



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Tesis Doctoral

**EVALUACIÓN DE LA ADAPTABILIDAD DE LOS EDIFICIOS AL CLIMA
USANDO EL CONCEPTO DE TEMPERATURA LIBRE**

Autor: Luis Rosales

Tutora: María Elena Hobaica

Trabajo que se presenta para optar al grado de
Doctor en Arquitectura

Caracas, marzo 2011

Aprobada en nombre de la Universidad Central de Venezuela por el siguiente Jurado Examinador:

Coordinadora

Fecha de aprobación: Día _____ del mes de _____ del año _____

RESUMEN

La presente tesis trata el tema de los métodos de ayuda al diseño arquitectónico orientados a adaptar los edificios al clima con miras a satisfacer los requerimientos de confort térmico y ahorro energético. Su contribución se divide en dos partes. Primero, se describen los métodos más conocidos, haciendo énfasis en aquellos que se usan en las etapas iniciales del proceso de diseño (por ser los más influyentes en el cumplimiento de los requerimientos mencionados), con el fin subsiguiente de aplicarlos al contexto venezolano y de esta forma sintetizar y ofrecer información útil para la práctica profesional de la arquitectura en Venezuela. Segundo, como aporte principal, propone un método original orientado a generar información utilizable en las etapas iniciales del proceso de diseño, basado en aplicar, bajo ciertas hipótesis (ligadas al concepto de temperatura libre), modelos de regresión lineal simple a los resultados de la simulación, con lo que se logra desacoplar al edificio simulado del clima en el que se le simuló, quedando luego caracterizado por dichas regresiones. Éstas relacionan la temperatura interior del edificio a determinada hora (la variable dependiente) con la temperatura exterior (la variable independiente). Puesto que se pueden a su vez relacionar con la temperatura exterior (según hipótesis propias) el criterio de confort térmico, por un lado, y la temperatura exterior de un clima particular, por otro, los tres elementos (edificio, confort y clima) quedan desacoplados y referidos a una misma variable. De esta forma se puede estimar la respuesta del edificio a cualquier clima desde la perspectiva del confort térmico sin necesidad de simular. Si además se determinan las regresiones correspondientes a cambios realizados en el edificio inicial (p.ej. basados en la aplicación de estrategias genéricas de diseño), se puede, finalmente, calcular de forma simple el potencial de dichas estrategias en cualquier clima (lo que se expresa *negativamente* en términos de grados-hora de malestar térmico).

PALABRAS CLAVE

Arquitectura sostenible, confort térmico, ahorro energético, clima, diseño bioclimático.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Esta tesis no hubiese sido posible sin el intercambio académico que se llevó a cabo en el marco del Programa de Cooperación InterUniversitario PCU/ECOS Nord Venezuela-Francia, proyecto Ispaven (código 9269), entre el LEPTAB de la Universidad de La Rochelle, Francia, y el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, IDEC, de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela. En este marco quiero agradecer a los coordinadores del Proyecto, María Elena Hobaica, por Venezuela, a quien además agradezco en un sentido amplio por haber sido mi tutora, Francis Allard, por Francia, director del LEPTAB, cuyas observaciones y hospitalidad el tiempo que me tocó trabajar en Francia fueron inestimables, y muy especialmente a Christian Ghiaus, por su entusiasmo, disponibilidad y generosidad al momento de debatir sobre el tema y aclarar mis dudas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS DEL TRABAJO	5
Objetivo principal.....	5
Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO 1 MARCO GENERAL Y ESPECÍFICO	6
1.1 La perspectiva global. Hacia una arquitectura sostenible	6
1.1.1 Una propuesta ética se convierte en una necesidad objetiva.....	6
1.1.2 Sostenibilidad y calidad de vida: dos caras de la misma moneda	8
1.2 Calidad y bienestar. Enfoque de exigencias de habitabilidad.....	10
1.3 El bienestar térmico	14
1.4 Métodos arquitectónicos para adaptar de los edificios al clima	15
1.5 Contribución de la tesis.....	17
1.6 Referencias del capítulo 1	19
CAPÍTULO 2 MÉTODOS PARA ADAPTAR LOS EDIFICIOS AL CLIMA. ESTADO DEL ARTE. CASO DE VENEZUELA	22
2.1 Introducción. Resumen de los tipos de métodos	22
2.2 El criterio de confort térmico	30
2.2.1 Evaluación y normativas.....	30
2.2.2 Escogencia del criterio de confort para Venezuela	44
2.3 Caracterización del clima	49
2.3.1 Zonas climáticas de Venezuela para el diseño arquitectónico	54
2.4 Aplicación de las reglas heurísticas de diseño en Venezuela.....	60
2.4.1 Indicadores al inicio del proceso de diseño	60
2.4.1.1 Grados-día y grados-hora	60
2.4.1.2 Tablas de Mahoney	62
2.4.1.3 Diagramas bioclimáticos.....	64
2.4.2 Métodos intermedios. Recomendaciones de diseño.....	72
2.4.2.1 Envolverte	75
2.4.2.2 Divisiones internas y distribución espacial	88
2.5 Métodos de comprobación. Modelización del edificio	92
2.6 Confluencia de los tipos de métodos y orientación actual	95
2.7 Referencias del capítulo 2	96

CAPÍTULO 3 MÉTODO PARA EVALUAR LA ADAPTABILIDAD DE UN EDIFICIO AL CLIMA	109
3.1 Introducción. Principios generales y resumen del método.....	109
3.2 Los elementos del sistema: confort, edificio y clima	112
3.2.1 El criterio de confort. Una caracterización basada en la adaptación.....	112
3.2.2 El edificio. Una caracterización basada en su temperatura interior	115
3.2.3 El clima. Una caracterización estadística.....	123
3.3 Formulación del algoritmo del método.....	126
3.3.1 Edificio de base o edificio libre	126
3.3.2 Temperatura operativa libre del edificio de base.....	127
3.3.3 Temperatura de balance. Método de los intervalos de ASHRAE (<i>Bin method</i>)	128
3.3.4 Método de los intervalos utilizando el concepto de temperatura libre.....	131
3.3.5 Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio de base presenta confort térmico	132
3.3.6 Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar térmico en el edificio de base.....	133
3.3.7 Potencial de las estrategias de diseño respecto del edificio de base	134
3.3.7.1 Caso de enfriamiento ($T_{est} < T_1$) (Figura 3.12).....	136
3.3.7.2 Caso de calentamiento ($T_{est} > T_1$) (Figura 3.13).....	137
3.3.8 Estrategias de diseño.....	139
3.3.8.1 Ventilación natural.....	139
3.3.8.2 Sombreado	140
3.3.8.3 Aislamiento.....	140
3.3.8.4 Reflexión del sol	140
3.3.8.5 Masa térmica.....	140
3.3.8.6 Ventilación nocturna.....	141
3.3.9 Combinaciones de estrategias de diseño.....	141
3.4 Alcance del método.....	142
3.5 Referencias del capítulo 3	144
CAPÍTULO 4 EJEMPLO DE APLICACIÓN: CÁLCULO DE LOS POTENCIALES DE CINCO ESTRATEGIAS PASIVAS EN UNA VIVIENDA TIPO.....	146
4.1 Introducción.....	146
4.2 Descripción del caso	146
4.2.1 Edificio de base o edificio libre	146
4.2.2 Las estrategias de diseño.....	147
4.2.2.1 Ventilación natural.....	148
4.2.2.2 Sombreado	148
4.2.2.3 Aislamiento.....	148
4.2.2.4 Reflexión del sol	148
4.2.2.5 Masa térmica.....	148
4.2.3 El clima.....	148
4.2.4 El criterio de confort.....	149
4.3 Simulación.....	149
4.4 Discusión de resultados y conclusiones	150
4.5 Referencias del capítulo 4	162
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. TE^* para actividad sedentaria y ropa estival (ASHRAE 55, 2009).....	33
Figura 2.2. Rangos aceptables de la temperatura operativa y la humedad para ambientes con aire en calma, en personas portando, sea ropa de invierno, sea ropa de verano, y realizando una actividad sedentaria. (a) ASHRAE 55:1981; (b) ASHRAE 55:1992; (c) ASHRAE 55a: 1995.....	34
Figura 2.3. Rangos aceptables de la temperatura operativa y la humedad para ambientes con velocidad del aire menor a 0,2 m/s, en personas portando ropa, sea de 1 clo, sea de 0,5 clo, y realizando una actividad sedentaria (1–1,3 Met) (ASHRAE 55:2004)	35
Figura 2.4. Velocidad del aire requerida para compensar posibles aumentos de la temperatura operativa por encima de la máxima temperatura admisible en verano (ASHRAE 55).....	36
Figura 2.5. Temperatura operativa óptima ($PMV = 0$) en función de la actividad y la vestimenta. $HR \approx 50\%$ y $v < 0,1$ m/s. Las zonas blancas y sombreadas indican los rangos de confort $\pm \Delta T_o$ alrededor de la temperatura operativa óptima que corresponden a: $-0,5 < PMV < 0,5$ (Fanger, 1980. Imagen tomada de: Ghiaus y Allard, 2005, 28).....	39
Figura 2.6. Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en función del PMV (Norma ISO 7730).....	39
Figura 2.7. Rangos aceptables de la temperatura operativa para edificios con ventilación natural (Norma ASHRAE 55:2004, según propuesta de Dear y Brager, 2002).....	42
Figura 2.8. Comparación entre las temperaturas medias mensuales del año 2000 (calculadas con las series horarias suministradas por la Fuerza Aérea Venezolana) y las medias consolidadas calculadas con datos de muchos años (tomadas de worldclimate.com)	53
Figura 2.9. Zonas climáticas según Marsh (2003) y áreas en que se ubican las 12 temperaturas máximas medias mensuales de cada una de las 11 localidades indicadas	58
Figura 2.10. Criterio de clasificación de zonas climáticas para Venezuela basado en la propuesta de Marsh (2003) y considerando que la amplitud anual nunca sobrepasa los 5 °C.....	58
Figura 2.11. Modelo de regresión lineal entre la altitud y la temperatura máxima media anual	59
Figura 2.12. Diagrama bioclimático de Givoni aplicado a Maracaibo (González et al., 1986)	65
Figura 2.13. Diagrama bioclimático de Maracaibo	67
Figura 2.14. Diagrama bioclimático de Valencia.....	67
Figura 2.15. Diagrama bioclimático de Caracas	68
Figura 2.16. Diagrama bioclimático de Mérida	68
Figura 2.17. Diagrama bioclimático de la Colonia Tovar.....	69
Figura 2.18. Diagrama bioclimático de Apartaderos.....	69
Figura 3.1. Zonas de confort para edificios con calefacción (invierno), aire acondicionado (verano) y ventilación natural, basadas en ASHRAE 55 (PMV y adaptación). Notación: T_{ic} : temperatura inferior de confort; T_{sc} : temperatura superior de confort.....	113
Figura 3.2. Temperatura exterior (T_o) y temperatura libre (T_l) durante el mes de junio en cuatro horas del día en una vivienda de una sola planta ubicada en Caracas (paredes de bloques y friso, techo de fibrocemento y tejas con cámara de aire, ventanas de vidrio simple, sin parasoles)	118
Figura 3.3. Diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior en una vivienda de una sola planta ubicada en el trópico (huella energética – precisión semanal)	120
Figura 3.4. Evolución anual de la contribución absoluta de las cargas internas y las ganancias solares desligándolas del efecto de las fluctuaciones de la temperatura exterior	120

Figura 3.5. Temperatura exterior (T_o) y temperatura libre (T_l) durante un año en cuatro horas del día en una vivienda de una sola planta ubicada en Caracas y estadísticas del modelo de regresión lineal de T_l en función de T_o para cada caso.....	121
Figura 3.6. A la izquierda, modelos de regresión lineal simple de la temperatura libre en función de la temperatura exterior a las 18 h para una vivienda ubicada en cuatro ciudades; a la derecha, regresión lineal que se obtiene con los valores promedios de las cuatro ciudades.....	123
Figura 3.7. Distribución de frecuencia de la temperatura del aire en cinco ciudades venezolanas.....	125
Figura 3.8. Frecuencia en un año de las temperaturas del aire horarias en Caracas distribuidas en intervalos de 1 °C.....	129
Figura 3.9. Distribución de los grados hora de enfriamiento anuales en función de la temperatura exterior para Caracas (Temperatura de balance de enfriamiento = 22°C).....	130
Figura 3.10. Rangos de confort, frío y calor en el edificio de base a una hora del día para un periodo de tiempo dado (un mes, una estación o un año). T_l : temperatura libre; T_{ic} : temperatura inferior de confort; T_{sc} : temperatura superior de confort.....	132
Figura 3.11. Grados-hora de malestar por exceso de calor en el edificio de base a una hora dada. (a) Temperatura libre (T_l), temperatura exterior (T_o) y rango de confort ($T_{ic} \leftrightarrow T_{sc}$); (b) distribución de frecuencia de la temperatura exterior a esa hora; (c) grados-hora de malestar.....	134
Figura 3.12. Rangos a una hora específica de la temperatura operativa libre (T_l) y la temperatura operativa luego de aplicar la estrategia de diseño (T_{est}). Caso $T_{est} < T_l$ (enfriamiento).....	135
Figura 3.13. Rangos a una hora específica de la temperatura operativa libre (T_l) y la temperatura operativa luego de aplicar la estrategia de diseño (T_{est}). Caso $T_{est} > T_l$ (calentamiento).....	135
Figura 4.1. Edificio libre o edificio de base: vivienda unifamiliar sencilla de 80 m ²	146
Figura 4.2. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores.....	151
Figura 4.3. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores.....	152
Figura 4.4. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores.....	153
Figura 4.5. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores.....	154
Figura 4.6. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores.....	155
Figura 4.7. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores.....	156
Figura 4.8. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de	

<i>la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores</i>	157
<i>Figura 4.9. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores</i>	158
<i>Figura 4.10. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 0 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida</i>	163
<i>Figura 4.11. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 6 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida</i>	163
<i>Figura 4.12. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 12 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida</i>	164
<i>Figura 4.13. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 18 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida</i>	164

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Distancia recomendada para medir distintos elementos del clima (Linacre, 1992, 24)</i>	51
<i>Tabla 2.2. Definición internacional de zonas climáticas (Apéndice normativo B - ASHRAE 90.1 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings)</i>	56
<i>Tabla 2.3. Zonas climáticas de 11 localidades venezolanas según los criterios de la norma ASHRAE 90.1 (2010) (Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings)</i>	57
<i>Tabla 2.4. Zonas climáticas para el diseño en Venezuela basadas en la sensación higrotérmica</i>	59
<i>Tabla 2.5. Grados-día anuales de enfriamiento para 26 °C (GDE26°C) y de calentamiento para 18 °C (GDC18°C) en seis localidades de Venezuela</i>	60
<i>Tabla 2.6. Grados-hora de malestar térmico en seis localidades de Venezuela durante un año, basadas en el modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55 para edificios con ventilación natural</i>	61
<i>Tabla 2.7. Diagnóstico del clima respecto del confort, indicadores climáticos y pautas de funcionamiento o recomendaciones genéricas para el diseño que se derivan de aplicar las tablas de Mahoney en seis localidades de Venezuela</i>	63
<i>Tabla 2.8. Pautas de diseño arquitectónico que se derivan de los diagramas bioclimáticos</i>	73
<i>Tabla 2.9. Resistencia térmica requerida en techos a fin de que la temperatura superficial interior no exceda en 2 °C la del aire exterior (calculado según método de Givoni [1998, 397])</i>	80
<i>Tabla 3.1. Diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior para cuatro horas del día en una vivienda de una sola planta ubicada en cuatro ciudades de Venezuela</i>	119
<i>Tabla 4.1. Grados-hora anuales de malestar térmico en Maracaibo, Valencia, Caracas y Mérida, a las 0 h, 6 h, 12 h y 18 h, en el edificio de base, antes y después de aplicar en él las estrategias de diseño según las hipótesis explicadas en el apartado 4.2.2 (página 148)</i>	159

INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de los edificios y las actividades que en ellos se realizan significan en la actualidad alrededor de la mitad del consumo energético mundial. Al mismo tiempo, la población urbana crece (más de la mitad de la población mundial vive hoy en ciudades), lo que lleva a que cada vez haya más edificios acoplados a los servicios modernos y más gente haciendo uso de ellos, por contraste con las prácticas rurales tradicionales de trabajar y permanecer en espacios abiertos. Si se relacionan estos dos hechos con la gravedad del problema del cambio climático, por un lado, y la aspiración de los grupos sociales que se incorporan al sistema económico global de adecuar su calidad de vida a los estándares de consumo modernos, por otro, se entiende la importancia que toman en el diseño de edificios los criterios de ahorro energético y confort térmico. Si en adición se observa que las decisiones más influyentes en el cumplimiento de estos criterios se toman en las primeras etapas del proceso del diseño arquitectónico, queda en evidencia la significación para los arquitectos de manejar el conocimiento necesario para que tales decisiones conduzcan a resultados óptimos. Ello conlleva adelantar acciones en varios ámbitos, principalmente en los ámbitos formativo, de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) y normativo.

Un tipo de acción es la propuesta de métodos de ayuda al diseño arquitectónico que puedan usarse en las primeras etapas de un proyecto, cuando se definen los principales atributos del edificio. La característica principal de esas etapas es un alto grado de libertad, en cuanto a que la dimensión creativa del diseño es allí dominante. A medida que el edificio se precisa, la libertad de decisión cede ante el creciente carácter técnico de los problemas que se presentan. En contrapartida, aumenta la disponibilidad de soluciones, así como la exactitud de los métodos para comprobarlas.

La dificultad de plantear métodos que orienten la toma de decisiones en las etapas iniciales es justamente la indefinición del edificio. Todo método que intente predecir la calidad de las condiciones ambientales de un edificio, así como su consumo energético (dos criterios distintos y no siempre compatibles), debe, por definición, acoplar en su análisis tres elementos: el clima, el criterio de confort térmico y el edificio. Es básicamente la interacción entre el clima y el edificio (incluyendo en la caracterización del edificio la influencia de las actividades que se realicen en él) lo que determina la conformidad de sus condiciones ambientales interiores con las condiciones normativamente preestablecidas de confort térmico. De no conocerse el edificio, cualquier pronóstico debe presumirlo, así sea de manera vaga y genérica. De ahí la tendencia creciente en los últimos años a suspender la justificación de las decisiones dudosas hasta llegar a las etapas finales ligadas a la simulación computarizada comprobatoria, la cual demanda, para ser viable, de un edificio lo suficientemente acabado como para caracterizarse matemáticamente. Lógicamente, un procedimiento como ese desemboca en un proceso de ensayo y error no siempre orientativo del diseño y pocas veces cuestionador de las decisiones iniciales.

La fuerte relación entre la etapa en que se esté en el proceso de diseño (*i.e.*, entre el grado de definición del edificio) y la naturaleza de los métodos aplicables, justifica diferenciar dichos métodos con arreglo a ese criterio antes que cualquier otro, más aún si se reitera que cuanto más temprano se les pueda usar, más influyentes serán. Diversos investigadores han hecho tal diferenciación, la cual, a grandes rasgos, se puede resumir en métodos iniciales, métodos intermedios y métodos finales. Los primeros son aquellos que comprenden las etapas de estudio preliminares y el planteamiento de alternativas mediante esquemas básicos. En este grupo se encuentran, primero, aquellos métodos que dan indicaciones sólo con base en la relación entre el clima y el criterio de confort y que se expresan en términos de estrategias genéricas globales; segundo, aquellos que dan recomendaciones relativas a los volúmenes, la orientación, el plan masa, los rasgos generales de las fachadas y, en general, cualquier decisión que se exprese en términos de modelos iniciales simples. Los métodos intermedios, bien que deban hacer aún abstracción de los edificios, se presentan bajo la forma de supuestos de casos, ejemplos de diseño, especificaciones y recomendaciones basadas en la experiencia, estudios paramétricos experimentales o simulados, problemas relacionados con componentes determinados, estrategias y evaluaciones de problemas típicos, etc. Al buscar caracterizar y explicar la innumerable cantidad de potenciales situaciones, ellos mismos son numerosos y variados. Estos métodos se relacionan concretamente con las etapas en que los rasgos más generales del edificio ya están definidos y se procede a pormenorizarlos (definiciones a escala 1:100 y 1:50). Los métodos finales son en cambio de carácter analítico, en cuanto a que modelan el edificio y los procesos energéticos a fin de predecir, con base en una propuesta concreta, el comportamiento de la misma. Entre ellos dominan hoy los programas de simulación computarizada, en especial los que se basan en una modelización numérica detallada.

La caracterización de los otros dos elementos que todo método debe articular entre sí y a la vez con el edificio (*i.e.*, el clima y el criterio de confort térmico) varía también, como es lógico, con el tipo de método. Para describir al clima se pueden usar desde descripciones cualitativas genéricas relacionadas con la sensación térmica asociada a dicho clima, hasta series meteorológicas detalladas de muchos años (horarias o incluso de menor frecuencia). Debido al auge de la simulación computarizada, la caracterización que más se difunde es la de las series meteorológicas horarias anuales *típicas*, que son las series que usan la mayoría de los programas. Estas series tienen la ventaja que una vez disponibles, permiten derivar las caracterizaciones asociadas a los otros métodos. Para que dichas series se consideren típicas, deben sin embargo cumplir con ciertas condiciones que no necesariamente cumplen las series horarias de años específicos (por el riesgo de que se trate de años atípicos), lo que conlleva procedimientos estandarizados para su creación, basados en procesar datos de muchos años. El criterio de confort puede igualmente expresarse de muchas formas, desde consideraciones cualitativas genéricas, pasando por la relación entre uno o varios de sus factores físico-ambientales y la sensación térmica (usualmente agrupados en el con-

cepto de temperatura operativa), hasta llegar a rigurosos indicadores cuantitativos que agregan la mayor cantidad de factores (normalmente seis, a saber, la temperatura del aire, la temperatura radiante, la velocidad del aire, la humedad, la vestimenta y la actividad). Se trata de un campo del conocimiento diferenciado en cuyo marco se han desplegado (como en tantos otros campos) dos grandes programas de investigación, el primero inspirado en una aproximación positivista y analítica del problema, y el segundo, en una aproximación empírica sistematizada en términos estadísticos. En el segundo caso la noción de base es la adaptación, al suponerse una importante influencia del acostumbramiento a un clima específico, así como de las acciones orientadas a adecuar, según los cambios de circunstancias, las condiciones personales y ambientales. Este enfoque tiende a imponerse por ser más flexible y práctico, en el sentido de relativizar las exigencias arquitectónicas orientadas a contrarrestar un clima desfavorable.

Una orientación actual interesante tiende a alterar la compartimentación de los tipos de métodos al plantearse la sistematización computarizada de toda información relevante generada con cualquiera de ellos. Uno de los objetivos es combatir la reticencia de la mayoría de los arquitectos (ratificada en años recientes en encuestas en todo el mundo) a usar las computadoras para diseñar, prefiriendo la tradicional toma de decisiones inspirada en una aproximación heurística del diseño y postergando el uso de las computadoras a las etapas finales, básicamente para verificar el cumplimiento de los requerimientos ambientales y energéticos exigidos por las normas y sistemas de certificación (tal reticencia es usualmente justificada con la dimensión creativa del diseño). Este enfoque, llamado Modelado de información de edificios (*Building Information Modeling, BIM*), ambiciona reproducir en computadora el edificio, su prestación y sus evoluciones (incluyendo su concepción), reuniendo y clasificando en unidades de tipo *objetos* todo componente e información utilizable o relevante, de forma que el arquitecto disponga de ellos cuando lo necesite. Esta perspectiva se inspira en el mismo paradigma que ha llevado a desarrolladores de software a desear las modelizaciones numéricas detalladas para orientarse hacia métodos de simulación simplificados de respuesta rápida, acompañados de métodos iniciales e intermedios de apoyo al diseño, de forma que la modelización gane en interactividad y pueda utilizarse en la concepción del edificio. Al intentar reproducir la realidad no sólo en los productos sino en los procesos, tal enfoque no contraría, en principio, la dimensión creativa de la arquitectura.

Lo anterior fortalece el alcance de toda producción de información que pueda considerarse útil en cualquier etapa del proceso de diseño. Un desarrollo interesante en este sentido lo constituye la utilización de los programas de simulación dinámica tradicionalmente usados en las etapas finales de comprobación para producir información que pueda ser usada en las etapas iniciales o intermedias. Esto incluye no sólo estudios paramétricos y análisis de sensibilidad orientados a presentar de forma sencilla indicaciones genéricas relacionadas con ciertas decisiones de diseño (mediante regresiones, ábacos, tablas, sistemas de puntuación, etc.), sino análisis estadísticos de

los resultados de la simulación orientados a identificar patrones de comportamiento simples que puedan desligarse del caso simulado y describir casos genéricos asociables a muchas situaciones.

En esta onda se propone en la presente tesis un método que se deriva de aplicar bajo ciertas hipótesis (ligadas al concepto de temperatura libre formulado por Ghiaus [2003]) modelos de regresión lineal simple a los resultados de la simulación, con lo que se logra desacoplar al edificio simulado del clima en el que se le simuló, quedando luego caracterizado por dichas regresiones. Las mismas relacionan la temperatura interior del edificio a determinada hora (la variable dependiente) con la temperatura exterior (la variable independiente). Puesto que se pueden a su vez relacionar con la temperatura exterior (según hipótesis propias) el criterio de confort térmico, por un lado, y la temperatura exterior de un clima particular, por otro, los tres elementos (edificio, confort y clima) quedan desacoplados y referidos a una misma variable. De esta forma se puede estimar la respuesta del edificio a cualquier clima desde la perspectiva del confort sin necesidad de simular. Si además se determinan las regresiones correspondientes a cambios realizados en el edificio inicial (p.ej. basados en la aplicación de estrategias genéricas de diseño), se puede, finalmente, calcular de forma sencilla el potencial de dichas estrategias en cualquier clima (lo que se expresa *negativamente* en términos de grados-hora de malestar térmico).

La caracterización mediante regresiones simples de un edificio tipo y de edificios que resulten de aplicar en él cambios genéricos orientados a adaptarlo al clima, superpuesta a la caracterización, en los mismos términos, del criterio de confort, es ese tipo de información que resulta de gran utilidad en las etapas iniciales del proceso de diseño, pues permite apreciar, a simple vista, a qué horas y para qué temperaturas exteriores cada alternativa tendrá condiciones de confort; en otras palabras, permite apreciar cuál es su grado de adaptación a un clima específico.

La formulación pormenorizada de este método se presenta en el Capítulo 3 del presente informe (página 109), y un ejemplo de aplicación se presenta en el Capítulo 4 (página 146). Antes, se desarrolla, primero, el marco general en el que se inspira el planteamiento de dicho método (Capítulo 1, página 6) y, segundo, el estado del arte de los métodos de ayuda al diseño más relevantes, acompañado de su aplicación al contexto venezolano, con el fin de resumir el conocimiento que se tiene a ese respecto en el país y servir a la vez de guía en la práctica profesional de los arquitectos que se interesen en este texto (Capítulo 2, página 22).

Esta estructura argumentativa responde al cumplimiento de los objetivos que se plantearon y que se resumen en la siguiente página.

Referencias

Ghiaus C. (2003) *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings, 35, 405-411.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

Objetivo principal

Formular un método para evaluar el potencial de adaptación a cualquier clima desde la perspectiva del confort térmico y el ahorro energético de un edificio y de cualquier cambio que se sugiera en él empleando el concepto de temperatura libre propuesto por Ghiaus (2003), a través del cual se pueden desacoplar los elementos del sistema, a saber, el edificio, el clima y el criterio de confort, derivando en una información aprovechable para la toma de decisiones en etapas tempranas del proceso de diseño de edificios.

Objetivos específicos

1. Describir el estado del arte de los métodos de ayuda al diseño arquitectónico orientados a adaptar los edificios al clima y clasificar dichos métodos con base en esa descripción.
2. Describir el estado del arte de la caracterización de los elementos que debe acoplar todo método de ayuda al diseño orientado a adaptar los edificios al clima, y que son: el edificio, el clima y el criterio de confort térmico.
3. Caracterizar los elementos del punto anterior para el contexto venezolano.
4. Aplicar los métodos de ayuda al diseño más relevantes al contexto venezolano a objeto de derivar información útil para la práctica de la arquitectura en el país.
5. Ubicar el método del objetivo principal en la clasificación del punto 1 y evaluar su contribución al estado del arte.
6. Formular el método del objetivo principal de forma que las hipótesis en que se basa estén sólidamente justificadas y sin dejar dudas acerca de los requisitos para su aplicación y el procedimiento que se debe seguir.
7. Demostrar la utilidad del método mediante la aplicación de un ejemplo concreto.
8. Formular acciones futuras orientadas a generar información utilizable en el diseño arquitectónico mediante la aplicación del método, así como acciones orientadas a sistematizar, informatizar y divulgar esta información, al igual que el método mismo, tanto en el ámbito académico, como en el ámbito de la práctica profesional de la arquitectura.

Referencias

Ghiaus C. (2003) *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings, 35, 405-411.

CAPÍTULO 1 MARCO GENERAL Y ESPECÍFICO

1.1 La perspectiva global. Hacia una arquitectura sostenible

1.1.1 Una propuesta ética se convierte en una necesidad objetiva

Tres hechos de proyección global marcaron el inicio de un reordenamiento gradual y sostenido de los principales valores que guían el ejercicio de la arquitectura. Éstos fueron: a) la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, realizada en 1972 en Estocolmo, b) la publicación ese mismo año por parte del Club de Roma de *Los límites del crecimiento* (Meadows *et al.*, 1972) y c) la crisis del petróleo de 1973. En la Conferencia de Estocolmo se creó el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y, por vez primera, se introdujo en la agenda política internacional la dimensión ambiental como condicionante del modelo tradicional de desarrollo económico industrial, al cual se había adscrito la mayoría de las actividades productivas, incluyendo la arquitectura. Por su parte, el informe del Club de Roma fue el primer aviso, basado en proyecciones científicas, de los límites de la tierra para sostener dicho modelo. Finalmente, el impacto económico que representó para los países consumidores la crisis del petróleo de 1973 los impulsó a plantearse con urgencia la reducción del consumo de combustibles fósiles y el desarrollo y uso de energías alternativas, acciones éstas forzosamente ligadas a la arquitectura, por estar los edificios directamente relacionados con alrededor del 50% del gasto energético mundial (Kostov, 2000, 348; Underwood y Yik, 2004, prefacio; Usón, 2005, 12).

Si bien, por un lado, en la llamada Declaración de Estocolmo se manifiesta aún la paradoja de auspiciar medidas de reducción de la contaminación ambiental y a la vez auparse el desarrollo industrial en los países del Tercer Mundo¹; si bien, por otro lado, el enfoque, propuestas, métodos y vaticinios (algunos desmentidos por el tiempo) del informe del Club de Roma fueron y siguen siendo objeto de debate (sobre todo su propuesta de *crecimiento cero*) (el informe ha sido de hecho actualizado en dos ocasiones, la última vez en el 2004 [Meadows *et al.*, 2006]), ambos acontecimientos y su coincidencia con la crisis del petróleo catapultaron los movimientos llamados de ecología política y ambientalismo, los cuales han penetrado desde entonces fuertemente las esferas sociales, económicas y políticas, al punto que el tema ambiental y la sostenibilidad son hoy parte fundamental de las preocupaciones sociales y del discurso y la acción políticos, así como de la mayoría de las actividades profesionales.

En este itinerario de más de tres décadas, vale aún mencionar, sintetizando, cuatro destacados hitos: a) la publicación en 1987 del informe *Nuestro futuro común* (Informe Brundtland) de la Comisión Mundial Para el Medio Ambiente y el Desarrollo de Las Naciones Unidas (ONU-WCED, 1987), en el que se define el desarrollo sostenible y se dan propuestas para su instrumen-

¹ La Declaración de Estocolmo puede leerse en el portal del PNUMA: <http://www.pnuma.org/docamb/mh1972.php>

tación; b) La creación en 1988 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) por parte de la PNUMA y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), cuya labor es reunir, evaluar e interpretar las investigaciones científicas relativas al cambio climático, y el cual ha presentado periódicamente informes amplios sobre el tema, datando el último grupo de informes del 2007 (IPCC-1, 2 y 3, 2007) (en estos se concluye, entre muchas otras cosas, que se ha reducido a menos de 10% la *incertidumbre científica* sobre la relación directa entre la emisión de gases de efecto invernadero por causas antropogénicas y el cambio climático [IPCC-1, 2007, 84]); c) La Segunda Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro (1992), en la que participaron 172 gobiernos y en la que se suscribió la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; y d) La aprobación en 1997 del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (el cual entró en vigor en 2005), centrado en el compromiso de los estados adherentes de reducir la emisión de gases de efecto invernadero ^{2, 3, 4}.

Dejando a un lado las controversias y complicaciones científicas, económicas y políticas que rodean la puesta en práctica del paradigma de desarrollo sostenible así como su justificación, el hecho es que éste se presenta hoy como una necesidad impuesta por unas condiciones objetivas, descubiertas y documentadas científicamente. En otras palabras, lo que con anterioridad se veía como una propuesta ética en concurrencia con otras – es decir, la propuesta ecológica general de un modo de vida que honre la diversidad y los ciclos de la naturaleza, en lugar de considerarla un recurso explotable sin condiciones allende la noción dominante de bienestar material –, progresó hasta considerársele una obligación de la humanidad, de aspirar ésta a sortear o mitigar situaciones colectivas trágicas desde la perspectiva de la estabilidad del mundo natural en el que habita⁵.

La arquitectura contemporánea, al igual que muchas otras actividades productivas del presente, ha venido gradualmente asumiendo el reto que plantea esta situación problemática global. En términos generales, en la concepción de edificios y espacios urbanos, despunta hoy con fuerza el criterio de cumplir las pautas de sostenibilidad, las cuales se evalúan por medio de estándares y sistemas de certificación concebidos para tal fin. El más conocido de estos sistemas es LEED

² En el libro *The sustainability revolution: Portrait of a paradigm shift*, Edwards (2005) expone de forma detallada la historia, evolución y proyecciones de la sostenibilidad (<http://www.andresedwards.com/Writing/tsr.html>).

³ La definición de desarrollo sostenible reza así: *satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades* (ONU-WCED, 1987).

⁴ El problema del cambio climático pasó a ser el principal en 1985 luego de la conferencia de Villach, Austria, donde las ONU y el Consejo Internacional para el Medio Ambiente revelaron que para finales del siglo XXI se podría producir un aumento en las temperaturas de entre 1,5 y 4,5 °C y un ascenso del nivel del mar de entre 20 y 140 cm.

⁵ Aunque minoritaria, existe una *ruidosa* contestación, parcial o total, por parte de científicos destacados, de la certeza manifestada en los informes del IPCC sobre la relación entre cambio climático y actividades del hombre. Al respecto consúltese: Lomborg, 2005; Michaels, 2005; Hulme, 2009; o el artículo de Wikipedia *Global warming controversy* o las páginas web: <http://www.climate-skeptic.com/> y <http://www.skepticalscience.com/>. Es interesante también señalar que a contrapelo de la certeza científica expuesta en los informes del IPCC, recientes estudios de opinión muestran que ha aumentado el escepticismo de los ciudadanos comunes frente a la gravedad de los problemas relacionados con el cambio climático, tal como se han venido presentando en los medios (ver el artículo de la BBC (07/09/2009) *UK climate scepticism more common*: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8249668.stm>).

(*Leadership in Energy and Environmental Design*), desarrollado en Los Estados Unidos por U.S. Green Building Council (USGBC). Muchos países cuentan con sus propios estándares o adaptaciones del LEED (Gowri, 2004 ; Yudelson, 2007). En líneas generales, estos sistemas intentan evaluar todas las fases relacionadas con la producción y funcionamiento de los edificios, desde la elaboración de los materiales hasta la disposición (o reciclaje) de los desechos o escombros, pasando por los procedimientos de diseño y construcción, la producción, abastecimiento y uso de la energía, el suministro, uso y saneamiento del agua, así como el acondicionamiento ambiental. A fin de auarlos y darles viabilidad económica, es cada vez más común en muchos países que el estado estimule su cumplimiento combinando obligatoriedad con incentivos fiscales (un ejemplo conspicuo de un organismo orientado a encontrarle viabilidad económica y política a la arquitectura sostenible es *Architecture 2030* [<http://www.architecture2030.org/>]).

1.1.2 Sostenibilidad y calidad de vida: dos caras de la misma moneda

Al criterio de adecuar la arquitectura al proyecto de desarrollo sostenible se le unen hoy los criterios relativos al bienestar de las personas, según estándares específicos definidos con bases científicas y las nociones intersubjetivas de bienestar. La búsqueda de la calidad de los edificios desde la perspectiva de la salud y el bienestar de la gente que los ocupa ha constituido de hecho un programa de investigación paralelo y conectado al de la sostenibilidad. Entre sus objetos de estudio sobresale el bienestar físico y psíquico (calidad del aire, confort térmico, acústico y visual, percepción espacial, conexión con el exterior, etc.), el cual se determina y evalúa en función de una descripción operacional de los contextos físicos y las exigencias individuales y colectivas, así como de su relación con el edificio.

Este enfoque sistémico, basado en las demandas reales de la gente, nació, en el plano deontológico, como una respuesta a la usanza modernista de centrar la interpretación de los criterios en la figura del arquitecto, quien en actitud positivista definía, según su propio enfoque y métodos, lo que eran las aspiraciones individuales y sociales, con resultados muchas veces contradictorios; en el plano práctico, de la constatación (sobre todo en el ámbito de la vivienda), que la construcción moderna, particularmente la industrializada, al privilegiar los criterios productivistas y economicistas en respuesta al acelerado crecimiento económico y poblacional de las ciudades, derivó en edificios defectuosos en relación con importantes criterios como la calidad ambiental o la durabilidad (Sosa y Sosa, 1999, 58). En adición, la postura utilitaria de despachar los problemas ambientales con aditivos tecnológicos como la iluminación artificial o el aire acondicionado se vio sacudida por el surgimiento del síndrome del edificio enfermo, el cual pudiera entenderse, en un sentido amplio, como el conjunto de los problemas psicológicos y de salud que surgen de la permanencia en ambientes cerrados y acondicionados artificialmente (en 1984, un informe de la Or-

ganización Mundial de la Salud [OMS] estimaba que este síndrome afectaba alrededor de 30% de los edificios nuevos o recientemente remodelados en el mundo [EPA, 1991])^{6, 7}.

Entre las premisas que dan lugar a esta afinidad entre criterios de sostenibilidad y calidad de vida está el que el desarrollo sostenible, para ser viable, debe compatibilizarse con las aspiraciones sociales de bienestar, aspiraciones las cuales a su vez sólo corresponde entender de manera no coercitiva. Por otro lado, debido a que son justamente las demandas de bienestar y calidad de vida las que están detrás de las demandas de energía y recursos naturales, sustituir un modo de satisfacerlas por otro debe forzosamente preservar el beneficio. Finalmente, el conjunto no sólo debe ser social y económicamente viable, sino social y económicamente ventajoso, vista la urgencia y gravedad del problema. El hacer concordar los criterios de sostenibilidad y calidad de vida con los criterios económicos y sociales constituye una línea de investigación en sí misma.

Por otro lado, a todo este acoplamiento se le entiende como trascendiendo la inspiración arquitectónica tradicional basada en tomas de posición plásticas (según las corrientes estéticas del momento), éticas (por el hecho del pluralismo), sociales (según el destinatario) o políticas (según el proyecto promotor). En otras palabras, los edificios pueden seguir concibiéndose, valorándose y argumentándose arquitectónicamente de mil maneras, pero deben respetar los estándares de sostenibilidad y bienestar de sus usuarios, estándares por lo demás crecientemente obligatorios.

Pese a esta pretensión de neutralidad normativa respecto de la dimensión no técnica de la arquitectura (y como ha sido la constante a lo largo de la modernidad en relación con la influencia de la técnica), la boga de las nociones de sostenibilidad y calidad de vida y los desarrollos técnicos asociados (incluyendo los informáticos) han dado lugar a nuevas corrientes arquitectónicas o reorganizado y reimpulsado viejas, todas las cuales pudieran reunirse bajo la denominación común

⁶ En realidad, en el modernismo hubo varias tendencias, las cuales se diferenciaron por plantear diversos grados de articulación entre arquitectura y ser humano, arquitectura y naturaleza, arquitectura y ciudad o arquitectura y tradición. Simplificando, los polos los conformaron, por un lado, el estilo internacional, y por otro, la llamada arquitectura orgánica. El estilo internacional planteaba una arquitectura descontextualizada, universal y recta, que fuese simple, práctica y visible en el empleo de los materiales y en las estructuras, de forma de representar de manera fiel la era tecnológica e industrial. Por su parte, la arquitectura orgánica se planteó integrar y armonizar el diseño con el entorno natural, explotando a la vez los potenciales de las nuevas técnicas y materiales. En los hechos ambas tendencias coexistieron con modalidades que resultaron de la retroalimentación que se dio entre ellas (Gössel y Leuthäuser, 2005). Muchos ven hoy en los postulados de la arquitectura orgánica el filón que conecta el modernismo con la arquitectura sostenible (Domínguez y Soria, 2004, 56-57)

⁷ La confianza en el proyecto modernista terminó cediendo a las mismas ambivalencias que el desarrollo industrial. Sin mencionar el problema ambiental, el ideario moderno de crear edificios acordes con las necesidades de la sociedad del trabajo y de masas, si bien permitió que éstas accedieran a vivienda, recreación y servicios, dejó a un lado las aspiraciones que se despliegan allende la esfera del trabajo social y que trascienden ampliamente los criterios productivistas. Así, la *asperidad, uniformidad, inhumanidad y monotonía* de muchos edificios modernos fueron los principales reproches que la reacción postmoderna, comenzada en los años 60, le hicieron a éste. Tal como cita Sebestyen (2003), a modo de ilustrar el ambiente de desencanto de los años 60: « *la decepción con el modernismo surgió del reconocimiento de su fracaso en construir ciudades de adecuada calidad de vida* » y « *el ideal revolucionario de resolver los problemas de la sociedad a través del diseño, tan vehementemente proclamado por los proponentes del modernismo en la década heroica de los 30, terminó siendo un cascarón vacío* » (Sebestyen, 2003, 8).

de arquitectura sostenible, y en las que el poderoso enunciado modernista *la forma sigue la función* (entendiendo ahora la función de forma renovada y sistémica) ha influido parcial o totalmente en el estilo. Según la estrategia que se acentúe o la postura deontológica, se habla, siempre en el marco de la sostenibilidad, de arquitectura naturalista, orgánica, verde, bioclimática, medioambiental, ecológica, autosustentable, dinámica, activa (*high-tech*), pasiva (*low-tech*), biomórfica, ecológico-minimalista, regionalista, crítico-regionalista, etc. (Domínguez y Soria, 2004, 51-72).

Cualquiera que sea la connotación, la perspectiva hoy dominante cuando se aborda un proyecto arquitectónico ajustado al desarrollo sostenible y la calidad de vida se sitúa en la tradición racional-instrumental moderna (por ser la única capaz de llevar a una normativa consensuada), y es la llamada perspectiva tecnocientífica. A ésta se le puede definir como el proceso de diseño que a partir de un análisis objetivo del entorno (medido, analizado y descrito física y funcionalmente con precisión) responde a éste mediante la incorporación al proyecto de la tecnología que puede aprovechar o contrarrestar los efectos naturales adecuados o inadecuados, según sea el caso, para la confortabilidad humana (Domínguez y Soria, 2004, 59). Tal enfoque no excluye ninguna opción (por ejemplo una pauta arquitectónica tradicional), siempre que su función en el todo pueda justificarse científicamente, lo que conduce a una normativa de tipo funcionalista y no procedimental. En lo que sigue se explica brevemente la articulación teórica de este enfoque desde la perspectiva de los criterios de bienestar y calidad de vida, lo que se conoce en términos generales como el enfoque de criterios, requerimientos o exigencias de habitabilidad.

1.2 Calidad y bienestar. Enfoque de exigencias de habitabilidad

La palabra habitabilidad se ha usado tradicionalmente para designar los requisitos básicos que debe tener un edificio para ser habitado (solidez estructural e instalaciones eléctricas, sanitarias y de seguridad). En los últimos años, sin embargo, ha adquirido un significado mucho más amplio, como consecuencia de asociársele las nociones contemporáneas de bienestar y calidad de vida: es con el fin de optimizar la calidad de vida de los usuarios de los edificios que se plantean, analizan y reglamentan, por un lado, los criterios, exigencias o requerimientos de habitabilidad (con los cuales se mide dicha calidad) y se desarrollan, por otro, los métodos para cumplir con ellos.

Quienes iniciaron la teorización de este enfoque con el fin de adoptarlo y divulgarlo fueron los investigadores del CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*), especialmente su director Gérard Blachère, quien lo esbozó por primera vez en los años 60 en su libro *Saber construir* (Blachère, 1978). La calidad dudosa de los edificios no tradicionales construidos luego de la Segunda Guerra en los que se priorizó la economía y la productividad (lo que fue el apogeo de la industrialización de la construcción, la mecanización y la prefabricación), llevaron a Blachère y su equipo a reflexionar sobre el asunto, pero fue sólo con la crisis del petróleo de 1973 que sus

ideas se extendieron, al punto que su enfoque domina hoy el campo de la normalización y, por rebote, del diseño arquitectónico mismo ^{8, 9}.

Su móvil no era la desconfianza en la industrialización de la construcción (a la cual adhería el CSTB por su esencia), sino depurar ésta de nociones tradicionales perniciosas, las cuales ya no se ataban a las nuevas técnicas, materiales y contextos, planteando para ello una visión científica de conjunto, centrada en las exigencias humanas (Blachère, 1978, 12-13):

Hay quien ha intentado plantear el problema del hábitat no en función de exigencias humanas, es decir, de condiciones de ambiente interior, sino en función de la resistencia a la intemperie (frío, calor, lluvia). Si el problema se aborda así se comprueba que los medios empleados para defenderse contra un agente ecológico entraña a menudo perjuicios para el interior. Por ejemplo, si se asegura el cerramiento del hábitat para luchar contra el frío y la lluvia, se provoca la polución del aire interior con los productos de la respiración, la combustión y el vapor de agua. Para oponerse a ellos hay que ventilar y, de esta suerte, se introducen otras molestias.

En una entrevista para la revista francesa *Revue Urbanisme*, el urbanista Michel Conan, colega de Blachère en el CSTB, resume las circunstancias (Conan, 2003):

La apuesta fue imponer un tipo diferente de normalización al establecido por los ingleses. La normalización anglosajona era dimensional: se refería al tamaño de las tuercas, de las barras de hierro, etc., y en nombre de esa normalización los objetos normalizados dominaban sobre el resto. Era pues una ventaja otorgada a todas las técnicas que ya habían adoptado la normalización. Para deshacer esa ventaja era necesario modificar radicalmente la filosofía de la normalización. Este hombre (Blachère) era absolutamente brillante, porque entendió que la situación podía revertirse con la argumentación funcionalista: no es la elección de las dimensiones lo importante, sino el servicio prestado. En nombre de una lógica funcionalista logró una victoria total, imponiendo, por la eficacia de su convicción, las perspectivas y los métodos de comprobación de la adecuación de los objetos y técnicas al conjunto de técnicas concernientes al edificio.

⁸ El CSTB fue creado por el estado francés en 1947 para reglamentar e impulsar la construcción de una Francia devastada por la Segunda Guerra. Sigue siendo el principal establecimiento público de ese país de investigación y reglamentación de la construcción. Se divide en ocho departamentos: 1) Energía, salud y ambiente, 2) Seguridad y resistencia al fuego, 3) Economía y ciencias humanas, 4) Acústica e iluminación, 5) Climatología, aerodinámica, contaminación y saneamiento, 6) Envoltente y revestimientos, 7) Hidráulica e instalaciones sanitarias y 8) Tecnologías de la información y difusión de conocimientos. Su portal de internet es: <http://www.cstb.fr>.

⁹ En realidad varios países se plantearon paralelamente la necesidad de pasar de una regulación descriptiva de los edificios a una de exigencias (se trataba pues de una idea que *flotaba en el aire*). Entre ellos están los países escandinavos y Holanda (Szigeti *et al.*, 2005). Hasta cierto punto, todos se abrogan la paternidad del enfoque, por razones de la independencia de sus programas de investigación. Sin embargo, las publicaciones iniciales en estos países datan de los años 70, a diferencia de las del CSTB, las cuales comenzaron a aparecer en los años 60.

Generalizando, con esta reorientación la situación dejaba de reducirse a que el arquitecto definiera los volúmenes, componentes y acabados (con base en un programa sujeto a su particular competencia y su concepción de los fines) y el ingeniero adaptara y calculara la resistencia estructural y las instalaciones (concebidas éstas como aditivos y con base en normas procedimentales), para convertirse (el diseño arquitectónico) en un trabajo de equipo orientado a integrar desde el comienzo y de forma sistémica la consecución del conjunto de las exigencias humanas de bienestar y calidad de vida, las cuales se evaluarían y normativizarían con bases científicas. En razón de la variedad y complejidad de tales exigencias, y si se añaden, como hizo Blachère, las exigencias económicas (y más tarde, en el contexto del problema ambiental, las exigencias de sostenibilidad y consumo energético), la arquitectura en sí pasaba a ser (como de hecho ocurrió) una labor multidisciplinaria, siendo el arquitecto uno entre otros (aunque normalmente el líder del equipo).

En aquel tiempo Blachère clasificó las exigencias en tres grupos, pensando en las nociones de bienestar individual y social, por un lado, y en su viabilidad y sostenibilidad económica, por el otro. Éstos son: a) *Exigencias de habitabilidad psicofisiológicas* (acústicas, higrotérmicas, de pureza del aire, de iluminación, de ambiente espacial, de irradiación y soleamiento, de percepción del mundo exterior); b) *Exigencias de habitabilidad sociológicas* (de privacidad, de pertenencia, de adaptación a las costumbres, de equipamiento); c) *Exigencias económicas* (costos y durabilidad). También hizo una distinción entre exigencias absolutas y relativas, siendo las primeras aquellas que no se prestan a discusión (por ejemplo, el nivel de ruido por encima del cual se pueden ocasionar daños irreparables en el oído) y las segundas, aquellas que pudieran conllevar (por causas muy diversas) niveles de aceptación variable y cuyo nivel de satisfacción viene determinado por los rangos de confort o bienestar. Finalmente, enumeró los *datos del problema*, a saber, las propias exigencias (de habitabilidad y económicas), los datos naturales, los datos exteriores impuestos y las condiciones normales de ocupación, para luego resumir el nivel de conocimiento de la época en relación con cada aspecto (Blachère, 1978).

Desde entonces, la visión delineada en el CSTB se ha globalizado, tanto en el ámbito de la reglamentación, como en el modo general de abordar los proyectos de arquitectura. La misma se ha venido enriqueciendo a través de múltiples líneas de investigación. Sería muy extenso exponer esta evolución, incluso resumidamente, por lo que sólo se nombrarán los temas generales: a) el afinamiento de la teorización del enfoque y su relación con la práctica de la arquitectura (Chemillier, 1986; Rilling, 1992; Szigeti y Davis, 2005) (en este itinerario, el enfoque de exigencias de habitabilidad se ha hecho congruente con los sistemas de gestión de calidad y garantía, tal como los definen las normas ISO 9000 y 9001 [Szigeti et al., 2005, 10]); b) la definición de las exigencias mediante una aproximación científica y estadística (pues se debe contar con el *aval* de los involucrados, es decir, de los usuarios de los edificios); c) las políticas para la normativización y

cumplimiento de las exigencias¹⁰; d) el estudio de los nuevos materiales, componentes o técnicas desde la perspectiva funcional; e) la descripción operacional de los contextos, sean éstos físicos como el clima, la luminancia del cielo o el ruido del ambiente, sean éstos urbanos, económicos o sociales; f) el estudio, propuesta y divulgación de los métodos para cumplir las exigencias (los cuales parten en general de indagar la relación entre el edificio, las exigencias y el contexto); g) el alcance y magnitud de los daños que se producen en las colectividades y en las personas cuando se incumplen las exigencias o por efecto de problemas nuevos aún no estudiados; h) la cuestión de su conjunción e incompatibilidades cuando se intenta cumplir varias exigencias a la vez.

Respecto del último punto vale una observación. Ocurrió que por la multidisciplinariedad aneja al enfoque, los especialistas en cada campo desarrollaron, de forma natural, sus propias líneas de investigación. Cada cual fue cubriendo en su campo los puntos b) al g), incluyendo la emisión de normas. Así, se emitieron, entre otras, normas térmicas, acústicas, espaciales, lumínicas, de ahorro energético o de calidad de aire, pero casi nadie se ocupó de los conflictos de su cumplimiento simultáneo en un mismo proyecto. Frente a esas discrepancias, el arquitecto y su equipo se encuentran todavía hoy en la necesidad de fijar prioridades y tomar decisiones con base en la situación global y sus consecuencias, apelando a su propia competencia y experiencia (pues finalmente el diseño arquitectónico siempre ha consistido en una disposición armónica de múltiples factores), así como a soluciones que se desarrollan en la actualidad orientadas a facilitar esta labor.

Entre las soluciones que se desarrollan en este sentido se pueden mencionar: a) el desarrollo de soluciones tecnológicas a problemas típicos de incompatibilidad de criterios (componentes multifuncionales) (un ejemplo son las ventanas con ventiladores de chorro [Van Pasen et al., 1998; Wilson, 1999]. Se trata de ventiladores integrados en los marcos, los cuales inyectan aire del exterior a través de cauces diseñados de forma que los ruidos no se transmitan. Con ellos se resuelve, al menos parcialmente, la recurrente discrepancia entre ventilación y aislamiento acústico, funciones típicas de una ventana); b) la aplicación en la arquitectura de la teoría de la decisión multicriterio (TDM), campo de estudio de la investigación de operaciones orientado a la búsqueda de las soluciones más convenientes a efectos de cumplir con un número determinado de criterios potencialmente conflictivos (en realidad no han sido muchos los trabajos en los que se utilice la TDM en el diseño arquitectónico, quizá por la dificultad de someter a través de dichos métodos y con ánimo tecnocrático un proceso con una componente plástica y creativa importante. La mayoría de tales intentos se ha centrado en tratar de armonizar criterios de calidad térmica con criterios de ahorro energético, asociando éstos con criterios de costos [Rosales, 2003, 42]).

¹⁰ En Venezuela, país donde las normas para edificios siguen siendo en esencia descriptivas, se han adelantado estudios orientados a cambiar tal enfoque hacia uno de exigencias mediante la propuesta de un código nacional de habitabilidad para la vivienda y su entorno (Siem *et al.*, 2001; Siem *et al.*, 2002).

1.3 El bienestar térmico

Una de los requerimientos más importantes en los edificios es el confort térmico. A éste se le puede definir como *la condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico* (ISO 7730, 2005). Pese a lo simple de la definición, determinar las condiciones en que los individuos expresan satisfacción es un problema complejo que abarca consideraciones ligadas a aspectos fisiológicos (calor metabólico y procesos con los que el organismo elimina ese calor), psicofísicos (relación entre las sensaciones térmicas y los estímulos del entorno), físicos (procesos de transferencia de calor entre las personas y el ambiente) y sociales (tradiciones, entorno, etc.).

Son numerosos los estudios que demuestran los problemas físicos y psíquicos que se manifiestan en las personas que permanecen en ambientes en los que el criterio de confort térmico no se cumple (Lagoudi *et al.*, 1996; Danna y Griffin, 1999; Heschong, 2003; Newsham *et al.*, 2009; Steemers y Manchanda, 2010; Bluysen *et al.*, 2011). Entre esos problemas están la desconcentración, el cansancio, la irritabilidad o el insomnio, así como secuelas en el estado anímico general y la vida social y laboral. En el caso de lugares de estudio o trabajo, esto se manifiesta por un descenso de la productividad, un mayor ausentismo y una mayor recurrencia de consultas médicas y peticiones al seguro (Heschong, 2003).

De forma similar a la mayoría de los criterios asociados a la noción de bienestar, el confort térmico conjuga dos enfoques en su evaluación: un enfoque determinista que se explica a través de estudios de física ambiental y fisioclimatología humana y un enfoque descriptivo/estadístico asociado a la subjetividad de la sensación térmica (la cual depende de factores difíciles de generalizar y se aborda por consiguiente por medio de encuestas). En función de ambos tipos de enfoque y con base en los factores cuya influencia es determinante y se puede establecer con relativa precisión (a saber, la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del aire, el entorno radiante, la vestimenta, la actividad y, como factor psicológico, el acostumbamiento a determinado clima), se han desarrollado diversos modelos o índices de confort térmico, de los cuales tres son usados normativa e internacionalmente para certificar el cumplimiento de la exigencia. Estos son: a) el índice de temperatura efectiva estándar (norma ASHRAE 55), basado en una temperatura compuesta que equipara la sensación térmica en el ambiente real a la de un ambiente uniforme de referencia (con temperaturas uniformes y sin corrientes de aire), b) El PMV–PPD (*Predicted Mean Vote – Percentage of People Dissatisfied*) (normas ISO 7730 y ASHARA 55), el cual consiste en una compleja fórmula basada en fisioclimatología humana y encuestas de laboratorio cuyo resultado se coteja con una escala de sensación térmica y c) los llamados modelos de adaptación (Norma ASHRAE 55 y norma europea EN 15251), los cuales toman en cuenta la aclimatación al lugar en el que se vive a través de una temperatura de confort que depende de la temperatura media del clima. Dependiendo del tipo de evaluación y las circunstancias, estas normas apuntan a que al menos 80% o 90% de las personas expresen satisfacción con el entorno térmico.

1.4 Métodos arquitectónicos para adaptar de los edificios al clima

Por tratarse de procedimientos, los métodos de diseño arquitectónico para adaptar los edificios al clima con miras a cumplir los criterios de confort térmico y ahorro energético no forman propiamente parte de las normas que adoptan el enfoque de exigencias de habitabilidad. Si bien éstas habitualmente traen en anexo orientaciones en ese sentido, su carácter de normas de exigencia no lo asumen, pues parten de que es de la exclusividad de los profesionales la responsabilidad de concebir y elegir los métodos, con lo cual se evita menoscabar su capacidad profesional. Desde la perspectiva del enfoque de exigencias de habitabilidad, la única condición es que los métodos estén justificados racional y científicamente y conduzcan al cumplimiento de las exigencias.

Todos los métodos para adaptar los edificios al clima conllevan acoplar tres elementos: el clima, el criterio de confort térmico y el edificio. El esquema básico se plantea habitualmente en términos de racionalidad técnica (búsqueda de medios con arreglo a fines), siendo el fin el cumplimiento del criterio de confort y el medio el edificio (Chemillier, 1986, 23-30). En este esquema el clima y sus fluctuaciones son vistos como la circunstancia a la que hay que adaptar el edificio a fin de cumplir el criterio de confort térmico. Al clima se le caracteriza en primera instancia por sus elementos básicos (lo que serían las *solicitaciones climáticas*): la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar (directa y difusa) y el viento (velocidad y dirección).

Otro enfoque común asemeja el edificio a un filtro a través del cual se produce una interacción energética (de calor y masas de aire) entre los espacios interiores y el clima (Rilling, 1991). Ello permite caracterizar dicho filtro con base en la naturaleza física de la interacción. Desde esta perspectiva, se puede afirmar, generalizando, que los edificios se comportan: a) como un filtro complejo, por tener más de una *entrada* (temperatura exterior, humedad exterior, insolación, viento, cargas internas) y más de una *salida* (temperatura interior, humedad interior, temperaturas superficiales y velocidad del aire), b) como un filtro dinámico (la transferencia energética a través de los materiales toma tiempo en razón del almacenamiento de calor que se produce en ellos) y c) como un filtro lineal (si se asume que las propiedades físicas de los materiales no varían en el tiempo). El problema consiste luego en caracterizar las relaciones que se dan entre las entradas y salidas, lo que se puede hacer con distintos tipos de modelización y niveles de precisión, tanto para el edificio en su conjunto, como para cada componente y subcomponente.

Un enfoque más operativo es considerar al edificio como un sistema integrado de adaptación al clima con potencial de ofrecer confort térmico. Desarrollar ese potencial conllevaría manejar la relación entre el diseño y los procesos térmicos que se generan en el edificio como resultado de su uso y la acción del clima. Resumiendo, la temperatura al interior de un edificio es producto del balance de los flujos de calor a través de la envolvente y las divisiones internas y del calor que se acumula en los materiales. Las principales ganancias de calor son las solares y las cargas internas (Givoni, 1991; Littlefair, 1998), la principales pérdidas son las conductivas y las advectivas (ven-

tilación) (Florides *et al.*, 2002) y el almacenamiento se produce en la masa térmica (Zalba *et al.*, 2003; Khudhair y Farid, 2004). La meta del diseño sería luego modificar la escala de estos procesos y por consiguiente el resultado del balance.

Los métodos orientados a guiar la escogencia y empleo de las estrategias y técnicas de diseño arquitectónico más adecuadas en un proyecto específico se desprenden de este tipo de esquemas de base. Desde la perspectiva del modo en que se aplican, se les puede clasificar en: a) recomendaciones de diseño, b) asesoramiento de expertos con base en la experiencia y c) toma de decisiones basada en la simulación por computadora (deWit y Augenbroe, 2002). Las recomendaciones de diseño surgen de estudios analíticos, empíricos o experimentales en los que se relacionan el clima y el confort con estrategias comunes de diseño arquitectónico (incluyendo el uso de sistemas o instalaciones añadidos de acondicionamiento ambiental). Al igual que el asesoramiento de expertos, éstas son útiles especialmente en las etapas iniciales e intermedias del diseño, cuando se toman las decisiones más influyentes desde la perspectiva del confort y el ahorro de energía (Holm, 1993; de Wilde *et al.*, 2002). Aunque predecir su efecto en detalle no sea posible (por su naturaleza genérica), dan indicaciones fundamentales en relación con aspectos como la orientación del edificio, su geometría, los materiales, la distribución de las aberturas, etc. Por su parte, la simulación computarizada necesita como entrada la geometría del edificio, lo que la hace más adecuada a las etapas finales del proceso (Hong *et al.*, 2000; Olsen y Chen, 2003; Clarke *et al.*, 2004). Los resultados generalmente se dan en forma de series de tiempo (por ejemplo de temperatura o confort) y carga total de consumo (en el caso que se prevea usar sistemas activos). Es común hoy entre los arquitectos concebir los edificios con base en las recomendaciones de carácter general y confirmarlas más tarde por simulación, una práctica que conduce muchas veces a un proceso empírico de ensayo y error, en la medida en que el resultado no sea satisfactorio.

La mayor influencia de las decisiones iniciales en el cumplimiento de los criterios de confort térmico y ahorro energético lleva a que sea de particular importancia para los arquitectos contar con conocimientos y herramientas que permitan justificar dichas decisiones al momento de tomarlas y no esperar a las etapas finales del proyecto para verificarlas, cuando realmente no se plantea ya su modificación por razones prácticas. De ahí que sea fundamental, desde una perspectiva heurística asociada a la práctica profesional, por un lado, así como desde una perspectiva más rigurosa de investigación académica, por otro, desarrollar y ofrecer información, conocimientos y herramientas que fortalezcan las decisiones en esas etapas iniciales. La particularidad de esas etapas es que el problema se presenta aún como un problema abierto en el que caben infinidad de soluciones. Es en esas etapas que la dimensión creativa de la arquitectura encuentra su máximo potencial, mientras que la racionalidad propiamente técnica que domina las etapas finales se encuentra en su punto mínimo. Cualquier propuesta de método para las etapas iniciales debe por tanto respetar esa indeterminación inevitable pero creativa.

Por otro lado, vale tener en cuenta que la inserción de la informática en estos temas se ha centrado usualmente en la oferta de software basado en la modelización numérica de alta complejidad, no sólo en cuanto a la tecnología y conocimientos incorporados, sino al nivel exigido para los usuarios. De ahí que su uso se haya principalmente circunscrito a investigadores y especialistas, en lugar de arquitectos, que es a quienes están en principio dirigidos. En adición, la mayoría del software está concebido en términos simulatorios, como útiles de comprobación, no como ayudas para la toma temprana de decisiones. En el otro extremo, el atractivo y el poder de procesamiento de la informática ha hecho que muchos especialistas releguen los métodos de ayuda al diseño tradicionales, por considerarlos ininteresantes, simples y hasta anticuados. De ahí que se esté replanteando hoy en día la relación entre la informática y la arquitectura, en el sentido de concebir a la primera como un medio para reproducir la lógica del diseño, construcción y funcionamiento de los edificios y, dentro de esa lógica, como una *organizadora* de información útil. Desde esa perspectiva, cualquier método orientativo del diseño que represente información sistematizable y aprovechable se potencia, pasando a un segundo plano su nivel de complejidad y su origen.

1.5 Contribución de la tesis

Atendiendo a la influencia fundamental que tienen en la solución de los criterios de confort térmico y ahorro energético los métodos utilizables en las etapas iniciales del proceso de diseño, la presente tesis se enfoca en ellos y desglosa su contribución (tal como se refleja en los objetivos presentados al inicio [página 5]) en dos partes diferenciables, pero relacionadas: primero, se describen los métodos de ayuda al diseño más importantes, haciendo énfasis en aquellos que se usan en las etapas iniciales de un proyecto, con el fin subsiguiente de aplicarlos al contexto venezolano y de esa forma sintetizar y ofrecer información útil para la práctica profesional de la arquitectura en Venezuela (Capítulo 2); segundo, como aporte principal (Capítulos 3 y 4), se propone un método original basado en un análisis descriptivo de los resultados de la simulación computarizada (o de mediciones experimentales en edificios existentes), el cual lleva a definir patrones de comportamiento independientes del clima que pueden resultar muy útiles para la toma de decisiones en las etapas iniciales de un proyecto¹¹.

Se ha juzgado importante, en una primera instancia, retomar los métodos tradicionales de ayuda al diseño, describirlos desde una perspectiva presente, aplicarlos al contexto venezolano y derivar información útil en los proyectos de diseño, en razón de que esto no ha sido nunca hecho de forma sistémica, al menos no para todo el país, ni desde la perspectiva actual en que aquí se hace.

En una segunda instancia, se ha juzgado que pudiera ser útil, además de innovador, plantear un método de ayuda al diseño aplicable en las etapas iniciales basado en el utilización de la simula-

¹¹ El método fue dado a conocer de forma muy puntual en la Conferencia Internacional Palenc 2007, realizada en la Isla Griega de Creta (Rosales et al., 2007).

ción computarizada, no como una herramienta para comprobar propuestas arquitectónicas acabadas, sino para producir información que pueda ser provechosa en el sentido aludido. Un método así se inspira en los llamados *métodos dinámicos simples*, los cuales partiendo del análisis descriptivo de los resultados de la experimentación o la simulación, derivan información genérica útil para el diseño (la cual se presenta bajo la forma de ábacos, tablas, regresiones, etc.). En el presente caso, el resultado se presenta en forma de patrones de comportamiento de edificios típicos desligados del clima. A un nivel menos genérico (y por lo tanto menos relacionado con las etapas iniciales), el método puede también usarse para evaluar en cualquier momento del proceso de diseño el potencial de adaptación al clima de cualquier cambio que se sugiera en el edificio.

El punto de vista inicial del método es la ya mencionada perspectiva (apartado 1.4) que considera al edificio como un sistema adaptable con potencial de ofrecer confort térmico. Tal como allí se acotó, las principales ganancias de calor son las solares y las cargas internas, las principales pérdidas son las conductivas y las advectivas y el almacenamiento se produce en la masa térmica. Si se aplica este punto de vista a los resultados de la simulación, al tiempo que se les describe estadísticamente, se hace posible separar, con base en hipótesis simplificadoras, el efecto de las ganancias y las pérdidas, con lo que se desacopla el comportamiento del edificio del clima.

