CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO DEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD

IRENE MARINCIC, JOSÉ MANUEL OCHOA Y JESÚS ANTONIO DEL RÍO

ACE: Architecture, City and Environment = Arquitectura, Ciudad y Entorno [en línea]. 2012, Año 7, núm. 20 Octubre P. 27-46

ISSN: [1886-4805](http://www.issn.org/1886-4805)

Website access: http://www-cpsv.upc.es/ace/Articles_n20/articles_pdf/ACE_20_SA_11.pdf

UPCommons Access: <http://hdl.handle.net/2099/12640>

ACE

Architecture, City, and Environment
Arquitectura, Ciudad y Entorno

C

ADAPTIVE THERMAL COMFORT CONSIDERING TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY

Key words: adaptive thermal comfort, hot dry climate, low-cost dwellings.

Abstract

The current demand for housing in developing countries has led to the construction of low-cost housing designed in any climate without regional adaptation, which usually causes low comfort levels and high energy consumptions. Indoor thermal variables have been measured and field surveys have been applied to occupants of low-cost housing in hot dry climate. Here, we analyze the data to evaluate the habitability of the houses. Neutral temperature and comfort range for the population adapted to the local climate are obtained.

A model to predict the thermal sensations of people acclimated to similar conditions, depending on the temperature and relative humidity, is proposed. The model has good statistical agreement with the surveys. The knowledge of thermal comfort conditions for specific climates and population allows the design of more comfortable buildings. To express these conditions as a function of temperature and relative humidity helps architects to directly relate the comfort conditions with passive thermal strategies for buildings.

CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO DEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD

MARINCIC, Irene¹
OCHOA, José Manuel²
DEL RÍO, Jesús Antonio³

Remisión inicial: 06-12-2011

Remisión definitiva: 4-05-2012

Palabras clave: confort adaptativo, clima cálido seco, viviendas económicas.

Resumen

La actual demanda de vivienda en países en vías de desarrollo, ha propiciado la construcción de casas económicas con diseño inadecuado para las condiciones climáticas regionales, lo cual provoca que sean poco confortables, además de que consumen mucha energía. En este trabajo se analizan datos de encuestas y mediciones para obtener el grado de habitabilidad de viviendas económicas en clima cálido seco. Para evaluarlo, se calcula la temperatura de neutralidad, y el rango de confort para la población que está adaptada al clima local.

En el presente estudio se propone un modelo para predecir las sensaciones térmicas de personas aclimatadas a condiciones similares a las del estudio, en función de la temperatura y la humedad relativa. El modelo tiene una buena concordancia estadística con las encuestas de habitabilidad presentadas.

Conocer las condiciones específicas de confort térmico para cada clima y tipo de población, favorece el diseño de edificaciones más habitables. Expresar estas condiciones en función de la temperatura y la humedad relativa, facilita a los arquitectos relacionar directamente las condiciones de confort con estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental para edificios.

¹ **Irene Marincic:** Dpto. de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Encinas y Rosales, 83000 Hermosillo, Son., México. E-mail: imarincic@arq.uson.mx.

² **José Manuel Ochoa:** Dpto. de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Encinas y Rosales, 83000 Hermosillo, Son., México. E-mail: jmochoa@arq.uson.mx.

³ **Jesús Antonio del Río:** Centro de Investigación en Energía y Centro de Ciencias de la Complejidad, U.N.A.M., Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Mor., México. E-mail: antonio@servidor.unam.mx

1. Introducción

La creciente demanda de vivienda en México, y en el mundo, provoca la necesidad de construirla de forma rápida y económica. Esto impulsa a los desarrolladores inmobiliarios a reducir cada vez más los espacios e invertir menos recursos en materiales y mano de obra.

La construcción de vivienda ha tenido un fuerte impulso por parte de instituciones y organismos del gobierno federal, estatal y municipal, ya que es primordial satisfacer la creciente demanda de la población, particularmente de la de más bajos ingresos, lo que ha propiciado la construcción de vivienda económica (Estado actual de la vivienda en México 2011, 2011). Los programas de crédito limitan, desde el punto de vista financiero, los costos máximos de vivienda para los diferentes niveles adquisitivos de la población, mediante los llamados cajones de crédito. En muchos casos, esto hace que la calidad de las construcciones en general, su habitabilidad y el diseño acorde al clima del lugar y energéticamente eficiente, no sean una prioridad para los desarrolladores.

Frecuentemente, en México se construyen viviendas en serie, carentes de características regionales, y que por lo tanto, no se adaptan al medio en el que se encuentran. De esta manera, se pueden observar casas semejantes, tanto en los climas más extremos como el de la ciudad de Hermosillo, con clima cálido seco, como en otras ciudades de clima cálido húmedo como Mérida al Sureste, o en clima templado, como la Ciudad de México. Todo esto se traduce en altos consumos de energía por climatización, o bien, una calidad de vida deficiente para la población que las habita (Marincic et al., 2010).

La construcción de viviendas poco eficientes agrava todavía más otro de los grandes problemas que se presenta en México y en el mundo: la crisis energética. El inadecuado diseño de viviendas en relación con el clima, provoca que estas sean incómodas y grandes consumidoras de energía. La optimización del diseño arquitectónico para buscar un comportamiento térmico con resultados más eficientes, no sólo favorece el confort de los ocupantes, sino que repercute notablemente en el ahorro de energía destinada a climatización, sobre todo en lugares donde las condiciones climáticas son extremas. En estas regiones se ha observado que la zona de confort no es necesariamente la misma a la reportada en la normatividad utilizada internacionalmente (ASHRAE, 2004; IOS, 2005), y en la bibliografía clásica (Olgyay, 1963 y Givoni, 1969), o sea, que esta puede ser distinta para una diversidad de regiones a lo largo del planeta. Para climas cálidos la temperatura de confort o de neutralidad puede ser más elevada, y en particular para climas cálidos secos, que se caracterizan por tener grandes oscilaciones de temperatura, el rango de confort puede ser más amplio. Por esta razón, es necesario determinar los límites de las condiciones de confort específicos para la población y clima local, a fin de determinar las condiciones óptimas para la climatización, y no basarse en estándares obtenidos para otros climas y situaciones.

