

Zonas climáticas para el diseño de edificaciones y diagramas bioclimáticos para Venezuela

Luis Rosales

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad Central de Venezuela

Resumen

Adaptar la arquitectura al clima demanda examinar el potencial que éste ofrece para lograr confort térmico al interior de las edificaciones. Una herramienta para ello son los diagramas bioclimáticos, los cuales se construyen reuniendo los rangos de temperatura y humedad del sitio, las condiciones de temperatura y humedad que por sí solas producirían confort térmico y aquellas que permitirían alcanzarlo recurriendo a determinadas estrategias de diseño. En este trabajo se presentan los diagramas bioclimáticos correspondientes a Venezuela y se deducen de ellos pautas de diseño generales. En la primera parte se presenta una clasificación climática del país para el diseño de edificaciones basada en el cotejo de los datos meteorológicos de varias localidades de Venezuela con una tipificación climática dependiente de la humedad y la temperatura; en la segunda se presentan los diagramas bioclimáticos de ciudades representativas de las zonas definidas precedentemente, y en la tercera, se enumeran y comentan las pautas generales de diseño que se derivan de dichos diagramas bioclimáticos.

Abstract

Adapting architecture to climate, demands examination of the potentiality it offers as to achieve thermic comfort in the interior of the buildings. Tools for that, are the bioclimatic diagrams structured by joining temperature and humidity ranges of the site, temperature and humidity conditions which will in themselves, produce thermic comfort, and those that will allow reaching it, resorting to specific design strategies. In this work are presented the bioclimatic designs corresponding to Venezuela, and deduced from them, the general design guidelines. In the first part is presented a climatic classification of the country for the designing of edifications based on the comparison of meteorological data of the various cities of Venezuela with a climatic typification depending on humidity and temperature. In the second part are presented bioclimatic diagrams of representative cities of the zones previously defined, and in the third part, enumerated and commented, are the general design guidelines derived from the mentioned bioclimatic diagrams.

Descriptorios

Clima y edificaciones; Diagramas bioclimáticos para Venezuela; Confort térmico.

El diseño arquitectónico tiene una influencia primaria en la eficiencia energética de las edificaciones y el confort térmico de los usuarios. Cualquier enfoque para predecir esa influencia debe acoplar tres elementos: el clima, el criterio de confort y la propia edificación. Ello ha dado lugar principalmente a dos formas de abordar el problema por parte de los arquitectos: usando pautas de diseño generales dependientes del tipo de clima, y tomando decisiones basadas en simulaciones por computadora (Dewit y Augenbroe, 2002). Las pautas de diseño se fundamentan en experiencia, investigaciones, estudios empíricos o análisis climáticos coligados con los requerimientos de confort. Son particularmente útiles al comienzo del proceso de diseño, cuando se toman las decisiones más importantes en relación con el ahorro energético y el confort térmico (Holm, 1993). La simulación por computadora es más precisa pero requiere como dato la geometría de la edificación, lo cual la hace más adaptada a las etapas finales del diseño en lugar de servir como herramienta para las decisiones iniciales (Clarke et al., 2004).

Entre los métodos para definir pautas de diseño generales para arquitectos están los diagramas bioclimáticos, de uso extendido en nuestros días. Estos facilitan el análisis de las características climáticas de un sitio desde la perspectiva del confort humano en las edificaciones, al reunir en un diagrama los valores de temperatura y humedad de la zona, los rangos de temperatura y humedad que producirían confort y aquellos que permitirían alcanzarlo mediante estrategias de diseño específicas.

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN | Vol. 23-I | 2007 |
pp. 45-60 | Recibido el 05/08/05 | Aceptado el 10/09/06

Salvo un estudio realizado hace 25 años (Curiel, 1982), en Venezuela, para adaptar la arquitectura al clima, es recurrente limitar la difusión de los procedimientos a las reglas propias de la arquitectura tropical: creación de plantas abiertas, fomento de la ventilación natural, sombreado de la envolvente y espacios internos y así sucesivamente (CMCTE, 1999; Sosa et al., 2004). Un enfoque de más alcance debe incluir las regiones de altitudes crecientes, en las que la reducción de la temperatura del aire relativiza la aplicación de las pautas propias de las regiones cálidas de baja altitud hasta invalidarlas.

La finalidad de este artículo es presentar los diagramas bioclimáticos de los diferentes tipos de clima de Venezuela con el objeto de que el arquitecto conozca desde el inicio del proyecto las estrategias básicas de adaptación al clima que corresponden aplicar en cada tipo de clima.

Zonas climáticas de Venezuela para el diseño de edificaciones

Los elementos del clima que condicionan el diseño de edificaciones son básicamente la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar y el viento. Un primer examen del clima venezolano basado en atlas climatológicos (Álvarez, 1983; Hobaica, 1985) permite relacionar dichos elementos con la geografía, a fin de determinar variaciones de carácter general. De tal examen se concluye:

- La temperatura del aire es el elemento que más claramente varía en Venezuela, en relación directa con la altitud. Los valores máximos superan los 35°C en las regiones bajas y no pasan de 15°C en las regiones montañosas altas. La amplitud diaria varía entre 5°C y 12°C, siendo menor en las zonas costeras y mayor en el resto del país. Por otro lado, por estar Venezuela cerca del ecuador, la amplitud térmica anual es comparativamente baja, menor que 5°C. Aunque tal amplitud faculte catalogar al clima como isotermo, su tamaño es suficiente (como se verá luego) para modificar la denominación del tipo de clima en una misma zona según la temporada.
- La humedad absoluta depende de la temperatura y, por consiguiente, de la altitud. Varía desde unos 7g/kg en las regiones montañosas altas hasta más de 20g/kg en las regiones bajas y húmedas. La humedad relativa en cambio es similar en todas partes, variando

entre 60% y 100%, según la hora: menor en las tardes, cuando el aire se calienta, y mayor en las noches, cuando el aire se enfría.

- Si bien la intensidad de la radiación solar es un elemento esencial en el diseño de edificaciones, no presenta en Venezuela variaciones determinantes, pudiéndose considerar elevada en todas partes (20 MJ/m²día a 25 MJ/m²día en el plano horizontal).
- Finalmente se pueden distinguir tres zonas en las cuales la velocidad media del viento es, ya sea fuerte (más de 5 m/s en las zonas costeras), ya sea moderada (unos 3 m/s en las zonas continentales de latitudes intermedias), ya sea baja (menor que 2 m/s en el Sur del país). Por su parte, la dirección del viento a escala macro se corresponde con la de los vientos alisios (NE-E), pero en las zonas costeras el viento llega de día perpendicular a la costa (brisas marinas) y en las zonas montañosas y las ciudades las direcciones predominantes las imponen la topografía y el urbanismo.

Con el objetivo de delimitar las principales zonas climáticas del país usando como criterio de base la variación de la temperatura del aire, se apela a los datos horarios de las estaciones meteorológicas y al diagrama psicrométrico. El diagrama 1 muestra las áreas en las que se ubican los promedios mensuales de la temperatura máxima diaria y la humedad en ocho localidades venezolanas de diferente altitud (datos de la Fuerza Aérea Venezolana del año 2000, con excepción de la Colonia Tovar, cuyos datos fueron tomados de Hobaica (1984), y de Apartaderos, cuyos datos los proporciona el observatorio astronómico en <http://www.cida.ve/meteorol.html>).

Seguidamente se pueden definir en el mismo diagrama tipos de clima diferentes con base en la sensación higrotérmica del aire, usando como indicador el índice de temperatura efectiva estándar de AHSRAE para ropa ligera, actividad sedentaria, ausencia de viento y temperatura radiante media igual a la del aire (ASHRAE 55, 1981; Marsh y Raines, 2005):

- La frontera entre clima frío y clima moderado corresponde a una temperatura de 20°C, límite entre una sensación de frío y una de confort.
- La frontera entre clima moderado y clima cálido corresponde a una temperatura de 27°C, límite entre una sensación de confort y una de calor ligero.
- La frontera entre clima cálido y clima caliente corresponde a una temperatura de 33°C, equivalente a la

temperatura promedio de la piel, la cual recibiría calor por convección si la temperatura del aire fuese superior, produciendo una sensación franca de calor.

- La frontera entre clima seco y húmedo corresponde a una humedad absoluta de 13g/Kg, equivalente a la presión de vapor del sudor a la temperatura promedio de la piel, por encima de la cual se dificulta su evaporación.

