
Problemática de los sistemas pasivos de climatización en zonas tropicales cálido-húmedas

Problematic of the passive cooling systems in hot-humid tropical zones

Ignacio A. Guzmán-Hernández,¹ Fidel Franco,^{2,3,4} Jaime Roset^{2,3,5}

Universidad Politécnica de Cataluña

¹Departamento de Tecnología de la Arquitectura UPC

²Departamento de Física UPC

³Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona (ETSAB) UPC

⁴Laboratorio de Innovación y Tecnología en la Arquitectura (LiTA) UPC

⁵Arquitectura, energí i medi ambient (AIEM) UPC

Fecha de recepción : 25 de marzo

Fecha de aceptación: 24 de abril

Favor de citar este artículo de la siguiente forma:

Franco, F., Guzmán-Hernández, I., & Roset, J. (2019). Problemática de los sistemas pasivos de climatización en zonas tropicales cálido-húmedas.

AULA Revista de Humanidades y Ciencias Sociales. Vol. 64. Número 4, enero-junio 2019. Santo Domingo: Amigo del Hogar.
<http://dx.doi.org/2636.2236/AULA.2019.007>

RESUMEN

Este artículo se enfoca en expresar algunas problemáticas con las que se encuentra la implementación de algunos sistemas de climatización pasiva para proyectos habitacionales ubicados en zonas climáticas cálido-húmedas, ya que la mayor parte del tiempo las condiciones climáticas son de desconfort térmico. El mayor problema es que las altas temperaturas están acompañadas de altos niveles de humedad, haciendo necesaria la implementación de más de dos estrategias de refrigeración, las que siendo efectivas, no logran ser suficientes para mantener niveles de confort la mayor parte del tiempo y hacen necesario el uso de sistemas activos que consumen bastante energía. En el desarrollo del artículo se analizan por separado algunas estrategias de climatización pasiva propuestas por Givoni en su carta bioclimática (Givoni, 1969) para conocer su grado de efectividad en un caso de estudio propuesto con clima cálido húmedo con lluvias todo el año. Con las estrategias estudiadas se busca disminuir la temperatura así como la humedad al interior de una habitación estándar.

Palabras clave: clima cálido-húmedo, climatización, confort térmico, sistemas pasivos.

ABSTRACT

This article focuses on expressing some problems with the implementation of some passive cooling systems for housing projects located in hot-humid climatic zones, since most of the time the climatic conditions are of thermal discomfort. The biggest problem is that high temperatures are accompanied by high levels of humidity, making it necessary to implement more than two cooling strategies, and although effective, they do not manage to be sufficient to maintain comfort levels most of the time, making necessary the use of active systems that consume a lot of energy. In the

development of the article, some passive cooling strategies proposed by Givoni in their bioclimatic chart (Givoni, 1969) are analyzed separately to know their degree of effectiveness in a proposed case study with a hot-humid climate with rainfall throughout the year. With the strategies studied, the aim is to reduce the temperature as well as humidity inside a standard room.

Keywords: Cooling, hot-humid climate, passive systems, thermal comfort.

Introducción

El confort térmico es uno de los temas de mayor interés en la arquitectura, ya que está relacionado directamente con la satisfacción del usuario final en las edificaciones. Es deber de todos los arquitectos no solamente diseñar la belleza estética de sus edificios, sino también buscar complacer todos los aspectos que afectan al ser humano en la arquitectura, tanto físicos y psicológicos, como los elementos físicos del entorno. (Figura 1)

Figura 1.
El hombre como medida central en arquitectura.
(Victor Olgay, 2015)



Tomando la definición de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés), en donde el confort térmico es «aquella condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico» (ASHRAE, 2004), podemos argumentar que dicha satisfacción mental depende de muchos factores, tanto dependientes como independientes de las condiciones climáticas al interior de las edificaciones; como el metabolismo, estado de ánimo, tipo de ropa y adaptabilidad a los cambios de las distintas personas. A pesar de que el tema ha sido ampliamente estudiado en todo el mundo, creando estándares para diversas zonas climáticas, en las zonas tropicales aun es un tema poco documentado (Djongyang, Tchinda, &

Njomo, 2010) y que por la diversidad de climas, debe de ser estudiado puntualmente en diferentes locaciones, cada una con sus particularidades de clima y gente.

En zonas cálido-húmedas, y especialmente las que tienen lluvias todo el año, tanto la temperatura como la humedad suelen estar por encima de los niveles permisibles para el confort humano, sin embargo el mayor problema es el alto porcentaje de humedad, el cual no permite la correcta implementación de sistemas pasivos de climatización para alcanzar niveles de confort. En la mayoría de los casos es necesaria la implementación de acondicionadores de aire y/o deshumidificadores, los cuales consumen bastante energía. Un estudio realizado en varias ciudades de Chile ha analizado el efecto de la ventilación como método único para reducir dicho consumo eléctrico, y en zonas húmedas con temperaturas máximas de 30°C han conseguido un ahorro energético entre un 12% y un 30% dependiendo de la orientación de la vivienda (Palme, Aldunate, & Huerta, 2016). En el presente trabajo se busca explicar esta problemática con algunos ejemplos, así como proponer posibles soluciones para esos lugares.

Desarrollo

Para hacer un análisis detallado del problema se elaborará el caso de estudio de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, en el sureste mexicano. Villahermosa se encuentra en la latitud norte 17° 59', longitud oeste 92° 56' y una altitud promedio de 9 m.s.n.m. Se encuentra en la zona cálida-húmeda con lluvias todo el año y el total de las precipitaciones anuales ronda los 2500mm (Cervantes *et al.*, 2000). La temperatura promedio es de 27°C, sin embargo la máxima alcanza los 41°C y la mínima un promedio de 17.4°C.

Las mayores temperaturas se han registrado en los meses de abril y mayo entre las 14:00 y las 16:00 horas, mientras las mínimas generalmente son entre los meses de diciembre, enero y febrero, entre las 6:00 y 8:00 horas. Esas horas son constantes para las mínimas y máximas temperaturas diarias durante todo el año. La humedad relativa se encuentra en un promedio del 80%, descendiendo a un promedio de 69% en el mes de mayo y un máximo promedio de 86.5% en agosto. Esto convierte a Villahermosa en un caso de estudio interesante, debido a que sus altas temperaturas y humedad relativa dificultan el confort térmico la mayor parte del año, teniendo que recurrir generalmente a sistemas activos de enfriamiento que representan aproximadamente un 18.5% del gasto eléctrico de los hogares (INEGI, 2016).