Los métodos tradicionalmente usados en las etapas iniciales del proceso de diseño hacen abstracción de los edificios a distintos niveles. Un primer tipo de métodos orienta la toma de decisiones iniciales sólo con base en la relación entre el clima y el criterio de confort, en términos de la *severidad* de un clima desde la perspectiva del confort, indicando en qué sentido el edificio debe contrarrestar sus efectos negativos. Un segundo tipo relaciona el clima y el criterio de confort con abstracciones de los edificios planteadas en términos de estrategias globales. Un tercer tipo plantea las recomendaciones en términos de las *posibilidades* concretas más adecuadas según las circunstancias. Se trata de las pautas acerca de la forma de la envolvente, el plan masa, la orientación, el ventanaje, etc. La propuesta que se hace en la presente tesis difiere de todas estas perspectivas, en razón de que parte de los resultados de la simulación (o de mediciones experimentales, de tratarse de un edificio existente objeto de restauración o remodelación). En otras palabras, parte de un edificio lo suficientemente acabado como para posibilitar la simulación. Sin embargo, en la medida en que ese edificio se considere un prototipo de cierto tipo de edificios, la información que se derive del análisis de su comportamiento, así como del análisis de la influencia de aplicar en él cambios también concebidos en forma genérica (y puesto que tal análisis conduce, como ya se explicó, a patrones a su vez genéricos), puede, esa información, usarse en las etapas iniciales para indicar la adaptabilidad de ese tipo de edificios al clima concreto del proyecto, cualquiera que éste sea. De esta forma, en la medida en que se conciba al edificio con esas premisas, se estará frente a un nivel de abstracción similar al de los métodos iniciales tradicionales (todo esto será detallado más adelante en los capítulos correspondientes [Capítulos 3 y 4]).

1.6 Referencias del capítulo 1

- ASHRAE 55-2004. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 16-Apr-2004, 30 pages.
- Blachère G. (1978) *Saber Construir*. Habitabilidad, durabilidad, economía de los edificios. Editores Técnicos Asociados. Impreso en España. ISBN : 84-7146-032-7.
- Bluyssen P.M., Aries M., van Dommelen P. (2011) *Comfort of workers in office buildings: The European HOPE project*. Building and Environment, Volume 46, Issue 1, January 2011, Pages 280-288.
- Chemillier P. (1986) *Sciences et bâtiment: La démarche scientifique appliquée à la construction*. Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CSTB. 448p. ISBN 2-85978-087-4
- 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.
- Conan Michel (Interview) (2003) Revue Urbanisme. N° 333. Novembre/Décembre 2003. Idées en débats/Invité(s) (<<http://www.urbanisme.fr/issue/guest.php?code=333>>)
- Danna K. y Griffin R.W. (1999) *Health and well-being in the workplace: a review and synthesis of the literature*. Journal of Management, Volume 25, Issue 3, 1999, Pages 357-384.
- de Wilde P., Augenbroe G., van der Voorden M. (2002) *Design analysis integration: supporting the selection of energy saving building components*. Building and Environment 37: 807–816.
- deWit S., Augenbroe G. (2002) *Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implication*. Energy and Buildings 34: 951–958.
- Domínguez L.A., Soria J.F. (2004) *Pautas de diseño para una arquitectura sostenible*. Editores: Universitat Politècnica de Catalunya, España, ISBN: 84-8301-767-9.
- Edwards A.R. (2005) *The sustainability revolution: portrait of a paradigm shift*. New Society Publishers, ISBN: 0865715319 (<<http://www.andresedwards.com/Writing/tsr.html>>)
- EPA (United States Environmental Protection Agency) (1991) *Sick Building Syndrome*, Indoor Air Facts No. 4 (<<http://www.epa.gov/iaq/pubs/sbs.html>>).
- Florides G.A., Tassou S.A., Kalogirou S.A., Wrobel L.C. (2002). *Review of solar and low energy cooling technologies for buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 6: 557–572.
- Ghiaus C. (2003) *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings 35: 405–411.
- Ghiaus C. (2006) *Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods*. Energy and Buildings 38: 429-435.
- Givoni B. (1991) *Characteristics, design implications, and applicability of passive solar heating systems for buildings*. Solar Energy 47: 425–435.
- Gössel P., Lauthäuser G. (2005) *Arquitectura del siglo XX* (2 tomos) Editorial Taschen. ISBN: 3822841242
- Gowri K. (2004) *Sustainability green building rating systems: an overview*. ASHRAE Journal, ISSN 0001-2491, Vol. 46, N° 11, 2004, pág. 56.

- Heschong L. (2003) *Windows and offices: a study of office worker performance and the indoor environment*. Technical Report No. P500-03-082-A-9, California Energy Commission (<http://www.h-m-g.com/projects/daylighting/projects-PIER.htm>).
- Heschong, L. (2003) *Windows and offices: A study of office worker performance and the indoor environment*. Technical Report, No. P500-03-082-A-9, California Energy Commission. Disponible en web: <http://www.h-m-g.com/projects/daylighting/projects-PIER.htm>.
- Holm D. (1993) *Building thermal analyses: what the industry needs: the architect's perspective*. Building and Environment 28: 405–407.
- Hong T., Chou S.K., Bong T.Y. (2000) *Building simulation: an overview of developments and information sources*. Building and Environment 35: 347–361.
- Hulme M. (2009) *Why We Disagree About Climate Change: Understanding Controversy, Inaction and Opportunity*. Cambridge University Press. ISBN-10: 0521727324
- IPCC-1 (2007) *Cambio climático 2007 – Base de ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC* (ISBN 978 0521 88009-1 Libro, 978 0521 70596-7 Folleto). Disponible en web: <http://www.oei.es/noticias/spip.php?article1373>.
- IPCC-2 (2007) *Cambio climático 2007 – Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC* (978 0521 88010-7 Libro; 978 0521 70597-4 Folleto). Disponible en web: <http://www.oei.es/noticias/spip.php?article1374>.
- IPCC-3 (2007) *Cambio climático 2007 – Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC* (978 0521 88011-4 Libro; 978 0521 70598-1 Folleto). Disponible en web: <http://www.oei.es/noticias/spip.php?article1375>.
- ISO 7730:2005 *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*
- Khudhair A.M., Farid M.M. (2004) *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*. Energy Conversion and Management 45: 263–275.
- Kostof S. (2000) *The architect: chapters in the history of the profession*. Oxford University Press, 1977; third edition, University of California Press, Berkeley Los Angeles London.
- Lagoudi A., Loizidou M., Santamouris M. y Demosthenes Asimakopoulos (1996) *Symptoms experienced, environmental factors and energy consumption in office buildings*. Energy and Buildings, Volume 24, Issue 3, 1 October 1996, Pages 237-243
- Littlefair P. (1998) *Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2: 303–326.
- Lomborg B. (2005) *El ecologista escéptico*. Editorial Espasa Calpe, ISBN: 8467019549.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J. y Behrens W. (1972) *Los Límites del Crecimiento*. Fondo de Cultura Económica. México.
- Meadows D. H., Randers J. y Meadows D. L (2006). *Los límites del crecimiento 30 años después*. Barcelona: Galaxia Gutenberg. SBN 10: 8481096016.
- Michaels P.J. (2005) *Shattered Consensus: The True State of Global Warming*. Rowman & Littlefield Publishers, Inc. ISBN-13: 9780742549234.
- Newsham G., Brand J., Donnelly C., Veitch A., Aries M., Charles K. (2009) *Linking indoor environment conditions to job satisfaction: a field study*, Building Research & Information, Volume 37, Issue 2.

Olsen E.L., Chen Q.Y. (2003) *Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate*. Energy and Buildings 35: 560–571.

ONU-WCED (1987) *Our common future (Brundtland Report)*. World Commission on Environment and Development. Disponible en web: <<http://worldinbalance.net/agreements/1987-brundtland.php>>.

Rosales L. (2003) *Ruido, clima y luz natural en arquitectura. Un enfoque integral para Venezuela*. Ejercicio de evaluación. Doctorado en arquitectura. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela. 51 páginas.

Rosales L., Hobaica M.E., Ghiaus C., Allard, F. (2007) *Potential of passive design strategies using the free-running temperature*. AIVC 28th Conference and Palenc 2nd Conference: Building Low Energy Cooling and Ventilation Technologies in the 21st Century, 27-29 September 2007, Crete island, Greece. Vol II, 850-854. Disponible en web: <http://www.inive.org/Ibase_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=100912>.

Rosales L., Hobaica M.E., Ghiaus C., Allard, F. (2007) *Potential of passive design strategies using the free-running temperature*. AIVC 28th Conference and Palenc 2nd Conference: Building Low Energy Cooling and Ventilation Technologies in the 21st Century, 27-29 September 2007, Crete island, Greece. Vol II, 850-854. Disponible en web: <http://www.inive.org/Ibase_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=100912>.

Sebestyen G. (2003) *New architecture and technology*. Architectural Press, ISBN: 0750651644.

Siem G. (coord.), Grimaldi L., Rosales L., Sosa M.E., Pasquali C., Sarevnik J. (Investigadores), de Brandt C., Vallmit-jana M., Cilento A., Hobaica M.E., Rodríguez A. (Asesores) (2002) *Código Nacional de Habitabilidad para la vivienda y su entorno*, Premio Nacional de Investigación en Vivienda 2001. Consejo Nacional de la vivienda, Caracas: 2002, ISBN 980-07-83360-9. Editor: CONAVI.

Siem G., Sosa M.E. (2001) *Revisión de las normas venezolanas referentes a las exigencias térmicas, acústicas y de iluminación bajo una perspectiva de sostenibilidad*. Revista Tecnología y Construcción. IDEC/FAU/UCV. Vol. 17-2, 2001, pp. 29-34.

Sosa M., Sosa M.E. (1999) *La calidad en la edificación: las reglas técnicas de calidad*. Revista Tecnología y Construcción. IDEC/FAU/UCV. Vol. 15-1, 1999, pp. 77-64.

Stemers K. y Manchanda S. (2010) *Energy efficient design and occupant well-being: Case studies in the UK and India*. 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings. Building and Environment, Volume 45, Issue 2, February 2010, Pages 270-278.

Szigeti F., Davis G. (2005) *Performance Based Building: Conceptual Framework*. Final Report, International Centre for Facilities. Editing Ms. Mansi Jasuja CIBdf. The Netherlands. ISBN 90-6363-051-4

Usón G. (2005) *Dimensiones de la sostenibilidad*, Ediciones UPC. ISBN: 8483017857. ISBN-13: 9788483017852.

Van Paassen A., Broekhuizen H.F., Verwaal M. (1998) *Prototype of night ventilator for cooling*. Non Nuclear Energy Programme, the European Commission.

Wilson M. (1999) *Un examen de los problemas acústicos en el diseño por climatización pasiva*. Apéndice del texto: Diseño acústico para arquitectos, publicado en Energía y Hábitat, Informe Científico, red ALFA-BUILT, IDEC/FAU/UCV. Caracas.

Yudelson J. (2007) *The green building revolution*. Island Press, ISBN: 1597261793, pág. 13 a 25.

Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H. (2003) *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering 23: 251–283.

CAPÍTULO 2 MÉTODOS PARA ADAPTAR LOS EDIFICIOS AL CLIMA. ESTADO DEL ARTE. CASO DE VENEZUELA

2.1 Introducción. Resumen de los tipos de métodos

Los métodos de apoyo al diseño arquitectónico orientados a adaptar los edificios al clima parten todos de acoplar tres elementos: el clima, el criterio de confort térmico y el edificio. Al clima se le concibe usualmente como la circunstancia a la que hay que adecuar el edificio a fin de cumplir el criterio de confort térmico. Se le caracteriza por sus elementos, principalmente la temperatura del aire, la humedad, la insolación (directa y difusa) y el viento (velocidad y dirección). Por su lado, el criterio de confort térmico se define a través de los llamados índices de confort, los cuales agregan, en mayor o menor número, y con base en hipótesis variadas, los principales factores que afectan la sensación térmica, a saber, por un lado, los factores físicos (temperatura del aire, entorno radiante, velocidad del aire y humedad) y, por otro, los factores asociados a las personas, al contexto y al uso del edificio (la actividad, la vestimenta, las expectativas, etc.).

Según la etapa del proceso de diseño en que se les use, a los métodos de apoyo al diseño se les puede dividir a grandes rasgos en¹: a) *métodos al inicio*, indicativos de las estrategias arquitectónicas globales, basados en la relación, según el uso y el tipo de edificio, entre el clima y el criterio de confort térmico, b) *métodos intermedios*, utilizados en las etapas de definición morfológica y material del edificio, orientativos de los efectos particulares y combinados de las distintas decisiones de diseño arquitectónico en el confort térmico (decisiones relativas a la disposición de los volúmenes y los ambientes, la concepción general y detallada de la envolvente, las divisiones internas, la adecuación del entorno del edificio y, eventualmente, el acoplamiento de sistemas pasivos, híbridos o activos de climatización) y c) *métodos finales*, dirigidos a evaluar desde la perspectiva del confort térmico y el ahorro energético² el edificio ya diseñado para eventualmente volver a él y corregir las fallas detectadas (algo que se hace hoy mayormente con programas de simulación dinámica, los cuales demandan contar con un edificio ya diseñado o, al menos, lo suficientemente definido como para posibilitar la simulación). Los dos primeros tipos de métodos pudieran agruparse bajo la apelativo de *reglas heurísticas o empíricas*, en el sentido de que son orientativos del diseño, y el tercero pudiera denominarse *métodos de comprobación*.

¹ Se trata aquí de una clasificación basada en una simplificación de las etapas del proceso de diseño descritas en el artículo *Thermal comfort in architecture* de Saberi, Saneei y Javanbakht (2006), en el que se divide el proceso de diseño en cuatro etapas: 1) etapa de estudio, 2) etapa de esquemas iniciales, 3) etapa de diseño (escala 1:100) y 4) etapa de diseño detallado (escalas 1:50 y 1:1).

² Bien que los criterios de confort térmico y ahorro energético sean diferentes, se juzgará que se les concilia cuando cumplir el de confort térmico lleve por extensión cumplir el de ahorro energético en lo tocante a climatización.

Conforme esta clasificación, la adecuación de los métodos existentes está sujeta al transcurrir del proceso de diseño. En líneas generales, cuanto más al inicio se recurra a ellos, más generales e indefinidos serán, pero, al mismo tiempo, mayor será su peso en la solución de los criterios de confort térmico y ahorro energético (Holm, 1993; de Wilde, 2002; Altavilla *et al.*, 2004; Zeiler *et al.*, 2008). Esta singularidad se debe a que el diseño arquitectónico se presenta como un problema abierto al inicio y un afinamiento de detalles al final, siendo las primeras decisiones las que fijan los atributos básicos de la obra arquitectónica. A medida que transcurre el proceso, la comprensión de los problemas que se presentan aumenta, así como la *disponibilidad* de soluciones, pero, en contrapartida, disminuye la libertad de decisión (Ullman, 2003, 17, 18). De ahí que los métodos al inicio y los métodos intermedios conciernen directamente al arquitecto, cuya competencia en aplicarlos es fundamental (aunque ello no signifique prescindir de especialistas que juzguen las soluciones, sugieran otras o planteen correctivos). Por otro lado, como es lógico prever (y se ha estimado), las complicaciones técnicas y los costes económicos de adaptar los edificios al clima con miras a satisfacer los criterios de confort térmico y ahorro energético crecen a medida que se retrase su consideración, llegando a ser máximos de dejarse ésta para cuando el edificio esté construido (DOE, 2001, 38; Altavilla *et al.*, 2004; Zeiler *et al.*, 2008).

De los métodos al inicio, los de mayor uso son tres: a) el cálculo de los *grados-día* o de los *grados-hora*, b) las *diagramas bioclimáticos* y c) las *Tablas de Mahoney*. A pesar de ser métodos de vieja data, siguen siendo muy usados como guías iniciales del diseño³.

- a) Calcular los *grados-día* o los *grados-hora* (ASHRAE, 2009, 14.6-14.7) consiste en estimar los grados totales de la temperatura exterior que habría que contrarrestar para mantener el confort térmico en un período de tiempo dado (un mes, una estación, un año), sea para neutralizar el frío, sea para neutralizar el calor, teniendo como referencia una *temperatura de confort* (o un rango de temperaturas de confort limitado por valores máximos y mínimos admisibles). En otras palabras, el método consiste en integrar en el tiempo la función de diferencias de temperatura dada por la temperatura de confort (o los límites del rango de confort) y la temperatura fluctuante impuesta por el contexto climático. La distinción entre *grados-día* y *grados-hora* viene dada por el paso de tiempo de dicha función (cuando se trate de *grados-día*, se usan los promedios diarios de la temperatura exterior). El resultado ofrece una primera indicación de la *severidad* del clima desde la perspectiva del confort, dando así una idea general de la orientación que debe dársele al proyecto de diseño.

³ El concepto de *grados-día* se usa desde hace décadas en diversos campos (climatología, ingeniería, agronomía) para caracterizar la variación acumulada de la temperatura en períodos prolongados alrededor de un valor de interés. Los *diagramas bioclimáticos* fueron ideados por los hermanos Olgay hace unos 50 años (Olgay, 1963) y han sido mejorados en dos ocasiones, primero por Givoni (1969) y luego por Szokolay (1987). Por su parte, las *tablas de Mahoney* aparecieron por primera vez publicadas a comienzos de los años setenta (Koenigsberger *et al.*, 1971).

- b) Los *diagramas bioclimáticos* (o cartas bioclimáticas) (Olgyay, 1963; Givoni, 1969; Szokolay, 1987) son representaciones gráficas en las que se contrastan *zonas* que señalan: a) el criterio de confort térmico, b) el clima del sitio y c) las condiciones *no confortables* del clima para las cuales sería posible restituir el confort apelando a determinadas *estrategias globales de diseño arquitectónico*. Se trata básicamente de *diagramas psicrométricos* en los que estas zonas se expresan en términos de temperatura y humedad (pudiendo la temperatura ser *compuesta*, es decir, agregar a más de un factor de confort). De esta forma se averigua, examinando el diagrama, la conveniencia de acentuar tal o cual estrategia global de diseño en el clima en cuestión. A un segundo nivel, mediante cuentas basadas en el diagrama, y en la medida en que el clima esté pormenorizado, se puede determinar por cuánto tiempo y en qué partes del día o del año cada estrategia global permitiría restituir el confort.
- c) El método de las *tablas de Mahoney* (Koenigsberger *et al.*, 1971; 1977) parte de una tabla con los datos climáticos mensuales promedios del sitio y, a partir de ella, y siguiendo un conjunto de reglas condicionales (fáciles de programar en una hoja de cálculo), se generan otras tablas que proveen información de ayuda al diseño. Los resultados se obtienen en tres niveles: a) una primera tabla que indica entre tres posibilidades (frío, calor o confort) cuál es la sensación térmica a esperar, mes a mes, tanto en el día, como en la noche, b) una segunda tabla que sugiere estrategias globales de diseño ajustadas al clima de cada mes y c) una tercera tabla con recomendaciones generales para el clima en cuestión, relativas a técnicas pasivas y componentes básicos del edificio.

Los *métodos intermedios* son muchos y variados y tienen como fin asistir al arquitecto a lo largo del proceso de diseño en decidir sobre aspectos particulares del edificio desde la perspectiva del confort térmico y el ahorro energético. Obedecen a una pragmática normativo/descriptiva, presentándose en forma de recomendaciones o herramientas de diseño referidas al edificio y sus partes y a los procesos de transferencia y acumulación de energía que se dan entre éstos y el clima. A pesar de apuntar a particularidades, su carácter es genérico, por la necesidad, al formularseles, de hacer abstracción de los edificios (o tipos de edificios), recayendo luego en el arquitecto el juzgar y definir su adecuación y el adaptarlos al edificio concreto que esté proyectando⁴.

Diferenciar entre sí los métodos intermedios es un requisito para su desarrollo y difusión. Sin que haya uniformidad (ni linealidad), lo habitual es plantear como primer nivel de diferenciación el *tipo de clima*, a fin de contar con conjuntos de métodos idóneos a cada uno (Givoni, 1998)⁵. También se pudiera plantear como primer nivel el *tipo de edificio*, de forma de ofrecerle al arquitecto información más ajustada a su proyecto particular (como es el caso de las guías de

⁴ En este grupo pudiera incluirse la *guía* que representan experiencias previas y edificios ya diseñados o construidos, entendidos como modelos de los cuales se pudiera *sacar ideas* de beneficio comprobado.

⁵ Las referencias aquí son ejemplos puntuales de textos con *métodos intermedios* diferenciados como se menciona.

ASHRAE denominadas *Advanced Energy Design Guides*⁶). Luego, se pudieran mencionar, a modo de ejemplo, los siguientes tres criterios de diferenciación (sin que sean ciertamente los únicos): a) la *intención* del método, planteada en términos de procesos energéticos, dando lugar a: métodos para impedir o auspiciar la entrada y acumulación de calor, métodos para extraer o conservar calor y métodos para modular las fluctuaciones de calor (Sosa *et al.*, 2004), b) los *componentes* a los que apunta el método, lo que va desde los métodos ligados al edificio y su entorno considerados en conjunto y a grandes rasgos, hasta los métodos puntuales enfocados en componentes y subcomponentes particulares (Comisión para el Mejoramiento de la Calidad Térmica de las Edificaciones y el Espacio Urbano, 1999) y c) las *técnicas, estrategias o prácticas* de diseño y construcción a las que se refiera el método, tales como orientación, sombreado, aislamiento, masa térmica, ventilación, enfriamiento radiativo, transmisión de luz y sol, etc. (Reardon *et al.*, 2001).

El que a los métodos intermedios se les pueda diferenciar con fines hermenéuticos no significa que su aplicación sea lineal, en razón del carácter holista del diseño arquitectónico. Si bien dentro del conjunto de métodos intermedios existen algunos que ofrecen soluciones a decisiones combinadas (aunque siempre sin ir más allá de aspectos específicos), la perspectiva holista ineludible del diseño complica considerablemente el trabajo del arquitecto, quien cuenta en principio con cuatro recursos para esclarecer las consecuencias de la conjunción final de las decisiones: a) la comprensión teórico/instrumental de los procesos de transferencia y acumulación de energía que rigen la interacción del edificio y el clima (sin la cual sería de hecho imposible mantener una visión sistémica a lo largo del proceso), b) la experiencia profesional propia y ajena (incluyendo ejemplos de *buen diseño*), c) el apoyo de especialistas (cuya función es suplir las justificables insuficiencias relativas a los dos puntos anteriores⁷) y d) los *métodos finales* o de *comprobación*.

Los *métodos finales* o de *comprobación* se pudieran clasificar según su forma de aplicación en tres grandes tipos: a) *métodos experimentales*, b) *métodos manuales o simplificados* (hipótesis estática) y c) *métodos computarizados* (simulación dinámica).

a) Bien que nunca hayan sido de uso generalizado por requerir de infraestructura experimental importante⁸, los *métodos experimentales* como medio de comprobación de la calidad ambiental de una propuesta arquitectónica han perdido peso en beneficio de la simulación computarizada. Esto no quita que en casos complejos, en proyectos de presupuesto acorde, no se recu-

⁶ ASHRAE (*The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*) ofrece gratuitamente guías específicas para varios tipos de edificios tales como escuelas, oficinas, comercios, clínicas, viviendas, etc., todas las cuales están disponibles en: <http://www.ashrae.org/technology/page/938>.

⁷ El concurso de especialistas se justifica por la complejidad y el carácter multidisciplinario que ha adquirido hoy el diseño arquitectónico en razón de la cantidad de criterios que se deben cumplir normativamente (ver el Capítulo I).

⁸ Entre los equipos de laboratorio para evaluar propuestas arquitectónicas desde la perspectiva del confort térmico se pueden mencionar los túneles de viento, las cámaras climáticas, los heliodones y los cielos artificiales, todos los cuales requieren construir maquetas y/o prototipos a escala reducida o real del edificio. También es frecuente construir prototipos al aire libre y medir su comportamiento ante el clima usando la debida instrumentación.

rra a ellos para aclarar incertidumbres fuera de las posibilidades de la simulación. Si bien la modelización numérica permite simular adecuadamente gran cantidad de propuestas, siempre serán posibles propuestas para las cuales no ofrece respuestas adecuadas (Splitter, 2006). Existen además fenómenos y situaciones asociados a los procesos de interacción energética entre los edificios y el clima cuya modelización conlleva niveles de incertidumbre variados que sólo pueden reducirse empírica o experimentalmente. Tal es el caso de los flujos detallados de ventilación cruzada y los intercambios convectivos asociados, de las transferencias de calor a través de cerramientos complejos o del pronóstico de las variables de operación ligadas a las cargas internas (de Wit, 1997; de Wit y Augenbroec, 2002; Hopfe *et al.*, 2007a, 2007b; Crawley *et al.*, 2005, 2008; Brohus *et al.*, 2009). La simulación ofrece soluciones aproximadas a estos problemas, las cuales, dependiendo del nivel de exigencia, pudieran no ser satisfactorias. De hecho, las discrepancias (no imputables a la impericia de quien realiza la simulación) entre la simulación y el comportamiento real del edificio luego de construirse y habitarse ocurren y pueden ser significativas (Torcelli *et al.*, 2004; Soebarto, 2009).

Otra forma de corroborar experimentalmente la calidad ambiental del edificio diseñado es realizar mediciones en él cuando ya esté construido. Como método de mejoramiento profesional y especialmente en el ámbito de la investigación y el desarrollo tecnológico, tales mediciones son sumamente útiles. Las mismas cumplen múltiples funciones, tales como la reducción de las incertidumbres de la simulación con miras a mejorar su predictibilidad y la comprobación y definición de métodos de ayuda al diseño⁹. Como método de ensayo y error enmarcado en el proceso de diseño y orientado a cumplir los criterios de confort térmico y ahorro energético, presenta la evidente desventaja – mencionada con anterioridad – de las complicaciones técnicas y los elevados costes económicos de modificar un edificio ya construido. Esta desventaja se atenúa si la experimentación se articula con la construcción, en aquellos diseños en los que se estime que las incertidumbres sólo pueden resolverse en sitio.

- b) Los *métodos manuales o simplificados* fueron ideados fundamentalmente para estimar de forma sencilla (manualmente o usando hojas de cálculo) las transferencias de calor totales en un período de tiempo dado a través de la envolvente de edificios cuya temperatura interior se mantenga fija por medio de sistemas de climatización. El resultado es la carga necesaria para climatizar, la cual puede luego cotejarse con las normas u otros edificios del mismo tipo. Aunque estos métodos también hayan perdido peso en favor de la simulación computarizada, su simpleza y la tradición los mantienen vigentes. Valerse de ellos exige estar al tanto de sus limitaciones, siendo la principal que no toman en cuenta el comportamiento dinámico de los

⁹ Como ejemplo de estudios de validación experimental de los programas de simulación se pueden mencionar los que realiza la Agencia Internacional de la Energía, algunos de los cuales pueden consultarse en: <http://www.iea-shc.org/publications/category.aspx?CategoryID=39>.

edificios, lo que los hace aptos sólo para edificios cuyos ambientes se mantengan en equilibrio térmico (régimen estático). De estos métodos, los más usados son el *método de grados-día* y el *método de los intervalos* (del inglés *bin method*).

El *método de grados-día* (ASHRAE, 2009, 19.17, 19.18) parte de la noción que un edificio se mantendrá en su interior a una temperatura confortable cuando la temperatura exterior se mantenga a su vez a una *temperatura de balance* (si bien esta temperatura de balance depende del tipo de edificio, un valor tradicionalmente usado es 18 °C). En tales condiciones se admite que las ganancias medias de calor debidas al sol y las cargas internas equivalen a las pérdidas por conducción a través de la envolvente (en otras palabras, que el edificio está en equilibrio térmico). De bajar o subir la temperatura exterior, el edificio tenderá a perder o ganar calor, lo que deberá compensarse con sistemas de calefacción o enfriamiento. La energía requerida para compensar los desequilibrios (en un sentido u otro) a lo largo del tiempo (un mes, una estación o un año) es luego proporcional a los grados-día (del mes, la estación o el año) calculados integrando la diferencia entre la temperatura de balance y la temperatura media exterior diaria) y a la conductancia térmica global de la envolvente. En temporadas cálidas el método toma adicionalmente en cuenta la posibilidad de apelar a la ventilación natural cuando la temperatura exterior se encuentre entre la temperatura de balance y una temperatura máxima exterior capaz de garantizar confort térmico ventilando.

El principal inconveniente del método de grados-día es que la caracterización del edificio es fija (lo que incluye la conductancia térmica global, las cargas internas, la eficiencia del sistema de climatización y la temperatura de balance). De ahí que dé resultados buenos sólo en edificios en los que las cargas internas sean constantes o pequeñas y cuando los promedios diarios de la temperatura exterior se mantengan por debajo de la temperatura de balance (calefacción) o por encima de la temperatura para la cual ya no se ventile naturalmente (enfriamiento). A fin de considerar los cambios que pudieran presentar las *variables* del método en función de la temperatura exterior o la hora, se diseñó el *método de los intervalos* (ASHRAE, 2009, 19.21, 19.22), en el que se discretiza la temperatura exterior en intervalos de igual tamaño, centrados en valores específicos (por ejemplo, si los intervalos son de 3 °C, el intervalo de 21 °C incluiría las temperaturas comprendidas entre 19,5 y 22,5 °C). Usando los datos horarios de la temperatura exterior se determina luego las veces (número de horas) en que la temperatura está en cada intervalo (distribución de frecuencia) a lo largo del período considerado (un mes, una estación o un año). Este cálculo se puede hacer separadamente para diversos momentos del día a fin de considerar los cambios rutinarios de los factores de uso y operación del edificio. Todo esto se tabula ordenadamente y se procede a calcular la carga requerida para cada intervalo y luego la carga total para el período dado (la sumatoria de todo).

- c) El principal uso que se le da en la actualidad a los *métodos computarizados* de simulación dinámica de edificios¹⁰ es calcular el comportamiento energético/ambiental de la propuesta arquitectónica para luego volver a ella y realizar los cambios que sugiera la interpretación de los resultados (según un proceso reiterativo de ensayo-error). Hasta hace poco, servirse correctamente de los programas de simulación exigía tener buenos conocimientos de transferencia energética, modelización y métodos numéricos, lo que limitaba su universo de usuarios al de los especialistas. Desde hace unos años esta situación ha venido cambiando, básicamente por tres razones: a) la evolución de los programas, especialmente en cuanto a facilidad de uso, con miras a que también los arquitectos se sirvan de ellos, al menos en proyectos pequeños y medianos (Marsh, 2004; Soebarto, 2005; Djunaedy *et al.*, 2006; Hopfe *et al.*, 2006; Khemlani, 2009; Crawley *et al.*, 2005; 2008), b) la necesidad de contar con medios eficaces para predecir la conformidad de los proyectos a las normas y los sistemas de certificación ambiental (Gowri, 2004; Roderick *et al.*, 2009; Ghauri *et al.*, 2009; Soebarto, 2009)¹¹ y c) la inserción en el mundo de la arquitectura, la ingeniería y la construcción de nuevas generaciones de profesionales formados en la era digital y familiarizados con estas tecnologías.

Paralelamente a estos avances, se ha venido desarrollando entre investigadores y creadores de software el proyecto de adaptar los métodos computarizados a las fases tempranas e intermedias del proceso de diseño (de Wilde *et al.*, 1999; Morbitzer *et al.*, 2001; Morbitzer, 2004; Hobbs *et al.*, 2004; Marsh, 2004; Obanye, 2006; Khemlani, 2009). Partiendo de que una modelización de *baja resolución* es muchas veces suficiente (y no necesariamente menos confiable que una de *alta resolución*) y de que la simulación es más efectiva como herramienta de comparación que como predictora del comportamiento absoluto de una propuesta arquitectónica singular (Djunaedy *et al.*, 2006), se han venido desarrollando programas de computación orientativos del diseño, en los que la combinación modelización simplificada /interfaz gráfica simplificada facilita la entrada de datos y aumenta la velocidad de respuesta, dando así mayor dinamicidad a la interacción usuario/programa. A esto se suma la inclusión, en estos mismos programas, de algunos métodos iniciales e intermedios, con miras a integrar, facilitar y extender su uso (p.ej. el análisis de los datos climáticos, la obtención y análisis de los diagramas

¹⁰ En el año 2007 la Agencia Austríaca de Energía publicó en internet, en el marco del proyecto Europeo *KEEP-COOL II*, un catálogo/resumen con las características básicas de los 38 programas de simulación más usados: <http://www.keep-cool.eu/System/FileArchive/175/File_12321.pdf>. Más conocida y mucho más extensa (383 programas) es la lista que ofrece el Departamento de Energía de los Estados Unidos en su web, la cual es actualizada periódicamente: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>. Frente a tanta oferta de programas, ASHRAE emitió una norma orientada a su evaluación (ASHRAE 140-2007: *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*).

¹¹ La simulación con miras a la certificación ambiental del edificio en el aspecto térmico/energético debe hacerse usando programas y métodos refrendados por la propia certificación. La certificación LEED, por ejemplo, demanda que el programa de simulación y la simulación misma cumplan con lo pautado en el apéndice G de la norma ASHRAE 90.1-2007: *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*.

bioclimáticos o el cálculo de protecciones solares)¹². Estos desarrollos se están actualmente diversificando y acoplando a lo que se conoce como *modelado de información de edificios* (del inglés *Building Information Modelling, BIM*), concepto que apunta a una gestión integral de toda la información relacionada con el edificio durante su ciclo de vida (diseño, construcción, uso, mantenimiento, demolición y gestión de desechos), usando para ello *software dinámico* de modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real. El principio gráfico subyacente es el *modelado por objetos* (en este caso cualquier parte o componente del edificio), el cual estaría remplazando la representación vectorial genérica de planos y superficies. Este cambio ha sido calificado como de gran trascendencia, en la medida en que permitiría reproducir exactamente la lógica de los procedimientos reales, contando con un *feedback* oportuno de toda información relevante (Seletsky, 2005; Malin, 2007).

Pese a estos sugestivos adelantos, sondeos hechos en varios países (Pedrini y Szokolay, 2005; Hopfe *et al.*, 2006; Bambardekar y Poerschke, 2009) muestran que la difusión de los métodos computarizados como ayuda de las decisiones iniciales e intermedias es todavía muy incipiente y que incluso su uso como herramientas de comprobación final, aunque esté más extendido, tampoco es generalizado. Entre las razones de ello se pudieran citar: a) que muchos programas todavía se circunscriben a la tradicional modelización numérica detallada, la cual obliga a contar con una propuesta lo bastante acabada como para posibilitar (y justificar) el cálculo, b) que muchos arquitectos no cuentan con criterios suficientes para discernir frente tanta oferta de software, c) la percepción entre los arquitectos de una disociación entre los métodos computarizados y el proceso de diseño, lo que se expresa en que tanto los programas más recientes orientados a guiar la toma de decisiones como los programas tradicionales de simulación detallada se usen por igual, sólo como medios de comprobación final y d) que los arquitectos recurren a los programas (o a los especialistas que saben usarlos) principalmente por la obligación de estimar el gasto energético de la propuesta y verificar su conformidad con las normas y los sistemas de certificación. Los mismos sondeos muestran que, en líneas generales, la práctica arquitectónica sigue dominada por la habitual toma de decisiones basada en la experiencia y el uso de reglas heurísticas o empíricas. Con todo, los adelantos citados, particularmente los enmarcados en el concepto de *modelado de información de edificios*, dan pie para suponer que la arquitectura pudiera estar al borde de una revolución digital capaz de cambiar la forma en que los edificios son diseñados y ejecutados (Seletsky, 2005).

Terminada esta introducción sobre los métodos de ayuda al diseño orientados a adaptar los edificios al clima, se procederá, en el transcurso del presente capítulo, a aplicarlos al contexto venezo-

¹² Si bien son muchos los programas existentes, los que están teniendo actualmente mayor penetración y a la vez mostrando más avances en adaptar la simulación a las etapas tempranas del diseño son los que aparecen comentados en las siguientes páginas web: <<http://greenbim.blogspot.com/2007/07/what-building-simulation-programmes-do.html>> y <http://www.aecbytes.com/feature/2009/AIA2009_EnergyApps.html>.

lano, así como a citar y resumir el uso que se ha hecho de ellos en Venezuela. El objetivo es reunir en un solo texto la información genérica básica que se pudiera derivar de la aplicación de los métodos, de forma que los arquitectos se puedan servir de ella en sus proyectos de diseño.

Antes de eso se expondrán, centrando igualmente la atención en el contexto venezolano, las consideraciones relativas a la escogencia del criterio de confort térmico que mejor se adecue al tipo de clima y edificio. Posteriormente se caracterizará el clima del país con miras al diseño arquitectónico. En tal sentido se discutirá, por un lado, la conveniencia de aplicar en Venezuela los índices de confort térmico más usados internacionalmente y se mencionarán, por otro, las clasificaciones climáticas para el diseño arquitectónico planteadas en el pasado, para luego proponer una clasificación propia, haciendo la salvedad que toda clasificación climática es sólo una indicación general de la orientación que debe dársele al diseño, en razón de que cada proyecto demanda constatar en sitio el efecto de eventuales modificadores locales del clima.

Toda esta información permitirá situar en contexto la contribución de la tesis, la cual, como se sugerirá al final del capítulo y detallará luego en el capítulo III, consiste en un método orientado a evaluar en cualquier etapa del proceso de diseño el efecto en el confort térmico de cualquier decisión, incluyendo decisiones hipotéticas conceptualmente esclarecedoras, como por ejemplo *extremar* tal o cual estrategia de diseño (o combinación de estrategias). La información que se obtiene al hacer esta evaluación tiene la particularidad que se le puede desacoplar del clima, pasando a describir el comportamiento del edificio (y de sus potenciales cambios) en términos genéricos, superponibles luego a cualquier otro clima. Entre otros potenciales interesantes, el método, así como la información que se puede derivar de él, pudieran acoplarse a las nuevas técnicas de representación virtual de edificios basadas en el modelado por objetos.

2.2 El criterio de confort térmico

2.2.1 Evaluación y normativas

Son dos las normas de alcance internacional que se usan para evaluar el criterio de confort térmico en edificios: a) la norma ANSI-ASHRAE 55: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* y b) la norma CEN-ISO 7730: *Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. En ambas, al confort térmico se le define como la condición mental que expresa *satisfacción* con el entorno térmico. Pese a lo simple de la definición, determinar las condiciones en que los individuos expresan satisfacción es un problema complejo que abarca consideraciones ligadas a los siguientes aspectos: a) *aspectos fisiológicos* relativos al calor metabólico y a los procesos con los que el organismo elimina ese calor o intenta conservarlo a fin de mantener la temperatura corporal constante (en aprox. 37 °C), b) *aspectos psicofísicos* referidos a la relación entre las sensaciones térmicas (originadas básicamente en la piel y vías

respiratorias) y los estímulos del entorno, incluyendo la apreciación que se tenga de dicha relación (lo que depende, en parte, de conceptos como *adaptación* o *expectativas*), c) *aspectos físicos* relativos a los procesos de transferencia de calor entre las personas y el ambiente y d) *aspectos sociales* referidos a la influencia de los hábitos y las costumbres. La relativa subjetividad de los aspectos psicofísicos y sociales hace que no se dé una relación unívoca entre la sensación térmica y las condiciones físicas del ambiente, por lo que la predicción del confort conlleva siempre una componente aleatoria sólo reductible estadísticamente (de ahí que el cumplimiento del criterio de confort térmico se exprese finalmente en términos de probabilidades). En tal sentido, dependiendo del tipo de evaluación y las circunstancias, las normas apuntan a que al menos 80% o 90% de las personas expresen satisfacción con el entorno térmico.

La parte central de las normas la conforman la definición, el cálculo y la interpretación de los *índices de confort térmico*¹³. Tradicionalmente la norma ASHRAE 55 se ha centrado en el índice de la *temperatura efectiva*, pero en su actualización más reciente del año 2004 ha incluido y dado primacía al índice PMV (y su complemento, el PPD), así como a una propuesta de *modelo adaptativo* orientada a edificios con ventilación natural. Por su parte, la norma ISO 7730 (cuya última actualización data del año 2005) se centra en el índice PMV y su complemento, el PPD¹⁴. El índice de la temperatura efectiva es de origen estadounidense, el PMV de origen europeo y los modelos adaptativos, a pesar de haberseles concebido en Europa, constituyen, por su esencia (como se explicará luego), una modelización del confort basada en estudios realizados en todo el mundo. Estos índices son de naturaleza distinta. La temperatura efectiva y el PMV parten de un enfoque cuantitativo y los modelos adaptativos de un enfoque cualitativo. Otra manera de diferenciar su naturaleza es catalogar a los dos primeros como *índices analíticos* y a los terceros como *índices empíricos*. Esto es debido a que tanto la temperatura efectiva como el PMV están basados en la ecuación detallada de balance térmico del cuerpo humano y fueron validados en encuestas hechas en laboratorio (usando cámaras climáticas), mientras que los modelos adaptativos provienen de mediciones y encuestas de campo. En la actualidad se usa a los índices analíticos en ambientes poco cambiantes y moderados (particularmente ambientes con sistemas de climatización activa) y a los modelos adaptativos en edificios de *funcionamiento libre* (edificios climatizados de forma pasiva cuyas condiciones ambientales cambian en respuesta a los cambios del clima). En lo que sigue se sintetizan estos tres índices y luego se argumenta su aplicabilidad al clima venezolano.

¹³ Son numerosos los índices de confort térmico propuestos hasta la fecha. Sólo se presentarán aquí los más conocidos y usados internacionalmente, por tratarse de los índices principales de las normas. Para un panorama completo de los índices existentes consúltese la obra *Thermal Comfort* de Auliciems y Szokolay (2007).

¹⁴ Bien que la parte central de las normas sean los índices de confort, en ambas hay consideraciones adicionales, como definiciones y vocabulario, métodos para estimar el malestar localizado en partes específicas del cuerpo humano (malestar en condiciones no uniformes) o indicaciones para realizar encuestas de confort térmico (aunque también hay una norma específica para esto último: ISO 10551:1995: *Ergonomics of the thermal environment -- Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales*).

- a) La *temperatura efectiva*¹⁵, TE^* , (Norma ASHRAE 55, 2004; ASHRAE, 2009) es una *temperatura combinada* que describe, dadas unas condiciones de actividad y vestimenta, el efecto conjunto en la sensación térmica de la temperatura del aire, la temperatura radiante media y la humedad (en otras palabras, el efecto conjunto de los flujos de calor sensible y latente que se llevan a cabo entre la persona y su entorno¹⁶). Se define como la temperatura de un *ambiente uniforme*¹⁷ con humedad relativa 50% en el que una persona perdería a través de la piel la misma cantidad de calor que en el ambiente considerado. De esta forma, ambientes con combinaciones distintas de temperatura del aire, temperatura radiante media y humedad producirán la misma sensación térmica, siempre y cuando tengan la misma temperatura efectiva.

La temperatura del aire y la temperatura radiante media se combinan previamente por medio del concepto de *temperatura operativa*, definida como la temperatura de un ambiente uniforme *negro*¹⁸ en el que una persona intercambiaría la misma cantidad de calor sensible que en el ambiente considerado. Se calcula como el promedio ponderado por los coeficientes convectivo y radiativo de la temperatura del aire y la temperatura radiante media:

$$T_o = \frac{h_c T_a + h_r \bar{T}_r}{h_c + h_r} \quad (2.1)$$

donde T_o , T_a y \bar{T}_r son, respectivamente, la temperatura operativa, la del aire y la radiante media (°C), y h_c y h_r son los coeficientes convectivo y radiativo (W/m²°C).

En ambientes con poco movimiento de aire ($v < \sim 0,2$ m/s), h_c y h_r son muy similares, por lo que es común, en tales casos, calcular T_o simplemente como el promedio de T_a y \bar{T}_r (lo que se puede interpretar como que T_a y \bar{T}_r tienen el mismo peso ponderado en la sensación térmica). En ambientes con corrientes de aire *perceptibles* ($v > \sim 0,25$ m/s), y a fin de independizar el cálculo de los coeficientes convectivo y radiativo (los cuales son difíciles de determinar), la norma sugiere, en uno de sus apéndices, la siguiente fórmula aproximada, la cual reparte el peso ponderado de cada temperatura en función de la velocidad del aire (pues a mayor velocidad del aire, mayor es el peso ponderado de T_a respecto de \bar{T}_r en la sensación térmica):

$$T_o = aT_a + (1-a)\bar{T}_r \quad \text{con : } a = 0,5 + 0,25v \quad \text{para : } v \leq 1\text{m/s} \quad (2.2)$$

¹⁵ El índice original de la temperatura efectiva, TE , fue concebido hace casi cien años por los investigadores Houghten y Yaglou (1923). Su forma actual se debe a importantes cambios de enfoque planteados a finales de los 60 y comienzos de los 70 por los investigadores Gagge, Stolwijk y Nishi (1971). Para diferenciar la versión actual de la original, se le denota agregando un asterisco: TE^* (El nombre en inglés es: *effective temperature*, ET^*).

¹⁶ El calor sensible es el directamente intercambiado entre la persona y el ambiente por convección y radiación y el calor latente, el disipado por la evaporación de la transpiración (que es agua en 95%).

¹⁷ Un *ambiente uniforme* es un ambiente isotermo en el que la temperatura del aire es igual a la radiante media y el aire está *en calma* (velocidad del aire $< 0,2$ m/s).

¹⁸ *Negro* significa aquí que las superficies del ambiente son de emisividad y absorptividad iguales a 1 (*cuerpo negro*).

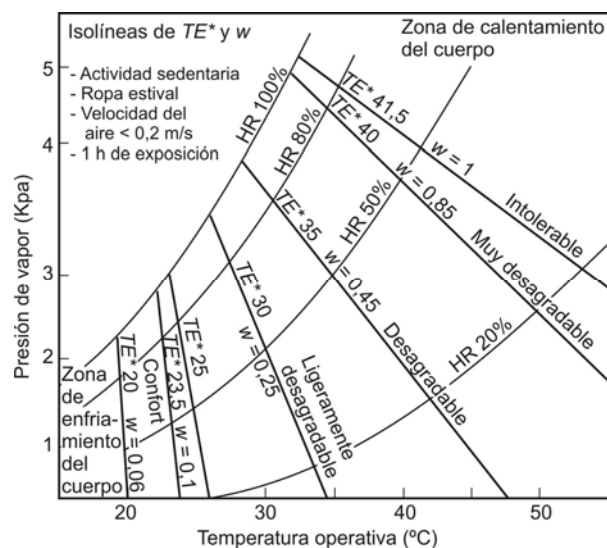


Figura 2.1. TE^* para actividad sedentaria y ropa estival (ASHRAE 55, 2009)

La esencia de la temperatura efectiva es que, a nivel corporal, la sensación térmica se explica por la temperatura de la piel¹⁹, la humectación de la piel y la permeabilidad de la ropa. Estos tres indicadores varían en función de la temperatura operativa, la humedad, la actividad y la vestimenta. Dadas una actividad y una vestimenta, la intensidad con que la termorregulación opera para sostener el equilibrio térmico (pérdidas de calor hacia el ambiente = tasa de calor metabólico) depende únicamente de la temperatura operativa y la humedad, lo que da lugar a circunstancias específicas de temperatura de la piel, humectación de la piel y permeabilidad de la ropa, y, por ende, a sensaciones térmicas específicas. La temperatura efectiva se deriva así de la ecuación detallada de las pérdidas de calor del cuerpo humano hacia el ambiente y traduce en términos térmicos el efecto combinado de la temperatura operativa y la humedad²⁰. En esta ecuación la humectación de la piel, w , se define como la fracción de la pérdida de calor por evaporación respecto de la máxima pérdida posible en las mismas circunstancias de encontrarse la piel impregnada ($w = 0,06$ cuando sólo haya perspiración insensible [*i.e.*, ausencia de sudor] y $w = 1$ cuando la piel esté impregnada). Luego, para condiciones prefijadas de actividad y vestimenta (estando la vestimenta caracterizada además por su *resistencia térmica intrínseca*), se trazan, usando el diagrama psicrométrico, *líneas de igual sensación térmica*, cada cual correspondiendo a valores específicos de w y TE^* . La Figura 2.1 (arriba) muestra la representación gráfica que corresponde a una actividad sedentaria y ropa estival. Adviértase que en tales circunstancias, a temperaturas moderadas y bajas ($T_o < \sim 26$ °C), la humedad pierde influencia en la sensación térmica: las líneas de TE^* se hacen casi verticales, pasando a ser la temperatura operativa la variable dominante (de hecho, la magnitud de la pendiente negativa depende básicamente de la humectación de la piel, w).

¹⁹ En condiciones sedentarias confortables, el promedio de la temperatura de la piel es de aprox. 33,5°C

²⁰ El lector interesado en la formulación matemática de TE^* puede consultar: ASHRAE, 2009, Cap.9.

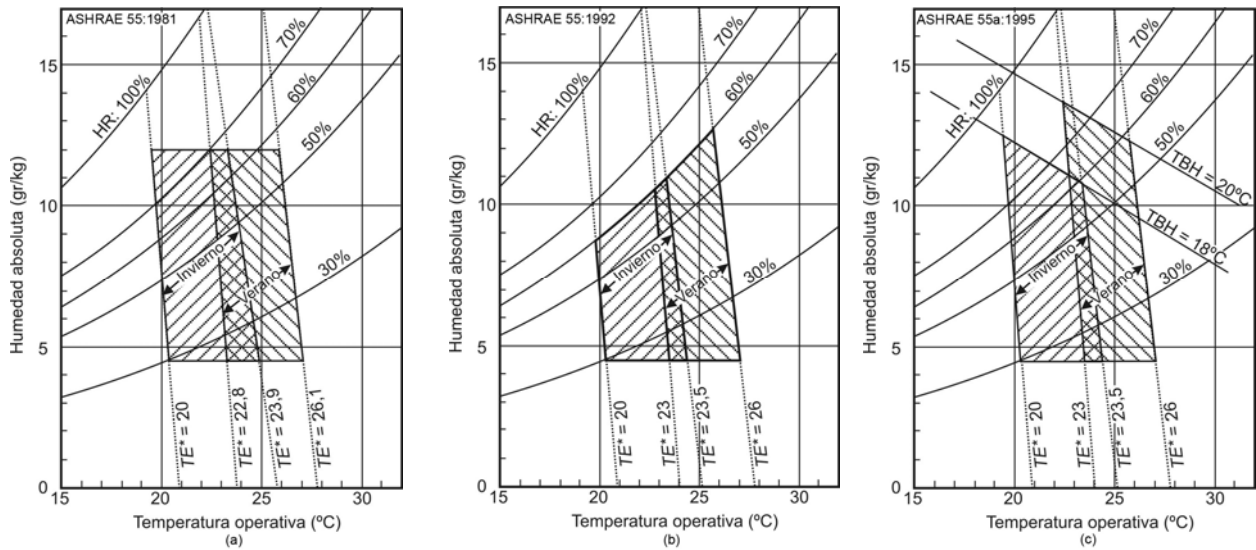


Figura 2.2. Rangos aceptables de la temperatura operativa y la humedad para ambientes con aire en calma, en personas portando, sea ropa de invierno, sea ropa de verano, y realizando una actividad sedentaria. (a) ASHRAE 55:1981; (b) ASHRAE 55:1992; (c) ASHRAE 55a: 1995

La norma ASHRAE 55 propone luego zonas de confort delimitadas por valores de TE^* y humedades máximas y mínimas admisibles. Estas zonas han variado con cada actualización de la norma. La Figura 2.2 muestra las zonas de confort de las actualizaciones de 1981 y 1992 y del *addendum* de 1995²¹. Indican las combinaciones confortables de la temperatura operativa y la humedad en los que las personas realizan una actividad sedentaria (1–1,2 Met)²² y llevan, sea ropa de invierno (0,8–1,2 clo), sea ropa de verano (0,5–0,7 clo)²³. La zona de invierno supone que la velocidad del aire no excede 0,15 m/s, y la de verano, 0,25 m/s. Estas zonas se derivan de sondeos hechos en laboratorio, usando cámaras climáticas, y corresponden a una probabilidad de 80% de aceptación (90% de no presentarse asimetrías térmicas que puedan producir malestar localizado). Los sondeos se hicieron con base en la siguiente escala valorativa, llamada *escala ASHRAE de sensación térmica*: –3 = frío, –2 = fresco, –1 = ligeramente fresco, 0 = neutro, +1 = ligeramente cálido, +2 = cálido, +3 = caliente.

Adviértase en la Figura 2.2 que la principal diferencia entre las zonas de confort a lo largo del tiempo son los límites superiores admisibles de la humedad. Estos límites siguen siendo objeto de debate. Originariamente, el límite de $Ha = 12$ gr/kg se planteó básicamente por razones de salud respiratoria (calidad del aire), en el sentido de controlar la condensación del vapor de agua y la aparición de moho, hongos y microorganismos en los conductos de los sistemas de

²¹ Se muestran aquí las zonas de confort de estas versiones anteriores de la norma porque han sido muy usadas en la práctica y por haber sido objeto de importantes investigaciones orientadas a evaluar su validez.

²² El Met es la unidad con que se mide la tasa de calor metabólico (1 Met = 58 W/m²).

²³ El clo es la unidad con que se mide la resistencia térmica de la ropa (1 clo = 0,155 °Cm²/W). A modo de ejemplo, 1 clo ≈ traje formal; 0,5 clo ≈ atuendo ligero conformado por una camisa de manga corta y un pantalón.

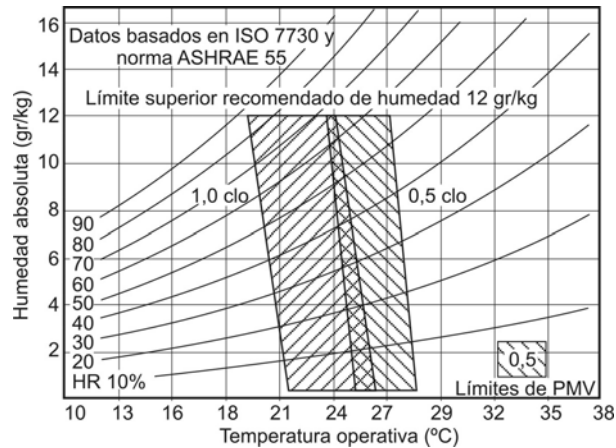


Figura 2.3. Rangos aceptables de la temperatura operativa y la humedad para ambientes con velocidad del aire menor a 0,2 m/s, en personas portando ropa, sea de 1 clo, sea de 0,5 clo, y realizando una actividad sedentaria (1–1,3 Met) (ASHRAE 55:2004)

climatización centralizados (Arens y Watanabe, 1986; TenWolde y Rose, 1994); desde el punto de vista térmico, dicho límite obedeció a que dentro del rango de temperaturas confortables, la presión de vapor en la superficie de la piel apenas cambia, lo que hace que sea la presión de vapor del aire (cuya relación con H_a es lineal) la que determine la evaporación (Auliciems y Szokolay, 2007, 58). El límite ulterior más taxativo de $HR = 60\%$ partió de estudios realizados en los años 80 que sugirieron que esa es la humedad máxima admisible por razones de salud respiratoria (Sterling *et al.*, 1985). Posteriormente, el *addendum* de 1995 eliminó los criterios no térmicos y definió los límites superiores en términos de temperatura de bulbo húmedo, TBH, como una aproximación de las líneas de TE^* que corresponden a $w = 0,2$ (Xu *et al.*, 1995) (ASHRAE optó entonces por referir a los interesados en los criterios de calidad del aire a las normas correspondientes: ASHRAE 62.1 y ASHRAE 62.2). Por su parte, el límite inferior de $H_a \approx 4$ gr/kg se mantuvo invariable y su fin es evitar los problemas que se presentan en ambientes muy secos por causa de la resequedad de la piel, las fosas nasales, los ojos y la garganta. Este límite inferior fue finalmente suprimido en el 2004, en la última actualización de la norma, por no relacionarse directamente con la sensación térmica (Figura 2.3). Pese a ello, la norma advierte sobre la inconveniencia de una humedad muy baja. Resulta interesante que en esta última actualización se regresara al límite superior admisible más simple de $H_a = 12$ gr/kg, el cual sólo aplica, en principio, cuando se cuente con sistemas de control de la humedad. Al margen de la forma que se use, numerosas investigaciones corroboran que la influencia de la humedad en la sensación térmica es relativamente pequeña dentro de los rangos de la temperatura operativa de las zonas de confort²⁴.

²⁴ En términos generales, e independientemente de la norma, múltiples estudios indican que para temperaturas operativas dentro de los rangos de confort, las personas no perciben diferencias significativas en la sensación térmica al aumentarse la humedad hasta valores de HR de entre 75 y 80% o incluso más (para un resumen de varios de estos estudios consúltese: Fountan *et al.*, 1999).

La última actualización de la norma (Figura 2.3) abandonó la denominación algo vaga de *invierno-verano* y estableció la resistencia térmica de la ropa en 1 clo y 0,5 clo respectivamente. También unificó la velocidad del aire en $v < 0,2$ m/s para ambas zonas. Mantuvo una gráfica introducida en la actualización de 1992 (Figura 2.4), según la cual, de aumentar la velocidad del aire, las temperaturas operativas de la zona de verano podrán aumentar la cantidad que allí se indica (o viceversa, de aumentar la temperatura operativa, tal aumento podrá compensarse con la velocidad del aire indicada). Adviértase que el efecto de la ventilación depende de la diferencia entre \bar{T}_r y T_a : cuanto menor sea T_a respecto de \bar{T}_r , mayor será el efecto refrescante de la ventilación. Adviértase igualmente que ASHRAE define, para una actividad sedentaria convencional (actividades típicas de oficina, salones de clase, etc.), límites admisibles de la velocidad del aire de poco más de 0,8 m/s, y del aumento de la temperatura operativa, de 3 °C. Esto se debe, por un lado, a las molestias asociadas a las ráfagas y al levantamiento de objetos livianos (algunos autores consideran conservador este límite y sugieren límites comprendidos entre 1 y 2 m/s, si bien por encima de 1,5 m/s el levantamiento de objetos livianos es patente [Auliciems y Szokolay, 2007, 14]); por otro lado, a que por encima de 3 °C de incremento, T_o se aproxima a la temperatura de la piel, lo que reduce el intercambio convectivo y por ende el refrescamiento. Es importante señalar que las curvas de la Figura 2.4 provienen de estimaciones teóricas que fueron luego avaladas experimentalmente para una actividad sedentaria convencional, siempre que las personas puedan controlar la velocidad del aire (Toftum *et al.*, 2000). Bien que menos exacta, y pese a que la norma no lo indique, otra forma común de asociar la velocidad del aire a las zonas de confort de ASHRAE es usando la Ecuación (2.2) (de hecho, así lo planteaba la norma en su versión de 1981 para la zona de confort de invierno).

El giro más importante de la última actualización de la norma ASHRAE 55 es que los límites de la temperatura operativa de las zonas de confort (Figura 2.3) se basan enteramente en el índice PMV de la norma ISO 7730. Este índice consiste en resolver una complicada ecuación

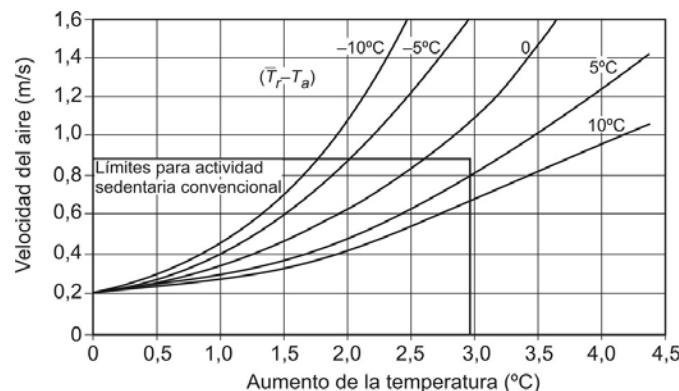


Figura 2.4. Velocidad del aire requerida para compensar posibles aumentos de la temperatura operativa por encima de la máxima temperatura admisible en verano (ASHRAE 55)

cuyas variables son los principales factores del confort térmico, a saber, la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la humedad, la velocidad del aire, la actividad y la vestimenta. El resultado se presenta en los términos de la escala ASHRAE de sensación térmica. Los límites de la temperatura operativa de la Figura 2.3 se definen así como las condiciones en las que el PMV vale $-0,5$ y $0,5$, lo que corresponde, en cada caso, a un porcentaje de aceptación del 90%. A fin de considerar el que disparidades térmicas en el ambiente²⁵ puedan producir malestar térmico localizado (algo que no toma en cuenta el PMV), la norma reduce el porcentaje de aceptación un 10% adicional, quedando éste finalmente en 80%.

Por tratarse de una fórmula matemática, el PMV es muy práctico si se le programa en una computadora (resolverla manualmente sí resulta impráctico, pues es complicada y requiere iterar). Luego de presentar las zonas de confort, la norma ofrece como alternativa el índice PMV, así como su complemento, el índice PPD, e incluye, con el permiso de ISO, un código de programación para calcularlos. ASHRAE pone restricciones en el uso del código en tanto que método con aval normativo, entre las cuales está el que la velocidad del aire no supere $0,2$ m/s (sin embargo, la formulación del PMV permite de hecho usar velocidades hasta de 1 m/s). Al incluir como alternativa el PMV, la norma relativiza la utilidad práctica de su tradicional representación gráfica, la cual requiere, para ser dibujada, prefijar la actividad y la vestimenta.

- b) El PMV o índice de Fanger (en honor a su autor, el investigador danés P. O. Fanger)²⁶ (Norma ISO 7730; ASHRAE, 2009, 9.16-9.18; Fanger, 1970, 1973, 1982, 1986) es un índice que predice el voto promedio de las personas en los términos de la escala ASHRAE de sensación térmica²⁷ bajo condiciones ambientales, de actividad y vestimenta dadas (PMV son las siglas de *Predicted Mean Vote*). Se obtiene de resolver una ecuación cuyos datos son la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la humedad, la velocidad del aire, la actividad y la vestimenta. Para la gran mayoría de condiciones ambientales factibles, el resultado se ubica entre -3 (frío) y $+3$ (caliente). Se le complementa normalmente con el índice PPD, el cual indica, en función del PMV, el porcentaje de personas insatisfechas con el entorno térmico (PPD son las siglas de *Predicted Percentage of Dissatisfied*).

El PMV parte de que una condición necesaria pero no suficiente del confort térmico es que el cuerpo humano esté en equilibrio térmico. El procedimiento que llevó a Fanger a formular el PMV se puede resumir como sigue: a) Primero definió las condiciones asociadas al equilibrio térmico como aquellas en las que los procesos de termorregulación del cuerpo humano logran

²⁵ Las disparidades térmicas que pudieran producir malestar térmico local son básicamente las asimetrías radiativas, las corrientes de aire, las variaciones verticales de la temperatura del aire y la temperatura del piso. Tanto la norma ASRAE 55 como la norma ISO 7730 presentan métodos para evaluar separadamente el efecto de tales disparidades.

²⁶ Los estudios de Fanger y el PMV constituyen desde 1984 la parte central de la norma ISO 7730.

²⁷ La escala ASHRAE original (1966) variaba de 1 a 7, con 1 = frío y 7 = caliente. Fanger cambió la numeración entre -3 y $+3$ a fin de hacerla simétrica al valor 0 = sensación neutra (antes esa sensación correspondía a 4).

por sí solas alcanzarlo. b) Luego determinó las condiciones de equilibrio asociadas al confort térmico. Según Fanger, éstas se reducen, dada una actividad (esto es, una tasa de calor metabólico), a márgenes estrechos de la temperatura de la piel y la tasa de transpiración. Usando resultados experimentales de otros investigadores, propuso correlaciones entre estas tres variables para los casos en que las personas manifestaron confort. c) Estas correlaciones las introdujo en la ecuación de balance térmico del cuerpo humano, obteniendo así una expresión que relaciona los principales factores del confort térmico en condiciones de confort (concretamente, la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la humedad, la velocidad del aire, la actividad y la vestimenta). Los resultados de aplicar esta ecuación (llamada ecuación de confort de Fanger) los presentó en diagramas similares al que se muestran en la Figura 2.5. d) A fin de generalizar la utilidad de su ecuación a condiciones no confortables, y buscando predecir así la sensación térmica, Fanger, con base en gran cantidad de sondeos, propios y ajenos (todos conducidos en cámaras climáticas en Dinamarca y los Estados Unidos), definió finalmente el PMV como una correlación entre la escala ASHRAE de sensación térmica, la tasa de calor metabólico y la *tensión o carga térmica* producida por el ambiente:

$$PMV = 3,155(0,303e^{-0,114M} + 0,028)L \quad (2.3)$$

donde M es la tasa de calor metabólico y L es la *tensión o carga térmica* del ambiente, definida por Fanger como la diferencia entre la tasa de calor metabólico y la pérdida de calor hacia el ambiente considerado de una persona hipotéticamente mantenida en condiciones confortables en términos de temperatura de la piel y tasa de transpiración para la actividad considerada. El cálculo de esta carga térmica *extra* es complicado y no se presentará en este texto (exige, entre otras cosas, calcular por iteración la temperatura de la ropa)²⁸.

Al constatar que incluso en las mejores condiciones ($PMV = 0$) había personas insatisfechas, Fanger complementó el PMV con el índice PPD (porcentaje de personas insatisfechas), para cuyo cálculo propuso la siguiente correlación (cuya gráfica se muestra en la Figura 2.6):

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)} \quad (2.4)$$

Adviértase en la Figura 2.5 que la ecuación de confort, el PMV y el PPD le permitieron a Fanger no sólo estimar para $HR \approx 50\%$ las temperaturas operativas óptimas según la actividad y la vestimenta, sino los rangos, alrededor de esas temperaturas, en que el voto en la escala ASHRAE se encuentra entre dos valores (en el caso de la figura, entre -0,5 y 0,5, lo que corresponde a $PPD = 10\%$). Fue con base en esa información generada por Fanger que la norma

²⁸ El lector interesado en la ecuación de Fanger podrá consultar la literatura ya referida (incluyendo la norma ISO 7730), así como Parsons, 2003; Santamouris y Asimakopoulos, 1996; Awbi, 2003; entre otros textos. Hay disponibles en internet programas para calcular el PMV. Dos de ellos son: *PsychTool* y *PMV calculador*. Un cálculo en línea puede encontrarse en: < <http://www.healthyheating.com/solutions.htm>>. Por otro lado, tanto la norma ASHRAE 55 como la norma ISO 7730 ofrecen códigos de programación para calcular el PMV.

ASHRAE 55 definió los puntos en el diagrama psicrométrico sobre la curva de HR = 50% desde los cuales parten las líneas de igual temperatura efectiva que marcan los límites de las zonas de confort (Figura 2.2). La norma ASHRAE 55 se ha venido pues basando tanto en el índice de la temperatura efectiva como en los índices PMV/PPD (Emmanuel, 2005, 72; Gómez *et al.*, 2007). Fue sólo en la actualización del año 2004 que la norma ASHRAE 55 incluyó el cálculo del PMV/PPD de la norma ISO 7730 como alternativa a su tradicional representación gráfica y que además definió dicha representación con base únicamente en el PMV, prescindiendo así de la temperatura efectiva (Figura 2.3) (lo que de hecho afectó poco las pendientes, pues Fanger parte de los mismos principios y estudios, en cuanto a que el confort depende esencialmente de la temperatura y la humectación de la piel). Es por ello que los autores se refieren a la modelización del confort térmico de las normas ASHRAE 55 e ISO 7730 en términos muy similares, pues ambas se derivan del mismo programa de investigación.

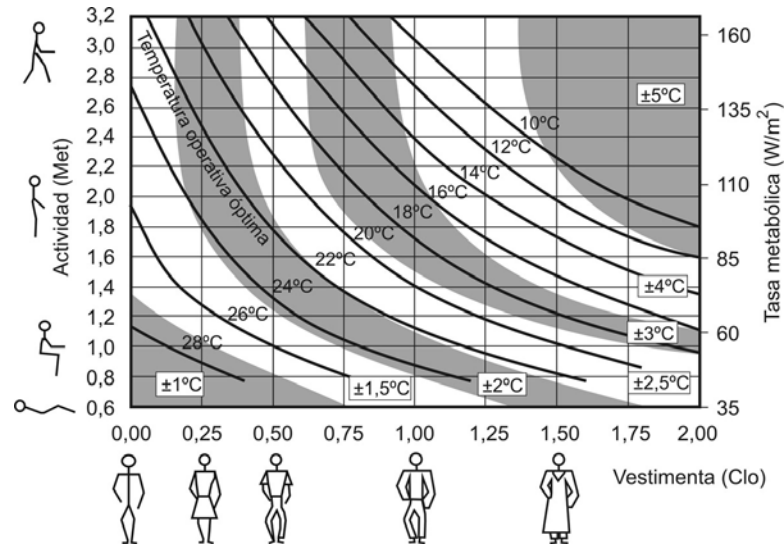


Figura 2.5. Temperatura operativa óptima ($PMV = 0$) en función de la actividad y la vestimenta. $HR \approx 50\%$ y $v < 0,1 \text{ m/s}$. Las zonas blancas y sombreadas indican los rangos de confort $\pm \Delta T_o$ alrededor de la temperatura operativa óptima que corresponden a: $-0,5 < PMV < 0,5$ (Fanger, 1980. Imagen tomada de: Ghiaus y Allard, 2005, 28).

