

CONDICIONES DE «COMFORT» DE PROYECTO EN FORMA GRAFICA PARA DIFERENTES AMBIENTES Y CLIMAS ESPAÑOLES

(CONDITIONS OF COMFORT OF THE PROJECT, SHOWN IN GRAPHIC FORM, FOR DIFFERENT SPANISH ATMOSPHERES AND CLIMATES)

Pedro M.^a Rubio Requena, Dr. Arquitecto y Físico. Catedrático de Instalaciones de la E.T.S. de Arquitectura de Madrid y Director del Departamento de Física e Instalaciones de la U.P.M. ESPAÑA

Fecha de recepción: 5-XII-88

190-8

RESUMEN

Se presenta la versión gráfica de un trabajo de investigación, que también aborda el cálculo analítico sobre condiciones de «comfort» a establecer en distintos ambientes con diferente uso, destino y ocupación y situados en los diferentes climas templados españoles. Se estudia la adaptación/aclimatización de tipo estacional de las personas y se proponen valores de comfort normales para cada caso. Se incluye, por último, una breve muestra gráfica seleccionada de zonas de comfort con variación estacional y específica para algunos locales edificatorios.

SUMMARY

Here we are given the graphic version of a piece of research, which also involves analytical calculation, on conditions of «comfort» to be established in various atmospheres used, assigned and occupied in different ways and located in the various temperate climates of Spain. A study is made of the seasonal adaptation/acclimatization of people, proposing normal standards of «comfort» for each case. Finally, the work includes a brief selection of graphic examples of «comfort» areas showing seasonal variation and specific variation for certain premises.

Introducción

El trabajo de investigación del que aquí se da un adelanto (*) trata de sintetizar y simplificar el establecimiento de las condiciones termohigrométricas de proyecto, según niveles de calidad definidos por la aceptabilidad de los usuarios. Se extiende a los ambientes de locales usuales en los edificios de programas normales situados en un clima español. Sin embargo no deberá olvidarse, en la práctica, que la adopción de los parámetros de «comfort» queda hoy muy limitada por disposiciones legales (**).

Una de las líneas principales del trabajo trata de contrastar y concordar las condiciones teóricas deducibles del equilibrio termodinámico en el intercambio de calor por el cuerpo humano, con los índices de «comfort» elaborados a partir de las respuestas de los observadores tanto en laboratorio como en locales de edificios. Se trata de una cuestión ardua pero fructífera por partida doble.

En cuanto a recurrir a métodos gráficos existen razones, además de ser habituales para ciertos profesionales. Una ventaja es la reducción del volumen de información frente a los datos numéricos con una disminución eso sí de la exactitud, asumible sin embargo, en este sector tecnológico. Otra, el fácil conocimiento del grado de calidad o de economía al moverse en los gráficos.

En lo que sigue se excluyen ciertas cuestiones influyentes pero difíciles de evaluar. Así los factores extraclimáticos que influyen en el «comfort»: condiciones visuales, auditivas, olfativas, etcétera. Por otro lado los aspectos psicológicos, tan importantes y tan difíciles de objetivar.

(*) Que se desarrolla en el Departamento de Física e Instalaciones aplicadas a la Edificación, el Medio Ambiente y el Urbanismo de la Universidad Politécnica de Madrid. En la investigación colaboran don Julio Castejón Sánchez, don Domingo Guinea Guerrero, don Julio Castejón Navas, doña Sara Pérez Ghisays y don José M. Sanz Guerrero.

(**) Especialmente la norma NBE-CT-79 y las instrucciones IT IC 02, 04 y 05 al Reglamento de Calefacción, Climatización y ACS.

1. El hombre en el ambiente climático

Las personas sólo tenemos sensaciones en relación con el ambiente climático, que no son susceptibles de medida. La razón es que una sensación permite el concepto de igualdad, pero no el de suma. En consecuencia no cabe medir directamente el grado o no de «comfort» de un recinto concreto. Se incluyen a continuación algunos datos que ayudarán a entender la evaluación posterior de los procesos de equilibrio térmico (→ 4).

1.1. El cuerpo humano como máquina térmica

Se pasa a analizar someramente el comportamiento biofísico de los individuos y grupos humanos para unas condiciones climáticas variables.

El cuerpo humano puede producir diversas formas de energía, debido a los alimentos que ingiere (y al aire que respira). Por una parte puede generar energía mecánica, trabajo y calor, que necesitará disipar.

El objetivo que tratan de conseguir las personas expuestas a climas rigurosos es mantener las constantes vitales dentro de los límites estrictos. Así la temperatura central del cuerpo entre valores limitados a un campo estrecho (unos 36,1 ... 37,2 °C) en la boca, cuando las temperaturas ambientales quedan entre límites bastante amplios (unos -12 ... 60 °C). Si una persona realiza ejercicios violentos puede alcanzar temperaturas centrales más elevadas (hasta 39,5 °C) de manera transitoria. Por el contrario, para climas muy fríos, la temperatura central puede descender esporádicamente a valores más bajos (menores de 36 °C).