Por otro lado, a pesar de que no existe un estándar para confort térmico en México, y mucho

menos en Villahermosa, es necesario tomar algún parámetro para poder evaluarlo. Numerosos autores han propuesto límites de temperatura y humedad para lograr dicho confort y los valores dependen mucho del lugar de aplicación de sus análisis (Hinz, 1986); para el caso particular de los climas tropicales podemos tomar los valores propuestos por Víctor Olgyay, donde la temperatura debe de mantenerse entre 23.3°C y 26.7°C y la humedad entre un 30% y un 70% (Víctor Olgyay & Frontado, 1998).

Si se analizan los datos climatológicos recopilados en Villahermosa, en un diagrama bioclimático o en un ábaco psicrométrico se puede observar que la mayor parte del tiempo no se alcanzan niveles confortables para las personas, debido en muchas ocasiones a que la humedad relativa no suele bajar del 70% y cuando baja, suele ir acompañada de altas temperaturas. (Figura 2)

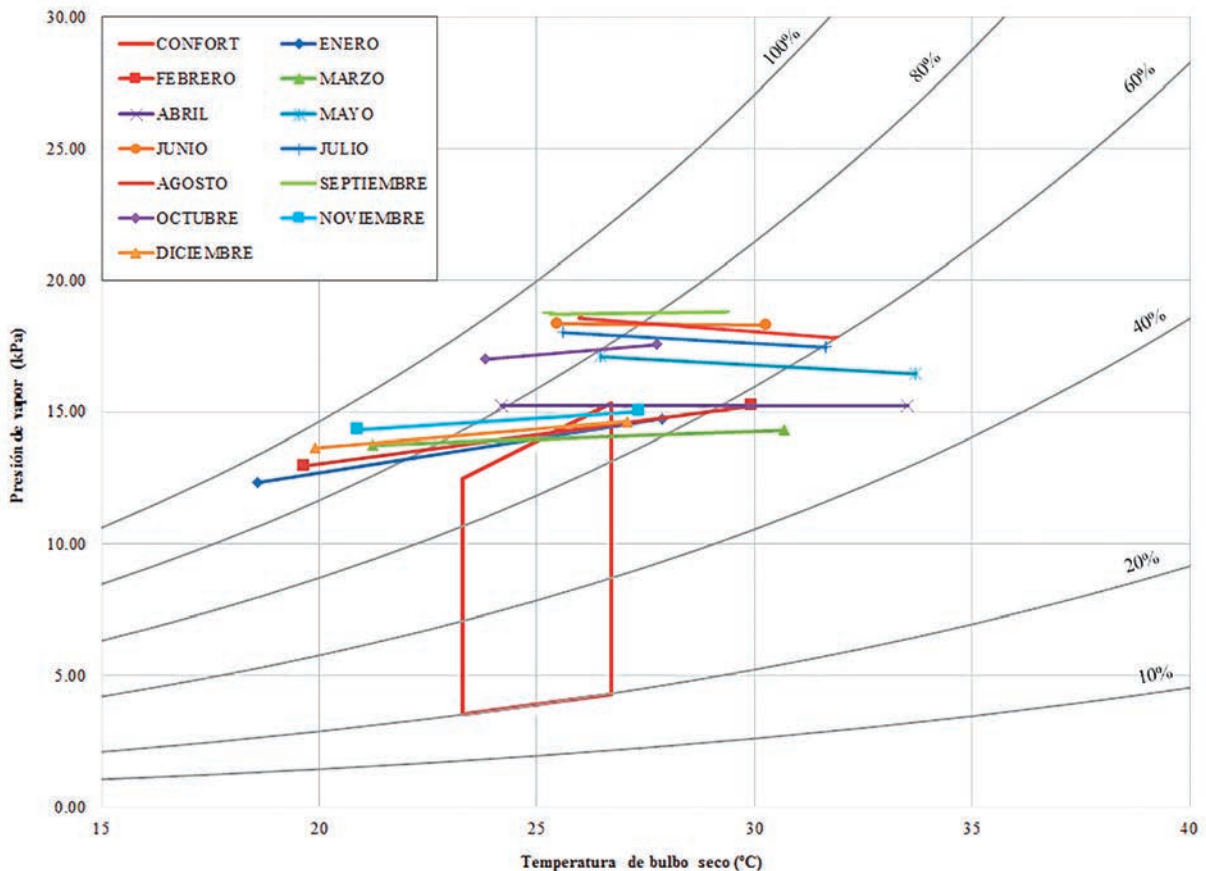


Figura 2. Carta bioclimática Givoni con datos de Villahermosa.

Baruch Givoni, en su libro *Man, climate and architecture* (Givoni, 1969), propone una serie de soluciones dependiendo del área fuera del confort térmico en que se encuentre cada dato de la carta bioclimática. (Figura 3)

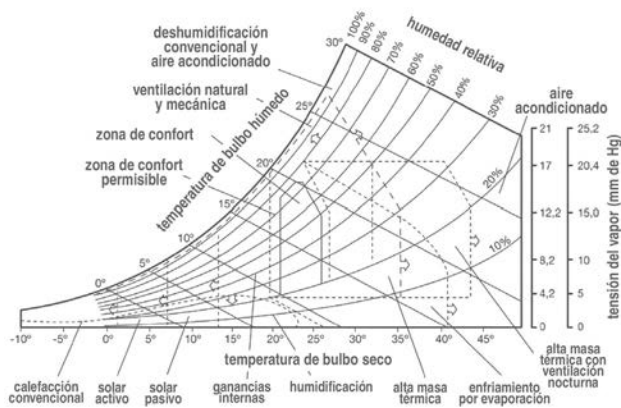


Figura 3. Estrategias bioclimáticas para lograr condiciones higrotérmicas de confort. (Givoni, 1969)

Para el caso de Villahermosa se aplicarían tres técnicas, dependiendo de la temporada y el horario del día: en algunos momentos de otoño e invierno se buscarían implementar estrategias para tener ganancias internas, y en primavera y otoño las estrategias serían la deshumidificación convencional y el uso de aire acondicionado, sin embargo, como ya se mencionó con anterioridad, implica un alto costo económico y ambiental el uso de estas tecnologías, sin hablar del ruido y afectación estética de los aparatos.

