es posible una conclusión clara sobre si hay o no confort, o si prevalece la sensación de frío o de calor, dado lo cercano de los valores y el que prevalezca sensación de frío en una ciudad cálida como la del estudio. Esto puede indicar que la escala de sensación térmica empleada por la norma ASHRAE, no logra reflejar en detalle el estado térmico de los niños de las aulas estudiadas.

Estrategias bioclimáticas y confort, en el caso base simulado

Al comparar los resultados del desempeño térmico de las estrategias aplicadas al *caso base*, con el rango de confort del modelo Adaptativo, se puede observar, como todas las temperaturas operativas (T_o) promedio, quedan dentro del rango; sin embargo, las T_o mínimas y máximas quedan por fuera (Figura 11, en la página siguiente). Lo anterior, es coherente con las condiciones climáticas de Cali, ciudad tropical, sin estaciones en donde los espacios naturalmente ventilados, guardan relación directa con las condiciones climáticas exteriores. Se comprueba que la T_o promedio de las variaciones permanece en confort, mientras las máximas y mínimas quedan por fuera del rango. Tanto en la situación real como en el caso base simulado, las temperaturas promedio se mantienen dentro del

Tabla 3. Datos medición, Tmr, T_o , media de VST y detalle de votos de sensación térmica

AULA	DÍA/MES	Ta EXT. °C	Ta INT. °C	HR EXT. %	HR INT. %	TMR °C	T_o °C	MEDIA VST	-3	-2	-1	0	1	2	3	TOTAL
PERÍODO LLUVIOSO																
1	22 MARZO	27,8	26,7	63,0	67,7	26,1	26,4	0,17	0	9	0	8	3	10	0	30
2	22 MARZO	29,8	28,6	55,5	61,0	28,3	28,4	1,29	0	3	4	3	5	8	11	34
3	17 MARZO	26,4	27,3	63,1	66,1	24,3	25,8	-0,03	1	8	7	8	6	5	3	38
4	17 MARZO	27,3	27,0	56,7	60,3	26,9	27,0	-0,25	1	11	3	8	9	2	2	36
5	6 ABRIL	29,9	29,8	57,2	53,9	29,5	29,6	1,14	0	4	3	0	13	7	8	35
6	6 ABRIL	31,0	30,6	58,3	55,4	30,2	30,4	0,76	0	5	2	4	16	8	3	38
7	31 MARZO	22,3	23,4	87,8	83,9	22,4	22,9	-2,33	16	11	1	1	1	0	0	30
8	31 MARZO	22,8	23,2	85,9	83,2	23,2	23,2	-1,81	12	14	2	7	1	0	0	36
TOTAL PERÍODO LLUVIOSO									30	65	22	39	54	40	27	277
PERÍODO SECO																
1	6 SETIEMBRE	29,4	27,3	58,5	64,3	25,8	26,6	-0,42	1	5	4	7	7	0	0	24
2	6 SETIEMBRE	27,3	26,4	63,5	68,8	25,5	26,1	-0,71	1	12	5	9	6	1	0	34
3	1 SETIEMBRE	28,4	28,9	49,5	55,4	24,5	26,7	-0,20	1	10	3	5	5	3	3	30
4	1 SETIEMBRE	28,2	26,9	49,3	53,3	24,3	25,6	0,07	0	9	5	12	8	6	2	42
5	31 AGOSTO	26,5	27,4	60,0	57,4	26,2	26,8	-0,55	1	11	4	5	4	3	1	29
6	31 AGOSTO	26,9	28,9	57,7	53,9	27,8	28,4	-0,53	1	12	1	10	6	1	1	32
7	30 AGOSTO	25,6	25,2	67,3	69,4	23,4	24,3	0,35	0	6	4	9	14	5	2	40
8	30 AGOSTO	26,2	26,9	64,5	62,8	26,1	26,5	0,00	1	6	2	6	7	5	0	27
TOTAL PERÍODO SECO									6	71	28	63	57	24	9	258
TOTAL VOTOS LLUVIOSO + SECO									36	136	50	102	111	64	36	535
TOTAL PORCENTAJE LLUVIOSO + SECO									32			49			19	

Fuente: elaborado para la investigación.