En cuanto al *sistema aislante* del cuerpo humano está constituido por la piel, los tejidos subcutáneos y adiposos, la grasa, tres veces más resistente que los primeros. Como casi todo el calor se produce en las regiones profundas del cuerpo el aislamiento que ofrecen los tejidos superficiales permite conservar la temperatura central, creando un gradiente de temperaturas hacia el aire de los alrededores.

Las personas pueden ayudarse en su intercambio de calor con los ambientes modificando su indumento: prendas de vestir, tocado y calzado.

Otro efecto, generalmente difícil de ponderar pero siempre presente, es la falta de simetría y uniformidad en los intercambios de calor del cuerpo y los recintos. Por un lado las temperaturas de las distintas partes del cuerpo son distintas; por otro unas pueden estar arropadas y otras no.

Es de notar que el ambiente presenta disimetrías en la temperatura de las zonas del recinto; existencia de fuentes frías o calientes, corrientes de aire, etcétera. Por último, y considerando además las formas y posiciones del cuerpo, la convección y la radiación resultan muy poco uniformes.

1.2. Sistema de control de la temperatura del cuerpo

El sistema de control de la temperatura del cuerpo humano actúa por un proceso de retroalimentación negativa, «*negative feedback*», de manera que si aumenta la temperatura ambiental, y consiguientemente la temperatura del cuerpo, la retroalimentación será negativa y producirá, bien que con un cierto retraso, una serie de cambios que conducirán a reducir la temperatura a los valores adecuados al cuerpo: *nivel de ajuste*.

Los estímulos de frío o calor del ambiente son captados por los *termorreceptores* de los tipos de frío-calor, del frío, del calor, de calor-dolor, y sus mensajes llegan por las vías aferentes a unos 20 m/s, al sistema nervioso central. Por debajo de unos 10 °C de temperatura de la piel se estimulan las fibras de frío-dolor; entre 10 y 15 °C los receptores de frío; a partir de 30 °C y hasta unos 45 °C actúan tanto los receptores de frío como de calor; a partir de 45 °C y hasta los 50 °C se estimulan tanto los receptores de calor como los de calor-dolor.

Una vez interpretados los mensajes en el centro de regulación del hipotálamo se producen impulsos que mandan glándulas y músculos: *procesos homeostáticos*.

1.3. Mecanismos del cuerpo en ambientes agradables

Los procesos de equilibrio térmico del organismo en los climas benignos, usuales en las estaciones otoñal y primaveral, son los que tienen lugar general y continuamente incluso cuando se le fuerza en climas menos favorables.

El mecanismo regulador más eficaz consiste en la variación del torrente sanguíneo. Un valor elevado del mismo supone una mayor transmisión de calor desde las partes internas del cuerpo hasta la piel; y un valor reducido, una mucho menor. La sangre alcanza de esta manera el plexo venoso; además en las porciones más expuestas del organismo, manos, pies, orejas, la sangre llega de las arteriolas y a las venas por *anastomosis arteriovenosa*. En todo caso no se producen en esos climas ni vasoconstricción ni vasodilatación.

Otros procesos de menor repercusión que tienen lugar son la transpiración, difusión del agua a través de

la piel pero no procedente de las glándulas sudoríparas, y las pérdidas por conducción y evaporación producidas en el aparato respiratorio durante la respiración.

1.4. Mecanismos del cuerpo en ambientes fríos

Los mecanismos que el cuerpo humano pone en marcha en atmósferas gélidas, y parte de los cuales pueden llegar a ser permanentes en la estación invernal tras suficientes días de adaptación, tienen por objeto, por una parte, aumentar la producción normal de calor y, por otra, disminuir el calor cedido.

El aumento del calor metabólico puede hacerse por excitación simpática química o termogénesis química (adrenalina y noradrenalina), por contracorriente («by pass»), por secreción de la glándula tiroidea (tiroxina), por estremecimientos o tiriteras, o evitando la sudación.

Para evitar las pérdidas del organismo se pone en marcha la vasoconstricción, que reduce el caudal sanguíneo y cierra los poros de la piel, o mediante la piloerección que, al aumentar el espesor de la capa límite, aumenta la resistencia de la piel.

La humedad del aire que rodea al cuerpo tiene una influencia muy reducida, excepto para valores muy bajos (correspondiente a presiones menores de 10 mm Hg o al 20%) o muy elevados (del orden del 75% al 80%). En el caso de ambientes muy secos la respiración se hace fatigosa: carrasperas con tos, hemorragias...

1.5. Mecanismos del cuerpo en ambientes calurosos

En el caso de unas condiciones sofocantes o simplemente cálidas que produzcan una excesiva temperatura corporal, el organismo desarrolla unos mecanismos, algunos de los cuales pueden llegar a estabilizarse permanentemente en la estación estival, que tiendan tanto a disminuir la producción normal de calor como a potenciar la disipación del mismo.