Para analizar estas estrategias y hacer un estudio más detallado del costo que implicaría, se tomarán dos días representativos del caso de estudio: el día más caluroso (4 de mayo de 2017, tabla 1) y el día más húmedo (10 de septiembre de 2017, tabla 2) con los siguientes datos:

HORA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRECIPITACIÓN TOTAL (MM)	NUBLADO TOTAL (%)	DURACIÓN DEL SOL (MIN)	RADIACIÓN DE ONDA CORTA (W/MP²)	VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 MTS (KM/H)
00:00	28.56	65	0	0	0	0	11.3
01:00	28.27	66	0	0	0	0	8.47
02:00	27.59	70	0	0	0	0	4.38
03:00	27.02	71	0	0	0	0	1.08
04:00	26.46	73	0	0	0	0	4.55
05:00	25.76	76	0	0	0	0	6.84
06:00	25.19	79	0	0	0	0	7.9
07:00	24.42	83	0	0	17.54	2.67	7.42
08:00	26.72	74	0	0	60	137.06	10.81
09:00	28.88	66	0	0	60	356.89	10.46
10:00	31.44	58	0	0	60	563.37	7.34
11:00	33.36	51	0	0	60	734.25	5.69
12:00	35.11	47	0	0	60	862.41	4.21
13:00	36.59	43	0	0	60	933.61	6.49
14:00	37.72	40	0	10	53.62	911.36	12.4
15:00	38.13	37	0	16	49.79	825.92	25.19
16:00	31.37	60	0	10	53.62	250.98	34.62
17:00	33.34	53	0	10	53.62	495.73	28.02
18:00	31.3	60	0.2	80	8.94	314.17	17.76
19:00	29.7	69	1.7	100	0	46.28	11.49
20:00	28.13	77	2.6	100	0	3.56	18.08
21:00	26.89	80	1.9	100	0	0	17.78
22:00	26.44	82	1.6	100	0	0	17.08
23:00	26.13	84	1.5	100	0	0	16.95

Tabla 1. Datos climatológicos Villahermosa del 4 de mayo de 2017, día más caluroso del año.

HORA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRECIPITACIÓN TOTAL (MM)	NUBLADO TOTAL (%)	DURACIÓN DEL SOL (MIN)	RADIACIÓN DE ONDA CORTA (W/M ²)	VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 MTS (KM/H)
00:00	24.54	96	1.4	100	0	0	8.79
01:00	24.34	96	0.4	100	0	0	7.42
02:00	24.38	96	0	100	0	0	7.1
03:00	24.28	96	0	100	0	0	7.42
04:00	24.08	96	0	100	0	0	8.91
05:00	23.88	96	0	100	0	0	9.67
06:00	23.76	96	0	100	0	0	9.93
07:00	24.44	98	0	100	0	0	6.49
08:00	25.68	93	0	100	0	77.43	6.57
09:00	25.45	89	0.1	100	0	102.35	8.28
10:00	26.11	88	0	100	0	162.87	10.37
11:00	25.55	90	0	100	0	139.73	11.11
12:00	26.07	90	0	100	0	181.56	11.73
13:00	25.55	92	0	100	0	146.85	11.87
14:00	25.75	92	0	100	0	138.84	11.79
15:00	25.31	93	0	100	0	102.35	11.87
16:00	25.69	92	0	100	0	126.38	11.87
17:00	25.2	93	0	100	0	99.68	11.53
18:00	25.49	92	0	100	0	108.58	11.18
19:00	25.25	92	0	100	0	76.54	9.69
20:00	24.94	93	0	100	0	2.67	8.09
21:00	24.88	94	0	100	0	0	7.75
22:00	24.82	94	0	100	0	0	7.17
23:00	24.75	94	0	100	0	0	6.38

Tabla 2. Datos climatológicos Villahermosa 10 de septiembre 2017, día con más humedad.

Con esos datos podemos calcular la sensación térmica, con un modelo matemático publicado por Robert G. Steadman en 1994, que toma en cuenta el impacto de la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la radiación, en el balance térmico del cuerpo humano (Steadman, 1994). Existen dos versiones, una que toma en consideración la radiación solar y otra que considera un ambiente en sombra total. La sensación térmica se calcula de las siguientes formas:

Versión en sombra:

$$ST = Ta + 0.33 \times Pv - 0.70 \times Vv - 4.00 \quad (1)$$

Versión en sol:

$$ST = Ta + 0.348 \times Pv - 0.70 \times Vv + 0.70 \times Q / (Vv + 10) - 4.25 \quad (2)$$

En donde:

- ST = Sensación térmica (°C)
- Ta = Temperatura de bulbo seco (°C)
- Pv = Presión del vapor de agua (hPa)
- Vv = Velocidad del viento a 10 metros de altura (m/s)
- Q = Radiación neta absorbida por unidad de superficie (W)

La presión del vapor de agua puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$Pv = Hr/100 \times 6.105 \times \exp(17.27 \times Ta / (237.7 + Ta)) \quad (3)$$

En donde:

$$Hr = \text{Humedad relativa (\%)}$$

Para efectos de este análisis se empleará la versión de la fórmula que no toma en consideración la radiación solar, y considera al usuario en un espacio de sombra completa. De igual forma, para sintetizar y facilitar la lectura de los datos, se tomarán solamente seis datos de cada día. (Tablas 3 y 4)

Como se puede observar, la sensación térmica aumenta considerablemente con niveles altos de humedad, esta puede ser disminuida o mitigada con ayuda del viento, siempre y cuando no se alcancen niveles muy altos de humedad relativa, tal como se muestra en el

HORA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 MTS. (KM/H)	DIRECCIÓN DEL VIENTO A 10 MTS. (KM/H)	PRESIÓN DEL VAPOR (HPA)	SENSACIÓN TÉRMICA A LA SOMBRA (°C)	DIFERENCIA (°C)
0:00	28.56	65	11.3	99.16	25.29905809	30.7114669	2.1514669
4:00	26.46	73	4.55	341.57	25.1353181	29.8699328	3.40993275
8:00	26.72	74	10.81	91.91	25.87196531	29.1558041	2.43580411
12:00	35.11	47	4.21	19.98	26.48804676	39.0324443	3.92244432
16:00	31.37	60	34.62	343.07	27.4327035	29.6911255	-1.67887451
20:00	28.13	77	18.08	324.73	29.23148141	30.2608333	2.13083331

Tabla 3. Sensación térmica en Villahermosa, 4 de mayo 2017.

HORA	TEMPERATURA (°C)	HHUMEDAD RELATIVA (%)	VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 MTS. (KM/H)	DIRECCIÓN DEL VIENTO A 10 MTS. (KM/H)	PRESIÓN DEL VAPOR (HPA)	SENSACIÓN TÉRMICA A LA SOMBRA (°C)	DIFERENCIA (°C)
0:00	24.54	96	8.79	235.01	29.4998479	28.5657831	4.02578313
64:00	24.08	96	8.91	226.64	28.6994529	27.8183195	3.73831946
8:00	25.68	93	6.57	260.54	30.5813982	30.4943614	4.8143614
12:00	26.07	90	11.73	252.12	30.2848372	29.7831629	3.71316293
16:00	25.69	92	11.87	255.96	30.2704732	29.3712006	3.68120062
20:00	24.94	93	8.09	249.15	29.2674874	29.0252153	4.0852153

Tabla 4. Sensación térmica en Villahermosa, 10 de septiembre 2017.

día más húmedo de 2017 (Tabla 4). En ese caso es contraproducente el efecto del viento, en donde el promedio de la diferencia de la sensación térmica en comparación con la temperatura de bulbo seco es de +3.93°C, mientras que en el día más caluroso, en el cual dicha diferencia fue de +2.33°C. De igual forma al graficar los datos de ambos días en un diagrama bioclimático podemos observar con más detalle el problema con el que nos enfrentamos y las posibles soluciones. (Figura 4)

Como se puede observar en la carta bioclimática ambos días se encuentran fuera de la zona de confort propuesta para la ubicación geográfica, y se pueden observar algunas propuestas de estrategias a emplear para mejorar las condiciones de sensación. En el caso del día más caluroso (4 de mayo) las estrategias serían refrigeración por ventilación natural y mecánica, y también el uso de acondicionadores de aire para algunos momentos del día. Para el 10 de septiembre, siendo el día más húmedo del año se tendría que combinar tanto la refrigeración por ventilación natural y mecánica, con la deshumidificación convencional.