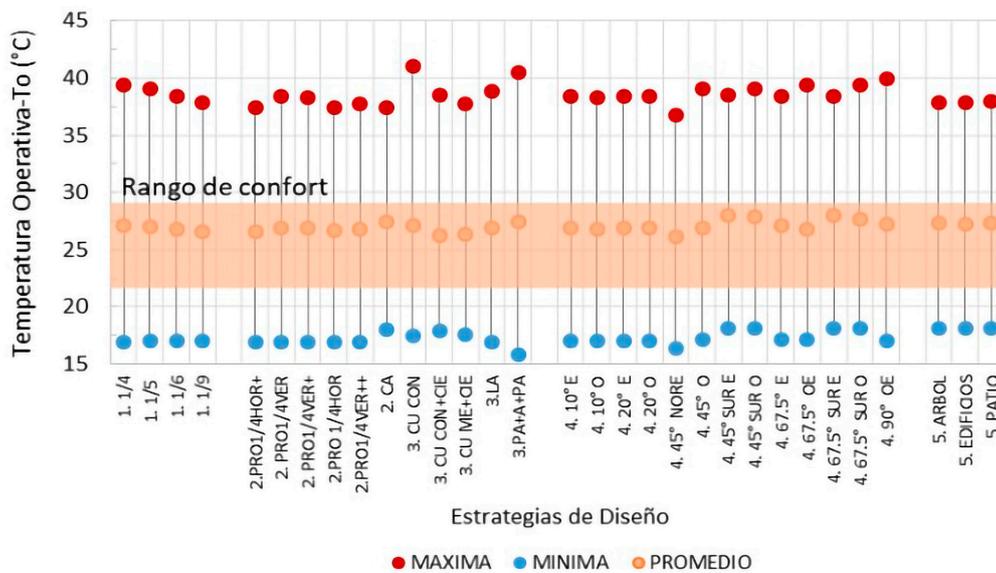


Figura 11
Desempeño térmico anual de las estrategias de diseño, en el caso base simulado. Grupo 1: eimensión de las ventanas en relación con el área del salón. Grupo 2: elementos de protección en fachada en modelo ¼. Grupo 3: materiales en la envolvente del aula. Grupo 4: alternativas de orientación. Grupo 5: elementos del entorno. Fuente: elaborado para la investigación.

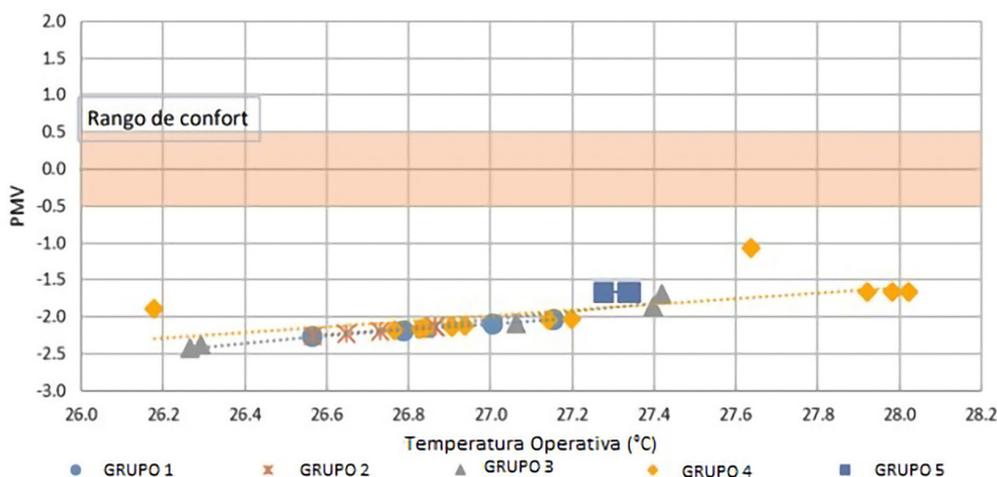


Figura 12
Validación del PMV en las estrategias de diseño simuladas. Grupo 1: dimensión de las ventanas en relación con el área del salón. Grupo 2: elementos de protección en fachada. Grupo 3: materiales en la envolvente del aula. Grupo 4: alternativas de orientación. Grupo 5: elementos del entorno. Fuente: elaborado para la investigación.

rango de confort, sin embargo el caso base simulado, presenta mayor oscilación térmica diaria con temperaturas máximas más altas y mínimas más bajas. Es importante resaltar que la situación real corresponde a un mes de medición, mientras el modelo simulado se basa en archivos climáticos históricos. En el análisis bajo el modelo Analítico, llama la atención que todas las medias de los votos estimados, resultan por fuera del rango de confort indicado por la norma, y que aún más, con las T_o simuladas entre 26 °C y 28 °C, la predicción del modelo bajo el software arroje disconfort por situación de frío, con valores entre -1,0 °C y -2,5 °C, situación distante de la que arrojó la opinión de los estudiantes en el estudio, la cual se

encontró dispersa en la escala de sensación térmica, detallada en la Figura 12.