Para reducir la generación de calor metabólico, el cuerpo se inhibe de la termogénesis química, de la actividad metabólica (hipertrofia del tiroides) y de los estremecimientos o temblores, que ya resultan incómodos. La disminución permanente en la generación de calor no es relevante (sobre un 5%).

En cuanto a aumentar la disipación de calor al ambiente lo logra el cuerpo mediante la vasodilatación y la sudación. Por el primer mecanismo se dilatan mucho los vasos sanguíneos de la piel, lo que permite aumentar varias veces el calor transferido a la piel; para ello se

inhiben los centros simpáticos del hipotálamo posterior que controlan la vasoconstricción. Por el segundo se estimula energéticamente y sobremedida el proceso de la sudación (unas diez veces si la temperatura central del organismo pasa de 37 a 38 °C) y a un máximo de unos 100 g/h; el aumento de la producción de calor se produce al estimular el área preóptica delantera del hipotálamo, transmitirse estos impulsos por vías neurovegetativas hacia la médula y de aquí por las vías simpáticas hasta las fibras nerviosas colinérgicas que inervan las glándulas sudoríparas.

1.6. Particularidades de las personas en el intercambio térmico

Se exponen aquellas condiciones específicas de las personas que influyen en los procesos de cambios térmicos entre el cuerpo y el ambiente. Se hace hincapié tanto en la actividad de las personas como el indumento de que están provistas.

De más difícil evaluación son otras peculiaridades relativas al sexo, edad, constitución, etnia, experiencia térmica, estado de salud, horario de comidas, tiempo de permanencia, etc. En general se acepta un menor grado de adaptación en niños, enfermos, mujeres y, aunque no aceptado por todos, en las personas mayores. Sí existe acuerdo en que las condiciones para permanencias cortas, menores de 3 horas, son más exigentes que las que son largas, a no ser brevísimas.

1.6.1. Producción de calor por el cuerpo.—El metabolismo de una persona en un período con clima templado da lugar a una liberación de calor con respecto al tiempo que depende de sus características somáticas (superficie de la piel, peso) y de su actividad muscular. Para el cuerpo tumbado en reposo, *metabolismo basal*, se establece el nivel metabólico normal (1 met) y para actividades más o menos violentas se deducen niveles más elevados, Tabla 1. En ella se incluyen también, por afectar directamente la calidad ambiental, las tasas de ventilación propuestas en la última normativa española (*).

1.6.2. Aislamiento del cuerpo en función del indumento.—El aumento medio de resistencia térmica que el vestido, más el calzado y el tocado en su caso, proporcionan al cuerpo se evalúa con el parámetro llamado *índice de indumento*; su unidad, que se denomina *clo* toma el valor cero para el cuerpo desnudo y uno para el indumento de invierno de un oficinista. Para otros equipos puede consultarse la Tabla 2.

(*) Se trata de la muy exigente, en línea con la normativa internacional más avanzada, norma UNE 100-011-88.

Tabla 1. Niveles metabólicos y ventilación correspondientes a actividades típicas de las personas

Metabolismo (met)	Actividades típicas:	locales en que se desarrollan	Caudal unitario	
			(l/s.per)	(l/s.m ² suelo)
< 0,8	tumbado, acostado (relajación)	dormitorios, saunas	4,8	0,4
0,8 ... 1,2	sentado con tareas ligeras	mesas oficinas, salas de espera, salas de espectáculos...	4,8 ... 7,2	0,4 ... 1,3
1,2 ... 1,4	trabajos activos en administración	centros de cálculo, archivos, mesas, delineación...	7,2 ... 8,4	—
1,6 ... 2,2	cocinado y servicio restaurantes	cocinas, comedores, barras, salones recreativos, mostradores, comercio...	9,6 ... 13,2	10
2,2 ... 3,8	trabajos fuertes de hogar y taller	planchas, lavadoras, lavavajillas, lavandería, locales fumadores...	13 ... 22	—
3,8 ... 7,0	prácticas deportivas	gimnasios, salas deportivas, pistas bailes rápidos...	21,6 ... 42	—

Tabla 2. Valores del índice de indumento, correspondientes a distintas formas de vestirse

Atuendo, calzado y sombrero	Índice (clo)
Desnudez	0,0
Pantalón corto	0,1
Conjunto de vacaciones (pantalón corto, camisa de manga corta, sandalias)	0,3 ... 0,4
Atuendo ligero de verano (pantalón largo, camisa de manga corta)	0,5
Conjunto femenino de estar en casa (falda, blusa y rebeca de manga larga, ropa interior normal, medias y zapatos)	0,7 ... 0,9
Indumentaria típica de ejecutivo (traje, camisa de manga larga, corbata, ropa interior de algodón, calcetines y zapatos)	1,0
Idem. más chaleco y calcetines gruesos	1,3
Idem. más abrigo (terno de lana, lo demás como en el caso anterior)	1,5
Ropa de mucho abrigo para hombre (como lo anterior con abrigo de lana e incluso sombrero)	2,0 ... 2,5

Nota: El valor 1 clo corresponde a una resistencia térmica media de 0,18 m · h · °C/kcal (0,155 m · h · K/W).