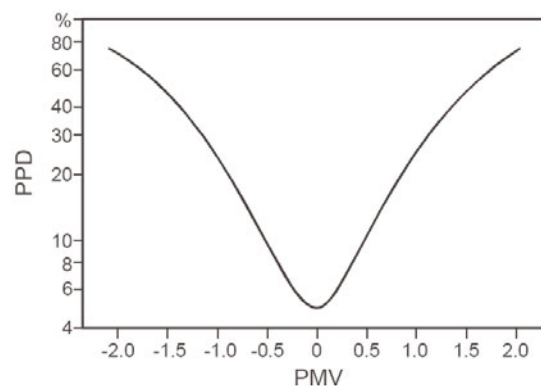


Figura 2.6. Porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en función del PMV (Norma ISO 7730).

Una limitación inherente al PMV es que el cálculo de la carga o tensión térmica L de la Ecuación (2.3) supone la condición de confort en la que la humedad de la piel se evapora completamente (Olesen y Dukes-Dobos, 1988). Esto hace que el PMV no sea apto en ambientes cálidos a calientes y muy húmedos en los que la transpiración supere ciertos límites y la permeabilidad de la ropa condicione la evaporación. De una manera general, la sujeción del PMV al concepto de carga o tensión térmica y a sondeos realizados en condiciones controladas de laboratorio llevó a Fanger a advertir que el PMV debe usarse con precaución cuando las condiciones se alejen del confort neutro, particularmente por el lado del calor (van Hoof, 2008). De ahí que el campo de aplicación de la norma ISO 7730 se restrinja a ambientes *moderados*, lo que significa, según la norma, un PMV entre -2 (fresco) y $+2$ (cálido). En términos de los datos de entrada, la norma plantea los siguientes límites: tasa de calor metabólico: 0,8 a 4 Met; resistencia térmica de la ropa: 0 a 2 clo; temperatura del aire: 10 a 30 °C; temperatura radiante media: 10 a 40 °C; velocidad del aire: 0 a 1 m/s; presión de vapor: 0 a 2700 Pa.

- c) Hasta hace alrededor de una década, los modelos analíticos de las normas ASHRAE 55 e ISO 7730 eran, internacionalmente, la principal referencia para caracterizar y evaluar el confort térmico en edificios. Sin embargo, desde su surgimiento, diversos investigadores pusieron en duda su adecuación a la realidad, al cotejarlos con sondeos realizados en edificios reales, en países distintos. Fue así que al margen de la normativización basada en el enfoque analítico, se desarrolló un programa de investigación orientado a estudiar de forma empírica el confort térmico. Por partir de la premisa de que el ser humano no es pasivo ante las condiciones térmicas e intenta, de ser necesario, alterarlas o adaptarse a ellas, a los modelos que se derivan de este programa se les conoce como *modelos adaptativos*. Resumidamente, el concepto de adaptación comprende los siguientes aspectos (de Dear *et al.*, 1997, 6-12): a) la *adaptación comportamental*, referida a las acciones orientadas a cambiar las condiciones personales para mejorar la sensación térmica (p.ej., cambiarse la ropa, abrir o cerrar las ventanas, cambiar de postura o actividad, encender un ventilador, etc.), b) la *adaptación fisiológica*, referida a cambios en los ajustes internos de la termorregulación debidos a la exposición prolongada a climas fríos o calientes y c) la *adaptación psicológica*, referida a la influencia en la percepción térmica de factores relacionados con las experiencias personales y las expectativas.

Estudiar científica y diferenciadamente el efecto de todos los factores de la adaptación es complejo y de aplicabilidad problemática, lo que de hecho constituyó la principal crítica que le hicieran al enfoque adaptativo los defensores del enfoque analítico. En respuesta, y con miras a instrumentalizar el conjunto de investigaciones y estudios empíricos existentes, Michael Humphreys condujo un metanálisis que lo llevó a proponer correlaciones sencillas entre la

*temperatura de neutralidad*²⁹ y la temperatura media mensual exterior, tanto para edificios ventilados naturalmente (en cuyo caso la correlación es un modelo de regresión lineal), como para edificios con aire acondicionado (Humphreys, 1978). La premisa fue que la adaptación responde a las condiciones del clima. Desde entonces, diversos modelos similares han sido propuestos por los principales investigadores del enfoque adaptativo, consistentes básicamente en mejorar las correlaciones de Humphreys con base en más y mejores datos (Auliciems, 1981; Griffiths, 1990; Nicol, 1993; de Dear *et al.*, 1997; Humphreys y Nicol, 2000, 2010).

El más conocido de estos modelos es el formulado por Richard de Dear y su equipo en un importante proyecto de investigación llamado Proyecto de modelo adaptativo ASHRAE RP-884 (*ASHRAE RP-884 Adaptive Model Project*) (de Dear *et al.*, 1997; de Dear y Brager, 2000, 2002)³⁰. Dicho proyecto fue comisionado por ASHRAE para evaluar los modelos adaptativos y derivar una propuesta que pueda incluirse en la norma ASHRAE 55. Sucintamente, el procedimiento consistió en realizar un metanálisis con cerca de 21.000 datos *crudos* de encuestas de confort efectuadas en 160 edificios, en cuatro continentes, teniendo como principal factor de contexto la diferenciación entre edificios con climatización activa y edificios con ventilación natural (a esta base de datos se le llama Base de datos RP-884 o Base de datos de confort ASHRAE). Entre las muchas conclusiones del estudio, las más influyentes fueron: a) al margen de la ubicación geográfica, el modelo analítico PMV/PPD predice correctamente las condiciones de neutralidad térmica en edificios con climatización activa, al predominar en ellos la adaptación comportamental orientada a armonizar controladamente tanto la potencia del sistema de climatización como la vestimenta (aunque, interesantemente, en tales casos, se constató que en climas cálidos la *temperatura preferida* es menor que la temperatura de neutralidad, y en climas fríos, mayor); b) en edificios con ventilación natural, el modelo analítico PMV/PPD produce errores significativos, al no considerar una importante componente adaptativa de tipo fisiológico/psicológico, causada por el habituación al clima y por los antecedentes y expectativas personales en cuanto a las condiciones térmicas exteriores e interiores. Se confirmó que para este tipo de edificios el modelo de regresión lineal es apropiado para relacionar la temperatura de neutralidad térmica con la temperatura media exterior. Se observó también que los rangos de tolerancia alrededor de la temperatura de neutralidad (rangos de confort) son mayores que en edificios con climatización activa: de $\pm 3,5$ °C para una aceptación del 80% de las personas y de $\pm 2,5$ °C para el 90%. De Dear y Brager (2002) propusieron luego para este tipo de edificios el modelo de regresión lineal que se muestra en la Figura 2.7, el cual fue finalmente incorporado a la norma ASHRAE 55 en su actualización del año 2004.

²⁹ La temperatura de neutralidad es una temperatura operativa asumida comúnmente como la temperatura de confort. Concuera con el voto 0 en la escala ASHRAE.

³⁰ Toda la información relacionada con este proyecto, incluyendo el informe final, se puede conseguir en: http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae_rp884_home.html.

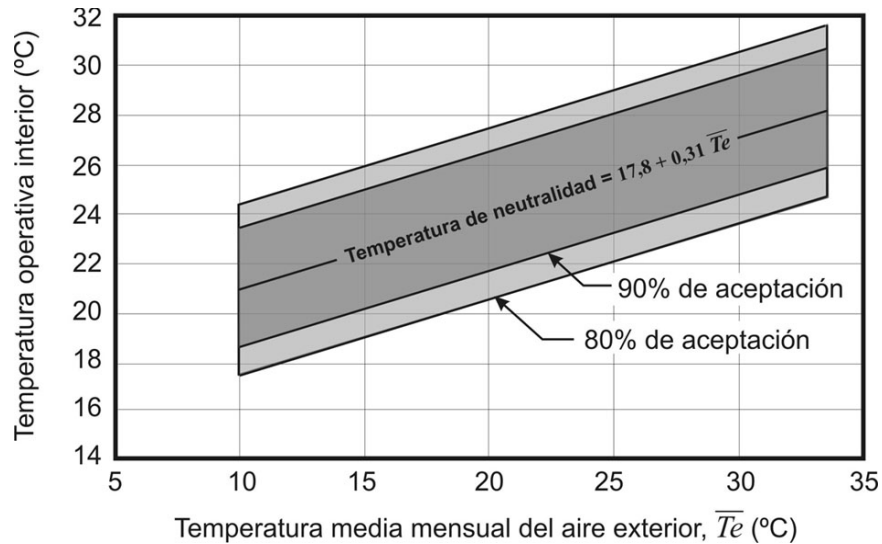


Figura 2.7. Rangos aceptables de la temperatura operativa para edificios con ventilación natural (Norma ASHRAE 55:2004, según propuesta de Dear y Brager, 2002)

La regresión lineal de la Figura 2.7 se limita a edificios con ventilación natural en los que los usuarios puedan controlar la ventilación ajustando las ventanas, puedan adecuar la vestimenta y realicen una actividad ligera (1 a 1,3 met) (el edificio puede hacer uso de ventiladores siempre que el principal medio para ventilar sean las ventanas). Dicha regresión es válida en el rango de temperaturas medias mensuales exteriores comprendido entre 10 °C y 33,5 °C, rango para el cual la temperatura de neutralidad térmica (la variable dependiente) varía entre 20,9 °C y 28,2 °C (lo que revela la magnitud del efecto de la adaptación por aclimatación y expectativas) (aunque la norma no lo señale, la temperatura de neutralidad puede, fuera de ese rango, considerarse constante e igual a su valor en el límite más cercano [Brager y de Dear, 2000]). Para cada situación específica, la temperatura operativa podrá luego variar alrededor de la temperatura de neutralidad térmica la cantidad de $\pm 2,5$ °C (5 °C en total) si el criterio es satisfacer al 90% de las personas y $\pm 3,5$ °C (7 °C en total) si el criterio es satisfacer al 80%³¹.

En razón de las premisas empíricas del modelo, la norma no prescribe límites para la humedad ni la velocidad del aire. Pese a ello, es común, en la práctica profesional y académica, graficar, usando el diagrama psicrométrico, *zonas de confort adaptativo* similares a las basadas en los índices analíticos (Figura 2.2), sólo que: a) en lugar de partir de la temperatura operativa de neutralidad obtenida con la ecuación de confort de Fanger para HR = 50%, se parte de la obtenida con el modelo adaptativo, y b) los rangos de confort ahora más amplios se reportan de acuerdo al criterio de aceptación adoptado. El resto del trazado de la zona de confort es idéntico al de las representaciones gráficas tradicionales de ASHRAE, incluyendo los

³¹ Estos límites obedecen a suponer que la distribución normal de sensaciones térmicas registradas en los estudios empíricos se asemeja a la de la función PPD del Fanger. El 90% de aceptabilidad corresponde así al rango de $-0,5$ y $+0,5$ en la escala ASHRAE y el 80% de aceptabilidad al rango de $-0,85$ y $+0,85$ en esa misma escala.

límites laterales de la temperatura, conforme a la pendiente de las líneas de igual sensación térmica (o igual TE^* o PMV), así como los límites aceptables de la humedad, según el argumento científico que se adopte.

La norma ASHRAE 55 no es la única norma de cierto alcance que presenta un modelo adaptativo. Aunque restringida en principio al ámbito europeo, la norma EN 15251³² incluye desde finales del año 2007 un modelo basado en estudios empíricos minuciosos realizados en 26 edificios de oficina en Europa Occidental a lo largo de un año, en el marco del proyecto SCATs (*Smart Controls and Thermal Comfort*) (McCartney y Nicol, 2002). Al igual que en el modelo de la norma ASHRAE 55 (así como en todos los modelos adaptativos formulados para edificios en funcionamiento libre), la propuesta parte de la comprobación de la relación lineal entre la temperatura exterior y la temperatura operativa de neutralidad. Sin embargo, presenta innovaciones interesantes relativas a la derivación de la temperatura de neutralidad y a la caracterización de la temperatura exterior, la cual no se hace por medio de la temperatura media mensual, sino de una media diaria ponderada exponencialmente con las medias diarias anteriores. La hipótesis que justifica este cambio es que la adaptación, además de responder a las condiciones climáticas del momento, responde a las experiencias termo-sensoriales pasadas, siendo las más cercanas las más influyentes (Nicol y Humphreys, 2010; Santamouris, 2007, 14-16). Esta diferencia en la caracterización de la temperatura exterior hace que las correlaciones de las normas ASHRAE 55 y EN 15251, aunque similares, no puedan compararse directamente. La norma define luego cuatro niveles de calidad o porcentajes de aceptación según las fluctuaciones admisibles de la temperatura operativa alrededor de la temperatura de neutralidad: ± 2 °C para el 85% de aceptación, ± 3 °C para el 75%, ± 4 °C para el 65% y $\pm > 4$ °C sólo por tiempo limitado y en circunstancias especiales. La velocidad del aire está incorporada al modelo en términos de un aumento de la temperatura de neutralidad según la curva usada tradicionalmente por ASHRAE para $\bar{T}_r - T_a = 0$ (Figura 2.4). Cabe destacar finalmente que las correlaciones derivadas de los estudios empíricos asociados al modelo muestran que la influencia de la humedad en el voto de confort es mínima en el contexto europeo (no más de 5% si se le considera en términos de humedad relativa y de aprox. 1% si se le considera en términos de humedad absoluta) (Nicol y Humphreys, 2010). Otra diferencia entre los modelos de las normas EN 15251 y ASHRAE 55 es que el de la norma europea se aplica a edificios en funcionamiento libre, sin importar que no operen con ventilación natural, mientras que el de la norma ASHRAE sólo se aplica a edificios con ventilación natural³³.

³² Norma europea: EN 15251:2007 - *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.

³³ A pesar de los aspectos interesantes de la norma europea, la misma no será tratada en más detalle por no pretender aplicabilidad más allá de Europa. Para una explicación de su derivación y diferencias respecto de la norma ASHRAE 55, consúltese: Nicol y Humphreys, 2010.

2.2.2 Escogencia del criterio de confort para Venezuela

El examen de la aplicabilidad de las normas a circunstancias concretas ha sido una constante en la investigación sobre el confort térmico. En los tiempos en que las normas presentaban sólo índices analíticos (*i.e.* hasta el 2004) fueron muchos los estudios que revelaron incongruencias entre éstas y la realidad, especialmente en climas alejados de las condiciones moderadas, y más especialmente en climas cálidos³⁴. Tales incongruencias se explicaron sobre todo por la no representatividad de las cámaras climáticas de laboratorio ajustadas a las hipótesis analíticas. Esto llevó en primera instancia a muchos investigadores a proponer ajustes de carácter empírico o teórico a dichos índices, algunos de los cuales incorporaron los conceptos de adaptación psicológica y fisiológica³⁵. Ninguno de estos ajustes ha trascendido el ámbito académico (van Hoof, 2008). Quizá el más conocido (y práctico) es el propuesto por Fanger y Toftum (2002) para edificios en funcionamiento libre en climas cálidos, consistente en dos factores de corrección del PMV dependientes de las expectativas y la actividad (la cual es instintivamente atenuada en condiciones cálidas). Esta corrección del PMV no se incluyó en la norma ISO 7730:2005 (recuérdese que la norma se autolimita a ambientes moderados), pero sí dio lugar a un apartado en el que se señala que la adaptación por efecto de las expectativas y la disminución inconsciente de la actividad es importante en climas cálidos y que el PMV se ve afectado en tales condiciones.

En este contexto de ajustes enmarcados en el programa de investigación analítico pero influidos por la idea de la adaptación, se realizaron en Venezuela en los años 90 dos tesis de grado de la Escuela de Ingeniería Mecánica cuyo objetivo fue adecuar las zonas de confort de la norma ASRAE 55:1992 al contexto venezolano (Aparcedo y Martínez, 1993; Pinzón y Rojas, 1994). En ambas se realizaron encuestas de confort puntuales entre estudiantes en la Ciudad Universitaria de Caracas. Ambas concluyeron que la zona de confort de verano de la norma ASHRAE se desplaza en Caracas entre 1 °C y 2 °C hacia mayores temperaturas, y que los límites de la humedad pueden ampliarse más allá de lo indicado en la norma (recuérdese que en la norma vigente en aquel tiempo el límite superior de la humedad era $HA = 12 \text{ gr/kg}$, lo que obedecía a razones de calidad del aire, no térmicas). Tales conclusiones son hoy de hecho perfectamente congruentes con el modelo adaptativo de la norma actual, según el cual, para las temperaturas medias mensuales de los meses en que se realizaron las encuestas, la temperatura de neutralidad es efectivamente entre 1 °C y 2 °C superior a la temperatura de neutralidad basada en el índice analítico, a la vez que los rangos de confort, tal como mostraron las encuestas, son algo más amplios.

Pese a todas estas propuestas orientadas a mejorar o adecuar los índices analíticos, cuando se trate de edificios en funcionamiento libre, la tendencia creciente es apelar directamente a los mo-

³⁴ Para un resumen de cómo los estudios empíricos produjeron una crisis en el enfoque analítico, así como para conocer los más importantes de estos estudios, consúltese: Humphreys et al. (2007); van Hoof *et al.* (2010).

³⁵ Para un resumen de los ajustes que se han propuesto para el PMV, consúltese: van Hoof (2008).

delos adaptativos (comenzando lógicamente por los normativizados). Dos razones básicas empujan a ello. Primero, la obligación de reducir el consumo energético lleva a maximizar el tiempo en que los edificios no necesiten de sistemas de climatización activa. La importante influencia de la adaptación y los mayores rangos de confort de los modelos adaptativos se avienen bien con este fin³⁶. Segundo, estos modelos son simples de aplicar, pues se basan en la temperatura operativa, la cual es fácil de medir y es uno de los resultados básicos de todo programa de simulación. Siempre que se esté dentro de los supuestos del modelo, no se requiere en principio cuantificar el resto de los factores de confort, a saber, la velocidad del aire, la humedad, la vestimenta y la actividad. Incluso, se ha demostrado por medio del análisis de las bases de datos empíricas (concretamente la RP-884 y la SCATs) que los votos reales de confort emitidos por las personas se correlacionan mejor con la temperatura operativa que con los índices analíticos; en otras palabras, las estadísticas muestran que es en principio menos confiable evaluar el confort térmico usando la temperatura efectiva o el PMV que usando la temperatura operativa (Humphreys *et al.*, 2007).

El modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55 se deriva de la base de datos RP-884 que es la base de datos de estudios empíricos de confort más grande y de mayor alcance geográfico. Los 160 edificios (16 residenciales, 136 de oficina y 8 industriales) en los que se registraron los cerca de 21 mil votos de confort (así como las condiciones ambientales interiores y exteriores) se sitúan en cuatro continentes (Norteamérica, Europa, Asia y Oceanía) y se reparten de forma aproximadamente equitativa entre los principales climas de la Tierra: 52 en países o regiones tropicales, concretamente, Indonesia, Tailandia, Singapur y el norte de Australia, 9 en Pakistán, en ciudades de climas disímiles, y el resto en regiones subtropicales o templadas de Australia, Gran Bretaña, Grecia, Canadá y los Estados Unidos. 45 de los 160 edificios funcionan con ventilación natural, 111 con sistemas de climatización artificial y los 4 restantes en modo mixto (de Dear *et al.*, 1997). Desde una perspectiva estadística, esta base de datos puede considerarse por su tamaño una muestra sobrada en cuanto a establecer correlaciones de pretensión universal entre la temperatura media mensual y la temperatura de neutralidad térmica. La regresión lineal a que da lugar para edificios con ventilación natural (Figura 2.7) no es de hecho muy distinta de las del resto de propuestas conocidas y basadas en menor cantidad de datos (bien que se trate a veces y en parte de los mismos datos) (Gómez *et al.*, 2007; van Hoof *et al.*, 2010). Sin embargo, salvo que se estén considerando circunstancias no cubiertas por la norma, lo procedente en la práctica es apelar a la misma por su mayor fundamentación y por servir de referencia consensuada.

Ahora bien, en razón de la homogeneización estadística que resulta de limitar las variables de contexto, los modelos adaptativos de pretensión universal tampoco garantizan su adecuación a

³⁶ Aunque aún no normativizado, de plantearse con rigor el criterio de ahorro energético en edificios con climatización activa, es recomendable recurrir a algún modelo adaptativo para este tipo de edificios, con todo y que la adaptación fisiológica y psicológica influyan poco. En tales casos, la temperatura de neutralidad térmica varía aprox. entre 22 y 25°C para el rango de temperaturas medias exteriores comprendido entre 0 y 30°C (Humphreys *et al.*, 2007).

circunstancias específicas. En el caso del metanálisis realizado por de Dear *et al.* (1997) utilizando la base de datos RP-884, éste sólo diferenció entre edificios con climatización activa y edificios con ventilación natural, dejando a un lado las múltiples diferenciaciones que podrían plantearse a otros niveles. Desde esa perspectiva, el problema de una base de datos global inconclusa se plantea no sólo en términos de ambicionar un modelo global mejorado (algo por lo demás resuelto una vez que se estime que la muestra es representativa), sino como fundamentación de propuestas que apunten a representar situaciones concretas, sea a través de modelos específicos, sea a través de ajustes del modelo global (en términos de variaciones de los rangos de confort o asimetrías de los mismos respecto de la temperatura de neutralidad). Es así por ejemplo que la preferencia en Europa se decanta naturalmente por el modelo de la norma EN 15251, ya que ésta se fundamenta en la base de datos CATs, que es una base de datos de edificios en Europa. A su vez, tanto esta base de datos como la base de datos internacional RP-884 incluyen principalmente edificios de oficina, lo que levanta la duda de su adecuación a edificios con otros usos (la norma ASHRAE 55 no hace distinción a ese respecto). Y así se pudieran plantear una cantidad de variables de contexto que implicarían una suerte de deconstrucción de los modelos universales orientada a brindar alternativas más exactas para las aplicaciones concretas que lo demanden.

Lo anterior ha dado lugar a estudios empíricos que parten de hipótesis variadas en cuanto a los tipismos que pudieran desviar la predicción del confort térmico respecto de los rangos homogeneizados de los modelos globales. Debido a que los modelos globales actuales se derivaron de bases de datos en las que predominan de forma amplia los edificios de oficina, el interés inicial ha sido investigar edificios con otros usos, en especial edificios residenciales y educativos (Bravo y González, 2001, 2003, 2006; Wong *et al.*, 2002; Wong y Khoo, 2003; Bouden y Ghrab, 2005; Ye *et al.*, 2006; Rangsiraksa, 2006; Hwang *et al.*, 2006; Corgnati *et al.*, 2007; Becker y Paciuk, 2009; Burattia y Ricciardib, 2009; Han *et al.*, 2009; Peeters *et al.*, 2009; Rijal *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010; Djongyanga y Tchindab, 2010; Yao *et al.*, 2010; Indraganti, 2010a, 2010b; Indraganti y Daryani, 2010; Rajasekar y Ramachandraiah, 2010). A más de agregar al tipo de climatización la variable de contexto *uso del edificio*, estos estudios delimitan con claridad la ubicación geográfica, circunscribiendo así (hasta prueba en contrario) el ámbito de aplicación de sus resultados (lo que no significa, como ya se razonó, excluirlos de un proceso posterior de desarrollo o ajuste de los modelos de pretensión universal). Un metanálisis que reúna éstos y otros trabajos con el fin de formular conclusiones y propuestas más amplias no ha sido aún realizado. Como observación general, se puede de momento afirmar que en edificios residenciales los rangos de aceptabilidad son más amplios que en edificios de oficina (algo que sin embargo ya había sido observado y considerado por de Dear *et al.* [1997]). Algunos estudios van más allá al considerar aspectos como el tipo de entorno (rural o urbano) (Han *et al.*, 2009), el tipo de espacio (según su uso) (Peeters *et al.*, 2009; Rijal *et al.*, 2009) o ciertas características

arquitectónicas particulares (juzgadas buenas o malas) y ligadas a opciones de adaptación comportamental, las cuales a su vez pudieran relacionarse con aspectos culturales o socioeconómicos (Bravo y González, 2001, 2003, 2006; Indraganti, 2010a, 2010b; Indraganti y Daryani, 2010).

En relación con el último punto, ya Givoni (1992) había propuesto ampliar los rangos de confort de los países en desarrollo, particularmente de las regiones cálidas a calientes y húmedas, argumentando para ello las restricciones económicas que impiden que la mayoría de la población acceda a las tecnologías de climatización (lo que supone unas expectativas supeditadas a la condición social). Bravo y González (2001, 2003) confirman la validez empírica de esta tesis al constatar que los habitantes de casas humildes de poca calidad térmica en Maracaibo reconocen estar acostumbrados a soportar calor en ellas y a no esperar mejores condiciones de temperatura, lo que en el marco del estudio se tradujo en temperaturas de neutralidad mayores que las de los encuestadores, más habituados al aire acondicionado. Al interior de dichas viviendas se llegaron a medir temperaturas de globo 1,5 a 2,5 °C mayores que las temperaturas de bulbo seco (lo que evidencia su mala calidad térmica si se considera el tipo de clima), llevando a presuponer una mejor correlación entre la temperatura de neutralidad y la de globo que entre la de neutralidad y la media exterior. El análisis sin embargo no mostró con claridad esa diferencia, quizá por insuficiencias de la muestra (140 registros). Tampoco llevó al establecimiento de rangos de aceptabilidad. Lo que sí mostró fue concordancia con los modelos de regresión lineal basados en estudios que forman parte de la base de datos RP-884 (específicamente los concernientes al norte de Australia y Pakistán). En un análisis posterior, Bravo y González (2006) reorganizaron los datos con el objeto de diferenciar las viviendas en tres niveles de calidad, encontrando que en aquellas de menor calidad (denominadas *formativas*) 7 de cada 10 habitantes optan por pasar las horas más calurosas al exterior, a la sombra, a diferencia de las de mayor calidad (denominadas *en consolidación*), en las que sólo un cuarto de los habitantes opta por lo mismo. Ello pudiera explicar la similitud entre las temperaturas de confort registradas en todas las viviendas y su concordancia con las regresiones lineales que usan como variable independiente la temperatura exterior.

La conexión entre la temperatura de neutralidad y el rango de confort, por un lado, y las situación socioeconómica, por otro, ha sido ratificada recientemente en estudios en la ciudad de clima cálido a caliente húmedo de Hyderabad, en La India, donde se observó que la carencia de oportunidades de adaptación tecnológica de los pobladores más humildes eleva la temperatura de neutralidad a 30,2 °C (2 °C más que el máximo concebible en la norma ASHRAE 55) y el límite superior del rango de confort a 33,1 °C (Indraganti y Daryani, 2010; Indraganti, 2010a, 2010b). Inversamente, la disponibilidad de aire acondicionado por las personas con mayor poder adquisitivo lleva los rangos de confort a los niveles de los índices analíticos e incluso a que estas personas ajusten la potencia de enfriamiento a la preferencia térmica, asociada a temperaturas menores que la de neutralidad. En otro estudio hindú realizado en la ciudad de clima similar de Chennai (Ma-

drás), en complejos de vivienda ventilados naturalmente, los habitantes que trabajan en ambientes con aire acondicionado reportaron temperaturas de neutralidad 1,8 °C menores que quienes no trabajan en ambientes acondicionados artificialmente (Rajasekar y Ramachandraiah, 2010).

Estos resultados ilustran dos de los problemas que surgen del carácter cualitativo de los modelos adaptativos: en primer lugar, determinar una temperatura de neutralidad equivale a *apuntarle a un blanco móvil* (Nicol y Humphreys, 2010), ya que ésta depende de situaciones siempre cambiantes (adaptación comportamental en lo inmediato; consolidación, ascenso social, etc. en el mediano/largo plazo); a ello se suman factores muy particulares como las divergencias en la cotidianidad de los individuos y sus antecedentes o los rasgos arquitectónicos relativos a la calidad ambiental y a las posibilidades de adaptación tecnológica. Frente a la complejidad de la realidad, limitar las variables de contexto y homogeneizar el análisis estadístico se vuelve finalmente necesario si se pretende difundir los resultados de los estudios empíricos en función de un alcance. Segundo, la relación entre la condición social y las expectativas emplazan a un debate acerca de los límites normativamente aceptables de los rangos de confort desde la perspectiva de los criterios de calidad de vida y ahorro energético. La respuesta a esta cuestión pasa por la generalización de una arquitectura térmicamente confortable, sustentable, socialmente plural y de amplia adaptabilidad tecnológica que lleve a independizar la aceptabilidad de la necesidad. La difusión de una arquitectura así reduciría además la influencia de las variables de contexto distintas al clima, mejorando la predictibilidad de los modelos globales.

Desde esta perspectiva, y estimando que: a) ninguno de los estudios aquí referidos muestra desviaciones de consecuencias importantes respecto del modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55, b) los dos estudios empíricos de confort térmico realizados de forma metódica en Venezuela concuerdan con dicho modelo, c) no se cuenta aún internacionalmente con modelos mejor fundamentados que los de las normas fuera de propuestas localistas cuya adecuación a situaciones análogas requiere aún analizarse y d) la referencia que significan las normas contribuye a la coherencia de la investigación en el campo; estimando estos cuatro puntos, vale concluir que lo procedente desde una perspectiva general es utilizar en Venezuela el modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55 para edificios con ventilación natural y los modelos analíticos de las normas ASHRAE 55 o ISO 7730 para edificios con aire acondicionado. En el ámbito académico, la no utilización de las normas internacionales para estudios específicos podrá siempre justificarse entre especialistas. Esto mientras no se realicen estudios empíricos nacionales que lleven a modelos cuyo empleo fuera de los modelos globales esté justificado o no surjan ajustes o diversificaciones comprobadas en los modelos globales que garanticen una mejor adecuación al contexto venezolano.

2.3 Caracterización del clima

La caracterización del clima depende del método de apoyo al diseño arquitectónico que se esté considerando. Abarca desde descripciones cualitativas asociadas a prácticas arquitectónicas generales hasta series meteorológicas detalladas de uno o más elementos del clima para uso en la simulación dinámica (los elementos del clima son básicamente la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar, el viento, las precipitaciones, la nubosidad y la presión atmosférica). En el marco de la clasificación presentada en el apartado 2.1 (Resumen de los tipos de métodos), sólo aquella parte de los *métodos intermedios* que no conlleve cálculos pudiera prescindir de datos cuantitativos del clima (lo que no implica que su formulación lo haga). Se trata en general de las recomendaciones o pautas de diseño asociadas a algún tipo de clima concebido de forma genérica. El resto de métodos demanda de al menos un valor numérico de referencia.

Comúnmente la caracterización del clima se deriva de los datos de las estaciones meteorológicas³⁷, con arreglo al método de ayuda al diseño que se aplique. Si se parte de que los datos son confiables y completos (lo que no siempre es así³⁸), su *representatividad* debe todavía justificarse desde las perspectivas temporal y espacial. Esto es: a) deben derivarse de períodos de medición lo suficientemente prolongados para así describir sin atipicidades el clima de la zona y b) deben haberse registrado no muy lejos del sitio de interés y bajo condiciones locales similares.

La caracterización más útil hoy en día es la *serie anual típica* de datos horarios de los principales elementos del clima, vinculada, en primera instancia, con la simulación dinámica. Con la penetración de la informática, esta caracterización tiende a generalizarse. La misma puede, en segunda instancia, empleársele, directa o indirectamente, en otros tipos de métodos. Es así que algunos métodos de vieja data aún vigentes (particularmente los *métodos iniciales*) fueron concebidos para usarse con series no muy grandes de promedios, por el problema de manejar grandes bases de datos en una época en que las computadoras no eran comunes. Estos métodos están hoy en día computarizados (p.ej. los grados-día, los grados-hora o las diagramas bioclimáticos) y pueden usarse de manera más provechosa con la serie anual típica. Lógicamente, al estar vigentes, lo están también en su forma tradicional, sin demandar contar, de partida, con una serie anual de datos horarios, en la medida en que se disponga de los promedios necesarios para hacer uso de ellos, lo que se puede hoy, en muchos casos, conseguir en internet³⁹.

³⁷ Las estaciones meteorológicas son de diverso tipo, siendo las de tipo climatológico y/o sinóptico las que miden el conjunto de los elementos del clima, tal como interesa en la arquitectura. El presente texto sólo se refiere a este tipo.

³⁸ La falta de datos meteorológicos puede ser insalvable, pero también, de aceptarse limitaciones, corregirse con métodos de estimación y ajuste (Guevara Díaz, 2003; Infante et al., 2008; Linacre, 1992) o de generación computarizada, sobre la base de datos parciales y variables geográficas (Malkawi y Augenbroe, 2004; David et al., 2010).

³⁹ Una fuente de datos climáticos de todo el mundo es la página web: www.tutiempo.net (incluye 49 localidades de Venezuela). Otra página con promedios mensuales históricos de muchas localidades es: www.worldclimate.com. Aunque todavía en construcción (desde hace años), la página del Servicio de Meteorología de la Aviación también ofrece datos de Venezuela, así como de otros países de la región: www.meteorologia.mil.ve.

Las *series anuales típicas* basan su representatividad temporal en tratamientos estadísticos realizados con bancos de datos horarios que abarcan lapsos bastante mayores de un año. De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial, si se obvia la influencia antropogénica⁴⁰, el período de retorno mínimo para el análisis climático es de 30 años (OMM, 1990). Por la imposibilidad en muchos países de contar con 30 años de datos consolidados, la práctica en la creación de series anuales típicas para el diseño de edificios es menos rigurosa y estima contar con al menos 10 años para definir una serie de representatividad aceptable (Malkawi y Augenbroe, 2004, 62). Asociados inicialmente a bases de datos de países concretos, varios modelos de aplicabilidad general han sido propuestos para este tipo de series (Kalamees y Kurnitski, 2006; Underwood y Yik, 2004, 227-230). Los más usados son el *test reference year* de ASHRAE (ASHRAE TRY), el *typical meteorological year* (TMY), el *weather year for energy calculations* (WYEC) y el *test reference year* de la norma ISO 15927-4 (ISO TRY). El primero consiste en escoger del banco de datos de varios años el año más *representativo*, y los tres últimos, en construir un año típico juntando y modificando los doce meses de calendario más *representativos* (según procedimientos que dependen del modelo). En todos los casos los criterios importantes son: a) que la serie represente el comportamiento del clima a largo plazo, b) que las sucesiones de días y meses sean correctas, y c) que los distintos elementos del clima se correlacionen adecuadamente. Los trabajos que se realizan en el mundo para definir series meteorológicas típicas se basan por lo general en estos cuatro modelos (p.ej: Pissimanis *et al.*, 1988; Fagbenle, 1995; Kalogirou, 2003; Skeiker, 2004; Kalamees y Kurnitski, 2006; Rahman y Dewsbury, 2007; Janjai y Deeyaia, 2009; Lee *et al.*, 2010). Paralelamente se han propuesto paquetes informáticos que generan automáticamente estas series (Petrakis *et al.*, 1996; Skeiker y Ghania, 2009; Ebrahimpour y Maerefat, 2010).

La utilidad de los datos de las estaciones meteorológicas debe también justificarse espacialmente. Esto significa saber si las condiciones en el sitio del edificio están representadas por dichos datos, según la precisión planteada, los métodos de ayuda al diseño que se usen y los criterios del proyecto. De no estarlo (o de no saberse), y de requerirse precisión, el problema pudiera demandar mediciones en sitio y correlacionar éstas con las mediciones de la(s) estación(es) meteorológica(s) más cercana(s) a fin de apreciar las desviaciones y decidir si son admisibles o corregibles. Existen también modelos matemáticos de extrapolación, desde muy simples hasta muy complejos, concretamente, desde el trazado de curvas de nivel basadas en los datos de las estaciones meteorológicas de la región, hasta la modelización meteorológica numérica basada en la termodinámica atmosférica (Linacre, 1992, Daley, 1994; Kalnay, 2003). A pesar de los avances en este campo, a nivel de mesoescala y microescala, y en la medida en que la topografía sea compleja y las estaciones meteorológicas lejanas, la determinación de las condiciones precisas en sitios en los que

⁴⁰ El efecto del cambio climático en las series meteorológicas típicas, así como las proyecciones de la demanda energética de los edificios para las próximas décadas considerando dicho efecto es un tema de interés creciente. Al respecto consúltese: Jentsch *et al.*, 2008; Guan, 2009; de Wilde y Tian, 2010.

no se cuente con observaciones experimentales sigue siendo casi imposible. De igual complejidad es la variación de los elementos del clima en las ciudades, caracterizadas por el fenómeno de isla de calor, lo que representa de por sí un campo de investigación cuyo objetivo es precisar, por un lado, las particularidades del contexto climático en tales condiciones, y, por otro, plantear alternativas arquitectónicas y urbanísticas que mitiguen el mencionado fenómeno (Bozonnet *et al.*, 2005; Akbari H. y Konopacki, 2005; Mirzaei y Haghghat, 2010).

La influencia de factores como la distancia y la topografía en la representatividad de los datos de las estaciones meteorológicas depende a su vez del elemento del clima que se esté considerando. En condiciones de terreno plano, el elemento que peor correlación presenta al aumentarse la distancia entre dos mediciones es la velocidad horaria del viento (*i.e.*, medida a la misma hora), en tanto que la temperatura del aire y la humedad son los elementos que presentan una mejor correlación. Desde una perspectiva estrictamente meteorológica, teniendo como referencia la conformación de *redes de estaciones meteorológicas*, Linacre (1992, 24) recomienda (aunque subrayando la imposibilidad de plantear reglas estrictas y universales) distancias del orden de las presentadas en la Tabla 2.1. Siempre que las observaciones o el conocimiento del sitio no muestren singularidades significativas, esta tabla puede usarse en el diseño arquitectónico, al menos como una indicación de la confiabilidad de los datos desde la perspectiva espacial, sin importar el método de apoyo al diseño que se utilice y aspirando a una buena precisión.

Tabla 2.1. Distancia recomendada para medir distintos elementos del clima (Linacre, 1992, 24)

	Terreno uniforme		Terreno no uniforme ^a	
	Rural	Ciudad	Costa	Montaña
Radiación solar global	560 km	—	10 km	160 km
Temperatura	160	2—3	15	—
Viento	160	—	15	160
Pluviosidad	30 ^b	15	5 ^c	5

^aEn dirección perpendicular a las isopletras, sean curvas de nivel, sea la costa.

^b60 km en zonas áridas y polares

^cPara islas montañosas

El distanciamiento promedio entre las estaciones de las redes meteorológicas de casi todos los países desarrollados es de 10 a 20 km (Linacre, 1992, 25), por lo que, exceptuando el caso de las ciudades, cumplen, al menos en número, con el requerimiento de la Tabla 2.1. Venezuela, en cambio, sólo cuenta con 52 estaciones (Rodríguez de Paiva *et al.*, 2006) (la mayoría perteneciente al Servicio de Meteorología de la Aviación⁴¹), lo que significa un distanciamiento promedio de 130 km aprox. (si se considera que la mayor parte se encuentra en la mitad norte del país, el distanciamiento promedio, en esa mitad, se reduce hasta unos 70 km). Esta situación, aunada a que gran parte de la población vive en zonas montañosas, restringe la utilidad de los datos disponibles.

⁴¹ Si se incluyen las de tipo pluviométrico y oceanográfico, el país cuenta realmente con 758 estaciones. Sin embargo, este tipo de estaciones interesa poco desde la perspectiva del confort térmico y el ahorro energético.

Ahora bien, la utilidad de los datos está a su vez ligada a la precisión planteada, según los criterios globales del proyecto y los métodos de ayuda al diseño que se consideren (sea en el ámbito del diseño o la investigación). Actualmente, el esmero por la exactitud está particularmente asociado a la simulación dinámica orientada a estimar el gasto energético de los edificios, tanto por razones económicas, como ambientalistas. Desde ese punto de vista, garantizar la precisión de la caracterización del clima constituye internacionalmente una línea de investigación muy importante. En contraste, desde una perspectiva arquitectónica general, y en especial en proyectos pequeños o medianos en los que la meta sea alcanzar el confort por medio de climatización pasiva, los criterios de representatividad de los datos se pueden flexibilizar, en la medida en que el resultado de aplicar los métodos de ayuda al diseño cubra el error (*i.e.*, que lleven a soluciones arquitectónicas cuya eficacia abarque determinados rangos de los elementos del clima o incluyan la adaptabilidad tecnológica). Por su parte, la investigación orientada a evaluar o proponer métodos, por su naturaleza genérica, puede abstraer la ubicación precisa de los edificios y tomar como referencia los valores de las estaciones meteorológicas. Si además se tiene en cuenta que la temperatura operativa admite variaciones de varios grados centígrados alrededor de la neutralidad térmica, los errores en la caracterización del clima tendrían que ser grandes para desfasar las condiciones predichas al interior del edificio de forma inadmisibles, lo que de nuevo depende del método usado y la precisión planteada. Nada de lo antedicho contradice la importancia que para la práctica profesional y la academia tiene el contar con una base de datos meteorológicos lo más amplia geográficamente y confiable, por lo que, de no ser el caso, su desarrollo debe plantearse como una línea de investigación. Una base de datos así serviría por igual para todos los tipos de métodos, desde los más generales, hasta los más minuciosos.

En Venezuela, hasta la fecha, son muy pocos los arquitectos que han usado en sus proyectos datos cuantitativos del clima, más allá de indicaciones puntuales o parciales. Comúnmente, la caracterización se hace cualitativamente, con base en el conocimiento del país u observaciones hechas en el terreno. En general, las soluciones arquitectónicas luego planteadas son de tipo heurístico.

El creciente interés por los problemas ambientales y la mayor divulgación del software de sostenibilidad para uso de arquitectos, llaman hoy a la creación de series anuales típicas, algo que aún no se ha hecho en el país. En la investigación universitaria, la caracterización del clima de Venezuela para uso en el diseño arquitectónico se ha basado en valores promedio y, más recientemente, en series horarias anuales de años específicos.

En el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC) de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU) de la Universidad Central de Venezuela (UCV) (que es el único centro de investigación que se ha planteado la caracterización del clima de todo el país para uso exclusivo en el diseño arquitectónico), se ha venido trabajando con las series horarias de varias ciudades venezolanas correspondientes al año 2000, suministradas por el servicio meteorológico de la

Fuerza Aérea Venezolana. El que dichas series abarquen únicamente un año, suscita la incertidumbre respecto de su falta de representatividad en el tiempo, en la medida en que el año 2000 pueda haber sido atípico. Pese a que la construcción de las series anuales típicas se mantiene postergada, una rápida comparación entre las temperaturas medias mensuales del año 2000 y las medias mensuales considerando gran cantidad de años (tomadas de la página web *worldclimate.com*) (Figura 2.8) indica que, al menos en una primera instancia, el orden de magnitud y la tendencia en las variaciones intermensuales autoriza calificar a las series del año 2000 como *aceptablemente representativas*, siempre que no se cuantifiquen con ellas tendencias a largo plazo (p.ej. gasto energético acumulado de varios años en un edificio) y adicionalmente se obvие el que las mediciones hayan sido tomadas en aeropuertos con condiciones cuya representatividad pueda eventualmente ponerse en duda respecto de otras zonas de la ciudad. Adviértase en la gráfica que las diferencias son de algunas décimas de grado, siendo rara la vez en que llegan a ser del orden de 1 °C. La prueba estadística *t* para muestras pareadas confirmó la similitud estadística entre las parejas de series. El coeficiente de correlación de Pearson superó en todos los casos 0,95, excepto en Mérida, donde vale 0,8. A falta de mejores datos, dichas series podrían considerarse aptas para calcular la temperatura operativa al interior de los edificios, especialmente cuando el objetivo sea comparar alternativas arquitectónicas o comparar una misma alternativa en diferentes ciudades.

En tanto no se construyan las series anuales típicas, cualquier labor necesitada de series horarias deberá emprenderse advirtiendo esta limitación. Tal es la situación del presente trabajo, por lo que todos los cálculos presentados en él estarán basados únicamente en las series del año 2000 suministradas por la Fuerza Aérea.

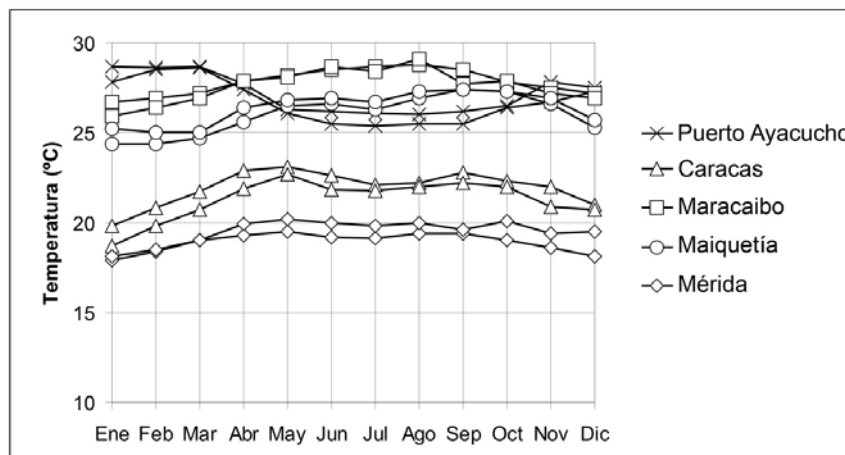


Figura 2.8. Comparación entre las temperaturas medias mensuales del año 2000 (calculadas con las series horarias suministradas por la Fuerza Aérea Venezolana) y las medias consolidadas calculadas con datos de muchos años (tomadas de *worldclimate.com*)

Nota: no hay una tendencia uniforme que permita afirmar que el año 2000 haya sido más fresco que el promedio: en Caracas y Mérida sí, donde las medias consolidadas son mayores que las medias del año 2000, pero en las otras tres ciudades las medias consolidadas son ligeramente menores.

2.3.1 Zonas climáticas de Venezuela para el diseño arquitectónico

La división de un país o región en zonas climáticas asociadas a recomendaciones arquitectónicas específicas es una noción que ha sido desarrollada en muchos países. Las maneras en que esto se ha hecho se pueden agrupar en: a) clasificaciones basadas en las variaciones geográficas de uno o más elementos del clima y orientadas a reunir las localidades con rangos y combinaciones similares (Hobaica, 1984; Khedari *et al.*, 2002; Sosa y Siem, 2004; Lam *et al.*, 2005). Aquí la perspectiva es básicamente climática y puede inspirarse en las clasificaciones climáticas clásicas (como la de Köppen) introduciendo aspectos como el relieve y la vegetación. La relación con el confort térmico y con el diseño, aunque implícita en los objetivos, se establece posteriormente; b) clasificaciones basadas en la sensación térmica característica de cada clima, evaluada por medio de algún indicador de confort (p.ej. la temperatura del aire, la temperatura operativa o la temperatura efectiva) (Curiel, 1982; Marsh, 2003). El análisis puede ser sólo numérico o relacionarse con aspectos como el relieve y la vegetación. Aunque implícita, la relación entre las zonas así definidas y el diseño se argumenta posteriormente; c) clasificaciones basadas en un enfoque bioclimático que apele a métodos de ayuda al diseño iniciales (*i.e.*, grados-día o grados-hora, diagramas bioclimáticos o tablas de Mahoney) (Roriz *et al.*, 1999; Briggs *et al.*, 2002; Ajibola, 2001; Lam *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2007; Rakoto *et al.*, 2009). Esta forma de definir zonas climáticas quizá sea la más completa, al considerar la relación entre el clima, el confort y el diseño en términos del potencial de determinadas estrategias de diseño concebidas genéricamente (p.ej., enfriamiento, calentamiento, ventilación natural, masa térmica, etc.). Las clasificaciones climáticas normativizadas utilizan este mismo criterio (ASHRAE 91.1:2010; BCA, 2009; Directiva 2002/91/CE).

Los objetivos de una clasificación climática son básicamente dos: a) en el marco de un proyecto, una vez conocida la zona climática en que se ubica el terreno, prever el tipo de diseño que el clima demanda, el tipo de métodos de ayuda al diseño adecuados, las técnicas previsibles y, en la medida en que las zonas climáticas utilizadas sean las de las normas, cumplir con las indicaciones que las mismas asocian a cada una o aplicar los manuales concebidos según esas normas; b) en el ámbito académico (I+D+i, divulgación y enseñanza), al igual que en el ámbito normativo, las zonas climáticas permiten cubrir, en términos genéricos, todos los contextos.

En contrapartida, por su carácter general, las clasificaciones climáticas son de una utilidad limitada en diseños concretos. Revelan, ciertamente, las condiciones *probables*, pero, debido a la fuerte influencia que pueden tener los modificadores locales del clima (cercanía de masas de agua, entorno vegetal y construido, topografía del lugar, etc.), la inspección *in situ* y, eventualmente, la toma de mediciones, es siempre necesaria. Adicionalmente, las series meteorológicas de las estaciones más cercanas, en la medida en que estén disponibles y sean representativas, constituyen una información que permite, usando los debidos métodos, caracterizar el clima local de forma más concreta que apelando a la zonificación climática (*i.e.*, usando métodos como los grados-día

o los grados-hora, las diagramas bioclimáticos o las tablas de Mahoney, todos de aplicabilidad muy sencilla en computadoras). Pensar, por otro lado, en corregir las limitaciones de las clasificaciones climáticas discretizando a nivel de microescala, usando la mayor cantidad de información y trayendo el mayor número de criterios de clasificación, incluyendo los modificadores locales del clima, resultaría en una discrepancia entre el método y su objetivo, en cuanto a que tales clasificaciones no pueden pretender sustituir la evaluación del contexto climático en el marco de un proyecto específico. Una labor como esa tendría además como límite la indeterminación propia de los modelos climáticos. Ligado a lo anterior, y al margen de la discusión sobre los inconvenientes de las normas descriptivas, una de las paradojas de considerar la zonificación climática como algo exacto se presenta en las normas que exponen especificaciones constructivas detalladas y subordinadas a una clasificación climática concebida con criterios de un nivel de precisión muy distinto (p.ej.: ASHRAE 91.1:2010). Finalmente, Szokolay (1986) observa que clasificar los climas de un país o región desde la perspectiva del confort apunta a un blanco móvil, en razón de que las condiciones de confort dependen del clima (adaptación). De ahí que considerase vago el *etiquetado* de un clima en términos de sensación térmica y planteara en su lugar un método (llamado *control potential technique*) basado en determinar, desde su propio contexto, el potencial de un clima para lograr confort por medio de estrategias de diseño generales (Szokolay, 1986; Ajibola, 2001). En conclusión, la aplicabilidad de cualquier clasificación climática para el diseño arquitectónico estará sujeta a mantener presentes sus supuestos y limitaciones.

Las clasificaciones climáticas para el diseño propuestas en Venezuela han sido hasta la fecha tres: a) Con base en la temperatura efectiva exterior y las clasificaciones climáticas tradicionales, Curiel (1982) dividió al país en tres zonas (regiones tropicales secas, regiones tropicales húmedas y regiones templadas) y planteó pautas generales de diseño para cada una; b) Hobaica (1984), luego de analizar los datos de 17 estaciones y los mapas meteorológicos construidos por Álvarez (1983), clasificó al país en tres zonas dependientes de la altitud (*i.e.*, de la temperatura, al estar ambas relacionadas). Estas zonas son: Zona A (0 a 500 msnm), Zona B (500 a 1000 msnm) y Zona C (más de 1000 msnm). A éstas zonas las relacionó luego con una descripción de los otros elementos del clima, especialmente el viento; c) Sosa et al. (2004, 21-28), con base en las variaciones de los elementos del clima y la geografía del país, y considerando la relación entre éstos y el diseño, plantearon cuatro zonas climáticas, dos de las cuales tienen a su vez subzonas. Estas son: Zona 1: zona norte costera (1A: zonas fuertemente ventosas [sitios muy áridos] y 1B: zonas costeras restantes); Zona 2: zona de tierras bajas continentales (0 a 500 msnm) (2A: zonas bajas en general y 2B: zonas bajas con vientos débiles); Zona 3: zona de altitud templada (500 a 1000 msnm); Zona 4: zona de altitud fría (más de 1000 msnm). A diferencia de la de Curiel, las clasificaciones de Hobaica y Sosa *et al.* no han trascendido en forma de pautas de diseño o normas asociadas a ellas.

Más allá de las clasificaciones propias están las clasificaciones de las normas internacionales. Su utilidad es que, al unificar criterios, permiten, por un lado, la comparación y, por otro, la aplicación de los procedimientos, especificaciones y normas asociados. Quizá la más conocida sea la clasificación de la norma ASHRAE 90.1 (2010) (*Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*). En dicha norma se catalogan los climas de la tierra en función de los grados-día de enfriamiento para 10 °C (GDE10°C) y los grados-día de calentamiento para 18 °C (GDC18°C). Son ocho los tipos de clima posibles, yendo desde clima *muy caliente*, hasta clima *subártico*. El método agrega criterios para definir tres posibles subzonas de algunos de los ocho tipos principales de clima: la subzona A implicaría un clima húmedo, la subzona B un clima seco y la subzona C un clima marino. La Tabla 2.2 resume los criterios de clasificación.

Tabla 2.2. Definición internacional de zonas climáticas (Apéndice normativo B - ASHRAE 90.1 - *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*)

Nº	Nombre de la zona climática	Criterio térmico
1A y 1B	Muy caliente / Húmedo (1A) - Seco (1B)	5000 < GDE10°C
2A y 2B	Caliente / Húmedo (2A) - Seco (2B)	3500 < GDE10°C ≤ 5000
3Ay 3B	Cálido / Húmedo (3A) - Seco (3B)	2500 < GDE10°C ≤ 3500
3C	Cálido / Marino (3A)	GDE10°C ≤ 2500 y GDC18°C ≤ 2000
4Ay 4B	Mixto / Húmedo (4A) - Seco (4B)	GDE10°C ≤ 2500 y GDC18°C ≤ 3000
4C	Mixto / Marino (4A)	2000 < GDC18°C ≤ 3000
5A, 5B y 5C	Fresco / Húmedo (5A) - Seco (5B) - Marino (5C)	3000 < GDC18°C ≤ 4000
6A y 6B	Frío / Húmedo (6A) - Seco (6B)	4000 < GDC18°C ≤ 5000
7	Muy frío	5000 < GDC18°C ≤ 7000
8	Subártico	7000 < GDC18°C

Definición de Marino (C): localidades que cumplan con todos los siguientes criterios:

1. Temperatura media del mes más frío entre -3 °C y 18 °C
2. Temperatura media del mes más cálido < 22 °C
3. Al menos cuatro meses con temperaturas medias mayores de 10 °C.
4. La temporada fría es la más lluviosa (Oct-mar en el hemisferio norte y abr-sep en el hemisferio sur).

Definición de seco (B): localidades que cumplan el siguiente criterio:

$$P < 2 (T+7)$$

Donde:

P = precipitación anual en cm y

T = temperatura media anual en °C

Definición de húmedo (A): localidades que no sean marinas ni secas.

La Tabla 2.3 presenta el resultado de aplicar la norma ASHRAE 90.1 a 11 localidades venezolanas. Obsérvese, desde una perspectiva local, y siempre que la calificación de los tipos de clima se asocie a la sensación térmica, que la norma pareciera acentuar el lado caliente/cálido. Es así que al clima de Valencia se le califica de *muy caliente*, al de Caracas de *caliente*, el de Mérida de *cálido* y al de Apartaderos de *fresco*. Esto es comprensible si se advierte que la norma engloba en ocho grupos todos los climas de la tierra y que su meta es el ahorro energético en edificios (p.ej. ciudades como Marsella, Milán y Roma reciben la misma calificación que La Colonia Tovar).

Tabla 2.3. Zonas climáticas de 11 localidades venezolanas según los criterios de la norma ASHRAE 90.1 (2010) (Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings)

Localidad	Altitud (m)	T media (°C)	Precipitación anual (cm)	GDE10°C	GDC18°C	Zona climática
Barcelona	7	28,1	55,3	5969	0	1A:muy caliente/seco
Porlamar	10	27,7	49,9	6192	0	1A:muy caliente/seco
Maiquetía	43	26,9	82,5	6002	0	1B:muy caliente/húmedo
Maracaibo	66	28,8	51,6	6446	0	1A:muy caliente/seco
P.Ayacucho	73	28,5	238,6	6291	0	1B:muy caliente/húmedo
Calabozo	100	29,2	149,5	6470	0	1B:muy caliente/húmedo
Valencia	430	27	46,3	5339	2	1A:muy caliente/seco
Caracas	835	23,8	91,7	4088	79	2B:caliente/húmedo
Mérida	1479	21	113,5	3494	204	3B:cálido/húmedo
C. Tovar	1790	16	95,1	2238	1180	4B:mixto/húmedo
Apartaderos	3500	11,5	ND	93	3605	5A:fresco/húmedo

Fuera del ámbito de las normas, la imprecisión aneja a las clasificaciones climáticas justifica usar un método sencillo basado en una descripción consensuada de la sensación higrotérmica desde la perspectiva del acostumbramiento a un clima promedio (moderado) y buscando una relación simple entre ésta y las pautas de diseño. En esta onda, Marsh (2003) propone una clasificación basada, por un lado, en las temperaturas efectivas que marcan: a) la frontera entre *caliente* y *cálido* (33 °C, igual a la temperatura promedio de la piel en condiciones de confort [por encima de 33 °C la convección transfiere calor del aire al cuerpo]; b) entre *cálido* y *moderado* (27 °C, límite derecho de la zona de confort de ASHRAE); c) entre *moderado* y *fresco* (20 °C, límite izquierdo de la zona de confort de ASHRAE); y, por otro lado, en la humedad absoluta equivalente a la presión de vapor de saturación a la temperatura promedio de la piel (33 °C) por encima de la cual el sudor comienza a tener dificultades para evaporarse (13 gr/kg). Esta humedad marca la frontera entre climas *secos* y *húmedos* (lo que sólo aplica en condiciones calientes o cálidas, que es cuando la humedad es importante). Las zonas así definidas son 6: *fresco/frío*, *moderado*, *cálido seco*, *cálido húmedo*, *caliente seco* y *caliente húmedo*. Estas zonas se dibujan luego en el diagrama psicrométrico, donde se las coteja con las temperaturas máximas medias mensuales que describen el clima de una localidad a mitad del día, que es la circunstancia que se toma como referencia.

En la Figura 2.9 se presenta esta clasificación y se contrapone con las áreas en que caen las medias máximas mensuales de 11 localidades del país. Nótese que por tener Venezuela una amplitud anual pequeña (< 5 °C), ningún sitio pasará por más de dos tipos de clima al año. Nótese igualmente que en ningún caso el clima será *seco*. De ahí que se puedan finalmente plantear para Venezuela seis zonas según si las temperaturas máximas medias anuales caen cerca del centro de cada tipo de clima o cerca de sus límites, lo que indicaría que las variaciones estacionales hacen que una localidad pase a lo largo del año de un tipo de clima a otro (Figura 2.10).

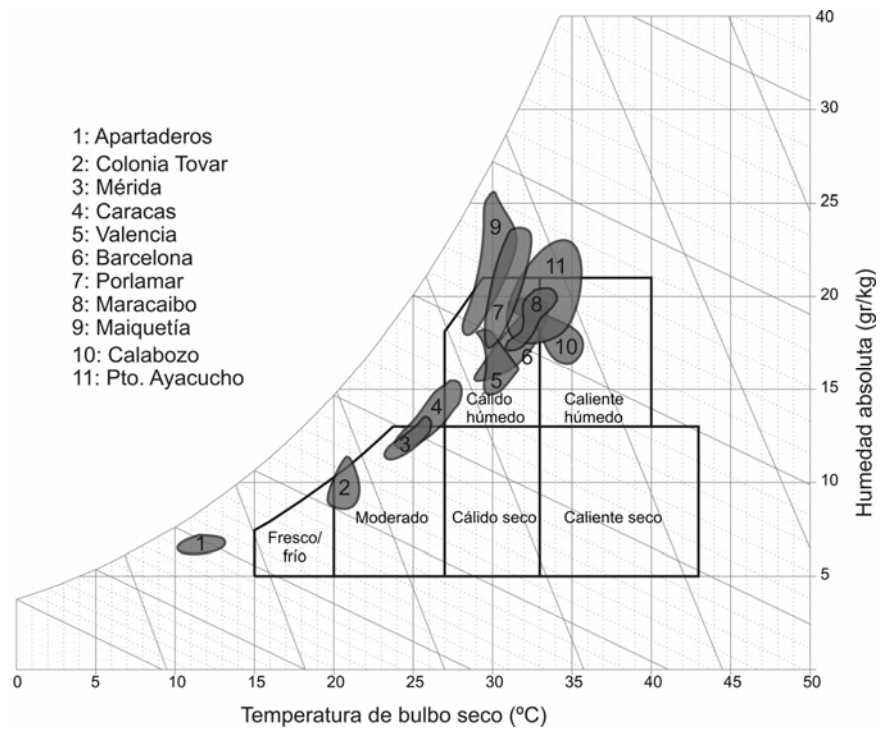


Figura 2.9. Zonas climáticas según Marsh (2003) y áreas en que se ubican las 12 temperaturas máximas medias mensuales de cada una de las 11 localidades indicadas

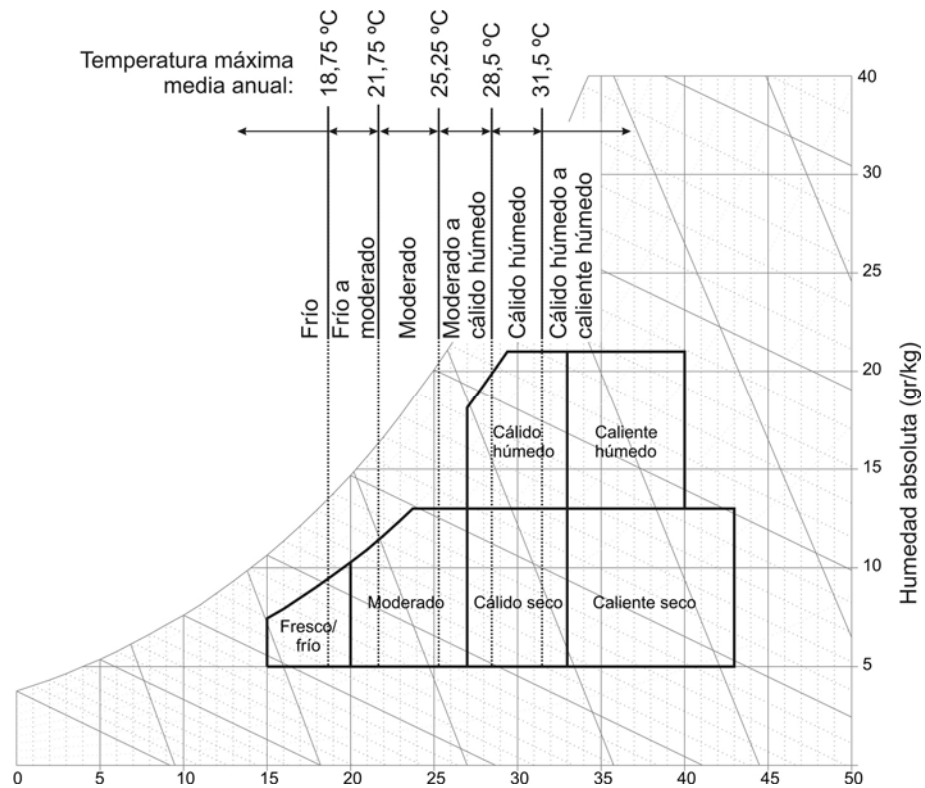


Figura 2.10. Criterio de clasificación de zonas climáticas para Venezuela basado en la propuesta de Marsh (2003) y considerando que la amplitud anual nunca sobrepasa los 5 °C

Buscando expresar el criterio de la Figura 2.10 en términos de altitud, se elaboró un modelo de regresión lineal entre ésta y la temperatura máxima media anual, usando los datos de 26 localidades (Figura 2.11). Finalmente, redondeando, las zonas climáticas quedan definidas como se muestra en la Tabla 2.4. Estas zonas pudieran complementarse con subcriterios basados en otros elementos del clima, la vegetación o las particularidades regionales. Esto no se hará por mantener la sencillez de la clasificación y por considerar que tales subcriterios atañen un segundo nivel de argumentación, ligado a contextos más precisos. Recuérdese que, a diferencia de la temperatura, los elementos como el viento o la vegetación dependen mucho del microclima y de factores locales como el entorno urbano y el relieve (vale sin embargo observar, respecto del viento, que, a escala nacional, la velocidad media es alta en las costas [~ 5 m/s], baja al sur del Orinoco [< 2 m/s], moderada en el resto del país [~ 3 m/s] y su dirección predominante es noreste-este).

Tabla 2.4. Zonas climáticas para el diseño en Venezuela basadas en la sensación higrótérmica

Zona	Altitud (m)	Tipo de clima	Algunas localidades importantes
1	0 a 300	Cálido húmedo a caliente húmedo	Acarigua, Altigracia de Orituco, Anaco, Barcelona, Barinas, Cabimas, Calabozo, Carúpano, Ciudad Bolívar, Coro, Cumaná, El Tigre, El Vigía, Guanare, 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	300 a 800	Cálido húmedo	Barquisimeto, Carora, El Tocuyo, Guarenas, Maracay, San Casimiro, San Juan de los Morros, Valencia, Valera
3	800 a 1300	Cálido húmedo a moderado	Caracas, Caripe, Los Teques, San Cristóbal, Santa Elena de Uairén, Trujillo
4	1300 a 1900	Moderado	Boconó, Mérida, La Grita, Colonia Tovar (parte baja), S. Antonio de los Altos
5	1900 a 2300	Moderado a frío	Timotes, Galipán, Santo Domingo, C. Tovar (parte alta)
6	> 2300	Frío	Apartaderos, Mucuchíes, Mucurubá

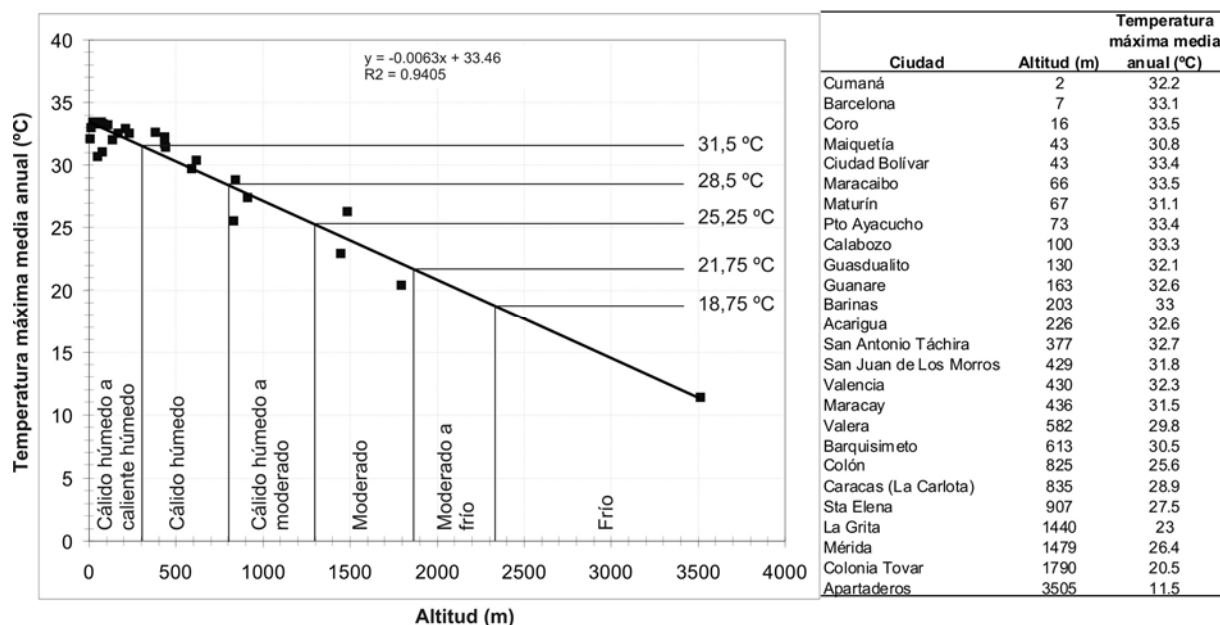


Figura 2.11. Modelo de regresión lineal entre la altitud y la temperatura máxima media anual

2.4 Aplicación de las reglas heurísticas de diseño en Venezuela

La denominación *heurística* engloba *métodos iniciales e intermedios*, según la clasificación presentada en el apartado 2.1 (página 22). Se refiere a aquellos métodos que sirven de orientadores durante el proceso de diseño, en contraste con los que calculan o evalúan soluciones ya concretadas. Tal como se explicó en aquel apartado, estos métodos incluyen, por un lado, los métodos iniciales tradicionales como los grados-día y los grados-hora, las Tablas de Mahoney y los Diagramas bioclimáticos, y, por otro, los métodos intermedios orientativos de los efectos particulares y combinados de las distintas decisiones de diseño en el confort térmico (relativas p.ej. a la disposición de los volúmenes y los ambientes, la concepción de la envolvente, las divisiones internas, la adecuación del entorno y, eventualmente, el acoplamiento de sistemas de climatización).