Recomendaciones de diseño en relación con el confort térmico

El desempeño térmico alcanzado en las estrategias de diseño según la norma NTC 4595, y bajo el análisis del rango propuesto por el modelo Adaptativo, permite concluir el comportamiento desde los siguientes temas: Temperatura ambiente (T_a), Temperatura media radiante (T_{mr}) y Velocidad de aire (V_a), para un mejoramiento de la T_o analizada. Para la T_a se debe tener presente que solo la carga térmica tenderá a calentar el ambiente, incrementando su valor. Para esto se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

UNO

Desde los elementos del entorno, minimizar la carga térmica sobre la envolvente: muros, techos, ventanas y superficies exteriores inmediatas, con elementos que proporcionen sombreado, adicional a doble fachadas ventiladas y otros elementos que promuevan el fenómeno de movimiento de aire explicados anteriormente, los cuales pueden reducir hasta 0,5 en la T_o máxima (Figura 13).

DOS

Para minimizar la carga térmica sobre las aberturas, es imprescindible la presencia de protecciones en los aventanamientos, como aleros o parasoles horizontales, en las fachadas norte y sur los cuales, con una mayor exploración de sus propiedades lumínicas, pueden actuar como estantes de luz que favorezcan una mayor iluminancia natural al interior (Figura 14).

TRES

En cuanto a la orientación de las protecciones, es recomendable la orientación al norte y sur, entendiendo que este tipo de protecciones es indispensable para la situación climática y geográfica. Considerada especialmente en las orientaciones este-oeste, pero no necesariamente (desde el confort térmico) en la norte y sur (Figura 15, en la página siguiente).

CUATRO

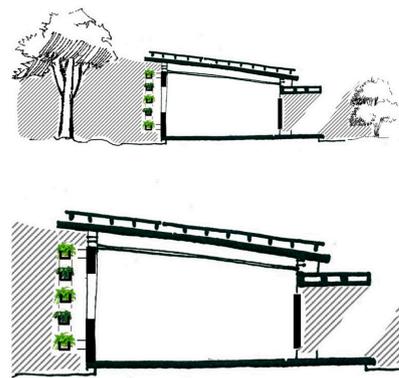
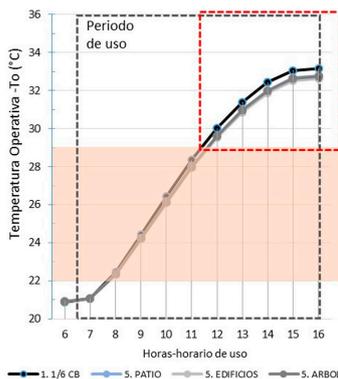
Aumentar la resistencia térmica (R) de la envolvente edilicia. En este sentido, la recomendación de la norma de preferir materiales másicos en la envolvente, frente a otros más ligeros es favorable (Konya, 1980).

CINCO

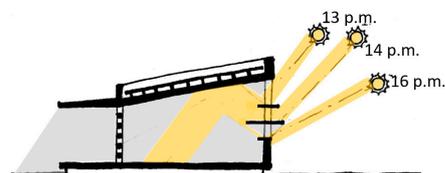
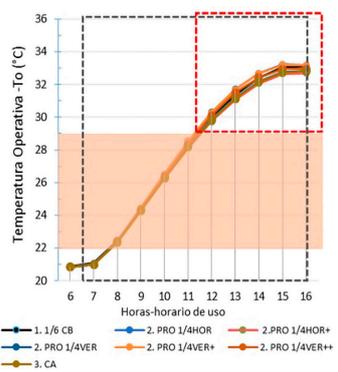
La distinción que realiza la norma entre los materiales, como el bloque de concreto y el de ladrillo (prefiriendo el primero) (ICONTEC, 2000), no tuvo relevancia en el estudio, ya que presentó un comportamiento similar con diferencia de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la T_o máxima (Figura 16, en la página siguiente).