2. Magnitudes físicas influyentes en el «comfort» climático

La imposibilidad de medir directamente el «comfort» climático, a partir de las sensaciones producidas sobre el cuerpo humano (→ 1), obliga a intentar su cuantificación, midiendo aquellas magnitudes físicas verdaderas que influyen en las sensaciones climáticas. Para ello se han realizado numerosas observaciones experimentales en laboratorio y en locales en que opinaba una población numerosa y representativa (→ 4).

2.1. Empleo de la temperatura

La magnitud física más interesante a emplear en la medición del «comfort» climático es la *temperatura*. La

temperatura, que arranca de la sensación que provoca en las personas, ha pasado tras difíciles consideraciones a ser una magnitud física.

A nuestros efectos prácticos la *temperatura* puede describirse como la magnitud que mediría el termómetro ideal que define la escala termodinámica de temperatura, utilizando un motor de Carnot con puntos fijos el triple de agua-hielo-vapor de agua y el de ebullición a presión normal. En la práctica la escala termodinámica coincide con la del termómetro de helio a volumen constante. Si al citado punto triple se le asignan los valores 0 ó 273,15, y consideramos en ambos casos el intervalo fundamental de 100 grados, resultan las escalas centígradas Celsius (°C) y Kelvin (K).

2.1.1. Temperatura del termómetro seco (T_s).—Es la que indica un termómetro cuyo bulbo o sensor tiene

seca su superficie y con una pantalla reflectora que sirve de protección frente a la energía radiante exterior, para circulación del aire ambiente con velocidades entre 3 y 10 metros por segundo.

2.1.2. Temperatura del termómetro húmedo (T_h).—Se mide con un termómetro semejante al anterior en cuanto a protección de la radiación y a velocidad de circulación del aire, pero cuyo bulbo o sensor está cubierto con gasa de algodón de densidad superficial muy pequeña que se mantiene humedecida con agua potable.

2.1.3. Temperatura radiante media (T_r).—Es la temperatura uniforme de una cavidad negra que radiaría a un cuerpo negro colocado en su interior con intensidad igual a la media observada.

2.2. Empleo de otras magnitudes termodinámicas

El estudio del cuerpo humano como máquina térmica exige el empleo de las magnitudes típicas de la Termodinámica. Por ello se hace necesario considerar los conceptos de calor, energía interna, entalpía, rendimiento, energía radiante, potencia, etcétera.

2.2.1. Calor y energía radiante.—El calor y la energía térmica son términos que suelen confundirse al no estar definidos con rigor. El *calor* puede definirse como la energía que pasa de un cuerpo de más temperatura, *caliente*, a un cuerpo de menos temperatura, *frío*, cuando están en contacto; es decir el calor es energía en movimiento. Por el contrario el Sol envía a la Tierra a través del vacío lo que puede definirse como *energía radiante*.

De acuerdo con las anteriores definiciones no debería hablarse de *calor almacenado* ni de *calor latente*, sino de *energías*. A pesar de tratarse de conceptos diferentes tanto el calor como la energía radiante se pueden convertir en *energía interna*, es decir nos calientan.

Las unidades del calor, o cantidad de calor, son las mismas de la energía o trabajo; en el sistema SI es el *julio* (J) = 1N × 1m; también se emplea mucho el *vatio-hora* (Wh); en el sistema técnico se emplea usualmente la *kilocaloría* (kcal). Si nos referimos a la rapidez con que el calor fluye o cambia se denomina *potencia térmica*; sus unidades son el *vatio* (W) = 1J/s y la *kilocaloría por hora* (kcal/h).

2.2.2. Energía interna, entalpía y entropía.—Las magnitudes termodinámicas que consideramos de calor y trabajo tienen el inconveniente de no ser funciones de estado, es decir que sus variaciones dependen de su historial. Se ha hecho necesario introducir unas funciones de estado homogéneas con el calor, *energía interna*, *entalpía*, *potencial termodinámico*, que permiten calcular sin más que conocer los estados inicial y fi-

nal, mediante tabulación. La *entalpía* del sistema representa el trabajo que cede o recibe más el calor que transmite; se mide en unidades de energía por unidad de masa; en todo proceso isobárico, en que la presión permanece constante, el calor total intercambiado es igual a la diferencia de entalpías en los estados extremos.

Otra función de estado, importante, aunque no homogénea con las anteriores es la *entropía*, suma de los cocientes de las cantidades de calor entre la temperatura absoluta que entra o sale del sistema de manera reversible; en toda transformación reversible sin intercambio de calor de un sistema, adiabática, la entropía permanece constante.

2.2.3. Humedades.—Pueden definirse las *humedades absoluta, específica y relativa*. La *humedad absoluta* es la masa de vapor de agua que contiene una unidad de volumen de aire en las condiciones actuales. En el sistema SI se medirá en kilogramos de agua por metro cúbico de aire.