Al aplicarse estos criterios se revela que Mérida tiene un clima diurno moderado, Caracas cambia a lo largo del año de un clima moderado a uno cálido-húmedo, Valencia y Porlamar son ciudades de clima cálido-húmedo (bien que Porlamar sea bastante más húmeda) y Maracaibo y Calabozo tienen un clima que cambia de cálido-húmedo a caliente-húmedo. Para lugares de mayor altitud que Mérida se entra gradualmente en las regiones de clima frío: La Colonia Tovar tiene un clima diurno que varía de moderado a frío, en tanto que Apartaderos posee un clima bastante frío todo el año.

Adviértase en el diagrama 1 que se puede establecer una correspondencia aproximada entre la altitud y la

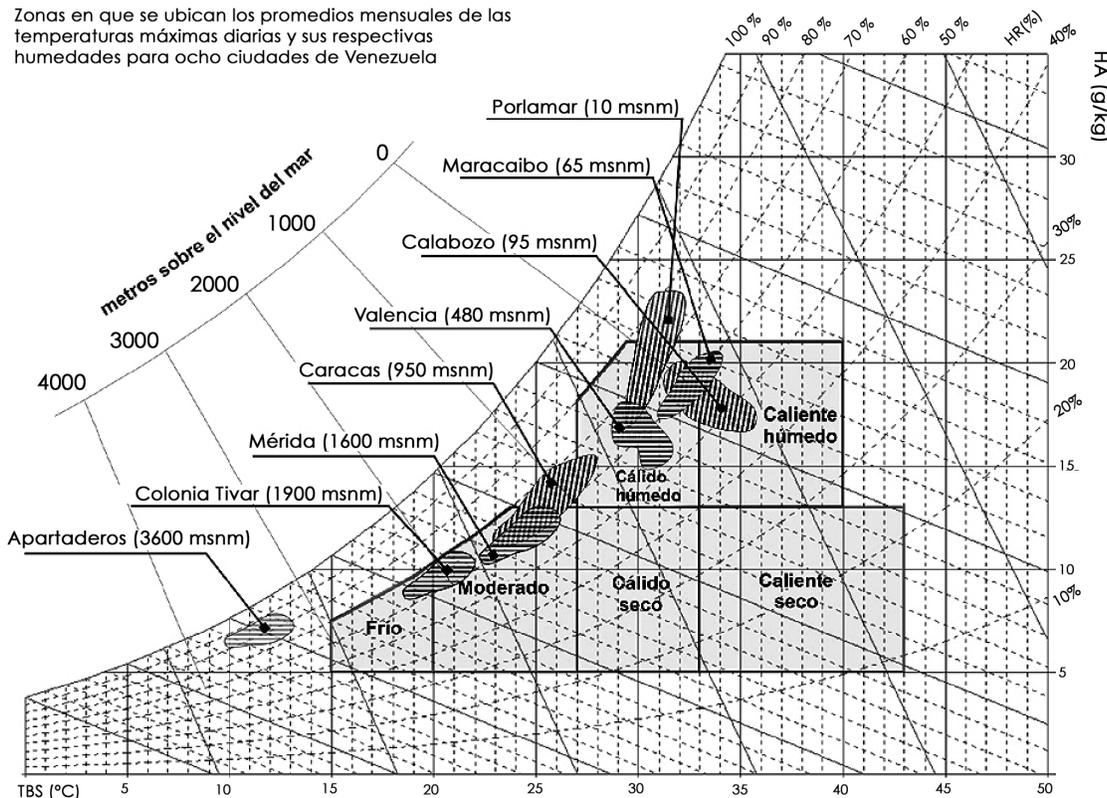
ubicación de los valores medios mensuales máximos de la temperatura del aire, lo que induce a incorporar una escala que permite ubicar cualquier región, conocida su altitud. Se pueden luego definir seis zonas, cada cual asociada a un rango de altitud definido y a uno o dos tipos de clima, según si las variaciones estacionales hacen que las condiciones pasen de un tipo de clima a otro (cuadro 1).

A una región incluida en una de estas seis zonas se le pueden finalmente asociar dos sub-zonas dependientes de la velocidad de viento (considerada a escala macro) y la amplitud diaria de temperatura, conforme al examen general realizado al inicio, utilizando atlas climáticos (cuadro 2).

La clasificación presentada no pretende ser rigurosa. Cabe al respecto considerar el sentido de definir con exactitud la transición entre un tipo de clima y otro pues no es posible delimitar a altitudes precisas el paso de una serie de pautas de diseño a otra. Las altitudes que señalan las fronteras entre dos zonas podrán entenderse como zonas difusas en que las pautas de diseño propias de ambas zonas se mezclan.

Diagrama 1
Tipos de clima diurno de ocho localidades venezolanas

Zonas en que se ubican los promedios mensuales de las temperaturas máximas diarias y sus respectivas humedades para ocho ciudades de Venezuela



Cuadro 1
Zonas climáticas para el diseño de edificaciones en Venezuela

| Zona | Altitud (m) | Tipo de clima | Algunas localidades importantes |
|------|-------------------|---------------------------------|---|
| 1 | 0 a 400 | Cálido húmedo a caliente húmedo | Acarigua, Altagracia de Orituco, Anaco, Barcelona, Barinas, Cabimas, Calabozo, Carúpano, Ciudad Bolívar, Coro, Cumaná, El Tigre, El Vigía, Guanare, Guarenas, La Asunción, Maiquetía, Maracaibo, Maturín, Píritu, Porlamar, Puerto Ayacucho, Puerto Cabello, Puerto La Cruz, Puerto Ordaz, Punto Fijo, San Carlos, San Felipe, San Fernando, Tucacas, Tucupita. |
| 2 | 400 a 700 | Cálido húmedo | Barquisimeto, Carora, El Tocuyo, Maracay, San Casimiro, San Juan de los Morros, Valencia, Valera |
| 3 | 700 a 1.100 | Cálido húmedo a moderado | Caracas, Caripe, Rubio, San Cristóbal, Santa Elena, Trujillo |
| 4 | 1.100 a 1.700 | Moderado | Boconó, La Grita, Los Teques, Mérida, San Antonio de los Altos |
| 5 | 1.700 a 2.200 | Moderado a frío | Bailadores, Colonia Tovar, Timotes, Galipán |
| 6 | 2.200 en adelante | Frío | Apartaderos, Mucuchíes, Mucurubá, Santo Domingo |

Cuadro 2
Sub-zonas climáticas para el diseño de edificaciones

| | |
|----------------------|--|
| Velocidad de viento: | Alta (del orden de 5 m/s): regiones costeras del norte del país. Moderada (del orden de 3 m/s): regiones de latitud intermedia (6 a 10° latitud norte). Débil (menor que 2 m/s): regiones de poca latitud (0.36 y 6° latitud norte). |
| Amplitud: | Pequeña (6°C): regiones costeras del norte del país. Moderada (8°C a 12°C): resto del país. |

Diagramas bioclimáticos: potencial de las estrategias de diseño vinculadas a las condiciones de temperatura y humedad del aire

Los diagramas bioclimáticos fueron ideados por los hermanos Olgay hace unos 50 años (Olgay, 1963). Su propuesta, muy usada aún, consiste en un diagrama donde el eje de las abscisas representa la humedad relativa y el de las ordenadas, la temperatura. Dentro del diagrama se localiza una zona de confort para el caso de una persona en actividad ligera, traje formal, sin viento y a la sombra (basada en datos de fisiólogos de los años 20). En el mismo diagrama se indican las condiciones fuera de la zona de confort para las cuales es posible alcanzar confort térmico ventilando, cambiando la temperatura radiante o eva-

porando agua. Por suponer que todo se da al exterior, el diagrama de Olgay fue sugerido para edificaciones livianas en regiones cálido-húmedas, en las cuales la temperatura interior pueda suponerse similar a la exterior.

