

Comunicación

Revisión Crítica de Criterios de Calidad en el Ambiente Interior: Hacia recomendaciones y directrices de investigación

Guillen Gutierrez, Guido

guillen.guido@fadu.uba.ar

Universidad de Buenos Aires (UBA). Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU). Centro de Investigación Hábitat y Energía). Buenos Aires, Argentina. Ciudad.

Palabras clave

Calidad Ambiental Interior (IEQ), Confort ambiental, Hardware abierto, Efectos combinados.

Resumen

Este trabajo investiga la complejidad de la calidad ambiental interior (IEQ) y su influencia en la percepción y comportamiento de los ocupantes en entornos construidos. A través de la revisión de literatura especializada, se analizan las interacciones entre factores ambientales como la acústica, la temperatura y la iluminación, y su impacto directo en la satisfacción y bienestar de los usuarios. La investigación subraya la importancia de enfoques multidisciplinarios que integren psicología, ingeniería y arquitectura para desarrollar una comprensión holística de cómo estos factores afectan la experiencia de los usuarios.

El estudio se centra en las métricas que interrelacionan diferentes aspectos del confort ambiental, específicamente la ventilación, la iluminación y el confort térmico. Además, se exploran propuestas de modelos de confort personalizados, que utilizan datos fisiológicos y ambientales para predecir preferencias

individuales, facilitando una mayor personalización del confort en espacios compartidos.

La incorporación de tecnologías de monitoreo y análisis de datos se presenta como una estrategia clave para mejorar la comprensión de las dinámicas de confort y satisfacción en entornos construidos. Finalmente, se argumenta que la investigación futura debe centrarse en el desarrollo de estándares de IEQ auditables y basados en evidencia, junto con directrices claras que promuevan el bienestar y la sostenibilidad en los espacios construidos. Este enfoque integral no solo busca promover la mejora en la calidad de vida de los ocupantes, sino también contribuir a la eficiencia energética y la sustentabilidad en el hábitat construido.

Introducción: ¿Por qué es importante la calidad ambiental interior?

Las personas pasan cerca del 90% de su tiempo en ambientes interiores, donde se encuentran expuestos a una multiplicidad de estímulos: térmicos, visuales, acústicos y calidad del aire. Ha sido ampliamente estudiado cómo la calidad ambiental interior afecta la forma en que las personas perciben el ambiente, sus comportamientos, su salud, y su desempeño.

Es ampliamente aceptado que el confort usuario, o la calidad ambiental interior (IEQ)¹, consiste en cuatro parámetros básicos: el confort térmico, la calidad del aire, el confort visual y el confort acústico. Alcanzar buenos niveles de IEQ no solamente tiene efectos en la salud de los ocupantes, si no que también está relacionado con la prevención del síndrome del edificio enfermo², u otras enfermedades.

Adicionalmente, existe un interés creciente en reducir el consumo de energía, y el IEQ está directamente relacionado ya los usuarios son los principales factores que influyen en las necesidades energéticas de un edificio debido a su comportamiento y hábitos de uso.