En este estudio se presenta información obtenida a través de mediciones y de varias encuestas aplicadas en viviendas económicas en la ciudad de Hermosillo (Romero et al., 2009). Dicha investigación incluye características de los usuarios y de las viviendas; mediciones de las condiciones térmicas en el interior y percepción sobre diferentes aspectos de las mismas por parte de los usuarios, particularmente en lo que se refiere a confort térmico en el interior. Los objetivos de este trabajo son, por un lado, cuantificar qué tan habitables son las viviendas

económicas desde el punto de vista térmico, en relación con sus ocupantes y con el medio donde se construyen, en este caso en clima cálido seco. Para esto, se determinan las condiciones de confort termohigrométrico para la población y clima específicos, para ser relacionadas con las sensaciones térmicas de todas las personas del caso estudiado. Por otro lado, se plantea un modelo de predicción que permite estimar la sensación térmica con base en la temperatura y la humedad relativa, válido para climas y poblaciones similares a los de este estudio.

2. Los modelos de confort

Los modelos de evaluación del confort térmico han evolucionado en las últimas décadas, adoptando principalmente dos enfoques: cuantitativo y adaptativo. Los modelos cuantitativos se basan en la transferencia de calor entre el ambiente y el cuerpo de las personas, y relacionan estos fenómenos con las sensaciones térmicas que estas experimentan. La condición para formular estos modelos es el estado estable, es decir, que los sujetos de estudio se encuentren por largo tiempo en un ambiente con condiciones térmicas casi constantes, por ejemplo, con aire acondicionado. Estos modelos, en general subestiman la capacidad, tanto de adaptación climática de las personas, como de efectuar cambios que mejoren su sensación de confort térmico. El enfoque adaptativo, introducido por Nicol y Humphreys (2002), logró conjuntar las características térmicas del ambiente y la transferencia de calor desde, y hacia el cuerpo humano, con la subjetividad del comportamiento de las personas. Este enfoque no sólo tiene en cuenta la interacción física entre el sujeto y el ambiente, sino que también su interacción psicológica y fisiológica largo plazo, incorporando los efectos de aclimatación y las decisiones que las personas pueden, y de hecho efectúan, para acercarse a las condiciones de confort. Tanto los autores mencionados como Brager, deDear, Auliciems y otros (Nicol y Humphreys, 2002), han trabajado sobre los modelos adaptativos, que tienen en cuenta las preferencias y expectativas de las personas.

Para abordar un estudio de confort con enfoque adaptativo, es necesario recabar, mediante una encuesta de campo, información sobre la sensación térmica de las personas en diferentes ambientes (votos), y relacionarlas con las variables térmicas en esos espacios, particularmente la temperatura de bulbo seco. Es decir, se aplicó una encuesta a parte de la población sobre su sensación de confort en ambientes interiores (generalmente), de este modo es posible estimar la temperatura de confort o de neutralidad T_n , que es la temperatura en la que el esfuerzo del cuerpo humano para lograr el confort térmico es mínimo. Con los datos de esta encuesta se calculan los límites del rango de confort, que abarcarían las condiciones térmicas bajo las cuales un número mayoritario de personas se encuentra confortable, considerando usualmente $T_n \pm 2^\circ\text{C}$.

Se ha demostrado, comparando resultados de los modelos adaptativos con los de cuantitativos, que las generalizaciones en los modelos, en cuanto a climas y preferencias térmicas de las personas, no es lo mejor para determinar las condiciones de confort, ya que estas dependen en gran medida del entorno y del contexto, por lo que es necesario determinar las condiciones de confort específicas para el clima y la población que se analiza. Para la utilización de estándares de confort, basados en modelos cuantitativos (como ISO 7730 o la

zona de confort de ASHRAE), sería necesario contar con conocimiento más preciso, con el fin de que estos puedan ser ajustados a las condiciones reales locales.

Los sistemas de control para aire acondicionado, generalmente funcionan con un rango de operación de entre 2°C por encima y por debajo de la temperatura fijada en el termostato. Para la determinación de la zona de confort usualmente se utiliza este mismo criterio, tomando $T_n \pm 2^\circ\text{C}$. Sin embargo, según estudios de confort adaptativo, la amplitud del rango de confort depende de las preferencias térmicas, que al igual que la T_n , debería ser variable (Bragger y De Dear, 1998) y estar influenciada, entre otros factores, por la región y la estación del año. De este modo sería más congruente con la sensación térmica real.