Buscando incorporar la influencia de la envolvente de la edificación, Givoni creó un nuevo diagrama basado en los procesos de transferencia que se dan a través de ella y en la relación lineal entre la presión de vapor media mensual y la amplitud diaria de la temperatura del aire, la cual es característica del tipo de clima (Givoni, 1978). Según esta relación y usando el diagrama psicrométrico definió zonas específicas alrededor de la zona de confort que indican las condiciones higrotérmicas del aire bajo las cuales se puede alcanzar confort térmico apelando a alguna de las siguientes estrategias de diseño:

- *Ventilación natural*: entendida como la infiltración de aire fresco exterior a través de ventanas y aberturas a fin de crear corrientes que enfríen la piel por convección y ayuden a evaporar el sudor.
- *Masa térmica*: basada en la propiedad de los cerramientos pesados de absorber el calor del aire gradualmente, sin que se produzca en ellos cambios rápidos y pronunciados de temperatura. Ello permite reducir de día los valores máximos de la temperatura radiante media y de la temperatura del aire interior (siempre que no se ventile), bien que se aumenten de noche los valores mínimos.
- *Ventilación nocturna*: referida a los casos en que una edificación con suficiente masa térmica expuesta interiormente es ventilada de noche ampliamente con el objeto de enfriar dicha masa por convección, aumentándole así su capacidad de mitigar las altas temperaturas diurnas.
- *Evaporación directa*: cuando una corriente de aire pasa por un depósito de agua o atraviesa un material poroso y húmedo o cuando se proyecta agua pulverizada, la evaporación que se produce enfría el aire, bien que se aumente con ello la humedad.
- *Calefacción solar pasiva*: la práctica más corriente (conocida como "ganancias directas") consiste en ubicar en la envolvente superficies vidriadas expuestas al sol que dejen pasar la radiación solar hasta pisos y paredes interiores pesados a fin de que éstos acumulen calor en cantidades significativas y lo disipen al ambiente gradualmente y con retardo. El vidrio crea de paso un efecto invernadero en razón de ser transparente frente a la radiación solar y opaco frente a la radiación infrarroja emitida por las superficies de los elementos calentados. Adicionalmente se cubre con aislante térmico el resto de las superficies interiores con la finalidad de preservar mejor el calor atesorado. Según la cantidad de radiación solar diaria disponible en las fachadas (función de su orientación, de la latitud y de las condiciones atmosféricas) y la eficiencia global del sistema podrán neutralizarse a toda hora temperaturas del aire no menores de cierto valor (6°C en el mejor de los casos) (Peyush, 1998).

El diagrama bioclimático de Givoni ha sido muy usado desde su creación (Kolokotroni y Young, 1990; Zain-Ahmed et al., 1998; Ajibola, 2001; Morillón et al., 2004;

Lam et al., 2006). En Venezuela, una versión en la cual la zona de confort se adapta al clima de la ciudad de Maracaibo fue propuesta por González et al. (1986) (diagrama 2). Usando esta misma versión, Quiroz (1995) estimó que aproximadamente el 75% del tiempo la ventilación natural permite alcanzar confort térmico en edificaciones en Maracaibo (para una velocidad del aire de hasta 1,5m/s), ciudad donde la temperatura y la humedad se ubican siempre fuera de la zona de confort.

La principal limitación del diagrama de Givoni es que no toma en cuenta las cargas internas, por lo que se restringe a edificaciones en las que sea admisible despreciarlas (comúnmente edificaciones residenciales y edificaciones no residenciales de grandes espacios o de poca ocupación). Además, al plantear los límites de la ventilación, considera que la presión de vapor y la temperatura radiante se mantienen iguales al interior y al exterior, lo cual implica envolventes con un óptimo control solar. Finalmente asume que la efectividad de la masa térmica como estrategia de enfriamiento necesita la supresión de la ventilación natural en el día (Sayigh y Marafia, 1998).

Por su parte Szokolay (1987), sin alterar las zonas planteadas por Givoni, las vinculó con una nueva zona de confort definida por el índice de temperatura neutral desarrollado por Humphreys (1978) y Auliciems (1983). Esta temperatura neutral de confort (T_n) está supeditada a la temperatura media exterior (T_m), partiendo del criterio de que la sensación de confort cambia con el clima, según la siguiente relación:

$$T_n = 17,6 + 0,31 T_m$$

En esta fórmula T_m varía entre 18,5 y 28,5 °C.

La zona de confort queda luego definida como sigue:

- a) en el punto de temperatura igual a la temperatura neutral y humedad relativa 50%, su ancho es de 4°C (2°C a cada lado);
- b) sus límites izquierdo y derecho son líneas de igual temperatura efectiva estándar, según la norma ASHRAE 55 (1981);
- c) siguiendo esta misma norma, sus límites inferior y superior se fijan en humedades absolutas de 4 g/kg y 12 g/kg;
- d) finalmente, la humedad relativa no puede exceder 90% (Szokolay, 1986; Peyush, 1998; Sayigh y Marafia, 1998).

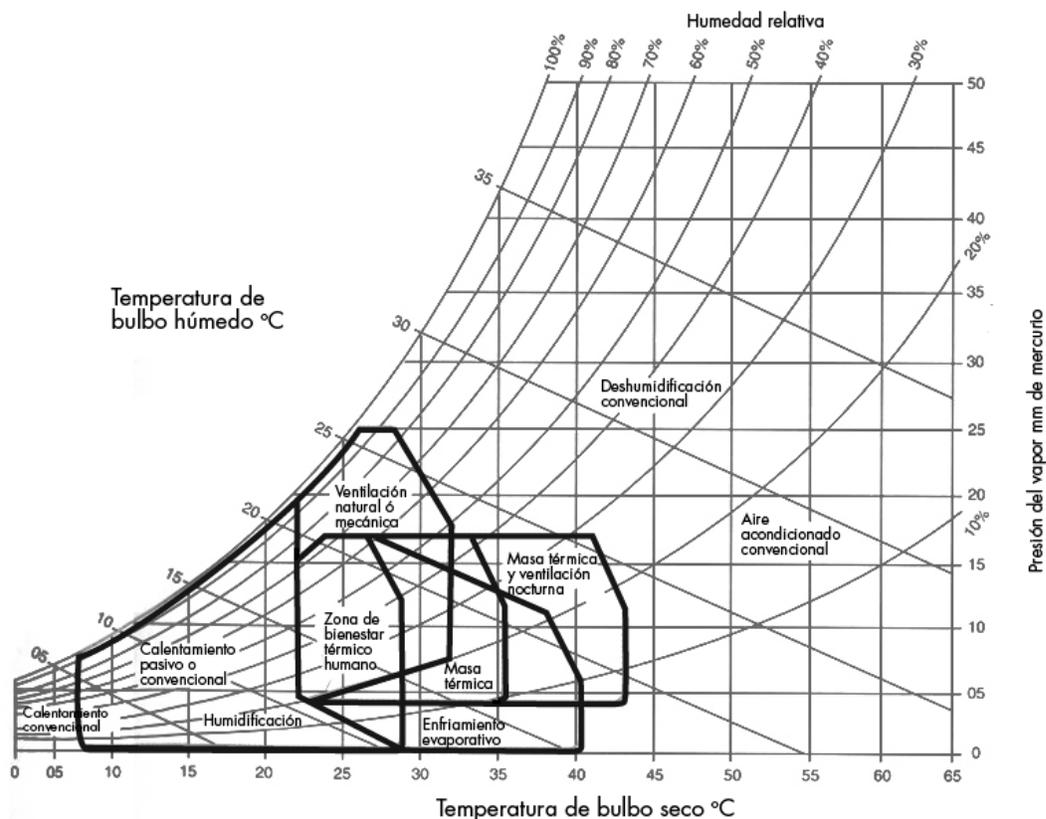
Esta zona de confort se puede entender como las condiciones de temperatura y humedad en las que sin corrientes de aire, con una temperatura radiante media igual a la del aire, realizando una actividad sedentaria (1 Met) y portando ropa estival (0,6 Clo) las personas se sienten confortables. Las zonas contiguas asociadas a cada estrategia de diseño suponen luego una ampliación de la zona de confort en el entendido de que bien aplicadas llevan a ambientes confortables. Al superponerse dichas zonas con los datos climáticos de una región se puede estimar cuán útil es cada estrategia en esa región a objeto de proveer confort. Si tales datos fuesen las amplitudes diarias promedio de cada mes, se puede, en adición, estimar cómo varía la eficacia de cada estrategia mes a mes.

Es importante subrayar que la zona de confort supone una temperatura radiante media igual a la del aire, lo cual significa que no interviene la radiación solar. En otras palabras, cualquier interpretación que se haga del diagrama parte de la premisa de que la edificación no recibe en primera instancia calor del sol.

Diagramas bioclimáticos para Venezuela

En lo que sigue se presentan los diagramas bioclimáticos según el modelo de Szokolay para seis de las ocho localidades venezolanas cuyo clima fue calificado más arriba. Concretamente Maracaibo, Valencia, Caracas, Mérida, La Colonia Tovar y Apartaderos, cada cual representando una de las seis zonas climáticas. El modelo fue llevado por Marsh y Raines (2005) al programa de computación *The Weather Tool* (<http://www.squ1.com/weathertool>), programa en el que se ingresaron los datos meteorológicos horarios de un año para cada una de estas localidades. Entre los resultados que suministra el programa están, además de los diagramas bioclimáticos, el tiempo en que las condiciones de temperatura y humedad se encuentran en una u otra zona del diagrama en intervalos de tiempo dados u horarios específicos.