Definición y factores que inciden en el IEQ

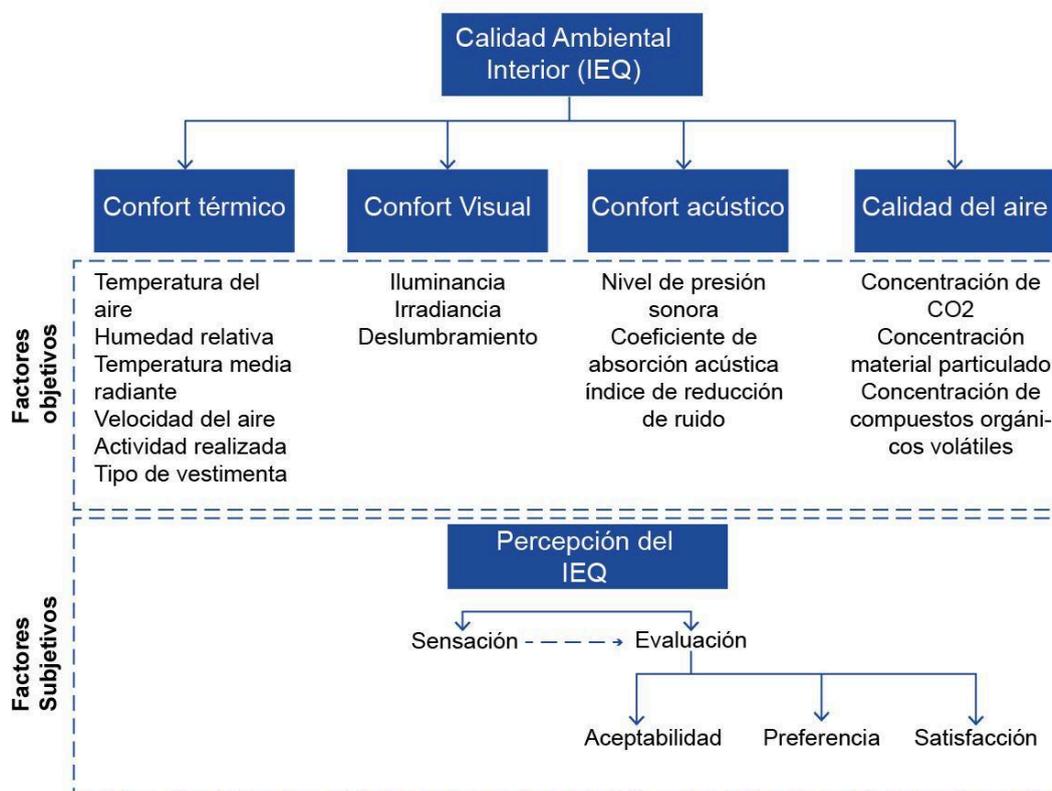
Principalmente, un modelo de IEQ es una herramienta de evaluación para conocer la calidad de un espacio interior. Los factores que afectan la calidad

¹IEQ por sus siglas en inglés (Indoor Environmental Quality)

² Una condición que afecta a trabajadores de oficina, normalmente asociado con dolores de cabeza o problemas respiratorios, atribuidos a factores insalubres en el entorno laboral como, por ejemplo, la falta de ventilación.

ambiental interior y la satisfacción de los usuarios se pueden dividir en factores físicos y factores no físicos. Los primeros suelen constar de cuatro partes: confort térmico, confort visual, confort acústico y calidad del aire. Estos pueden evaluarse mediante parámetros cuantificables. Los factores no físicos generalmente se refieren a aquellas cualidades interiores que son difíciles de medir con instrumental, como por ejemplo la distribución del espacio, el mobiliario, la limpieza y la vista. Debido a la capacidad de ser cuantificados, los factores físicos se analizaron con mayor frecuencia en los estudios anteriores, en comparación con los factores no físicos. Por lo tanto, se revisan principalmente estudios sobre factores físicos (Ver Figura 1).

Figura 1. Factores que inciden en el IEQ



Fuente: autor

Confort térmico

Según la norma ASHRAE 55-2004, el confort térmico puede definirse como "la condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico". Dentro del campo de estudios del confort térmico, dos grandes modelos han sido utilizados para entender científicamente y poder predecir el confort térmico.

El primer modelo para cuantificar el confort térmico es análogo a la metodología para estimar la cantidad de refrigeración/calefacción necesaria en un edificio, en el que la relación entre el usuario y la temperatura interior está definida por un balance entre el calor metabólico del cuerpo, por un lado, y la transferencia de ese calor al espacio interior a través de la convección, conducción o radiación. Este es el modelo del Voto Predictivo Medio (PMV por sus siglas en inglés), desarrollado por Fanger (1970), y se utiliza tanto en edificios nuevos como en reacondicionados. Es el más utilizado de los modelos de confort térmico, ya que se emplea en estándares para edificios acondicionados mecánicamente, como ASHRAE 55-202, ISO 7730 y EN 16798-1. El PMV predice la sensación térmica promedio de un grupo de individuos, basado en un balance térmico. Dentro de ese balance térmico se tienen en cuenta 6 variables: dos son humanas (tasa metabólica según la actividad y tipo de ropa), y cuatro provienen del entorno (temperatura del aire, temperatura media radiante, velocidad del aire y humedad relativa). Las métricas obtenidas son dos: El Voto Predictivo Medio (PMV), y el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD, por sus siglas en inglés), que muestra en porcentaje la cantidad de personas que pueden sentirse por fuera de los parámetros de confort. Si bien este modelo se desarrolló en cámaras climáticas cerradas y fue pensado para ambientes acondicionados artificialmente, su influencia ha sido mucho mayor, y se han trasladado sus criterios de evaluación a edificios de diversas tipologías y en multiplicidad de climas.