Desde otro punto de vista, las herramientas de análisis para la formulación de estrategias de diseño bioclimático en arquitectura, parten de los clásicos diagramas bioclimáticos de Olgyay (1963) y Givoni (1969) que incluyen la zona de confort, así como una indicación sobre las posibles estrategias arquitectónicas para acercarse a esta. Los datos locales de temperatura y humedad relativa incorporados a estos diagramas (gráfico de temperatura en función de humedad relativa, en el caso de Olgyay, o carta psicrométrica, en el caso de Givoni) dan indicaciones valiosas sobre los criterios de diseño para aplicarse en el clima específico donde se desarrollará un proyecto. Para efectos de diseño térmico, la clasificación de los climas, si son cálidos o fríos, secos o húmedos, facilita la elección de las estrategias de diseño. Se tiene en cuenta principalmente, la temperatura y la humedad relativa, aunque en los mencionados diagramas también intervienen (directa o indirectamente) la radiación solar y el viento. La representación gráfica es fundamental para que sea una herramienta útil para los arquitectos. No obstante, como el mismo Olgyay (1963) reconoce, la zona de confort puede variar con diferentes factores, como la aclimatación de la población, entre otros. También admite que la utilización de estos diagramas funciona mejor para edificios climatizados que para los naturalmente ventilados, esto se debe a su origen cuantitativo. Los conocidos estándares ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) e ISO 7730 (IOS, 2005), basados en estudios con el mismo planteamiento, presentan en su origen limitaciones similares. La zona de confort propuesta por ASHRAE ha sufrido sucesivas modificaciones en las que intervinieron diferentes autores como De Dear et al. (1997) y Givoni (1998). La ISO 7730, basada en el modelo de Fanger (1970) ha sido modificada por el mismo Fanger y otros, a fin de ajustarla a las respuestas reales de las personas. Si bien en la actualidad, tanto el enfoque cuantitativo como el adaptativo siguen vigentes, el primero se aborda en general con modificaciones que incorporan resultados de tipo adaptativo, ya sea formalmente, mediante encuestas, o empíricamente, ya que se reconoce la gran cantidad de variables que intervienen en la sensación de confort térmico y, en general, en el confort ambiental (Serra y Coch, 2005).

En el mundo, una gran cantidad de países de clima cálido, se encuentran en vías de desarrollo y frecuentemente no tienen posibilidades de utilizar climatización artificial. En esas circunstancias, la posibilidad de ventilación, así como la aclimatación de las personas, y en muchos casos, las expectativas en cuanto a sus condiciones de habitabilidad, hacen que la normatividad mencionada no se ajuste a las condiciones reales. Givoni ha hecho modificaciones a su diagrama bioclimático original, a fin de adaptarlo a otras condiciones sin uso de aire acondicionado, creando versiones de la zona de confort para países desarrollados y en vías de desarrollo (Givoni, 1998). Los estudios adaptativos, como se mencionó, son un modo de obtener resultados más reales acerca de la sensación térmica. Expresar los

resultados de estos estudios en función de una zona de confort dependiente de la temperatura y la humedad relativa puede ser más útil para el diseño bioclimático que en función sólo de T_n y su rango de confort.

En nuestra opinión, el enfoque adaptativo es la aproximación más adecuada para evaluar la sensación térmica en ambientes no climatizados. Algunos autores han hecho estudios adaptativos, expresándolos en función de la temperatura y otras variables climáticas, aunque no es lo más usual. Nikolopoulou et al. (2004) desarrollaron un modelo para estimar la sensación de confort en espacios exteriores urbanos, relacionándola con la temperatura del aire, la velocidad del viento, la radiación solar y la humedad relativa.

En el caso de los países en vías de desarrollo, con pocas posibilidades de climatización, la obtención de una zona de confort específica para el clima y el tipo de población estudiadas posibilita, por un lado, evaluar el grado de habitabilidad de las edificaciones desde el punto de vista térmico, teniendo en cuenta la zona de confort de la población local adaptada, y por otro lado, facilita la formulación de estrategias de diseño arquitectónico que puedan mejorar estas condiciones a través del diseño pasivo.

3. Estudio de caso: conjuntos de viviendas económicas en clima cálido seco

3.1 Los desarrollos inmobiliarios de viviendas económicas y sus ocupantes

En este trabajo se presentan estudios de confort térmico en diversos desarrollos inmobiliarios de vivienda económica en la ciudad de Hermosillo, México, construidos durante el período 2002-2005 (Proyecto CONAFOVI 2004-01-20, 2009). Se encontraron diez que fueron terminados con todos los servicios y que tenían, por lo menos, un año de estar habitados (Fig. 1). Se realizaron encuestas de diferente tipo, donde se recabó información sobre distintos aspectos de las viviendas y sus residentes, en nueve de estos conjuntos habitacionales, como muestra representativa en la ciudad.

Las casas donde se realizó el estudio son de una planta, con una superficie de construcción de $33,5 \text{ m}^2$ a 39 m^2 , según el modelo, y un área de lote que varía entre 117 y 122 m^2 . Todas ellas constan de una sala-comedor, un dormitorio, cocina y baño. En todos los casos cuentan también con un espacio exterior para aparcamiento. La orientación más habitual de las fachadas es según el eje Norte-Sur. Debido a restricciones de costo de las viviendas, la calidad de la construcción de las mismas, en la mayoría de los casos, no es aceptable. Ninguna de las construcciones se entrega con aislamiento térmico en la envolvente, ni dispositivos de sombra en las ventanas. En general no cuentan con sombreado exterior en las áreas habitables, ni en las fachadas, ni en el área de estacionamiento.

Figura 1. a) Imagen aérea de uno de los desarrollos estudiados y b) fachada de uno de los modelos de vivienda

Fuente: a) Google Earth y b) Elaboración propia.

Los desarrollos inmobiliarios estudiados corresponden a un programa gubernamental de vivienda económica dirigido a familias cuyo ingreso mensual está entre 95 y 380 € (al tipo de cambio de 18,4 pesos mexicanos / €, en el 2011), de ahí que el nivel económico de los trabajadores es bajo. La escolaridad máxima del jefe de familia es, en la mayoría de los casos, de secundaria (42%). Generalmente trabajan en la industria, en el comercio o en el sector servicios. La mayoría de las familias están integradas por parejas jóvenes o de mediana edad, con uno o dos hijos. El número más habitual de ocupantes es, por lo tanto, entre 3 y 4 habitantes por vivienda.

El origen de la mayor parte de esta población es la ciudad de Hermosillo o el estado de Sonora. Esto implica que los residentes están plenamente aclimatados a las rigurosas condiciones térmicas locales.