Diagrama 2
Zona de confort para Maracaibo por González et al. (1986) y diagrama bioclimático de Givoni.



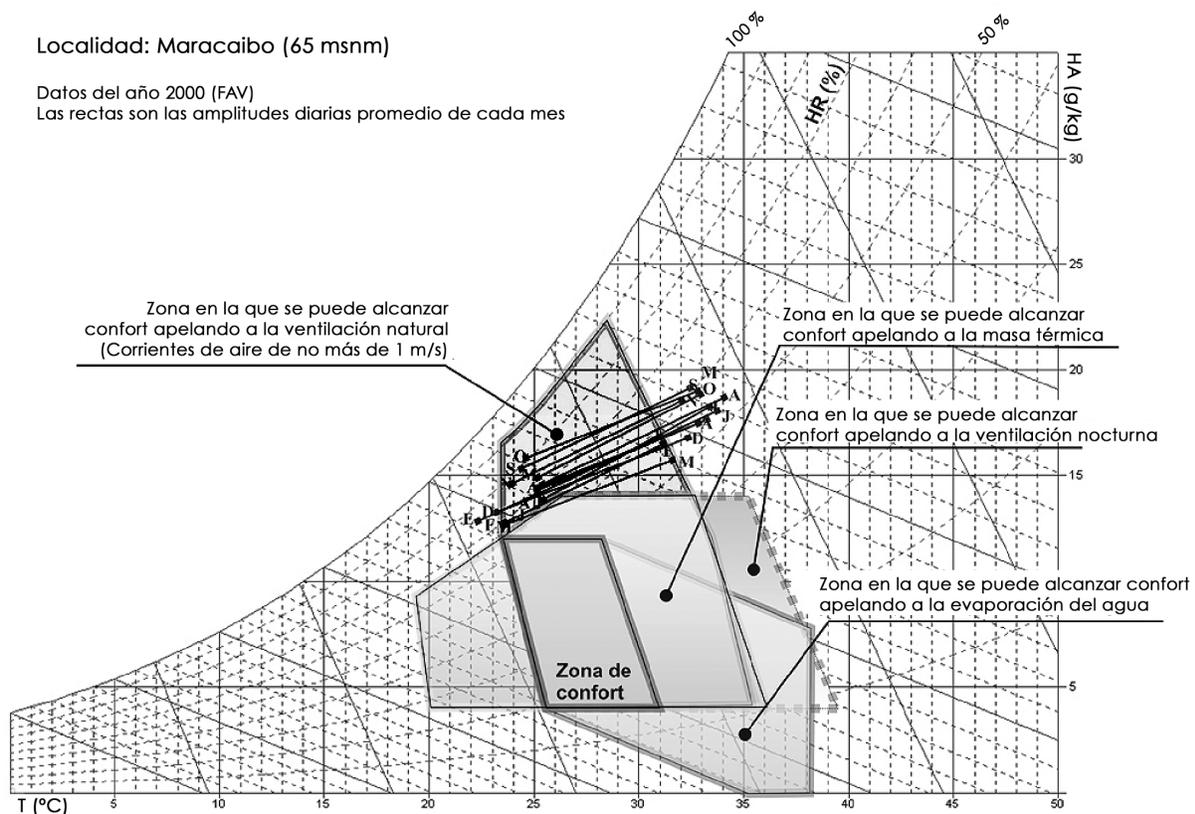
Zona climática 1. Altitud: 0 a 400 m. Localidad representativa: Maracaibo

Del diagrama bioclimático de la ciudad de Maracaibo (zona climática 1) (diagrama 3) se desprende:

- *Zona de confort:* la temperatura y la humedad se ubican fuera de la zona de confort todo el año.
- *Ventilación natural:* es factible lograr confort por medio de ventilación natural, salvo en las horas más calurosas (final de la mañana y la tarde). Específicamente, la ventilación permite obtener confort el 65% del año (casi 100% en los meses menos calurosos). Al respecto adviértase que se asume en el diagrama un límite de 1 m/s para la velocidad del aire, debido a que por encima de ese valor surgen molestias asociadas con el levantamiento de polvo y objetos livianos (AEC, 2003). Según el tipo de espacio ese límite podrá aumentar, aumentando el área de la zona asociada a la ventilación, aunque no más a la derecha que la temperatura promedio de la piel (33 °C).

- *Masa térmica:* en razón de la elevada humedad la masa térmica es poco eficaz para obtener confort de día al interior de las edificaciones (sólo 5% del año y menos de 10% en los meses menos cálidos). Corresponde sin embargo precisar que el diagrama indica las posibilidades de obtener confort usando la estrategia, pero no dice de manera específica si ésta puede mejorar las condiciones aunque no se alcance confort. Al respecto se puede comentar que observaciones, experimentos y simulaciones muestran que un adecuado manejo de la masa térmica permite disminuir los valores máximos de la temperatura diurna, sin que ello signifique restituir el confort en términos de humedad del aire (Givoni, 1994; González, 1997), aunque con el riesgo de empeorar las condiciones durante la noche si no se toman medidas particulares relativas al sombreado y al aislamiento de la masa térmica (PLEA, 1999).
- *Ventilación nocturna:* la ventilación nocturna no aumenta la probabilidad de lograr confort en comparación con la masa térmica (aunque se ha demostrado

Diagrama 3
Diagrama bioclimático de la ciudad de Maracaibo (zona climática 1)



que ayuda a mejorar las condiciones diurnas, particularmente si se le asiste con ventiladores (Givoni, 1997)).

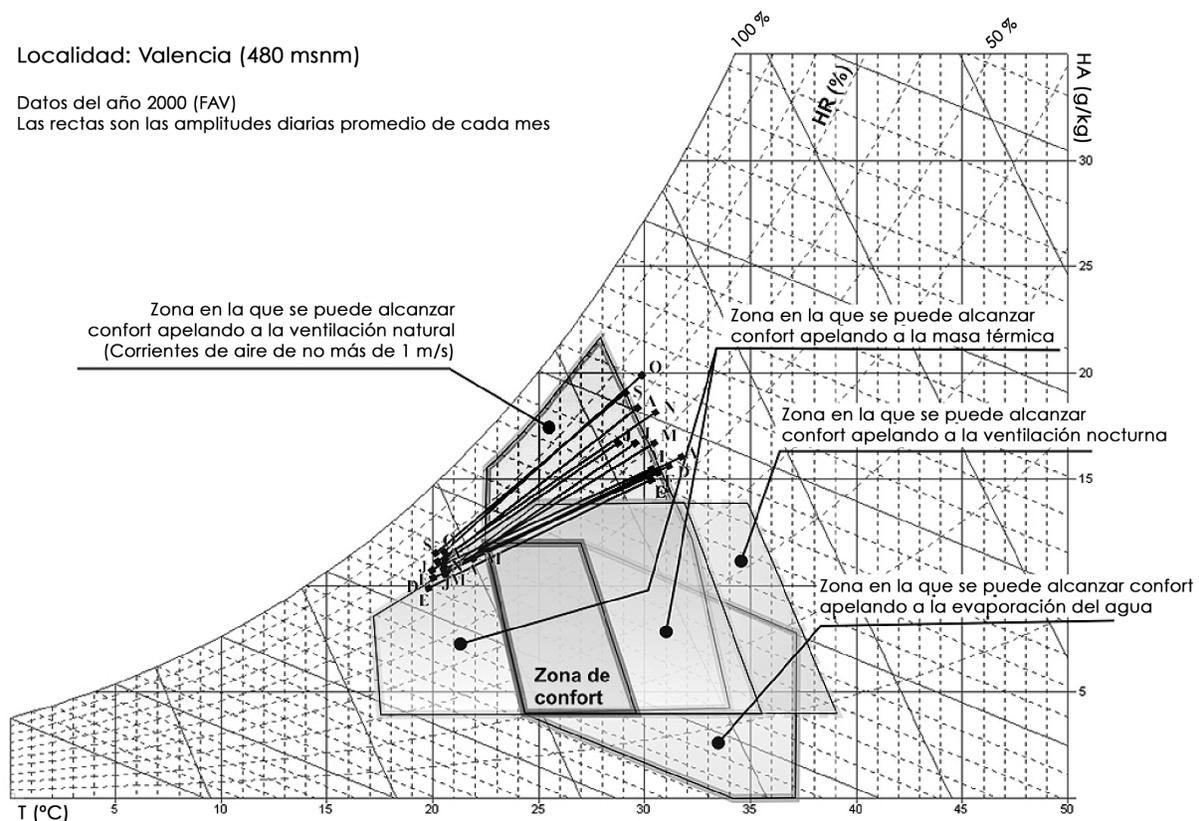
- *Evaporación de agua:* durante todo el año la elevada humedad impide sacar provecho de la evaporación directa como recurso de enfriamiento.