Sin embargo, este modelo de confort térmico ha encontrado dificultades para predecir la sensación de confort en varios climas y tipologías, especialmente en aquellos ubicados en climas cálidos y ventilados naturalmente. A lo largo de las décadas se han ido desarrollando versiones para perfeccionar estas inconsistencias (Fanger, Totum, 2002). La forma más común de modificar el PMV es a través de la incorporación de coeficientes o constantes sacadas por medio de encuestas destinadas a tipologías o climas antes no investigados. Reflejo de estos trabajos se puede mencionar el PMV extendido (ePMV), el PMV nuevo (nPMV), o el PMV adaptativo (aPMV) (Yao et. al, 2009). Estos modelos mantienen el procedimiento de cálculo, pero corrigen la diferencia entre el resultado y la encuesta con un coeficiente.

Son muchos los estudios que muestran discrepancias, en ocasiones graves, entre el Voto Predictivo Medio y la sensación térmica real. Generalmente, estas diferencias están atribuidas a la capacidad adaptativa que poseen los edificios reales, como, por ejemplo: la costumbre del usuario a cierta temperatura, el ajuste del comportamiento o la modificación del entorno (Wu et. al. 2019). La simplificación del confort térmico en un modelo como el balance térmico puede ser otra de las causas de su falta de precisión. Por último, la imposibilidad de incorporar otras variables más allá de las preestablecidas genera limitaciones al momento de pensar en otros factores relevantes, por ejemplo, género, contextura corporal u horario del día.

El modelo alternativo de confort es el denominado “confort adaptativo”, y se asocia más con la arquitectura y las ciencias que estudian el desempeño ambiental edilicio. Ubica al confort térmico dentro de un relativismo centrado en la percepción del usuario (de Dear et al., 2020). El crecimiento del uso de este modelo está relacionado con: en primera medida, la creciente crisis climática, y la concientización de que el sector edilicio juega un factor fundamental en el consumo energético y, por ende, en la mitigación de las consecuencias que trae consigo el cambio climático³. Otro factor importante del crecimiento de este modelo teórico ha sido el fallo del modelo de Fanger para adaptarse a un abanico amplio de climas y tipologías edilicias.

Sin embargo, el modelo adaptativo también cuenta con desventajas: la principal, y la más señalada, es que este modelo está basado en análisis estadísticos de estudios de campo, es decir, una “caja negra” solo visible en términos de resultados, pero sin conocimiento de su comportamiento interno. A pesar de que a lo largo de los años diversos estudios han tratado de proveer evidencia que explique las bases del modelo, todavía no se han llevado a cabo grandes contribuciones.

Una de las ventajas de este modelo es reflejar la capacidad del usuario de, cuando existe la posibilidad, modificar su entorno para alcanzar el confort. Es por eso muy importante contar con un abanico de posibilidades para que los usuarios interactúen con el edificio y logren así, el confort deseado.

Con respecto a las tipologías, se suele pensar que el confort adaptativo funciona mejor en tipologías residenciales, principalmente porque existe una mayor capacidad del usuario para modificar su entorno (ya sea su ropa o elementos de protección solar como persianas o cortinas). También se ha demostrado que los residentes en climas cálidos suelen ser más sensibles a las temperaturas exteriores que los residentes en climas fríos. Las características arquitectónicas también influyen dentro del confort: aquellos residentes en entornos rurales tienden a poseer un rango de confort mayor, atribuido al estilo debido, pero sobre todo a las características de las viviendas tradicionales donde habitan (generalmente construidas con mayor conciencia de las características climáticas).

Es importante señalar también que, a lo largo de las décadas, el rango de confort térmico se ha ido estrechando. Esto probablemente se base en el hecho de que el acostumbramiento a edificios acondicionados produce una expectativa más acotada de lo que se considera confortable. En este punto, el modelo adaptativo también cuenta con una ventaja sobre el modelo del PMV, ya que permite identificar estas problemáticas y los comportamientos de los ocupantes en relación con el clima interior (de Dear et al., 2020).

Confort Visual

³ Las emisiones de carbono atribuibles a la refrigeración de espacios se han triplicado desde 1990 hasta el año 2016.

El confort visual está definido como la condición de bienestar subjetiva provocada por el entorno visual. Si bien la definición introduce la variable psicológica en el confort visual, existen una serie de propiedades físicas y métricas que permiten cuantificar la calidad visual de una manera objetiva.