SEIS

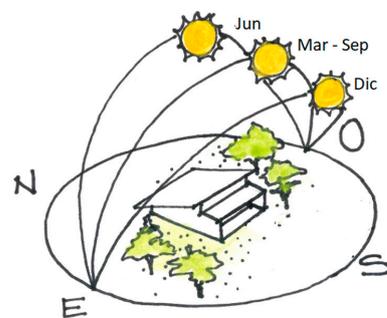
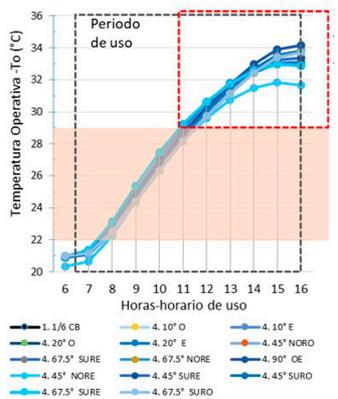
En el caso de los muros, la resistencia propia de los materiales convencionales, como el bloque de concreto y ladrillo –con valores de Resistencia (R) = $0,13$ y $0,12\text{ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ respectivamente– (Cengel y Boles, 2009), no son suficientes para mantener el espacio en confort. Sin embargo, como bien lo expresa Rafael Serra



13



14



15

Figura 13
(Izquierda) Grupo 5.
Elementos del entorno.
(Derecha) Elementos del entorno.
Fuente: elaborado para la investigación.

Figura 14
(Izquierda) Grupo 2.
Elementos de protección en fachada en modelo 1/4.
(Derecha) Protecciones horizontales + estantes de luz.
Fuente: elaborado para la investigación.

Figura 15
(Izquierda) Grupo 4.
Alternativas de orientación.
(Derecha) Orientación eje N-S.
Fuente: elaborado para la investigación.

(1999), no todo el peso del desempeño térmico se le puede asignar a las paredes, ya que presentan accidentes, aberturas y otras irregularidades que afectan los flujos de calor y, sobre todo, frente a condiciones cambiantes, especialmente en aulas como las estudiadas con alta permeabilidad.

SIETE

En la misma línea, se demostró que las cubiertas metálicas o en concreto, por más que cuenten con cámara de aire y aislación térmica, exceden el rango de temperatura. En el caso de la cubierta metálica con aislación del *caso base*, a pesar de que presenta temperaturas similares a la cubierta de las mismas características con cámara de aire en concreto, la segunda (concreto) permanece una hora más en confort (Figura 17, en la página siguiente). Lo anterior, se presenta contrario a la afirmación de autores como Konya (1980), quienes sostienen que cubiertas con materiales reflectantes con cámara de aire pueden disminuir dos o tres veces el valor anterior.

OCHO

La cámara de aire demostró su efectividad en cubierta tipo losa en concreto maciza, la cual alcanzó 36 °C, frente a 3,5 °C menos, que logró la misma cubierta con la cámara de aire. Sin embargo, ambas opciones exceden las T_o de confort.

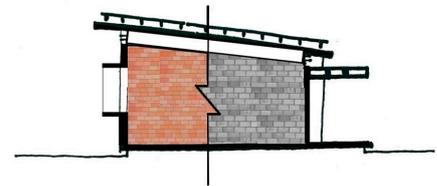
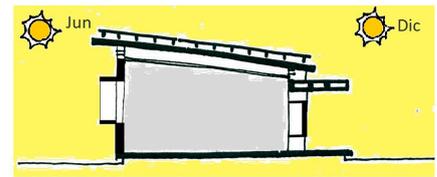
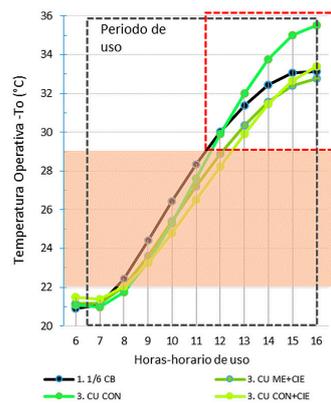
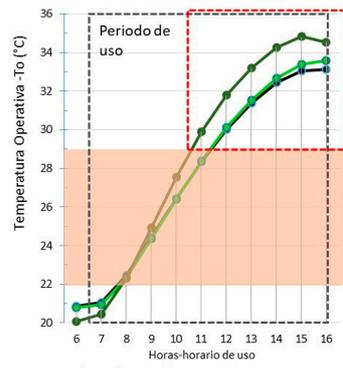
NUEVE

La cubierta tipo sándwich en todos los casos ($R = 0,70 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$) (Cengel y Boles, 2009), no alcanza a conservar el espacio en confort a partir del mediodía solar, ya que, en este tipo de climas, la cubierta es la que recibe el impacto principal de la radiación solar (Evans y de Schiller, 1994). La configuración arquitectónica tiene incidencia directa en la temperatura de cada superficie, y por consiguiente en la T_{mr} , como también en el acabado de las superficies.