3.2 El clima y las condiciones interiores

Para comprender el contexto de la ciudad de Hermosillo, su ubicación y clima son determinantes. La ciudad se encuentra hacia el límite Sur del Desierto de Sonora, que abarca gran parte del estado de Sonora, en México, y Arizona, al Suroeste de Estados Unidos. Es una zona árida, con escasa precipitación pluvial.

El clima se caracteriza por elevados niveles de radiación solar, cielos despejados a lo largo del año, y grandes oscilaciones de temperatura diarias y en el año. La época cálida es muy prolongada (5 ó 6 meses), con temperaturas que van de los 15-21 °C de mínima promedio a los 38-45 °C de máxima promedio (con máximas extremas de hasta 48°C). La estación más fría se presenta como clima templado, con temperaturas que van de los 0-7°C en la mañana a los 25-30°C en las primeras horas de la tarde.

La escasez de agua es un problema característico de las zonas desérticas como esta: la precipitación pluvial es menor a 300 mm. al año, concentrada en pocos días de lluvia. La radiación solar es intensa y la heliofanía promedio anual de 8,9 horas/día. La contaminación del aire por polvo en suspensión es también una característica de las ciudades del desierto, lo que obliga a la población a mantener sus ventanas cerradas gran parte del año.

Es habitual el uso de diversos tipos de equipos de acondicionamiento térmico, dependiendo de las posibilidades de adquisición y de la capacidad para solventar los gastos de consumo durante el período cálido, que abarca casi la mitad del año. Las personas de escasos recursos tienen poco o ningún acceso a estos equipos, mucho menos pueden enfrentar los costos de operación. En consecuencia, este sector de la población enfrenta, sobre todo en verano, condiciones térmicas poco confortables.

En la encuesta de confort que se realizó como parte de este estudio (que se detallará en el siguiente apartado), se llevó a cabo en dos épocas del año, se hicieron mediciones de las condiciones térmicas interiores mientras se aplicaba el cuestionario. Se presentan en la Figura 2 las condiciones de temperatura y humedad medidas en el interior de las viviendas encuestadas, en invierno y verano.

Figura 2. **Temperatura Tint y humedad relativa HR interiores durante los períodos de las encuestas de invierno (a) y verano (b)**

Fuente: Elaboración propia.

Como puede predecirse, a partir de un análisis preliminar (ver Fig. 2), si bien las condiciones de invierno parecen razonablemente confortables, las de verano están lejos de poder considerarse agradables. A continuación se describirán los estudios de campo.

3.3 Encuestas de campo

A través de una encuesta de campo a habitantes de una cierta localidad, es posible analizar las sensaciones térmicas de las personas en su propio medio, obteniendo información en el mismo sitio donde viven o trabajan. Para recabar la información necesaria sobre las viviendas y sus

ocupantes, se realizaron dos tipos de encuestas en los conjuntos habitacionales; la primera, dirigida a recolectar las características físicas de las viviendas (orientación, geometría, materiales, dispositivos de sombra, equipos de acondicionamiento, etc.), el perfil de los usuarios (número de ocupantes, edad, empleo, salario, etc.), y la percepción general de la vivienda por parte de los residentes (condiciones térmicas, de iluminación, ruido, seguridad, espacio, etc.).

Figura 3. Campaña de medición y encuesta en viviendas económicas. Una encuestadora está entrevistando a uno de los residentes, mientras se miden las condiciones térmicas interiores

Fuente: Elaboración propia.

El segundo tipo de encuesta, que se realizó durante dos épocas de año, una cálida y una más fría, se orientó a recabar la sensación térmica de los usuarios, al mismo tiempo que se registraban las condiciones térmicas en el interior de las viviendas. Se reunió información adicional sobre los residentes, como edad, peso, género, vestimenta, actividad física, etc., y sobre la vivienda (por ejemplo: el tipo de sistema de climatización utilizado en ese momento). La sensación térmica de los usuarios se registró en una escala de 7 puntos, de muy frío a muy cálido (escala ASHRAE de -3 a +3). Simultáneamente se midieron la temperatura del aire (bulbo seco y bulbo húmedo), temperatura de globo, humedad relativa y velocidad del viento (ver Fig. 3). Más adelante se recolectó información sobre los consumos eléctricos de las viviendas encuestadas. Los cuestionarios y el procedimiento de los dos tipos de encuestas fueron diseñados conforme a las normas ISO 7730 y 10551 (2005 y 1995). El equipo de medición cumple con ISO 10551.

El equipo utilizado para medir las variables interiores es el dispositivo QUESTemp[®] 36 (ver Fig. 3), que es un data logger con varios sensores. Los datos meteorológicos exteriores se obtuvieron de la estación meteorológica del Laboratorio de Energía y Medioambiente en Arquitectura de la Universidad de Sonora, ubicada en la misma ciudad. Con estos datos se pretende determinar el rango de confort de la población a la que se le aplicó la encuesta, en función de la temperatura.

En las siguientes tres secciones se describirá la obtención de la temperatura de neutralidad y el rango de confort específicos de la población estudiada, mediante el método de regresión por capas. Con estos resultados, se hallará el porcentaje de personas encuestadas que se encuentran térmicamente confortables, en invierno y verano. Por otro lado, con los resultados de estos estudios, se planteará un modelo (en función de la temperatura y la humedad relativa) para predecir la sensación térmica de personas que se encuentren en un clima y circunstancias similares a las analizadas. De este modelo se pueden extraer además las condiciones térmicas de confort, en función de la temperatura y la humedad relativa.

4. Rango de confort en función de la temperatura

En las secciones anteriores se describió el estudio de caso, su entorno y el método utilizado para recabar los datos necesarios para determinar los niveles de confort térmico en el interior de las viviendas. En las siguientes secciones, obtendremos los resultados que nos permitirán diagnosticar el nivel de confort y predecirlo para otros casos mediante un sencillo modelo.