En lo que sigue se presenta el resultado de aplicar estos métodos al contexto Venezolano, por tratarse de una formación de gran utilidad en el diseño. Esto se hará para seis localidades de Venezuela, cada una representando una de las zonas climáticas mostradas en la Tabla 2.4. Estas localidades son: Maracaibo, Valencia, Caracas, Mérida, La Colonia Tovar y Apartaderos. Se utilizarán las series horarias del año 2000 suministradas por la Fuerza Aérea (con excepción de Apartaderos, cuyos datos fueron suministrados por CIDA, el Centro de Investigaciones de Astronomía [<http://www.cida.ve/>] y la Colonia Tovar, cuyos datos se tomaron de los registros manuales usados por Hobaica [1984] en su propuesta de zonas climáticas).

2.4.1 Indicadores al inicio del proceso de diseño

2.4.1.1 Grados-día y grados-hora

Los grados-día y los grados-hora (apartado 2.1) permiten evaluar la *severidad* del clima respecto de un rango de temperaturas exteriores deseadas, en términos del tiempo y grados centígrados acumulados en que las condiciones climáticas se desvían de tales rangos. Primero se calcularán los grados-día de un año, que son la acumulación de la diferencia entre la temperatura media diaria y, en el presente caso, dos temperaturas muy usadas en el análisis energético de edificios: 18 °C para los grados-día de calefacción (GDC18°C) y 26 °C para los grados-día de enfriamiento (GDE26°C). Los GD así calculados se muestran en la Tabla 2.5 (el signo negativo de los GDC resalta el que resulten de los días en que la media diaria es menor que 18 °C).

Tabla 2.5. Grados-día anuales de enfriamiento para 26 °C (GDE26°C) y de calentamiento para 18 °C (GDC18°C) en seis localidades de Venezuela

	GDE26°C	GDC18°C
Maracaibo	768,3	- 0,1
Valencia	326,6	- 1,5
Caracas	30,5	- 78,5
Mérida	3,9	- 203,9
Colonia Tovar	0	- 1180,1
Apartaderos	0	- 3604,6

La Tabla 2.5 sirve de indicación global de las condiciones climáticas que deberán contrarrestarse con sistemas de calefacción o enfriamiento durante un año en esas seis localidades. Obsérvese que, desde esa perspectiva, las ciudades con menos necesidades de sistemas de climatización serían las que se encuentran en las zonas de clima moderado, que son Caracas y Mérida. Esta información podría de hecho usarse posteriormente para estimar, con base en las propiedades globales de transferencia de calor de un edificio concreto (o de un edificio típico), el gasto energético anual necesario para mantener la temperatura interior en los valores en que se encuentra cuando la temperatura media exterior se encuentra a su vez entre los dos valores de referencia.

Los grados-hora (GH) son el mismo concepto de los grados-día pero referido a la temperatura horaria. Su cálculo se hará aquí para las mismas seis localidades y tomando como referencia un rango de confort de $\pm 1,75$ °C (95% de aceptabilidad) centrado en la temperatura de neutralidad del modelo de adaptación de la norma ASHRAE 55 (Figura 2.7). Téngase presente que al escoger este criterio, las referencias para la estimación de los grados-hora (*i.e.*, las temperaturas mensuales de neutralidad) cambiarán según la localidad y el mes. El cálculo se puede hacer para partes del día (p.ej., 8 a 6 p.m.), pero aquí se hará para las 24 h. El resultado se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Grados-hora de malestar térmico en seis localidades de Venezuela durante un año, basadas en el modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55 para edificios con ventilación natural

	Maracaibo		Valencia		Caracas		Mérida		Colonia Tovar		Apartaderos	
	Calor	Frío	Calor	Frío	Calor	Frío	Calor	Frío	Calor	Frío	Calor	Frío
Ene	1.312	11	1.021	131	33	1.267	82	1.716	0	3.381	0	6.847
Feb	1.354	1	986	45	84	1.098	98	1.338	0	3.143	0	5.876
Mar	1.662	0	1.085	40	127	1.121	147	1.258	0	3.165	0	6.760
Abr	2.152	0	1.433	3	544	328	228	917	0	2.566	0	6.351
May	2.278	0	1.308	4	627	114	221	751	0	2.401	0	6.568
Jun	2.554	0	938	17	294	195	161	819	0	2.374	0	7.088
Jul	2.497	0	1.065	51	365	253	207	1.012	0	2.620	0	7.659
Ago	2.985	0	1.007	45	611	71	260	930	0	2.664	0	7.433
Sep	2.009	0	805	73	439	233	146	1.026	0	2.513	0	7.138
Oct	2.250	0	986	59	406	213	270	881	0	2.552	0	7.281
Nov	1.789	0	1.104	60	172	399	106	1.058	0	2.736	0	7.359
Dic	1.834	1	1.382	112	325	759	210	1.095	0	3.080	0	7.715
TOTAL	24.675	13	13.120	641	4.027	6.052	2.136	12.802	0	33.195	0	84.074

Los valores de la Tabla 2.6 pueden entenderse como la cantidad de °C que se salen del rango de confort en el período dado, en el exterior y a la sombra, sin brisas, en actividad ligera y con una ropa como la usada en los ambientes interiores. Si p.ej. ese valor se dividiese entre la cantidad de horas del período, se tendría el *alejamiento promedio* de las condiciones de confort (p.ej, en Valencia, donde los GH de calor anuales son 13.120, es, globalmente, como si se estuviera en un clima en el que la temperatura es siempre 1,5 °C mayor que la máxima aceptable). Nótese también que en Caracas el malestar por frío es ya un poco mayor que el malestar por calor. La utilidad de este tipo de información es evidente en proyectos en los que se prevé ventilación natural.

2.4.1.2 Tablas de Mahoney

Aunque aplicable a cualquier tipo de clima, la finalidad básica de las tablas de Mahoney (apartado 2.1) es informar sobre las principales estrategias de diseño en climas en los que los requerimientos para diferentes estaciones u horas del día puedan ser contradictorios. Siguiendo un conjunto de reglas condicionales (fáciles de programar en una hoja de cálculo), se generan, partiendo de una tabla con los datos climáticos promedio (denotada como *tabla 1*), otras dos tablas que proveen información de ayuda al diseño: la *tabla 2*, la cual facilita un diagnóstico del clima respecto del confort diurno y nocturno de cada mes y desarrolla una serie de indicadores climáticos también para cada mes, y la *tabla 3*, la cual traduce estos indicadores a pautas de funcionamiento o recomendaciones generales para el diseño.

En Koenigsberger et al. (1977, 248-255) se da una explicación detallada del método. En el presente texto sólo se resumirá el resultado de aplicarlo a las seis localidades representativas de las seis zonas climáticas señaladas en la Tabla 2.4. Este resultado se presenta en Tabla 2.7.

Si bien el método de las tablas de Mahoney es ideal para programarse en una hoja de cálculo⁴², debe usarse siempre manteniendo un seguimiento de los indicadores de los cuales dependen las reglas condicionales y las soluciones a las que van llevando, para así entender cómo y por qué se llega a un resultado. Considerando que el procedimiento se basa en el reconocimiento del tipo de clima de cada mes, y como las soluciones a que lleva son limitadas y excluyentes, el resultado pierde claridad cuando se está cerca de los límites que determinan que los indicadores o especificaciones vayan por un camino u otro. Por ejemplo, cuando la humedad relativa promedio se encuentra un poco por debajo de 70%, la amplitud de temperatura un poco por encima de 10 °C y la sensación térmica diurna sea de calor, el indicador que resulta es: *necesidad de inercia térmica*, cuando de haber sido un poco menor la amplitud o un poco mayor la humedad, hubiera sido: *movimiento de aire esencial*. Otro aspecto puntual de tipo *falso dilema* se presenta en la especificación *plan masa*, la cual sólo admite dos opciones: a) *planos compactos con patios interiores* y b) *orientación este-oeste para disminuir la exposición al sol*. La primera opción sólo se aplica a los climas en los que domine la estación cálido-seca, por lo que el método lleva a la segunda opción en todos los otros tipos de clima, incluyendo aquellos siempre fríos de altitud.

Teniendo claras las limitaciones anejas al método, las cuales demandan de una aproximación crítica, las indicaciones y recomendaciones que de él se derivan constituyen, como se puede apreciar en la aplicación sintetizada en la Tabla 2.7, una información práctica y sencilla que da una primera idea de lo que el clima demanda como solución arquitectónica.

⁴² En internet se pueden conseguir archivos Excel con esta programación. Concretamente las siguientes dos páginas (téngase en cuenta que estas hojas de cálculo tienen un carácter informal que no garantiza la ausencia de errores):
<<http://hackitectura.net/escuelas/tiki-index.php?page=arquitectura+y+medio+ambiente>>
<http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Arquitectura_Sostenible/Clima/Tablas_mahoney.asp>

Tabla 2.7. Diagnóstico del clima respecto del confort, indicadores climáticos y pautas de funcionamiento o recomendaciones genéricas para el diseño que se derivan de aplicar las tablas de Mahoney en seis localidades de Venezuela.

	Maracaibo	Valencia	Caracas	Mérida	Colonia Tovar	Apartaderos
Confort	En el día: calor todos los meses. En la noche: confort en enero y el resto del año calor.	En el día: calor todos los meses del año. En la noche: calor de abril a junio y confort de julio a marzo.	En el día: calor en abril, mayo y noviembre. Confort el resto del año. En la noche: frío en enero y confort el resto del año.	En el día: confort todo el año. En la noche: frío en enero y febrero y confort el resto del año	En el día: frío en enero y confort el resto del año. En la noche: frío todo el año.	En el día: frío todo el año. En la noche: frío todo el año. .
Indicadores	Ventilación esencial todo el año.	Ventilación esencial de mayo a noviembre. Inercia térmica necesaria de diciembre a abril.	Ventilación esencial en mayo y noviembre. Inercia térmica necesaria entre enero y abril.	Protección contra lluvias fuertes en mayo y octubre. Inercia térmica necesaria en enero, febrero, septiembre y octubre.	Ventilación deseable entre mayo y diciembre. Inercia térmica necesaria en febrero y marzo. Problemas con el frío en enero.	Protección contra el frío.
Plan Masa	Orientación en eje este-oeste para disminuir exposición al sol.	Orientación en eje este-oeste para disminuir exposición al sol.	Orientación en eje este-oeste para disminuir exposición al sol.	Orientación en eje este-oeste para disminuir exposición al sol.	Orientación en eje este-oeste para disminuir exposición al sol.	Orientación en eje este-oeste para disminuir exposición al sol.
Separación entre edificios	Separación grande para favorecer la penetración del viento.	Separación grande para favorecer la penetración del viento, previendo protección contra vientos fríos o cálidos.	Separación grande para favorecer la penetración del viento, previendo protección contra vientos fríos o cálidos.	Organización compacta de los edificios.	Organización compacta de los edificios.	Organización compacta de los edificios.
Movimiento de aire	Habitaciones en crujía simple, con ventilación permanente.	Habitaciones en crujía simple, con ventilación permanente.	Habitaciones en crujía simple, con ventilación permanente.	No se requiere movimiento de aire.	No se requiere movimiento de aire.	No se requiere movimiento de aire.
Aberturas	Grandes: 40 a 80% de las fachadas norte y sur, ubicadas a la altura del cuerpo, a barlovento y protegidas del sol y la lluvia.	Medianas: 25 a 40% del área de las fachadas, ubicadas a la altura del cuerpo, a barlovento y protegidas del sol y la lluvia.	Medianas: 25 a 40% del área de las fachadas, ubicadas a la altura del cuerpo, a barlovento y protegidas del sol y la lluvia.	Medianas: 25 a 40% del área de las fachadas, ubicadas a la altura del cuerpo, a barlovento y protegidas del sol y la lluvia.	Medianas: 25 a 40% del área de las fachadas, ubicadas a la altura del cuerpo, a barlovento y protegidas de la lluvia.	Pequeñas: 10 a 20% del área de las fachadas.
Paredes	Ligeras de baja inercia térmica.	Pesadas para fuerte inercia térmica; desfase horario superior a 8 horas.	Pesadas para fuerte inercia térmica; desfase horario superior a 8 horas.	Pesadas para fuerte inercia térmica; desfase horario superior a 8 horas.	Pesadas para fuerte inercia térmica; desfase horario superior a 8 horas.	Pesadas para fuerte inercia térmica; desfase horario superior a 8 horas.
Techo	Ligero y aislado.	Ligero y aislado.	Ligero y aislado.	Ligero y aislado.	Ligero y aislado.	Pesado, transmisión diferida más de 8 h.
Necesidad de dormitorios al aire libre	No.	No.	No.	No.	No.	No.
Protección especial contra lluvias fuertes	No.	No.	Drenaje apropiado para lluvias fuertes.	Drenaje apropiado para lluvias fuertes.	No.	No.

2.4.1.3 Diagramas bioclimáticos

Los diagramas bioclimáticos fueron ideados por los hermanos Olgyay hace ya cerca de 50 años (Olgyay, 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 evaporando agua. Por suponer que todo se da al exterior, el diagrama de Olgyay fue sugerido para edificios livianos en regiones cálido-húmedas, en las cuales la temperatura interior pueda suponerse similar a la exterior.

Buscando incorporar la influencia de la envolvente del edificio, 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), pero se aumentan de noche los valores mínimos.

Ventilación nocturna: referida a los casos en que un edificio con suficiente masa térmica expuesta interiormente es ventilada de noche ampliamente a 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 infra-

roja emitida por las superficies de los cuerpos calentados. Anexamente se cubre con aislante el resto de las superficies interiores a fin 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; Mesut, 1991; Zain-Ahmed, 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) (Figura 2.12). 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 1,5 m/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). El diagrama de Givoni también supone, al plantear los límites de la ventilación, que la presión de

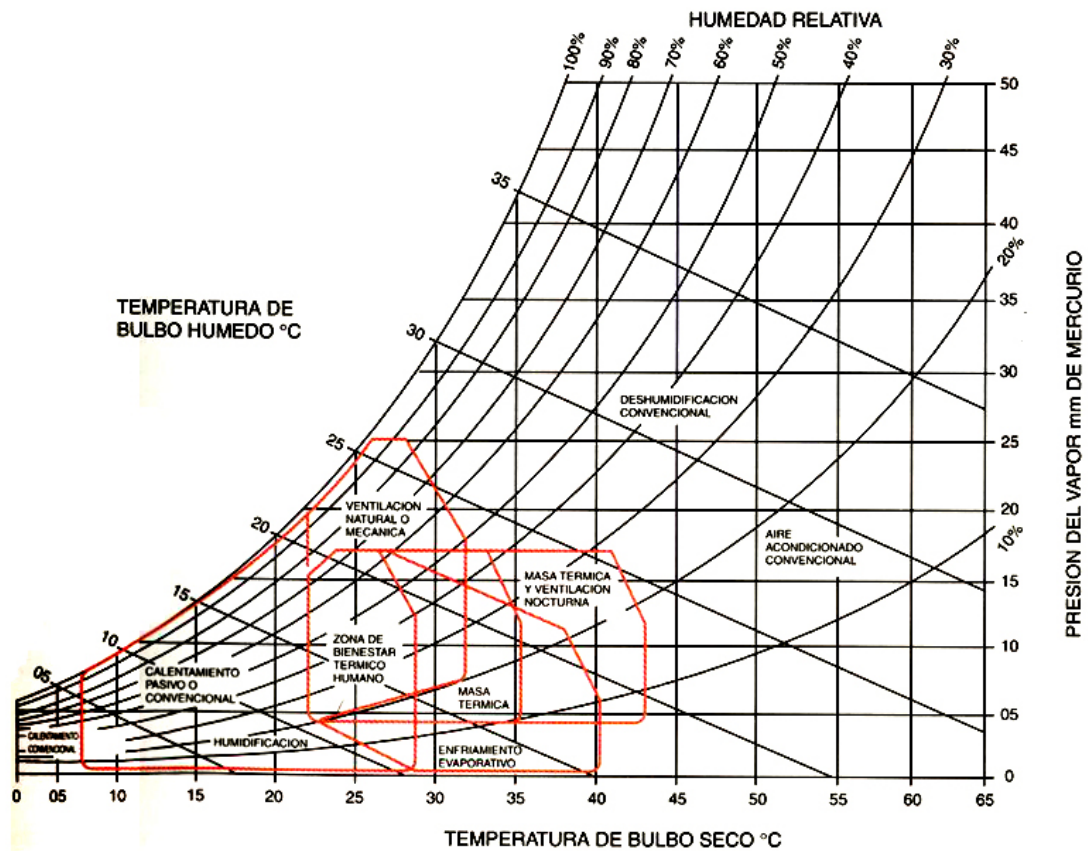


Figura 2.12. Diagrama bioclimático de Givoni aplicado a Maracaibo (González et al., 1986)

vapor y la temperatura radiante media se mantienen iguales al interior y al exterior, lo que implica envolventes que no aumenten su temperatura por dentro (básicamente livianas y aislantes, con un óptimo control solar). Finalmente, asume que la eficacia de la masa térmica como estrategia de enfriamiento necesita la supresión de la ventilación natural en el día (Givoni, 1978).

Sin alterar las zonas planteadas por Givoni, Szokolay (1987) las vinculó con una zona de confort definida por el índice adaptativo desarrollado por Auliciems (1983), basado en una regresión lineal muy similar a la que años después sería adoptada por la norma ASHRAE 55 (Figura 2.7). Tomando como referencia la zona de confort de la norma ASHRAE vigente para aquel entonces (Figura 2.2), definió la zona de confort en el diagrama psicrométrico mediante el siguiente procedimiento: a) partiendo del punto definido por la temperatura de neutralidad (calculada con la temperatura media anual exterior) y la humedad relativa de 50%, su ancho corresponde a 2 °C a cada lado, siguiendo la curva de 50% (aceptabilidad de 90%); b) sus límites izquierdo y derecho son líneas de igual temperatura efectiva según la norma ASHRAE 55 (1981); c) sus límites inferior y superior se fijan según esta misma norma en humedades absolutas de 4 y 12 g/kg; d) finalmente, la humedad relativa no puede exceder 90% (Szokolay, 1986; Peyush, 1998).

A esta zona se le puede entender como las condiciones de temperatura y humedad en las que con una temperatura radiante igual a la del aire y realizando una actividad ligera 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 cotejarse 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 que se puede interpretar como que no incide la radiación solar.

Por considerar que adoptar un criterio de confort de tipo adaptativo es un avance importante respecto de la propuesta Givoni, los diagramas bioclimáticos que se emplearán en el presente texto para derivar de ellos las estrategias más adecuadas al clima venezolano serán los de Szokolay, sin olvidar por tanto lo conservador del límite superior de la humedad de 4gr/kg. Las siguientes seis figuras muestran los diagramas bioclimáticos según el modelo de Szokolay de seis localidades representativas de las zonas climáticas mostradas en la Tabla 2.4. En esta aplicación del modelo se mantuvieron todos los criterios originales, sin que ello desautorice considerar como no determinante el límite superior de la humedad (se podrá en tal sentido suponer un límite superior de la humedad relativa del orden de 80%, por encima del cual se sabe que ésta comienza a *sentirse*)¹.

¹ El modelo fue llevado por Marsh (2003) al software The WeatherTool. Entre los resultados que suministra 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 para intervalos de tiempo dados u horarios específicos.

Diagrama bioclimático
Localidad: Maracaibo (65 msnm)

Datos del año 2000 (FAV)
 Las rectas son las amplitudes diarias promedio de cada mes

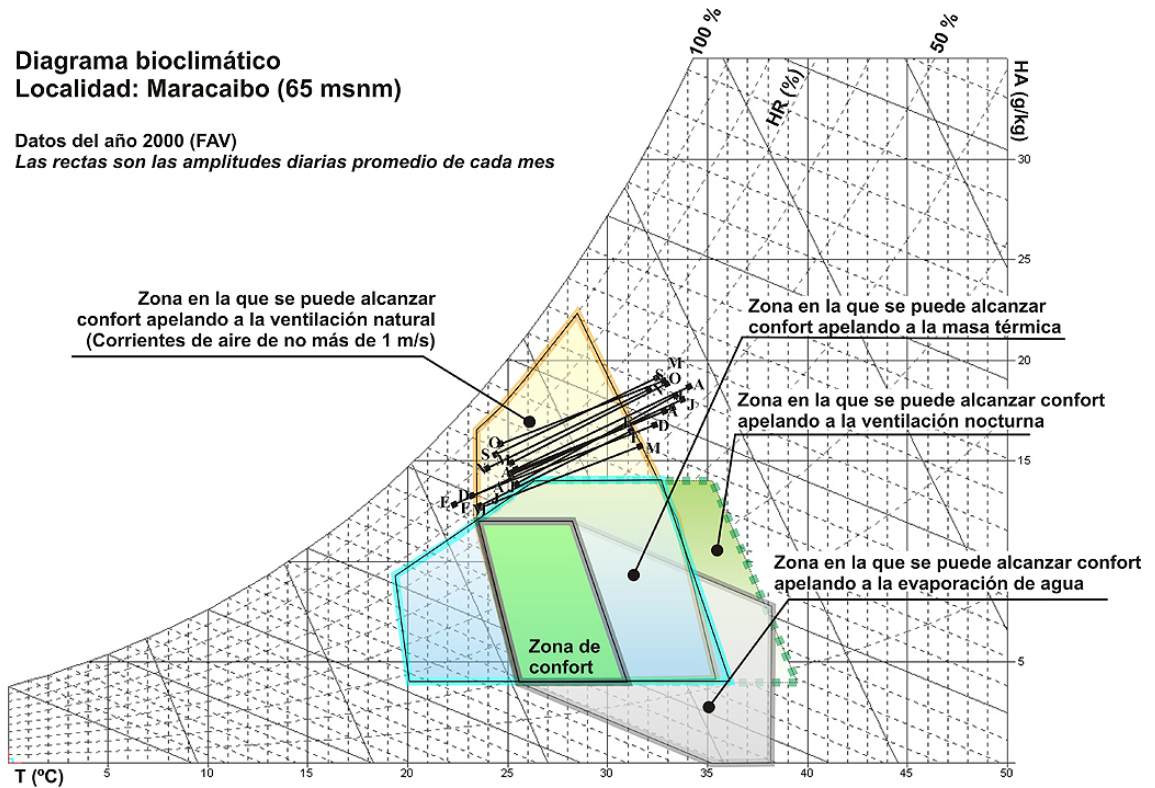


Figura 2.13. Diagrama bioclimático de Maracaibo

Diagrama bioclimático
Localidad: Valencia (480 msnm)

Datos del año 2000 (FAV)
 Las rectas son las amplitudes diarias promedio de cada mes

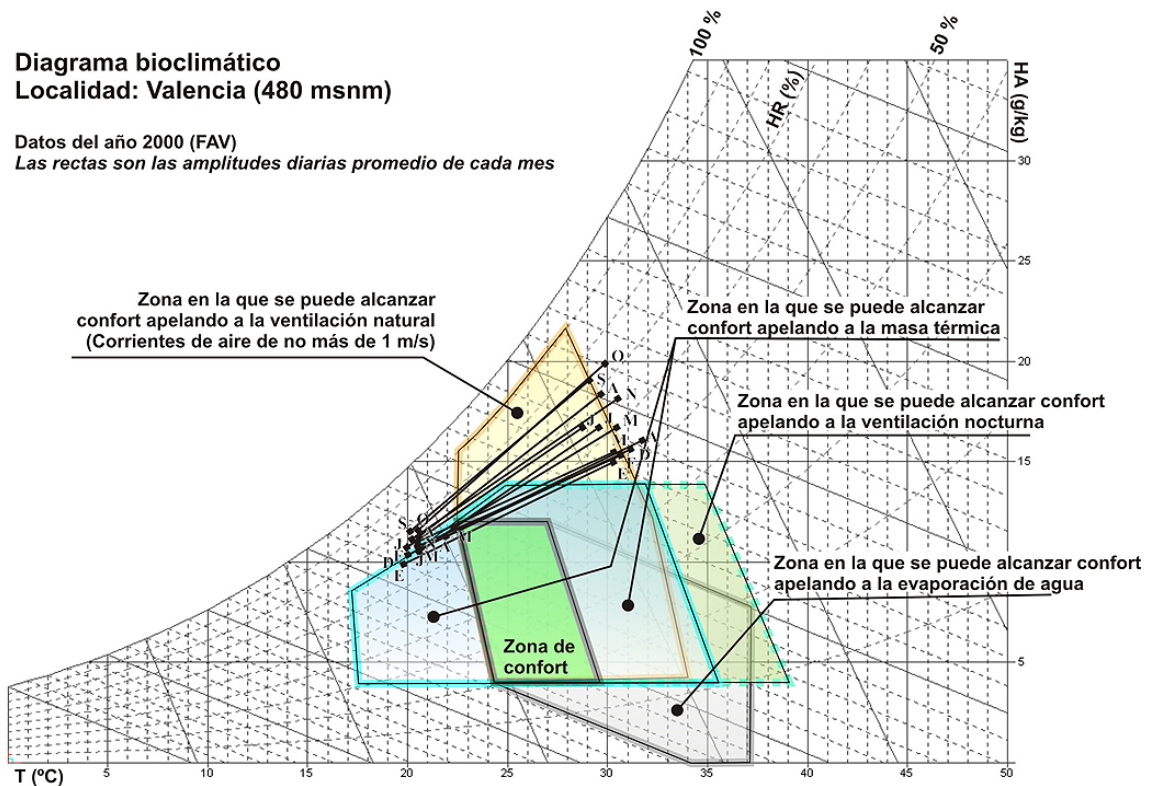


Figura 2.14. Diagrama bioclimático de Valencia

Diagrama bioclimático
Localidad: Caracas (900 msnm)

Datos del año 2000 (FAV)
Las rectas son las amplitudes diarias promedio de cada mes

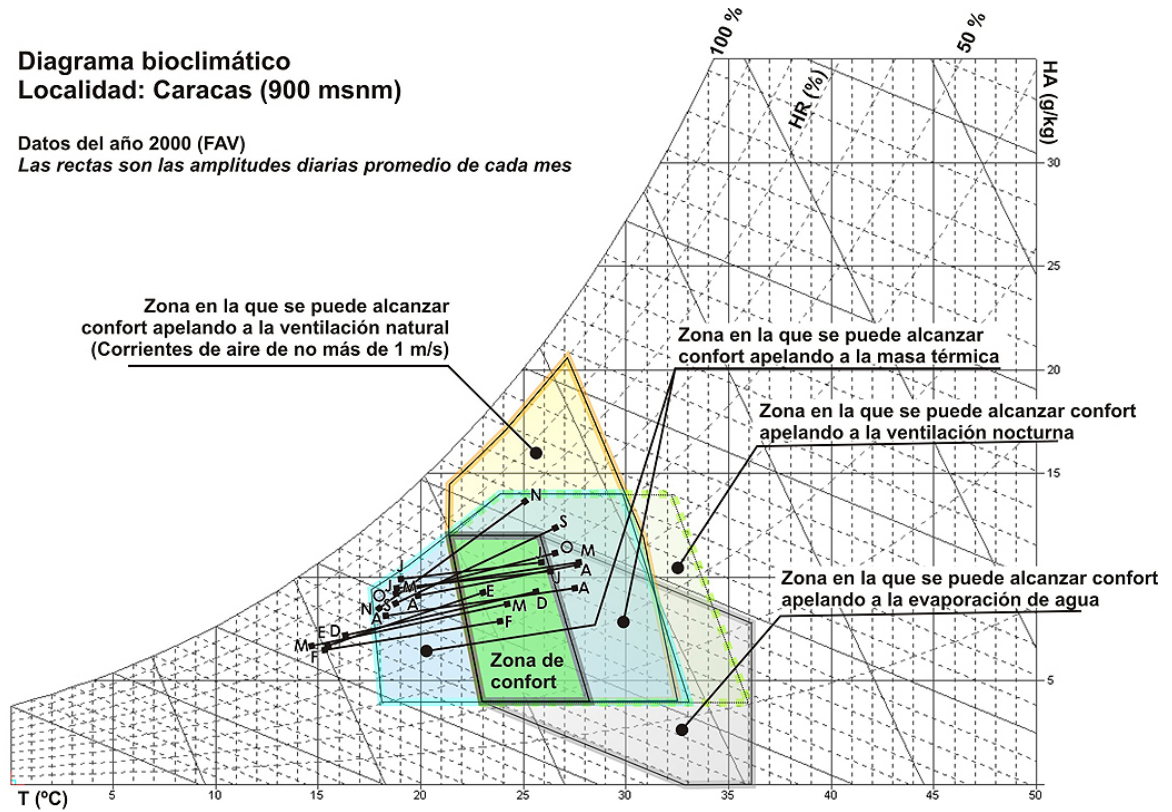


Figura 2.15. Diagrama bioclimático de Caracas

Diagrama bioclimático
Localidad: Mérida (1600 msnm)

Datos del año 2000 (FAV)
Las rectas son las amplitudes diarias promedio de cada mes

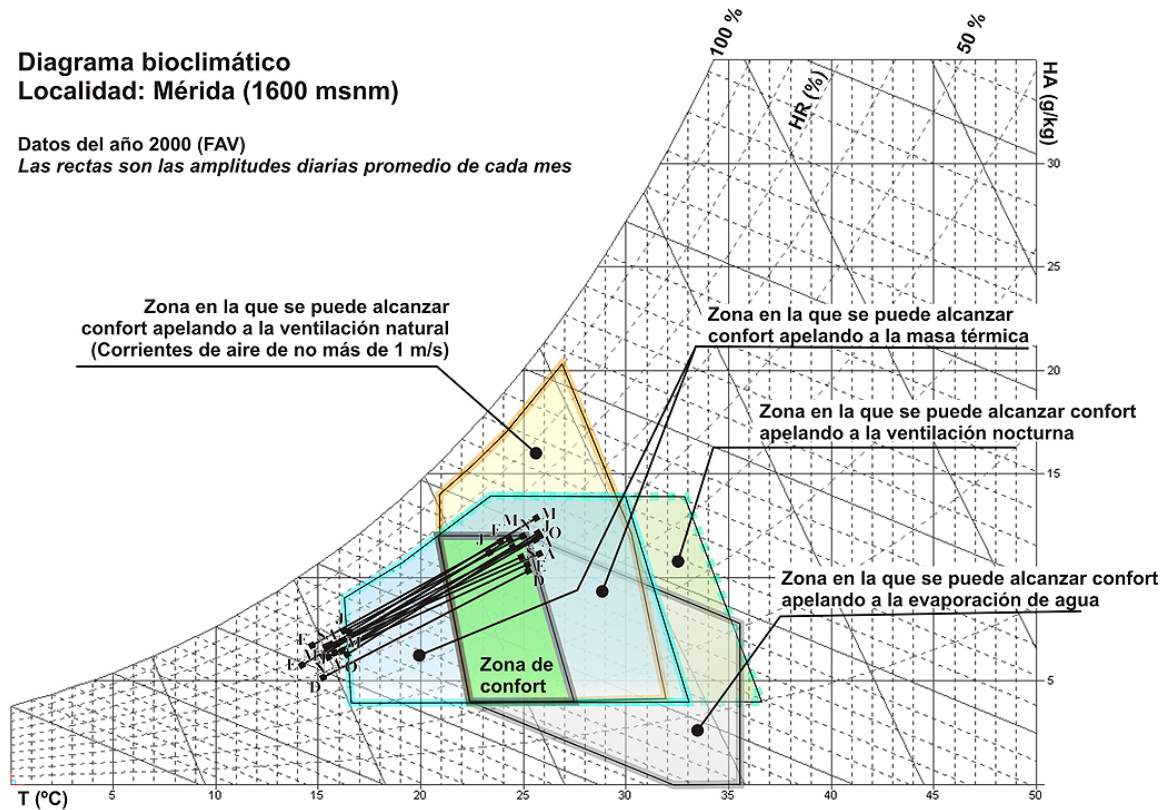


Figura 2.16. Diagrama bioclimático de Mérida

Diagrama bioclimático
Localidad: Colonia Tovar (1900 msnm)

Datos del año 1987 [Hobaica, 1984]
 Las rectas son las amplitudes diarias promedio de cada mes

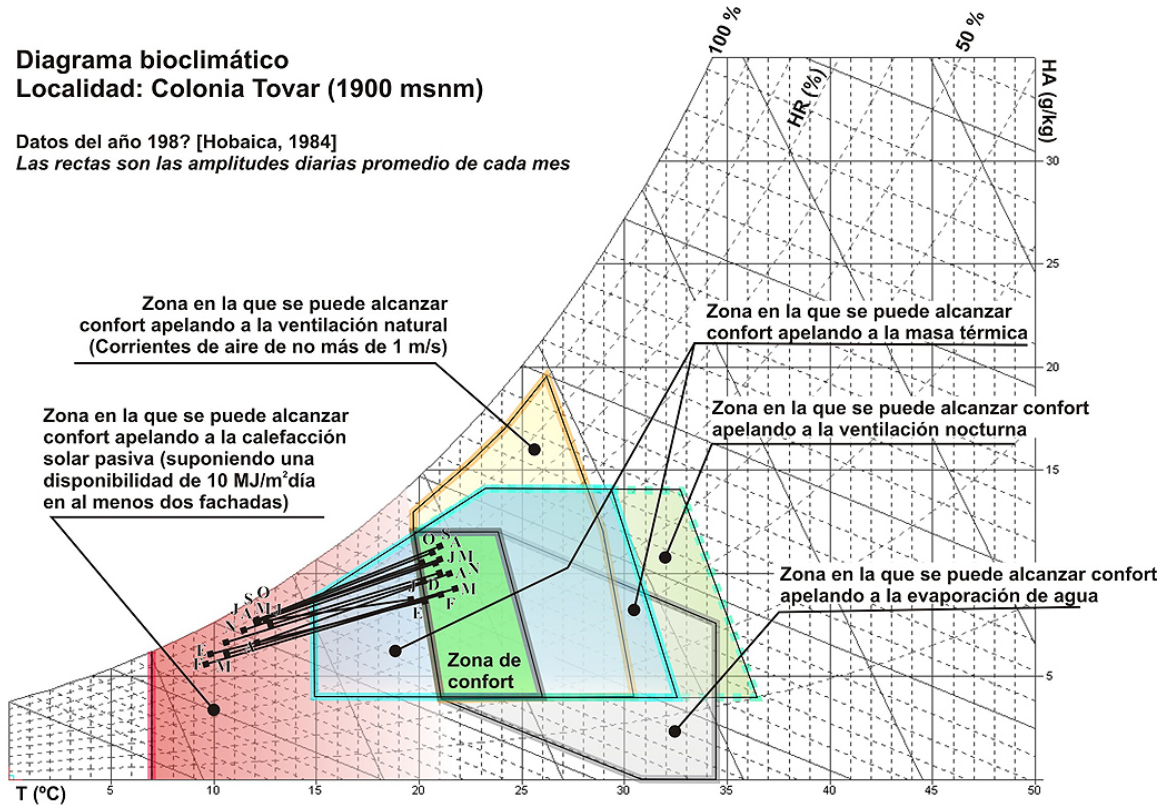


Figura 2.17. Diagrama bioclimático de la Colonia Tovar

Diagrama bioclimático
Localidad: Apartaderos (3600 msnm)

Datos del 1998 (Estación Observatorio)
 Las rectas son las amplitudes diarias promedio de cada mes

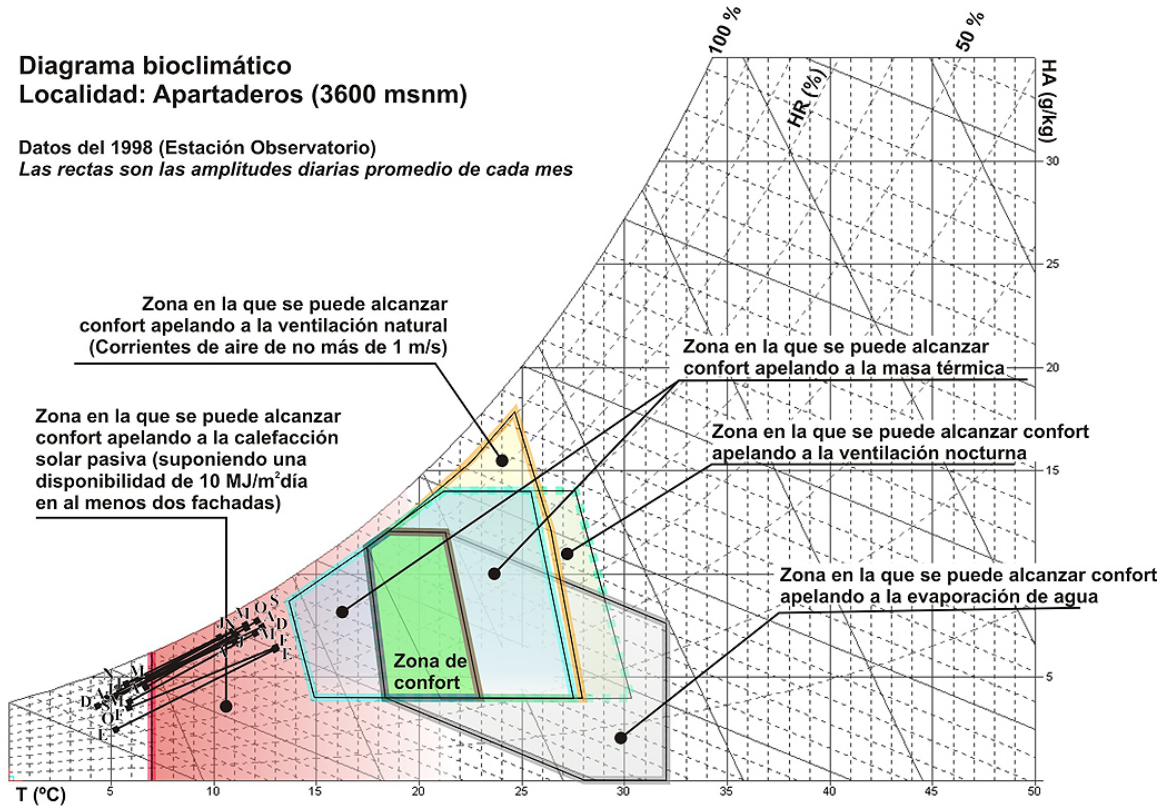


Figura 2.18. Diagrama bioclimático de Apartaderos

Del análisis de los diagramas de las figuras anteriores se desprenden las siguientes conclusiones:

Maracaibo (Figura 2.13): *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 pueden aparecer molestias asociadas con el levantamiento de polvo y objetos livianos. 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. *Masa térmica:* en razón de la elevada humedad, la masa térmica es poco eficaz para proveer confort térmico de día al interior de las edificaciones (sólo 5% del año y menos de 10% en los meses menos cálidos). Vale sin embargo precisar a manera de paréntesis que observaciones, experimentos y simulaciones realizadas en Maracaibo (González, 1997) 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, según el límite de 4 gr/kg, 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. *Ventilación nocturna:* la ventilación nocturna no aumenta la probabilidad de lograr confort en comparación con la masa térmica (aunque se ha demostrado 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 Maracaibo 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 y el enfriamiento por el suelo (González, 1997; González y Achard, 1998; Hobaica et al, 2001).

Valencia (Figura 2.14): Aumenta el tiempo en que la ventilación permite alcanzar confort térmico (cerca de 80% en horas diurnas a lo largo del año). Aún 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 Maracaibo, 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 un 30% del tiempo. En esta zona también se da el que de noche pueda hacer fresco (alrededor de 20 °C). En tal sentido es válido juzgar que basta cerrar parcialmente el edificio a fin de preservar parte de las cargas internas.

Caracas (Figura 2.15): En Caracas la situación cambia de manera significativa. *Zona de confort*: las condiciones higrotérmicas del aire se ubican en la zona de confort sólo 25% del tiempo. El malestar térmico se presenta más que todo de noche y temprano 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 el 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, un edificio 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 el diagrama no considera las cargas internas, se puede prever una compensación por esta vía. Reducir el frío (habiendo suprimido la ventilación y no contando con las cargas internas) significa en términos de diseño térmico 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 que 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%. Sin embargo las condiciones higrotérmicas para las cuales la evaporación directa restituye el confort coinciden con aquellas de la ventilación natural y la masa térmica, estrategias que permiten restituir el confort todo el año. Podrá luego concebirse la evaporación directa más bien como un complemento o un recurso alternativo en diseños específicos.

Mérida (Figura 2.16): La situación en Mérida es similar a la de Caracas, sólo que el clima es moderado todo el año, por lo que se presenta poca necesidad de enfriar. Un edificio en este tipo de clima, protegido 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 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 efec-

tividad 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 a 3 °C, es viable suponer que las cargas internas permitirían compensarlo.

Colonia Tovar (Figura 2.17): Se advierte la innecesidad 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. De resto se podrá apelar a la calefacción solar pasiva, la cual tendría que compensar alrededor de 5 °C de exceso de frío.

Apartaderos (Figura 2.18): En Apartaderos 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 acentuar 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) y a un resguardo de las cargas internas.

Si se extiende el comportamiento de cada una de estas localidades a todas las localidades de la misma zona climáticas, se pueden generalizar sintetizadamente las pautas de diseño asociadas a cada zona, lo que se muestra en la Tabla 2.8. 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 (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.

2.4.2 Métodos intermedios. Recomendaciones de diseño

El objetivo de este tipo de métodos es asistir al arquitecto en la definición progresiva de los aspectos específicos del proyecto (morfología, materiales, etc.). Como ya se acotó (apartado 2.1), a pesar de apuntar a particularidades, su carácter es genérico, por la necesidad, al formularseles, de hacer abstracción de los edificios (o tipos de edificios), recayendo luego en el arquitecto el juzgar y decidir su adecuación y el adaptarlos al edificio concreto que esté proyectando. Se presentan bajo la forma de manuales, guías, especificaciones, procedimientos referidos a problemas particulares, etc., y sus medios de difusión van desde la comunicación oral (p.ej. entre expertos y arquitectos trabajando juntos), pasando por las publicaciones impresas tradicionales, hasta llegar al audiovisual y la informática (lo que incluiría por ejemplo programas de computación, manuales en internet, páginas web interactivas, etc.).

Tabla 2.8. Pautas de diseño arquitectónico que se derivan de los diagramas bioclimáticos

Zona climática	Altitud (m)	Pautas generales de diseño
Zona 1 (Caliente a cálido húmedo)	0 a 300	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.
Zona 2 (Cálido húmedo)	300 a 800	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.
Zona 3 (Cálido húmedo a moderado)	800 a 1300	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.
Zona 4 (Moderado)	1300 a 1900	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.
Zona 5 (Moderado a frío)	1900 a 2300	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 6-7°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.
Zona 6 (Frío)	Más de 2300	Alternativa 1: <ul style="list-style-type: none"> Usar la calefacción solar pasiva (maximizar sus efectos de día y de noche).

Como con el resto de métodos, las pautas o recomendaciones para uso en las etapas intermedias del proceso de diseño no pueden sustituir el juicio del proyectista. Vale recordar esta evidencia contra la tendencia que nace de la concepción descriptiva de las normas, en razón de su carácter necesariamente procedimental. El punto central para que se haga un uso adecuado de este tipo de métodos es que vengan acompañados de la noción – o traigan implícita la noción – de su condicionamiento a la comprensión del conjunto. Ello demanda, en contrapartida, por parte de quien se sirva de ellos, poseer al menos los conocimientos básicos acerca de los fenómenos energético/ambientales que se producen en los edificios. Sin esos conocimientos los métodos corren el riesgo de convertirse en una simple fuente de ideas, quizá muy buenas, pero inconexas.

Ya se citaron en el apartado 2.1 los diversos criterios con que estos métodos se pueden clasificar y estructurar con miras a su divulgación. Su materialización más común es en forma de manuales o guías de diseño, sean de tipo esquemático y rápida consulta, sean libros didácticos tradicionales. Hacer una lista sería muy extenso (una simple búsqueda en internet abriría un mundo en tal sentido). Sin embargo, vale mencionar, por no dejarlo, y a un nivel internacional, por un lado, libros clásicos muy importantes y aún vigentes como el Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas de V. Olgyay (1998), los libros de B. Givoni centrados en dar recomendaciones de diseño como *Passive and low energy cooling of buildings* (1994) y *Climate considerations in building and urban design* (1998), el texto clásico dedicado al trópico de Koenigsberger *et al.* (1977) titulado *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*, y, por otro lado, como ejemplos de manuales de amplia difusión o buena estructuración, los manuales de ASHRAE orientados a tipos de edificios particulares y conocidos como *Advanced energy design guides*² y el manual australiano en línea *Your home technical manual*³, orientado a viviendas⁴.

Se puede mencionar como una razón para exigirle conocimientos a quienes hacen uso de los métodos, que acudir a textos o manuales hechos en otros países conlleva entender las limitaciones que nacen de las diferencias de contextos. Ciertamente, cuando la información internacional hace abstracción del clima o se orienta a climas tropicales, tales limitaciones se borran. Sin embargo, buscando responder a una problemática y un contexto propiamente nacionales, varios investigadores o grupos de investigadores han publicado libros o guías de carácter general, dirigidos a los arquitectos y profesionales del sector de la construcción. Ellos son, en orden cronológico, el libro editado por el Banco Obrero, *Clima y arquitectura* (Poler M., 1968), el ya mencionado trabajo de ascenso de Curiel (1982) titulado *La arquitectura en regiones de Venezuela*, donde se presentan pautas generales de diseño diferenciadas según una clasificación del país en tres zonas climáticas, la guía elaborada por Sosa y Siem (2004) llamada *Manual de diseño para edificaciones energéti-*

² Web de *Advanced energy design guides* de ASHRAE : <http://www.ashrae.org/technology/page/938>

³ Web de *Your home technical manual* : <http://www.yourhome.gov.au/technical/index.html>

⁴ Una lista muy completa de recursos bibliográficos es: <http://www3.hku.hk/mech/sbe/refs/refs-pro-design.htm>

camente eficientes en el trópico, y la guía echa en Maracaibo bajo la dirección del Instituto de la Facultad de Arquitectura de la universidad del Zulia, Recomendaciones para mejorar la calidad térmica de las edificaciones (CMCTE-Comisión para el Mejoramiento de la Calidad Térmica de las Edificaciones, 1999). Por otro lado, fuera del ámbito de la divulgación de conjuntos de métodos en forma de libros y manuales, no se puede hablar en el país de un aporte significativo en la concepción de métodos para usarse en las etapas intermedias, a excepción de un trabajo de tesis doctoral recientemente realizado por Sosa M.E. (2008), en el que se plantea un método de evaluación de la eficiencia energética global de las fachadas de los edificios de oficina en Venezuela.

Con excepción de la propuesta de Curiel, las demás propuestas de divulgación de métodos de ayuda al diseño hechas en el país se han centrado básicamente en atender el problema de los climas calientes y cálidos, lo que es comprensible, por tratarse del problema mayor.

En la línea llevada en el presente texto de tomar en cuenta todos los contextos por medio de seis zonas climáticas (Tabla 2.4, página 59), se presenta a continuación, a manera de sinopsis del estado del arte de su aplicación práctica, un resumen de pautas de diseño diferenciadas, a un primer nivel, en función de los dos problemas macro cuya conjugación hace al edificio, a saber, el diseño de la envolvente, por un lado, y la distribución espacial y las divisiones internas, por otro, y a un segundo nivel, en función de la zona climática. No se trata, como se arguyó, de listar una serie de recomendaciones, sino de relacionar éstas entre sí, así como con el contexto, desde la óptica de una argumentación que responda a las reflexiones que el arquitecto se hace frente a los problemas. Las fuentes de tal argumentación son los métodos iniciales presentados anteriormente, la literatura sobre el tema, la experimentación, la simulación dinámica y finalmente la experiencia.

2.4.2.1 Envolvente

Zonas calientes a cálido húmedas de Venezuela (zona climática 1: 0 a 300 msnm.)

En esta zona la ventilación natural es fundamental para lograr condiciones de confort térmico, en conjunción con un control solar óptimo. Por consiguiente, el diseño *ideal* de la envolvente es el de un edificio totalmente sombreado con grandes aberturas en todas las fachadas, que promuevan una ventilación cruzada amplia. Considerando que sombrear plenamente la envolvente no siempre es viable (lo cual no implica no procurarlo) se podrá esbozar como primera alternativa reducir el área de las fachadas que reciban el sol con mayor perpendicularidad (orientaciones este y oeste) y situar las aberturas en las fachadas más amplias, pero más fáciles de proteger con protecciones solares usuales como pantallas externas, aleros o volados (orientaciones norte y sur), tratando a la vez de que éstas reciban el viento frontalmente. La forma y orientación de la envolvente y sus componentes estarán así sujetas a la posición del sol y a la procedencia del viento.

Sin embargo, es común que el control solar y la ventilación no se puedan acoplar cabalmente, pues el viento no tiene por qué provenir del norte o del sur. En Venezuela, debido a los alisios, es usual que provenga del noreste o del este, siempre que no intervengan modificadores locales que cambien esta situación (lo cual también es usual). Ventajosamente se sabe que, a condición de que se garantice una ventilación cruzada, la dependencia de la ventilación respecto de la orientación de las aberturas se reduce, teniéndose un margen de hasta unos 60° a cada lado (Givoni, 1978, 1998). Para que el aire fluya fácil de un lado a otro conviene además reducir la cantidad de divisiones entre las ventanas de entrada y salida del aire (habitaciones en crujía simple).

En los proyectos o situaciones en que lo anterior no sea posible, dependerá de la creatividad del arquitecto conjugar debidamente los criterios de control solar y ventilación. Por ejemplo, si la dirección del viento fuese este u oeste francos, una idea sería situar en esas orientaciones patios, atrios o porches anchos y techados (sin paredes o rodeados de bloques de ventilación) que protejan del sol los espacios de más adentro y a su vez dejen pasar el viento. Esta práctica es fácil de realizar en edificios bajos al tiempo que tales espacios permiten ubicar actividades según las horas en que el sol no penetre en ellos (en edificios altos una solución como esa es posible mediante terrazas grandes techadas). Cuando se apele a este recurso convendrá usar pisos poco reflectantes y de alta inercia térmica a fin de reducir la reflexión de la radiación hacia los espacios de más adentro, evitando a la vez que la temperatura del piso se eleve demasiado. La mejor solución será sin embargo colocar vegetación baja como materos o áreas con césped (la condición cuando se aumente la inercia térmica es que la entrada de sol sea temporal y con inclinación; de lo contrario, el piso a la larga se calentará tanto como cualquier otro material, con el agravante de que se mantendrá caliente por largo tiempo). A estos espacios se los puede complementar con grandes protecciones móviles según la ubicación del sol, ajustables según la combinación que se desee en un momento dado entre ventilación y protección solar (como toldos graduables o esteras enrollables). Es importante en este tipo de soluciones aprovechar la vegetación o algún otro tipo de obstáculo externo para sombrear, considerando la influencia que ello tenga en la ventilación.

Dobles fachadas o estructuras distanciadas y concebidas como protecciones solares pueden también ser una solución, aunque no sea fácil en las orientaciones este y oeste proteger del sol, inducir una buena ventilación, admitir luz natural y proveer una visual despejada, todo al mismo tiempo. Otra práctica es romper la geometría de las fachadas en planos de orientaciones distintas para las aberturas y las paredes a fin de que las últimas se conviertan en protecciones solares de las primeras, sin bloquear con ello la entrada del viento (esto puede lograrse a menor escala usando bloques de ventilación con planos inclinados). Apelar a este recurso conlleva vigilar que la radiación solar no se refleje demasiado desde las superficies hacia adentro y considerar un aumento potencial de la temperatura radiante media por efecto del calentamiento de la fachada.

Por otro lado, cuando la planta del edificio no sea compacta sino dispersa (*i.e.* con salientes y entrantes que hagan que cada ambiente tenga más de una pared que dé hacia el exterior), se reduce la importancia de la dirección del viento, pues se hace más fácil lograr una ventilación cruzada autónoma en cada ambiente. Ello sin embargo complica el control solar ya que se tendrán más fachadas con orientaciones diversas. En tales casos, además de las protecciones solares usuales (vegetación, toldos, porches, volados, parasoles, etc.) convendrá valerse de los salientes y entrantes para producir sombras, dimensionándolos conforme a la ubicación del sol.

Si se optara por plantas rectangulares con patios centrales abiertos será igualmente más fácil lograr una ventilación cruzada en los ambientes, aunque para ello los espacios tendrán que abrirse hacia el patio, vulnerándose la privacidad. El patio deberá a su vez sombreadarse, al igual que los corredores o paredes contiguas, para lo cual se podrán ubicar estratégicamente árboles altos de copa ancha. Estos árboles son el medio vegetal de protección solar más indicado en climas cálidos y húmedos ya que producen un sombreado apropiado sin obstaculizar la ventilación. Complementarlos con césped u otro tipo de vegetación baja (siempre más baja que las aberturas para ventilar) reduce a su vez la reflexión de la radiación. Se debe contar con que la vegetación aumenta la humedad, por lo que exagerarla y no ventilar puede saturar el aire. Por lo mismo, usar fuentes puede ser un error si no se ventila, aunque ello tenga un efecto psicológico refrescante.

En esta zona climática será importante usar protecciones solares exteriores que bloqueen la radiación solar antes de que llegue a las paredes, techos y ventanas, pues con ello se evita que la temperatura radiante media interior aumente bajo condiciones climáticas en las que se le debe mantener tan baja como posible. Las protecciones solares interiores como persianas o cortinas deberán por ende pensarse en términos de ventilación y privacidad, más que de control solar.

Cuando se deban proteger ventanas orientadas este u oeste (o tendiendo hacia esas orientaciones) y no se pueda apelar a recursos como los expuestos, una solución parcial será usar toldos que se levanten cuando el sol no incida (a fin de maximizar la ventilación) y se abatan gradualmente hasta la altura del antepecho cuando incida, conforme a la altura que tenga el sol, pero guardando una separación que no bloquee del todo la ventilación. Una mejor solución serán los postigos ajustables o las contraventanas abatibles de romanillas o de cualquier forma permeable al viento y opaca a la radiación directa, que a la vez permitan una separación que deje pasar el aire. Se trata de soluciones parciales, puesto que si bien ayudan a bloquear el sol, conllevan una mengua de la ventilación, un riesgo de penetración de radiación solar cuando el sol llegue de lado y un calentamiento de la protección solar, la cual, por su ubicación, producirá un aumento de la temperatura radiante, en especial en las zonas cercanas a ella (razón por la cual dichas protecciones deberán ser de colores claros y materiales aislantes). De hecho, cuando se usen superficies extensas de romanillas, siempre será más conveniente hacerlo con base en criterios de ventilación e ilumina-

ción y no con base en el criterio de control solar, dejando la solución de este último criterio a elementos de sombreados alejados de las fachadas.

Tan importante como sombrear será minimizar la absorción de la radiación que incide en la envolvente (reflexión) e impedir la conducción de la radiación que se absorbe (aislamiento). La meta principal de ambas técnicas es reducir las temperaturas superficiales interiores y por ende la temperatura radiante media. En climas cálidos ambas técnicas se suman de día para reducir la carga solar. Sin embargo, en tanto que usar acabados claros es provechoso sin condiciones (siempre que la reflexión no produzca molestias allende), maximizar el aislamiento puede ser un error en climas con noches cálidas. Si no se asegura una amplia ventilación que elimine el aire caliente a una tasa adecuada y reduzca por convección la temperatura radiante será necesario usar materiales de menor resistencia térmica en los cerramientos no soleados, de modo que de noche se facilite el enfriamiento conductivo. Son sobre todo los techos, por ser más o menos horizontales y encontrarse de cara al cielo, los componentes más eficaces para evacuar de noche calor por radiación hacia el cielo y por convección con el aire. Para ello su conductancia debe ser alta pues de otra manera el calor no llegaría hasta la superficie exterior, quedándose adentro. Sin embargo, un techo de conductancia alta puede ser muy perjudicial de día, por no impedir la entrada del calor solar, a menos que esté bien sombreado, lo que resuelve el problema.

La forma, pendiente y orientación del techo pueden también concebirse con miras a aminorar la carga solar. Un techo de un agua, de fuerte inclinación y mirando al este recibirá radiación solar con mayor intensidad en la mañana y con menor intensidad en la tarde, reduciendo la ganancia solar luego del mediodía, que es cuando hace más calor (sin embargo, parte de ese calor se transmitirá al interior a una hora que dependerá de la inercia térmica del techo). Si el agua estuviese inclinada hacia el norte el calentamiento del techo será mayor en los meses en que el sol esté al norte y menor en los meses en los que esté al sur. Cuando un techo tenga dos o más aguas la carga solar a través de cada agua dependerá de su área y orientación respecto del sol. Cada espacio se verá luego afectado de forma distinta, según la parte del techo que tenga encima. En general, cuanto más compleja sea la geometría de un techo, más variable y dispar será su calentamiento (y más podrá producir sombras propias y arrojadas).

Se debe recordar que cuanto más sombreado esté el techo, más claro sea o más resistencia térmica tenga, menor será la influencia de su orientación e inclinación en la temperatura radiante interior y por ende en la temperatura operativa interior. Si en adición la ventilación fuese buena, la temperatura interior se vería aún menos afectada por la geometría del techo. A modo indicativo, en una vivienda simple, sin ventilación, con un techo de un agua mirando al este, de reflectividad 0,5 y conductividad alta, la temperatura máxima interior se reduciría en no más de 1,5 °C al aumentarse la pendiente desde 0 hasta 30%. Si en cambio la ventilación fuese buena y dicho techo

estuviese a la sombra, fuese blanco y/o tuviese aislante, tal variación de pendiente se haría superflua, pues ya se habría reducido la carga solar por otros medios (Sosa *et al.*, 2004).

En tanto que usar cerramientos conductores es en principio perjudicial de día pero conveniente de noche y usar cerramientos aislantes lo contrario (aunque todo dependa, como se vio, de su reparación en la envolvente conforme el sombreado y la ventilación), usar cerramientos de elevada inercia térmica puede ser tan perjudicial de día como de noche si no se toman en cuenta ciertas consideraciones relativas a la manera como se comportan. En comparación con los cerramientos aislantes, los cuales bloquean la conducción del calor pero cuyas superficies se calientan y enfrían rápido (cada cual por su cuenta conforme a los cambios térmicos de su entorno) los cerramientos pesados se calientan y enfrían despacio en todo su volumen, sin frenar a la postre la conducción desde la superficie más caliente hasta la más fría (conducción que se demora unas diez horas en cerramientos pesados de espesor 30 cm). Debido a la lentitud con que el calor se propaga es usual que parte del flujo se revierta en la noche cuando la superficie exterior se enfría, por lo que no todo el calor captado de día por la superficie exterior llegará hasta la superficie interior.

Valerse de lo anterior en climas cálidos y húmedos depende de varios factores, principalmente el espesor del cerramiento, la diferencia entre las temperaturas diurna y nocturna y la diferencia entre las temperaturas superficiales exteriores e interiores (diferencias que serán mayores en cerramientos expuestos al sol). En líneas generales, si no se adopta un espesor grande (más de 30 cm según el tiempo y la hora en que el sol incida) será nocivo ubicar cerramientos pesados al sol, pues captarán y conducirán calor en cantidades importantes, haciendo que en la tarde y/o en la noche permanezcan calientes⁵. Si en cambio se les sombrea bien, sus temperaturas superficiales fluctuarán poco alrededor de la temperatura media del aire, lo que se traduce en temperaturas superficiales menores de día y mayores de noche respecto de cerramientos cuyas superficies se calientan y enfrían rápido. El beneficio diurno de este efecto depende de la amplitud diaria de temperatura: puesto que en Venezuela ésta es del orden de 10 °C, la masa térmica pudiera mantener la temperatura radiante unos 3 o 4 °C por debajo de la del aire en las horas pico. Se debe estimar en todo esto que el efecto de la masa térmica disminuye en proporción al área de aberturas respecto del área de la envolvente, puesto que ello implica una reducción de la inercia térmica global y un aumento de la ventilación. Vale finalmente mencionar que experimentos en los Estados Unidos (Givoni, 1998) y en Venezuela (González, 2000) muestran que un edificio construido

⁵ Un techo de placa maciza de concreto de 15 cm expuesto al sol tarda unas 4 horas en conducir hasta la cara interior el calor solar que absorbe, por lo que empieza a aumentar la temperatura radiante media del recinto y transmitir el calor al aire interior a comienzos de la tarde, cuando el calor general es intenso. Llegada la noche, el calor que aún fluye por el material y que se devuelve para salir por la cara exterior es finalmente pequeño comparado con todo el calor absorbido y transmitido durante el día. Un techo así permanecerá todavía caliente por varias horas, hasta que todo el calor absorbido termine de salir a través de sus dos superficies. Si dicho techo fuese muy grueso (por ejemplo, de 30 cm), el calor del sol se manifestaría al interior ocho horas después; pero, si bien la cantidad que se devuelve en la noche es importante, también lo es la cantidad que sigue su camino hacia adentro.

con materiales pesados pero abierto, ventilado y con un buen control solar puede ser de día más fresco que un edificio liviano y presentar condiciones similares de noche si la ventilación nocturna se asiste con ventiladores que incrementen el enfriamiento de la masa térmica.

Las edificaciones vernáculas de las regiones tropicales cálidas son hechas en general con materiales aislantes y livianos, principalmente fibras vegetales y madera. Tales edificaciones son consideradas apropiadas, en razón del rápido enfriamiento que se produce en ellas al caer la noche. Sin embargo, los materiales livianos presentan la desventaja de que no ofrecen solidez estructural y durabilidad. Ya se comentó que si se asegura un buen sombreado y una buena ventilación, la solidez de un edificio de elevada inercia térmica no tiene por qué contravenir los requerimientos de confort térmico. En caso de que se diseñen fachadas al sol, los bloques de concreto de agregado liviano (Alivén) son una solución adecuada para las fachadas más soleadas, pues combinan solidez y resistencia térmica adecuada. En techos, en cambio, la incidencia del sol obliga a complementar cualquier base de techo con algún material aislante, a objeto de asegurar que la temperatura superficial interior no sea mucho mayor que la temperatura del aire. A manera indicativa se muestran en la Tabla 2.9 las resistencias térmicas mínimas requeridas en techos, en función del color de la superficie exterior, y a fin de que la temperatura superficial interior no supere más de 2 °C la temperatura del aire (se asume que la incidencia máxima de radiación solar es de 900 W/m² y que la ventilación es lo suficientemente buena como para mantener la temperatura del aire interior a niveles similares a los de la temperatura del aire exterior).

Tabla 2.9. Resistencia térmica requerida en techos a fin de que la temperatura superficial interior no exceda en 2 °C la del aire exterior (calculado según método de Givoni [1998, 397])

Color exterior	Absortividad	Resistencia térmica requerida (m ² °C/W)	Ejemplos de techos cuya resistencia térmica se encuentra cerca del mínimo requerido*
Claro	0,4	1,0	Losa maciza de concreto de 20 cm, fieltro aluminizado exterior y panel aislante de 2,5 cm. Losa nervada de concreto con bloques de agregado liviano, fieltro aluminizado exterior y friso interior. Losa nervada de concreto con tabelones de arcilla de 6 cm, fieltro aluminizado exterior y panel aislante de 2 cm. Techo a base de tabelones de arcilla, fieltro aluminizado exterior y panel aislante de 2 cm. Lámina liviana de acabado exterior claro y panel aislante de 3 cm.
Medio	0,6	1,8	Losa maciza de concreto de 20 cm, teja criolla y panel aislante de 4 cm. Losa maciza de concreto de 20 cm, acabado exterior obra limpia y panel aislante de 5 cm. Losa nervada de concreto con bloques de agregado liviano, teja criolla y panel aislante de 2 cm. Losa nervada de concreto con tabelones de arcilla de 6 cm, teja criolla y panel aislante de 3,5 cm. Techo a base de tabelones de arcilla, impermeabilizante, teja criolla y panel aislante de 3,5 cm. Lámina liviana de acabado exterior verde o rojo y panel aislante de 5 cm.
Oscuro	0,8	2,5	Losa maciza de 20 cm, impermeabilizante oscuro y panel aislante de 6 cm. Losa nervada de concreto con bloques de agregado liviano, impermeabilizante oscuro y panel aislante de 4 cm. Losa nervada de concreto con tabelones de arcilla de 6 cm, impermeabilizante oscuro y aislante de 6,5 cm. Techo a base de tabelones de arcilla, impermeabilizante oscuro y panel aislante de 6,5 cm. Lámina liviana de acabado exterior oscuro y panel aislante de 6,5 cm.

* No se listan techos de resistencia térmica mayor pues se sobreentiende que cumplen con lo planteado.

Zonas cálido húmedas de Venezuela (zona climática 2: 300 a 800 msnm.)

Las pautas de diseño de la envolvente presentadas para la zona climática 1 (optimización del control solar y la ventilación natural) se mantienen vigentes en la zona climática 2, con la salvedad de que en la noche el clima puede ser fresco, mitigándose la necesidad de evacuar calor a esas horas. El que de madrugada la temperatura pueda llegar a menos de 20 °C obliga en los hechos a cierto control de la ventilación. Ello comporta la inconveniencia de cerramientos extensos siempre abiertos como áreas grandes de bloques de ventilación o de romanillas en espacios de ocupación nocturna. Visto que simultáneamente es imprescindible de día ventilar, el problema se resuelve optando porque sean los usuarios quienes decidan los niveles de ventilación requeridos, operando sobre puertas y ventanas. Del mismo modo, en las noches más cálidas se deberá poder maximizar la ventilación, en especial en edificios de cierta inercia térmica que tiendan a esas horas a estar más calientes, en razón de la restitución al ambiente del calor acumulado durante el día, y previendo a la vez la influencia de las cargas internas en un posible sobrecalentamiento.

Zonas cálido-húmedas a moderadas de Venezuela (zona climática 3: 800 a 1300 msnm.)

Los principios expuestos en los apartados previos se mantienen en esencia en las regiones cuyo clima varíe a lo largo del año entre cálido húmedo y moderado, pero se reduce la necesidad de maximizar simultáneamente al control solar y a la ventilación natural. El diagrama bioclimático de Caracas revela que, de considerarse baja la influencia de las cargas internas, sólo se necesitan corrientes de aire del orden de 0,4 m/s para lograr condiciones de confort en los días más cálidos, siempre que el edificio cuente con un control solar óptimo. Un edificio en esta zona puede luego diseñarse con una ventilación reducida (independiente de la dirección del viento o unilateral) a condición de que el control solar sea rigurosamente resuelto. Se advierte que todavía a esas altitudes, si el control solar y la ventilación natural fuesen ambos deficientes, la perspectiva que se dé malestar térmico estará asegurada.