El problema con todas esas estrategias es el gasto energético que conllevan, que, como ya se mencionó, se estima que la implementación de sistemas activos de enfriamiento y/o deshumidificación representa aproximadamente un 18.5% del gasto eléctrico en los hogares de México (INEGI, 2016). Tanto para el 4 de mayo como para el 10 de septiembre se recomienda la protección solar de la vivienda para evitar la incidencia de la radiación solar directa en el edificio. La certidumbre de estos sistemas depende de muchos factores, como la cantidad de radiación, el ángulo de incidencia o la latitud de la ubicación, por lo cual se deben diseñar específicamente para cada edificio y para cada situación geográfica. Sin embargo, su efectividad es irrefutable y existen estudios que miden el coeficiente de eficacia de varios modelos de protectores solares e indican que, mientras menor sea el coeficiente de sombra, mayor es el grado de protección al interior del edificio. (Figura 5)

Para el caso de estudio en cuestión las protecciones solares deberán colocarse prioritariamente hacia el sur, debido a que en los meses de

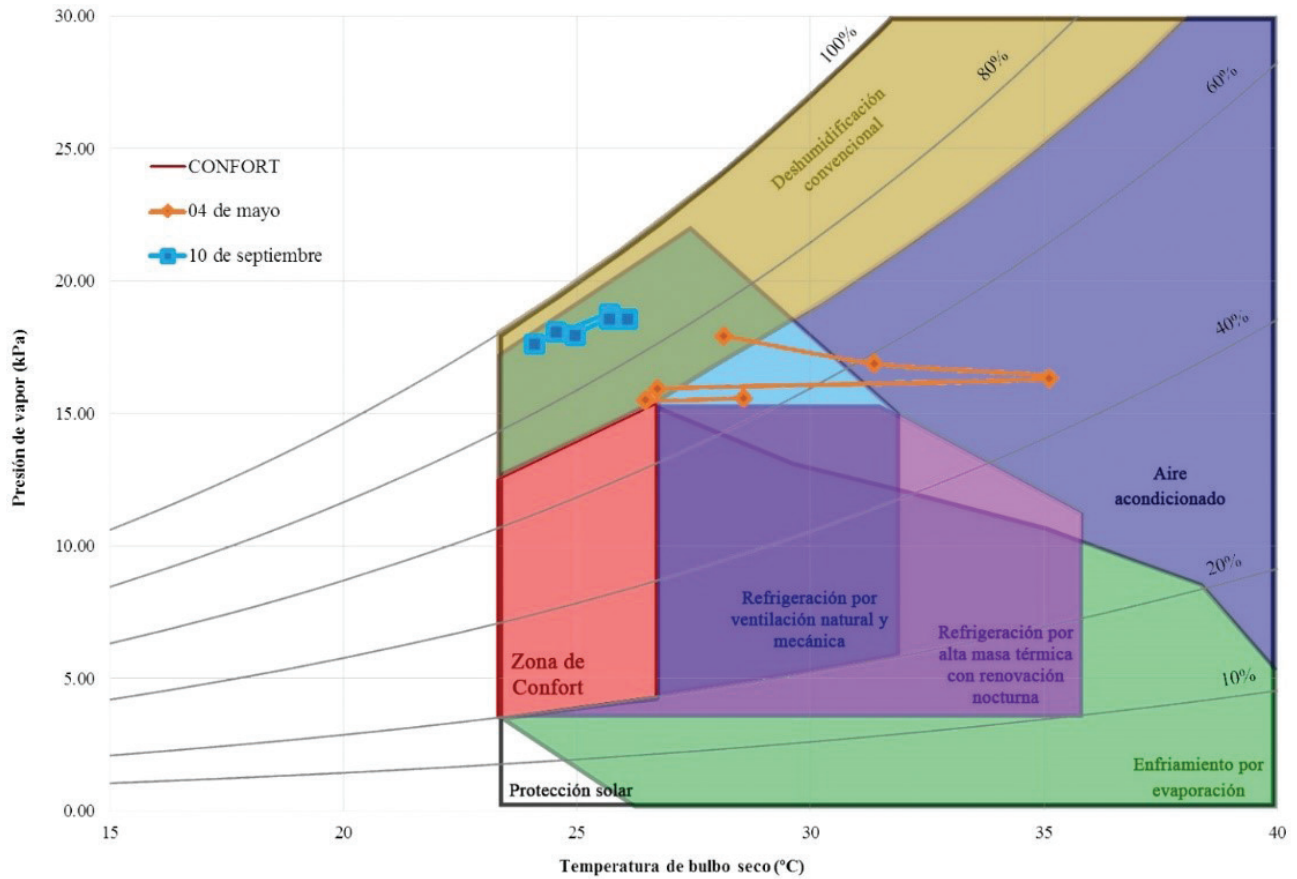


Figura 4. Carta bioclimática Villahermosa, 4 de mayo y 10 de septiembre de 2017.

mayor calor el sol tiene esa inclinación, combinando algunos de ellos, en orientaciones este y oeste se sugiere colocar sistemas móviles, que permitan ajustarlos dependiendo de la temporada del año y hora del día.