El rango de confort generalmente se calcula a partir de la temperatura de neutralidad T_n y se calcula $T_n \pm 2^\circ\text{C}$ para obtener sus límites. Sin embargo, como se mencionó, tanto T_n como el rango de confort varían, entre otros factores, según el clima y características de las personas, por lo que es necesario hallar valores específicos para cada tipo de población, condiciones sociales, hábitos y clima.

A través de los datos obtenidos en la encuesta de campo aplicada en las viviendas en dos épocas del año, se obtuvieron los votos de confort de alrededor de 300 personas, al mismo tiempo que se registraron las condiciones térmicas en el interior de sus viviendas. Se consideraron como variables más relevantes: la temperatura (en adelante, T) y la humedad relativa (en adelante, HR), ya que sus efectos son los que podrían incidir más sobre el confort en interiores. La temperatura de globo también es una variable importante para la sensación térmica, así que se analizaron también estas mediciones. Ésta resultó - en nuestros casos - proporcional a la temperatura del aire, por lo que se decidió tomar esta última para que sea más fácilmente comparable con resultados de otros autores (Marincic et al., 2009). En cuanto a la velocidad del viento, dado que las velocidades medidas son muy bajas, ya que generalmente se trata de minimizar la ventilación debida principalmente al polvo, se consideró en este caso menos importante.

Al encuestar a las personas sobre la sensación térmica, además de preguntar sobre la temperatura, se preguntó sobre la percepción de la humedad en una escala similar a la mencionada anteriormente de 7 puntos. Mientras se realizaba la encuesta, fue claro que la gente no podía calificar con la precisión esperada la sensación de humedad, aunque podía evaluar más fácilmente la temperatura como una sensación térmica global. Por esto, no se analizaron separadamente los datos de sensación de humedad. Aunque se asoció la respuesta sobre sensación de temperatura (voto) con las variables de T y HR medidas en ese momento.

Graficando los votos de sensación térmica en función de la temperatura, es posible hallar la temperatura de neutralidad (en adelante, T_n) para la población encuestada, según los métodos adaptativos de determinación de la temperatura de confort. En nuestro caso, se obtuvo una T_n

para invierno y otra para verano, ya que la estación del año influye en la aclimatación estacional de las personas, así su sensación térmica frente a una determinada temperatura se percibe en diferentes épocas del año de una manera distinta.

En una primera instancia, se utilizó para el procesamiento de los datos el método de cuadrados mínimos, sin ninguna modificación, que es como usualmente se obtiene la T_n . La intersección de la recta de regresión obtenida con el eje correspondiente a la sensación térmica de valor cero (confort), permitiría hallar la T_n . No obstante, los resultados claramente fueron no representativos, ya que el valor de la T_n se encontraba alejado de los votos medidos. Por esto, se consideró una variante a este método, aplicable para un clima que no tiene una estación del año fría y otra cálida, sino una templada y otra cálida. Esto genera votos volcados hacia un lado de la escala, los votos de *cálido*.

El clima de la ciudad de Hermosillo puede considerarse como *asimétrico*. De acuerdo con Nicol (1993), en este tipo de climas las respuestas de sensación térmica en las encuestas muestran tendencia hacia sólo un extremo de la escala de sensación. Los votos de *cálido* no tienen una respuesta simétrica en el extremo opuesto de la escala (frío). Por esto, el método convencional de regresión para obtener la T_n distorsionaría los resultados. Para estimar la T_n y sus límites (rango de confort) es necesario aplicar el método de regresión por capas, para evitar los errores que se presentarían para este tipo de climas (Gómez-Azpeitia et al., 2009). El método que se aplica en este estudio está basado en la propuesta de Nicol para climas asimétricos (Nicol, 1993).

La diferencia fundamental con el método convencional es que, en lugar de obtener la temperatura de neutralidad T_n a través de una recta de regresión que caracterizaría la muestra completa, los datos se agrupan en capas según el nivel de sensación térmica (voto), para después obtener el promedio de temperaturas y su desviación estándar σ por cada capa. La intersección de la recta de regresión obtenida de los promedios, con el eje de voto = 0 (eje de confort), determina el valor de la T_n . Mediante suma y resta de $\pm 1\sigma$ y $\pm 2\sigma$ se obtienen los límites de rango de confort restringido y ampliado respectivamente, los cuales deberán incluir en diferente porcentaje, pero en ambos casos mayoritario, las respuestas reales de confort.

En la Figura 4 se muestran las T_n obtenidas para invierno y verano, así como los rangos de confort restringido y ampliado. La T_n de invierno es igual a 26,9 °C (con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,94741$), mientras que la de verano es de 32,2 °C (con un $R^2 = 0,97824$). Los coeficientes R^2 miden el porcentaje de variabilidad de los valores de la variable dependiente (en este caso sensación térmica) que puede ser explicada por la variabilidad de los valores de la variable independiente (en este caso temperatura interior). Los valores de R^2 pueden variar entre $0 \leq R^2 \leq 1$, siendo $R^2 = 1$ el ajuste perfecto. En la Tabla 1 se resumen estos resultados, donde se evidencia el porcentaje de votos de confort que quedarían incluidos en los rangos de confort restringido y ampliado. El método aplicado de regresión por capas, es el que hizo posible la obtención de resultados coherentes con los datos medidos, con un ajuste muy satisfactorio de la recta de regresión a los datos, y verificándose un porcentaje muy alto de votos incluidos dentro de los límites del rango de confort, mismos que validan los resultados.