Confort acústico

Si bien la definición de este término podría indicarse como el bienestar provocado por las condiciones acústicas, normalmente el confort acústico está más relacionado con la ausencia de discomfort (existencia de ruido). La calidad del sonido está relacionada con varios fenómenos físicos, que incluyen tanto las características físicas del sonido como las características físicas del ambiente. La característica del sonido está dada tanto por la frecuencia de onda, y las características del ambiente están dadas según la absorción, reverberación y aislación del sonido (Cowan, 1994).

Calidad del Aire

La calidad aceptable del aire está definida como aquel en donde no se presentan contaminantes en cantidades peligrosas y en el que la mayoría de las personas no presentan insatisfacción (entendiendo mayoría como mayor al 80%).

Con respecto a la jerarquización de cada uno de estos componentes, la literatura especializada sugiere que el confort térmico es normalmente considerado como el factor más importante al momento de lograr calidad ambiental interior.

Por último, darle al usuario la posibilidad de controlar el ambiente mejora el confort térmico y visual, como también la satisfacción general con la calidad del aire, por lo que es necesario brindar las herramientas para una interacción con el entorno.(Frontczak & Wargocki, 2011)

Metodología: ¿De qué manera se puede lograr un sensor auditable, compacto y reproducible para medir los parámetros físicos del IEQ?

La idea fue desarrollar un sistema de hardware que sea expandible y pueda a su vez la capacidad de recopilar datos. De esta forma, se decidió por el desarrollo de un sensor de hardware abierto⁴. El prototipo se basa en un microcontrolador (Arduino), con una serie de sensores específicos conectados. Estos sensores tienen como objetivo medir los parámetros físicos asociados con el IEQ (confort térmico, calidad del aire, confort térmico y acústico). El

⁴ El hardware abierto (OH por sus siglas en inglés), es un término que “denomina artefactos tangibles – máquinas, dispositivos, u otros objetos del mundo físico – cuyo diseño ha sido publicado de forma tal que cualquier persona pueda fabricar, modificar, distribuir y usar esos objetos” (OSHWA, 2010)

confort térmico se mide a través de la temperatura del aire (en grados Celsius) y humedad relativa (en porcentaje). La calidad del aire interior se mide a través de la concentración de CO₂ (en partes por millón). El confort visual se mide a través de la iluminancia (en lux). El confort acústico se mide a través del nivel de ruido (en decibeles). La siguiente tabla resume las categorías de confort incluidas, el parámetro físico y la unidad de medida (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Dimensiones del confort, métricas de medición y unidades.

Categoría de Confort	Parámetro Físico	Unidad
Confort Térmico	Temperatura del aire	°C
	Humedad Relativa	%
Calidad de aire interior	Concentración de Co2	ppm
Confort Visual	Iluminancia	Lux
Confort acústico	Nivel de ruido	dBA

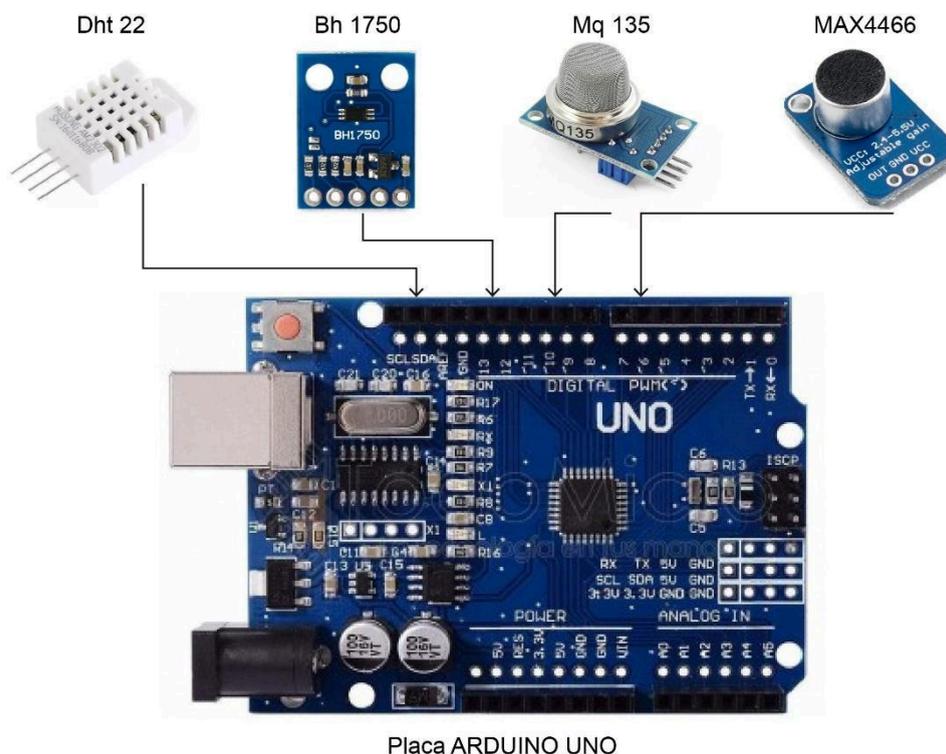
Fuente: autor.