En nuestro sector se emplea la *humedad específica* (H_e), relación entre la masa de vapor de agua contenida en cierto volumen de aire y la masa de aire seco que contiene ese volumen. Se expresa en gramos de vapor por kilogramos de aire seco (g/kg). También se emplea, aunque en la actualidad mucho menos, la *humedad relativa* (H_r), relación entre la humedad absoluta actual del aire y la máxima que podría tener saturación en las mismas condiciones de presión y temperatura, es decir muy aproximadamente el grado de saturación. Se suele medir con un sicrómetro, constituido por un termómetro seco y otro húmedo, de cuyas indicaciones se deduce mediante un cálculo laborioso el valor de la humedad relativa. (El aumento de la humedad del aire incrementa ligeramente su velocidad al disminuir su viscosidad).

2.3. Empleo de magnitudes mecánicas

Las más empleadas son la presión y la velocidad relativa del aire respecto al cuerpo humano.

2.3.1. Presión (p).—La magnitud mecánica que más incide en las condiciones de «comfort» es la *presión del aire* del recinto en que están las personas. Esta presión del aire puede también representarse por las presiones parciales de los gases que lo constituyen: oxígeno, nitrógeno, vapor de agua, anhídrido carbónico, etcétera.

2.3.2. Velocidad del aire (v_a).—La *velocidad relativa del aire* respecto del cuerpo humano influye en la transmisión del calor por convección, luego es una magnitud que importa en el «comfort». Su medida debe hacerse con anemómetros cuyas pequeñas dimensiones

permitan conocer con detalle suficiente su distribución en una región, señalando dirección, sentido y cuantía. Se mide en metros por segundo. Los mejores anemómetros, muy delicados, son los de hilo caliente. También se ha introducido para una medida más específica de la calidad de una distribución de aire el *índice IPDA*.

3. Evaluación termodinámica de los procesos de «comfort» climático

Se trata de aplicar las leyes físicas, especialmente las de tipo termodinámico, al organismo humano, con vistas al logro de su «comfort» en el ambiente climático. Para ello se aplicarán los conceptos físicos que acaban de exponerse (→ 2) a las características fisiológicas del metabolismo del cuerpo humano incluidas más arriba de aquéllos (→ 1).

Entre las cantidades del balance térmico se excluyen algunas (expectoraciones, evacuaciones) de baja consideración y sólo evaluables de manera global (por ejemplo la evacuación de las heces que puede representar el 3% de las pérdidas de calor).

3.1. Formas de intercambio de calor en períodos tibios

Se consideran en primer lugar los mecanismos de intercambio de energía térmica entre el cuerpo humano y el ambiente interior en el tiempo climático más favorable, otoño-primavera, y que no exigen por tanto una adaptación climática especial por parte del organismo humano. La importancia de los procesos que se pasa a describir radica en que tienen asimismo lugar, aunque en distinto grado, en los tiempos de clima frío o cálido.

3.1.1. Pérdidas por convección-conducción.—El intercambio por convección y por conducción entre el cuerpo y un ambiente agradable supone una cesión de calor por convección, si se desprecia la pequeña cesión por conducción.

El intercambio por convección del cuerpo con su indumento depende, además de la posición de aquél (de pie, sentado, acostado), de la diferencia de temperaturas entre las superficies desnudas del cuerpo y del indumento y la seca del aire, así como de un coeficiente de convección; este coeficiente depende a su vez fundamentalmente de la velocidad relativa aire-cuerpo y algo de otros factores: rugosidad del indumento, humedad del aire, que disminuye su viscosidad al incrementarse, etcétera. Una expresión que permite traducir aproximadamente el fenómeno físico es:

$$P_{cv} = h_{cv} \cdot S_{p/i} (T_{p/i} - T_s), \text{ en la que:}$$

— P_{cv} potencia de calor cedida por el cuerpo/indumento por convección al recinto (kcal/h ó W)

— h_{cv} coeficiente de convección que puede evaluarse por

$$\frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{0,63 (G_r \cdot P_r) \cdot \lambda}{l} \left(\frac{\text{kcal} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}}{h} \right)$$

ó $W \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

— $S_{p/i}$ superficie de la piel/indumento expuesta al aire (m^2).

— $T_{p/i}$ temperatura media de las superficies desnudas de la piel e indumento (dentro del «comfort», de $30 \dots 36 \text{ } ^\circ\text{C}$).

— T_s temperatura media seca (de bulbo) del aire que rodea al cuerpo ($^\circ\text{C}$).

3.1.2. Pérdidas por radiación.—En el caso de ambientes agradables el intercambio por radiación electromagnética entre el cuerpo y las superficies del recinto se traduce en unas pérdidas de aquél hacia éstas.