La refrigeración por ventilación natural y mecánica es, como su nombre lo indica, una combinación de sistemas generadores del movimiento

del aire y estrategias puntuales de introducción de aire al recinto. Mediante esta técnica se logra renovar el aire interior, eliminando el aire viciado, o con exceso de vapor de agua y es precisamente muy beneficiosa en áreas con suficiente viento y humedad relativa superior al 20%, tal como es el caso de estudio. Los sistemas de ventilación natural de edificios son bastante conocidos, y pueden

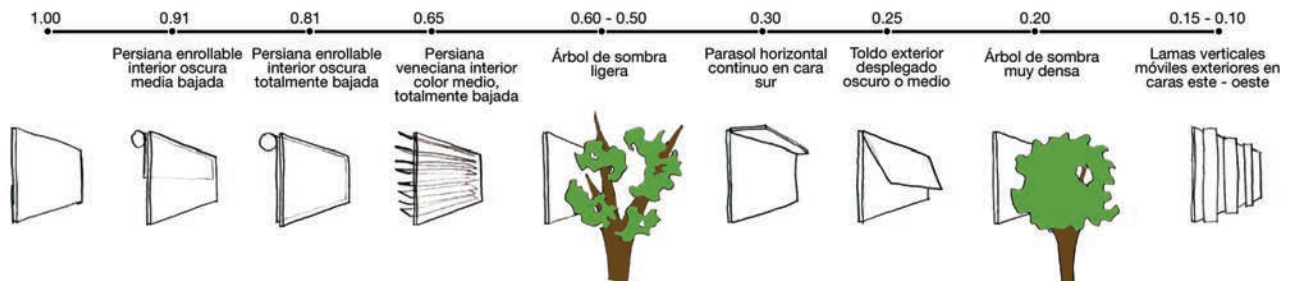


Fig 5. Coeficiente de sombra de sistemas de protección solar. Elaboración propia con datos de *Design with Climate*, Victor Olgyay, 2015.

ser tan sencillos como la generación de ventilación cruzada realizando dos (o más) aberturas situadas en fachadas opuestas que den al exterior y alguna de ellas orientada a la entrada de viento. También existen disposiciones como el efecto chimenea, sin embargo, la efectividad de este sistema desciende cuando las temperaturas exteriores son muy altas, como en el caso de estudio. (Figura 6)

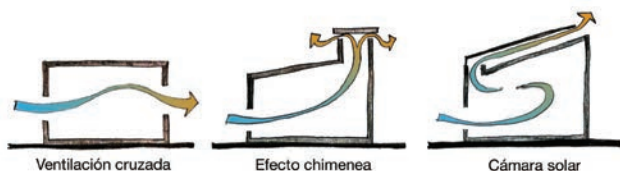


Figura 6. Sistemas de ventilación natural, elaboración propia.

Algunos sistemas requieren de aparatos impulsores de aire, cuando la ventilación natural no sea suficiente, tal es el caso de la ventilación subterránea. Este tipo de ventilación aprovecha la inercia térmica del terreno, haciendo pasar el aire a través de conductos enterrados, puesto que a partir de los tres metros de profundidad la temperatura del subsuelo es bastante estable y tiende a mantenerse a la temperatura media del lugar. (Figura 7) En el caso de estudio la estación meteorológica es de 25.34°C; lo cual nos ayudaría en algunos momentos del año, cuando la temperatura supere los 27°C, sin embargo el resto del tiempo sería mejor no utilizarlo.

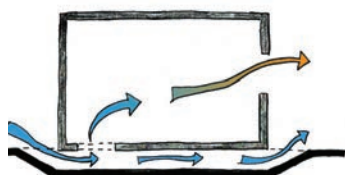


Figura 7. Ventilación subterránea.

Para los días más húmedos, la estrategia sugerida es la deshumidificación convencional, y es necesario combinarlo con otros sistemas para mejorar las condiciones. Los más conocidos son básicamente dos: las sales desecantes y las placas salinas absorbentes. Las primeras tienen

propiedades químicas que son utilizadas para eliminar la humedad del aire al mismo tiempo que se hidratan, el más utilizado es el gel de sílice, por su bajo precio. Las segundas utilizan precisamente dichas sales y buscan regenerarse, para después retornar al interior de los edificios y seguir absorbiendo el vapor del aire. El problema con estos sistemas es que las cantidades necesarias para desecar las habitaciones son muy grandes, y sería necesario mantener completamente cerrados y aislados los cuartos para no dejar ingresar la humedad del exterior. Esto no permitiría la aplicación de los sistemas de ventilación natural y es inevitable la implementación de equipos de aire acondicionado. Para hacer un cálculo de muestra para la deshumidificación podemos tomar como punto de partida las 8:00 pm del 10 de septiembre, con las siguientes temperatura y humedad relativa:

$$T = 24.94^{\circ}\text{C}$$

$$\text{HR} = 93 \%$$

Dando una humedad absoluta de:

$$\omega = 0.018 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}$$

Se busca mantener la misma temperatura y disminuir la humedad relativa por lo menos al 60%, siendo una humedad absoluta resultante de:

$$\omega_{60\%} = 0.012 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}$$

Se utiliza una fórmula (Daud, 2001) para conocer la cantidad total de agua a remover por hora que es de la siguiente forma:

$$m_{\text{agua a remover}} = (\omega - \omega_{60\%}) m_{\text{aire}} \quad (4)$$

En donde:

$$m_{\text{aire}} = \rho_{\text{aire}} * Vol$$

y podemos dimensionar una habitación tipo para hacer el análisis, con 24.3 m³ como se observan sus medidas. (Figura 8)

$$m_{\text{agua a remover}} = (0.018 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}} - 0.012 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}) (1.2 \text{ kg}/\text{m}^3 * 24.3 \text{ m}^3)$$

$$m_{\text{agua a remover}} = 0.19 \text{ kg}_{\text{agua}}$$

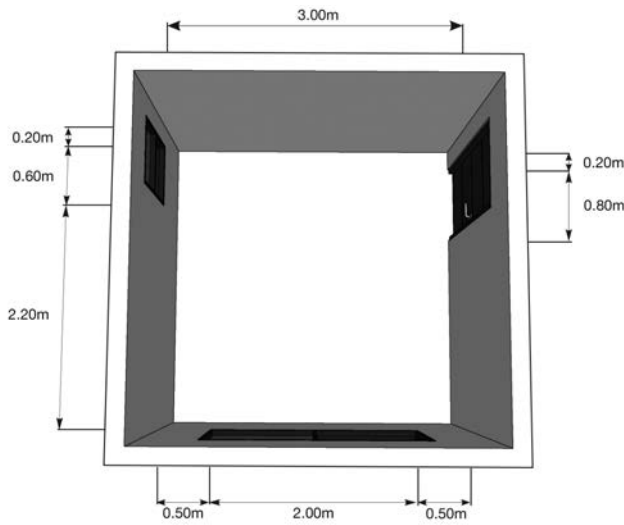


Figura 8. Medidas habitación analizada.

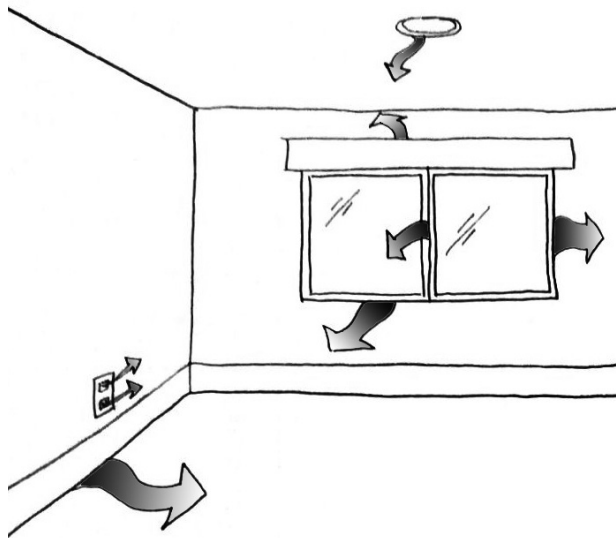


Figura 9. Infiltración de aire, posibles fuentes.