Se concluye que en la zona climática 1 es fundamental recurrir a la ventilación natural, siempre que se acepte que en las horas más calurosas el confort térmico será de todos modos inalcanzable. De modo que si se deseara contar con confort térmico a esas horas será necesario apelar a algún sistema adicional de enfriamiento (tal sistema no necesariamente es el aire acondicionado, pues existen sistemas pasivos que han demostrado poseer un buen potencial de enfriamiento en el clima de Venezuela, como son el enfriamiento radiativo, el enfriamiento evaporativo indirecto o el enfriamiento por el suelo (González, 1997a y 1997b; González y Achard, 1998; Hobai-ca et al., 2001)).

Zona climática 2. Altitud: 400 a 700 m. Localidad representativa: Valencia

En la ciudad de Valencia (zona climática 2) (diagrama 4) aumenta el tiempo en que la ventilación permite alcanzar confort térmico (cerca de 80% en horas diurnas a lo largo del año). Aun así, al menos en seis meses del año la temperatura y la humedad exceden en las horas más calurosas los mínimos propicios para alcanzar confort ventilando. Al igual que en la zona climática 1, la masa térmica, la ventilación nocturna y la evaporación directa no resultan de mucha utilidad para lograr confort, si bien durante los meses menos cálidos la masa térmica permite restituirlo hasta 30% del tiempo. En esta zona también se da el que de noche pueda hacer cierto frío (alrededor de 20°C). En tal sentido es válido juzgar que basta cerrar parcialmente la edificación a fin de preservar el calor interior. En este punto se debe además recordar que la zona de confort supone que las personas portan ropa

Diagrama 4
Diagrama bioclimático de la ciudad de Valencia (zona climática 2)



ligera, lo que autoriza considerar que se pueden abrigar mejor ante condiciones frías según el diagrama (cambiar de ropa mueve la zona de confort y por extensión las zonas asociadas a cada estrategia. Por ejemplo, ponerse un suéter produce un desplazamiento de entre 2°C y 3°C hacia la izquierda).

Zona climática 3. Altitud: 700 m. a 1.100 m.

Localidad representativa: Caracas

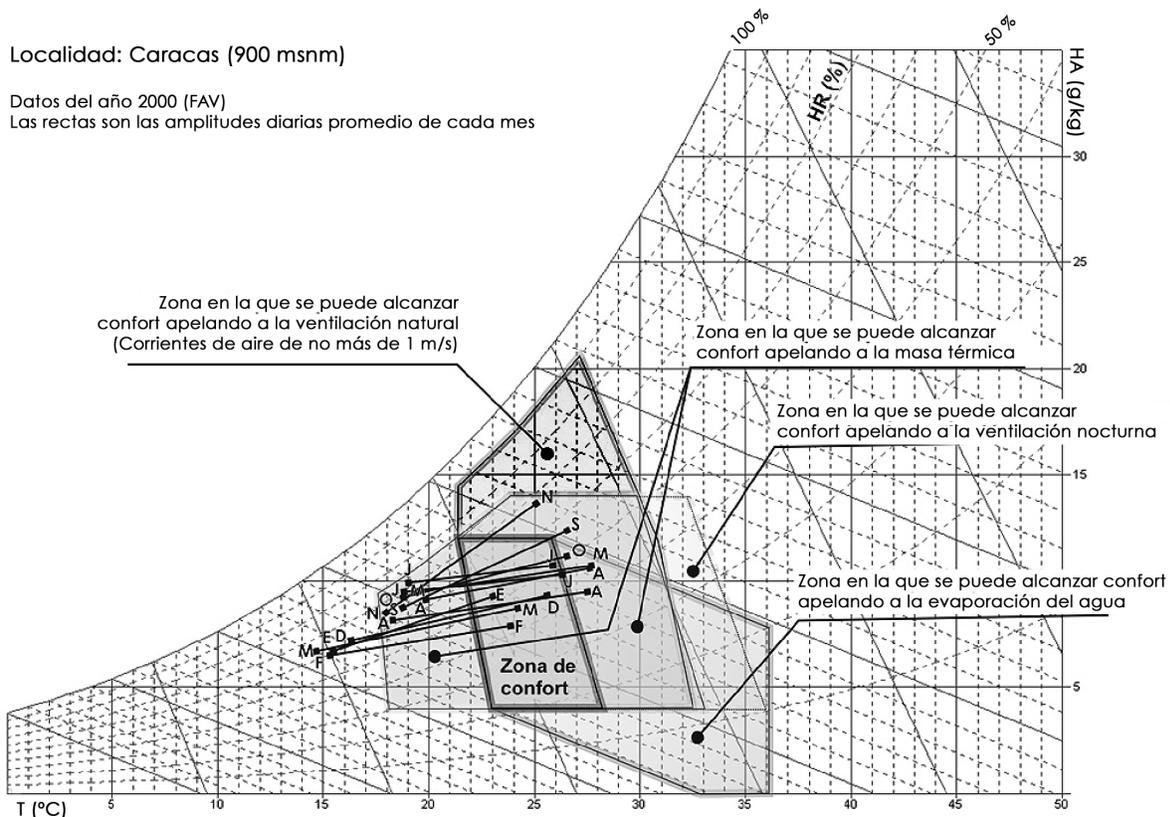
En Caracas (zona climática 3) (diagrama 5) la situación cambia de manera significativa en relación con las dos zonas anteriores. Debido a la importancia de la zona se glosan una a una las estrategias:

- **Zona de confort:** las condiciones higrotérmicas del aire se ubican en la zona de confort sólo 25% del tiempo. No obstante, el malestar térmico se presenta más que todo de noche y en la mañana, en razón del frío. En horas diurnas (de 10 a.m. a 6 p.m.) los valores de la

temperatura y la humedad se encuentran en la zona de confort aproximadamente 60% del tiempo.

- **Ventilación natural:** en las horas más cálidas basta con generar corrientes moderadas para que la ventilación lleve a las condiciones de confort (corrientes del orden de 0,5 m/s). De noche (y a veces de día) se debe contar con mecanismos que permitan reducir o anular las corrientes de aire.
- **Masa térmica:** durante el día, una edificación de elevada masa térmica presenta condiciones de confort todo el año. En la noche la masa térmica puede aprovecharse para atenuar el frío. En aquellos meses en que esto no baste (diciembre a marzo) se podría en teoría recurrir al calor del sol. Sin embargo, observando que el exceso de frío no cubierto por la masa térmica es del orden de 3°C y tomando en cuenta que la zona de confort fue definida para ropa ligera, se puede prever una adaptación en la vestimenta. Vale señalar que reducir el frío (habiendo suprimido la ventilación y no

Diagrama 5
Diagrama bioclimático de la ciudad de Caracas (zona climática 3)



contando con las cargas internas) significa en términos de diseño aumentar la temperatura del aire, aumentar la temperatura radiante o ambas. Aumentar la temperatura radiante se logra en primera instancia usando el calor del sol, con lo cual se produce una sensación equivalente a la de una temperatura del aire mayor en el diagrama. En Caracas esto puede consentirse en cantidades controladas según la temperatura que tenga el aire. Si ésta está cerca del límite derecho de la zona de confort, tal aumento deberá necesariamente compensarse con algún mecanismo de enfriamiento, como un incremento de la ventilación. La manera concreta de hacer esto se sale sin embargo del ámbito de las estrategias globales y sólo puede considerarse en el contexto de diseños específicos.

- *Ventilación nocturna*: al igual que la masa térmica, esta estrategia es aprovechable todo el año. Pese a ello, su utilización sólo podrá consentirse en espacios de uso

diurno, pues de noche hace demasiado frío como para maximizar la ventilación habiendo personas.