El calor radiado por el cuerpo/indumento es función de la superficie y emisividad de la piel desnuda/indumento, del coeficiente de Stefan-Boltzman y de las cuartas potencias de las temperaturas absolutas medias de la piel/indumento y de las superficies del recinto. Puede emplearse la siguiente expresión:

$$P_{rd} = 0,7 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 1,8 \times 0,71 \times 0,861 \times [(T_{p/i} + 273,15)^4 - (T_r + 273,15)^4]$$

— P_{rd} potencia calorífica intercambiada entre el cuerpo/indumento y las superficies del recinto (kcal/h ó W).

— $T_{p/i}$ temperatura media partes desnudas del cuerpo/indumento ($^\circ\text{C}$).

— T_r temperatura radiante media de las diferentes superficies presentes en el recinto ($^\circ\text{C}$).

3.1.3. Pérdidas por transpiración y respiración.

— Aunque el cuerpo humano esté en un ambiente agradable existen pérdidas, relacionadas pero diferentes de la evapotranspiración, por difusión y debidas a la respiración. La transpiración, difusión continua del vapor de agua a través de la piel, llamada también por difusión o *perspiratio insensibilis*, no está controlada por las glándulas sudoríparas, por lo que no forma parte del proceso termorregulador; el grado de difusión depende de la diferencia entre la presión de valor saturado en la piel, deducible de la temperatura de la piel, y la presión parcial del vapor en el aire.

Las pérdidas en la respiración son por un lado en forma de calor latente al evaporarse agua de la humedad que impregna el interior del sistema respiratorio (saliva, etcétera); por otro el calor sensible cedido al calentar el aire respirado.

Las pérdidas de calor por difusión y latente de la respiración se han estimado en unas 20 kcal/h.

3.2. Evaluación de procesos en período frío

Se trata de cuantificar los ya analizados (→ 1.4) procesos termodinámicos que aparecen con carácter permanente tras la adaptación de varios días, a la estación invernal. Se excluyen aquellos que, como la inhibición de la sudación, no representan una diferencia considerable respecto a los de los períodos de clima agradable (→ 3.1).

3.2.1. Incremento en la producción de calor por el organismo.—El aumento en la producción de calor con carácter permanente en el período frío puede evaluarse como sigue:

- Por termogénesis química, puede aumentarse la producción de calor entre un 15% y un 20%.
- Por contracorriente, en que parte de la sangre arterial calienta a la sangre venosa fría que retorna de la piel al centro, estimable en un 10% a un 15%.
- Por aumento de la tiroxina liberada por la glándula tiroideas, de menor incidencia del orden del 10 al 15 por ciento.

En resumen, si se combinan los efectos de estos mecanismos dentro de un funcionamiento no excesivamente forzado, el aumento del metabolismo en invierno puede alcanzar del 20% al 30%, respecto al metabolismo en las estaciones tibias.

3.2.2. Reducción de pérdidas de calor por aumento de resistencia térmica de la piel.—El mecanismo de la vasoconstricción de la piel, respuesta del sistema termostático del hipotálamo al descenso de la temperatura corporal, con la consiguiente contracción de los vasos sanguíneos y cierre de los poros, aumenta la resistencia media de la piel a valores importantes (del orden de los $0,125 \text{ m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$). De esta manera se reduce la temperatura cutánea y, consiguientemente, la temperatura de las superficies exteriores del indumento, o sea la temperatura cutánea/indumento (T_{pi}), lo que lleva a una drástica disminución de las pérdidas por radiación (→ 3.1.2), y a una ligera reducción en las pérdidas por convección (→ 3.1.1).

3.3. Evaluación de procesos en período cálido

Se describen y cuantifican aquellos procesos que aparecen con carácter específico en la adaptación consolidada que las personas adquieren para la estación estival. A medida que la temperatura de la piel/indumento se acerca a la seca del aire o a la radiante media resultan menores las posibilidades del organismo humano para ceder calor por los procesos de convección o radiación. Tampoco ayuda por su escasa incidencia, hacia el 5 %, la disminución que se consigue en esta época en la dispersión metabólica. Dejando aparte otras pérdidas menores (respiración, transpiración), no existe otro recurso de seguridad que una regulación del sudor mediante el sistema termostático hipotalámico.

3.3.1. Pérdidas por evaporación del sudor.—En ambientes calurosos es fundamental estimar, por lo antes dicho, las posibles pérdidas al evaporarse el sudor. El índice de sudación depende de la humedad, temperatura y velocidad del aire que envuelve al cuerpo, así como de la temperatura cutánea/indumento. Una expresión de las pérdidas por evaposudación es la siguiente:

$$P_{se} = h_{se} (p_{vp} - p_{va}), \text{ en la que:}$$

- P_{se} potencia de calor cedida por el cuerpo por evaporación del sudor (kcal/h).
- h_{se} coeficiente de sudoevaporación de valor en nuestros casos prácticos sobre $3,75 \text{ kcal/h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$.
- p_{vp} , p_{va} presiones de vapor de la superficie de la piel y del aire (mm Hg).