Fig. 4. Votos de sensación térmica en función de la temperatura interior y obtención de T_n mediante regresión lineal por capas para invierno (a) y verano (b) (en el gráfico S corresponde a σ)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Temperatura de neutralidad y límites de la zona de confort adaptativo

Confort invierno	T_n	Límite inf.	Límite sup.	% de votos incluidos
Rango restringido	26.9 °C	24.0 °C	29.9 °C	79%
Rango ampliado	26.9 °C	21.1 °C	32.7 °C	94%
Confort verano	T_n	Límite inf.	Límite sup.	% de votos incluidos
Rango restringido	32.2 °C	29.7 °C	34.7 °C	76%
Rango ampliado	32.2 °C	27.3 °C	37.1 °C	96%

Fuente: Elaboración propia.

Como es de esperarse para este tipo de climas cálidos extremos, las T_n son más elevadas de lo que habitualmente se presenta en la bibliografía y los rangos de confort son más amplios, debido a que estos están relacionados con la amplitud de las oscilaciones de la temperatura exterior, que para un clima desértico es realmente considerable. Como puede observarse, la T_n no necesariamente está en el centro del rango de confort. Estos resultados, sobre todo las elevadas T_n preferidas por la población, concuerdan con otros estudios sobre confort térmico en edificios sin aire acondicionado (Baker y Standeven, 1996). Además, los mismos muestran el grado de adaptación de las personas al clima local y la variabilidad, tanto de T_n como del rango de confort.

Teniendo en cuenta los rangos de confort obtenidos para invierno y verano, se calcula cuántas personas de la población encuestada se encuentra en situación de confort térmico; en invierno, el 63% de los votos está en condiciones de confort, mientras que en verano, sólo el 35% del total de personas encuestadas. Estos porcentajes dan una idea del grado de habitabilidad de

las viviendas desde el punto de vista térmico, según la percepción de sus propios residentes, aclimatados a las condiciones locales.

La temperatura parece ser la variable predominante para definir el rango de confort, sin embargo, la humedad también juega un papel relevante. En la siguiente sección definiremos una zona de confort en términos de la temperatura y humedad.

5. Zona de confort en función de la temperatura y la humedad relativa

Si bien el modelo adaptativo considera que los votos de confort que corresponden a la T_n , y en general las temperaturas dentro del rango de confort, englobarían la totalidad de las variables y parámetros que inciden sobre el confort térmico, como humedad relativa, viento, temperatura radiante, vestimenta, actividad física, aclimatación, expectativas de confort, etc., puede ser de suma utilidad expresar las condiciones de confort en función, no sólo de la temperatura T , sino también de la humedad relativa HR .

Considerando entonces, T y HR como variables relevantes que inciden sobre el confort térmico, se graficaron los votos de sensación térmica para invierno y verano en función de estas variables (Fig. 5).

Figura 5. Sensación térmica encuestada (voto) en función de la T y HR interior en invierno (a) y verano (b). En rojo: votos de confort. En azul: votos fuera de confort

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5, un plano con coordenada $z = 0$ (voto = 0) que corte horizontalmente la nube de puntos, mostraría los valores de la encuesta en condiciones de confort en cada período. Se representa este plano en un gráfico $T = f(HR)$ y se presenta también la proyección de las condiciones de los demás votos que se encuentran fuera de confort, sobre el plano mencionado (ver Fig. 6). Este tipo de representación en un plano $HR - T$ es más útil para formular posibles estrategias con la finalidad de mejorar las condiciones interiores a través del diseño pasivo.

Para comparar con la bibliografía clásica sobre el tema, se grafican los datos obtenidos (puntos rojos: votos de confort, puntos azules: votos fuera de confort) junto con la conocida zona de confort de Olgay (Olgay, 1963) para climas templados, a fin de analizar las diferencias. Se representan los rangos de confort restringido (entre líneas discontinuas) y ampliado (entre líneas punteadas) (ver Fig. 6).

Como puede apreciarse en la Figura 6, la zona de confort para este tipo de clima se encuentra desplazada hacia temperaturas más altas (puntos rojos en su mayoría por encima de la poligonal en negro), tal como era esperable. La amplitud de la misma es más grande que la de Olgay, lo que corresponde con un clima de gran amplitud en las temperaturas exteriores, tanto diaria como anualmente. Esto indica la importancia de los efectos del tipo de clima sobre los procesos de aclimatación de las personas y, por consiguiente, sobre la determinación de la zona de confort.

Figura 6. Condiciones de HR y T para las cuales la sensación térmica es de confort (voto=0) y de disconfort, en invierno (a) y verano (b) comparado con zona de confort de Olgay para clima moderado de Estados Unidos

Fuente: Elaboración propia.

La comparación de la zona de confort obtenida a través de la encuesta con la conocida zona de confort de ASHRAE no sería adecuada, ya que esta última se utiliza para ambientes climatizados o para clima no extremo.

Como se mencionó, en nuestro caso, en invierno el 63% de las personas está en condiciones de confort, mientras que en verano, sólo el 35%. Esta comparación se realiza con la zona de confort obtenida especialmente para este estudio, ya que de compararse con la zona de confort de Olgay de la Figura 6, este dato sería mucho más desfavorable. Este resultado señala la responsabilidad de los diseñadores de proyectar viviendas que faciliten una mejor calidad de vida para este sector de la población. Las condiciones de confort interior se podrían mejorar mediante diseño térmico pasivo, que es una opción económicamente más viable para estos casos.

Está claro que partiendo de los resultados de las mediciones y encuestas, se pudo estimar el rango de confort para la situación específica de clima y población. Sin embargo, sería deseable disponer de un método para estimar los votos de sensación térmica, a partir de datos de T y HR, basado en el enfoque adaptativo.

6. Método para estimar la sensación térmica en función de la temperatura y la humedad relativa

En esta sección describimos el método propuesto por los autores para estimar la sensación térmica de las personas para un clima y población específicos, en función de la temperatura T y la humedad relativa HR. De las sensaciones térmicas que se calculan, con valores de -3 a +3, se pueden extraer las condiciones térmicas para las cuales la sensación es de confort, es decir, la zona de confort.