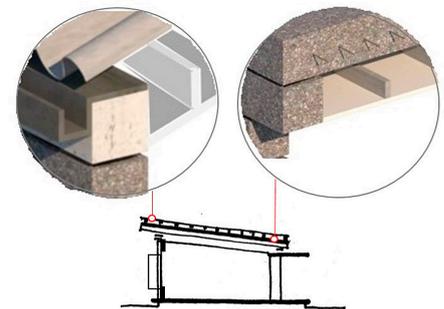
Para mejorar este parámetro se debe tener en cuenta:

DIEZ

Se deben explorar materiales con baja emisividad, que en el caso del aluminio es la más baja, explorado en otros trabajos aplicados a vivienda social en Cali (Gamboa, Rosillo, Herrera, López e Iglesias, 2011), como barrera radiante en el contexto tropical, con resultados muy favorables en la disminución de la temperatura al interior.



16



17

ONCE

En relación con el área de vidriados, se concluyó que funciona mejor térmicamente una menor área de ventana (con una relación de área ventana vs. área de piso en planta de 1/9), que mayor área de ventana (relación 1/4). Situación recomendada por la mayoría de los autores para clima cálido seco (Figura 18, en la página siguiente).

DOCE

Sin embargo, la diferencia entre las distintas dimensiones no es muy marcada (1,5 °C) y de una hora aproximada de confort en el día. Reafirmando la necesidad de hacer énfasis en el sombreado de las superficies –propia de recomendaciones para clima cálido húmedo– (Evans y de Schiller, 1994; Olgyay, 1963), que frente al tamaño de áreas vidriadas –propias de recomendaciones para clima cálido seco– (Konya, 1980).

TRECE

Las orientaciones norte y sur, presentan un desempeño similar a rotaciones leves de hasta 10 °C, permitidas por la norma. Cuando el ángulo de exposición es mayor en 20°,

Figura 16

(Izquierda) Grupo 3. Materiales en la envoltura del aula. (Derecha) Masa térmica. $T_o \text{ Max} =$ Ladrillo = 33,5 °C y Bloque concreto = 33 °C. Fuente: elaborado para la investigación.

Figura 17

(Izquierda) Grupo 3. Materiales en la envoltura del aula. (Derecha) Cubierta con cámara de aire. Fuente: elaborado para la investigación.

los resultados son similares. Las diferencias hasta de 3 °C, se presentan en fachadas expuestas a 45° y 90°, hacia el oeste. Esta recomendación reafirma la preferencia por orientaciones norte y sur en las fachadas expuestas (Figura 19, arriba) (Evans y de Schiller, 1994; Givoni, 1969; Konya, 1980; Olgyay, 1963; Serra, 1999).

CATORCE

Una de las principales recomendaciones para clima cálido es que, de permitir el ingreso de aire, este debe ser tratado, reduciendo su calidad higro-térmica, por ejemplo, mediante sombreado exterior e inyección desde espacios sombreados (Figura 19 abajo).

Las estrategias enfocadas a lograr una correcta velocidad de aire (V_a) son:

QUINCE

Se deben proyectar salidas y entradas de aire que favorezcan su renovación y el retiro de la carga térmica, las cuales deben permitir el cerramiento y apertura (de manera selectiva) según las condiciones térmicas y acústicas circundantes. Estas deben ser diseñadas en función de las corrientes de aire según el período (climático, diurno, mensual o anual verificando dirección y frecuencia), así como permitir las o no, en función de la temperatura del aire exterior.