Ahora bien, apuntar a lo contrario, es decir, reducir el control solar y aumentar la ventilación, resulta más problemático. Ello se debe a que en las horas más cálidas el sol puede calentar los espacios más de lo que la ventilación alcanzaría a enfriarlos. En este tipo de climas, el aire, si bien no llega en los peores casos a estar más caliente que la piel (33 °C en promedio), sí alcanza temperaturas que hacen indeseable cualquier deterioro de los demás parámetros de confort (en particular de la temperatura radiante), deterioro que puede darse fácilmente sin un buen control solar. Concretamente, si se tiene una temperatura del aire de 28 °C y corrientes de aire de 0,4 a 0,8 m/s, la temperatura radiante no puede ser mayor que 28 °C si se desea mantener condiciones aceptables de confort. Es decir, las superficies interiores no pueden estar más calientes que el aire y por lo tanto no pueden recibir calor del sol.

Las condiciones en la mañana y al final de la tarde autorizan en cambio una penetración parcial de los rayos solares acorde con el uso y volumen del espacio, siempre que se pueda ventilar en correspondencia. De esta forma se compensa un aumento temporal y limitado de la temperatura radiante con un enfriamiento convectivo proporcionado (tanto de las personas como de las superficies interiores), puesto que en la mañana y al final de la tarde el aire está más fresco. Conviene en ello vigilar que la radiación llegue oblicuamente hasta las superficies interiores a objeto de reducir la intensidad con que incide, así como evitar el empleo de materiales de poca inercia térmica cuyas superficies se puedan calentar rápido (como alfombras o parquet). Los materiales pesados en cambio no verán aumentar su temperatura de forma importante, siempre que la incidencia del sol sea inclinada y temporal. Lo esencial es que sus superficies no estén a temperaturas superiores a la del aire en las horas más cálidas.

En todo caso, cuando se trate de las condiciones térmicas en la mañana o al final de la tarde, es válido ofrecer la perspectiva de ajustar el control solar y la ventilación abriendo o cerrando las ventanas, en unión con protecciones solares fijas y/o móviles, pudiendo estas últimas ser interiores en esta zona climática (una persiana o una cortina). Ello siempre que se asegure un buen dominio de ambas técnicas, es decir, que exista la posibilidad de regular simultáneamente tanto el control solar como la ventilación natural.

Por otro lado, juzgando que en esta zona climática entre los meses de noviembre y marzo la temperatura del aire puede bajar de noche a menos de 15 °C, cabe preguntarse sobre la perspectiva de situar en la envolvente paredes pesadas ciegas de cara al sol que almacenen calor solar de día y lo emitan al interior de noche (en ello se debe recordar que los cerramientos externos pesados son eficaces sólo a medias para calentar de noche los ambientes, pues a esas horas devolverán buena parte del calor acumulado al exterior). Según la orientación se tendrá que colocar masas térmicas distintas, pues se debe asegurar que el calor se desprenda de noche y no de día. En teoría, para fachadas orientadas sur y para techos se deberá escoger un desfase alto (unas 10 horas, lo cual resulta en los hechos impráctico pues implica espesores grandes), mientras que para fachadas oeste un desfase de 6 horas será suficiente para retrasar la transferencia hasta la noche. Recuérdese que la fachada sur sólo recibirá radiación en los meses en que el sol esté inclinado hacia el sur. Por otro lado, las fachadas este, las cuales reciben sol sólo en la mañana, son poco útiles para calentar de noche, pues comienzan a enfriarse al mediodía.

Sin embargo, en las épocas más cálidas (abril y septiembre) la temperatura del aire es con frecuencia de unos 25 °C a comienzos de la noche y de unos 20 °C en la madrugada, circunstancias para las cuales la temperatura radiante no puede superar 25 y 30 °C respectivamente si la ventilación es deficiente. Ello conduce a usar un desfase que produzca un incremento prácticamente nulo de la temperatura superficial interior por encima de la temperatura del aire a primeras horas de la noche. Lograrlo usando materiales de elevada inercia térmica es poco práctico por los espe-

sores requeridos, incluso en fachadas oeste en las que el calor del sol comienza a absorberse en la tarde. Concretamente, posponer la llegada del calor solar hasta la madrugada sin afectar las condiciones térmicas a comienzos de la noche obliga a recurrir a espesores de alrededor de 25 cm. Tales espesores producen por lo demás una reversión del flujo al ponerse el sol, rebajando la temperatura radiante en la madrugada a niveles similares a los de una pared más delgada y de resistencia térmica mayor (por ejemplo, una pared de bloques huecos de concreto de 20 cm con friso). De asegurarse en cambio corrientes de aire del orden de 0,5 m/s, las superficies podrán alcanzar hasta 30 °C a comienzos de la noche, con lo que el problema se reduce.

De lo anterior se concluye que será preferible en esta zona climática realzar de día el control solar observando la resistencia térmica de los cerramientos expuestos al sol y diseñar pensando en una ventilación regulable que permita cerrar las ventanas cuando de noche haga frío, dejar que la masa térmica interactúe únicamente con el aire y/o simplemente forzar al usuario a abrigarse mejor (en Caracas, la temperatura media fluctúa entre 18 y 23 °C. Considerando que las amplitudes rondan los 10 °C, una envolvente de alta inercia térmica y protegida del sol mantendrá temperaturas superficiales de ese orden, lo que se traduce en temperaturas radiantes que ayudan a mejorar las condiciones en las horas más calurosas y a la vez temperan los ambientes en las horas más frías).

Zonas de clima moderado de Venezuela (zona climática 4: 1300 a 1900 msnm.)

Tal como lo evidencia el diagrama bioclimático de Mérida (Figura 2.16, página 68), en la zona climática 4 la ventilación natural es redundante si se cuenta con un control solar óptimo (no así la renovación de aire por razones de calidad del aire, la cual siempre será requerida, al margen de lo frío del clima). Entre otras consecuencias las ventanas podrán ser más pequeñas y no seguir esquemas tendientes a captar los vientos ni generar ventilación cruzada. Sin embargo, para que ello sea válido la temperatura radiante no puede superar a la del aire en las horas más cálidas, lo que obliga a contar con un buen control solar. De modo que si se diseña sin observar la ventilación o no se asegura una ventilación aceptable se tendrá que restringir al mediodía y a comienzos de la tarde la entrada de sol a través de ventanas y aberturas y maximizar la reflexión y el aislamiento de las partes de la envolvente más expuestas al sol a objeto de no contravenir el confort térmico.

En esta zona climática las temperaturas máximas del aire son de alrededor de 26 °C, lo que permite temperaturas radiantes de 30 y 35 °C cuando se aseguren velocidades de aire de 0,4 y 0,8 m/s respectivamente. Por lo tanto se podrá tolerar cierto calentamiento solar en las horas más cálidas, siempre que se ventile en correspondencia (equivalente de hecho al aceptado en la zona climática 3 en la mañana y al final de la tarde). Los cerramientos al sol podrán así tener acabados de absortividad media y resistencia térmica media, del orden de 0,3 a 0,6 °C.m²/W (paredes de bloques de concreto o arcilla, techos de concreto con tejas) o, alternativamente, la radiación solar podrá penetrar a través de las aberturas oblicuamente y en cantidades reguladas.

Cuando se den condiciones para controlar a la vez la ventilación y la carga solar bastará en esta zona climática que las protecciones solares sean internas (descartándose las externas, más complicadas y costosas), puesto que por lo fresco del aire el calor que pueden atrapar las persianas y cortinas y que luego se emite al ambiente no es un problema (en último caso dicho calentamiento podrá compensarse dejando entrar aire fresco por otra abertura). Los toldos graduables o las contraventanas permeables y abatibles serán también buenas soluciones en las fachadas que reciban el sol de frente pues evitan los inconvenientes que produce el sol sin suprimir la ventilación.

Por otro lado, debido a que de noche hace frío (en promedio 20 °C a comienzos de la noche y 15 °C de madrugada) el clima da pie para usar la masa térmica de la envolvente para emitir calor de noche escogiendo los desfases de acuerdo a la hora en que incida el sol en cada fachada. A diferencia de lo que ocurre en la zona climática 3, a comienzos de la noche la temperatura del aire autoriza temperaturas radiantes medias varios grados superiores a la temperatura del aire, lo que permite usar sin mucho perjuicio paredes pesadas gruesas en fachadas oeste y sur. Ello puede complementarse con cerramientos que tengan materiales aislantes en su cara interior de manera de preservar el calor almacenado, así como las cargas internas (estos cerramientos no serán los mismos que se usen para almacenar y emitir calor, pues al colocar aislante se cubre la masa térmica anulándose su efecto). Adicionalmente, el que bajo condiciones de ventilación se tolere a cualquier hora una penetración limitada y localizada de radiación solar da pie para almacenar cierta cantidad de calor en cerramientos interiores de alta inercia térmica (sobre todo el piso), calor que se incorporará de noche al emitido por los componentes pesados de la envolvente. En compensación se deberá ventilar a conveniencia a fin de contrarrestar una potencial acumulación de calor más allá de lo requerido.

Como beneficio adicional, contar con paredes más calientes de noche reduce la condensación de vapor en sus superficies (lo que se conoce como condensación superficial), fenómeno común en esas altitudes en las que de noche las superficies tienden a alcanzar temperaturas menores que la temperatura de rocío. Esta condensación no sólo deteriora los materiales, sino que afecta la salud al convertirse en receptáculo de hongos y bacterias. Por lo mismo, conviene que la envolvente reciba siempre algo de sol a objeto de impedir su enmohecimiento.

Zonas de clima moderado a frío de Venezuela (zona climática 5: 1900 a 2300 msnm)

Si se sube más en altitud el aire se enfría y la ventilación se vuelve contraproducente. Ello ocurre al entrar en la zona climática 5 (1900 a 2300 msnm.) donde las temperaturas máximas apenas sobrepasan los 20 °C. Un ambiente sin ventilación sensible ubicado en esta zona climática podrá tener hasta una temperatura radiante media de 30 °C en las horas más cálidas. Lo anterior no significa que se pueda aún dejar completamente de lado el control solar, puesto que el sol es fuerte y

puede calentar las superficies hasta temperaturas radiantes superiores. En caso que se prevea una situación así se tendrá que ventilar en correspondencia.

Se debe advertir que reducir la resistencia térmica de la envolvente a objeto de aumentar las temperaturas superficiales interiores durante el día puede contravenir el resguardo nocturno del calor interior bajo condiciones en que la temperatura del aire exterior no supera los 13 °C. Las pautas de diseño dirigidas a regular la temperatura radiante media atañen de hecho más al frío nocturno que al calor diurno. Convendrá en tal sentido que las fachadas al sol sean de cerramientos pesados (pudiendo en adición ser oscuras) de modo que descarguen hacia adentro al final de la tarde y en la noche parte del calor solar que acumulen en el día. Ese calor, unido al que se genera en los espacios, podrá luego preservarse por medio de un aislamiento interior en otras paredes y/o el techo. En vista que una configuración como esa puede generar espacios demasiado fríos en el día, se deberá en contrapartida permitir el ingreso selectivo del sol a través de las aberturas y ventanas, con lo cual no sólo se introduce calor, sino que se calienta la masa térmica del piso y las divisiones internas. En un clima así, según el uso del espacio, podrán incluso permitirse superficies vídriadas herméticas extensas en espacios grandes, corredores o patios, a condición de prever ventilar por medio de aberturas situadas allende y colocar protecciones internas (cortinas o persianas) que se puedan desplegar cuando el efecto invernadero se vuelva excesivo en los días más despejados y cálidos. Inversamente, en los días fríos o medianamente nublados, provocar un efecto invernadero usando radiación directa y/o difusa conseguirá calentar los ambientes.

Zonas de clima frío de Venezuela (zona climática 6: 2300 msnm en adelante)

Por encima de 2300 msnm el problema pasa a ser el frío. A pesar de que se le puede combatir con maniobras de adaptación como abrigarse bien, a grandes altitudes tales maniobras pudiesen no bastar, sobre todo de noche. Sin embargo, en Venezuela, es posible por medio del diseño bioclimático lograr condiciones suficientemente cálidas como para que los usuarios puedan realizar sus actividades sin necesidad de abrigarse en exceso. Ello se logra valiéndose de la radiación solar, la cual en las regiones altas presenta una intensidad elevada, aún mayor que en las regiones bajas.

En esta zona climática la temperatura del aire máxima es de 17 °C a 2300 msnm y 13 °C a 3600 msnm y la temperatura mínima inferior a 10 y 5°C respectivamente. Ante tales condiciones y en ausencia de ventilación, la temperatura radiante media necesaria para restituir el confort térmico durante el día debe estar entre 35 y 40 °C, lo que en la práctica significa usar el sol para calentar las superficies interiores.

El calentamiento solar pasivo comprende acciones relativas a: a) *la protección contra los vientos fríos*, obstruyendo con elementos constructivos la llegada del viento en el edificio y en los lugares donde permanecerán las personas; b) *la captación de la radiación solar durante el día*, orientando los cerramientos con arreglo a la ubicación del sol para calentar la envolvente y las divisiones

internas y/o generar el efecto invernadero y c) *la preservación del calor solar tanto de día como de noche*, almacenándolo en los materiales y/o aislando los espacios internos. El aislamiento comprende no sólo maximizar la resistencia térmica en las superficies interiores de los cerramientos, sino evitar la infiltración de aire frío, sobre todo de noche.

Protección contra los vientos fríos: Cualquier obstáculo ancho que se interponga entre el viento atmosférico y las fachadas produce una fuerte disminución de la velocidad del viento a alturas inferiores a la del obstáculo, perturbación que desaparece completamente a una distancia de aproximadamente 12 veces esa altura. En tanto que en climas cálidos la pauta es evitar tales obstáculos – o en último caso adecuar el diseño de las aberturas a los mismos – en climas fríos su presencia será por el contrario beneficiosa, por dos razones: por un lado, bloquean la llegada del viento en condiciones en que no conviene ventilar los espacios más allá de lo requerido por razones de calidad de aire y, por otro, atenúan el enfriamiento convectivo de la envolvente al reducir la velocidad del aire en sus inmediaciones (a menor convección mayor será la temperatura para la cual los cerramientos al sol alcanzarán el equilibrio).

Captación de radiación solar durante el día: Es común en el páramo andino conservar la configuración típica de las casas coloniales con grandes patios centrales. En tanto que en climas cálidos tales patios sirven para generar ventilación cruzada en los ambientes y situar árboles altos de copa ancha que sombreen paredes interiores y techos, en climas fríos su función será contar con un espacio abierto al sol y protegido del viento que permita calentar los cerramientos que den hacia él. Si el clima es muy frío, resulta aún provechoso cerrar el patio con grandes superficies vidriadas a fin de generar el efecto invernadero. Conviene luego usar en los patios y corredores pisos y paredes oscuros y pesados (adobe, concreto, caico, piedras, granito, ladrillos) que absorban la energía solar directa, difusa y reflejada y la reemitan al ambiente gradualmente y con retardo. Con ello se aumenta la temperatura radiante y se calienta por convección el aire, el cual circula luego por el resto de los ambientes. En general, crear el efecto invernadero en espacios en los que el deslumbramiento visual pueda tolerarse o controlarse es muy útil en climas fríos. Esto se puede hacer de múltiples maneras. Para que tal efecto sea eficaz se deben usar vidrios de alta transmisividad ante la radiación solar y de transmisividad nula ante la radiación infrarroja (vidrios crudos, laminados o templados, siempre claros).

Dimensionar y escoger acertadamente las áreas y materiales de pisos, paredes y ventanas a fin de acentuar el efecto invernadero y/o almacenar con provecho el calor del sol implica en la práctica atender ciertas consideraciones constructivas sutiles, las cuales se exponen a continuación:

Primero, puesto que el vidrio es un material de poco espesor, cuanto más aumente su área respecto del área total de cerramientos, menor será la masa térmica global disponible para almacenar

calor. Al respecto se estima una relación no menor de 6:1 entre el área de los cerramientos cuya masa térmica se ha de calentar y el área vidriada destinada a transmitir el sol.

Por otro lado, puesto que el vidrio tiene poca conductancia (debido también a su espesor), los espacios que cuenten con las áreas vidriadas más extensas se enfriarán de noche más rápido. De ahí que sea inadecuado maximizar el área de cerramientos de vidrio en dormitorios y espacios de uso nocturno, donde corresponderá contar con ventanas de tamaño moderado para generar el efecto invernadero. En todo caso convendrá siempre frenar el enfriamiento conductivo nocturno a través de los vidrios usando postigos o contraventanas aislantes, desplegando cortinas gruesas y/o usando vidrios dobles con cámaras de aire, todo lo cual apunta a aumentar la resistencia térmica del área vidriada en aquellas horas en que se requiera preservar el calor.

Usar materiales pesados asegura el desprendimiento de calor por largo tiempo pero no el aumento rápido y elevado de la temperatura superficial y por ende de la emisión de radiación infrarroja, que es la que acentúa el efecto invernadero. Un piso de contrachapado expuesto al sol (material liviano de baja conductividad) se calentará rápido y palpablemente (por ejemplo, 6 a 10 °C, dependiendo de la temperatura y velocidad del aire contiguo), pero sólo en su superficie (los primeros milímetros) y con tendencia a enfriarse también rápido cuando el sol deje de incidir. En cambio, un piso de caico sobre base de concreto (materiales pesados de conductividad media) sometido a las mismas condiciones de soleamiento irá *tragando* el calor más lenta, repartida y profundamente, lo que hace que su temperatura superficial aumente comparativamente poco (2 a 3 °C). En contrapartida un piso así seguirá devolviendo al ambiente el calor acumulado mucho después de que el sol haya dejado de incidir (se advierte que para que este proceso se dé el piso no puede tener alfombras o estereras que cubran su masa térmica). Se concluye que si lo que se busca es acentuar el calentamiento diurno, se deberán usar acabados oscuros y de poca inercia térmica en aquellos sitios en los que incida el sol, mientras que si la meta es almacenar el calor para su posterior uso, se deberán usar materiales también oscuros pero de elevada inercia térmica.

Será mucho más útil almacenar calor en las divisiones internas que en las fachadas, puesto que las primeras desprenderán todo hacia adentro y las segundas devolverán al menos la mitad de ese calor al exterior al caer la noche. En adición, las fachadas verán fuertemente reducido su calentamiento debido al enfriamiento convectivo con el aire frío exterior. Servirse de las fachadas conlleva por tanto cargarlas de día al máximo, para lo cual deberán ser oscuras y tener espesores que produzcan desfases conformes al tiempo en que el sol incida y la hora en que se desee que el calor entre. Un modo de evitar que el calor así almacenado se pierda es cubrirlas por fuera al final de la tarde con algún sistema móvil de aislamiento externo (grandes contrapuertas corredizas).

En caso que una pared pesada de una fachada reciba calor sólo en su cara interior (por incidencia de la radiación solar que penetra a través de una abertura o por reflexión de superficies contiguas)

convendrá colocarle aislante por fuera, pero esta vez fijo. En tales casos la capa de material pesado podrá ser de aproximadamente 10 a 12 cm, ya que es hasta esa profundidad que se almacena el calor que finalmente se devuelve. De manera similar, un piso disipará parte de su calor hacia el terreno (cuya masa térmica es parecida), por lo que usar pisos pesados de espesores mayores que 10 a 12 cm resulta superfluo para reemitir el calor hacia los ambientes en la noche.

En cuanto a las divisiones internas, la mejor condición es que estén expuestas el mayor tiempo al sol y a la vez al aire cálido del efecto invernadero. De esta forma podrán alcanzar temperaturas bastante superiores a las que alcanzan las fachadas. Las aberturas y superficies vidriadas deberán por ende diseñarse de forma de asegurar que la radiación penetre hasta la masa térmica interior.

Preservación del calor solar: Tan importante como captar el calor será conservarlo, sobre todo de noche. Las rendijas entre paredes y puertas, paredes y ventanas o paredes y techos deberán controlarse, pues cualquier infiltración de aire exterior puede anular las acciones destinadas a conservar el aire cálido. Por ende, las puertas y ventanas tendrán que ser herméticas y estar bien selladas. No obstante, dependiendo del uso del espacio y la cantidad de personas que en él se encuentre habrá que aceptar por razones de calidad del aire un mínimo de renovación. En ambientes donde se genere humo o contaminantes específicos en cantidades perjudiciales deberán poderse abrir las ventanas o las puertas, de forma de generar caudales acordes, según el caso.

De la misma forma, deberá evitarse el uso de elementos conductores que separen los ambientes con el exterior, así sean éstos de áreas pequeñas. Por ejemplo, una ventana de vidrio doble con marco de aluminio perderá más calor a través del marco que a través de toda el área de vidrio. Asimismo, cualquier elemento estructural metálico no cubierto como una viga colindante de techo dejará salir calor en cantidades indeseables. A tales zonas pequeñas y débiles ante el paso de calor se les conoce como puentes térmicos. Evitar los puentes térmicos implica en consecuencia usar materiales de mayor resistencia térmica para los marcos, las puertas, etc. (madera, por ejemplo) o cubrir y sellar dichos puentes con materiales aislantes.

En general, será importante que los cerramientos que no se usen de día para almacenar calor cuenten con una capa de aislante en su cara interior que de noche bloquee la salida de calor por conducción. Esto vale también para los cerramientos pesados cuya inercia térmica no se use, pues al no recibir calor de ninguna fuente tenderán a estar siempre fríos y dispuestos a “tragarse” el calor que se genere en el ambiente (personas, equipos o incluso calefacción eléctrica o chimenea).

2.4.2.2 Divisiones internas y distribución espacial

Respecto del confort térmico, la conveniencia de subdividir un edificio aumenta en la medida en que el clima se haga más frío. Los argumentos para que esto sea así son tres: a) en un clima cálido, cuanto menor sea la cantidad de divisiones internas, más fácil será lograr una ventilación cruzada a lo largo y ancho del edificio; b) en un clima cálido, cuanto menor sea la cantidad de divi-

siones internas, menor será el calentamiento nocturno producto de la masa térmica. Inversamente, en un clima frío, cuanto mayor sea la cantidad de divisiones internas, mayor será la masa térmica útil para almacenar de día calor y emitirlo en la noche; c) en un clima cálido, cuanto menor sea la cantidad de divisiones internas, mayor volumen corresponderá a cada espacio, facilitando la dispersión del calor. Contrariamente, en un clima frío, cuanto mayor sea la cantidad de divisiones internas, menor volumen corresponderá a cada espacio, lo cual limita la dispersión de calor hacia áreas no ocupadas por las personas. En lo que sigue se enlazan brevemente estas tres consideraciones con pautas concretas de diseño.

En aquellos climas en que la ventilación natural sea prioritaria, la mejor solución será evitar separar los espacios con divisiones internas, dejando como único criterio para su creación la necesidad de proporcionar privacidad acústica y visual. Más aún, en caso que el clima sea caliente y húmedo (zona climática 1) y haya que distribuir varios espacios en una planta compacta, se deberá valorar seriamente la perspectiva de sacrificar tal privacidad – así sea parcialmente – en aras de permitir que el aire circule de un espacio a otro. Ello conlleva el uso de puertas permeables, las cuales pudieran eventualmente tener contrapuertas o romanillas basculantes que permitan a las personas regular los niveles de privacidad y ventilación según las circunstancias.

La ausencia de divisiones internas conlleva la creación de plantas abiertas. Una planta abierta significa localizar las distintas funciones asociadas a los ambientes de las edificaciones en un espacio único, sin divisiones. La separación de las funciones puede conseguirse por medio de barreras simbólicas como el mobiliario, cambios de nivel o divisiones permeables. En viviendas, muchas funciones tradicionalmente asociadas a ambientes individuales como la sala de estar, el comedor, la cocina, etc., pueden localizarse en un espacio único o en espacios interconectados de manera que se permita el libre flujo de aire entre ellos.

Más allá de su ventaja en la ventilación, abolir las divisiones internas implica también aumentar el volumen de los espacios, con lo cual se disemina el calor generado en los ambientes y se reduce el riesgo de saturación de los mismos por la humedad que producirían las plantas, las personas y sus actividades (ciertamente, en tanto que el edificio esté bien ventilado, ese calor y esa humedad serán evacuados debidamente).

En plantas abiertas de gran volumen, cuando la altura libre sea de cierta magnitud, el aire caliente que sube (sobre todo en días de poco viento) y el aire en contacto con el plafón y calentado por éste tenderán a estancarse, por lo que convendrá situar aberturas altas que creen corrientes de ventilación que lo expulsen y a la vez enfríen el plafón (rebajando así la temperatura radiante) o aberturas en el techo que desalojen ese aire. Esto último crea de paso un caudal térmico útil en situaciones de poco viento.

Ya se señaló con base en los diagramas bioclimáticos que en las regiones de Venezuela de baja altitud (zonas climáticas 1 y 2) las amplitudes diarias de temperatura y la elevada humedad limitan la utilidad de la masa térmica en tanto que recurso para obtener condiciones de confort durante el día, incluso asociándola con la ventilación nocturna. Más aún, en climas con tardes calientes y noches cálidas, contar con una masa térmica cuantiosa produciría de noche temperaturas mínimas demasiado elevadas, en razón del calor que expulsarían a esa hora los cerramientos. La escasez de divisiones internas conlleva en los hechos una disminución de la inercia térmica global por metro cuadrado de construcción. De ahí que otra ventaja importante de las plantas abiertas sea la de aminorar la cantidad total de calor que almacenarán los cerramientos en aquellas horas en que el aire esté más caliente y por ende la cantidad que emitirán al final de la tarde y en la noche.

En la medida en que se suba en altitud, disminuye la exigencia de ventilar y en consecuencia la utilidad de apelar a plantas abiertas, al tiempo que aumenta gradualmente la obligación de usar la masa térmica con el objeto de aumentar la temperatura resultante interior en la noche. Ya en la zona climática 3 (800 a 1300 msnm) se puede lograr confort térmico con una ventilación menor, siempre que el control solar sea óptimo, por lo que se puede prescindir de las plantas abiertas. Sin embargo, el clima diurno a esas altitudes hace que éstas sean aún apropiadas, siempre que en espacios de uso nocturno se ofrezca la posibilidad de atenuar los niveles de ventilación y preservar el calor interior. Contrariamente, considerando que en un edificio de uso sólo diurno la exigencia de preservar el calor de noche no se presenta, el clima faculta combinar envolventes muy permeables con pisos y techos pesados a fin de inducir una eficiente ventilación nocturna que enfríe la masa térmica y reduzca al día siguiente la temperatura radiante media.

Un edificio en Venezuela en la zona climática 3 podrá tener tantas divisiones internas como lo demande la funcionalidad del diseño, siempre que se tomen en cuenta las siguientes consideraciones constructivas:

Si el control solar es óptimo, se podrá tolerar una ventilación reducida a condición de que alcance para evacuar el aire caliente que se acumule debido a las cargas internas. Tal ventilación podrá ser dinámica unilateral o por corrientes térmicas (efecto de chimenea) siempre que se garanticen caudales conformes al volumen del espacio y su uso. En recintos con poca cantidad de personas realizando actividades ligeras se podrán aceptar caudales mínimos de 8 CAH (cambios de aire por hora = volúmenes de local por hora), lo cual se puede obtener con una ventilación unilateral a través de una abertura cuya área sea de aproximadamente 10% el área de piso⁶. Si la densidad fuese mayor, el área de abertura deberá crecer en proporción. En baños y espacios de uso circunstancial ubicados en edificios altos – como por ejemplo maleteros o depósitos – se podrá contar con el efecto de chimenea a través de rejillas de ventilación que den hacia ductos cuya altura sea

⁶ Valor recomendado en la Gaceta Sanitaria (GACETA OFICIAL N° 4044 E, 1988). Este porcentaje resulta en promedio en una ventilación unilateral del orden de 8 CAH.

la del edificio, de modo de tener un caudal térmico de magnitud suficiente para mantener el aire del recinto renovado, no saturado y libre de malos olores⁷. Los espacios de uso breve y eventual como escaleras o pasillos podrán prescindir de ventilación, siempre que estén aceptablemente resguardados del sol y no violen las regulaciones contra incendios referentes a la acumulación de humo en vías de escape. De todos los tipos de ambientes residenciales son las cocinas las más exigentes debido al calor y los gases que en ella se generan, por lo que deberán contar con una renovación de por lo menos 30 CAH.

Ahora bien, cuando las divisiones internas sean de una cantidad tal y estén distribuidas de modo que supriman la ventilación cruzada, será fundamental a esas altitudes y en espacios con producción interna de calor evitar el uso de materiales aislantes en las caras internas de pisos y paredes, incluyendo maderas, alfombras y otros cubrimientos livianos. De lo contrario se convertirán en trampas del calor que se genera al interior, pudiendo éste llegar hasta niveles muy irritantes. Conviene en tales ambientes usar cerramientos pesados, pues éstos, al estar lejos del sol, tenderán a mantenerse relativamente frescos y dispuestos a absorber el calor que se genere y disiparlo en la masa térmica sin mayores consecuencias.

Es importante subrayar que las indicaciones previas se refieren a los casos en que por criterios funcionales se deba plantear un número de divisiones internas que dificulte la ventilación cruzada. En un clima como el de la zona climática 3, la mejor solución en un edificio de uso diurno-nocturno será asegurar una ventilación cruzada en correspondencia con un buen control solar y permitir limitar la ventilación cuando haga frío. Por lo demás, una solución así no sólo mantendrá los ambientes frescos de día, sino que calentará por convección lenta y moderadamente los materiales, calor que podrá aprovecharse de noche para moderar la temperatura interior, siempre en armonía con una ventilación ajustable.

Tal como se discutió con anterioridad, para altitudes mayores (zonas climáticas 4, 5 y 6) la necesidad de ventilar disminuye y el provecho de calentar los cerramientos aumenta. Luego de 1800 msnm se planteará cada vez con mayor fuerza el ingreso controlado del sol a los fines de calentar las divisiones y superficies interiores. De igual forma, en ambientes en los que no haya ingreso directo de sol convendrá usar aislantes térmicos, de manera de preservar el calor del aire interior.

En el diseño bioclimático, la ubicación relativa de los espacios se hará de manera que los beneficios sean máximos en los ambientes más exigentes. En climas cálidos, los espacios de permanencia prolongada (habitaciones, estudios, recibos, salones de clase, lugares de trabajo, etc.) deberán situarse en aquellas zonas en que el control solar y la ventilación sean óptimos. Ello apunta idealmente al ala norte del edificio y, subsiguientemente, al ala sur, donde se hace más fácil el control

⁷ Por ejemplo, una rejilla de ventilación de 0,35 x 0,35 m en un ducto de ventilación de altura equivalente a 5 pisos producirá un caudal térmico de aproximadamente 6 a 8 CAH en un baño de 6 m².

solar. Obviamente, la decisión estará subordinada a la dirección predominante del viento y a la factibilidad de sombrear mediante obstáculos externos. Inversamente, los lugares de menor permanencia y por ende menos exigentes (baños, lavaderos, áreas de servicios, escaleras, pasillos, depósitos, etc.) quedarán en las partes más difíciles de proteger del sol, que son en principio los lados este y oeste. Ubicados de esa forma tales espacios se convierten en zonas *tapones* o zonas de transición desde las condiciones menos favorables hasta las más favorables.

Por otro lado, cuanto más se eleve un espacio sobre el nivel del suelo, más habrá potencial para ventilar, pues el viento llegará con más fuerza, al tiempo que disminuirá el riesgo de que obstáculos externos se interpongan entre el viento aguas arriba y las aberturas. En edificaciones de una planta situadas en zonas con una vegetación no muy alta pero abundante que anule la libre llegada del viento, se podrá considerar levantar el edificio sobre columnas o pilotes, lo cual trae como beneficio adjunto la eventual protección contra las inundaciones. Bien que lo dicho apunta a situar los espacios de mayor permanencia en plantas altas, cuando se trate de la última deberá controlarse el calentamiento solar del techo, el cual puede revertir cualquier beneficio ligado a la altura. En adición, un espacio alto será en principio más difícil de sombrear mediante obstáculos externos, los cuales habitualmente cubren las partes bajas del cielo.

En la medida en que el clima se vuelva más frío se irán trocando las reglas recién expuestas: los espacios de mayor permanencia se irán desplazando hacia el sol, al tiempo que deberán resguardarse más del viento. Al respecto ya se presentaron las pautas básicas.

2.5 Métodos de comprobación. Modelización del edificio

Todo método que calcule el comportamiento térmico de un edificio se basa en algún tipo de modelización físico/matemática del mismo. En el apartado 2.1 se comentaron algunos métodos de comprobación, así como su alcance y limitaciones (páginas 26 a la 30). Los hay desde muy simples, basados en hipótesis lineales, hasta muy detallados, basados en sistemas de ecuaciones diferenciales y métodos numéricos. Empero, por más que la modelización sea *detallada*, será siempre una simplificación de la realidad. Aunque, como lo expresa M.F. Aburdene (citado por Hensen [1991, 1.4]), esto no es un impedimento para desconfiar de su capacidad de análisis y predicción:

La simulación es un proceso que consiste en desarrollar un modelo simplificado de un sistema complejo y utilizarlo para analizar y predecir el comportamiento del sistema original. ¿Por qué la simulación? Porque los sistemas reales son a menudo difíciles o imposibles de analizar en toda su complejidad. Sin embargo, hacerlo no es en general necesario. Si se extraen cuidadosamente del sistema real los elementos relevantes según criterios preestablecidos y se ignoran los que son relativamente insignificantes (algo no tan fácil como suena), es posible desarrollar un modelo que pueda utilizarse para predecir el comportamiento del sistema real con buena aproximación.

Los *criterios establecidos* encuentran así correspondencia con el conjunto de elementos con que se describe al sistema real, lo que depende de la naturaleza del sistema y los objetivos subyacentes. En tal sentido, se han desarrollado diferentes *tipos de métodos*, cuya pertinencia y alcance están sujetos a hipótesis. Marsh (2003) divide estos tipos de métodos en: a) *Métodos estáticos*: aquellos que ignoran el comportamiento dinámico de los edificios, al limitar su caracterización a las propiedades térmicas relativas a la circulación del calor (desatendiendo las relativas a su almacenamiento), específicamente la conductancia de los componentes de la envolvente o de la envolvente como un todo. Entre estos métodos están los ya mencionados *métodos manuales* de estimación del gasto energético de edificios, concretamente, el método de los grados-día y el método de los intervalos de ASHRAE (ASHRAE, 2009, 19.17-19.22). Su simplificación es suponer que la relación entre las condiciones exteriores e interiores es lineal e instantánea, cuando en realidad es el resultado del historial térmico (normalmente de una o varias horas, según la inercia del edificio). Sin embargo, bajo ciertas hipótesis, dan resultados globales buenos (cuando el edificio se mantenga en equilibrio térmico y el cálculo integre los ciclos); b) *Métodos dinámicos simples*: mediante el análisis estadístico de los resultados de la experimentación o la simulación dinámica es posible plantear patrones de comportamiento típicos que se expresen de forma práctica y sencilla (regresiones, tablas, ábacos, etc.). Con este tipo de análisis se puede, entre otras cosas, readecuar los métodos estáticos, a fin de incluir en la caracterización de sus variables el efecto dinámico; c) *Métodos de factores de respuesta*: se basan en una aproximación analítica y a la vez simplificada de la respuesta dinámica de la envolvente a las variaciones del clima. Modelizan estas variaciones usando funciones matemáticas (p.ej. sinusoides, funciones armónicas) y describen la respuesta de los cerramientos de forma incremental. Derivan así en un conjunto de fórmulas matemáticas cuya aplicación secuencial se acompaña de especificaciones y cuyo resultado final es la evolución de la temperatura interior. La variante más usada es el *método de transmitancia* o *método Cibse* (Cibse, 2006). Este método se basa en el concepto de admitancia, que es esencialmente una conductancia dinámica dependiente de las fluctuaciones de la temperatura del edificio alrededor de su valor medio (el método Cibse es el que usa uno de los software más difundidos, el *Autodesk Ecotect Analysis* [Marsh, 2003]); d) *Métodos numéricos de simulación dinámica computarizada*: se trata de los ya mencionados procedimientos basados en discretizar el dominio de estudio en mallas bidimensionales o tridimensionales de *elementos finitos* o *diferencias finitas* y aplicar en cada unidad de discretización las ecuaciones que rigen el almacenamiento y la transferencia del calor, lo que lleva al planteamiento de grandes sistemas de ecuaciones no lineales cuya convergencia se logra por métodos numéricos. La mayoría de los programas de simulación utilizan esta modelización. A diferencia de los que usan métodos simplificados del tipo factores de respuesta, y dependiendo de la complejidad de lo simulado y la potencia del procesador, éstos métodos, por su meticulosidad, requieren de mayor tiempo de procesamiento.

Si bien el desarrollo de los métodos numéricos de simulación dinámica sería imposible sin la computación, el uso de la computación no se limita a los métodos numéricos de simulación dinámica. Cualquiera de los tipos de modelización resumidos arriba se puede programar (se ha programado) con miras a facilitar su uso, diversificarse y adaptarse a objetivos de mayor alcance. Sobre los programas de simulación existentes (comerciales, académicos, software libre) se han hecho estudios que los caracterizan y clasifican con base en criterios como los tipos de modelización adoptados (un mismo programa puede de hecho comportar diversos tipos de modelización según las preferencias del usuario o el aspecto específico que se modele), así como criterios relativos a su grado de actualización respecto del estado del arte (p.ej. la inclusión de criterios de confort adaptativo), la interface y modelado gráficos, la inclusión de otros aspectos ambientales como los acústicos o lumínicos, el acoplamiento de sistemas de certificación ambiental, el análisis económico, la disponibilidad de archivos de datos meteorológicos, de archivos de datos de componentes y materiales, etc. (Marsh, 2003; Martínez *et al.*, 2006; Crawley *et al.*, 2005, 2008).

En Venezuela, la única línea de investigación consecuente orientada a producir software de simulación dinámica del comportamiento térmico de los edificios para su uso en la arquitectura es la desarrollada en la Universidad del Zulia por el Laboratorio de Simulación Computacional del Departamento de Energía de la Facultad de Ingeniería, en sociedad con el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura. En el marco de esta línea de investigación se desarrolló, primero, un modelo bidimensional llamado EVITA (Almao *et al.*, 1998) orientado a simular una sección de vivienda simple, y, segundo, la extensión de ese modelo a las tres dimensiones (EVITA 3d [Dopazo *et al.*, 2004]), ambos basados en el método de los volúmenes finitos. A pesar del esfuerzo sostenido en mejorar la practicidad de la propuesta y la valiosa experiencia académica que representa, estos modelos no han trascendido el ámbito de la investigación en esa universidad, en razón de la dificultad de competir con software internacional de mucha mayor versatilidad. Sin embargo, la experiencia derivó en una propuesta muy importante de una ordenanza sobre la calidad térmica de las edificaciones en el Municipio Maracaibo, la cual ha sido adoptada y se encuentra actualmente vigente (Almao *et al.*, 2005). La misma establece que los edificios a ser construidos deben cumplir con ciertos requisitos relativos a la transmisión de calor de la envolvente, los cuales se pueden verificar desde la etapa de diseño mediante la aplicación de un modelo simplificado del comportamiento dinámico de los edificios que fue programado para uso de los profesionales que introduzcan solicitudes de construcción en la ingeniería municipal.

Otra propuesta venezolana interesante de modelización orientada a calcular las condiciones térmicas interiores de los edificios es la de Hobaica (1993), enmarcada en los métodos simplificados del tipo factores de respuesta e inspirada en una analogía con los circuitos eléctricos. Esta propuesta fue desarrollada por Hobaica en el CSTB de Francia (ver el apartado 1.2, página 10) y luego validada con numerosas mediciones en viviendas y edificios del país. Consiste en determi-

nar, primero, el incremento de la temperatura media interior respecto de la exterior con base en una estimación de las ganancias medias de calor, y luego, mediante fórmulas basadas en parámetros que dependen de las fluctuaciones térmicas y las propiedades de los materiales de la envolvente, el desfase y amortiguamiento producido por ésta en la curva de la temperatura exterior, lo que lleva a la temperatura máxima interior y a la hora en que ésta se presenta. Si bien el método no ha trascendido el ámbito académico, con él se hicieron estudios y certificaciones de sistemas constructivos validados igualmente con mediciones experimentales (Hobaica *et al.*, 2000).

2.6 Confluencia de los tipos de métodos y orientación actual

Hoy en día el escrúpulo por el detallismo y la exactitud propios de la simulación numérica así como su naturaleza académica y analítica vienen cediendo ante una concepción más operativa de la utilidad de un software desde el punto de vista de la práctica profesional de la arquitectura y, en general, de toda actividad profesional relacionada con el ciclo de vida de un edificio. Sin que ello tampoco signifique desconocer las líneas de investigación del análisis numérico (hoy ya tradicionales y convencionales), la tendencia es hacia la integración y procesamiento de toda información provechosa desde la perspectiva de la gestión de los edificios, sin condicionar la naturaleza de su origen. Esta es la visión del ya mencionado proceso de generación y gestión de datos conocido como Modelado de información de edificios (*Building Information Modeling, BIM*) (Apartado 2.1, página 28). BIM puede entenderse como una *meta-modelización*, en cuanto a que considera los productos de modelizaciones particulares como *objetos* sistematizables. El paradigma de este enfoque ambicioso es el mismo que había venido inspirado le puesta en mercado de programas de simulación del comportamiento térmico de los edificios que dejan a un lado la modelización detallada, para basarse en métodos más simples, buscando con ello un *feedback* adecuado a las etapas tempranas e intermedias del proceso de diseño (caso del mencionado software *Autodesk Ecotect Analysis* [Marsh, 2003]). Las empresas que desarrollan software con la filosofía de BIM (Graphisoft, Bentley Systems, Autodesk) priorizan en esta primera instancia los criterios comerciales, de gestión y construcción, pero también los criterios ambientales, en razón de la creciente importancia que se les da hoy colectivamente.

Esta perspectiva ha renovado métodos tradicionales que habían comenzado a ser vistos como anticuados o de interés secundario frente al poder de procesamiento de la computación (métodos, de hecho, como los que se han venido comentado en el presente capítulo), en tanto que potencialmente incluíbles en un sistema de manejo de información de *segundo orden* provechoso en las etapas tempranas o intermedias del proceso de diseño. En la producción de este tipo de información vale cualquier tipo de modelización, siempre que la misma derive en resultados útiles. Un ejemplo concreto es el uso de la simulación numérica detallada para generar (a la manera de los métodos dinámicos simples) regresiones, ábacos o cualquier tipo de información generalizable y utilizable en la toma de decisiones, algo que antes se hacía (y todavía hoy, dependiendo de la

naturaleza del problema) mediante estudios experimentales. Como ejemplos se pueden mencionar los estudios paramétricos generadores de ábacos que relacionan la reducción de la temperatura diurna en edificios ventilados de noche en función de la amplitud de la temperatura exterior y la inercia térmica del edificio (Shaviv *et al.*, 2001; Pfafferott *et al.*, 2003) o la generación de curvas de carga de climatización de edificios tipo en función de la temperatura exterior (Pfafferott *et al.*, 2005; Ghiaus, 2006; Breesch y Janssens, 2010). Para que esta información genérica de fácil lectura y aplicabilidad trascienda más de lo que tradicionalmente ha venido haciéndolo (en forma de artículos o libros), debe incorporársele a un sistema de manejo de información computarizado y acoplado al software de diseño, modelización y simulación, a la manera en que lo prevé BIM.

En esta onda de explotar los resultados de la simulación dinámica para definir patrones de comportamiento y generar información genérica de utilidad en las etapas tempranas del proceso de diseño se propone, en el capítulo siguiente, un método el cual, partiendo de los resultados de la simulación dinámica o de mediciones experimentales, y mediante la aplicación de modelos de regresión lineal simple a esos resultados, genere patrones genéricos del comportamiento del edificio desligables del clima concreto en el que se realizó la simulación o la experimentación.

2.7 Referencias del capítulo 2

- AEC (2003) *Hawaii Guidelines for Energy Efficient Buildings*. Architectural Energy Corporation. Disponible en web: <<http://www.archenergy.com/library/general/hawaiiig/>>.
- Ajibola, K. (2001) *Design for comfort in Nigeria. A bioclimatic approach*, Renewable Energy, Volume 23, Issue 1: 57-76.
- Akbari H. y Konopacki S. (2005) *Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies*. Energy Policy. Volume 33, Issue 6, April 2005, Pages 721-756.
- Almao N., Rincón J. y González E. (1998) *EVITA: Computational model for evaluating buildings thermal efficiency*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Vol. 21, N° 1, 74-84.
- Almao N., Verónica Reyes V., Quirós C., Luzardo A. (2005) *Hacia una normativa sobre la calidad térmica de las edificaciones en Maracaibo*. Revista Tecnología y Construcción, Vol. 21, N° 3, IDEC/FAU/UCV, Caracas, sep. 2005.
- Altavilla F., Vicari B., Hensen JLM., y Filippi M. (2004) *Simulation Tools for Building Energy Design*. In: Proc. Ph.D. symposium Modelling and Simulation for Environmental Engineering, Czech Technical University Prague, 16 April.
- Alvarez, F. (1983) *Atlas climatológico de Venezuela*. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Aparcedo L. Yumely del V., Martínez S. Gladys M.. Tutores: Cohen Miguel, Hernandez Nelsón, Segura Julio. (1993) *Procedimiento para la determinación de zonas de "confort" en climas tropicales*. Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuelas de Ingeniería Mecánica y de Ingeniería Hidrometeorológica. Grado Académico: Ing. Mecánico.
- Arens, Edward A, & Watanabe, N.(1986). A Method for Designing Naturally Cooled Buildings Using Bin Climate Data. UC Berkeley: Center for the Built Environment. Disponible en web: <<http://escholarship.org/uc/item/8x28q3qs>>.

ASHRAE (2009) *Ashrae Handbook – Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISBN-10: 1933742542.

ASHRAE Standard 55 (1981) *Thermal environmental conditions for human occupancy*.

ASHRAE Standard 90.1 (2010) *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*.

Auliciems A. (1981) *Towards a psycho-physiological model of thermal perception*. International Journal of Biometeorology., 26 (suppl.) p 68-86. Disponible en Web: <<http://www.springerlink.com/content/754028j0u8q06965/>>.

Auliciems A., Szokolay S (2007). *Thermal Comfort*. PLEA Note 3 Design Tools and Techniques, in Association University of Queensland Dept. Architecture. Second edition. Disponible en web: <<http://www.arct.cam.ac.uk/PLEA/Notes.aspx?p=9&pid=9&ix=603>>.

Auliciems, A. (1983) *Psychophysical criteria for global thermal zones of building design*. International Journal of Biometeorology n° 8, Part 2, Supplement to Vol. 26: 69-86.

Awbi, HB (2003) *Ventilation of Buildings*. Second Edition, pp 522, ISBN 0415270553, Taylor and Francis (E&FN Spon).

Bambardekar S., Poerschke U., (2009) *The Architect as Performer of Energy Simulation in the Early Design Stage*. In Building Simulation 2009: Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association (IBPSA) Conference at the University of Strathclyde, Glasgow, edited by Paul A. Strachan, Nick J. Kelly, Michael Kummert, Glasgow: IPBSA 2009, pp. 1306-1313. Disponible en Web: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1306_1313.pdf>.

BCA (2009) *Building Code of Australia (BCA) for 2009*.

Becker R. y Paciuk M. (2009) *Thermal comfort in residential buildings – Failure to predict by Standard model*. Building and Environment, Volume 44, Issue 5, May 2009, Pages 948-960.

Bouden C. y Ghrab N. (2005) *An adaptive thermal comfort model for the Tunisian context: a field study results*. Energy and Buildings, Volume 37, Issue 9, September 2005, Pages 952-963.

Bozonnet E., Belarbi R., Allard F. (2005) *Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach*. Solar Energy. Volume 79, Issue 1, July 2005, Pages 10-24.

Brager, G. y de Dear R.J. (2000) *A Standard for Natural Ventilation*. ASHRAE Journal, Vol. 42, N° 10, pág. 21-29. Disponible en web: <<http://www.cbe.berkeley.edu/research/publications.htm>>.

Bravo G. y González E. (2003) *Confort térmico en el trópico húmedo: experiencias de campo en viviendas naturalmente ventiladas*. Ambiente Construído: Conforto e Energia, Porto Alegre, V3 N2, p. 47-55, 2003. Disponible en web: <http://www.antac.org.br/ambienteconstruido/scripts/ArtigosAutor.asp?CD_AUTOR=89>.

Bravo G. y González E. (2001) *Confort térmico en el trópico. Hacia un estándar en viviendas naturalmente ventiladas*. Información Tecnológica, Vol. 12, No. 5 (2001) 169-174. Disponible en web: <<http://www.antac.org.br/ambienteconstruido/pdf/revista/artigos/Doc11284.pdf>>.

Bravo G. y González E. (2006) *Thermal comfort in naturally ventilated buildings of Maracaibo, Venezuela*. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, ago. 2006, vol.29, no.2, p.169-181. ISSN 0254-0770. Disponible en web: <<http://www.scielo.org.ve/scielo.php>>.

Breesch H. y Janssens A. (2007) *Reliable Design of Natural Night Ventilation Using Building Simulation*. 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference : 30 years of research. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Disponible en web: <http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/186_New.pdf>.

- Briggs R., Lucas R.G. y Taylor Z.T. (2002) *Climate Classification for Building Energy Codes and Standards*. ASHRAE Transactions 2002, 109, Pt 1. Disponible en web: http://www.energycodes.gov/implement/pdfs/climate_paper_review_draft_rev.pdf.
- Brohus H., Heiselberg P., Simonsen A. y Sørensen K.C. (2009) *Uncertainty Of Energy Consumption Assessment Of Domestic Buildings*. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009, Proceedings (1022-1029).
- Burattia C. y Ricciardi P. (2009) *Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: Correlation between experimental data and mathematical models*. Building and Environment. Volume 44, Issue 4, April 2009, Pages 674-687.
- Charles, K. E. (2003) *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*. Institute for Research in Construction, Report RR-162, Ottawa, Oct. 2003.
- CIBSE Guide A (2006) Environmental Design. Disponible en web: <http://es.scribd.com/doc/42019258/Cibse-Guide-a-2006>.
- 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.
- 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.
- Comisión para el Mejoramiento de la Calidad Térmica de las Edificaciones y el Espacio Urbano (1999) *Recomendaciones para mejorar la calidad térmica de las edificaciones*. Maracaibo Grafipress, C. A., VENEZUELA 161 p. ISBN: 980-296-733-5.
- Corgnati S. P., Filippia M. y Viazzoa S. (2007) *Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort*. Building and Environment. Volume 42, Issue 2, February 2007, Pages 951-959.
- Crawley D., Hand J., Kummert M., Griffith B. (July 2005) *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Version 1.0, United States Department of Energy, University of Strathclyde and University of Wisconsin. Informe completo disponible en Web: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf.
- Crawley, D.B. and Hand, J., Kummert, M. y Griffith, B.T. (2008) *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Building and Environment, 43 (4). pp. 661-673. ISSN 0360-1323. Disponible en Web: <http://strathprints.strath.ac.uk/6555/>.
- CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment). Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat tropical humide. Tome 1 : Méthodologie de prise en compte des paramètres climatiques dans l'habitat et conseil pratiques. Paris, 1992.
- 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.
- Daley R. (1994) *Atmospheric data analysis*. Cambridge University Press. ISBN: 9780521458252.
- David M., Adelard L., Lauret P. y Garde F. (2010) *A method to generate Typical Meteorological Years from raw hourly climatic databases*. Building and Environment. Volume 45, Issue 7, July 2010, Pages 1722-1732.

- de Dear R.J., Brager G.S. y Cooper D.J. (1997) *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference – Final Report*. ASHRAE RP-884. Sydney:MRL. Disponible en web: <http://sydney.edu.au/architecture/staff/homepage/richard_de_dear/ashrae_rp-884_hypothesis.shtml>.
- de Dear, R. and Brager, G. (2002) *Thermal comfort in naturally ventilated building: Revisions to ASHRAE Standard 55*. Energy and Buildings, Vol. 34, No. 6 (2002) 549-561. Disponible en web: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- de Wilde P. y Tian W. (2010) *Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics, sensitivity and zonal resolution*. Energy and Buildings. Volume 42, Issue 10, October 2010, Pages 1674-1684.
- de Wilde, P., Augenbroe G., van der Voorden M (1999) *Invocation of Building Simulation Tools in Building Design Practice*. Proceedings of Building Simulation '99, Sixth International IBPSA Conference, Kyoto, Japan, September 13-15, 1999, p.1211-1218. Disponible en Web: <http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive%5CIBPSA%5CUFSC773.pdf>.
- de Wilde, P., Augenbroe, G., van der Voorden, M. (2002) *Design analysis integration: supporting the selection of energy saving building components*. Building and Environment 37, 807–816.
- de Wilde, P., M. van der Voorden (2004) *Providing computational support for the selection of energy saving building components*. Energy and Buildings, 36 (8), 749-758
- de Wit S. y Augenbroe G. (2002) *Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implication*. Energy and Buildings 34: 951 - 958.
- de Wit, S. (1997) *Influence Of Modeling Uncertainties On The Simulation Of Building Thermal Comfort Performance*. Proceedings of Building Simulation '97, Volume 2: 95-102.
- de Wit, S. and Augenbroec, G. (2002) *Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications*. Energy and Buildings, 34, 9, 951-958.
- Directiva 2002/91/CE (2002) del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de los edificios.
- Djongyanga N. y Tchindab R. (2010) *An investigation into thermal comfort and residential thermal environment in an intertropical sub-Saharan Africa region: Field study report during the Harmattan season in Cameroon*. Energy Conversion and Management. Volume 51, Issue 7, July 2010, Pages 1391-1397
- Djunaedy, E., Hensen, J., Hopfe, C. J., Struck, C., Trcka, M., & Yahiaoui, A. (2006) *Notes on building performance simulation and the role of IBPSA*. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT, 5 - 8 December, (keynote presentation), Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Curitiba, p. 8 pages on CD
- DOE (2001) GREENING FEDERAL FACILITIES. *An Energy, Environmental, and Economic Resource Guide for Federal Facility Managers and Designers*. SECOND EDITION. Department of Energy, United States of America.
- Dopazo J.A., Almao N. y Rincón J. (2004) *Computational program for the 3D simulation of the indoor temperature distribution*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Vol. 27, N° 1, Maracaibo, abril 2004. ISSN 0254-0770 versión impresa.
- E. Rajasekar and A. Ramachandraiah (2010) *Adaptive comfort and thermal expectations – a subjective evaluation in hot humid climate*. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April 2010. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings. Disponible en web: <<http://nceub.commoncense.info/uploads/48-01-17-Rajasekar.pdf>>.

- Emmanuel, M.R. (2005) *An Urban Approach to Climate-Sensitive Design: Strategies for the Tropics*. London & New York: Spon Press, Taylor & Francis Group. ISBN-10: 0415334101.
- EN ISO 13790:2008 (Norma internacional) *Energy performance of buildings -- Calculation of energy use for space heating and cooling*.
- Fagbenle R. Layi (1995) *Generation of a test reference year for Ibadan, Nigeria*. Energy Conversion and Management. Volume 36, Issue 1, January 1995, Pages 61-63
- Fanger P.O. (1986) *Thermal environment – human requirements*. Environmentalist 6 (4) (1986) 275–278. Disponible en web: <<http://www.springerlink.com/content/8htw6261502761g5/>>.
- Fanger PO: (1982) *Thermal Comfort*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Fanger, P.O. and Toftum, J. (2002) *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*. Energy Building., 34, 533–536.
- Fanger, P.O.” *Thermal Comfort*”, McGraw-Hill Co., New York, 1973.
- Fountain, M.E., E. Arens, T. Xu, F.S. Bauman, and M. Oguru, 1999: *An investigation of thermal comfort at high humidities*. ASHRAE Transactions, 105, pp. 94-103. Disponible en web: <<http://en.scientificcommons.org/13098921>>.
- Gagge A, Stolwijk A, Nishi Y (1971) *An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response*. ASHRAE Trans 77, 247–57.
- Ghuri S, Hand J, Johnstone C, Kim J, Kokogiannakis G, Tuohy P and Woo K. (2009) *Adoption of Dynamic Simulation for an Energy Performance Rating Tool for Korean Residential Buildings: EDEM-SAMSUNG*. Proceedings International Building Performance Simulation Association conference '09, University of Strathclyde, Glasgow, UK. Disponible en Web: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_2070_2076.pdf>.
- Ghiaus C. (2006) *Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods*. Energy and Buildings 38: 429-435.
- Ghiaus C. y Allard F. (editores) (2005) *Natural ventilation in the urban environment*. Londres, James and James. ISBN: 1844071294.
- Ghiaus, C. (2003) *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings 35(4): 405-411.
- Givoni B. (1992) *Comfort, climate analysis and building design guidelines*. Energy and Buildings. Volume 18, Issue 1, 1992, Pages 11-23
- Givoni, B. (1969) *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Science Ltd. ISBN: 0444200398.
- 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, New York. ISBN-10: 0471291773
- Gómez G., Bojórquez G., Ruiz R. (2007) *El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados*. Revista Palapa / Vol. 2 / Núm. 1 / Enero – Junio de 2007. ISSN Impreso:1870-7483. Universidad de Colima, México. Disponible en Web: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/948/94820107.pdf>>.

- 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.
- Gowri K. (2004) *Sustainability Green Building Rating Systems: An Overview*, ASHRAE journal, ISSN 0001-2491, Vol. 46, N° 11, 2004, pag. 56. Disponible en Web: <<http://www.energycodes.gov/implement/pdfs/Sustainability.pdf>>.
- Griffiths, I. (1990) *Thermal comfort studies in buildings with passive solar features; field studies: report to the Commission of the European Community*. ENS35 090 UK.
- Guan L. (2009) *Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings*. Building and Environment. Volume 44, Issue 4, April 2009, Pages 793-800.
- Guevara Díaz, José (2003) *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. Segunda edición. Universidad central de Venezuela, Consejo de desarrollo científico y humanístico. ISBN: 9800019650.
- Han J., Yang W., Zhou J., Zhang G., Zhang Q. y Moschandreas D. (2009) *A comparative analysis of urban and rural residential thermal comfort under natural ventilation environment*. Energy and Buildings, Volume: 41(2) (2009).
- Hensen J.L.M. (1991) *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system*. Doctoral dissertation Eindhoven University of Technology (FAGO). ISBN 90-386-0081-X. Disponible en web : <<http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications.html>>.
- Hobaica M.E. (1993) *Validación experimental de un modelo de térmica de las edificaciones para clima tropical húmedo*. Trabajo de ascenso (Agregado). IDEC-FAU-UCV, Caracas, 1993.
- Hobaica M.E., Sosa M.E. y Rosales L. (2000) *Influencia de los componentes constructivos en la temperatura del aire interior de viviendas*. Revista Interciencias. VOL. 25, N° 3. Disponible en web: <<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/339/33904503.pdf>>.
- 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 (Disponible en el CID de IDEC/FAU/UCV).
- Hobaica, M.E., Belarbi, R., Rosales, L. (2001) *Los sistemas pasivos de refrescamiento de edificaciones en clima tropical húmedo. Posibilidades de aplicación en Venezuela*. Caracas: Revista Tecnología y Construcción N° 17-I. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.
- Hobbs D., Morbitzer C., Spires B., Strachan P. y Webster J. (2004) *Experience of Using Building Simulation Within the Design Process of an Architectural Practice*. J. International Building Simulation Performance Association, V14(1), pp43-50, April.

- Holm D (1993) *Building thermal analysis: What the industry needs: The architectural perspective*. Building and Environment, Building and Environment, Vol.28, No. 4, pp 405-407, 1993.
- Hopfe C. J., Hensen J. y Plokker W. (2007a.) *Uncertainty and sensitivity analysis for detailed design support*. Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference, 3-5 September, Tsinghua University, Beijing, pp. 1799-1804.
- Hopfe C. J., Struck C., Kotek P., Schijndel A., Hensen J. y Plokker, W (2007b) *Uncertainty analysis for building performance simulation - a comparison of four tools*. Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference, 3-5 September, Tsinghua University, Beijing, pp. 1383-1388
- Hopfe C. J., Struck C., Ulukavak H. y Hensen J (2006) *Computational tools for building services design - professional's practice and wishes*. Proceedings of the 17th Int. Air-conditioning and Ventilation Conference, 17-19 May, STP - Society of Environmental Engineering, Prague, p. 5 pages on CD. Disponible en Web: <http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/06_acv_ccg.pdf>.
- Houghten F. C. y Yaglou C. P. (1923) *Determining lines of equal comfort*. Trans. Am. Soc. Heat Vent. Eng, 29:163-176.
- Humphreys M. A., Nicol J. F. y Raja I. A. (2007) *Field Studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach*. Journal of Advances on Building Energy Research 1, pp.55-88. Disponible en web: <http://www.get-sust.com/PDFs/ABER_Vol1_Humphreys.pdf>.
- Humphreys M.A. (1978) *Outdoor temperature and comfort indoors*. Building Research and Practice 6 (2) (1978) 92-105.
- Humphreys M.A. y Nicol J.F. (1998) *Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort*. ASHRAE Transactions: Symposia: 991-1004.
- Humphreys M.A. y Nicol J.F. (2000) *Outdoor temperature and indoor thermal comfort: raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies*. ASHRAE Transactions 206(2) pp 485-492 (ISSN 0001 2505)
- Humphreys, M. A. (1978) *Outdoor Temperature and comfort indoor*. Building Research and Practice, 6 (2): 92-105.
- Hwang R.L., Lin T.P. y Kuo,N.J. (2006) *Field Experiments on Thermal Comfort in Campus Classrooms in Taiwan*. Energy and Buildings 38(1),53-62 (SCI)
- Hwang R.L., Lin T.P., Cheng, M.J. y Jian R.H. (2007) *Patient thermal comfort requirement for hospital environments in Taiwan*. Building and Environment 42(8), 2980-2987 (SCI)
- Indraganti M. (2010a) *Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India*. Energy and Buildings. Volume 42, Issue 7, July 2010, Pages 1019-1025
- Indraganti M. (2010b) *Adaptive use of natural ventilation for thermal comfort in Indian apartments* Building and Environment Volume 45, Issue 6, June 2010, Pages 1490-1507
- Indraganti M. y Daryani R. K. (2010) *Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: A field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations*. Energy and Buildings Volume 42, Issue 3, March 2010, Pages 273-281.
- Infante S., Ortega J., Cedeño F. (2008) *Estimación de datos faltantes en estaciones meteorológicas de Venezuela vía un modelo de redes neuronales*. Revista de Climatología, año 2008, Vol.: 8N, Pag. 51-70. Disponible en web: <<http://webs.ono.com/reclim/>>.

- ISO 15927-4 (2005) *Hygrothermal performance of buildings -- Calculation and presentation of climatic data -- Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling.*
- ISO 7730 (2005) *Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*
- Janjai S. y Deeyaia P. (2009) *Comparison of methods for generating typical meteorological year using meteorological data from a tropical environment.* Applied Energy, Volume 86, Issue 4, April 2009, Pages 528-537
- Jentsch M., Bahaj A. y James P. (2008) *Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files.* Energy and Buildings. Volume 40, Issue 12, 2008, Pages 2148-2168.
- Kalamees T., Kurnitski J. (2006) *Estonian test reference year for energy calculations.* Proc. Estonian Acad. Sci. Eng. 2006. Vol. 12 , No. 1. P. 40–58.
- Kalnay E. (2003) *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability.* Cambridge University Press. ISBN: 0521796296.
- Kalogirou S. (2003) *Generation of typical meteorological year (TMY-2) for Nicosia, Cyprus.* Renewable Energy, Volume 28, Issue 15, December 2003, Pages 2317-2334.
- Kalogirou S. (2009) *Solar Energy Engineering: Processes and Systems.* Academic Press. ISBN-10: 0123745012. ISBN-13: 978-0123745019.
- Khedari J., Sangprajak A. y Hirunlabh J. (2002) *Thailand climatic zones.* Renewable Energy 25 (2) (2002), pp. 267–280.
- Khemlani L. (2009) *Sustainable Design Tools Exhibited at AIA 2009.* AECBytes newsletter. Disponible en web: <http://www.aecbytes.com/feature/2009/AIA2009_EnergyApps.html>.
- Koenigsberger O., Mahoney C. y Evans J.M. (1971) *Climate and house design*, Vol. I of UN Dept. of Economic and Social Affairs, Design of Low Cost Housing Community.
- Koenigsberger O.H, Ingersoll T.G, Mayhew A, Szokolay S.V. (1977) *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales.* Editorial Paraninfo. ISBN 84-283-0885-3.
- Kolokotroni M. y Young A.N. (1990) *Guidelines for bioclimatic housing design in Greece.* Building and Environment, Volume 25, Issue 4: 297-307.
- Krarti M. (2000) *Energy audit of building systems: an engineering approach.* CRC Press. ISBN: 0-8493-9587-9. Disponible en Web (Google libros): <<http://books.google.co.ve/books?id=48AiZjq3WgoC&printsec=frontcover#v=onepage&q=&f=false>>.
- Lam J., Tsang C.L., Yang L. y Li D. (2005) *Weather data analysis and design implications for different climatic zones in China.* Building and Environment. Volume 40, Issue 2, February 2005, Pages 277-296.
- Lam J., Yang L. y Liu J. (2006) *Development of passive design zones in China using bioclimatic approach.* Energy Conversion and Management, Volume 47, Issue 6: 746-762.
- Lam J.C., Yang L. y Liu J.P. (2006) *Development of passive design zones in China using bioclimatic approach.* Energy Conversion and Management, 47(6), pp.746-762.
- Lee K., Yoo H. y Levermore G. (2010) *Generation of typical weather data using the ISO Test Reference Year (TRY) method for major cities of South Korea.* Building and Environment. Volume 45, Issue 4, April 2010, Pages 956-963

- Linacre E. (1992) *Climate, data and resources: A reference and guide*. Routledge (London). ISBN 0415057035.
- Malin N. (2007) *Building information modeling and green design*. Revista digital: BuildingGreen.com. Disponible en web: <<http://www.buildinggreen.com/auth/article.cfm/2007/5/1/Building-Information-Modeling-and-Green-Design/>>.
- Malkawi A.M. y Augenbroe G. (editores) (2004) *Advanced building simulation*. Spon Press, New York. ISBN 0-415-32122-0
- Marsh A. (2004) *Performance analysis and Concept design: The parallel needs of Classroom & office*. Welsh School of Architecture. Between Research and Practice Conference, ARCC and EAAE Transactions on Architectural Education, Dublin.
- Marsh, A. (2003). *ECOTECH Tutorials*. Square One research Pty Ltd. <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Ecotect_Tutorials>.
- Martínez J, Manzano M.J., Varga M., Hofer G., Isaksson C., Cavalius R., Bangens L. y Read G. (2006). *Keep Cool-Calculation Tools*. Vienna, Austria: Austrian Energy Agency. Disponible en web: <<http://www.keep-cool.eu/CM.php?PageID=66904>>.
- McCartney K.J y Nicol J.F. (2002) *Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATs Project*. Energy and Buildings 34(6) pp 623-635 (ISSN 0375 7788). Disponible en Web: <<http://bluwiki.com/images/b/be/AdaptiveControlEurope.pdf>>.
- McCartney K.J y Nicol J.F. (2002) *Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATs Project*. Energy. and Buildings 34(6) pp 623-635
- Mehdi (2010) *A method for generation of typical meteorological year*. Energy Conversion and Management. Volume 51, Issue 3, March 2010, Pages 410-417.
- Mirzaei P. y Haghghat F. (2010) *Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations*. Building and Environment. Volume 45, Issue 10, October 2010, Pages 2192-2201
- Morbiter C., Strachan P., Webster J., Spires B. y Cafferty D. (2010) *Integration of building simulation into the design process of an architectural practice*, IBPSA, Building Simulation 2010. Disponible en Web: <<http://strathprints.strath.ac.uk/6315/>>.
- Morillón D., Saldaña R. y Tejada A. (2004) *Human bioclimatic atlas for Mexico*, Solar Energy, Volume 76, Issue 6: 781-792.
- Nicol F. and Humphreys M.A. (2010) *Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free running buildings in European standard EN15251*. Building and Environment, 2010, 45: p. 11-17
- Nicol, J. F. (1993) *Thermal comfort, A handbook for field studies toward an adaptive model*. London: University of East London.
- Obanye I. (2009) *Integrating building energy simulation into the architectural design process*. Built Environment Education Annual Conference, BEECON 2006. Disponible en Web: <http://www.cebe.heacademy.ac.uk/news/events/beecon2006/pdf/P18_Ike_Obanye.pdf>.
- Olesen B.W. y Brager G.S. (2004) *A better way to predict comfort: The new ASHRAE standard 55-2004*. ASHRAE Journal, August. Disponible en web: <<http://escholarship.org/uc/item/2m34683k>>.
- Olesen B.W. y Dukes-Dobos F.N. (1988) *International Standards for Assessing the Effect of Clothing on Heat Tolerance and Comfort, Performance of Protective Clothing*. Second Symposium, ASTM STP 989, S. Z. Mansdorf, R. Sager, and A. P. Nielson, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 17-30.