Para desarrollar el modelo de la sensación térmica o voto en función de T y HR utilizamos los datos medidos en las encuestas, a los que aplicamos el método de cuadrados mínimos para hallar una línea de regresión entre los datos. Al tener dos variables independientes, fijamos en una primera instancia una de ellas, seleccionando intervalos de valores para los cuales ésta sería constante, permaneciendo la segunda como variable independiente. Como se mencionó anteriormente, la población demostró ser menos sensible a la variación de HR que de T, en relación con su sensación térmica, por lo que decidimos elegir intervalos de HR para los cuales se trabajó con su valor promedio como constante.

El procedimiento consiste entonces, en partir de la T como variable independiente para estimar el voto, y analizar posteriormente la influencia de la HR por rangos específicos. Se dividen los pares de datos (T, HR) por rangos de humedad, de modo que abarquen una cantidad similar de datos. Con estos datos se procede a hacer una regresión lineal de los votos con la temperatura, donde la pendiente (m) y ordenada al origen (b) de esta regresión están en función de HR. Se encontró que utilizando este criterio para la elección del intervalo se obtienen funciones más definidas de m(HR) y b(HR) que con otros intervalos. Estas funciones se obtienen por regresión de los pares de valores T y HR=constante por intervalos.

Con este criterio se plantea la siguiente ecuación, en que el voto o sensación térmica V depende de T y de HR:

$$V(T, HR=cte) = m(HR) T + b(HR) \quad (Ec. 1)$$

De esta ecuación, es necesario encontrar las funciones m(HR) y b(HR). Mediante un ajuste de mínimos cuadrados se obtienen las siguientes funciones para m y b:

$$m(HR) = a_0 + a_1 HR + a_2 HR^2 \quad y \quad para \quad b(HR) = c_0 + c_1 HR + c_2 HR^2 \quad (Ec. 2)$$

La calidad de los ajustes de m y b se ven en las siguientes gráficas (ver Fig. 7). En la Tabla 2 se muestra el valor de los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , c_0 , c_1 y c_2 de la Ec. 2, así como los coeficientes de determinación de ambas regresiones R^2 .

Los cálculos se efectuaron de manera análoga para ambas estaciones del año, pero se ejemplifica el procedimiento sólo para verano. Los resultados se muestran para ambas estaciones.

Figura 7. a) función $m(HR)$ y b) función $b(HR)$, obtenidas mediante regresión. Los coeficientes de ambas se pueden ver en la Tabla 2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Coeficientes de regresión para $m(HR)$ y $b(HR)$

$m(HR)$	Valor	$b(HR)$	Valor
a_0	-1.1467	c_0	31.570948
a_1	0.0850	c_1	-2.445336
a_2	-0.0012	c_2	0.0352619
R^2	0.9114	R^2	0.9282

Fuente: Elaboración propia.

Se puede obtener entonces, con base en una encuesta de confort y mediciones como datos, una función para calcular la sensación térmica o voto de las personas V en función de T y HR como variables independientes. Esta función es aplicable para predecir la sensación térmica para poblaciones que se encuentran en climas similares a los del estudio original. Para este caso en particular, la fórmula completa del voto para verano quedaría de la siguiente manera (reemplazando Ec. 2 en Ec.1):

$$V(T, HR) = (-0.0012 HR^2 + 0.085 HR - 1.1467) T + 0.0353 HR^2 - 2.4453 HR + 31.571 \quad (\text{Ec. 3})$$

De este modo, el resultado de la predicción será una nube de puntos que indicará las condiciones de sensación térmica (similar a la Fig. 5, donde se representan condiciones para votos encuestados), entre las cuales se puede extraer para fines específicos, las condiciones de confort. Esta información estaría en el plano de voto = 0 (eje z), formada por pares de datos de T y HR que representan las condiciones de confort. Para comparar con los datos originales, se grafican los votos calculados y los encuestados para la condición de confort en la Figura 8.

Figura 8. Plano de confort de las condiciones termohigrométricas para los votos calculados y para los votos encuestados, en invierno (a) y verano (b)

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se puede valorar la habitabilidad de espacios interiores desde el punto de vista térmico, mediante mediciones de T y HR. Es posible predecir las sensaciones térmicas de las personas que se encuentran en el mismo entorno, o similar, respecto al utilizado para el estudio, en cuanto a clima y a condiciones de aclimatación de la población y sus expectativas. Aplicando el procedimiento descrito, se pueden estimar los porcentajes de personas con diferentes niveles de sensaciones térmicas y determinar qué porcentaje de ellas podría estar en condiciones confortables. En cuanto al análisis de la habitabilidad de las viviendas, la principal ventaja de este procedimiento sobre el desarrollado en la sección 4 (rango de confort en función de la temperatura) de este trabajo, -y el principal aporte de los autores-, es el modelo de predicción de los votos y el modo cómo se expresan los resultados. Como se mencionó, los votos expresados en función de T y HR, y no sólo T, darían a los arquitectos herramientas más claras para elaborar estrategias de diseño basadas en métodos pasivos.

Para probar la bondad del ajuste del modelo que hemos desarrollado, evaluamos la posibilidad de que las diferencias entre los votos encuestados y los predichos por la fórmula propuesta (Ec. 3 y otra ecuación análoga obtenida para invierno), sean debidos al azar. Para esto calculamos las distribuciones de los votos en los siete niveles de confort, y las comparamos con las de los votos predichos, para los dos períodos (invierno y verano), utilizando la prueba χ^2 . Esta prueba se utiliza para obtener la desviación total de los valores observados respecto de los predichos con el modelo que se propone. El uso de la prueba χ^2 es el indicado, ya que se pretenden comparar dos distribuciones discretas: la de los votos de la población con la de

los votos predichos. No se desea comparar la sensación promedio, sino la distribución de las preferencias de la población.