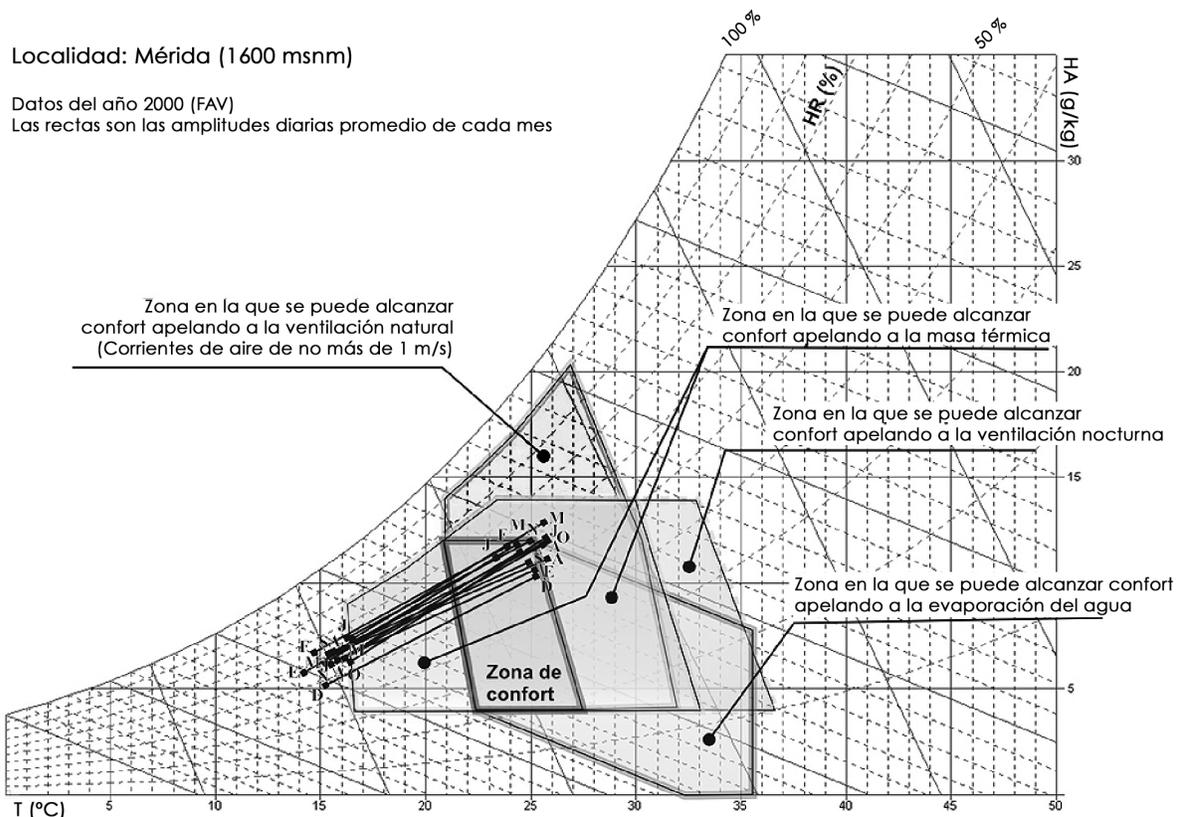
- *Evaporación directa*: esta estrategia lleva a confort eventualmente, en aquellos períodos en que las temperaturas máximas sobrepasan la zona de confort y la humedad relativa no excede 60%. Se debe observar que las condiciones higrotérmicas para las cuales la evaporación directa restituye el confort coinciden con aquellas de la ventilación natural y la masa térmica, estrategias éstas que permiten restituir el confort todo el año. En consecuencia podrá concebirse la evaporación directa como un complemento o un recurso alternativo en diseños específicos.

Zona climática 4. Altitud: 1.100 a 1.700 m.

Localidad representativa: Mérida

La situación en Mérida (zona climática 4) (diagrama 6) es similar a la de la zona climática 3, sólo que el

Diagrama 6
Diagrama bioclimático de la ciudad de Mérida (zona climática 4)

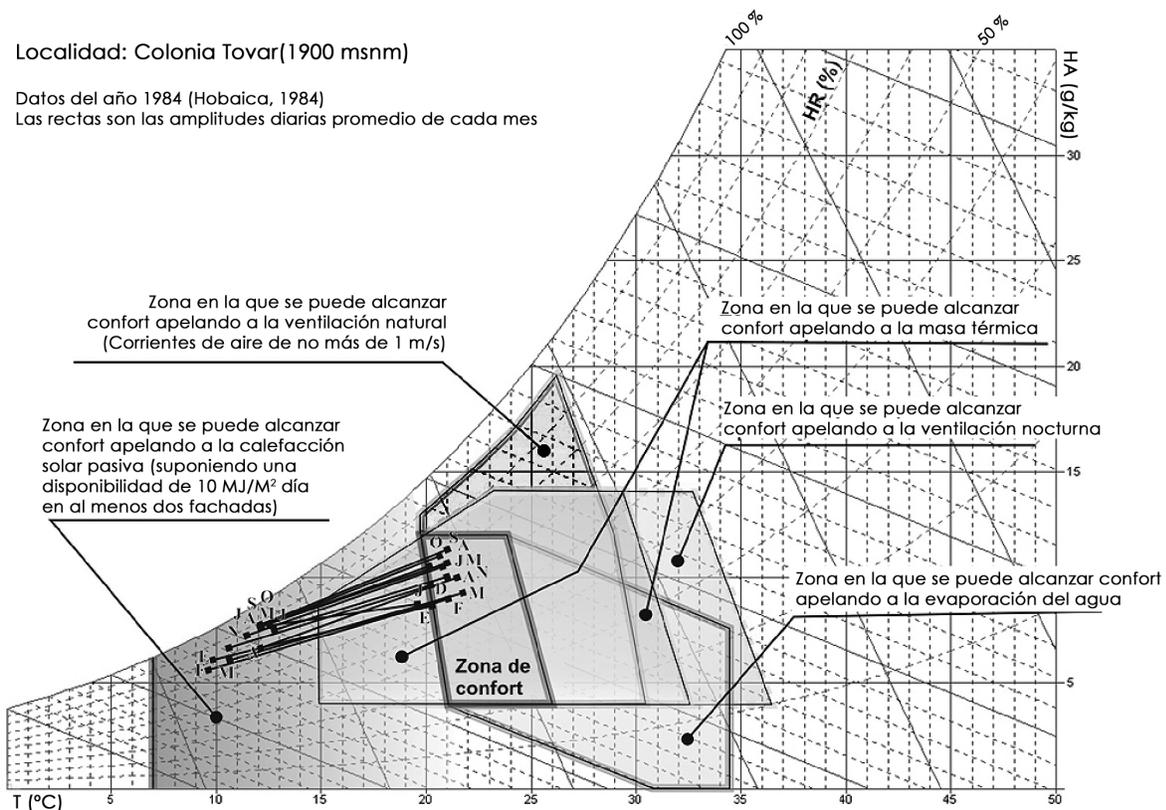


clima es moderado todo el año, razón por la cual se presenta poca necesidad de enfriar. Una edificación en este tipo de clima, protegida del sol, requiere en rigor ventilarse muy levemente, en ocasiones y por corto tiempo. El confort en las horas más cálidas puede alcanzarse igualmente recurriendo de forma limitada a la masa térmica o a la ventilación nocturna (el diagrama de hecho muestra que a esas horas existe todavía un margen de unos 4°C para consentir cierta captación de sol, siempre que se incremente la efectividad de las estrategias de enfriamiento). De noche hace frío, lo que obliga a usar envolventes de alta masa térmica, aunque ello no baste en las horas más frías. Sin embargo, al ser el exceso de frío del orden de 2°C a 3°C, es viable suponer que los usuarios puedan contrarrestarlo abrigándose.

Zona climática 5. Altitud: 1700 a 2200 m. Localidad representativa: La Colonia Tovar

Del diagrama bioclimático de La Colonia Tovar (zona climática 5) (diagrama 7) se advierte que no hay necesidad de apelar a estrategias de diseño destinadas a enfriar. Las temperaturas máximas se ubican en la zona de confort del lado del frío y permanecen allí sólo temporalmente (final de la mañana y primeras horas de la tarde). El resto del tiempo las condiciones atmosféricas obligan a calentar. Aumentar la masa térmica permite restituir el confort térmico aproximadamente la mitad de ese tiempo, el resto se podrá apelar a la calefacción solar pasiva. Sin embargo, juzgando que existe aún la perspectiva de abrigarse no se pensará en acentuar sin condiciones la calefacción solar pasiva, pero sí en recurrir a prácticas parciales inscritas en esta estrategia.