- Olgay V. (1998) *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Gustavo Gili, 1998. ISBN 8425214882, 9788425214882.
- Olgay, V. (1963) *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- OMM - Organización Meteorológica Mundial (1990) *Guía de Prácticas Climatológicas*. OMM-N° 100, 1990.
- Özdeniz M. (1991) *Bioclimatic analysis of traditional Turkish houses*. Environment International, Volume 17, Issue 4: 325-336.
- Parsons, K. (1993) *Human Thermal Environments: the effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance*. London, Taylor and Francis. ISBN-10: 0748400400.
- Pedrini A. y Szokolay S. (2005) *The architects approach to the project of energy efficient office buildings in warm climate and the importance of design methods*. Proceedings of Building Simulation Ninth International IBPSA Conference, Montréal, Canada. August 15-18, 2005, pp. 937-944. Disponible en web: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_0937_944.pdf>.
- Peeters L., Dear R., Hensen J. y D'haeseleer W (2009) *Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation*. Applied Energy, vol. 86, no. 5, pp. 772-780. Disponible en web: <http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/08_apen_peeters.pdf>.
- Petrakis M., Lykoudis S. y Kassomenos P. (1996) *A software tool for the creation of a typical meteorological year*. Environmental Software. Volume 11, Issue 4, 1996, Pages 221-227
- Peyush A. (1998) *Bioclimatic Design Central*. USA: The University of Arizona, College of Architecture, Planning and Landscape Architecture. Web: <<http://architecture.arizona.edu/architecture/academic/graduate/peyush/index.html>>.
- Pfafferott J., Herkel S., Wapler J. (2005) *Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models*. Energy and Buildings. 37 (8) (2005) 844–852.
- Pfafferott J., Herkel S., Jäschke M. (2003) *Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements*. Energy and Buildings 35 (11), 1129–1143.
- Pinzón M. y rojas D. (1994) *Determinación de zonas de confort en climas tropicales*. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 1994. Inédito.
- Pissimanis D., Karras G., Notaridou V. y Gavra K. (1988) *The generation of a "typical meteorological year" for the city of Athens*. Solar Energy. Volume 40, Issue 5, 1988, Pages 405-411
- 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.
- Poler M. (1968) *Clima y arquitectura*. Caracas: Banco Obrero, 1968. 93 p.
- Quiroz L. (1995) *Condiciones climáticas y confort térmico en una localidad intertropical. Caso de estudio: Maracaibo, Venezuela*. Revista Técnica de Ingeniería. Caracas.
- Rahman I.A. y Dewsbury J. (2007) *Selection of typical weather data (test reference years) for Subang, Malaysia*. Building and Environment. Volume 42, Issue 10, October 2007, Pages 3636-3641
- Rakoto O., Garde F., David M., Adelard L. y Randriamanantany Z.A. (2009) *Development of climatic zones and passive solar design in Madagascar*. Journal: Energy Conversion and Management. Volume: 50 Issue: 4 (2009-04) Page: 1004-1010.

- Rangsiraksa Preechaya (2006) *Thermal comfort in Bangkok residential buildings, Thailand*. Proceedings PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006
- Reardon C., White S., McGee C., Shackel S. y Slapp B. (2001) *Your home: design for lifestyle and the future. Technical manual*. Commonwealth of Australia/Joint Initiative of the Australian Government and the Design and Construction Industries. ISBN-10: 1920840184. Disponible en web: <<http://www.yourhome.gov.au/technical/index.html>>.
- Rijal H.B., Yoshida H. y Umemiya N. (2010) *Seasonal and regional differences in neutral temperatures in Nepalese traditional vernacular houses*. Building and Environment (December 2010), 45 (12), pg. 2743-2753
- Roderick Y., McEwan D., Wheatley C. y Alonso C. (2009) *A comparative study of building energy performance assessment between LEED, BREEAM and Green Star schemes*. Integrated Environmental Solutions Limited, Kelvin Campus, West of Scotland Science Park, Glasgow, G20 0SP, U.K. Disponible en web: <<http://www.osun.org/the+difference+between+leed+and+breeam-pdf.html>>.
- Rodriguez De Paiva M., Cortez A., Nuñez M., Ovalles F. y Rey J. (2006) *Distribución espacial de las redes de estaciones meteorológicas en Venezuela*. Revista Inia Divulga, Vol. 8. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Disponible en web: <http://sian.inia.gov.ve/repositorio/revistas_tec/inia_divulga/id_n8.htm>.
- Roriz M., Ghisi E. y Lamberts R. (1999) *Bioclimatic zoning of Brazil: a proposal based on the Givoni and Mahoney Methods*. Proceedings of the PLEA '99 Conference, pp211–216. Disponible en web: <http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/Plea99_RORIZ.pdf>.
- Santamouris M. (Editor) (2007) *Advances In Passive Cooling (Buildings, Energy and Solar Technology Series*. Publisher: Earthscan Publications Ltd. ISBN: 1844072630 DDC: 697.93 Edition: Hardcover; 2007-09
- Santamouris, M. y Asimakopoulos, D. (editores) (1996) *Passive Cooling of Buildings*. James & James, London. ISBN-10: 1873936478.
- Sayigh A y Marafia A.H. (1998) *Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2, pp3-24.
- Sayigh A. y 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.
- Seletsky P. (2005) *Digital Design and the age of Building simulation*. Revista digital AECbytes. Nº 19. Disponible en web: <http://aecbytes.com/viewpoint/2005/issue_19.html>.
- Shaviv E., Yezioro A. y Capeluto I. (2001) *Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy*. Renewable Energy. Volume 24, Issues 3-4, November 2001, Pages 445-452.
- Singh M.K., Mahapatra S. y Atreya S. K. (2007) *Development of Bio-climatic zones in North-East India*. Energy & Buildings. 2007:39(12),1250-1257.
- Singh M.K., Mahapatra S. y Atreya S.K. (2010) *Thermal performance study and evaluation of comfort temperatures in vernacular buildings of North-East India*. Building and Environment, Volume 45, Issue 2, February 2010, Pages 320-329.
- Skeiker K. (2004) *Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein–Schafer statistical method*. Energy Conversion and Management. Volume 45, Issue 1, January 2004, Pages 99-112

Skeiker K. y Ghania B.A. (2009) *A software tool for the creation of a typical meteorological year*. Renewable Energy. Volume 34, Issue 3, March 2009, Pages 544-554.

Soebarto V. (2005) *Teaching An Energy Simulation Program in An Architecture School: Lessons Learned. Building Simulation*. Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association Conference, pp 1147-1153. International Building Performance Simulation Association, Montreal, Canada ISSN/ISBN: 2-553-01152-0.

Soebarto V. (2009) *Will simulation-based assessments and decisions save our built environment?* Charla dictada en la Universidad de Adelaida, Australia. Presentación y audio disponibles en web: <http://www.adelaide.edu.au/environment/event/2009/eiss2009-2-08.html>.

Sosa M.E. (2008) *Desarrollo de Método Paramétrico para Determinar Índices de Eficiencia Energética para Fachadas en Edificios con Sistema de Acondicionamiento Activo. Caso Estudio: Edificios de Oficina en Caracas y Maracaibo-Venezuela*. Tesis Doctorado de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad central de Venezuela, UCV.

Sosa M. E. y Siem G. (2004) *Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico*. Programa Agenda Ciudad. FONACIT/IDEC-FAU-UCV/EDC. Caracas. Disponible en web: <http://www.scribd.com/doc/37727075/manual-de-diseno-para-edificaciones-energeticamente-eficientes-en-el-tropico>.

Sosa M.E., Hobaica M., Siem G., Rosales L., Hernández N., Rojas I., Reyes C. (2004) *Técnicas de Reducción del Gasto Energético en Edificaciones. Informe Final*. Programa Agenda Ciudad - FONACIT N° 98003396. IDEC/FAU/UCV; Departamento de Hidrometeorología FI/UCV; C.A. La Electricidad de Caracas. Informe disponible en el CID del IDEC/FAU/UCV.

Spengler J.D., McCarthy J.F. y Samet J.M. (2000) *Indoor Air Quality Handbook*. McGraw-Hill Professional. 1488pages. ISBN: 0074455494

Spitler J.D (2006) *Building Performance Simulation: The Now and the Not Yet*. Special issue of HVAC&R Research, vol. 12, no. 3a, ASHRAE. Disponible en web: <http://www.hvac.okstate.edu/Faculty/Spitler/publications.html>.

Sterling E.M., Arundel A. y Sterling T.D. (1985) *Criteria for Human Exposure to Humidity in Occupied Buildings*. ASHRAE Transactions, Vol. 91, No 1, 1985, pp 611-621. Disponible en web: <http://www.sterlingiaq.com/dynpublications.php>.

Szokolay S. (1986) *Climate analysis based on the psychrometric chart*. Ambient Energy. 1986;7(4):169–82.

Szokolay, S. V. (1987) *Thermal Design of Buildings*. Canberra, Australia: RAI A Education Division. ISBN: 0909724814.

TenWolde A. y Rose W.B. (1994) *Criteria for humidity in the building and the building envelope*. Bugs, Mold, and Rot II: Proceedings of Workshop on Control of Humidity for Health, Artifacts, and Buildings: November 16-17, 1993, pp. 63-65. Washington, D.C.: NIBS. Disponible en web: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1993/tenwo93b.pdf>.

Toftum J., Melikov A.K., Rasmussen L.W., Kuciel A.A., Cinalska E.A., Tynel, A., Bruzda M. y Fanger P.O. (2000) *Human response to air movement. Part 1: Preference and draft discomfort*. ASHRAE Project 843-TRP, Technical University of Denmark.

Torcelli P.A, Deru M., Griffith B., Long N., Pless S., Judkoff R. y Crawley D.B. (2004) *Lessons Learned from Field Evaluation of Six High-Performance Buildings*. Proceedings of the 2004 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.

- Ullman G.D. (2003) *The mechanical design process*. Third edition, McGrawHill, ISBN 0072373385
- Underwood C. P. y Yik F. (2004) *Modelling Methods for Energy in Buildings*. Blackwell Publishing, 2004, ISBN: 0632059362
- van Hoof J. (2008) *Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all?* Indoor Air, Volume 18, Number 3, June 2008 , pp. 182-201(20). Disponible en web: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18363685>.
- van Hoof J., Mazej M. y Hensen J. (2010) *Thermal comfort: research and practice*. Frontiers in bioscience : a journal and virtual library Volume: 15 ISSN: 1093-4715. Disponible en web: http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/10_fbs_hoof.pdf.
- Wang Z., Zhanga L., Zhaoa J. y Hea Y. (2010) *Thermal comfort for naturally ventilated residential buildings in Harbin*. Energy and Buildings Volume 42, Issue 12, December 2010, Pages 2406-2415.
- Wong N. H., Feriadi H., Lim P. Y., Tham K. W., Sekhar C., Cheong K. W. (2002) *Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore*. Building and Environment, Volume 37, Issue 12, December 2002, Pages 1267-1277
- Wong Nyuk Hien, Khoo Shan Shan (2003) *Thermal comfort in classrooms in the tropics*. Energy and Buildings, Volume 35, Issue 4, May 2003, Pages 337-351
- Xu T., Arens E.A. y Bauman F. (1995) *The Effects of High-Level Air Humidity on Subjective Perception of Comfort*. UC Berkeley: Center for the Built Environment. Disponible en web: <http://escholarship.org/uc/item/2cc4525b>.
- Yao R., Liua J. y Lib B. (2010) *Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms* Applied Energy. Volume 87, Issue 3, March 2010, Pages 1015-1022
- Ye X.J, Zhou Z.P., Lian Z.W., Liu H.M., Li C.Z. y Liu Y.M. (2006) *Field study of a thermal environment and adaptive model in Shanghai*. Indoor Air. 2006 Aug;16(4):320-6.
- Zain-Ahmed A., Sayigh A., Surendran P. y 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.
- Zeiler W., Savanovic P. y Quanjel E. (2008) *Design decision support for conceptual design*. In I Horvath, Z Rusak (Eds.), Tools and Methods of Competitive Engineering. (pp. 1473-1482). Delft: Delft University of Technology.
- Zhang Y., Wanga J., Chena H., Zhanga J. y Menga Q. (2010) *Thermal comfort in naturally ventilated buildings in hot-humid area of China*. Building and Environment. Volume 45, Issue 11, November 2010, Pages 2562-2570

CAPÍTULO 3 MÉTODO PARA EVALUAR LA ADAPTABILIDAD DE UN EDIFICIO AL CLIMA

3.1 Introducción. Principios generales y resumen del método

La propuesta que se presenta en este capítulo aspira a sumarse al conjunto de métodos de ayuda al diseño arquitectónico orientados a adaptar los edificios al clima. Como se apuntó en el capítulo anterior (apartado 2.1, página 22), a cada método se le puede ubicar en alguna etapa del proceso de diseño según la especificidad de la información que demande y el alcance de la información que suministre. Aquellos que se usan al comienzo son los más generales, pero, por referirse a aspectos básicos del edificio, los más influyentes en el confort y el ahorro energético, mientras que aquellos que se usan al final apuntan al afinamiento de detalles y a comprobaciones de decisiones ya tomadas (Altavilla *et al.*, 2004; Zeiler *et al.*, 2008). El método que aquí se propone trasciende en parte ese condicionamiento al poderse emplear en cualquier etapa posterior al trazado del esquema más básico del edificio (*i.e.*, de lo mínimo requerido para simular) y extenderse hasta edificios ya construidos que sean objeto de restauración o remodelación.

La perspectiva global es concebir al edificio como un sistema adaptable con el potencial de ofrecer confort térmico. Desarrollar ese potencial conlleva manejar la relación entre el diseño y los procesos térmicos que se generan en el edificio como resultado de su uso y la acción del clima. Simplificando, la temperatura al interior de un edificio es producto del balance de los flujos de calor a través de la envolvente y las divisiones internas y del calor acumulado en los materiales. Las principales fuentes de calor son las solares y las cargas internas (equipos, ocupantes, etc.), las principales pérdidas son las conductivas y las advectivas (ventilación) y el almacenamiento se da en la masa térmica. Las estrategias y técnicas de diseño arquitectónico orientadas al confort térmico buscan en el fondo modificar la escala de estos procesos y el resultado del balance. Visto así, el problema consiste estimar y predecir, en función del clima y el edificio, el potencial de estas estrategias y técnicas para llevar y mantener la temperatura interior a niveles confortables.

Una manera de medir ese potencial es comparando los rangos de confort (definidos en términos de temperaturas operativas admisibles) con la temperatura operativa interior de un edificio, antes y después de aplicarse en él las estrategias y técnicas objeto de evaluación. Una comparación como esa adquiriría un carácter genérico si el edificio representara una tipología y su respuesta ante diversos tipos de clima obedeciera a un patrón conocido. Por basarse en una comparación entre el criterio de confort, el clima y las condiciones al interior del edificio, un enfoque así sería, en sus fundamentos, similar al de los diagramas bioclimáticos, sólo que, a diferencia de éstos, en los que el comportamiento del edificio se presupone vagamente, la caracterización del edificio se haría de manera concreta, aprovechándose las posibilidades que brinda la simulación computari-

zada. La interpretación estadística de los resultados de la simulación permite de hecho describir el comportamiento dinámico del edificio en términos estáticos y por ende adaptar métodos estáticos de análisis energético que conduzcan, entre otras cosas, a expresar el potencial de las estrategias de diseño en forma de distribuciones de frecuencia de grados-hora de malestar relacionados con la temperatura exterior. La ventaja de las distribuciones de frecuencia sobre las series de tiempo tradicionales de la simulación computarizada es que la información que contienen está más organizada y es más aprovechable: dado un edificio, resulta más interesante anticipar, según el tipo de clima, la frecuencia, ocurrencia y duración de situaciones de malestar térmico de nivel dado a lo largo de su vida útil, que apreciar la variación horaria de la temperatura operativa interior a lo largo de un año meteorológico típico (lo que también es interesante, sólo que más difícil de relacionar con decisiones de diseño concretas en un proyecto).

El punto de partida del método es el concepto de temperatura libre. Este concepto es análogo al de la temperatura de balance (*balance point temperature*) de los métodos estáticos de estimación del consumo energético de edificios como el método de grados-día y el método de los intervalos (*Bin method*) (ASHRAE, 2009, 19.17-19.22) (apartado 2.1, página 26). La temperatura libre se define como la temperatura interior para la cual, habiéndose suprimido la ventilación y sin que funcione ningún sistema de climatización, el edificio está en equilibrio térmico con su entorno (Ghiaus, 2003). Como se detallará luego, esta temperatura puede sustituir a la temperatura de balance en los métodos de estimación energética mencionados (Ghiaus y Allard, 2006). Para intervalos de tiempo dados (un día o una hora), a la temperatura libre se la podrá entender simplemente como la temperatura media interior del edificio en ese intervalo. La misma será el resultado del equilibrio entre las ganancias medias de calor (sol, ocupantes, equipos, etc.) y las pérdidas medias (conductivas) generadas por su diferencia con la temperatura media exterior en ese intervalo y reguladas por la conductancia media global (dinámica) del edificio. En tales condiciones, la diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior se deberá básicamente a las ganancias de calor y equivaldrá a la relación entre éstas y la conductancia global del edificio.

La temperatura libre puede obtenerse por simulación o, en el caso de edificios ya construidos, por mediciones *in situ*. De considerarse intervalos de tiempo de una hora, y si se admite que la ganancia total de calor a una hora del día es siempre la misma (algo válido en edificios con cargas internas constantes y durante períodos sin mayores cambios en los ángulos solares, como p.ej. un mes), entonces, a esa hora, la diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior será también siempre la misma. Ésta podrá luego derivarse del modelo de regresión lineal de la temperatura libre a esa hora obtenida por simulación o experimentación. La diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior se independiza así de la temperatura exterior y pasa a ser función de la hora, quedando luego desligada del clima y convertida en un rasgo del edificio.

Asegurar, con base en las simplificaciones descritas, que a una hora dada y para un edificio dado la relación entre la temperatura libre y la temperatura exterior se ajusta a una regresión lineal, brinda, sintetizando, las siguientes tres ventajas en la evaluación del potencial que cualquier cambio en el edificio pueda tener en logro del confort térmico: a) el funcionamiento del edificio puede describirse usando métodos estáticos, b) el edificio puede caracterizarse con una temperatura conocida y c) se *desacoplan* los tres elementos del sistema, a saber, el edificio, el clima y el criterio de confort. Estos tres elementos quedan de hecho expresados en términos de temperatura y se convierten en variables dependientes de la temperatura exterior, pero independientes entre sí.

En el método que aquí se propone, el edificio cuya temperatura libre interesará conocer es el que se tenga al momento de recurrir al método. A este edificio se le llamará *edificio de base* o *edificio libre*. Todo cálculo, medición o consideración posterior estarán referidos él. Debe cumplir con los criterios que hagan que su temperatura interior sea la temperatura libre, esto es, no puede contar con sistemas de climatización activa, ni estar ventilado. Más aún, a efectos de reducir aún más la dispersión de los resultados de la simulación, convendrá suponer cargas internas constantes.

Una vez definido el edificio de base, su temperatura libre se podrá obtener por simulación. Graficar la temperatura libre en función de la temperatura exterior para una hora específica del día y un determinado número de días (un mes o un año) conduce a un diagrama de dispersión o nube de puntos. Determinar el modelo de regresión lineal que mejor se adecue conlleva desacoplar el edificio del clima, al obtenerse la *ecuación* que relaciona la temperatura libre con la temperatura exterior a esa hora. Cotejar esa regresión con el criterio de confort permite averiguar de un vistazo para qué rangos de la temperatura exterior el edificio de base estará en confort térmico y para qué rangos no. Usando luego la distribución de frecuencia de la temperatura exterior del clima que se esté considerando, se pueden calcular, de ubicarse el edificio de base en ese clima, los grados-hora de malestar que se presentarían en él para intervalos dados de la temperatura exterior.

Cualquier cambio que se le haga posteriormente al edificio de base (*i.e.*, cualquier estrategia o técnica de diseño que se le adapte) se manifestará, a la misma hora, como un incremento o un descenso de la temperatura libre. El que cualquier cambio en el edificio se manifieste de esa forma permite averiguar, simulando, a cuánto equivale. Al cotejar la nueva temperatura con el criterio de confort, se visualiza para qué rangos de la temperatura exterior el edificio modificado estará en confort térmico y para qué rangos no. Luego, con base en la distribución de frecuencia de la temperatura exterior, se pueden cuantificar los grados-hora de malestar en el edificio modificado. La comparación con los grados-hora de malestar del edificio de base dará la medida del potencial para ese clima del cambio que se evalúa en el edificio de base.

En términos generales, el método puede entenderse como una explotación de los resultados de la simulación dinámica (o la experimentación) orientada a adecuar un equivalente de los métodos

estáticos que permita calcular el potencial de adaptación a cualquier clima de cualquier propuesta arquitectónica desde la perspectiva del cumplimiento del criterio de confort térmico. Pudiera incluirse entre los *métodos dinámicos simples*, por estar basado en la aplicación de técnicas de regresión a los resultados de la simulación hecha con herramientas dinámicas más poderosas (apartado 2.5, página 92). En todo esto se concibe a la simulación, no como un instrumento destinado a evaluar alternativas ya acabadas, sino como una herramienta para el desarrollo y aplicación de métodos orientativos del diseño en etapas tempranas del mismo.

En los apartados que siguen se explicarán de manera más detallada los principios del método y se expondrán las hipótesis que se sugieren para cuando se le use en las etapas tempranas del proceso de diseño. Más adelante, en el capítulo 4, se presentará un ejemplo de aplicación concreto, consistente en simular una vivienda ubicada en cuatro ciudades venezolanas de clima diferente.

3.2 Los elementos del sistema: confort, edificio y clima

Sobre las formas usuales de caracterizar el confort, el clima y el edificio, así como sobre los principales métodos que relacionan estos tres elementos con miras a servir de ayudas al diseño, se argumentó ampliamente en el Capítulo 2. En el presente apartado sólo se explicará la forma en que el método que se propone aborda cada uno de estos elementos y se resaltarán los aspectos relevantes desde esa perspectiva. Por razones que se irán aclarando en el transcurso de la argumentación, el principal criterio será caracterizar los tres elementos en términos de temperatura.

3.2.1 El criterio de confort. Una caracterización basada en la adaptación

En el apartado 2.2 (página 30) se explicaron los principales enfoques con que se aborda la caracterización del confort térmico y se comentaron las ventajas y desventajas de cada uno. Resumiendo, se tiene, por un lado, el enfoque analítico, avalado en laboratorio y basado en la ecuación de balance térmico del cuerpo humano, y, por otro, el enfoque empírico, avalado *in situ*, basado en la noción intersubjetiva de adaptación y expresado en términos estadísticos. Los índices de confort térmico normativizados más importantes que se derivan del primer enfoque son la temperatura efectiva estándar de la norma ASHRAE 55 y el índice de Fanger o PMV de las normas ISO 7730 y ASHRAE 55. De los que se derivan del segundo enfoque, los más importantes son el modelo adaptativo para edificios con ventilación natural de la norma ASHRAE 55 y el modelo adaptativo para edificios en funcionamiento libre de la norma europea EN 15251 (la aplicabilidad de este último se circunscribe al contexto europeo, por lo que no será considerado en lo que sigue). Más allá de estos índices se han propuesto, siempre en el marco de estos dos enfoques (o de su combinación), numerosos otros índices o correcciones de los índices más conocidos, aunque sin trascender realmente el ámbito académico (Auliciems y Szokolay, 2007).

Dadas una humedad, una actividad y una vestimenta, los índices de la temperatura efectiva estándar y el PMV permiten relacionar los valores que pueda tomar la temperatura operativa con la sensación térmica. Esta relación es considerada universal, es decir, no dependiente de factores de contexto distintos a la actividad y la vestimenta. Al haberseles concebido racionalmente y validado en laboratorio, estos índices desprecian las variables de contexto que no puedan considerarse desde esa perspectiva (o cuya consideración resulte demasiado complicada desde esa perspectiva). El resultado es que su aplicabilidad se restringe a expectativas asociadas a condiciones moderadas o controladas, lo que básicamente cubre ambientes con calefacción o aire acondicionado.

Por su parte, la regresión lineal entre la temperatura exterior y la temperatura de neutralidad del modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55 se expresa en términos de temperatura operativa interior y condiciona la zona de confort al clima del sitio, descrito por la temperatura media mensual. Los demás parámetros ligados a la adaptación quedan implícitos en los rangos de aceptación. La única condición para aplicar este índice es que el edificio funcione con ventilación natural.

Por otro lado, se ha comprobado que los rangos de aceptación son más amplios en edificios con climatización natural que en edificios con climatización activa. Para una aceptabilidad del 80% de las personas, la zona de confort basada en el PMV de la norma ASHRAE 55 admite variaciones alrededor de la temperatura operativa de neutralidad de tan sólo $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en verano (actividad ligera y vestimenta de 0,5 clo) y $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno (actividad ligera y vestimenta de 1 clo), mientras que el modelo adaptativo de la misma norma para edificios con ventilación natural amplía ese rango hasta $\pm 3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la Figura 3.1 se representan las zonas de confort que se derivan de los dos tipos de enfoques en función de la temperatura media exterior.

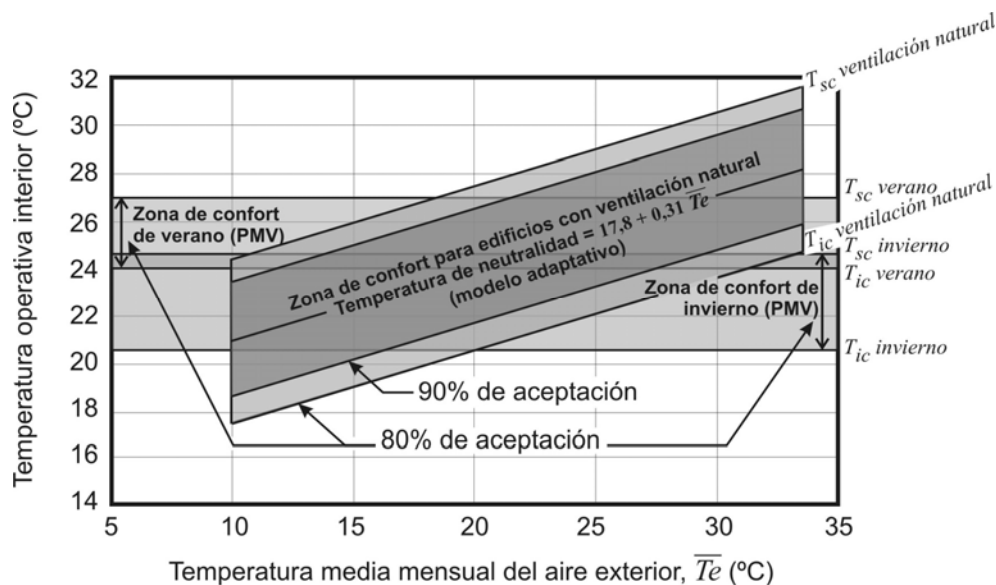


Figura 3.1. Zonas de confort para edificios con calefacción (invierno), aire acondicionado (verano) y ventilación natural, basadas en ASHRAE 55 (PMV y adaptación). Notación: T_{ic} : temperatura inferior de confort; T_{sc} : temperatura superior de confort.

Las zonas de confort para climatización activa (aire acondicionado en verano y calefacción en invierno) basadas en el PMV (Figura 3.1) y delimitadas por sus correspondientes límites inferiores y superiores (T_{sc} y T_{ic}) son la referencia normativamente usada para estimar el gasto energético de los sistemas de climatización activa. Los métodos estáticos de estimación del consumo energético de edificios, como el método de grados-día y el método de los intervalos (*Bin method*) (ASHRAE, 2009, 19.17-19.22), definen la temperatura de balance de enfriamiento (*balance point temperature for cooling*) o la temperatura de balance de calefacción (*balance point temperature for heating*) como la temperatura exterior para la cual, estando el edificio a la temperatura deseada (T_{sc} verano o T_{ic} invierno), el edificio está en equilibrio térmico. De aumentar la temperatura exterior por encima de la temperatura de balance de enfriamiento, el edificio tenderá a calentarse más de lo aceptable, lo que supone el funcionamiento del aire acondicionado; simétricamente, de descender la temperatura exterior por debajo de la temperatura de balance de calefacción, el edificio tenderá a enfriarse más de lo aceptable, lo que supone la activación de la calefacción. De cara al ahorro energético, en un edificio que usará aire acondicionado en verano y calefacción en invierno (p.ej. en un clima templado continental de veranos muy cálidos e inviernos muy fríos), la adaptabilidad se puede entender como la capacidad del arquitecto de diseñar un edificio para el cual la temperatura de balance de enfriamiento sea lo más alta posible y la de balance de calefacción lo más baja posible. Observando la Figura 3.1 se puede asimismo advertir que de admitirse temporalmente el criterio de confort adaptativo (*i.e.*, que el edificio funcione con ventilación natural en ciertas temporadas), se puede excluir el uso del aire acondicionado en aquellas situaciones en que la temperatura operativa interior supere T_{sc} verano (27 °C) pero no supere T_{sc} ventilación natural (es decir, que se encuentre aún en la zona de confort adaptativo). La condición sería que se use la ventilación natural por temporadas de al menos un mes, de forma que los usuarios adopten la expectativa asociada, que es la premisa subyacente al concepto de adaptación.

De la Figura 3.1 se sigue igualmente que desde la perspectiva de adaptar un edificio al clima, la zona de confort adaptativo para edificios con ventilación natural es más *favorable* que las zonas de confort basadas en el PMV, pues la misma está de por sí adaptada al clima. Al mismo tiempo, presenta un rango más amplio de aceptación. Al estar este tipo de edificios en funcionamiento libre (*i.e.*, sus condiciones internas varían en respuesta a las variaciones del clima), el concepto de temperatura de balance, tal como se usa en los métodos de estimación del gasto energético, se hace inadecuado, pues el mismo implica una temperatura interior fija, algo incompatible con el funcionamiento libre del edificio. La *distancia a salvar* entre malestar térmico y confort sustituye aquí la noción de gasto energético. Por consiguiente, así como se cuantifican en los métodos estáticos los *grados-tiempo* (grados-día o grados-hora) en que se está por encima o por debajo de la temperatura de balance, de conocerse la temperatura interior del edificio, se puede, de forma análoga, cuantificar los grados-tiempo en que se está por encima o por debajo de la zona de confort.

Por último se debe señalar que el modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55 está limitado a edificios con ventilación natural, por lo que, en principio, no es válido en edificios sin ventilación natural, pero en funcionamiento libre. Esta limitación se debe a que entre los edificios no climatizados artificialmente de la base de datos RP-884 (de donde se deriva el modelo [apartado 2.2.1, página 40]) no hay ninguno sin ventilación natural. La reserva que se pudiera derivar de esto tendría su origen en la falta de información, no en razones positivas. El modelo de la norma europea EN 15252-2007 sí abarca todos los edificios en funcionamiento libre, pero su aplicabilidad sólo está garantizada en Europa, por derivarse de una base de datos europea. El método que aquí se presenta adoptará el modelo adaptativo de ASHRAE, aunque con esa reserva.

3.2.2 El edificio. Una caracterización basada en su temperatura interior

En los métodos de ayuda al diseño orientados a adaptar los edificios al clima, la caracterización del edificio depende lógicamente del avance del proyecto. Tal como se describió en el Capítulo 2 (apartado 2.1, página 22), entre los *métodos iniciales* están, primero, los que sólo relacionan clima y confort a fin de informar sobre la orientación del diseño. Entre ellos se cuentan los grados-día, los grados-hora y el diagrama bioclimático de Olgyay, basados en la hipótesis de la similitud inicial de las condiciones exteriores e interiores (apartado 2.4.1.1, 2.4.1.160). La incorporación del edificio empieza en métodos también iniciales como las Tablas de Mahoney y los diagramas bioclimáticos de Givoni y Szokolay, donde se presupone, de manera genérica, la respuesta de los edificios en los que se acentúen ciertas estrategias generales de diseño (apartados 2.4.1.2 y 2.4.1.3, páginas 62 y 64). Sin embargo, en ellos las *distancias* potencialmente corregibles entre malestar y confort siguen estando dadas por la temperatura y la humedad exterior. Las reglas e indicaciones heurísticas o empíricas ligadas a las etapas intermedias del proceso de diseño hacen igualmente abstracción del edificio, pero, por referirse a componentes y aspectos concretos del mismo, condicionan su aplicabilidad. A este nivel, la caracterización consiste en supuestos de casos, ejemplos de diseño, especificaciones o problemas relacionados con componentes determinados, estrategias y evaluaciones de problemas típicos (apartado 2.4.2, páginas 72). Es sólo en los métodos finales de comprobación que la caracterización del edificio se concretiza, al contarse ya con una propuesta detallada (apartado 2.5, página 92).

La caracterización que aquí se propone se asemeja a la de los diagramas bioclimáticos en cuanto a expresar el comportamiento del edificio en términos de temperatura, pero difiere en que no presupone este comportamiento de forma genérica con base en la temperatura exterior, sino que lo expresa directamente por medio de la temperatura interior del edificio obtenida por simulación o experimentación. En tal sentido se asemeja a la caracterización de la simulación dinámica, pero entiende por edificio, no un producto acabado, sino una propuesta con al menos lo mínimo requerido para simular. Puede tratarse de la temperatura interior de un esquema elemental limitado a los volúmenes básicos y a materiales de envolvente genéricos, pero también de la temperatura de

un edificio ya construido y objeto de remodelación o restauración. Como sea, el edificio así descrito es previo a la incorporación de las estrategias o técnicas cuyo potencial de adaptación al clima se desea averiguar, lo que puede situarse en cualquier etapa del proceso de diseño, exceptuando el mero inicio. Lo *mínimo para simular* requiere sin embargo conocer ciertas reglas empíricas básicas relativas a la volumetría, la orientación, la distribución espacial, el ventanaje, etc. En el marco del método, al edificio así concebido se le llamará *edificio de base* o *edificio libre*.

La simulación del edificio de base (o la medición experimental cuando se trate de un edificio ya construido) tiene por objeto calcular su temperatura operativa interior a fin de cotejarla con el criterio de confort térmico. Esto es lo que normalmente se hace cuando se simula una propuesta arquitectónica, expresándose el resultado en series de tiempo de la temperatura interior, de los grados-hora de calor o frío o del porcentaje de tiempo de confort. Sin embargo, la simulación concebida así es casi siempre de comprobación de un diseño acabado, con la posibilidad de volver a él, lo que se pudiera describir como una etapa conclusiva basada en un procedimiento de *ensayo y error*, no necesariamente orientativo del diseño, menos aún de las decisiones iniciales. Para que los resultados de la simulación o la experimentación puedan ser útiles desde ese otro punto de vista, deben, por un lado, desligarse de los atributos del edificio asociados a las etapas finales del diseño, y, por otro, ser objeto de un tratamiento analítico o descriptivo que concluya en patrones típicos de comportamiento bajo ciertas premisas. En otras palabras, el resultado debe desacoplarse, siguiendo hipótesis válidas, de las especificidades del caso simulado.

Un concepto que permite desacoplar los tres elementos del sistema, *i.e.*, el edificio, el clima y el criterio de confort, es el concepto de temperatura libre (*free-running temperature*) (Ghiaus 2003, 2006; Ghiaus y Allard, 2005a, 201-208, 2005b, 2006). La temperatura libre de un edificio se define de forma análoga a la temperatura de balance (*balance point temperature*) de los métodos estáticos de estimación del gasto energético de los edificios (ASHRAE, 2009, 19.17-19.22) (apartado 2.1, página 26). En estos métodos, la temperatura de balance es la temperatura exterior para la cual, dada una temperatura interior fija, el edificio está en equilibrio térmico con su entorno. Con base en la diferencia entre la temperatura exterior y la de balance y la conductancia térmica global del edificio, estos métodos estiman luego las necesidades energéticas de climatización. Análogamente, la temperatura libre se define como la temperatura interior de un edificio cerrado (sin ventilación) y sin sistemas de climatización activa, para la cual, dada una temperatura exterior, el edificio está en equilibrio térmico con su entorno. Esta condición de equilibrio térmico significa que las ganancias de calor (básicamente solares y cargas internas) equivalen a las pérdidas de calor conductivas, según la relación lineal:

$$K(T_i - T_o) = q_{gan} \quad (3.1)$$

donde K es la conductancia térmica global del edificio ($W/^\circ C$); T_l y T_o son respectivamente la temperatura libre y la temperatura exterior ($^\circ C$) y q_{gan} es la ganancia total de calor (sol más cargas internas) (W). De la relación anterior se desprende que:

$$T_l = T_o + \frac{q_{gan}}{K} \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) indica que, en condiciones de equilibrio, la temperatura libre equivale a la temperatura exterior más un incremento proporcional a las ganancias de calor según el valor de K .

El problema de los métodos estáticos es que al suponer el equilibrio bajo condiciones transitorias, desestiman la influencia de los procesos de acumulación de calor, que son los que hacen que el problema sea en realidad dinámico. Esta suposición puede aceptarse en estimaciones del gasto energético de edificios que se mantengan a una temperatura constante (*i.e.*, cuyo interior esté en equilibrio térmico) y que integren los aumentos y descensos periódicos de la temperatura exterior, pero no puede aceptarse de fluctuar la temperatura interior (ASHRAE, 2009, 19.17). Conceptualmente, el edificio puede concebirse como un filtro que amortigua y desfasa la ondulación diaria de la temperatura exterior. Si no hay ganancias solares ni internas, las medias de las temperaturas exterior e interior son iguales, pero no sus valores máximos y mínimos, ni la hora en que éstos ocurren. De presentarse ganancias, éstas incrementan la media (de ahí la importancia de la ventilación como estrategia de enfriamiento). Durante este proceso de carga y descarga, la temperatura interior, a una hora dada, es una consecuencia del historial térmico, no de la temperatura exterior a esa hora. De ahí que la imprecisión de los métodos estáticos crezca en la medida en que crezcan la amplitud diaria de la temperatura y la inercia térmica de la envolvente.

Este inconveniente se puede esquivar de varias formas, siendo una la *linearización* del comportamiento del edificio mediante técnicas de regresión aplicadas a los resultados de la simulación o la experimentación. Esto es lo que hacen los *modelos dinámicos simples* (apartado 2.5, página 92), en los que las simulaciones obedecen a estudios estadísticos o paramétricos orientados a definir patrones o elaborar especificaciones (p.ej, derivar la conductancia global [dinámica] o la curva de carga energética de edificios tipo, establecer correlaciones entre la temperatura máxima de edificios con ventilación nocturna y la amplitud diaria de la temperatura exterior, etc.) (Shaviv *et al.*, 2001; Pfafferott *et al.*, 2003, 2005; Ghiaus, 2006; Breesch y Janssens, 2010).

De adecuarse la relación entre la temperatura exterior y la temperatura libre a un modelo de regresión lineal, se haría posible desligar el comportamiento del edificio del clima, pues se contaría con una ecuación simple para esa relación. En tal sentido, es lógico suponer que la dispersión de las nubes de puntos que resultarían de graficar esa relación utilizando los resultados de la simulación aumenta si se consideran realísticamente aspectos con una fuerte componente aleatoria, tales como la radiación solar horaria (debido a las variaciones de la nubosidad), la ventilación cruzada

o las variables de equipamiento y ocupación. Con miras a reducir esta dispersión en el edificio de base, se puede, además de anular la ventilación, suponer cargas internas constantes. Si además se acota el análisis a períodos sin cambios significativos en los ángulos solares y la amplitud diaria de la temperatura exterior (un mes, una estación o una temporada, según las particularidades del clima), a una hora específica del día, la regularidad entre días haría que las ganancias de calor (sol más cargas internas) y la conductancia térmica global (dinámica) del edificio sean siempre similares, y por lo tanto también su relación. De ahí que se pueda prever un comportamiento lineal vinculable a la ecuación (3.2) para esa relación si se asumen tales hipótesis.

La Figura 3.2 muestra los diagramas de dispersión que se obtienen para cuatro horas del día durante el mes de junio en una vivienda situada en Caracas, de una planta, conformada por paredes de bloques y friso, techo de fibrocemento y tejas con cámara de aire y ventanas de vidrio simple.

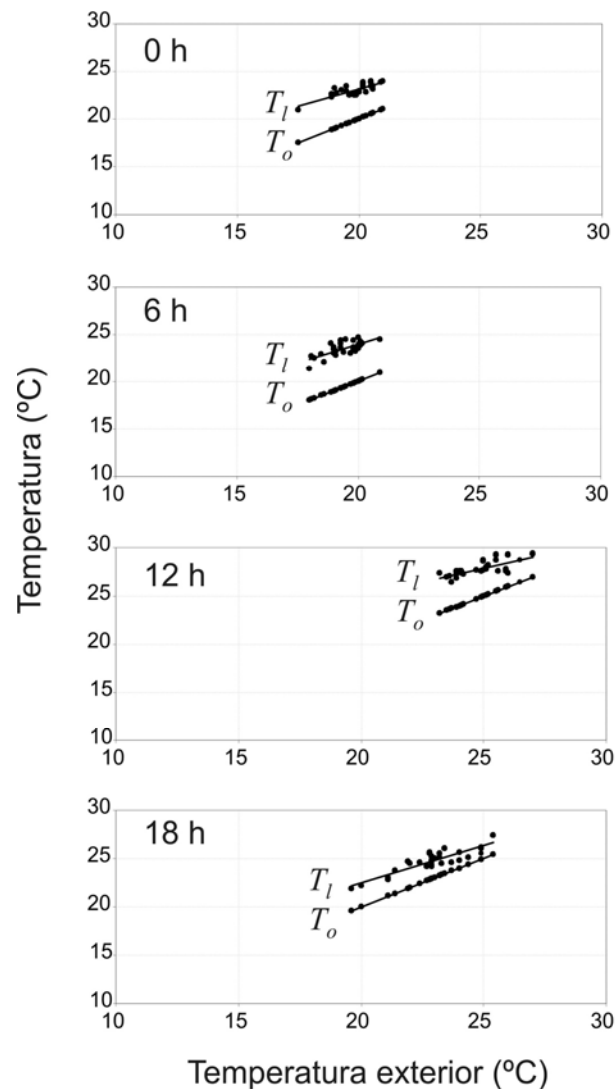


Figura 3.2. Temperatura exterior (T_o) y temperatura libre (T_l) durante el mes de junio en cuatro horas del día en una vivienda de una sola planta ubicada en Caracas (paredes de bloques y friso, techo de fibrocemento y tejas con cámara de aire, ventanas de vidrio simple, sin parasoles)

De admitirse, con base en el cuasi-parallelismo entre la temperatura libre y la temperatura exterior (Figura 3.2), que a una hora del día y durante un mes la diferencia entre ambas temperaturas es constante e igual al promedio de las diferencias diarias, la relación entre las ganancias de calor y la conductancia global (que es lo que expresaría esa diferencia según la ecuación (3.2)) se desliga de la temperatura exterior, pasando a ser sólo función de la hora. Esa diferencia debe además ser la misma en cualquier lugar con ángulos solares similares en ese mismo mes (*i.e.*, en cualquier lugar de latitud similar). La Tabla 3.1 muestra el promedio mensual de la diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior para esta vivienda y las mismas cuatro horas del día, considerando los 12 meses del año y ubicando la vivienda en cuatro ciudades distintas de Venezuela.

Tabla 3.1. Diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior para cuatro horas del día en una vivienda de una sola planta ubicada en cuatro ciudades de Venezuela

	Maracaibo				Valencia				Caracas				Mérida				Promedios			
	0 h	6 h	12 h	18 h	0 h	6 h	12 h	18 h	0 h	6 h	12 h	18 h	0 h	6 h	12 h	18 h	0 h	6 h	12 h	18 h
ene	3,3	4,9	4,1	3	3,6	5,3	2,4	3	3,5	4,2	3,3	2,4	3,5	4,5	3,2	2,1	3,5	4,7	3,3	2,6
feb	3,4	4,8	4	3,1	3,7	4,9	2,2	3,2	3,6	4,3	3	2,4	3,3	4,4	2,9	2,4	3,5	4,6	3,0	2,8
mar	3,3	5	4,2	3	3,4	5	2,4	2,9	3,5	4,5	3	2,3	3,4	4,4	3,8	2,3	3,4	4,7	3,4	2,6
abr	3,2	4,9	4,3	2,7	3,4	5	3,6	2,8	3,5	4,6	2,8	2,1	3,6	4,6	3,8	2,5	3,4	4,8	3,6	2,5
may	3,1	4,6	4,5	2,3	3,1	4,4	3,4	2,1	3,3	4,3	2,8	1,8	3,3	4,6	3,4	2,3	3,2	4,5	3,5	2,1
jun	3,2	5,2	3,9	2,7	3,4	4,4	3,1	2,4	3,2	4,2	3,1	2	3,3	4,3	3,7	2,1	3,3	4,5	3,5	2,3
jul	3,4	5	3,8	2,2	3,3	4,7	3,3	2,1	3,2	4	3,1	1,9	3,7	4,7	3,6	1,9	3,4	4,6	3,5	2,0
ago	3,4	5,5	4,1	2,5	3,5	4,9	3,1	2,4	3,5	4,3	2,9	2,4	3,7	4,8	3,3	2,1	3,5	4,9	3,4	2,4
sep	3,4	5,1	4,5	2,8	3,6	4,9	2,9	2,6	3,4	4,6	3,2	2,6	3,6	4,3	3,7	2,2	3,5	4,7	3,6	2,6
oct	3,2	5	4,9	2,2	3,5	4,9	2,3	2,5	3,4	4,2	3,5	2,5	3,7	4,4	3,8	2,2	3,5	4,6	3,6	2,4
nov	3,2	4,9	4,2	2,7	3,4	5	2,5	2,8	3,1	4,1	3,7	2,4	3,3	4,2	3,9	2,2	3,3	4,6	3,6	2,5
dic	3,4	4,9	3,5	2,6	3,7	5,3	2,8	2,5	4,1	4	2,7	1,7	3,4	4,9	3,1	2,1	3,7	4,8	3,0	2,2
Prom	3,3	5,0	4,2	2,7	3,5	4,9	2,8	2,6	3,4	4,3	3,1	2,2	3,5	4,5	3,5	2,2	3,4	4,7	3,4	2,4

El promedio de las diferencias entre la temperatura libre y la temperatura exterior (Tabla 3.1, a la derecha) (o en su defecto cualquiera de las diferencias obtenidas en ciudades específicas) puede asumirse como una especificidad del edificio. Ghiaus (2003) llama a esa diferencia *huella energética del edificio*. Es importante subrayar que la hipótesis para desacoplar de esta forma el edificio del clima es la semejanza en las ganancias de calor, es decir, iguales cargas internas y ángulos solares similares (según la geometría del edificio, podría también desligarse de la orientación, siempre que las ganancias solares no estén influenciadas de forma importante por este factor).

La Figura 3.4 muestra gráficamente la *huella energética* de esta vivienda con base en los promedios semanales y considerando las 24 horas del día. Obsérvese que la vivienda aumenta su diferencia de temperatura con el exterior en la noche, cuando afuera la temperatura decrece, para luego reducirla bruscamente cuando afuera se eleva, aumentarla de nuevo por causa de la acumulación del calor del sol y finalmente acercarse otra vez a la temperatura exterior al caer la tarde. Como complemento de esta evolución se presenta en la Figura 3.4 la contribución de las cargas solares e internas, desligándola de la influencia de las fluctuaciones de la temperatura exterior.

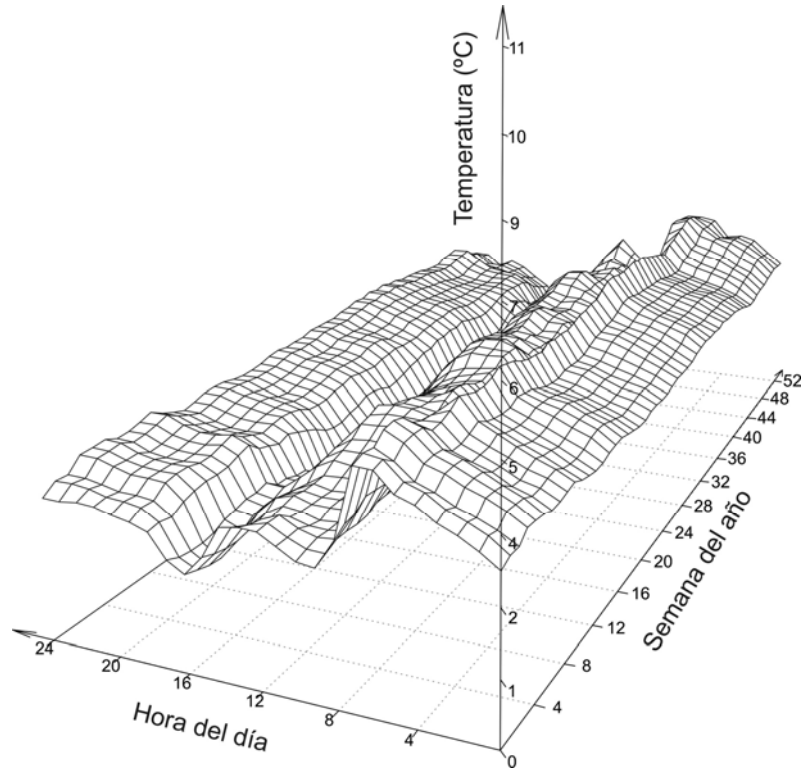


Figura 3.3. Diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior en una vivienda de una sola planta ubicada en el trópico (huella energética – precisión semanal)

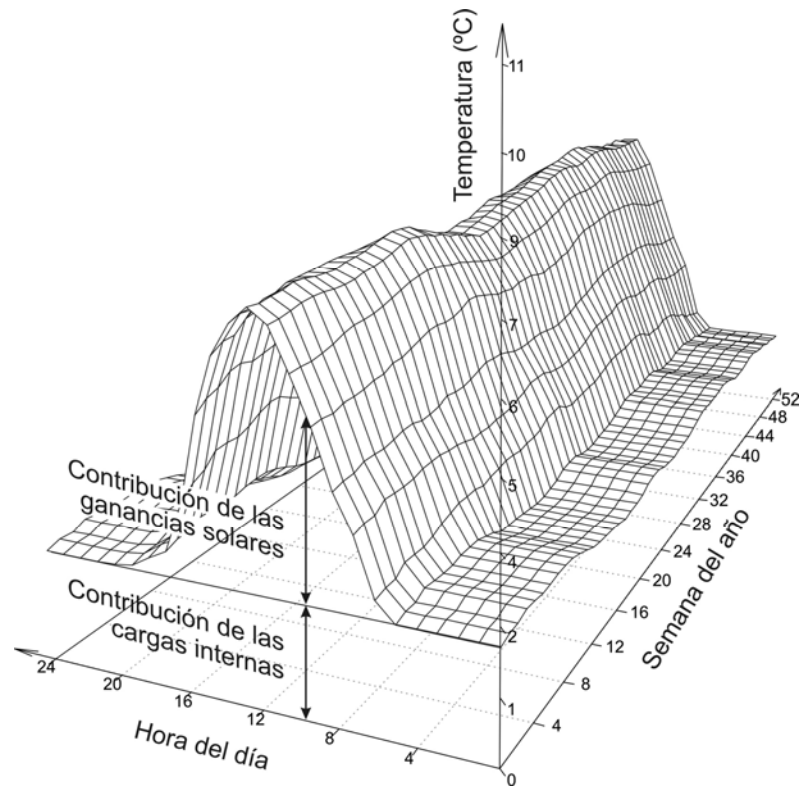


Figura 3.4. Evolución anual de la contribución absoluta de las cargas internas y las ganancias solares desligándolas del efecto de las fluctuaciones de la temperatura exterior

Una peculiaridad observable en la Tabla 3.1 y la Figura 3.3 es la similitud de la magnitud y evolución diarias de la diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior a lo largo del año, lo que se explica por el carácter isotermo del clima tropical (se puede en efecto verificar que en climas con diferencias estacionales importantes esa regularidad no se da). Ello lleva a suponer buenas condiciones para adecuar un modelo de regresión lineal al diagrama de dispersión de todo el año para una hora del día, lo que no implica olvidar que al hacerlo se desdiferenciarían, al menos de forma explícita, las distintas temporadas, algo aceptable sólo en la medida en que la precisión planteada permita ignorar la amplitud térmica anual (la cual en Venezuela es menor de 4 °C). La Figura 3.5 muestra los diagramas de dispersión y los modelos de regresión lineal con sus respectivas estadísticas básicas para la misma vivienda en Caracas y las mismas cuatro horas del día consideradas en las gráficas de la Figura 3.2, pero ahora reuniendo los valores de todo el año.

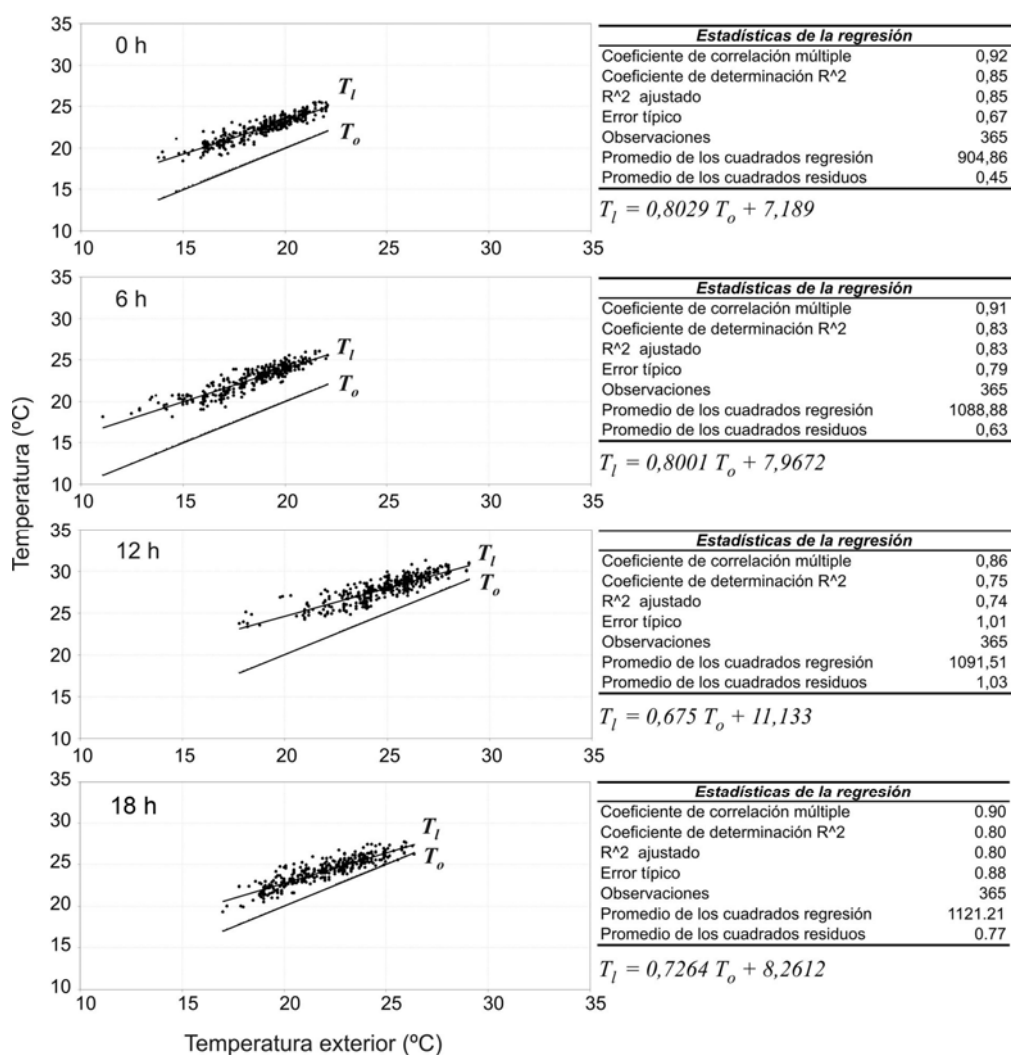


Figura 3.5. Temperatura exterior (T_o) y temperatura libre (T_l) durante un año en cuatro horas del día en una vivienda de una sola planta ubicada en Caracas y estadísticas del modelo de regresión lineal de T_l en función de T_o para cada caso

Obsérvese que el modelo de regresión lineal a una hora específica considerando todo el año es casi paralelo a la temperatura exterior en horas nocturnas, pero pierde paralelismo en horas diurnas. Esto es atribuible a que, a una misma hora, a lo largo del año, la ganancia de calor solar varía según la época, al cambiar los ángulos solares. Una consecuencia es que se hace notar el efecto de la inercia térmica del edificio simulado: para temperaturas exteriores muy altas, a esas horas, la temperatura libre tenderá a ser inferior a la exterior. Cuanto mayor sea la inercia térmica, más fácilmente se manifestará esa tendencia. Un edificio con una inercia térmica muy alta presentará de hecho temperaturas libres inferiores a la temperatura exterior todas las tardes, al margen del clima. Desde una perspectiva estrictamente matemática, si se mantiene la suposición de equilibrio térmico, la conductancia global del edificio pasa a ser negativa (en otras palabras, el *incremento* asociado a las ganancias de calor se hace negativo, pues se parte de la suposición de que sin ganancias ambas temperaturas son iguales). De ahí que, a pesar de que el clima sea aproximadamente isoterma, el no paralelismo impide asumir, para todo un año, la regularidad aceptada en períodos de un mes, sobre cuya base se delimitó la precisión de la huella energética del edificio.

La diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior deja por consiguiente de depender sólo de la hora y se convierte también en una función de la temperatura exterior. Esto es, la relación entre las ganancias de calor y la conductancia global del edificio, a una hora dada, pasa a ser también función de la temperatura exterior. Que T_l no sea del todo paralela a T_o no anula el que su relación pueda modelarse por medio de una regresión lineal simple, según la forma:

$$T_{li} = \beta_1 + \beta_2 T_{oi} + u_t \quad (3.3)$$

donde t es el número de la observación, β_1 es el valor del modelo para una temperatura exterior igual a cero, β_2 es la pendiente del modelo y u_t es la dispersión alrededor del modelo para la observación t , dispersión atribuible a la influencia de los factores distintos al valor de la temperatura exterior al momento de la observación (considerados de menor peso desde la perspectiva de las hipótesis planteadas), tales como las variaciones, en buena medida aleatorias, de la radiación solar horaria por causa de la nubosidad y el desigual efecto de la inercia térmica del edificio como consecuencia de las diferencias diarias en las condiciones térmicas previas a la observación.

La Figura 3.6 muestra los modelos de regresión lineal obtenidos para las 18 h (6 de la tarde) al simular durante un año la misma vivienda de las gráficas previas, ubicándola ahora en cuatro ciudades distintas. Adviértase la similitud de los cuatro modelos, lo que permite, aproximando, generar un modelo basado en los valores promedio, el cual caracterizaría el comportamiento de la vivienda para cualquier clima de latitud similar. Al basarse en promedios, la dispersión se reduce y el modelo lineal se robustece. Adviértase que, según este modelo promedio, a esa hora, la temperatura libre se hará inferior a la temperatura exterior para valores de esta última superiores a 34 °C (algo de muy poca ocurrencia a esa hora incluso en las zonas más calientes de Venezuela).

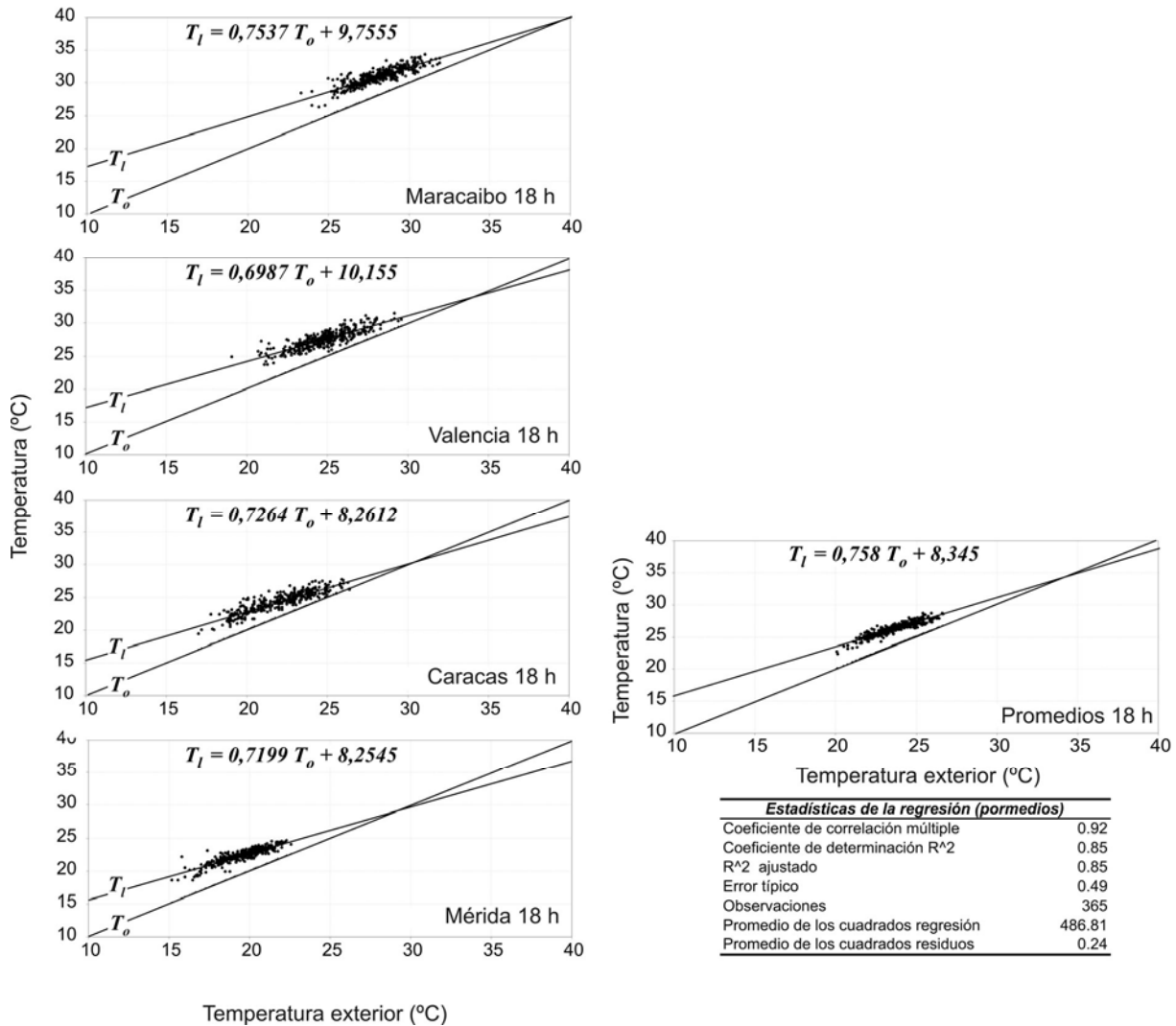


Figura 3.6. A la izquierda, modelos de regresión lineal simple de la temperatura libre en función de la temperatura exterior a las 18 h para una vivienda ubicada en cuatro ciudades; a la derecha, regresión lineal que se obtiene con los valores promedios de las cuatro ciudades

3.2.3 El clima. Una caracterización estadística

Una de las premisas básicas del método es desacoplar los tres elementos que conforman el sistema (criterio de confort térmico, clima y edificio), para así caracterizarlos separadamente, usando como referencia, al igual que la correlación del modelo de confort adaptativo de la norma ASHRAE 55 (Figura 3.1, página 113), la temperatura exterior. En el apartado anterior se plantearon las hipótesis que permitieron caracterizar el edificio de esa forma, por medio de regresiones entre la temperatura exterior y la temperatura libre que se obtiene de la simulación o de mediciones experimentales. Caracterizar ahora al clima plantea la interrogante de qué elementos acoplar y correlacionar con la temperatura exterior.

Desde una perspectiva térmica, los elementos del clima que más influyen en la temperatura de un edificio son la temperatura del aire, la radiación solar y, de funcionar el edificio con ventilación

natural, el viento. La caracterización del viento en términos de velocidad y dirección no es propiamente térmica, pero los caudales de ventilación que se producen tienen un efecto térmico, al sustituir el aire interior por uno de temperatura diferente. El viento también incide como un modificador de los intercambios convectivos en las superficies interiores y exteriores, si bien en ese aspecto es un factor difícil de cuantificar y de una influencia relativa, al lado de la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de las superficies, que es lo que activa ese flujo. Si se considera, primero, que la ventilación (al igual que la humedad) está implícita en los rangos de confort del modelo adaptativo, segundo, que el edificio de base no cuenta con ventilación y, tercero, que la misma podrá incorporarse posteriormente de forma genérica como una estrategia de diseño a evaluar con el método, se justifica no incluirlo en la caracterización del clima.

La radiación solar, en cambio, tiene una importancia primaria como fuente de calor en los edificios, aunque, como se vio en el apartado 2.3.1 (página 54), para que se den diferencias sustanciales en sus valores globales, se requiere recorrer grandes distancias. De ahí que su influencia a lo largo y ancho del país se haya podido uniformizar y separar de la temperatura del aire, al plantearse la hipótesis de equilibrio térmico con la que se interpretan los modelos de regresión lineal que describen el edificio (apartado anterior).

Suponiendo, sin embargo, que se plantee caracterizar la radiación solar en términos de temperatura, se podría recurrir al concepto de temperatura sol-aire. Este concepto es usado corrientemente en el análisis térmico de los edificios, y se calcula con la expresión:

$$T_{s-o} = T_o + \frac{\alpha E_s}{h} \quad (3.4)$$

donde T_o es la temperatura exterior (°C), α es la absorptividad de la superficie en la que incide la radiación solar (adimensional), E_s es la radiación solar incidente (W/m^2) y h es el coeficiente global de transferencia de esa superficie (convección más radiación) ($\text{W/m}^2\text{°C}$).

La temperatura sol-aire puede entenderse como aquella que produciría por sí sola el mismo efecto de calentamiento que el aire y el sol juntos. De modo que si se la calculara con base en los datos meteorológicos, se estaría expresando ese efecto conjunto en términos de temperatura. En tal sentido, Szokolay (1988) planteó un procedimiento para calcular los grados-día de un clima incorporando al sol por medio de la temperatura sol-aire. Sin embargo, este concepto tiene, desde la perspectiva genérica, el inconveniente que se refiere al calentamiento de superficies concretas, en situaciones concretas, caracterizadas por una absorptividad, un coeficiente superficial y una radiación solar incidente concretos. En un edificio, en un momento dado, cada superficie tendría una temperatura sol-aire distinta. El método de Szokolay parte de hecho de supuestos que condicionan su aplicación: asume una vivienda de ciertas características, por lo que se le usa básicamente para comparar climas con base en su efecto sobre una vivienda de referencia consensuada.

Por otro lado, se debe tener presente que la radiación solar se correlaciona de forma estrecha con la temperatura del aire, al punto que, de no conocerse, se le puede estimar sobre la base de dicha correlación (Morid *et al.*, 2002; Mandal *et al.*, 2003; Prieto *et al.*, 2009). Esa correlación es la que permite de hecho suponer a su vez una buena correlación entre la temperatura exterior y la temperatura libre de un edificio, puesto que las fluctuaciones de la temperatura libre se deben básicamente a la acción conjunta de las fluctuaciones de la temperatura exterior y la radiación solar, siendo a su vez que las fluctuaciones de la temperatura exterior se deben básicamente a las fluctuaciones de la radiación solar. El sol es, directa e indirectamente, la principal fuente de energía de la atmósfera y la causa principal de los valores de la temperatura del aire.