Al hacer estos cálculos, encontramos que los votos encuestados y los calculados son estadísticamente equivalentes ya que solamente en un 2% ($p = 0,02$) la diferencia observada entre las distribuciones en invierno sería debido al azar. En tanto en verano, solamente el 5% ($p = 0,05$) de las ocasiones en que encontraríamos estas diferencias sería por el azar. Por lo tanto, consideramos que el ajuste multivariado que hemos desarrollado nos indica satisfactoriamente el grado de sensación térmica para las situaciones determinadas por la temperatura y humedad relativa. Con esto, hemos dado un paso en la estimación cuantitativa del grado de confort en climas extremos, a partir del enfoque adaptativo.

7. Conclusiones

La actual demanda de vivienda en algunos países en vías de desarrollo ha propiciado la construcción de viviendas económicas con un inadecuado diseño para el clima, lo cual provoca que sean poco confortables y que consuman mucha energía. Por otro lado, los estándares internacionales que regulan los límites de las condiciones de confort, no pueden abarcar las especificidades de cada clima y las preferencias de todo tipo de población. La aclimatación de las personas a condiciones extremas y sus expectativas de confort cambian en relación con ambientes más benignos y estables, o bien, climatizados artificialmente. En climas cálidos, las preferencias cambian hacia temperaturas más altas, y en climas con gran amplitud térmica, como el cálido seco, también se amplían los rangos de confort. Es preciso determinar las condiciones particulares de cada sitio, y de la población adaptada a ese clima. El enfoque adaptativo parece ser un método adecuado, y en el presente trabajo es el utilizado para obtener las preferencias térmicas de confort, que engloban un gran número de variables que inciden sobre el confort de las personas.

Resulta muy conveniente, que la zona de confort quede expresada en función de la temperatura y la humedad relativa, con el fin de que los arquitectos relacionen directamente las condiciones de confort con estrategias pasivas que puedan aplicarse en edificios para acercarse a dichas condiciones.

En este trabajo, se analizaron las condiciones de habitabilidad térmica de viviendas económicas en clima cálido seco, en relación con un rango de confort obtenido a través de encuestas de personas aclimatadas. Además, se propone una fórmula para predecir las sensaciones térmicas (votos) de personas aclimatadas a condiciones similares y con expectativas parecidas, en función de la temperatura y la humedad relativa, que presenta una buena concordancia estadística con los votos de las encuestas aplicadas.

El conocimiento de las condiciones específicas de confort térmico favorece que se puedan diseñar edificaciones más habitables desde el punto de vista térmico y, por ende, que sea posible mejorar la calidad de vida de las personas. En cuanto a los ambientes climatizados, la selección de las condiciones de temperatura preferidas para controlar la temperatura interior favorece no sólo el confort de los ocupantes, sino que también contribuye al ahorro de energía.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México CONACyT y de la Comisión Nacional de Vivienda CONAVI en el marco del proyecto CONAFOVI 2004-01-20. Se agradece también el apoyo económico de la Universidad de Sonora y de la Universidad Nacional Autónoma de México en el marco de las convocatorias de intercambio académico.

Bibliografía

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *ASHRAE 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy*, 2004.

BAKER, N. y STANDENVEN, M. *Thermal comfort for free-running buildings*. En: *Energy and Building*, (23): 175-182, 1996.

BRAGER, G. y DE DEAR, R. *Thermal adaptation in the built environment: a literature review*. En: *Energy and Buildings*, (27): 83-96, 1998.

DE DEAR, R. et al. *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. Final Report RP-884*. Sidney, Australia, 1997.

ESTADO actual de la vivienda en México 2011. Fundación CIDOC y Sociedad Hipotecaria Federal. México, octubre 2011.

FANGER, P.O. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill, 1970.

FREYSZIG, E. *Introducción a la estadística matemática: principios y métodos*. México, Limusa, 1973.

GIVONI, B. *Man, Climate and Architecture*. Applied Sciences Publishers, 1969.

GIVONI, B. *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley and Sons, Inc., 1998.

GÓMEZ-AZPEITIA, G. et al. *Comfort Temperatures Inside Low-Cost Housing*. En: *26th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2009*, 2009, pp: 498-503.

IOS, International Organization of Standardization. *ISO 10551:1995 (E) Ergonomics of the thermal environment – assessment of the influence of thermal environment using subjective judgment scales*, 1995.

IOS, International Organization of Standardization. *ISO 7726:1998 (E) Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities*, 1998.

IOS, International Organization of Standardization. *ISO 7730-2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPV indices and local thermal comfort criteria*, 2005.

MARINCIC, I. et al. *Adaptive Thermal Comfort in Warm Dry Climate: Economical Dwellings in Mexico*. En: 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2009, 2009, pp: 510-515.

MARINCIC, I. et al. *La vivienda económica en Hermosillo y el consumo de energía eléctrica*. En: XXXIV Semana Nacional de Energía Solar ANES 2010, 2010.

NICOL, F. *Thermal comfort. A handbook for field studies toward an adaptive model*. London, University of East London, 1993.

NICOL, J. F. y HUMPHREYS, M. A. *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. En: *Energy and Buildings* 34 (6): 563-572, 2002.

NIKOLOPOULOU, M. et al. *Thermal Comfort Models for Urban Spaces*. En: Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach. Editado por Nikolopoulou, M. del Centre for Renewable Energy Sources, Grecia, 2004, pp: 2-6.

OLGYAY, V. *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press, 1963.

ROMERO, R. A. et al. *Informe técnico final del proyecto CONAFOVI 2004-01-20 Confort térmico y ahorro de energía en la vivienda económica en México: regiones de clima cálido seco y húmedo*. México, 2009.

SERRA, R. y COCH, H. *Arquitectura y energía natural*. México. Alfaomega, 2005.