4. Empleo de los índices de «comfort» climático

Como acaba de observarse (→ 3) el «comfort» climático depende de muchos y muy variados factores: de la naturaleza de las personas y su indumento, de su adaptación-aclimatación, de la actividad que desarrollan; del recinto, incluyendo la latitud (y altitud) y de la permanencia de los usuarios; etcétera. Por otro lado ya se describieron más arriba (→ 2) los parámetros físicos que pueden incidir en el «comfort» climático.

En el método seguido para introducir los índices de «comfort» se parte de un grupo humano homogéneo y locales de características uniformes. Para estas condiciones homogéneas del recinto y de los ocupantes, el «comfort» climático puede hacerse depender únicamente de variables físicas, por ejemplo: temperatura seca del aire (T_a), humedad específica (H_a) o humedad relativa (H_r), temperatura radiante media (T_r) y velocidad del aire (v_a).

4.1. Ecuación del equilibrio térmico del cuerpo en un ambiente

Una vez establecidas (\rightarrow 3) las ecuaciones que traducen tanto la generación de calor por el cuerpo humano como las formas en que éste intercambia calor con el ambiente, en las que radican sus posibilidades de «comfort» climático, puede establecerse la siguiente expresión del equilibrio del balance:

$P_{mt} = P_{cv} + P_{cd} \pm P_{rd} + P_{se} + P_{tr}$ en la que:

- P_{mt} potencia de calor generada por el organismo humano en su metabolismo, regulado por su sistema de control de temperatura (kcal/h).
- P_{cv} potencia de calor cedida por el cuerpo/indumento al recinto por el mecanismo de convección (kcal/h).
- P_{cd} potencia de calor, generalmente despreciable, cedida mediante conducción por aquellas partes (calzado, etc.), en contacto directo con alguna superficie del recinto (kcal/h).
- P_{rd} potencia radiante que el cuerpo/indumento cede o absorbe según los casos al recinto (kcal/h).
- P_{se} potencia que el cuerpo humano cede al recinto al evaporar sudor (kcal/h).
- P_{tr} potencia, generalmente de valor estable, que el cuerpo cede por transpiración del vapor de agua a través de la piel y en los procesos de la respiración (kcal/h).

Es de notar que a efectos del «comfort» climático los procesos de intercambio de calor sólo pueden tener lugar sin forzar la actuación del organismo.

A continuación se dan unos tanteos analíticos de equilibrio térmico para condiciones muy normales que sirvan como comprobación entre los estudios teóricos y empíricos. Se observa una aceptable concordancia en temporada fría y no en la calurosa o tibia.

4.1.1. Ejemplo típico de equilibrio en período tibio.—

Se trata de aplicar la anterior ecuación de equilibrio térmico al caso de personas con adaptación normal, es decir al clima favorable del otoño-primavera, Tabla 3. He aquí el valor propuesto para los diferentes parámetros:

- Condiciones de las personas: varones adultos de tipo mediterráneo y complexión normal, con actividad sedentaria ligera e indumento de entretiempo (0,75 clo).

- Condiciones del recinto: velocidad media relativa ocupantes-aire de 0,16 m/s, situado a 40 °LN y ocupado más de 3 horas.

Unos criterios admisibles de las variaciones transitorias cíclicas sobre el anterior equilibrio serán (*):

- T_s y T_r : ≤ 2 °C/h, con amplitud ≤ 1 °C;
- T_{eq} : ≤ 2 °C/h, con amplitud $\leq 0,5$ °C;
- H_e : ≤ 4 g/Hg · h, con amplitud ≥ 2 g/kg.

4.1.2. Ejemplo de equilibrio en período frío.— La ecuación de equilibrio, Tabla 4, se aplica al caso de la estación invernal y con restantes parámetros:

- Condiciones de las personas: varones adultos de tipo mediterráneo y complexión normal, adaptados al frío invernal, con actividad ligera sedentaria (1 met) e indumento de suficiente abrigo (1,05 clo).
- Condiciones del recinto: velocidad relativa media ocupantes-aire de 0,125 m/s, situado a los 40 °LN y ocupado más de 3 horas.

4.1.3. Ejemplo de equilibrio en período caluroso.— Se trata de utilizar la ecuación de equilibrio, Tabla 5, en el caso de la estación estival y con los siguientes parámetros:

- Condiciones de las personas: varones adultos de tipo mediterráneo y complexión normal adaptados a un clima caluroso, con actividad ligera sedentaria (1,0 met) e indumento fresco (0,6 clo).
- Condiciones del recinto: velocidad relativa media ocupantes-aire de 0,20 m/s, situado a los 40 °LN y ocupación de más de 3 horas.

4.2. Índices de «comfort» más adecuados

No es ésta la ocasión para discutir la larga historia de la introducción de los numerosos índices de «comfort», en cada uno de los cuales se ha venido tratando de incorporar el mayor número posible de parámetros térmicos. Sólo se incluirá el número mínimo de índices (**), imprescindible para establecer las condiciones de «comfort» en el otoño-primavera, el invierno y el verano en un clima templado como el nuestro.