La placa de Arduino UNO, y los sensores Dht22 (temperatura y humedad relativa), Bh1750 (iluminancia), Mq135 (Co2) y MAX4466 (decibeles) fueron adoptados como el hardware necesario para el desarrollo del sistema de medición (Ver Tabla 2 y Figura 1).

Tabla 2. Parámetros físicos medidos y sensores utilizados

Parámetros Físicos	Sensor
Temperatura del aire	Dht 22
Humedad Relativa	Dht 22
Iluminancia	Bh 1750
Co2	Mq 135

Fuente: autor.

Figura 1. Estructura del hardware del sensor de IEQ.

Fuente: autor

Junto con estos sensores, otro tipo de sensores también deben ser utilizados, como por ejemplo los cables de conexión entre las placas, un cable USB para alimentación de energía de 5 V, un sensor para registrar el horario de las mediciones y una placa que permita guardarlas en una tarjeta SD.

Por otro lado, la consideración subjetiva de confort se recolecta a través un cuestionario, que se divide en dos partes: información básica, y categorías de confort en la última hora. El cuestionario se realiza adoptando el método de evaluación de post-ocupación (Lamberts, et al. 2024). El rango de respuestas varía del 1 al 5, donde 1 es “muy pobre” y el 5 es “muy bueno”.

Cuestionario IEQ

Información básica

Género: Masculino | Femenino | No binarie

Edad: 20-25 | 26-30 | 30-35 | 35-40 | 40-45 | 50+

Categorías de confort en la última hora

a- ¿Cómo evaluas el confort térmico?

MUY POBRE 1 | 2 | 3 | 4 | 5 MUY BUENO

b- ¿Cómo evalúas la calidad del aire?

MUY POBRE 1 | 2 | 3 | 4 | 5 MUY BUENO

c- ¿Cómo evalúas el confort visual?

MUY POBRE 1 | 2 | 3 | 4 | 5 MUY BUENO

d- ¿Cómo evaluás el confort acústico?

MUY POBRE 1 | 2 | 3 | 4 | 5 MUY BUENO

Con respecto a la forma de interrelacionar las variables, el modelo más empleado en la literatura es el de regresión lineal múltiple (RLM) (Humphreys, 2005). El análisis de regresión lineal múltiple (RLM) se utiliza para estudiar la relación lineal entre una variable dependiente y múltiples variables independientes. Se puede usar para entender los efectos de las variables independientes sobre la dependiente o para predecir el valor de la dependiente. Estudios previos sobre índices de confort han aplicado MLR para desarrollar un índice global de confort interior (IGCI) (Buratti et al, 2018;). La forma de generalizar la fórmula es la siguiente:

$$IGCI = c + W1 I1 + W2 I2 + \dots + Wn In$$

Donde c es la constante, I son las diferentes categorías del confort, y W es la incidencia que tiene cada categoría en el confort global. A través de este modelo, el objetivo del estudio es desarrollar un Modelo predictivo de índice de confort global, con base en la medición de los parámetros físicos del ambiente.

Conclusiones: ¿de qué forma se puede mejorar el modelo?

Gran variedad de estudios subraya la necesidad de desarrollar un modelo comprensible, auditable y genérico para evaluar el IEQ. Muchos modelos no tienen un proceso adecuado de validación, lo que produce dificultad su adecuación a otras condiciones. También es necesario investigar el efecto combinado de varios parámetros y explorar las diferencias culturales, de género, demográficas e individuales.

Por otro lado, el IEQ puede contribuir a reducir el consumo de energía y es necesario comprender los hábitos y patrones de conducta que influyen en este consumo.