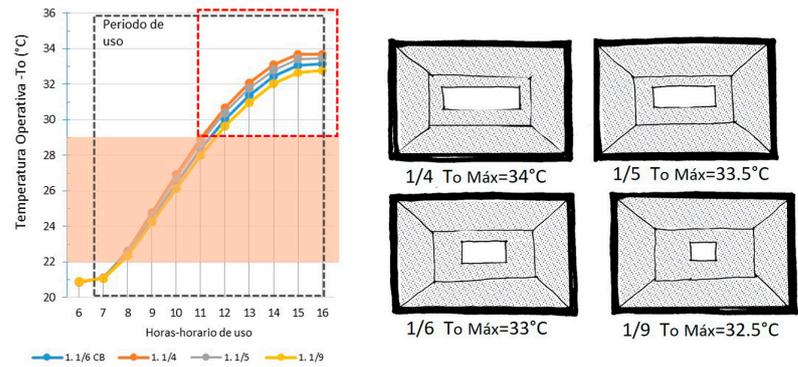
DIECISÉIS

La exclusividad de la ventilación cruzada natural, por sí sola, no es suficiente para lograr el confort al interior en la mayor parte del horario de uso de las aulas como se demostró a lo largo del estudio.

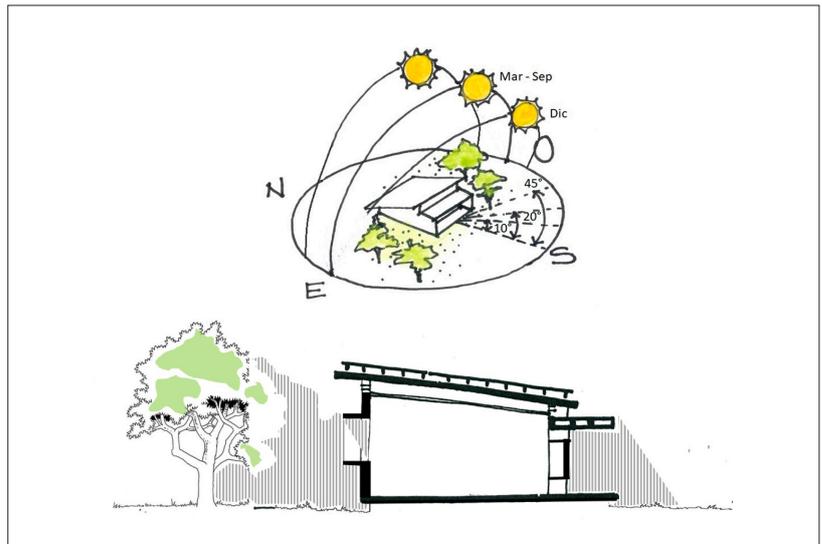
DIECISIETE

Por lo tanto, deben ser considerados elementos para favorecer la ventilación por desplazamiento convectivo, chimeneas solares y movimiento de aire con ventiladores, y otros sistemas híbridos como suelo radiante y enfriamiento evaporativo, (específicamente cuando la humedad relativa es reducida, lo cual coincide con las T_a más elevadas en horario de uso de las aulas), los cuales no deberían afectar las condiciones auditivas del ambiente (Figura 20).

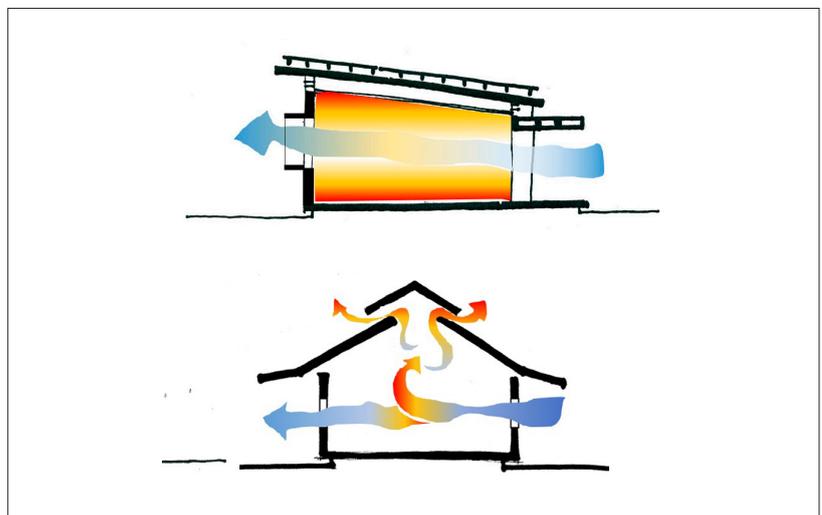
Como se demostró, la mayoría de las alternativas bioclimáticas logran mejorar el desempeño térmico, sin embargo, con su implementación no siempre se alcanza el confort en los momentos más críticos del día, con temperaturas máximas en el



18



19



20

Figura 18
(Izquierda) Grupo 1. Dimensión de las ventanas en relación con el área del salón. (Derecha) Dimensión de ventanas t T_o máxima. Fuente: elaborado para la investigación.