Por lo anterior, y considerando finalmente que la temperatura del aire es el elemento más usado para describir un clima, a éste se le caracterizará mediante la distribución de frecuencia (histograma) de la temperatura del aire. Las distribuciones de frecuencia ofrecen una información más rica que las series de tiempo tradicionales de la simulación, al permitir comparar de un vistazo la ocurrencia de rangos de valores. En la Figura 3.7 se muestran las distribuciones de frecuencia de la temperatura del aire en cinco localidades venezolanas (Apartaderos, Mérida, Caracas, Valencia y Maracaibo). Obsérvese que en Apartaderos la temperatura más recurrente es $6 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, con una ocurrencia de 3600 veces (*i.e.*, durante 3600 h la temperatura está en ese rango), en Mérida la condición más común es $16 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que ocurre poco más de 2400 h al año, y así para las demás localidades. Este tipo de información puede, como se verá en el siguiente apartado, cotejarse fácilmente con el criterio de confort y así observarse qué tan centrada queda la distribución de cada localidad respecto de la intersección entre la temperatura exterior y el rango de confort.

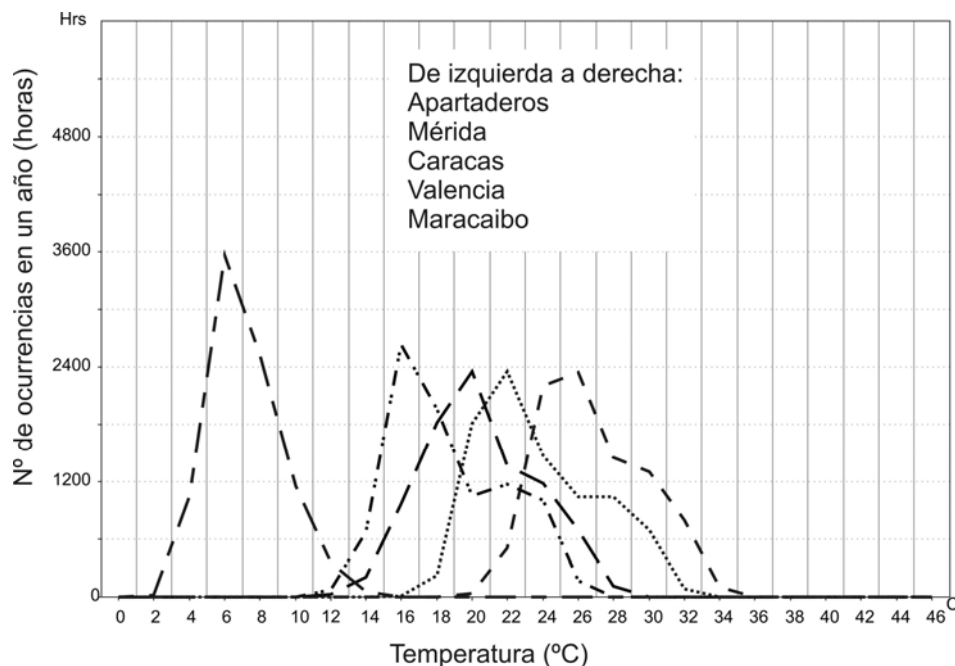


Figura 3.7. Distribución de frecuencia de la temperatura del aire en cinco ciudades venezolanas

3.3 Formulación del algoritmo del método

3.3.1 Edificio de base o edificio libre

El primer paso del algoritmo es definir el edificio de base (o edificio libre) y obtener su temperatura operativa interior (la temperatura libre), sea por simulación, sea experimentalmente. Por definición, para que la temperatura operativa interior sea la temperatura libre, el edificio no puede estar ventilado ni contar con sistemas de climatización activa. De resto podrá consistir en cualquier propuesta arquitectónica *simulable* o cualquier edificio existente previsto para remodelar o restaurar. Simulable significa que cuente con al menos lo mínimo requerido para calcular su temperatura interior por medio de algún software de simulación dinámica. Si se está al comienzo del proceso del diseño, el edificio de base podrá limitarse a la geometría elemental de la envolvente, incluyendo la ubicación y área de las superficies vidriadas y la distribución de los espacios. De no haberse decidido aún los materiales, se podrán suponer, en esta primera instancia, materiales muy comunes o materiales de alta conductividad que resalten el efecto resistente y de almacenamiento de los materiales que se incluyan luego. Concebir al edificio de base lo más al comienzo del proceso de diseño según criterios de adaptación al clima demanda conocer de partida ciertas reglas arquitectónicas básicas relativas a la forma, volumetría y orientación de la envolvente, la distribución de los espacios y el tamaño y ubicación de las aberturas y ventanas (un resumen de dichas reglas para el contexto venezolano fue presentado en el capítulo 2, apartado 2.4.2, página 72).

Como regla general, el edificio de base carecerá de los atributos que resulten de las estrategias y técnicas de diseño cuyo potencial de adaptación al clima se busca evaluar por medio del método (en general, de cualquier decisión que pueda repercutir en el confort térmico y que se desee evaluar). Dichas estrategias y técnicas se añadirán luego (una a una o integradamente) al momento de calcular su potencial (lo cual se describirá en los apartados 3.3.8 y 3.3.9, páginas 139 y 141).

El edificio de base o edificio libre puede ser en definitiva cualquier propuesta incompleta en cualquier etapa del proceso de diseño que no sea ni la etapa del mero inicio (cuando aún no se cuenta con nada) ni la etapa concluyente (cuando ya se cuenta con una propuesta acabada).

El edificio de base se puede también plantear desde una perspectiva académica, como un modelo de edificio cuya caracterización y posterior evaluación respecto de las estrategias o técnicas potencialmente aplicables lleve a métodos orientativos del diseño arquitectónico de edificios que puedan asociarse con dicho modelo. Visto así, el trabajo de simulación y evaluación de alternativas se hace con el fin de generar las regresiones que describan el comportamiento del edificio y de las potenciales estrategias o técnicas de diseño de manera desligada del clima, a objeto que sea el arquitecto quien coteje de manera rápida y simple dichas regresiones con el clima concreto de su proyecto y estime, sin necesidad de simular, las posibilidades de las mismas.

Un requisito anexo y conveniente del edificio de base es que cuente con cargas internas lo más uniformes, a fin de reducir la dispersión y garantizar las regresiones lineales simples con las que se prevé describir la relación entre la temperatura exterior y la temperatura libre. Las cargas internas son junto con las cargas solares la principal fuente de calor de los edificios. A diferencia de las cargas solares, las cuales se controlarán mediante estrategias y técnicas de diseño que podrán examinarse con el método, las cargas internas estarán en principio siempre presentes. En tal sentido, se deberán prever, según las posibilidades del programa de simulación, cargas internas típicas en función del uso del espacio, lo más uniformizadas posible, preferiblemente constantes.

3.3.2 Temperatura operativa libre del edificio de base

La temperatura operativa libre del edificio de base será el punto de partida para estimar el potencial de adaptación a cualquier clima del edificio de base y los edificios que resulten de aplicar en él las estrategias, técnicas o decisiones de diseño que se proyecte hacer y evaluar.

Como ya se explicó (apartado 3.2.2, página 115), la aplicación de modelos de regresión lineal simple a la temperatura libre obtenida por simulación permite caracterizar el comportamiento del edificio mediante un patrón independiente del clima, expresado como una ecuación lineal entre la temperatura exterior y la temperatura libre. La influencia de cada cambio posterior en el edificio podrá obtenerse también simulando. A cada nueva simulación corresponderá un nuevo patrón de comportamiento desligable igualmente del clima bajo las mismas hipótesis. La representación conjunta de todos estos patrones se convierte en una caracterización múltiple desacoplada del clima, la cual reúne al edificio de base y los cambios propuestos. Bastará luego superponer a estos patrones la distribución de frecuencia del clima específico y el criterio de confort para derivar el potencial de cada posibilidad en términos de grados-hora (lo que se explicará detalladamente más adelante, concretamente, en los apartados 3.3.6 y 3.3.7, páginas 133 y 134).

Se debe recordar que la temperatura operativa, en ausencia de ventilación, es el promedio entre la temperatura del aire interior y la temperatura radiante media (ecuaciones (2.1) y (2.2), página 32). En el marco de mediciones experimentales, se trata de la temperatura de globo. Es importante distinguir entre estas tres temperaturas (la operativa, la del aire y la radiante media), puesto que los programas de simulación pueden suministrar las tres, dos o una de ellas⁸.

⁸ Los ejemplos de aplicación del método que se presentan en este trabajo fueron simulados con el programa *Autodesk Ecotect Analysis*, desarrollado originalmente por Andrew Marsh (2003), y actualmente de la empresa Autodesk. Ecotect está basado en un método dinámico simplificado y de respuesta rápida llamado *método de admitancia* o *método CIBSE* (por haber sido desarrollado y propuesto por *the Chartered Institution of Building Services Engineers* de Gran Bretaña). Dicho método proporciona directamente la temperatura operativa interior, sin pasar por la radiante ni la del aire (Cibse, 2006). Sin embargo, Ecotect incluye también métodos para estimar, de ser necesario, la temperatura radiante en cualquier punto de un ambiente, con base en la ubicación relativa de las superficies y una estimación de sus temperaturas. Teniendo ambas, la temperatura del aire se puede despejar fácilmente. Nota: el que en el presente trabajo se use Ecotect no significa que se le esté recomendando o que se esté condicionando el método a dicho programa: cada usuario podrá usar el que tenga a la mano o el que considere mejor o más conveniente.

3.3.3 Temperatura de balance. Método de los intervalos de ASHRAE (*Bin method*)

El concepto de temperatura de balance (ya presentado en los apartados 2.1, 3.1, 3.2.1 y 3.2.2, páginas 26, 109, 112 y 115) se deriva de los métodos estáticos de ASHRAE orientados a calcular el gasto energético de los edificios, concretamente, el método de grados-día y el método de los intervalos (*Bin method*) (ASHRAE, 2009, 19.17-19.22). El principio en ambos métodos es calcular el gasto energético en función de la conductancia global del edificio y la diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura de balance, definida como la temperatura exterior para la cual, dada una temperatura interior fija *deseada* (o máxima o mínima aceptable), el edificio está en equilibrio térmico. De bajar la temperatura exterior por debajo de la de balance, el edificio tenderá a enfriarse más de lo aceptable, lo que implicaría la activación del sistema de calefacción a una potencia acorde con la pérdida de calor a través de la envolvente. Simétricamente, de subir la temperatura exterior por encima de la de balance, el edificio tenderá a calentarse más de lo aceptable, lo que implicaría la activación del sistema de aire acondicionado a una potencia acorde con la ganancia de calor a través de la envolvente. La diferencia entre el método de grados-día y el de los intervalos es que el primero usa los valores medios diarios de la temperatura exterior, mientras que el segundo usa los valores horarios. Por esta razón el método de los intervalos permite considerar variaciones de los factores involucrados en función de la hora o la temperatura exterior (la eficiencia del sistema de climatización, las variables de ocupación, la conductancia global, etc.). Ambos métodos fueron concebidos para aplicarse en forma de hojas de cálculo, en un tiempo en que no estaban extendidas las computadoras. En razón de que el método de los intervalos servirá de referencia para el cálculo de los potenciales de adaptación de las estrategias que se evaluarán con el método propuesto, se le resume a continuación.

El dato para aplicar de forma tradicional el método de los intervalos es la distribución de frecuencia (o histograma) de la temperatura exterior en el período considerado (un mes, una estación o un año). Dada una temperatura de balance, la distribución de la temperatura exterior permite averiguar de forma sencilla las veces (número de horas) en que la diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura de balance es de un nivel determinado.

La Figura 3.8 muestra, a modo de ejemplo, la frecuencia anual de la temperatura exterior horaria en Caracas, distribuida en intervalos de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_o \pm 0,5^{\circ}\text{C}$) (se puede comprobar en la gráfica que la suma de todas las frecuencias equivale a las horas que tiene un año: 8760). De asumirse, por ejemplo, para un edificio de oficinas, la temperatura de balance para enfriamiento de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, según el histograma de la figura, el aire acondicionado deberá funcionar sólo las horas indicadas en los intervalos de la temperatura exterior que van desde $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, y su potencia, en cada caso, será proporcional a la diferencia entre esa temperatura y la temperatura de balance. El método consiste luego en calcular las cargas de enfriamiento correspondientes a cada intervalo y multiplicarlas por la frecuencia respectiva para luego hacer la sumatoria y obtener la carga total.

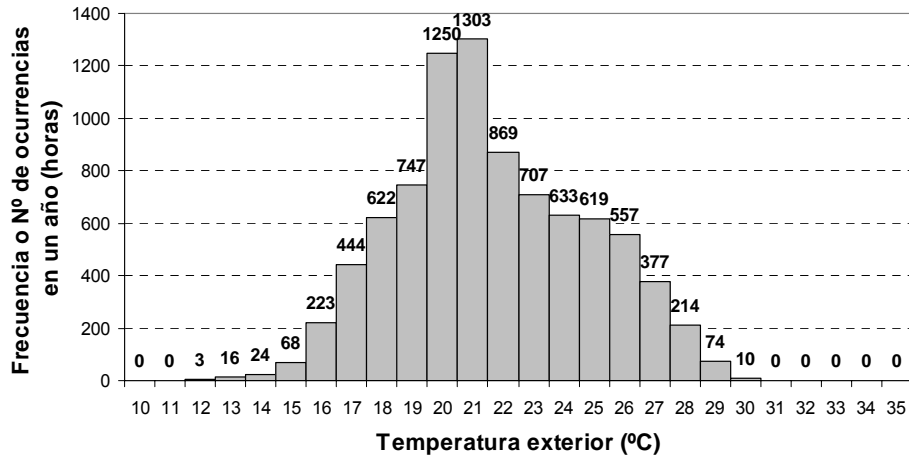


Figura 3.8. Frecuencia en un año de las temperaturas del aire horarias en Caracas distribuidas en intervalos de 1 °C

La condición de equilibrio del edificio (ganancias igual a pérdidas) cuando la temperatura exterior sea igual a la temperatura de balance se expresa de la siguiente forma:

$$q_{gan} = K(T_b - T_c) \quad (3.5)$$

donde q_{gan} es el flujo de ganancias de calor (cargas internas más cargas solares) (W), K es conductancia global del edificio (W/°C) y T_b y T_c son respectivamente la temperatura de balance y la temperatura deseada o, más concretamente, la temperatura de confort (°C).

Despejando, se obtiene la temperatura de balance:

$$T_b = T_c + \frac{q_{gan}}{K} \quad (3.6)$$

En el caso del aire acondicionado, la potencia de enfriamiento en un momento dado (en W) será:

$$\begin{cases} q_{enf} = \frac{K}{\eta}(T_o - T_b), & \text{si } T_o > T_b \\ 0, & \text{si } T_o \leq T_b \end{cases} \quad (3.7)$$

donde T_o es la temperatura exterior (°C) y η es la eficiencia del sistema de climatización.

Si se denota la condición de enfriamiento como:

$$\delta_{enf} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_o > T_b \\ 0, & \text{si } T_o \leq T_b \end{cases} \quad (3.8)$$

la carga de enfriamiento total (en Wh) del aire acondicionado a lo largo de un período de tiempo dado se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_{enf} = \sum_i \sum_j \frac{K(i, j)}{\eta(i, j)} [T_o(i, j) - T_b(i, j)] \delta_{enf}(1h) \quad (3.9)$$

donde i representa el intervalo de la temperatura exterior, j el número de la hora (su total es el número de horas del período) y el multiplicador ($1h$) indica que la carga se calcula para intervalos de una hora. Nótese que la conductancia global K y la eficiencia del sistema de enfriamiento η pueden variar en función de la hora y el intervalo de la temperatura exterior. Al término:

$$gh_{enf} = [T_o(i, j) - T_b(i, j)] \delta_{enf}(1h) \quad (3.10)$$

se le conoce como grados-hora de enfriamiento del intervalo de la temperatura exterior i en la hora de ocurrencia j (°C.h).

La totalidad de grados-hora que el sistema de enfriamiento debe compensar es la suma de todos los grados-hora de todos los intervalos, lo que se expresa de la siguiente forma general:

$$GH_{enf} = \sum_i \sum_j [T_o(i, j) - T_b(i, j)] \delta_{enf}(1h) \quad (3.11)$$

Para el caso de la estimación de las cargas de calefacción, se plantea una formulación análoga.

Volviendo al ejemplo de Caracas, para una temperatura de balance de enfriamiento de 22 °C, la aplicación de la ecuación (3.11) a la serie horaria anual de la temperatura exterior (cálculo exacto, a diferencia de aplicar sólo el histograma de la Figura 3.8) produce el resultado que se muestra en la Figura 3.9. Lo que allí aparece puede leerse como sigue: el sistema de enfriamiento debe contrarrestar en un año 8552 °C.h de exceso de la temperatura exterior respecto de la temperatura de balance. De esa cantidad, 54 °C.h corresponden a cuando la temperatura exterior sea menor de 22,5 °C, 642 °C.h a cuando esté entre 22,5 y 23,5 °C, y así de seguidas. Obsérvese que la máxima carga tiene lugar cuando la temperatura exterior está en el intervalo de 26 °C (25,5 a 26,5 °C).

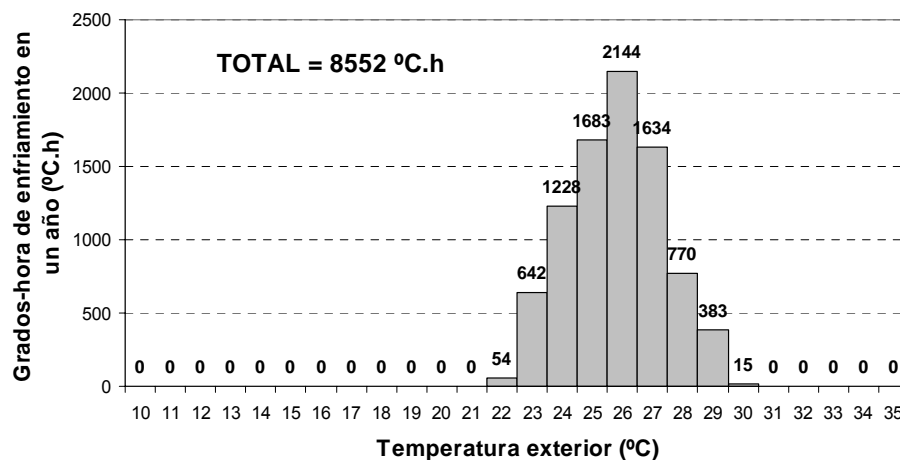


Figura 3.9. Distribución de los grados hora de enfriamiento anuales en función de la temperatura exterior para Caracas (Temperatura de balance de enfriamiento = 22°C)

3.3.4 Método de los intervalos utilizando el concepto de temperatura libre

El concepto de grados-hora, tal como se le utiliza en el método de los intervalos de ASHRAE, puede expresarse como una función de la temperatura libre de un edificio (Ghiaus, 2003). A la temperatura libre se le define (apartado 3.2.2, página 115) como la temperatura interior de un edificio sin ventilación ni sistemas activos de climatización para la cual, dada una temperatura exterior, el edificio está en equilibrio térmico con su entorno.

Del balance energético se tiene entonces que las ganancias de calor equivalen a las pérdidas:

$$q_{gan} = K(T_l - T_o) \quad (3.12)$$

donde q_{gan} es el flujo de ganancias de calor (cargas internas más cargas solares) (W), K es conductancia global del edificio ($W/^\circ C$) y T_l y T_o son respectivamente la temperatura libre y la temperatura exterior ($^\circ C$).

Despejando, se obtiene la temperatura libre:

$$T_l = T_o + \frac{q_{gan.}}{K} \quad (3.13)$$

Remplazando T_b en la ecuación (3.10) por su expresión en la ecuación (3.6) y usando la ecuación (3.13) se llega a una expresión equivalente a la del método de los intervalos para los grados-hora de enfriamiento, pero ahora en función de la temperatura libre y el límite superior de confort:

$$gh_{enf} = (T_l - T_{sc})\delta_{enf}(1h) \quad (3.14)$$

donde T_{sc} es la temperatura del límite superior del rango de confort (Figura 3.1, página 113) y δ_{enf} es la condición para activar el enfriamiento:

$$\delta_{enf} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_l > T_{sc} \\ 0, & \text{si } T_l \leq T_{sc} \end{cases} \quad (3.15)$$

Similarmente, los grados-hora de calentamiento a una hora específica se calculan con:

$$gh_{cal} = (T_{ic} - T_l)\delta_{cal}(1h) \quad (3.16)$$

donde T_{ic} es la temperatura del límite inferior del rango de confort (Figura 3.1, página 113) y δ_{cal} es la condición para activar la calefacción:

$$\delta_{cal} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_l < T_{ic} \\ 0, & \text{si } T_l \geq T_{ic} \end{cases} \quad (3.17)$$

Al igual que en el método de los intervalos, los grados-hora totales a ser compensados al interior del edificio libre mediante sistemas de enfriamiento o calefacción se obtienen finalmente sumando los grados-hora de todo el período considerado (p.ej., un año):

$$GH_{enf}(i, j) = \sum_i \sum_j [T_l(i, j) - T_{sc}(i, j)] \delta_{enf}(1h) \quad (3.18)$$

$$GH_{cal}(i, j) = \sum_i \sum_j [T_{ic}(i, j) - T_l(i, j)] \delta_{cal}(1h) \quad (3.19)$$

3.3.5 Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio de base presenta confort térmico

Considerando que tanto la temperatura libre como el rango de confort quedan ambos, a una hora del día, referidos linealmente a la temperatura exterior (apartados 3.2.1 y 3.2.2, páginas 112 y 115), se hace sencillo representar gráficamente los rangos de la temperatura exterior para los cuales la temperatura libre se encontrará en la zona de confort o fuera de ella a esa hora (*i.e.*, los rangos de la temperatura exterior asociados a las condiciones de las ecuaciones (3.15) y (3.17)). La Figura 3.10 esquematiza esos rangos. Al ser la temperatura libre un rasgo del edificio, a esa hora, se podrá afirmar que el edificio de base estará *adaptado* a cualquier clima cuya temperatura exterior se mantenga en el rango para el cual la temperatura libre está en la zona de confort. Teóricamente, la adaptabilidad *perfecta* se daría en edificios cuya temperatura libre resulte paralela a la zona de confort y esté centrada en ella (es decir, que coincida con la temperatura de neutralidad).

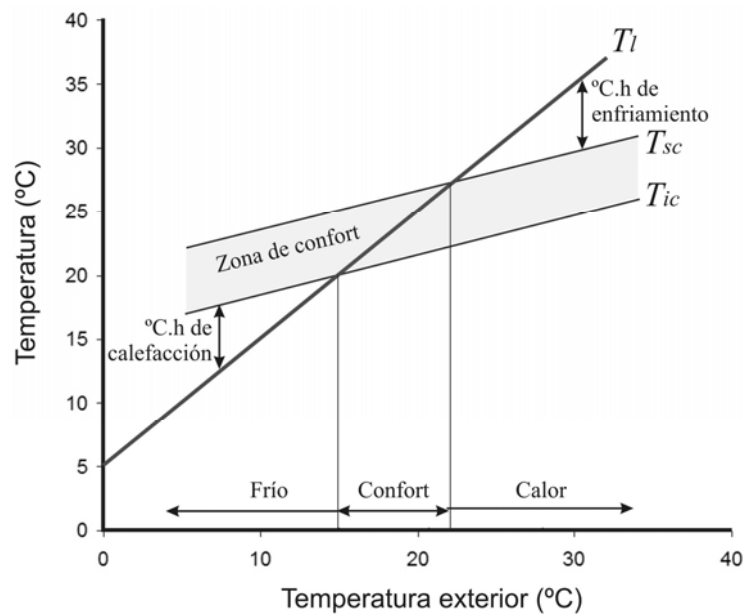


Figura 3.10. Rangos de confort, frío y calor en el edificio de base a una hora del día para un período de tiempo dado (un mes, una estación o un año). T_l : temperatura libre; T_{ic} : temperatura inferior de confort; T_{sc} : temperatura superior de confort

Observando la Figura 3.10, se aprecia que, dada una temperatura exterior, la temperatura libre tendrá un valor que podrá estar dentro del rango de confort o fuera de él. En caso de estar fuera (por encima o por debajo), se puede calcular la diferencia entre la temperatura libre y la temperatura de confort y obtener los grados-hora que habría que compensar con el sistema de climatización para esa situación (la expresión matemática de esa diferencia son las ecuaciones (3.14) y (3.16)). Los grados-hora totales de malestar para esa temperatura exterior a lo largo del período considerado serán la diferencia antes medida multiplicada por la frecuencia (número de ocurrencias u horas) de esa temperatura durante ese período de tiempo y a esa hora del día. La cantidad total de grados-hora de malestar a lo largo de todo el período para esa hora será finalmente la sumatoria de los grados-hora totales de cada temperatura exterior (la expresión matemática de esa totalidad son las ecuaciones (3.18) y (3.19), donde j ya no enumeraría las horas, sino los días).

3.3.6 Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar térmico en el edificio de base

En la Figura 3.11 se muestra un ejemplo de la representación gráfica de los grados-hora de malestar térmico en función de la temperatura exterior que se obtiene al combinar la temperatura libre del edificio de base, el criterio de confort y la distribución de frecuencia de la temperatura exterior de un clima específico, a una hora del día, durante un período de tiempo dado. La distribución de frecuencia que allí se muestra es concretamente la de la temperatura exterior de Caracas, a las 15 h (3:00 pm.), a lo largo de un año (*i.e.*, dicha distribución se basa en 365 valores de temperatura). El edificio de base es una vivienda simple cuya envolvente es de elevada conductividad.

Obsérvese que para temperaturas exteriores menores de 20 °C, la temperatura libre del edificio de base se ubica en la zona de confort, pero tal situación es poco frecuente a esa hora en Caracas. En cambio, la mayor ocurrencia corresponde a temperaturas de 25, 26 y 27 °C. Aproximadamente durante 200 días al año, la temperatura exterior en Caracas está en esos niveles a esa hora. Para esas tres temperaturas exteriores, la temperatura libre del edificio de base toma valores de 2 a 4 °C más altos que la temperatura máxima admisible según el criterio de confort, lo que contribuye en cerca de 600 °C.h de exceso de calor de un total anual de aproximadamente 1000 °C.h.

Para que el edificio de base del ejemplo se encuentre en confort a esa hora durante todo el año, la única opción es que la temperatura exterior se mantenga por debajo de los 20 °C, no demasiado lejos de ese valor (de estar muy lejos, la temperatura libre se pondría por debajo de la zona de confort, más a la izquierda de lo representado en la Figura 3.11). En otras palabras, el edificio no se adapta a las condiciones de Caracas a las 15 h, pero pudiera hacerlo en otra ciudad más fría. Al graficarse la temperatura exterior junto con la temperatura libre (Figura 3.11(a)), se advierte que de ventilarse (*i.e.*, de acercarse la temperatura interior a la del aire exterior), se podría restituir el confort una parte del tiempo en que no lo hay sin ventilar. La ventilación puede entenderse luego como una estrategia de diseño cuya incorporación cambia el edificio y cuyo efecto puede medirse.

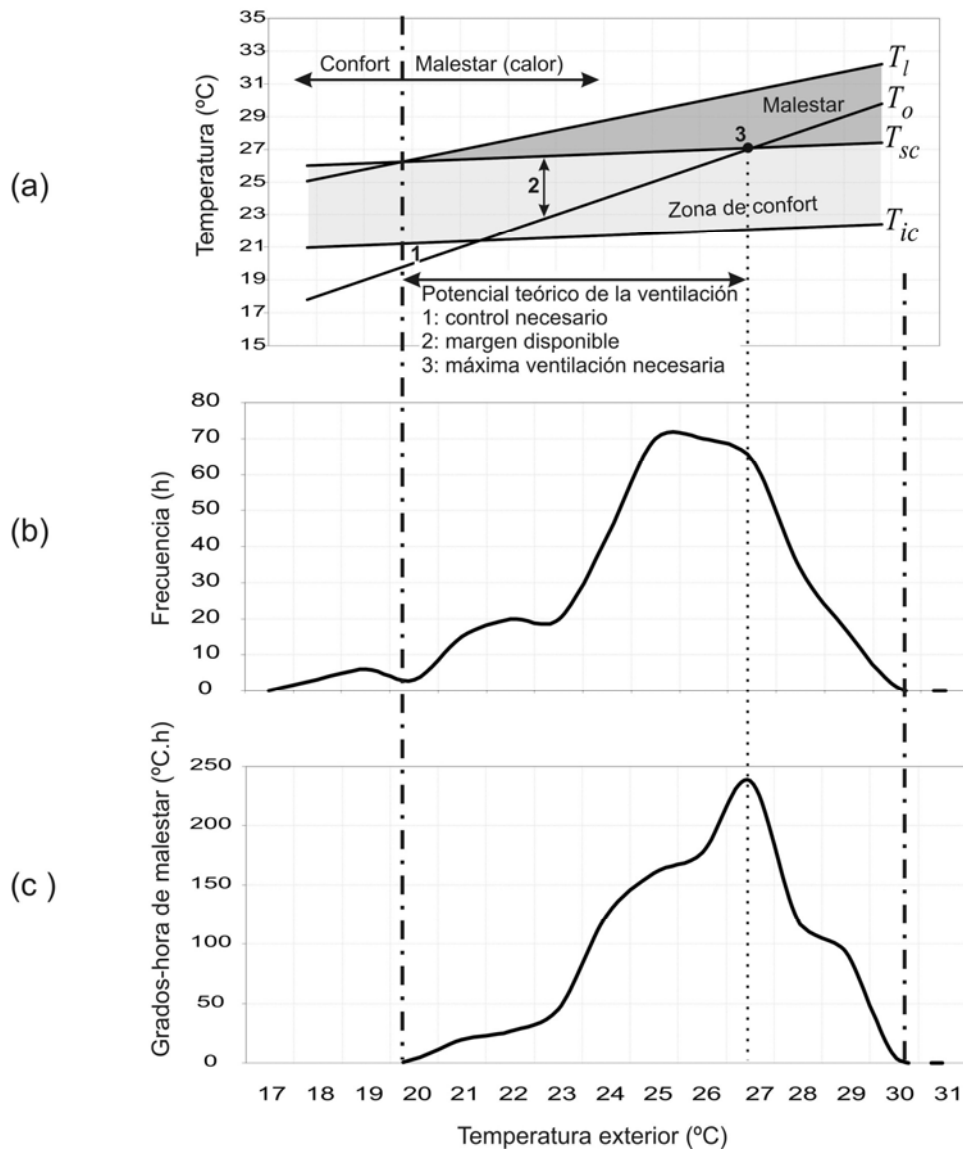


Figura 3.11. Grados-hora de malestar por exceso de calor en el edificio de base a una hora dada. (a) Temperatura libre (T_l), temperatura exterior (T_o) y rango de confort ($T_{ic} \leftrightarrow T_{sc}$); (b) distribución de frecuencia de la temperatura exterior a esa hora; (c) grados-hora de malestar

3.3.7 Potencial de las estrategias de diseño respecto del edificio de base

Adicionar una estrategia de diseño al edificio de base significa plantear la posibilidad de restituir el confort en al menos parte de su distribución de grados-hora de malestar térmico. A una hora del día, dicha estrategia producirá un aumento o una disminución de la temperatura libre. Ello conlleva una temperatura operativa nueva distinta de la temperatura operativa libre o, visto de otro modo, conlleva un edificio distinto. La nueva temperatura operativa, al igual que la temperatura operativa libre, es la variable dependiente de una regresión lineal cuya variable independiente es la temperatura exterior, por lo que ambos comportamientos son superponibles.

El desplazamiento de la temperatura interior del edificio puede ser negativo o positivo. De ser positivo, la estrategia de diseño calienta a esa hora el edificio ($T_{est} > T_l$), y de ser negativo, lo enfría ($T_{est} < T_l$). La Figura 3.12 y la Figura 3.13 muestran los rangos y situaciones que se pueden presentar al modificar la temperatura operativa libre (T_l) por la temperatura que resulta de aplicar la estrategia (T_{est}) para los casos en que $T_{est} < T_l$ (enfriamiento) y $T_{est} > T_l$ (calentamiento).

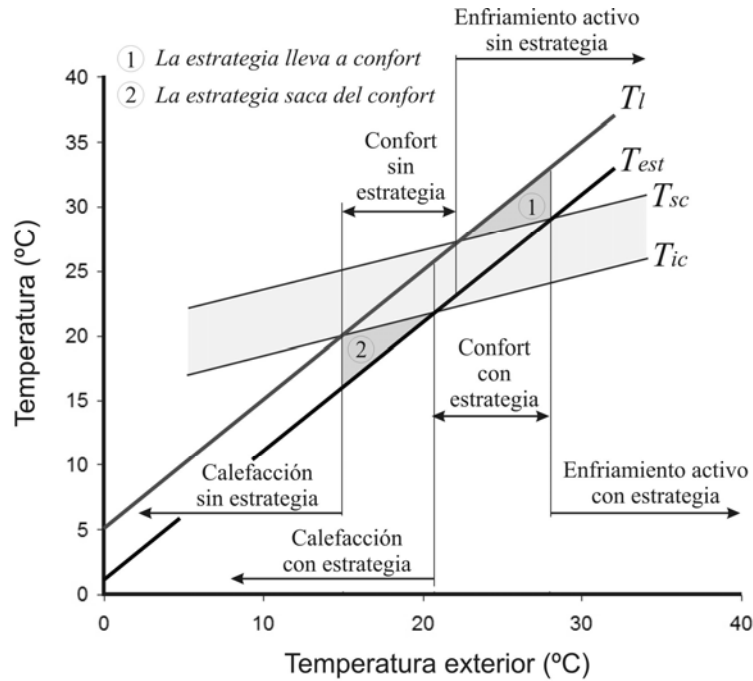


Figura 3.12. Rangos a una hora específica de la temperatura operativa libre (T_l) y la temperatura operativa luego de aplicar la estrategia de diseño (T_{est}). Caso $T_{est} < T_l$ (enfriamiento)

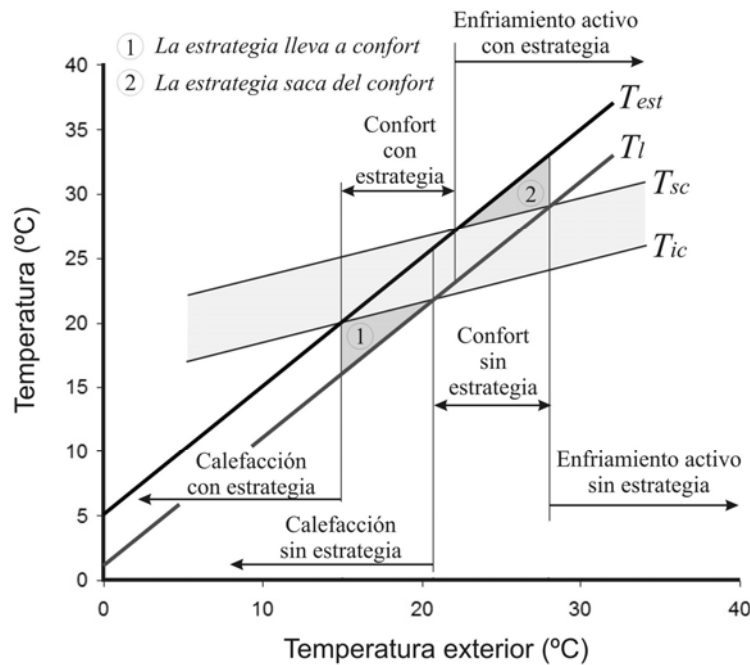


Figura 3.13. Rangos a una hora específica de la temperatura operativa libre (T_l) y la temperatura operativa luego de aplicar la estrategia de diseño (T_{est}). Caso $T_{est} > T_l$ (calentamiento)

Los rangos de la Figura 3.12 y la Figura 3.13 pueden expresarse mediante funciones binarias, tal como se expone a continuación.

3.3.7.1 Caso de enfriamiento ($T_{est} < T_l$) (Figura 3.12)

Mientras no se aplique la estrategia de diseño, la condición para enfriar usando algún sistema de enfriamiento activo es:

$$\delta_{enf\ act}^l = \begin{cases} 1, & \text{si } T_l > T_{sc} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.20)$$

Los grados-hora de calor a compensar son en ese caso:

$$gh_{enf\ act}^l = (T_l - T_{sc}) \delta_{enf\ act}^l \quad (3.21)$$

Al funcionar la estrategia de diseño, la condición para enfriar usando algún sistema de enfriamiento activo pasa a ser:

$$\delta_{enf\ act}^{est} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_{est} > T_{sc} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.22)$$

En ese caso, los grados-hora de calor a compensar son:

$$gh_{enf\ act}^{est} = (T_{est} - T_{sc}) \delta_{enf\ act}^{est} \quad (3.23)$$

La diferencia entre las ecuaciones (3.23) y (3.21) da los grados-hora de malestar que se subsanan usando la estrategia de diseño o que se ahorran de enfriamiento activo. Esto corresponde al rango en que se cumple la siguiente condición (zona 1 en la Figura 3.12):

$$\delta_{enf}^{est} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_l > T_{sc} \text{ y } T_{est} \leq T_{sc} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.24)$$

Y los grados-hora de ese ahorro son:

$$gh_{enf}^{est} = (T_l - T_{sc}) \delta_{enf}^{est} \quad (3.25)$$

La ecuación (3.25) mide el beneficio de aplicar la estrategia de diseño para combatir el calor.

En contraste, la estrategia es inapropiada a esa hora en los casos en que la temperatura exterior sea baja, lo que pudiera obligar a activar la calefacción bajo condiciones en que no sería necesario hacerlo en el edificio de base. De donde se desprende que sería conveniente, de ser posible, controlar la estrategia a efectos de volver, cuando eso sea así, a la condición del edificio de base.

La condición para activar la calefacción en el edificio de base es:

$$\delta_{cal}^l = \begin{cases} 1, & \text{si } T_l < T_{ic} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.26)$$

Y los grados-hora a compensar con calefacción son (computados negativo):

$$gh_{cal}^l = (T_l - T_{ic})\delta_{cal}^l \quad (3.27)$$

La condición para la cual una vez aplicada la estrategia de diseño el edificio debe calentarse, es:

$$\delta_{cal}^{est} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_{est} < T_{ic} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.28)$$

Los grados-hora de calefacción serán en ese caso:

$$gh_{cal}^{est} = (T_{est} - T_{ic})\delta_{cal}^{est} \quad (3.29)$$

La diferencia entre las ecuaciones (3.29) y (3.27) mide la adaptación de la estrategia a condiciones frías o el ahorro de calefacción que se obtiene de controlársele en tal sentido. Este control pudiera lograrse mediante acciones de adaptación ejecutadas sobre el edificio y sus espacios por los usuarios o por medios tecnológicos y depende de las posibilidades de la estrategia.

Para un número extendido de días (p.ej. 365), la suma de los grados-hora de las ecuaciones (3.21), (3.23), (3.25), (3.27) y (3.29) para intervalos definidos de la temperatura exterior, da la distribución de grados-hora de cada una de las situaciones que representan en función de la temperatura exterior. Esto se puede expresar de una forma común a todos los casos como sigue:

$$GH(i) = \sum_j [\Delta T(i, j)] \delta \quad (3.30)$$

donde $GH(i)$ son los grados-hora totales para el intervalo i de la temperatura exterior, $\Delta T(i, j)$ es la diferencia de temperatura para el intervalo i de la temperatura exterior y para el día j , y δ es la condición que se evalúa (ecuaciones (3.20), (3.22), (3.24), (3.26) y (3.28)).

La integral de las distribuciones de grados-hora en función de la temperatura exterior obtenidas para cada condición aplicando la ecuación (3.30) da los grados-hora totales asociados a esa condición a la hora considerada y a lo largo del período de tiempo considerado.

3.3.7.2 Caso de calentamiento ($T_{est} > T_l$) (Figura 3.13)

El razonamiento es análogo al del caso de enfriamiento, por lo que se le mostrará resumidamente, aunque desde una perspectiva distinta, cuantificando directamente, por un lado, los grados hora que se ganan de confort contrarrestando el frío y, por otro, los que se pierden al aumentar el calor.

La reducción de malestar por frío o el ahorro de calefacción que se logra al aplicar la estrategia obedece a la siguiente condición (zona 1 en la Figura 3.13):

$$\delta_{cal}^{est} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_l < T_{ic} \text{ y } T_{est} \geq T_{ic} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.31)$$

Los grados-hora de confort ganados o que se ahorran aplicando la estrategia son por lo tanto:

$$gh_{cal}^{est} = (T_l - T_{ic})\delta_{cal}^{est} \quad 3.32$$

Esta cantidad de grados-hora se puede comparar con los grados-hora de malestar por frío del edificio de base, en el cual la condición para calentar era:

$$\delta_{cal}^l = \begin{cases} 1, & \text{si } T_l < T_{ic} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad 3.33$$

y los grados-hora eran:

$$gh_{cal}^l = (T_l - T_{ic})\delta_{cal}^l \quad 3.34$$

Del lado del calor, la adaptabilidad de la estrategia deberá procurarse para la condición:

$$\delta_{enf}^{est} = \begin{cases} 1, & \text{si } T_{est} > T_{sc} \text{ y } T_l \leq T_{c,max} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad 3.35$$

Y los grados-hora de adaptación con miras a controlar el calor son:

$$\delta_{enf}^{est} = (T_{est} - T_{sc})\delta_{enf}^{est} \quad 3.36$$

Luego, los grados-hora totales de lo que se gana en confort o se pierde al implementar la estrategia se obtienen, al igual que en el caso de que la estrategia enfríe, con la ecuación (3.30).

Observando la Figura 3.12 o la Figura 3.13, se puede sugerir que la *adaptabilidad perfecta* de la estrategia que se implemente en el edificio de base se da cuando ésta produzca una temperatura operativa interior que coincida con la temperatura de neutralidad del criterio de confort (esto es, que sea paralela a los límites de confort y esté centrada en el rango). Significaría que el edificio estará siempre en confort, cualquiera que sea la temperatura exterior. Lograr una aproximación de esa situación sin apelar a sistemas de climatización activa se puede lograr con envolventes de mucha inercia térmica que independicen, hasta lo necesario, el interior del edificio de las fluctuaciones externas (*i.e.*, que reduzcan los coeficientes de correlación entre la temperatura exterior y la interior), y siempre que la temperatura media exterior esté en los niveles de confort (a menos que las cargas internas sean muy altas, en cuyo caso la media exterior tuviera que ser más baja).

3.3.8 Estrategias de diseño

El efecto en el confort térmico de las modificaciones que se le hagan al edificio de base puede evaluarse siguiendo el procedimiento mostrado en el apartado anterior. Tales modificaciones pudieran ser decisiones particulares dependientes de las especificidades de un proyecto concreto, en cuyo caso se estaría en el ámbito de los métodos de comprobación de una decisión tomada en un contexto único, o plantearse según principios genéricos amoldables a muchos casos, en cuyo caso, de concebirse al edificio de base también en términos genéricos, se estaría en el ámbito de los métodos de ayuda al diseño utilizables en etapas tempranas o intermedias del proceso.

De tratarse de estrategias y técnicas de carácter genérico, se deben plantear hipótesis acerca de esas condiciones genéricas bajo las cuales se evaluaría su potencial. En lo que sigue se presentan de forma resumida posibles formas de caracterizar el funcionamiento y alcance de algunas estrategias de diseño concebidas de esta forma, concretamente, la ventilación natural, el sombreado, el aislamiento, la reflexión del sol, la masa térmica y la ventilación nocturna. Tales caracterizaciones tampoco pretenden universalidad, pues cada tipo de edificio o tipo de contexto pudiera conllevar hipótesis más convenientes. Sin embargo, de cara a difundir los potenciales de adaptación de cada una de estas estrategias (u otras) en edificios típicos o de cara a una posible incorporación del método en algún software de simulación, y pensando adicionalmente en contar con referencias que permitan la comparación, algunas reglas básicas tendrían que establecerse.

3.3.8.1 Ventilación natural

Para evaluar la adaptabilidad de la ventilación natural se puede plantear, en primera instancia, que su potencial óptimo (teórico) se alcanza cuando la temperatura interior se iguale a la exterior. Puesto que la temperatura interior con que se evalúa el edificio es la operativa, lo anterior implicaría que la temperatura radiante y la temperatura del aire sean iguales. Ello conlleva la hipótesis de un enfriamiento convectivo máximo de las superficies interiores o de un control solar óptimo. De aceptarse cualquiera de estas hipótesis, la determinación de la temperatura de la estrategia no requiere simulación, pues sería la misma temperatura exterior (Figura 3.11, página 134).

De considerarse que tal hipótesis es en exceso optimista para las circunstancias de un proyecto (p.ej. que se esté en un sitio de poco viento) o que maximizar la ventilación pudiera traer molestias de carácter no térmico, se pudieran considerar máximos caudales realizables, como, p.ej., 50 cambios de aire por hora (CAH) en espacios en los que se deba limitar la ventilación o 200 CAH para caracterizar una ventilación cruzada de muy buena eficiencia. Como sea, de no aceptarse la hipótesis de igualdad entre la temperatura exterior y la interior como consecuencia de una ventilación *ideal*, cualquier otra hipótesis requeriría simular, lo que da la libertad de plantear hipótesis específicas según las posibilidades del software o los criterios del análisis.

3.3.8.2 Sombreado

El potencial máximo realizable (potencial teórico) con las técnicas de sombreado pudiera plantearse como aquel que produzca una temperatura interior igual a la que se tendría en ausencia de sol. Lo anterior implicaría simular el edificio de base en esas condiciones. La temperatura interior sería en ese caso el resultado del desfase y el amortiguamiento que produce la envolvente en la onda de la temperatura exterior más el incremento por efecto de las cargas internas. De considerarse demasiado *optimista* o irreal tal hipótesis, se pudiera plantear hacer la simulación considerando sólo la radiación difusa o parte de ella. Cualquiera que sea el caso, se trata de una estrategia que siempre producirá una temperatura interior menor que la del edificio de base ($T_{est} < T_l$).

3.3.8.3 Aislamiento

Para el aislamiento, el máximo potencial de la estrategia, desde la perspectiva de impedir la conducción de la radiación solar absorbida por la envolvente, podría ser aquel que resulte de concebirla en su totalidad de un material liviano y de muy alta resistencia térmica (p.ej., de paneles aislantes de espesor 15 cm y resistencia térmica $5 \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$). Sin embargo, el caso del aislamiento demanda criterio: en aquellos climas en los que se deba combatir el calor, aislar toda la envolvente reduciendo las alternativas de enfriamiento (como en el caso del edificio de base, en el que se ha suprimido la ventilación) produciría una acumulación de las cargas internas y las ganancias solares directas (aquellas que entran por las ventanas). De ahí que la evaluación del aislamiento deba plantearse en términos relativos a ciertas circunstancias típicas, a menos se esté buscando evaluar el caso extremo. Ello podría hacerse desechando al aislamiento como estrategia separada de otras estrategias e incorporándola de forma combinada, o tipificando las partes de la envolvente necesitadas *siempre* de aislamiento, como las fachadas este y oeste y el techo (en caso que se esté en el trópico). En este último caso se estaría ante un adelantamiento de decisiones de diseño que va un poco más allá de las estrategias concebidas en su máxima generalidad. Sin embargo, la metodología lo hace posible, y se pudieran concebir luego dos o tres reglas genéricas para el uso de materiales aislantes de forma de condicionar la evaluación del potencial de esta técnica.

3.3.8.4 Reflexión del sol

Para la reflexión del sol, la temperatura de la estrategia podría ser, en el caso ideal, la que se obtenga de simular el edificio de base teniendo acabados totalmente reflectantes (reflectividad = 1). De considerarse esto irreal o de poco interés desde la perspectiva de la información que se esté demandando, se podría reducir la reflectividad a los valores máximos fácticamente realizables y conservables, con el debido mantenimiento de los acabados exteriores (del orden de 0,7 a 0,8).

3.3.8.5 Masa térmica

La temperatura de esta estrategia será la que se obtenga de simular el edificio de base suponiendo que toda su envolvente y sus divisiones internas son de elementos muy gruesos y pesados (p.ej,

de piedra o concreto y de espesor 30 cm o más). Como una opción relativa se pudiera plantear el que las divisiones internas queden como en el edificio de base y sólo se cambie la envolvente.

3.3.8.6 Ventilación nocturna

En el marco del método, la ventilación nocturna conlleva la utilización de algún software de simulación que pueda calcular sus beneficios. No todos los programas disponibles en el mercado lo hacen, sólo aquellos que asumen plenamente la modelización dinámico-numérica, tanto para el aspecto térmico, como el de masa, así como para el acoplamiento entre ambos (Crawley *et al.*, 2008). En adición, una correcta simulación del fenómeno plantea dificultades singulares (Breesch y Janssens, 2007). Pensando en servir de ayuda a diseño, se han propuesto correlaciones simples basadas en experimentos y simulaciones que permiten predecir, para determinados climas, la reducción de la temperatura máxima interior en función de los caudales de ventilación, la amplitud de la temperatura exterior y la inercia térmica del edificio (Shaviv *et al.*, 2001). Como sea, una evaluación del potencial de esta técnica usando la metodología propuesta implicaría combinar las hipótesis antes señaladas relativas a la masa térmica y la ventilación natural y luego ajustar, en el programa de simulación, la variable de funcionamiento asociada a esta estrategia de refrescamiento (*i.e.*, el proceso de abrir de noche las ventanas y cerrarlas de día). De no contarse con el software adecuado, se podría plantear la simplificación consistente en asumir, como beneficio máximo, que la temperatura radiante interior es igual durante el día al promedio de la temperatura exterior nocturna, en el lapso que se ventile. Hecho esto, se puede simular el edificio de base agregándole la masa térmica y ventilando sólo de noche, y luego recalculer el resultado de la temperatura operativa interior afectándolo con el valor de la temperatura radiante diurna supuesta.

3.3.9 Combinaciones de estrategias de diseño

Debido al carácter sistémico del diseño, la evaluación individuada de las estrategias que se listaron en el apartado 3.3.8 (o de otras) permite jerarquizarlas según los potenciales obtenidos, pero no sumar o combinar esos potenciales pensando en caracterizar su actuación conjunta, pues los mismos dependen de las circunstancias de partida (que son en el presente caso las del edificio de base). De quererse averiguar sus efectos combinados, se deberán simular una a una las combinaciones posibles o de mayor interés y calcular una nueva temperatura operativa para cada combinación partiendo del edificio de base. Si, por ejemplo, se deseara evaluar el potencial de todas las combinaciones posibles de cinco estrategias actuando de a dos (incluyendo las de cada estrategia consigo misma), habría que hacer 32 simulaciones. Se trata de una variación con repetición:

$$VR_n^P = n^P \quad (3.37)$$

donde n es el número máximo en que se las puede agrupar y P es el número de estrategias. Por ejemplo, para cinco estrategias agrupadas de a dos, las posibilidades serían: $2^5 = 32$ simulaciones.

Esta formalidad matemática puede eludirse de tres maneras: a) decidiendo que la evaluación de las estrategias individuales es ya suficiente información para tomar decisiones adecuadas, b) decidiendo las combinaciones con mejores perspectivas según el análisis de los resultados obtenidos de la simulación individuada y c) agregando al grupo inicial de técnicas individuales las combinaciones que pudieran considerarse por sí mismas una estrategia.

Respecto de lo último, ya la estrategia de ventilación nocturna, considerada antes como una estrategia en sí, pudiera entenderse como una combinación de estrategias realizada bajo criterios específicos (masa térmica y ventilación). Otras posibilidades típicas serían sombreado y reflexión, cuyo agrupamiento pudiera denominarse *control solar*; ventilación y sombreado, en tanto que combinación típicamente tropical, o, también, aunque probablemente más problemática, masa térmica y aislamiento, en el sentido de colocar este último del lado externo de la envolvente a fin de evitar que el calor del sol llegue al elemento pesado.

Lo más inmediato sin embargo para decidir la evaluación de combinaciones de estrategias sería analizar los resultados de la evaluación individualizada, lo que, de hacerse con criterio, daría indicios para orientar tales evaluaciones ulteriores. Como los resultados se tienen en función de la temperatura exterior y el tiempo, se pueden prever las mejores combinaciones y pensar los mecanismos de adaptación más viables según la hora para acentuar o reducir el efecto de cada estrategia según las necesidades (en el siguiente capítulo se ejemplificará un análisis como ese).

3.4 Alcance del método

El método propuesto y explicado en los apartados precedentes debe entenderse como un análisis descriptivo de los resultados de la simulación dinámica (o la experimentación) orientado a linealizar a través de modelos de regresión lineal simple, y con base en determinadas hipótesis simplificadoras, el comportamiento de los edificios, lo que deriva en patrones de comportamiento independientes del clima que a la postre pueden usarse para evaluar de manera sencilla el potencial de adaptación de cualquier alternativa de diseño a cualquier clima.

A un segundo nivel, el método puede verse como una manera de analizar, procesar y organizar los resultados de la simulación o la experimentación de forma no acostumbrada, para su óptima presentación y comprensión de cara a la toma de decisiones durante el proceso de diseño.

No se le puede por consiguiente confundir con la tradicional comprobación computarizada de propuestas acabadas, aunque ciertamente explote las capacidades de la simulación al concebirla como una herramienta para la creación de métodos de ayuda en la toma de decisiones durante las etapas tempranas del proceso de diseño.

Pese a que se le puede aplicar en cualquier etapa del proceso para estimar en términos de distribuciones de frecuencia los beneficios de cualquier decisión, así sea muy específica, su mayor

potencial está en las etapas tempranas, cuando las decisiones a tomar son tan globales como influyentes y el arquitecto requiere de orientaciones generales. A diferencia de los otros métodos iniciales, los cuales se basan en consideraciones generales derivadas de la relación entre el clima y el confort, la presente propuesta es menos genérica, ya que demanda de al menos un esquema elemental del edificio. Sin embargo, ese esquema es el punto de partida de potenciales derivaciones que conforman un conjunto de propuestas cuya caracterización a través del método trasciende las particularidades de un proyecto específico, en cuanto a que se les puede luego ubicar en cualquier contexto climático para evaluar su grado de adaptación. El carácter genérico del método se acentúa si el edificio simulado y las alternativas que se deriven de él se conciben o asumen como diseños tipo que engloben en su comportamiento el de muchas alternativas similares. En ese caso, contar, en cualquier proyecto, con las regresiones que describen los patrones de comportamiento de una o varias alternativas parecidas a las que se piensa implementar, permite averiguar de entrada cuáles se adaptan mejor al clima específico del proyecto y en qué medida lo hacen.

De ahí que se ponga en una primera instancia el acento en estrategias generales similares a las que se evalúan por medio de los diagramas bioclimáticos, sólo que, sin dejar de planteárseles de forma genérica, las mismas se conectan con un esquema inicial de propuesta y su potencial se calcula por consiguiente de forma precisa. No obstante, en la medida en que al esquema inicial y a las estrategias se les conciba de manera genérica, la interpretación de los resultados también lo será. Tal carácter genérico le quita precisión al método desde la perspectiva de ayudar a resolver problemas concretos de proyectos concretos, pero le da mayor alcance desde una perspectiva conceptual utilizable en muchos proyectos y en etapas tempranas del proceso de diseño. Inversamente, cuanto más ligada a un proyecto y más detallada sea constructivamente la estrategia evaluada con el método, más se asemejará éste a la tradicional comprobación computarizada de las etapas finales del proceso de diseño.

El verdadero potencial del método surge cuando se le concibe como una herramienta que responda a la pregunta *qué es mejor hacer*, en lugar de a la pregunta *qué pasaría si*. Para que pueda responder a la primera pregunta debe usársele en una primera instancia para generar información clasificable y generalizable. Concretamente, para generar regresiones de diseños tipo, así como de estrategias, técnicas o alternativas aplicadas a esos diseños tipo. Generar esa información pasa por plantearse la segunda pregunta en el marco de proyectos de diseño específicos o de proyectos de investigación académicos, uno de los cuales podría consistir en organizar la información que se genere con el método, de manera de darle operatividad y divulgarla.

En el capítulo que sigue se presenta un ejemplo de aplicación del método, el cual servirá para despejar dudas respecto de su naturaleza y alcance.

3.5 Referencias del capítulo 3

Altavilla F., Vicari B., Hensen JLM., y Filippi M. (2004) *Simulation Tools for Building Energy Design*. In: Proc. Ph.D. symposium Modelling and Simulation for Environmental Engineering, Czech Technical University Prague, 16 April.

ASHRAE (2009) *Ashrae Handbook – Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISBN-10: 1933742542.

ASHRAE Standard 55 (2004) *Thermal environmental conditions for human occupancy*.

Auliciems A., Szokolay S (2007). *Thermal Comfort*. PLEA Note 3 Design Tools and Techniques, in Association University of Queensland Dept. Architecture. Second edition. Disponible en web:

<<http://www.arct.cam.ac.uk/PLEA/Notes.aspx?p=9&pid=9&ix=603>>.

Breesch H. y Janssens A. (2007) *Reliable Design of Natural Night Ventilation Using Building Simulation*. 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference : 30 years of research. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Disponible en web:<http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/186_New.pdf>.

CIBSE Guide A (2006) Environmental Design. Disponible en web:

<<http://es.scribd.com/doc/42019258/Cibse-Guide-a-2006>>.

Crawley D., Hand J. W., Kummert M. y Griffith B. T. (2008) *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Building and Environment, vol 43, pp661–673. Disponible en web: <<http://strathprints.strath.ac.uk/6555/1/strathprints006555.pdf>>.

de Dear R.J., Brager G.S. y Cooper D.J. (1997) *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference – Final Report*. ASHRAE RP-884. Sydney:MRL. Disponible en web:

<http://sydney.edu.au/architecture/staff/homepage/richard_de_dear/ashrae_rp-884_hypothesis.shtml>.

EN 15251:2007. European Standard. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.

Ghiaus C. (2003) *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings 35(4): 405-411.

Ghiaus C. (2006). *Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods*. Energy and Buildings 38: 429-435.

Ghiaus C. y Allard F. (2005b) *Potential for free-cooling by ventilation*. Solar Energy. Volume 80, Issue 4, April 2006, Pages 402-413.

Ghiaus C. y Allard F. (2006) *Estimation of energy performance of buildings by using the Free-running temperature*. Journée thématique SFT-IBPSA, mars 2006. Disponible en web : < http://perso.univ-lr.fr/fcherqui/IBPSAmars2006/15_CGhiaus.pdf>.

Ghiaus C. y Allard F. (editores) (2005a) *Natural ventilation in the urban environment*. Londres, James and James. ISBN: 1844071294.

Hobaica, M.E., Belarbi, R., Rosales, L. (2001) *Los sistemas pasivos de refrescamiento de edificaciones en clima tropical húmedo. Posibilidades de aplicación en Venezuela*. Caracas: Revista Tecnología y Construcción N° 17-I. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.

ISO Standard 7730 (2005) *Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*

Mandal U., Victor K., Rao N. y Srivastavaand K. (2003) *Estimation of solar radiation from temperature and rainfall*. Vittal Journal of Agrometeorology 5 (2) : 15 – 26. Disponible en web: <<http://www.crida.ernet.in/Bulletins/uk%20mandal/journal%20of%20agrometeorology1.pdf>>.

Marsh, A. (2003). *ECOTECH Tutorials*. Square One research Pty Ltd. <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/ECotect_Tutorials>.

McCartney K.J y Nicol J.F. (2002) *Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATs Project*. Energy and Buildings 34(6) pp 623-635 (ISSN 0375 7788). Disponible en web: <<http://bluwiki.com/images/b/be/AdaptiveControlEurope.pdf>>.

Morid S., Gosain A.K. y Keshari A. (2002) *Solar Radiation Estimation using Temperature-based, Stochastic and Artificial Neural Networks Approaches*. Nordic Hydrology, 33 (4), 2002,29 1-304. Disponible en web: <<http://www.iwaponline.com/nh/033/0291/0330291.pdf>>.

Nicol F. and Humphreys M.A. (2010) *Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free running buildings in European standard EN15251*. Building and Environment, 2010, 45: p. 11-17

Pfafferott J, Herkel S., Wapler J. (2005) *Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models*. Energy and Buildings. 37 (8) (2005) 844–852.

Pfafferott J., Herkel S., Jäschke M. (2003) *Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements*. Energy and Buildings 35 (11), 1129–1143.

Prieto J.I., Martínez-García J.C. y García D. (2009) *Correlation between global solar irradiation and air temperature in Asturias, Spain*. Solar Energy. Volume 83, Issue 7, July 2009, Pages 1076-1085. Disponible en web: <<https://www.cfa.harvard.edu/~wsoon/JuanRamirez09-d/Prietoetal09-SolarRadvsAirTempAsturiasSpain.pdf>>.

Shaviv E., Yezioro A. y Capeluto I. (2001) *Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy*. Renewable Energy. Volume 24, Issues 3-4, November 2001, Pages 445-452.

Szokolay S. V. (1988) *Climatic Data and Its Use in Design*, RAI Education Division, Canberra. Second edition <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Degree_Days>.

Zeiler W., Savanovic P. y Qvanjel E. (2008) *Design decision support for conceptual design*. In I Horvath, Z Rusak (Eds.), Tools and Methods of Competitive Engineering. (pp. 1473-1482). Delft: Delft University of Technology.

CAPÍTULO 4 EJEMPLO DE APLICACIÓN: CÁLCULO DE LOS POTENCIALES DE CINCO ESTRATEGIAS PASIVAS EN UNA VIVIENDA TIPO

4.1 Introducción

En el presente capítulo se muestra un ejemplo de aplicación del método delineado en el capítulo 3, a objeto de detallar el procedimiento y explicar la manera de interpretar sus resultados. El ejemplo consiste en averiguar el potencial de adaptación al clima de cinco estrategias de diseño genéricas aplicadas a una vivienda cuyo esquema elemental se conoce. Dicho potencial se calculará para cuatro ciudades ubicadas en diferentes zonas climáticas del país, concretamente, Maracaibo, Valencia, Caracas y Mérida (ubicadas respectivamente en las zonas climáticas 1, 2, 3 y 4 según la clasificación climática propuesta en el apartado 2.3.1, página 54). Es importante entender que el potencial no se calculará sólo con respecto al clima, como hacen normalmente los métodos concebidos para usarse al inicio del proceso de diseño, sino con respecto a la conjunción entre el esquema inicial de la vivienda y el clima (del cual depende, por otro lado, el criterio de confort adaptativo). Este condicionamiento a un esquema constructivo es lo que hace la particularidad del método, concebido para derivar información utilizable en etapas tempranas del proceso de diseño, pero no en el mero inicio. Las estrategias que serán evaluadas son el sombreado, la ventilación natural, la masa térmica, la reflexión solar y el aislamiento, concebidas todas de forma genérica y suponiendo que cada una actuará con una eficiencia óptima (lo que se detallará más adelante).

4.2 Descripción del caso

4.2.1 Edificio de base o edificio libre

En razón de que el objetivo es enseñar la forma de aplicar e interpretar el método, se optó por el caso elemental de una vivienda unifamiliar sencilla de 80 m², con sala-comedor-cocina, un baño y dos habitaciones (Figura 4.1).

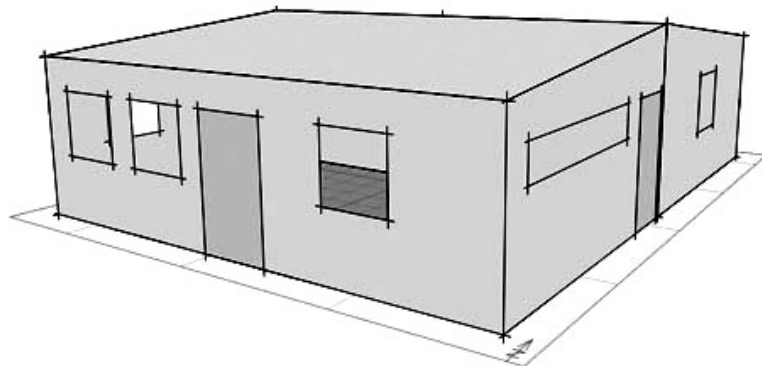


Figura 4.1. Edificio libre o edificio de base: vivienda unifamiliar sencilla de 80 m²

Desde la perspectiva del método, la vivienda de la Figura 4.1 constituye el edificio de base o edificio libre. Se trata en este caso de un bosquejo inicial elemental circunscrito a lo mínimo requerido para simular, esto es, a los volúmenes básicos, a la forma y orientación de la envolvente, incluyendo lugar y tamaño de las puertas y ventanas, así como a las divisiones internas. Los materiales se escogieron con criterios mínimos y alejados de toda consideración climática: tanto el techo como las paredes son de materiales delgados y conductivos y de acabado oscuro: el techo es una lámina liviana cuya conductancia es $5,5 \text{ W/m}^2\text{C}$ y cuya absorptividad exterior es 0,7, y las paredes son de fibrocemento de conductancia $4,7 \text{ W/m}^2\text{C}$ y absorptividad exterior 0,7. Las ventanas son de vidrio simple y están cerradas (como corresponde al edificio libre o edificio de base). Finalmente, se consideró como cargas internas un equipamiento normal de vivienda que produce una ganancia promedio de calor sensible de 10 W/m^2 , así como la presencia de 5 personas, 3 en la sala-comedor-cocina y una en cada cuarto. Estas cargas son consideradas fijas en el tiempo.

La vivienda descrita en esos términos debe entenderse como un punto de partida ajeno a consideraciones climáticas. Representa un tipo de vivienda ajustado exclusivamente a criterios de simpleza, economía y factibilidad (de hecho viviendas así existen en el país). Que el ejemplo escogido sea ese no significa que la morfología básica se considere un factor de segundo orden: además de señalar el tipo de diseño, determina la geometría general de los intercambios térmicos entre la vivienda y su entorno, lo que constituye un aspecto de una influencia primaria en el confort térmico. Lo pertinente en cualquier proyecto de diseño es concebir la geometría del edificio según las pautas de diseño de adaptación al clima relativas a esa etapa inicial del proceso. Sin embargo, si ese fuera el caso, el edificio de base representaría otro punto de partida y otra circunstancia, no las del ejemplo. El ejemplo en cambio busca representar un tipo de vivienda común concebido en términos genéricos sobre el cual se aplicarán cambios concebidos en términos genéricos a fin de estimar el potencial de adaptación al clima, tanto de la vivienda, como de los cambios.

4.2.2 Las estrategias de diseño

En lo que sigue se explican resumidamente los criterios de funcionamiento escogidos para las estrategias de diseño que serán evaluadas (ver también el apartado 3.3.8, página 139). Desde la perspectiva de un ejemplo orientado a ilustrar la aplicación e interpretación del método, las estrategias que se implementarán en el edificio de base estarán concebidas de forma genérica y teórica, pensando en determinar sus límites *ideales* en esas circunstancias. Cualquier aplicación condicionada o realista de dichas estrategias nunca podrá en principio exceder la influencia estimada al concebírselas de esta forma ideal. La interpretación del resultado de esta evaluación teórica estará por consiguiente subordinada a esa perspectiva, lo que comporta una utilidad práctica particular, de hacerse con criterio. Lo anterior no excluye por supuesto la posibilidad de evaluar las mismas estrategias con base en hipótesis más realistas o concibiendo combinaciones típicas de las mismas.

4.2.2.1 Ventilación natural

Para evaluar el potencial de la ventilación natural se supuso que su rendimiento máximo corresponde a un caudal de 200 CAH. Con este caudal la temperatura operativa interior tenderá a equivaler a la temperatura exterior, aunque la temperatura radiante media, de estar las superficies interiores muy calientes, pueda colocarla un poco por encima.

4.2.2.2 Sombreado

Se asumió para el sombreado la hipótesis ideal de que su efecto equivaldría a la ausencia de sol. El potencial que se obtenga con esta hipótesis deberá por tanto entenderse como lo máximo realizable en materia de sombreado, algo equivalente a colocar la vivienda en un lugar muy a la sombra, que no sólo esté protegido de la radiación solar directa, sino también de la difusa.