A pesar de que las ventanas se encuentren cerradas, se debe considerar la infiltración que existe, y que aunque sea poco, introduce humedad al interior de la habitación. Esta infiltración puede suceder en varios lugares. (Figura 9) Para efectos prácticos se considerará un 0.1% del flujo de aire infiltrado que pasaría por la ventana al estar abierta de la siguiente forma:

$$m_{\text{agua a remover}} = m_{\text{aire}} (\omega - \omega_{60\%}) \quad (5)$$

Donde:

$$m_{\text{agua}} = V * \rho_{\text{aire}} = (1.15 \text{ m}^3/\text{hr}) * (1.2 \text{ kg}/\text{m}^3) = 1.34 \text{ kg}/\text{hr}$$

y por lo tanto la fórmula 5 queda de la siguiente forma:

$$m_{\text{agua a remover}} = 1.34 \text{ kg} / \text{hr} (0.018 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{aire}} - 0.012 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{aire}}) = 0.0085 \text{ kg}/\text{hr}$$

Si se analiza un tiempo de análisis de 10 horas, durante la noche serían 0.085 kg_{agua} y si se suma al agua a remover que ya se encontraba dentro de la habitación tenemos un total de 0.28 kg_{agua}. El gel de sílice tiene un promedio de absorción de 0.3 kg_{agua}/kg sílice por lo tanto serían necesarios 0.92 kg de gel de sílice. Esto presenta el primer problema en cuanto a la cantidad de material necesario en cada habitación, además de la cantidad de energía necesaria para calentar dicho material para poder reutilizarlo.

Para las situaciones donde sea necesaria la implementación de ventilación natural y mecánica para alcanzar niveles de confort, o si no es posible, disminuir el consumo del aire acondicionado, se deben de tomar algunos factores en consideración. Principalmente, para que funcione de manera correcta, es imprescindible que la temperatura interior sea mayor que la temperatura en el exterior, de lo contrario al introducir ventilación natural en la vivienda, estaríamos contribuyendo a la ganancia térmica al interior de la misma. Esto es posible debido a la inercia térmica, específicamente al retardo que existe en la transmisión de temperatura del exterior al interior de la vivienda en función a los materiales utilizados y sus espesores, de tal forma se puede controlar el momento del día en el que comienza a penetrar el calor del exterior. Para efectos prácticos del análisis se tomó un promedio de ocho horas de desfase, así como un amortiguamiento del 10% de igual forma, dependiendo de los materiales empleados. En el análisis del 4 de mayo de 2017, a partir de las 18:30 horas, y hasta las 04:30 la temperatura interior es mayor que la exterior, lo que permite el empleo de esta estrategia como método de refrigeración. (Figura 10)

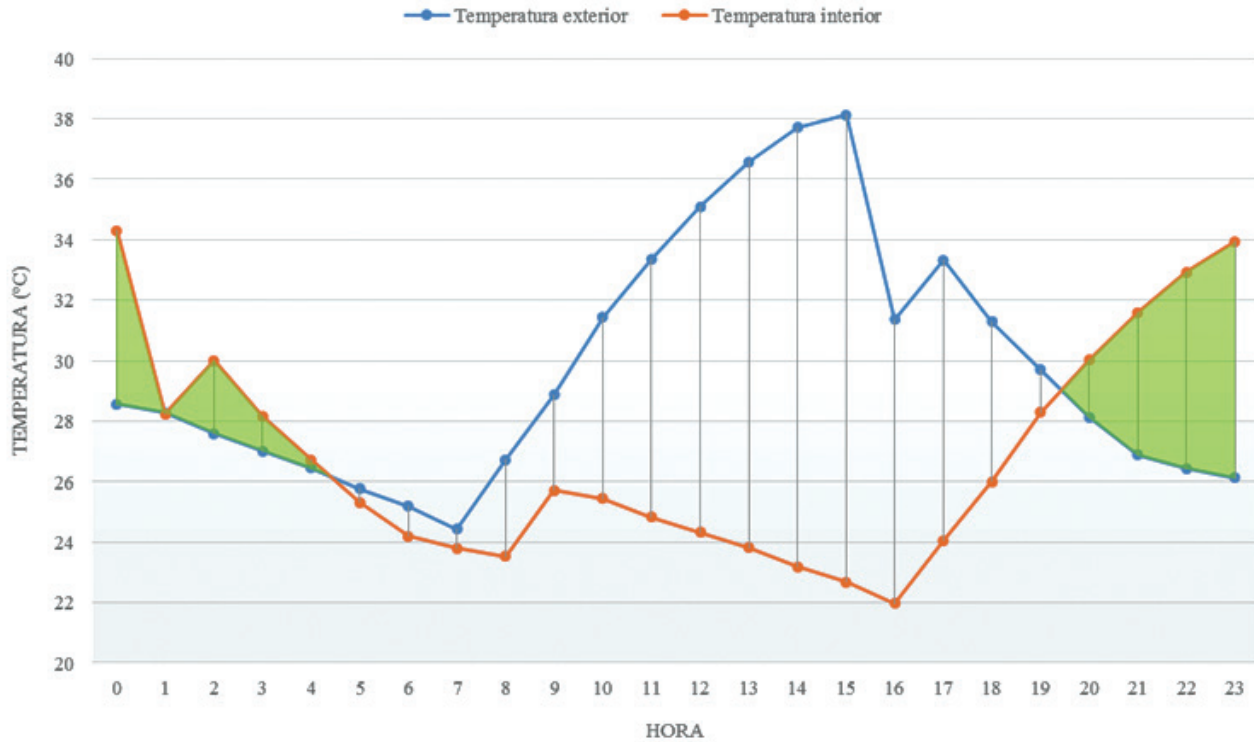


Figura 10. Gráfica de temperatura interior y exterior. 4 de mayo 2017.