BIBLIOGRAFÍA (se mencionan los trabajos más relevantes)

- ANSI/ASHRAE, (2020) *ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA.
- ATTIA, J.L.M. HENSEN, L. BELTRÁN, A.D. HERDE (2012), *Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs*. Build. Perform. Simul. 5 155–169, <https://doi.org/10.1080/19401493.2010.549573>
- BURATTI, C.; BELLONI, E.; MERLI, F.; RICCIARDI, P (2018). A new index combining thermal, acoustic, and visual comfort of moderate environments in temperate climates. Build. Environ, 139, 27–37.
- CHEUNG, T; et. Al (2018)., *Development of the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II*, Build Environment 142 (2018) 502–512.
- COWAN JP (1994). *Handbook of environmental acoustics*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- DE DEAR, R., XIONG, J., KIM, J., & CAO, B. (2020). *A review of adaptive thermal comfort research since 1998*. Energy and Buildings, 214, 109893. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>
- DU, H. et al (2022)., *Evaluation of the Accuracy of PMV and Its Several Revised Models Using the Chinese Thermal Comfort Database*. Energy and Buildings 271. Elsevier.
- FANGER, O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Application in Environmental Engineering*. Danish technical press, Copenhagen, 1970
- FANGER, P.O; TOFTUM, J. (2002) *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*, Energy Build. 34 (6) 533–536.
- FRONTCZAK, M., & WARGOCKI, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. Building and Environment, 46(4), 922–937. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
- FRONTCZAK, S. SCHIAVON, J. GOINS, E. ARENS, H. ZHANG, P. WARGOCKI (2012) *Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design*, Indoor Air 22119–131
- HUMPHREYS, M.A; J.F. NICOL (2002). *The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments*, Energy Build. 34 (6)
- HUMPHREYS, M.A. (2005). *Quantifying occupant comfort: Are combined indices of the indoor environment practicable?* Build. Res, 33, 317–325.
- IEA (2018) *The future of cooling, Opportunities For Energy Efficient Air Conditioning*, IEA Publications France
- ISO (2005), *ISO 7730: Ergonomics of the Thermal Environment Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*, International Organization for Standardization, Geneva.
- KIM, J., ZHOU, Y., SCHIAVON, S., RAFTERY, P., & BRAGER, G. (2018). *Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning*. Building and Environment, 129, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.011>

- KO, W. H., SCHIAVON, S., BRAGER, G., & LEVITT, B. (2018). *Ventilation, thermal and luminous autonomy metrics for an integrated design process*. *Building and Environment*, 145, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.038>
- LAMBERTS R.; CASTRO L., DE VECCHI R.M (2024): Design process for an occupant survey system to assess satisfaction with indoor environmental quality, *Building Research & Information*
- LI, P. T. PARKINSON, G. BRAGER, S. SCHIAVON, T.C.T. CHEUNG, T. FROESE (2019), *A data-driven approach to defining acceptable temperature ranges in buildings*, *Build Environ* 153 (2019) 302–312.
- LUO, M., J. XIE, Y. YAN, Z. KE, P. YU, Z. WANG, J. ZHANG (2020), *Comparing machine learning algorithms in predicting thermal sensation using ASHRAE Comfort Database II*, *Energy Build* 210
- MACKEY, C. (2015), *Pan climatic Humans: Shaping thermal Habits in an Unconditioned Society*, Master thesis Massachusetts Institute of Technology,
- O'BRIEN, W., GAETANI, I., CARLUCCI, S., HOES, P.-J., & HENSEN, J. L. M. (2017). *On occupant-centric building performance metrics*. *Building and Environment*, 122, 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.028>
- QUINTANA, M., SCHIAVON, S., TARTARINI, F., KIM, J., & MILLER, C. (2023). Cohort comfort models—Using occupant's similarity to predict personal thermal preference with less data. *Building and Environment*, 227, 109685. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109685>
- REFFAT, R.M.; HARKNESS, E.L. Environmental comfort criteria: Weighting and integration. *J. Perform. Constr. Facil.* 2001, 15, 104–108
- REINHART, C.F., J. MARDALJEVIC, Z. ROGERS (2006), *Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design*, *Leukos* 3
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.
- VALE, B. VALE, R. (2000) *The New Autonomous House: Design and Planning for Sustainability*, Thames & Hudson London,
- YAO, R. B. LI, J. LIU. (2009) *A theoretical adaptive model of thermal comfort Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)*, *Build Environ* 44 (10) 2089–2096.