Figura 19
(Arriba) Rotaciones de fachada. (Abajo) Sombreado exterior. Fuente: elaborado para la investigación.

Figura 20
(Arriba) Ventilación natural. (Abajo) Ventilación por desplazamiento convectivo. Fuente: elaborado para la investigación.

cuartil 3, entre 30,5 y 31 °C. Sin embargo, las alternativas con mejor desempeño que podrían aplicarse en ese caso serían las de cubierta metálica con cámara de aire, envolvente con masa térmica y rotación adecuada. Las demás alternativas pueden alcanzar el confort en los cuartiles 1 y 2.

Si bien, en el marco del proceso de diseño bioclimático, es ideal incorporar las pautas de diseño desde el inicio de la etapa de concepción del proyecto, para que el desarrollo sea integral y coherente, la mayoría de las recomendaciones anteriores se pueden aplicar a espacios educativos existentes, con el fin de mejorar las condiciones de confort.

Las estrategias desarrolladas forman parte del universo de la arquitectura bioclimática pasiva. Otras estrategias que se requieran desde el confort térmico, manejos más específicos como las chimeneas solares, extractores solares o eólicos, enfriamiento evaporativo o sistemas mixtos, implican un abordaje integral con arquitectura e ingeniería, ya que sobrepasa el saber específico arquitectónico.

Conclusión

El presente trabajo expone una serie de metodologías, herramientas y estudios previos para determinar el confort térmico, específicamente en aulas escolares en clima tropical. En cuanto al apoyo al proceso de diseño y verificación a través del modelo simulado, es necesario avanzar en análisis mediante diferentes aplicaciones de computadora destinadas al contexto cálido y tropical, con espacios naturalmente ventilados y en relación estrecha con las condiciones climáticas exteriores.

El diseño de aulas en el trópico requiere de mayor aplicación de estrategias de diseño, que implican no solo ventilación cruzada, protecciones, sombreado y orientación; sino que requiere además el apoyo de técnicos de expertos en el tema para una mayor exploración de los fenómenos de ventilación forzada, y otros de carácter semi-pasivos para proveer confort. Estas estrategias deben ser involucradas desde el inicio del proceso de diseño, para proporcionar edificios estéticamente adecuados a las condiciones del contexto.

El diseño de las aulas debe ser abordado con una visión integral del proceso, desde las etapas tempranas en el que participen todos los actores involucrados –rectores, maestros, encargados del mantenimiento, arquitectos diseñadores y gestores–, y en el que intervengan todos los temas de confort ■