Diagrama 7
Diagrama bioclimático de La Colonia Tovar (zona climática 5)



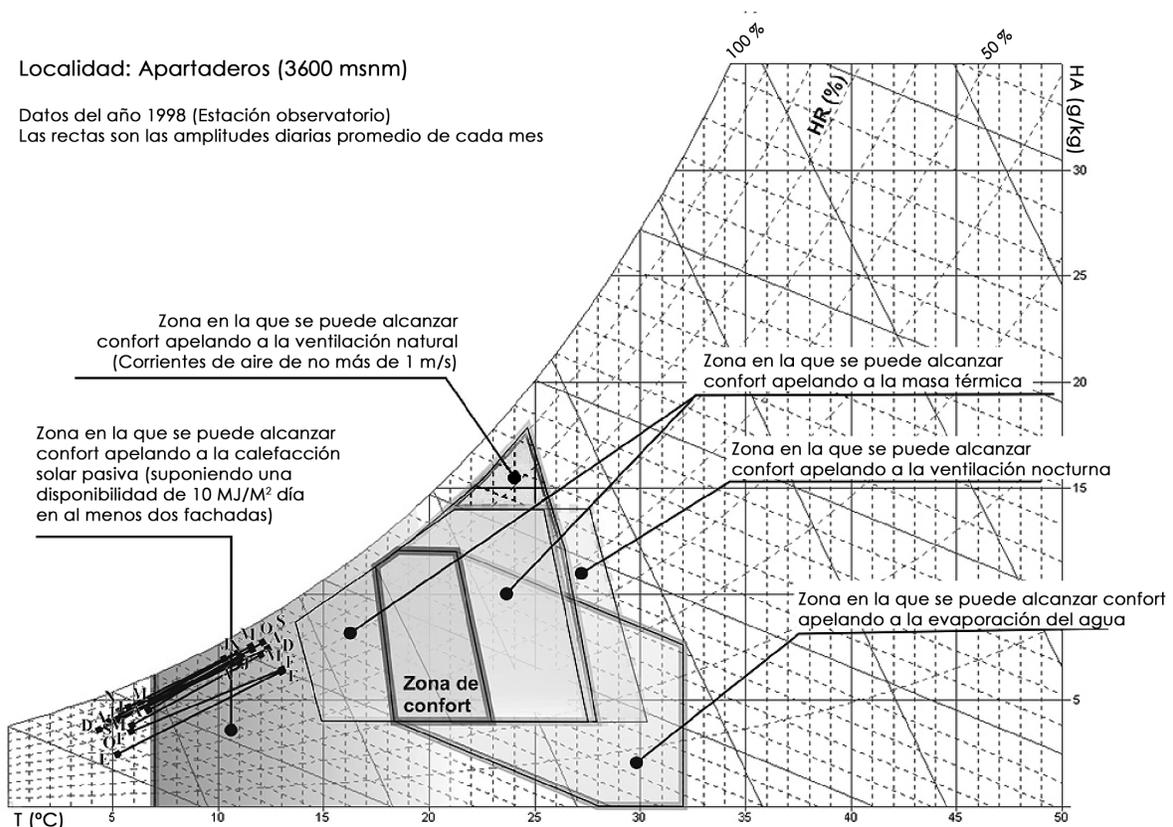
Zona climática 6. Altitud: 2.200 m en adelante.
Localidad representativa: Apartaderos

Como se desprende del diagrama bioclimático de Apartaderos (zona climática 6) (diagrama 8), el aire nunca adquiere temperaturas confortables, estando siempre frío. Los bajos niveles de temperatura inhabilitan usar la masa térmica en relación con el aire y obligan a recurrir a la calefacción solar pasiva. La temperatura impone aquí extremar dicha estrategia, aunque ello no consiga contrarrestar plenamente el frío nocturno, por lo que en las horas más frías será necesario acudir (en teoría) a sistemas adicionales de calefacción (chimeneas, calefacción artificial) (si bien una buena calefacción solar pasiva parece ser suficiente a toda hora si las personas se abrigan bien).

Pautas de diseño que se derivan de los diagramas bioclimáticos

El cuadro 3 lista algunas de las pautas de diseño arquitectónico que se derivan de los diagramas bioclimáticos de las seis zonas climáticas en que se dividió Venezuela (ver apartado 2). Dichas pautas señalan las estrategias globales que corresponde considerar desde el comienzo del proceso de diseño a fin de obtener confort térmico el mayor tiempo posible. No incluyen todas las combinaciones potenciales entre estrategias, en razón de que las premisas con las cuales se definen las zonas en el diagrama envuelven condiciones propias a cada una (ver apartado 3) (en otras palabras, no se consideran los casos en que actúan simultáneamente). En todos los casos se parte de que la temperatura radiante es igual a la del aire, lo cual indica que el calor del sol no está presente en un comienzo.

Diagrama 8
 Diagrama bioclimático de Apartaderos (zona climática 6)



Cuadro 3

Algunas pautas de diseño arquitectónico que se derivan de los diagramas bioclimáticos

| Zona climática | Altitud (m) | Pautas generales de diseño |
|---------------------------------|---------------|--|
| 1 (Caliente a cálido húmedo) | 0 a 400 | Alternativa 1: <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Permitir una ventilación natural amplia y perceptible tanto en el día como en la noche. |
| 2 (Cálido húmedo) | 400 a 700 | Alternativa 1: <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Permitir una ventilación natural amplia y perceptible tanto en el día como en la noche. • Limitar la ventilación en las noches más frescas. |
| 3 (Cálido húmedo a moderado) | 700 a 1.100 | Alternativa 1: <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Permitir una ventilación natural de corrientes moderadas en el día (0,5 m/s). • Usar la masa térmica a fin de atenuar el frío en la noche. • Limitar la ventilación natural en la noche. Alternativa 2: <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Usar la masa térmica a fin de atenuar el calor en el día y el frío en la noche. Alternativa 3 (sólo edificaciones de uso diurno): <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Usar la ventilación nocturna a fin de mantener en el día el aire y las superficies interiores a temperaturas frescas. Alternativa 4: <ul style="list-style-type: none"> • Permitir un aumento limitado de la temperatura radiante (equivalente en sensación térmica a no más de 2°C de aumento de la temperatura del aire en las horas más calidas, pudiendo ser algo mayor el resto del día). • Permitir una ventilación natural amplia en el día (1 m/s). • Usar la masa térmica a fin de atenuar el frío en la noche. • Limitar la ventilación natural en la noche. |
| 4 (Moderado) | 1.100 a 1.700 | Alternativa 1: <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Permitir una ventilación natural mínima en el día. • Usar la masa térmica a fin de atenuar el frío en la noche. • Limitar la ventilación natural en la noche. Alternativa 2: <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Usar la masa térmica a fin de atenuar el calor en el día y el frío en la noche. Alternativa 3 (sólo edificaciones de uso diurno): <ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el control solar. • Usar la ventilación nocturna a fin de mantener en el día el aire y las superficies interiores a temperaturas frescas. Alternativa 4: <ul style="list-style-type: none"> • Permitir un aumento limitado de la temperatura radiante (equivalente en sensación térmica a no más de 4°C de aumento de la temperatura del aire en las horas más calidas, pudiendo ser algo mayor el resto del día). • Permitir una ventilación natural amplia en el día (1 m/s). • Usar la masa térmica a fin de amortiguar el frío en la noche. • Limitar la ventilación natural en la noche. |
| 5 (Moderado a frío) | 1.700 a 2.200 | Alternativa 1: <ul style="list-style-type: none"> • Usar la masa térmica a fin de atenuar el frío tanto en el día como en la noche. • Producir un aumento de la temperatura radiante en la noche por medio de alguna técnica de calefacción solar pasiva (equivalente en sensación térmica a no menos de 6°C de aumento de la temperatura del aire). Alternativa 2: <ul style="list-style-type: none"> • Producir un aumento de la temperatura radiante en el día y en la noche (equivalente en sensación térmica a no más de 6°C -7°C de aumento de la temperatura del aire) • Usar una elevada masa térmica para atenuar el frío en la noche. • Permitir una ventilación natural regulable en el día (0 a 1 m/s). • Suprimir la ventilación en la noche. |
| 6 (Frío) | Más de 2.200 | Alternativa 1: <ul style="list-style-type: none"> • Usar la calefacción solar pasiva (maximizar sus efectos tanto de día como de noche). |

Conclusiones

Los diagramas bioclimáticos señalan las estrategias de diseño globales apropiadas a un clima específico con miras a obtener confort térmico al interior de las edificaciones. Su principal ventaja es que pueden ser utilizados al comienzo del proceso de diseño, que es cuando se toman las decisiones más importantes en relación con el confort térmico y el ahorro energético. Las desventajas son que no se consideran las cargas internas (las cuales pueden contrarrestar por sí solas una situación de frío o producir un exceso de calor) que definen las zonas asociadas a cada estrategia con base en premisas independientes (por lo que no informan sobre su efecto simultáneo) y que no permiten estimar hasta qué punto una estrategia puede ser útil a pesar de no restituir plenamente las condiciones de confort.