Para calcular la velocidad y el caudal de viento que entra por la ventana orientada al noreste y cómo se realiza la ventilación cruzada, se deben realizar algunos cálculos matemáticos. Primero, se debe realizar un ajuste por la rugosidad y otro ajuste por la altura de la velocidad del viento, debido a que los datos obtenidos por la estación meteorológica son a 10 metros de altura en una zona urbana, se hace la corrección a 3.5 metros con las siguientes fórmulas (ASHRAE, 1993):

$$V_{ref} = A_o * V_{met} \quad (6)$$

$$A_o = 1.291 \exp(-0.005214 (\delta - 250)) \quad (7)$$

Donde:

- V_{ref} = velocidad de referencia estimada (m/s)
- V_{met} = velocidad meteorológica (m/s)
- A_o = constante de rugosidad
- δ = capa de fricción o altura de la capa límite
(se toma valor aproximado de 400 metros)

La velocidad promedio del día estudiado es de 12.35 km/h, es decir 3.53 m/s, por lo tanto la

velocidad ajustada por rugosidad es igual a 2.08 m/s y se procede a hacer el ajuste por altura mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_H = k * H^{1/3} \quad (8)$$

Donde:

- V_H = velocidad del viento a la altura H (m/s)
- k = constante de velocidad
- H = altura de referencia (estación meteorológica)

La constante de la velocidad de determina mediante la siguiente función:

$$k = V_{ref} / H_{ref}^{1/3} \quad (9)$$

Donde:

- k = constante de velocidad
- V_{ref} = velocidad del viento (m/s)
- H_{ref} = altura de referencia

Con los datos obtenidos y ajustados por rugosidad se obtiene una velocidad del viento ajustada a la altura de la habitación a analizar (3.5 mts) de 1.02 m/s. A continuación es

necesario conocer la presión dinámica del viento en ambas ventanas para conocer posteriormente el caudal de viento que atraviesa la habitación, mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_w = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (10)$$

En donde:

- ρ_w = presión dinámica del viento (pa)
- ρ = densidad del aire ambiente –exterior- (kg/m³)
[Al nivel del mar la densidad del aire es aproximadamente 1.2 kg/m³]
- v = velocidad del viento (m/s)

Reemplazando los valores en la fórmula $\rho_w = 0.6 \cdot (1.02)^2 = 0.62$ pa y se emplean coeficientes aproximados de presión para conocer la presión en cada una de las ventanas, la ventana grande apunta frontalmente a la dirección del viento (Figura 11), por lo cual se toma un coeficiente de 0.8 y se conoce como barlovento. La ventana de salida del viento toma un coeficiente de -0.3 y se conoce como sotavento, quedando las presiones de la siguiente forma:

$$\text{Ventana barlovento} = 0.51 \text{ pa} \quad \text{Ventana sotavento} = -0.19 \text{ pa}$$

Una vez que se conocen las presiones específicas, se calcula la tasa de ventilación de la siguiente manera:

$$Q = 0.827 A (\Delta p)^{0.5} \quad (11)$$

En donde:

- Q = tasa de ventilación (m³/s)
- A = área de la abertura de ventilación (m²)
- Δp = diferencia de presiones entre las dos aberturas de la ventilación cruzada (pa)

Por lo tanto:

$$Q = 0.827 \cdot 1.10 \cdot (0.51 - (-0.19))^{0.5} = 0.76 \text{ m}^3/\text{s}$$

Y la velocidad del viento a través de la ventana queda definida por la fórmula:

$$v = Q/A \quad (12)$$

$$v = 0.76 \text{ m}^3/\text{s} / 1.10 \text{ m}^2 = 0.69 \text{ m/s}$$

Este resultado es bueno, ya que según Evans (Evans, 1957), nos permitiría lograr un enfriamiento en la sensación térmica de los usuarios de aproximadamente 1.2°C; sin embargo no será suficiente para alcanzar niveles de confort térmico por completo, ya que en muchos momentos seguirán existiendo más de 30°C al interior de la vivienda. (Tabla 5)

De igual forma se puede evaluar la posibilidad de la ventilación subterránea, tanto para disminuir temperatura, como para disminuir la humedad del aire, sobre todo para los días húmedos.

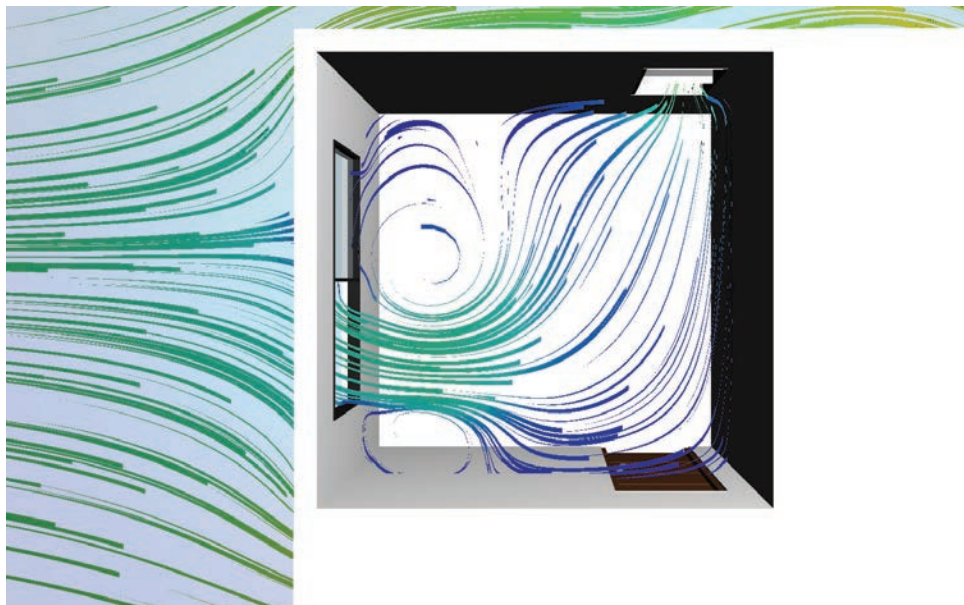


Figura 11. Simulación de ventilación cruzada. Generado con *flow design software*. (AUTODESK, 2019)

VELOCIDAD DEL VIENTO (M/S)	EFECTO MECÁNICO	EFECTO EN EL USUARIO	EFECTO D ENFRIAMIENTO TBS°C				
			PIEL SECA				PIEL HÚMEDA
			15°	20°	25°	30°	30°
0.1	Mínimo a nivel doméstico.	Se puede sentir sofocación.	0	0	0	0	0
0.25	El humo del cigarro indica el movimiento.	Hay movimiento imperceptible excepto a bajas temperaturas del aire.	2	1.3	0.8	0.7	0.7
0.5	Flamear de una vela.	Se siente fresco a temperaturas confortables, pero incómoda a bajas temperaturas.	4	2.7	1.7	1.2	1.2
1	Los papeles sueltos pueden moverse, lo que equivale a la velocidad al caminar.	Agradable generalmente cuando el clima es confortable o caliente pero causa una sensación de movimiento patente. Es el nivel máximo aceptable de confort nocturno.	6.7	4.5	2.8	1.7	2.2
1.5	Demasiado rápido para trabajos de oficina. Se vuelan los papeles.	Incómodo a temperaturas confortables. Límite máximo de confort para actividades interiores.	8.5	5.7	3.5	2	3.3
2	Equivale a la velocidad al caminar rápido.	Aceptable solo en condiciones muy cálidas y húmedas, cuando ningún otro alivio ambiental está disponible.	10	6.7	4	2.3	4.2