> REFERENCIAS

- ASHRAE. (2017). *Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Georgia: ANSI/ASHRAE.
- ASHRAE. (2013). *Standard 55-2013 user's manual: thermal environmental conditions for human occupancy*. Georgia: ANSI/ASHRAE.
- ASHRAE. (2005). Thermal Comfort [p. 29]. En *ASHRAE Handbook-Fundamentals*. Georgia: ANSI/ASHRAE.
- Bruni Celli, J. F., Aguirre Ledezma, N., Murillo Torrecilla, F. J., Díaz Díaz, H., Fernández Ludeña, A. y Barrios Yaselli, M. (2008). *Una Mejor Educación Para Una Mejor Sociedad. Propuestas Para El Diálogo y La Transformación Educativa En América Latina y El Caribe*. [Archivo PDF]. Madrid: Federación Internacional de Fe y Alegría. Recuperado de <https://www.feyalegría.org/biblioteca/>
- Cengel, Y. y Boles, M. A. (2009). *Termodinámica*. Buenos Aires: McGraw-Hill.
- de Dear, R. J. y Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, (104), pp. 1-18.
- Evans, J. M. (2007, setiembre). The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design. [Tesis doctoral]. [Archivo PDF]. Londres: TUDelft Library. Recuperado de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A5a12f90e-2e07-4ba7-b21f-1da81c5c523a>
- Evans, J. M. y de Schiller, S. (1994). *Diseño bioambiental y arquitectura solar*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Fanger, P. O. (1972, setiembre). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. [Archivo PDF]. *Applied Ergonomics*, 3(3), p. 181. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(72\)80074-7](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(72)80074-7)
- Fanger, P. O. y Toftum, J. (2002). Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. [Archivo PDF]. *Energy and Buildings*, 34(6), pp. 533-536. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8)
- Gamboa, J. D., Rosillo, M. E., Herrera, C. A., López, O. e Iglesias, V. (2011). *Confort Ambiental en vivienda de interés social en Cali*. Cali: Universidad del Valle.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- Gómez-Azpeitia, G., Bojórquez Morales, G. y Pável Ruíz Torres, R. (2013). El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados. *Palapa*, 2(1), pp. 45-57.
- Gonzalo, G. E. (2003). *Manual de arquitectura bioclimática*. Buenos Aires: Nobuko.
- Groat, L. N. y Wang, D. (2013). *Architectural research methods*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación-ICONTEC. (2015). Norma Técnica Colombiana NTC 4595: Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares. [Archivo PDF]. *ICONTEC*, (57). Recuperado de https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf
- Koenigsberger, O. H., Mahoney, C. y Evans, J. M. (1970). *Climate and House Design*. Nueva York: Naciones Unidas.
- Konya, A. (1980). *Design primer for hot climates*. Nueva York: The Architectural Press.
- Krüger, E. L. y Zannin, P. H. T. (2004). Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. *Building and Environment*, 39(9), pp. 1055-1063.
- Montoya Flórez, O. L. (2020). *La arquitectura del aula para el trópico. Principios de diseño pasivo para edificaciones eficientes*. La Plata: FAU/UNLP.
- Nicol, F., Humphreys, M. y Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Londres: Routledge.
- Olgay, V. (1963). *Clima y Arquitectura en Colombia*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Ramírez Potes, F. (2009). Arquitectura y pedagogía en el desarrollo de la arquitectura moderna. [Archivo PDF]. *Revista Educación y Pedagogía*, 21(54), pp. 29-65. Recuperado de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/revistaeyp/article/view/9779>
- San Juan, G. A. (2013). *Diseño bioclimático como aporte al proyecto arquitectónico*. [Archivo PDF]. La Plata: EDULP. Recuperado de <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/153/133/421-1>
- San Juan, G. A., Hoses, S. y Martini, I. (2014). *Environmental Audit and Comfort Levels in Educational Institutions*. [Archivo PDF]. Washington DC: Inter-American Development Bank/BID-Education. Recuperado de <https://publications.iadb.org/en/learning-twenty-first-century-schools-note-5-environmental-audit-and-comfort-levels-educational>
- Serra, R. (1999). *Arquitectura y climas*. Barcelona: Gustavo Gili.

Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T. y Hoyt, T. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: online tool for thermal comfort calculations and visualizations. [Archivo PDF]. *SoftwareX* 12, 100563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>

Trebilcock, M. (2009, julio/diciembre). Proceso de Diseño Integrado: nuevos paradigmas en arquitectura sustentable. [Archivo PDF]. *Arquitectura Revista*, 5(2), pp. 65-75. DOI: <https://doi.org/10.4013/arq.2009.52.01>

UNESCO. (2021). La educación en situaciones de crisis. [En línea]. Recuperado de <https://es.unesco.org/themes/educacion-situaciones-tesis>

Wu, W. y Ng, E. (2003). A review of the development of daylighting in schools. [Archivo PDF]. *Lighting Research and Technology*, 35(2), pp. 111-125. DOI: <https://doi.org/10.1191/1477153503li072oa>

Yannas, S. (1994). *Design of educational Buildings*. Londres: Architectural Association Graduate School.

Yeang, K. (2000). *Proyectar con la naturaleza*. Barcelona: Gustavo Gili.

Zapata Rueda, C. M., Viegas, G. M., San Juan, G. A., Ramos Calonge, H., Coronado Ruiz, J. A., Ochoa Villegas, J., ..., y Montoya Flórez, O. L. (2018). Comodidad ambiental en las aulas escolares. Incidencia en la salud docente y en el rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali. Universidad de San Buenaventura; Universidad de La Salle. Universidad Nacional de La Plata. Universidad de San Buenaventura. Proyecto COLCIENCIAS. Recuperado de <http://editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>