En este trabajo se emplearon los diagramas bioclimáticos para evaluar la utilidad de cinco estrategias de diseño en los seis tipos de clima en que se dividió Venezuela, las cuales fueron: la ventilación natural, la masa térmica, la ventilación nocturna, la evaporación directa y la calefacción solar pasiva. Adicionalmente, al estar los diagramas centrados en una zona de confort para ambiente uniforme (sin movimiento de aire y temperatura radiante igual a la del aire), fue posible evaluar la influencia del control solar (en tanto que sexta estrategia), pues tal premisa autoriza admitir que éste es de partida óptimo.

Con base en el análisis realizado se puede afirmar que en Venezuela las pautas de diseño se pueden acen- tuar sin ambivalencias sólo en las zonas climáticas 1 y 6 (la más cálida y la más fría, respectivamente), en las cuales corresponde, en el primer caso, maximizar el control

solar y la ventilación, y en el segundo, maximizar el calentamiento solar pasivo. En el resto de las zonas las pautas deben cubrir situaciones en las que se requiere combatir tanto el calor como el frío, lo que condiciona la actuación de las diferentes técnicas a las circunstancias (circunstancias que dependen básicamente de la hora). Ello hace que en estas zonas se presenten alternativas de diseño variadas según las técnicas que se decida utilizar.

Las insuficiencias de los diagramas bioclimáticos se deben a que asumen premisas muy generales, pues su objetivo es indicar los criterios básicos con los cuales se debe abordar el diseño. Las interrogantes que dejan se solventan por lo general recurriendo a la simulación por computadora, la cual demanda contar con una propuesta arquitectónica avanzada y sustentada en pautas de diseño más específicas. Ello lleva en muchos casos a un proceso iterativo de ensayo y error cuya rapidez depende de lo acertado de la propuesta inicial y del conocimiento de quien lo realiza.

Se puede sin embargo pensar un método intermedio que demande contar al menos con una volumetría básica de la edificación, carente aún de toda estrategia. Usando la simulación por computadora se podría estimar luego el efecto que produciría en el confort térmico asociar a ese esquema primario una estrategia de diseño o combinación de estrategias. Tal propuesta se está desarrollando actualmente en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela (IDEC-FAU/UCV), en el marco del programa de cooperación internacional EcosNord entre Francia y Venezuela (Proyecto Ispaven-9269).

Referencias Bibliográficas

- AEC (2003) "Hawaii Guidelines for Energy Efficient Buildings". Architectural Energy Corporation. (<http://www.archenergy.com/library/general/hawaiiigl/>).
- Ajibola, K. (2001) "Design for comfort in Nigeria. A bioclimatic approach", *Renewable Energy*, Volume 23, Issue 1: 57-76.
- Álvarez, F. (1983) *Atlas climatológico de Venezuela*. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- ASHRAE-55 (1981) "Thermal environmental conditions for human occupancy". Norma ASHRAE 55-1981.
- Auliciems, A. (1983) "Psychophysical criteria for global thermal zones of building design", *International Journal of Biometeorology* n° 8, Part 2, Supplement to Vol. 26 (1982): 69-86.
- CMCTE-Comisión para el Mejoramiento de la Calidad Térmica de las Edificaciones (1999) Recomendaciones para mejorar la calidad térmica de las edificaciones. Enelven. Centro de Optimización Energética. Grafipress, C. A., Maracaibo.
- Clarke, J. A.; Conner, S.; Fujii, G.; Geros, V.; Johannesson, G.; Johnstone, C. M.; Karatasou, S.; Kim, J.; Santamouris, M.; Strachan, P. A. (2004) "The role of simulation in support of internet-based energy services", *Energy and Buildings* 36: 837 - 846.
- Curiel, E. (1982) "La arquitectura en regiones de Venezuela". Trabajo de ascenso. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Dewit, S.; Augenbroe, G. (2002) "Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implication", *Energy and Buildings* 34: 951 - 958.
- Givoni, B. (1978) *L'homme, l'architecture et le climat*. Editions du Moniteur. Paris.
- Givoni, B. (1994) *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Givoni, B. (1998) *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold, Toronto.
- González, E. (1997a) Étude de matériaux et de techniques de refroidissement passif pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide. Thèse de doctorat en Energétique de l'Ecole des Mines de Paris. Sophia Antipolis, France.
- González, E. (1997b) "Técnicas de enfriamiento pasivo. Resultados experimentales en el clima cálido y húmedo de Maracaibo, Venezuela". CIT, *Información Tecnológica*, Vol. 8 N° 5, pp. 99-103. La Serena, Chile.
- González, E. y Achard, P. (1998) *Comparative Experimental Study of Three Passive Cooling Systems in Hot and Humid Climate*. EPIC'98 (2nd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings and 3rd International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation on Buildings), Lyon, France, Vol. 2.
- González, E.; Hinz, E.; Oteiza, P.; Quirós, C. (1986) *Proyecto Clima y Arquitectura*. Editorial Gustavo Gili, México.
- Hobaica, M. E (1984) "Caracterisation des zones climatiques au Venezuela pour la conception thermique des bâtiments". Travail de fin d'études. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Hobaica, M. E.; Belarbi, R.; Rosales, L. (2001) "Los sistemas pasivos de refrescamiento de edificaciones en clima tropical húmedo. Posibilidades de aplicación en Venezuela", *Tecnología y Construcción* n° 17-I. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Holm, D. (1993) "Building thermal analyses: what the industry needs: the architect's perspective", *Building and Environment* 28: 405 - 407.
- Humphreys, M. A. (1978) "Outdoor Temperature and comfort indoor", *Building Research and Practice*, 6 (2): 92-105.
- Kolokotroni, M.; Young, A. N. (1990) "Guidelines for bioclimatic housing design in Greece", *Building and Environment*, Volume 25, Issue 4: 297-307.
- Lam, J.; Yang, L.; Liu, J. (2006) "Development of passive design zones in China using bioclimatic approach", *Energy Conversion and Management*, Volume 47, Issue 6: 746-762.

- Marsh, A. & Raines, C. (2005) "Square One research PTY LTD". Australia. (<http://www.squ1.com/>).
- Morillón, D.; Saldaña, R.; Tejeda, A. (2004) "Human bioclimatic atlas for Mexico", *Solar Energy*, Volume 76, Issue 6: 781-792.
- Olgay, V. (1963) *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Özdeniz, M. (1991) "Bioclimatic analysis of traditional Turkish houses", *Environment International*, Volume 17, Issue 4: 325-336.
- Peyush, A. (1998) "Bioclimatic Design Central". USA: The University of Arizona, College of Architecture, Planning and Landscape Architecture. (<http://architecture.arizona.edu/architecture/academic/graduate/peyush/index.html>).
- PLEA'99-Passive and Low Energy Architecture (1999) "Sustaining the future: energy, ecology, architecture". Proceedings of the sixteenth international PLEA (Passive and Low Energy Architecture) conference, Brisbane, Australia. Edited by Steven V. Szokolay.
- Quiroz, L. (1995) "Condiciones climáticas y confort térmico en una localidad intertropical. Caso de estudio: Maracaibo. Venezuela", *Revista Técnica de Ingeniería*. Caracas.
- Sayigh, A. & Marafia, H. (1998) "Chapter 1: Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 2, Issues 1-2.
- Sosa, M. E.; Siem, G.; Hobaica M. E. (s.f.) "Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico". IDEC/EDC. Caracas. (<http://fau.ucv.ve/idec/racionalidad/Paginas/manual.html>).
- Szokolay, S. V. (1987) *Thermal Design of Buildings*. Canberra, Australia: RAIA Education Division.
- Zain-Ahmed, A.; Sayigh, A.; Surendran, P.; Othman, M. (1998) "The bioclimatic design approach to low-energy buildings in the Klang Valley, Malaysia", *Renewable Energy*, Volume 15, Issues 1-4: 437-440.