4.2.2.3 Aislamiento

Para el aislamiento se supuso que toda la vivienda de base, con excepción de las ventanas y las puertas, se rodea de un material aislante de 15 cm de espesor, haciendo que la envolvente adquiera una resistencia térmica cercana a $5 \text{ m}^2\text{C/W}$.

4.2.2.4 Reflexión del sol

Para la reflexión del sol se supuso que toda la vivienda de base se pinta de un acabado muy claro de reflectividad 0,9 (casi un espejo). De esta forma el sol absorbido por el techo y las fachadas es sólo el 10% de la radiación solar incidente. Las ventanas sin embargo permanecen como en la vivienda de base, de vidrio simple y con un coeficiente de ganancias solares de 0,8. No se colocaron vidrios reflectantes en razón de que no se estilan en viviendas y porque la meta es evaluar la influencia de la reflectividad de los elementos opacos.

4.2.2.5 Masa térmica

Para evaluar la masa térmica se plantea una envolvente de paredes y techo de hormigón de 30 cm de espesor, lo que produce un amortiguamiento de la onda térmica exterior de más de dos tercios y un desfase de alrededor de 10 horas. Las divisiones internas también se supusieron de las mismas características.

4.2.3 El clima

En un proyecto de arquitectura lo habitual es concentrarse en el clima específico del emplazamiento. Los métodos de ayuda al diseño para adaptar los edificios al clima basados en una visión puramente descriptiva se circunscriben en tal sentido a climas y circunstancias específicos. Una comprensión más acorde con la práctica arquitectónica profesional (y con el trabajo académico) demandaría trascender los particularismos para comprender y juzgar las semejanzas y diferencias entre contextos desde una perspectiva funcional.

En lo concerniente al presente método, puesto que su premisa es que la caracterización de los edificios se haga en términos de temperatura y se desacople del clima (mediante el concepto de temperatura libre), el ejemplo de aplicación que aquí se muestra abarcará cuatro tipos distintos de clima del país, todos de soleamiento similar, pero ubicados en altitudes que modifican de manera clara su temperatura. De esta forma podrá constatar que la temperatura libre y las temperaturas operativas que resulten de simular la vivienda del ejemplo, expresadas en función de la temperatura exterior, siguen un patrón de comportamiento independiente del clima, convirtiéndose en una caracterización genérica de la respuesta de esa vivienda (o tipo de vivienda) y de las estrategias de diseño implementadas, la cual puede usarse como una información de ayuda al diseño en cualquier proyecto similar ubicado en cualquier clima de latitud similar.

Se escogieron concretamente cuatro importantes ciudades: Maracaibo, con una temperatura media anual cercana a los 28 °C, Valencia, con una media anual del orden de 25 °C, Caracas, cuya media anual se ubica en alrededor de 22 °C y Mérida, cuya media anual es normalmente inferior a 20 °C. Se trata de cuatro *pisos climáticos* distintos, con temperaturas distintas, pero no tan distintos respecto del resto de los elementos del clima, por encontrarse las cuatro ciudades en latitudes del mismo orden desde una perspectiva global. Si las premisas del método son correctas, la comparación entre los resultados de las cuatro ciudades debería evidenciarlas.

4.2.4 El criterio de confort

Por tratarse de climatización pasiva, el criterio de confort adoptado es el modelo adaptativo de Dear *et al.* (1997), *i.e.*, la regresión lineal de la norma ASHRAE 55 (2004) (Figura 2.7, página 42, y Figura 3.1, página 113). Se sabe que ese criterio es sólo para edificios con ventilación natural (lo que no incluye en rigor edificios en funcionamiento libre), pero, como ya se argumentó (apartado 3.2.1, página 112), la razón de esa restricción no es de peso y puede omitirse. Se optó por un rango de aceptación exigente de $\pm 2,5$ °C, correspondiente a 90% de personas satisfechas, pensando en evidenciar mejor en el resultado las situaciones de malestar.

4.3 Simulación

Se simuló para cada ciudad y para un año el edificio de base (la vivienda de la Figura 4.1) y el mismo edificio aplicándole una a una las modificaciones que se derivan de las estrategias que se evalúan según los criterios que se describieron en el apartado 4.2.2 (página 147). Esto es: la vivienda apartada del sol, la vivienda muy bien ventilada, la vivienda con acabados muy reflectantes, la vivienda conformada por paredes muy pesadas y la vivienda envuelta en material aislante.

La simulación se hizo con el software *Autodesk Ecotect Analysis* (Marsh, 2003) que es una herramienta que presenta dos ventajas desde la perspectiva del método, al menos en esta etapa en que aún no está programado. Primero, puesto que se necesita extraer el resultado en términos de

distribuciones de frecuencia de los grados hora de malestar en función de la temperatura exterior para horas específicas, se requería de un software que permitiera programar la salida de datos de forma no tradicional. *Ecotect* incluye una herramienta llamada *script manager* (un manejador de códigos de programación) que permite escribir secuencias de comandos para controlar muchos de los aspectos más complejos de las funciones de análisis y modelado no incluidos originalmente. Se escribieron con esta herramienta los códigos para que la salida sea la adecuada y los cálculos y gráficos finales se hicieron usando aplicaciones de hojas de cálculo. Segundo, *Ecotect* no es un programa que utilice la modelización dinámica detallada basada en discretizar los materiales y el aire y plantear sistemas de ecuaciones no lineales, sino que usa un método basado en hipótesis simplificadoras (el método de *admitancia* o método *Cibse* [Cibse, 2006]) que consiste, resumiendo, en una aplicación secuencial de fórmulas que llevan a la curva de la temperatura interior operativa (no por ello dicho método es más inexacto, aunque eso dependa de lo que se requiera investigar). Con ello se reducen grandemente los tiempos de cálculo, en especial cuando los mismos conllevan simular años enteros (Nota: el que se haya usado *Ecotect* no significa que aplicar el método esté condicionado a ese software ni que se le esté recomendando).

4.4 Discusión de resultados y conclusiones

Los resultados que se presentan y analizan a continuación son los obtenidos de simular la vivienda de base en cada una de las cuatro ciudades mencionadas en el apartado 4.2.3 (página 148) (Maracaibo, Valencia, Caracas y Mérida), antes y después de aplicarse en ella y de forma separada las estrategias de diseño descritas en el apartado 4.2.2 (página 147). Para cada hora y cada ciudad el resultado se divide en tres gráficas referidas a la temperatura exterior: a) una primera gráfica con los diagramas de dispersión y las regresiones lineales de la temperatura operativa libre, las temperaturas operativas que resultan de aplicar las estrategias, la temperatura exterior y el criterio adaptativo de confort, limitado por valores máximos y mínimos que dependen del clima de la ciudad (rango de $\pm 2,5$ °C para una aceptabilidad de 90%); b) una segunda gráfica con la distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad a esa hora; y c) una tercera gráfica con la distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que producen las temperaturas operativas de la primera gráfica en el clima caracterizado en la segunda gráfica.

Estas gráficas se presentan en las siguientes páginas (Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9, páginas de la 151 hasta la 158). Después de las gráficas se muestran, en la Tabla 4.1 (página 159), los grados hora totales de malestar de cada hora en cada ciudad (Nota: a fin de comparar entre climas, convenía mostrar los resultados de cada hora agrupando las ciudades en una sola figura, pero por razones de espacio se han debido separar en grupos de a dos ciudades por figura. Por otro lado, para facilitar la comparación entre ciudades a una hora determinada se unificaron las escales de cada tipo de gráfica).

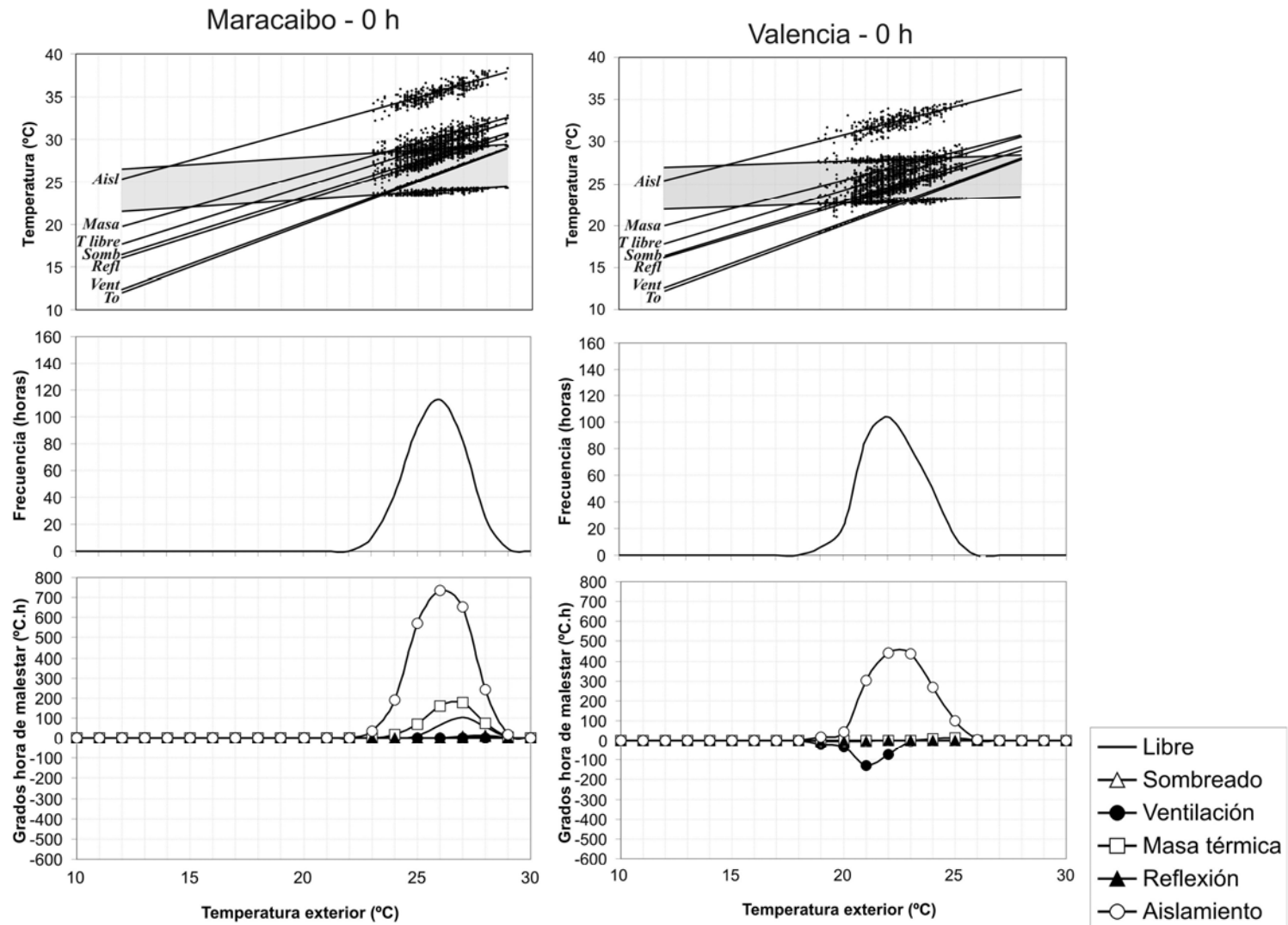


Figura 4.2. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

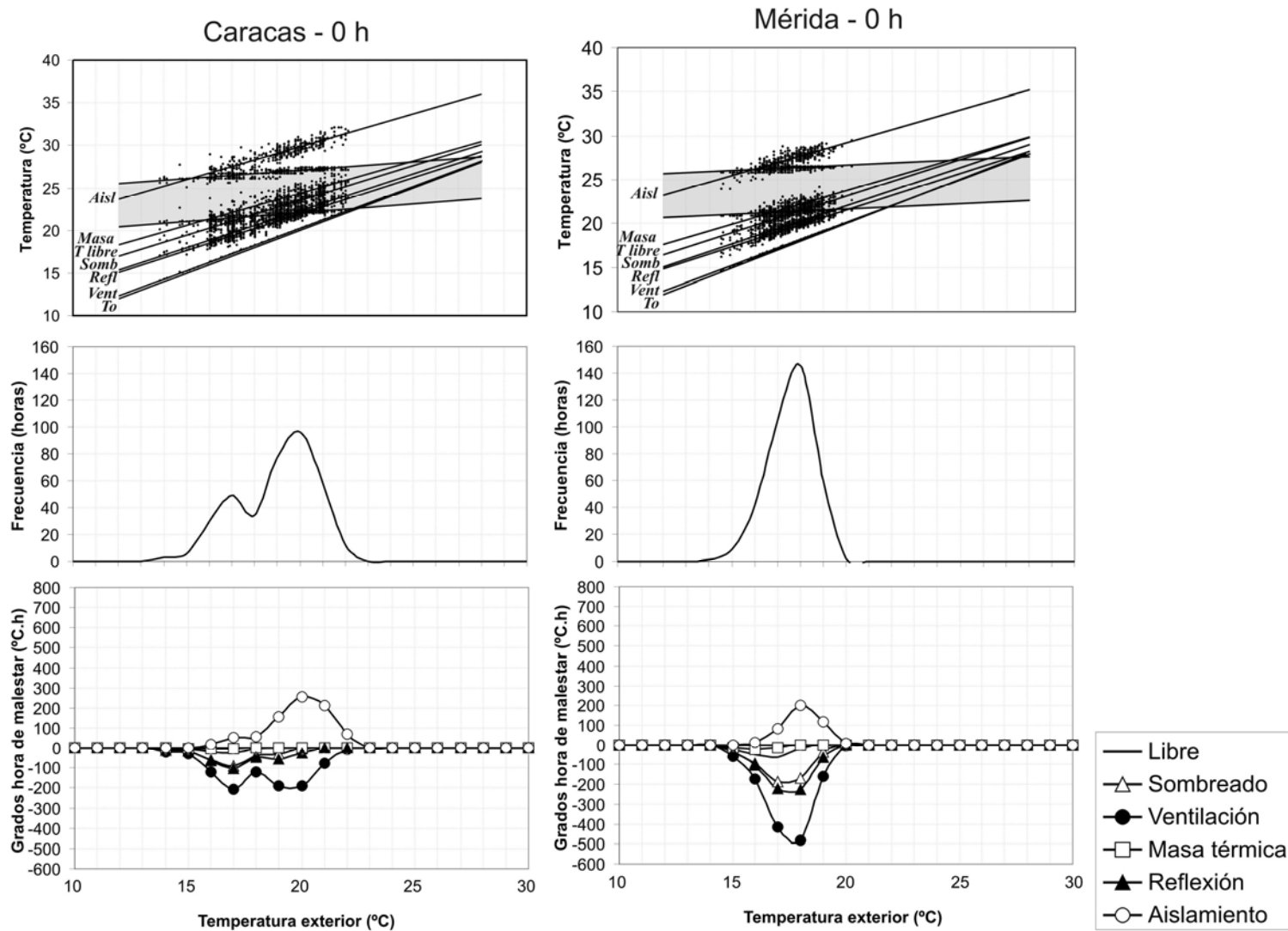


Figura 4.3. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

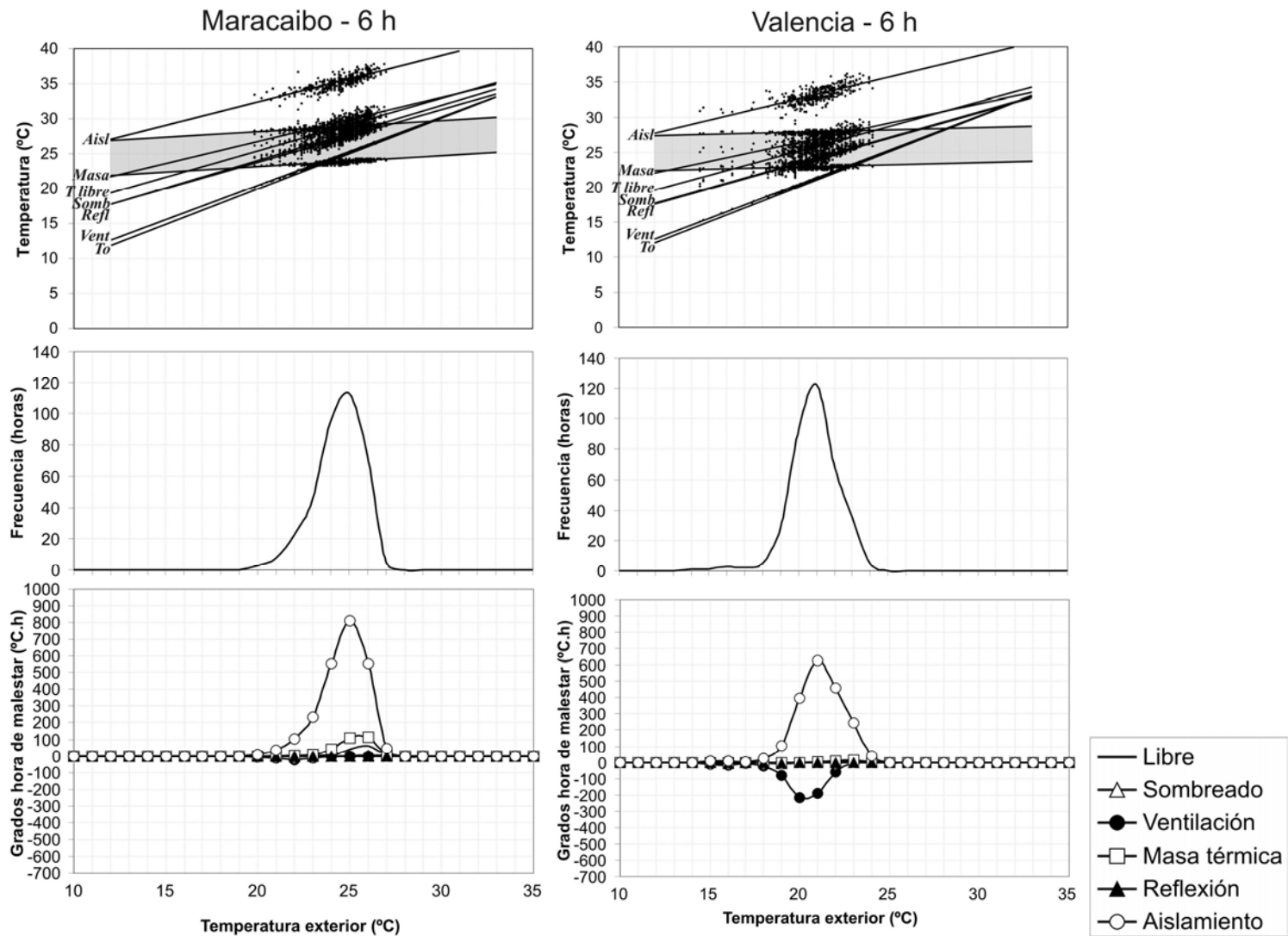


Figura 4.4. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

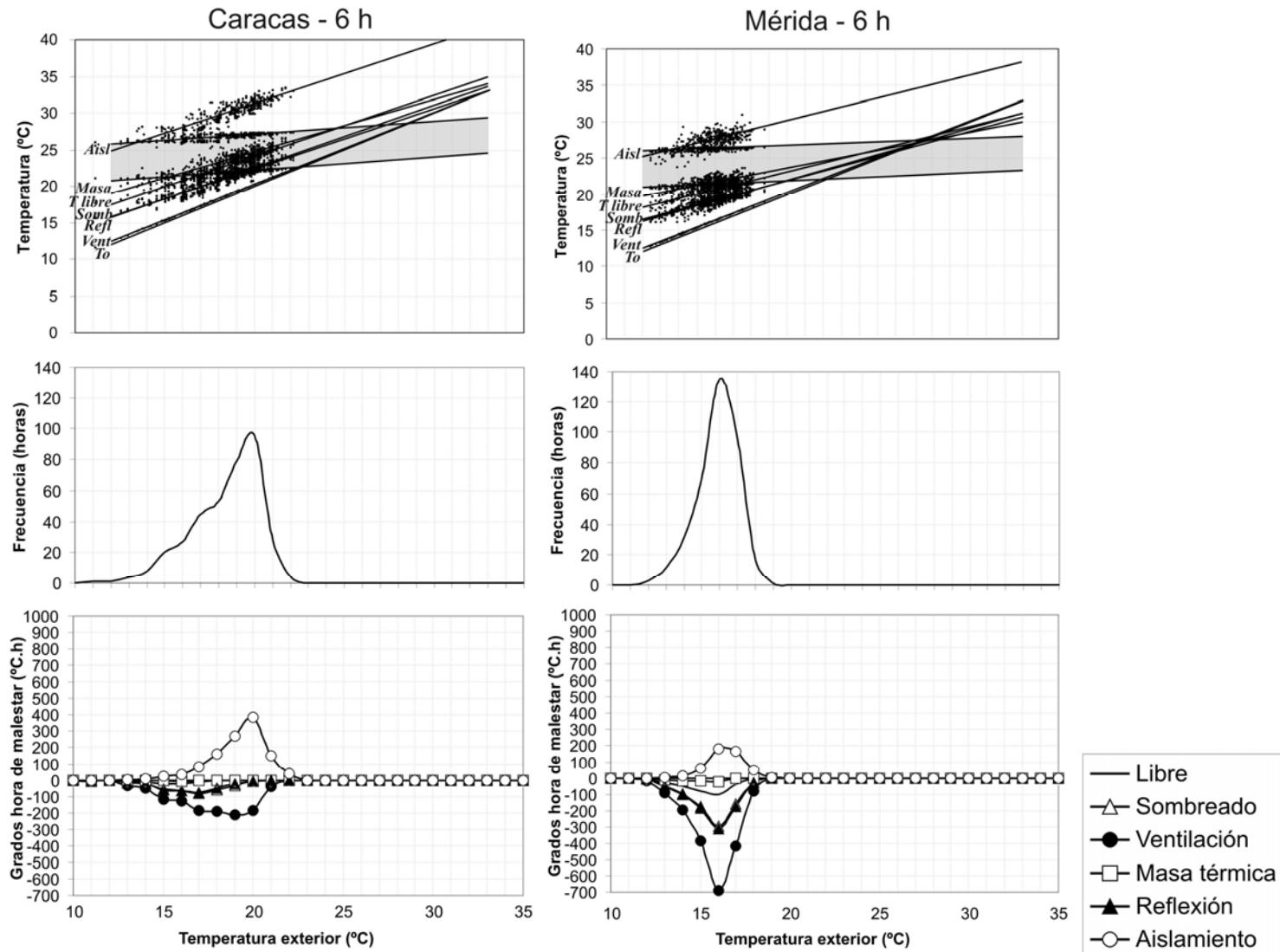


Figura 4.5. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

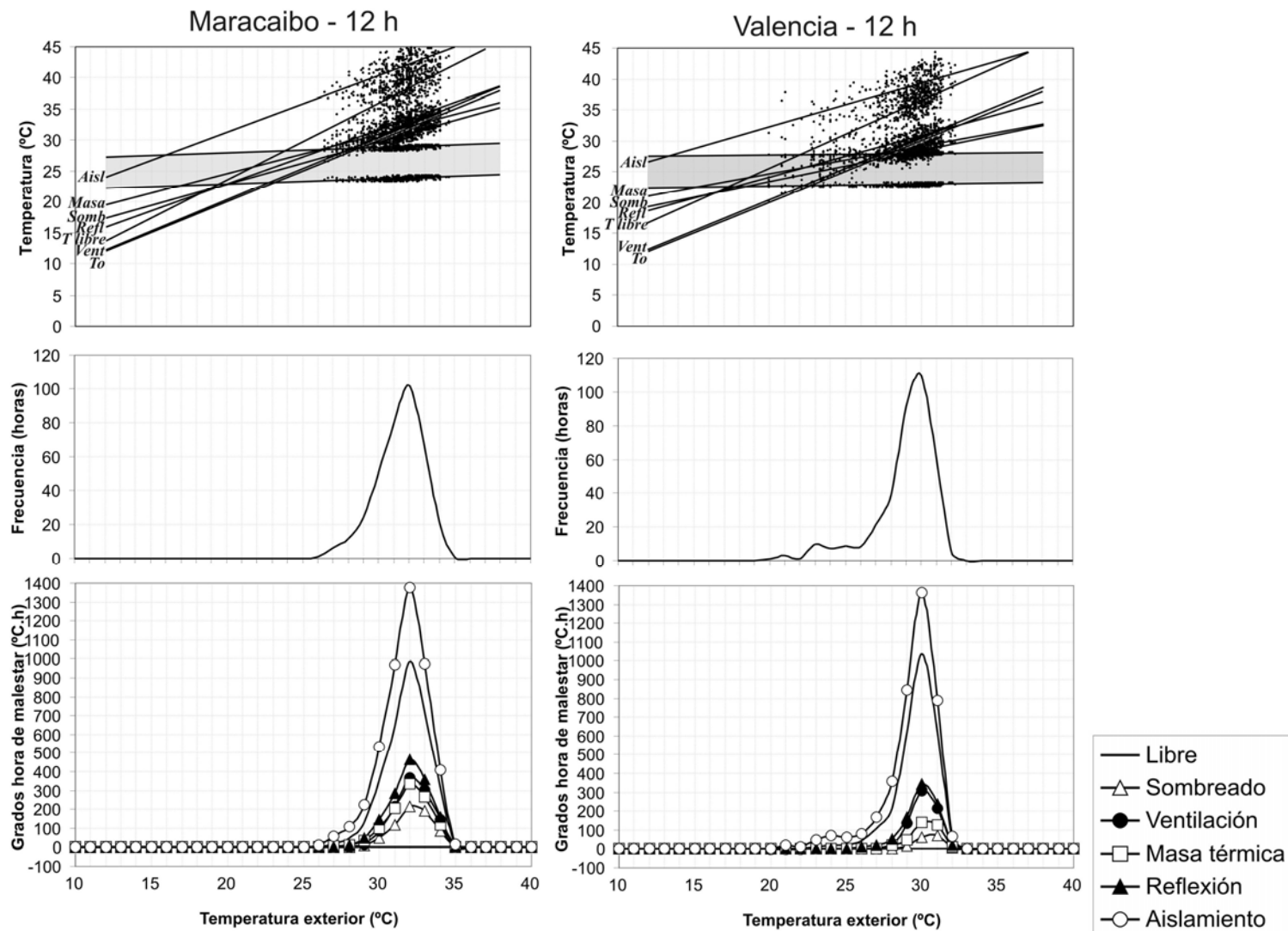


Figura 4.6. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

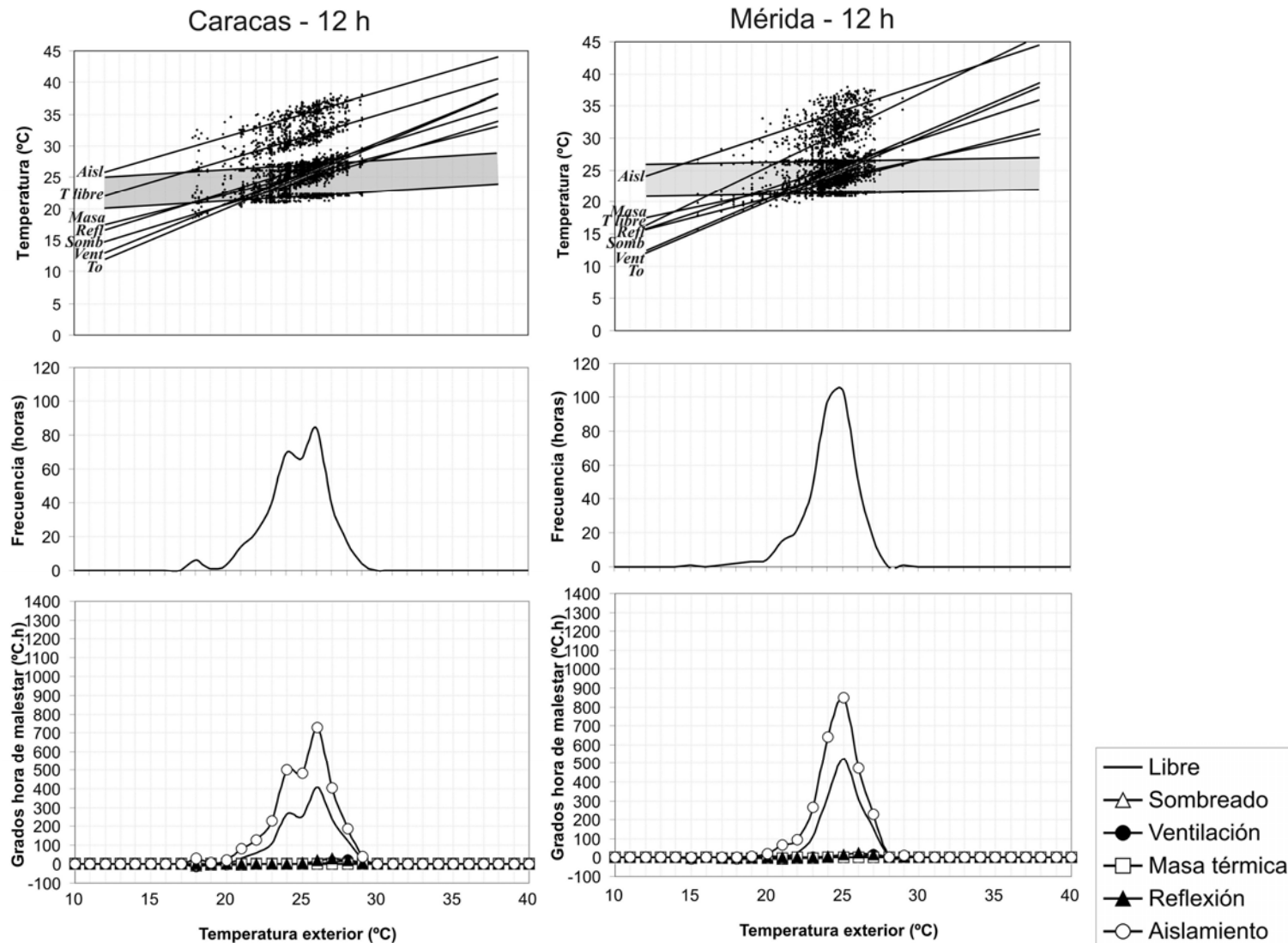


Figura 4.7. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

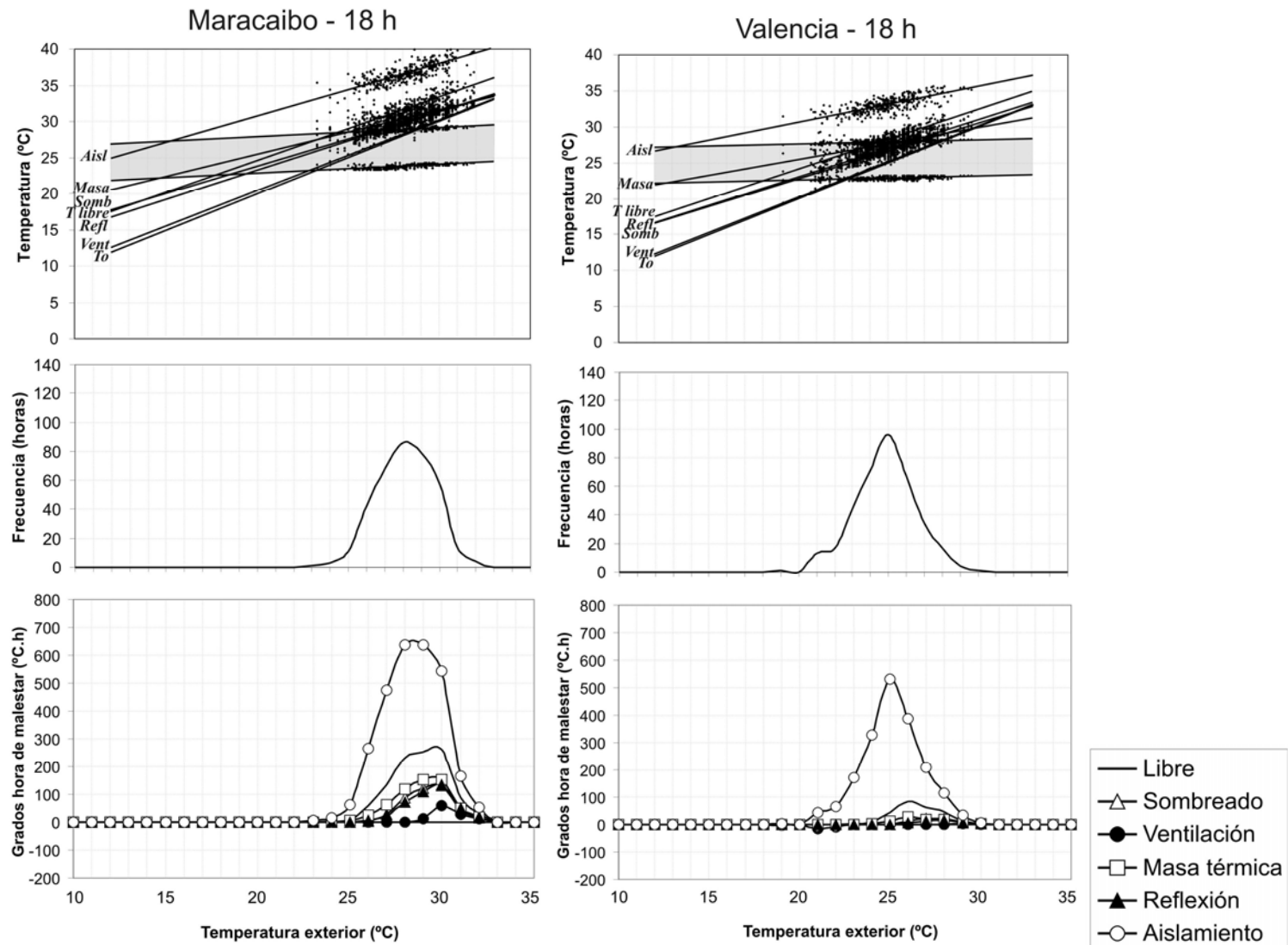


Figura 4.8. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

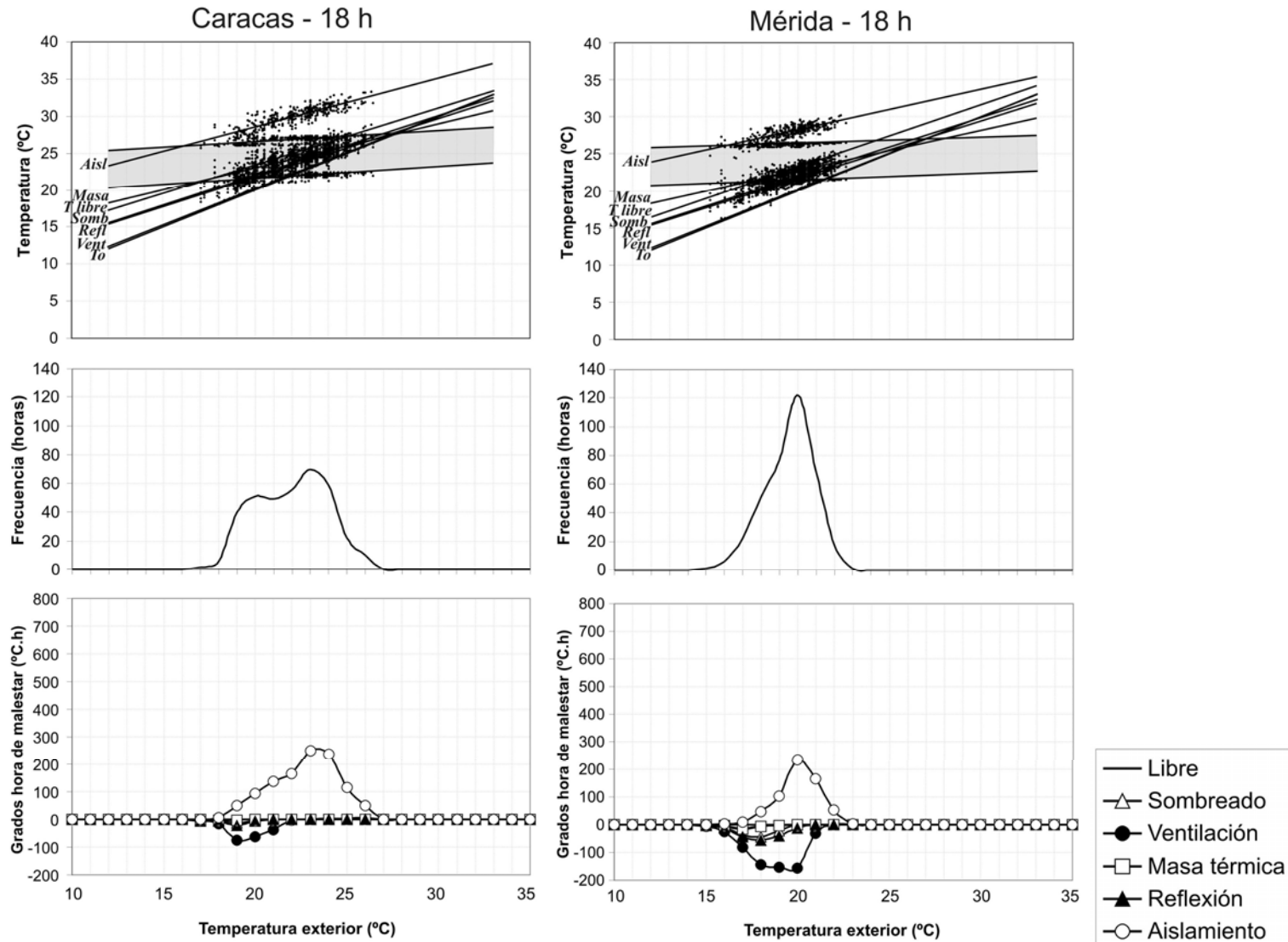


Figura 4.9. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura libre, las temperaturas operativas de las estrategias, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

Tabla 4.1. Grados-hora anuales de malestar térmico en Maracaibo, Valencia, Caracas y Mérida, a las 0 h, 6 h, 12 h y 18 h, en el edificio de base, antes y después de aplicar en él las estrategias de diseño según las hipótesis explicadas en el apartado 4.2.2 (página 147)

			Edificio libre	Sombreado	Ventilación natural	Masa térmica	Reflección del sol	Aislamiento
Maracaibo	0 h	Calor	242	25	0	510	11	2447
		Frío	0	0	-2	0	0	0
	6 h	Calor	113	2	0	278	1	2342
		Frío	0	0	-59	0	0	0
	12 h	Calor	3223	678	1137	1076	1480	4672
		Frío	0	0	0	0	0	0
18 h	Calor	1068	432	114	589	410	2862	
	Frío	0	0	0	0	0	0	
Valencia	0 h	Calor	3	0	0	28	0	1619
		Frío	0	-4	-258	0	-10	0
	6 h	Calor	1	0	0	25	0	1915
		Frío	-2	-23	-612	0	-21	0
	12 h	Calor	2759	159	700	359	866	3891
		Frío	0	0	-6	0	0	0
18 h	Calor	267	67	7	88	38	1896	
	Frío	0	0	-28	0	-1	0	
Caracas	0 h	Calor	0	0	0	0	0	815
		Frío	-65	-249	-960	-15	-330	0
	6 h	Calor	0	0	0	0	0	1155
		Frío	-82	-349	-1149	-22	-325	0
	12 h	Calor	1519	0	36	5	84	2839
		Frío	0	-13	-20	0	0	0
18 h	Calor	9	0	0	0	0	1109	
	Frío	-4	-24	-206	-5	-39	0	
Mérida	0 h	Calor	0	0	0	0	0	421
		Frío	-153	-520	-1293	-50	-652	0
	6 h	Calor	0	0	0	0	0	475
		Frío	-312	-815	-1878	-83	-864	0
	12 h	Calor	1477	0	24	0	68	2663
		Frío	-3	-23	-23	-7	-9	0
18 h	Calor	0	0	0	0	0	619	
	Frío	-29	-117	-597	-27	-168	0	

Los resultados mostrados en las gráficas de las páginas 151 a la 158, así como en la Tabla 4.1, pueden interpretarse a dos niveles:

- a) A un primer nivel, ofrecen una descripción concreta del comportamiento de la vivienda, en cuatro horas del día y en cuatro climas distintos, antes y después de aplicar en ella las estrategias de diseño concebidas según las hipótesis expuestas en el apartado 4.2.2 (página 147). Esta descripción no distingue entre temporadas o estaciones, al basarse en modelos de regresión que abarcan todo un año. Ello supone una uniformidad a lo largo del año, algo que puede aceptarse en climas relativamente isotermos como el venezolano. Pese a ello, de admitirse (de una manera ciertamente no muy precisa) que el lado izquierdo de las distribuciones de fre-

cuencia representa la ocurrencia de la temperatura en las temporadas más frías, es posible diferenciar esas temporadas más frías de las más cálidas. Obviamente, siempre será posible realizar los cálculos haciendo la distinción al comienzo (es decir, limitando las regresiones a períodos menores de un año, como un mes o una temporada).

En términos generales, los resultados, vistos como una descripción del caso concreto, dan una información primaria acerca de cuáles estrategias podrían priorizarse, según la hora, para adaptar la vivienda al clima. De entrada se aprecia que concebir toda la envolvente de material aislante (recuérdese que no se ventila) produce un fuerte malestar por exceso de calor, en las cuatro ciudades, a toda hora. Si se observan las regresiones, se aprecia que para que eso no sea así la temperatura exterior tuviera que ser menor que 10 a 15 °C, lo que ocurre sólo en Caracas y en Mérida, de noche, y pocas veces al año. La explicación es que si bien el aislante impide la entrada de calor, también impide su evacuación. Más allá de este resultado desfavorable, es sabido que el uso de materiales aislantes es una buena técnica en climas cálido-soleados si se le aplica parcial y selectivamente, en aquellos cerramientos al sol y en combinación con otras estrategias. Tal combinación pudiera evaluarse usando el método, incluso de manera genérica (p.ej., suponiendo que el aislante se coloca siempre en la fachadas este y oeste y el techo), junto con otras combinaciones concebibles o que se pudieran derivar de analizar los resultados obtenidos en este primer análisis, en el que las estrategias se consideraron de manera general y excluyente.

El resultado confirma por otro lado la evidencia empírica de que en un clima como el de Maracaibo el control solar y la ventilación son las estrategias que dan el mejor resultado. Si se observan las regresiones, se constata que esas estrategias son las que normalmente se encuentran más abajo y las que superan el límite superior de la zona de confort más a la derecha, es decir, a temperaturas relativamente altas. Los grados-hora totales de la Tabla 4.1 muestran que la ventilación es la única estrategia que garantiza el confort en Maracaibo en la noche y al amanecer y que las estrategias orientadas a alejar el sol durante el día también mejoran fuertemente las condiciones en la noche, aunque no al mismo nivel que la ventilación. No obstante, en esa ciudad, al mediodía, ninguna opción permite estar en términos generales ni siquiera cerca del confort. Aunque insuficiente, la mejor opción, a esa hora, es un máximo sombreado, dado que el aire se encuentra muy caliente para proveer confort ventilando. Aunque esté también lejos del confort, la estrategia de construir la vivienda con mucha inercia térmica se porta al mediodía un poco mejor que la ventilación, en razón de que resguarda el relativo frescor de las horas previas. Hacia el final de la tarde, la ventilación recupera su potencial de enfriamiento, pasando a ser la mejor estrategia, al igual que en la noche.

En Valencia la situación es similar a la de Maracaibo en términos de las tendencias y ocurrencias de las situaciones de malestar, pero la intensidad de las consecuencias desfavorables

del calor se atenúa aproximadamente a la mitad. Incluso, en la noche y el amanecer (y esta sería la única tendencia inversa), ventilar en exceso produciría entre 250 y 600 grados-hora totales de frío, lo que obliga a un cierto control de la ventilación a esas horas en las épocas más frías del año. Restringir la ventilación de noche para volver a las condiciones del edificio de base se presenta todavía en Valencia como una mejor opción que extremar la masa térmica, en razón de que en las *medias-noches* en que la temperatura supere 23 °C, que son muchas (Figura 4.2), esta estrategia conservaría más calor del tolerable. En Caracas y Mérida, en cambio, la mejor opción de noche es rodearse de masa térmica a efectos de temperar el frío. La intersección entre la temperatura asociada a la masa térmica y la zona de confort se da justamente en los rangos de la temperatura exterior nocturna de ambas ciudades (Figura 4.3 y Figura 4.4). La masa térmica es de hecho la estrategia que más *horizontaliza* la temperatura interior, haciendo que el rango de la temperatura exterior para el cual se presenta confort sea el más ancho. Por esta razón, al mediodía, el confort (que no existe en la vivienda de base en esas ciudades) puede igualmente resolverse con *mucha* masa térmica. Si maximizar la inercia es visto como impráctico, optimizar el sombreado o apelar a la ventilación natural se presentan como buenas soluciones, en especial si se dan posibilidades de adaptación tecnológica o comportamental para los casos en que el aire no tenga buenas condiciones térmicas (que esté muy frío o muy caliente, lo que ocurre en Caracas al mediodía, aunque con poca frecuencia).

b) A un segundo nivel (que es el que amplía el alcance e interés del método), los resultados pueden interpretarse desligándolos del clima y, en la medida en que el edificio de base y sus modificaciones se consideren representativas de un *tipo* de edificio y de soluciones *típicas*, desligándolos de los detalles del proyecto concreto. Si se comparan las regresiones lineales (a la misma hora y entre ciudades) de las temperaturas operativas interiores del edificio de base así como de las temperaturas de las estrategias de diseño, se advierte, a simple vista, que son muy parecidas. Como se explicó en el apartado 3.2.2 (página 115), la *regularidad* de las ganancias de calor (cargas internas más soleamiento) hace que la relación entre la temperatura exterior y la temperatura interior, a una hora dada, se ajuste a un modelo de regresión lineal que lleva a un desacoplamiento de ambas, al expresarse esta relación en términos de una ecuación lineal. Puesto que las ganancias de calor son similares en las cuatro ciudades (la cargas internas son las mismas y las ganancias solares son similares debido a que las latitudes lo son), las regresiones que se obtienen también son similares. Las mayores diferencias y dispersiones se presentan cuando la radiación solar horaria está influenciada por factores en buena medida aleatorios como la nubosidad, lo que se constata en las regresiones que corresponden a las horas de mayor sol. Sin embargo, éstas siguen siendo buenas en términos estadísticos. En tal sentido, su alcance y el uso que se haga de ellas obviando la dispersión alrededor del modelo están condicionados a mantener presente que se trata una simplificación.

La similitud de las regresiones de las cuatro ciudades hace que se pueda considerar que las de cualquier ciudad representan el comportamiento de la vivienda en cualquier clima de país (o en cualquier clima de latitud similar). Puesto que ya se cuenta con las regresiones de las cuatro ciudades, se puede, buscando una mejor *representatividad*, calcular un *promedio* de las cuatro regresiones de una misma hora. Estas regresiones promedio se muestran en la Figura 4.10, la Figura 4.11, la Figura 4.12 y la Figura 4.13, para las 0, 6, 12 y 18 h respectivamente (páginas 163 y 164). En dichas figuras se eliminó el diagrama de dispersión (la nube de puntos) a fin de simplificar. Las zonas de confort sombreadas son también zonas de confort promedio (que coinciden aproximadamente con la zona de confort de Caracas). Sin embargo, se indican, en líneas discontinuas, las zonas de confort de Maracaibo y Mérida, que son las que marcan los límites superior e inferior de las zonas de confort que se dan en ese rango de altitud. Si se acepta obviar la dispersión, las intersecciones entre las líneas de la temperatura operativa interior (sea la temperatura libre o las temperaturas asociadas a las estrategias de diseño) y la zona de confort indican los rangos de la temperatura exterior para los cuales la vivienda está en confort térmico o en malestar térmico (frío a la izquierda y calor a la derecha).

Estas regresiones promedio de la temperatura operativa interior son una caracterización de la vivienda del ejemplo, la cual se puede considerar a su vez como una representación de muchas viviendas sencillas de interés social. En la medida en que sea así, estas gráficas (o las que se puedan generar mediante criterios distintos de definición de las técnicas o estrategias a evaluar) pueden usarse directamente en las etapas iniciales del proceso de diseño (*i.e.*, sin necesidad de simular), sea de forma cualitativa, juzgando sólo con base en las temperaturas típicas del clima, sea de manera cuantitativa, calculando, con base en la distribución de frecuencia de la temperatura exterior, los grados hora de malestar de la vivienda en ese clima.

4.5 Referencias del capítulo 4

ASHRAE Standard 55 (2004) *Thermal environmental conditions for human occupancy*.

CIBSE Guide A (2006) *Environmental Design*. Disponible en web:
<<http://es.scribd.com/doc/42019258/Cibse-Guide-a-2006>>

de Dear R.J., Brager G.S. y Cooper D.J. (1997) *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference – Final Report*. ASHRAE RP-884. Sydney:MRL. Disponible en web:
<http://sydney.edu.au/architecture/staff/homepage/richard_de_dear/ashrae_rp-884_hypothesis.shtml>.

Marsh, A. (2003). *ECOTECH Tutorials*. Square One research Pty Ltd.
<http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Ecotect_Tutorials>.

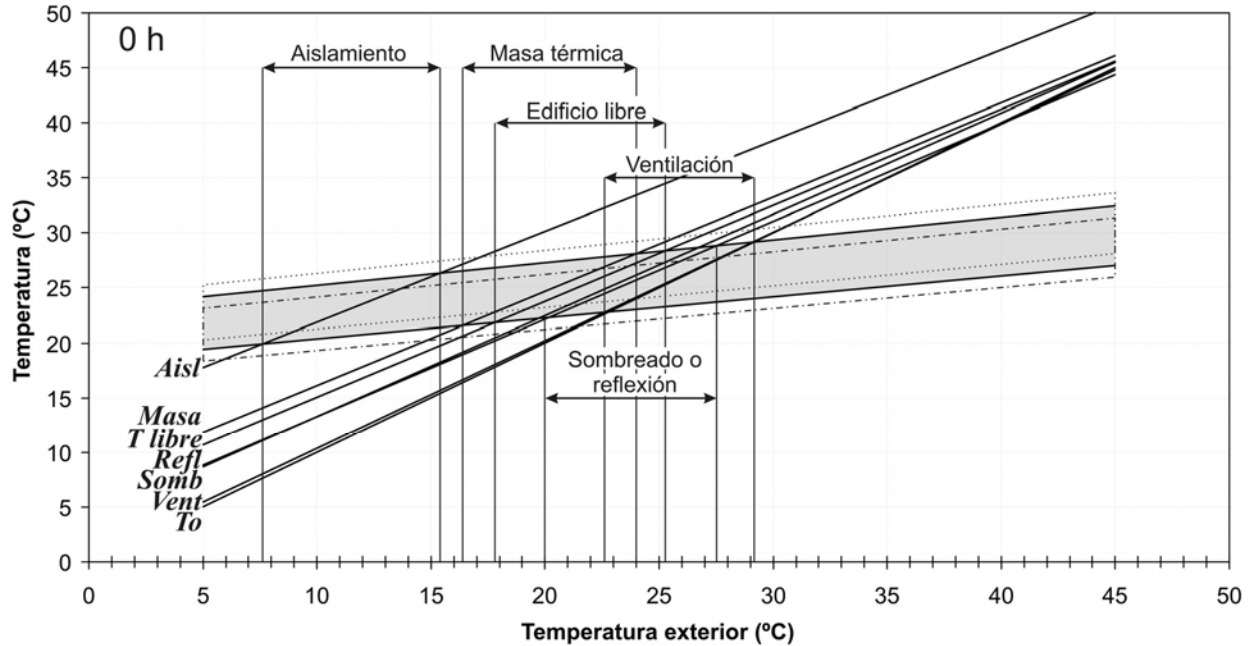


Figura 4.10. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 0 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida

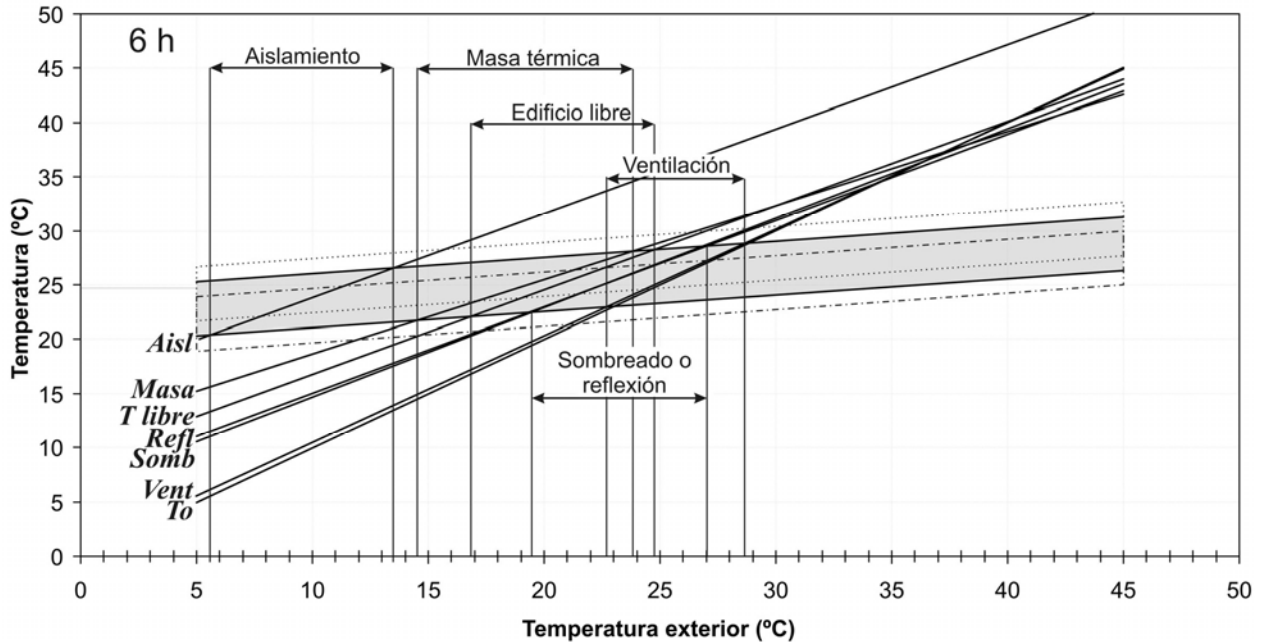


Figura 4.11. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 6 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida

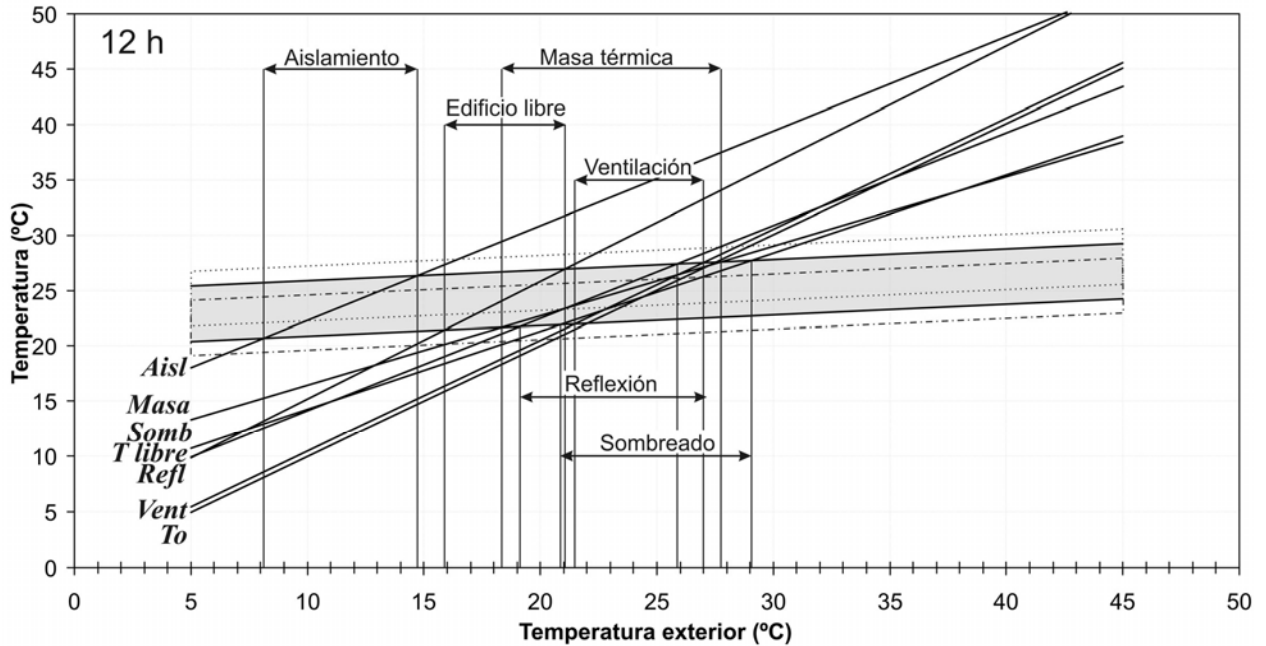


Figura 4.12. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 12 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida

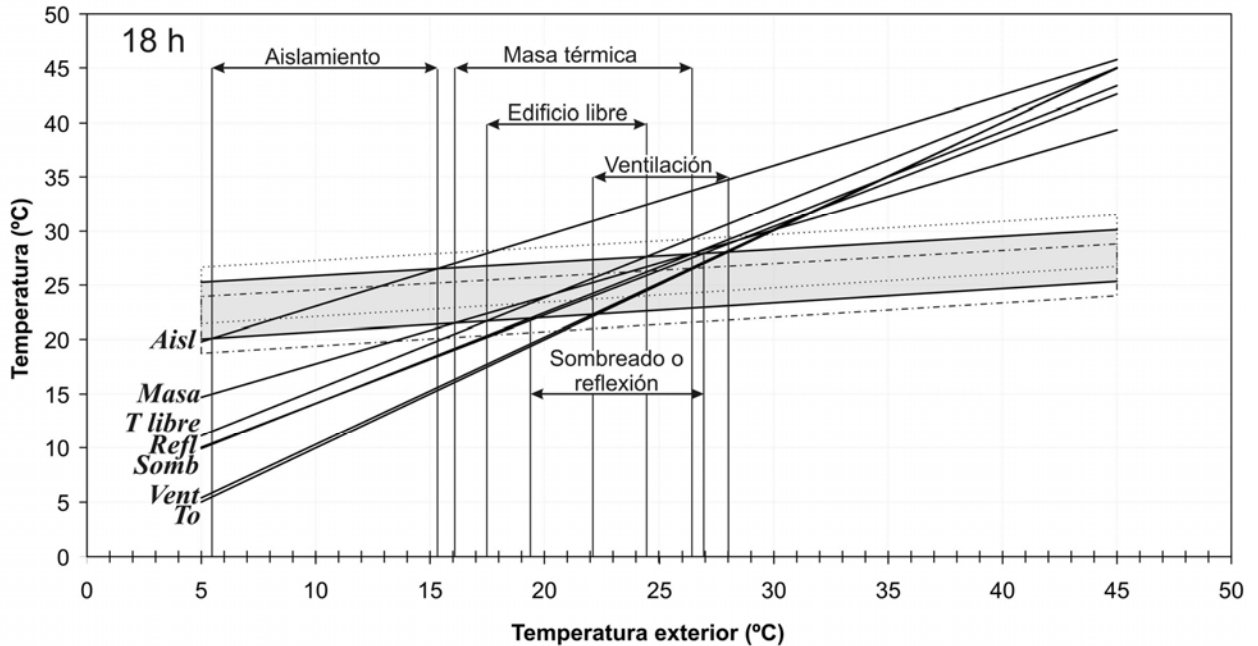


Figura 4.13. Rangos de la temperatura exterior para los cuales el edificio libre (vivienda del ejemplo) y los edificios que resulten de aplicar las estrategias de diseño presentan condiciones de confort térmico a las 18 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Evaluar la adaptabilidad de un edificio a un clima y sus variaciones desde la perspectiva del confort térmico y el ahorro energético demanda caracterizar y relacionar tres elementos: el comportamiento térmico del edificio, el clima y el criterio de confort térmico. En las etapas tempranas del proceso de diseño, cuando se está frente a problemas abiertos, el interés consiste en tomar decisiones correctas sobre la base de datos escasos y de carácter general. Habitualmente esto se hace aplicando métodos *iniciales* que relacionan el clima y el criterio de confort y sugieren con base en ello estrategias genéricas globales (como hacen por ejemplo los diagramas bioclimáticos) o aplicando métodos *intermedios* que dan indicaciones globales acerca de aspectos más puntuales como la forma de la planta del edificio, la orientación, la volumetría, la distribución espacial, la resistencia térmica de la envolvente, su inercia térmica, el control de la radiación solar, etc.

Un enfoque más específico es el del presente trabajo, basado en el uso de la temperatura libre, definida como la temperatura operativa interior de un edificio sin ventilación y sin sistemas de climatización activa para la cual, dada una temperatura exterior, el edificio se encuentra en equilibrio térmico (Ghiaus, 2003). Si se elimina la aleatoriedad relacionada con la ventilación natural y se considera que las ganancias de calor son estables, la diferencia entre la temperatura interior y la temperatura exterior se puede considerar a una hora del día independiente del clima, convirtiéndose en una caracterización sintética del edificio. En otras palabras, se desacoplan el comportamiento del edificio y el clima en el que se encuentra, al derivarse un patrón de comportamiento común a todos los climas. De hacerse esto mismo para las variantes que se obtienen de aplicar en el edificio cambios potencialmente deseables desde la perspectiva del diseño, se obtiene una caracterización desligada del clima, tanto del edificio, como de sus variantes. Si finalmente se caracteriza al criterio de confort por medio de las regresiones lineales dependientes de la temperatura exterior de los modelos adaptativos y al clima por medio de la distribución de frecuencia de la temperatura exterior, se pueden obtener estimaciones rápidas del potencial de adaptación del edificio a ese clima, lo que representa una información valiosa para la toma de decisiones en las etapas iniciales del proceso de diseño, en la medida en que el edificio del cual se obtiene tal información pueda considerarse representativo del edificio que se va a diseñar.

El enfoque es ciertamente más específico que el de los métodos habitualmente usados en las etapas tempranas del proceso de diseño, en razón de que para simular un edificio (o realizar mediciones experimentales en él) a objeto de determinar su temperatura libre se requiere contar con el edificio, al margen de que a éste se le conciba, en el caso de la simulación, como un esquema elemental de partida. A diferencia, por ejemplo, de los diagramas bioclimáticos, en los que se suponen de forma genérica *todos* los edificios, la proyección del método como fuente de infor-

mación utilizable al comienzo de otros proyectos requiere concebir al edificio cuyo patrón de comportamiento se representa por medio de regresiones lineales como un *tipo* de edificio, no como *todos* los edificios. En el otro extremo, pensar en usar al método para evaluar cambios muy concretos en cualquier etapa del proceso de diseño (es decir, sin trascender el contexto del proyecto en que se esté), lo aproximaría a los métodos tradicionales de comprobación computarizada de casos concretos, siendo que la única diferencia sería la forma no tradicional en que se presentan los resultados (lo que puede de por sí considerarse un aporte puntual, pero no el principal). A menos, por supuesto, que la generación de las regresiones lineales de ese proyecto concreto se conciba en términos lo suficientemente genéricos como para incorporarse al conjunto de edificios *tipo* de los que ya se conoce su caracterización en términos de temperatura libre.

A un nivel más riguroso, en el proceso de conferirle al método un carácter genérico de cierto alcance, se debe observar que a los errores asociados, por un lado, a las diferencias que surgirían de simular el mismo edificio en distintos climas y, por otro, a la exclusión del término aleatorio del modelo de regresión lineal, se añadiría el error implícito en las *diferencias* reales entre el edificio considerado como modelo y el edificio concreto del proyecto en el que se esté. Sin embargo, en todo esto no se puede olvidar que la característica principal de los métodos iniciales es justamente que se basan en datos generales y escasos, por lo que no pueden ser precisos: la premisa de usárseles lo antes posible conlleva ese costo. En la medida en que eso sea así, no se puede pretender obtener con ellos demasiadas respuestas acerca de la concreción detallada de las orientaciones que dan, aunque, de nuevo, en el caso del presente método, puesto que simular significa concebir un edificio concreto, la sola realización de la simulación reafirma su carácter específico.

Todo lo cual lleva a plantear, como sugerencia de trabajos futuros, dos proyectos afines pero diferenciables en cuanto a reflejar la dualidad aludida en los párrafos anteriores, en el sentido de que el método sirve tanto para evaluar decisiones concretas en proyectos concretos como para producir información genérica de utilidad en las etapas iniciales de cualquier proyecto de diseño:

Proyecto 1: programar el método en algún software de simulación dinámica de los edificios que sea lo suficientemente abierto como para permitir su inclusión. Para los cálculos que se realizaron en el presente trabajo, se adelantaron ya varios *scripts* orientados a extraer directamente de la simulación las temperaturas de interés (concretamente, las temperaturas interiores y exteriores a una hora dada a lo largo de un año, las temperaturas mensuales de confort y las diferencias mensuales promedio entre la temperatura interior y la exterior), las cuales luego se llevaron a una aplicación de manejo de hojas de cálculo en la que se realizaron los cálculos y gráficos relacionados con las regresiones lineales y las distribuciones de frecuencia. Al lado de la posibilidad de que tales cálculos y gráficos sean generados por el mismo software de simulación, la aplicación del método, tal como se hizo, resulta bastante engorrosa, sin mencionar la mayor probabilidad de cometer errores. Enmarcado en el mismo proyecto, y subiendo a un nivel académico, se podrían

diseñar y programar los modos de aplicar en el edificio de base las estrategias o técnicas de diseño cuya adaptabilidad al clima se desearía comúnmente averiguar, de forma que todo, cálculos y conjuntos de gráficos, se hagan automáticamente. Ello conlleva definir muy claramente las premisas de esas estrategias, de forma que, sin dejar de ser genéricas, den respuestas útiles en la práctica. Pudiera pensarse en dos niveles, uno similar al planteado en el capítulo 4, en cuanto a concebir las estrategias de forma ideal, y otro más detallado y realista. Un punto importante de un proyecto así sería estudiar los límites y la confiabilidad relativa del programa de simulación que se escoja, puesto que cualquier sospecha acerca de la veracidad de los grados-hora que se obtengan con el método no puede atribuirse al método, sino al programa de simulación, ya que el método no simula, sólo procesa, a conveniencia, el resultado de esa simulación. En adición, debido a que se trata aquí de la programación completa del método (es decir, de una programación que conlleva cálculos que pueden ser prolongados), conviene que el software se base en algún método simplificado pero confiable, de manera de brindar los resultados con la mayor rapidez.

Proyecto 2: producir la información propiamente utilizable en las etapas tempranas del proceso de diseño, esto es, los patrones de comportamiento de edificios típicos y las alternativas típicas aplicables a esos edificios. Ello significa, antes que nada, decidir los criterios de diferenciación de los edificios y sus potenciales modificaciones. Hecho esto, se procedería a generar las regresiones lineales basadas en la temperatura libre. Para ello no se necesitaría en rigor que el proyecto 1 se haya terminado (aunque convendría), ya que los cálculos se pueden hacer de la misma forma en que se hicieron en la presente tesis. Sin embargo, la parte más importante de un proyecto como ese sería la divulgación de la información, lo que conllevaría dos tipos de acción: primero, la publicación de las regresiones de manera tradicional, sobre papel, guías, páginas web, etc., para que puedan usarse manualmente; segundo, la *programación* de esa información, es decir, la introducción de las regresiones en algún programa (de simulación o no) que tenga las series meteorológicas, de forma que se pueda obtener al instante el potencial de adaptación del tipo de edificio de interés al clima de interés. En ese caso se estaría en la onda de los programas interactivos como los que incluyen métodos iniciales o los basados en BIM (*Building Information Modeling*).

Aunque no relacionado sólo con el método, y como sugerencia final, un proyecto de investigación que se hace necesario abordar en Venezuela es la generación de series meteorológicas típicas confiables, dado que las series con que se cuenta, además de ser de años específicos, tienen fallas de origen que han debido corregirse con métodos de estimación y ajuste cuyos resultados son por definición aproximaciones, a falta de una alternativa mejor.

Referencias

Ghiaus C. (2003) *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings 35, 405-411.

FIN DE LA TESIS. NO HAY ANEXOS NI APÉNDICES