Tabla 5. Velocidades del viento en espacios interiores y su efecto en los usuarios. (Evans, 1957)

Teniendo como ejemplo el 10 de septiembre, con una temperatura promedio de 25.01°C, una humedad relativa del 93.37%, y una humedad absoluta de 18.10 gr_{agua}/kg aire, sería necesario disminuir la humedad relativa al 60%, es decir a 11.63 gr_{agua}/kg aire. Sin embargo, para conseguirlo mediante esta técnica, sería necesario que la temperatura del terreno fuera de 17.78°C, muy distinto a los 25-27°C que existen en realidad. Se han estudiado algunas formas de descender la temperatura del terreno por medio de irrigación, sombreado y colocación de capas de grava sobre el terreno (Derradji & Aiche, 2014; Givoni, 2007) y se deberá analizar su efectividad para el tipo de clima en cuestión.

Conclusiones

Por los análisis realizados se puede concluir el importante papel que juega la humedad en lugares

como Villahermosa, Tabasco, aumentando la sensación térmica entre 2°C y 4°C, volviendo una prioridad el disminuir dichos niveles para lograr confort térmico. Es posible captar la humedad contenida en cuartos cerrados mediante la utilización de materiales desecantes, como el gel de sílice, sin embargo se deben buscar formas estéticas de colocarlo al interior de las viviendas, así como nuevos métodos de regenerarlo empleando la menor cantidad energética posible.

Para descender las altas temperaturas del interior, es posible utilizar ventilación natural nocturna asistida de ventilación mecánica controlada, debido a que las constantes climatológicas muestran un potencial del viento para ayudar al enfriamiento de la sensación térmica de los usuarios, aproximadamente 1.2°C. La ventilación subterránea podría servir para el caso de estudio,

siempre y cuando se pudiera descender la temperatura del terreno, aproximadamente entre 1 y 2 metros de profundidad, caso que deberá de estudiarse detalladamente. Cuando se analizan varias estrategias de climatización pasiva por separado, propuestas para viviendas ubicadas en clima cálido-húmedo, se encuentran resultados favorables, pero que no permiten obtener niveles de confort térmico al interior de la vivienda por completo; sin embargo son efectivos para mitigar los efectos y reducir el consumo eléctrico de los sistemas activos de refrigeración y de ventilación mecánica. De igual forma es necesario realizar análisis completos integrando todas las estrategias en el mismo caso de estudio y realizando simulaciones para varios casos, jugando con las combinaciones de humedad, temperatura y ventilación. (Tabla 6)

En lugares tropicales que tengan clima cálido-húmedo es probable que sigan siendo dependientes parcialmente de equipos de refrigeración para alcanzar niveles de confort térmico, sin embargo la implementación de sistemas pasivos es necesaria para disminuir el consumo eléctrico.

	HUMEDAD	TEMPERATURA	VENTILACIÓN
Caso #1	Alta	Alta	Alta
Caso #2	Alta	Alta	Baja
Caso #3	Alta	Baja	Alta
Caso #4	Alta	Baja	Baja
Caso #5	Baja	Alta	Alta
Caso #6	Baja	Alta	Baja
Caso #7	Baja	Baja	Alta
Caso #8	Baja	Baja	Baja

Tabla 6. Escenarios propuestos para análisis.

Referencias

- ASHRAE. (1993). *Handbook, Fundamentals*.
- . (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy (Vol. 55).
- Cervantes, J., Barradas, V., Martínez, A., Cordova, Q., Ramírez, C., & Tepach, G. (2000). *Aspectos del clima urbano de Villahermosa*. Universidad y Ciencia, 16, 10-16. Tabasco, México.
- Daud, W. R. W. (2001). *A novel short-cut design method for adsorbers used in gas dryers and dehumidifiers*.
- Derradji, M., & Aiche, M. (2014). Modeling the soil surface temperature for natural cooling of buildings in hot climates. *Procedia Computer Science*, 32, 615-621.
- Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2626-2640.
- Evans, B. (1957). Research report 59. *Texas: texas engineering station*.
- Givoni, B. (1969). *Man, climate and architecture*. Amsterdam: Elsevier Science.
- (2007). Cooled soil as a cooling source for buildings. *Solar Energy*, 81(3), 316-328.
- Hinz, E. (1986). *Proyecto clima y arquitectura: informe final de la primera etapa del trabajo de investigación*. Universidad del Zulia.
- INEGI. (2016). *Encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares 2016*. México.
- Olgyay, V. (2015). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism-New and expanded*. Princeton university press.
- Olgyay, V., & Frontado, J. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili.
- Palme, M., Aldunate, C.C., & Huerta, M.A.G. (2016). Estimación del riesgo de sobrecalentamiento y del potencial de refrigeración por ventilación natural de viviendas unifamiliares en ciudades costeras de Chile. *Hábitat Sustentable*, 52-61.
- Steadman, R.G. (1994). Norms of apparent temperature in Australia. *Aust. Met. Mag*, 43, 1-16.



Ignacio Alejandro Guzmán-Hernández

Doctorando en tecnología de la arquitectura, la edificación y el urbanismo de la Universidad Politécnica de Catalunya, graduado con mención honorífica del máster en tecnología en la arquitectura en la Universidad Nacional Autónoma de México.



Fidel Franco González

Licenciado en Física (1975), Doctor en Física (1983), Profesor de la UPC desde 1975. Profesor titular desde 1984.

Áreas de interés de investigación: ahorro energético, confort térmico, cambio climático y salud de los edificios.

Actividades y publicaciones: 45 presentaciones en congresos, 14 patentes de invención, 5 capítulos para libros, 2 libros y 20 artículos.



Jaime Roset

Licenciado en Física. Facultad de Física UB, 30 de septiembre de 1982.

Doctor en Ciencias Especialidad Físicas. ETSAB/UPC 10 de julio de 2006.

Profesor Titular (en la UPC desde 1982 fue Encargado de Curso, Asociado a tiempo completo, TEU y, desde 2014, TU).

Actividades y publicaciones: autor de 20 artículos, 2 libros, 5 capítulos para libros, 85 presentaciones a congresos (1982-2018). Entre 2011 y 2018, 13 artículos, 1 libro y 4 capítulos para libros. Profesor de Física en la ETSAVs y la ETSAB desde 1982 hasta 2018. Miembro de la Junta de Escuela. Jefe de Estudios 2008-2011.