(*) De acuerdo con las normas UNE 100-012 y ASHRAE 55-81.

(**) Se han tenido en cuenta las normas ASHRAE 55-1981, ISO 7730-1984 (E) y UNE 100-000-88, 100-001, 100-012-84 y 100-013-85. También la NBE-CT-79 y las IT. IC. del Reglamento de Instalaciones.

Tabla 3. Extracto de listado de cálculo de condiciones higrotérmicas en tiempo tibio

P_{mt}	T_{eq}	$T_{p/i}$	H_r	I_{nd}	v_a	P_{cv}	P_{rd}	P_{se}
106.61	24.00	33.20	40.00	0.75	0.16	34.30	41.08	30.40
100.20	25.00	33.20	40.00	0.75	0.16	30.57	36.89	32.00
95.33	26.00	33.20	40.00	0.75	0.16	26.84	32.54	35.20

Tabla 4. Extracto de listado de cálculo de condiciones higrotérmicas en tiempo frío

P_{mt}	T_{eq}	$T_{p/i}$	H_r	I_{nd}	v_a	P_{cv}	P_{rd}	P_{se}
111.53	18.00	32.00	40.00	1.05	0.13	39.02	49.17	22.08
106.47	19.00	32.00	40.00	1.05	0.13	36.24	46.03	23.04
101.36	20.00	32.00	40.00	1.05	0.13	33.45	42.83	24.00

Tabla 5. Extracto de listado de cálculo de condiciones higrotérmicas en tiempo caluroso

P_{mt}	T_{eq}	$T_{p/i}$	H_r	I_{nd}	v_a	P_{cv}	P_{rd}	P_{se}
100.08	27.00	33.50	50.00	0.60	0.20	30.36	33.14	36.00
94.21	28.00	33.50	50.00	0.60	0.20	25.69	28.24	39.79
90.35	29.00	33.50	50.00	0.60	0.20	21.02	23.27	45.65

No deberá perderse de vista que aunque los índices que se van a proponer se denominan *temperaturas* y se miden en °C, no se trata en realidad de temperaturas físicas sino de magnitudes complejas que engloban otros parámetros, además de la temperatura.

4.2.1. Temperatura equivalente (T_{eq}).—Se define como la temperatura seca del aire de un recinto similar al problema, pero con aire en reposo y elementos presentes a la misma temperatura del aire, que produjera la misma sensación térmica que el recinto problema a iguales velocidad del aire, presión de vapor, actividad metabólica e indumento. Engloba a T_s y T_r y puede expresarse por $T_{eq} = (T_s + T_r)/2$. Aplicable a ambientes en invierno cuando quedan dentro de valores aceptables la humedad y la velocidad del aire.

4.2.2. Temperatura resultante (T_{re}).—Se define como la temperatura seca del aire de un recinto similar al problema, pero con aire en reposo y elementos presentes a la misma temperatura del aire, que produjera la misma sensación térmica que el recinto problema a iguales presión de vapor, actividad metabólica e indumento. Engloba a T_s , T_r y v_a , pudiendo expresarse por $T_{re} = (h_{cv} \cdot T_s + h_{rd} \cdot T_r)/(h_{cv} + h_{rd})$. Se puede aplicar a ambientes en invierno cuando la humedad queda dentro de valores aceptables.

4.2.3. Temperatura efectiva (T_{ef}).—Se adopta aquí concretamente la *temperatura efectiva nueva (KSU-ASHRAE)*, definida como la temperatura seca del aire de un recinto similar al problema que con un 50 por ciento de humedad relativa, velocidad del aire de unos

0,20 m/s y elementos presentes a la misma temperatura del aire produjera la misma sensación térmica que el recinto problema a iguales actividad e indumento. Engloba todos los parámetros térmicos: T_s , H_e ó H_r , T_r y v_a . Se ha obtenido empíricamente sobre el diagrama sicrométrico, con el inconveniente de no poder incorporar T_{ri} , lo que exige emplear la temperatura equivalente o la resultante como complemento. La temperatura efectiva resulta muy apropiada para imponer a los ambientes las condiciones de verano.

5. Nomogramas con zonas de «comfort» para situaciones variadas

El intento principal del presente trabajo es incluir una pequeña muestra de un repertorio más amplio y completo de nomogramas que permita obtener las condiciones de «comfort» para los casos más usuales en los proyectos edificatorios. En realidad para lograrlo sería necesaria una colección suficientemente amplia.

Dado que para representar la temperatura efectiva nueva se viene empleando el diagrama sicrométrico no puede incluirse el efecto de la temperatura radiante, que no interviene en las condiciones termodinámicas del aire húmedo, por lo que se hace necesario considerar paralelamente la temperatura equivalente o la resultante. La elaboración de nomogramas que engloben los cuatro parámetros termohigrométricos básicos constituye uno de los principales objetivos de nuestra investigación.

5.1. Nomogramas normales con zonas de «comfort»

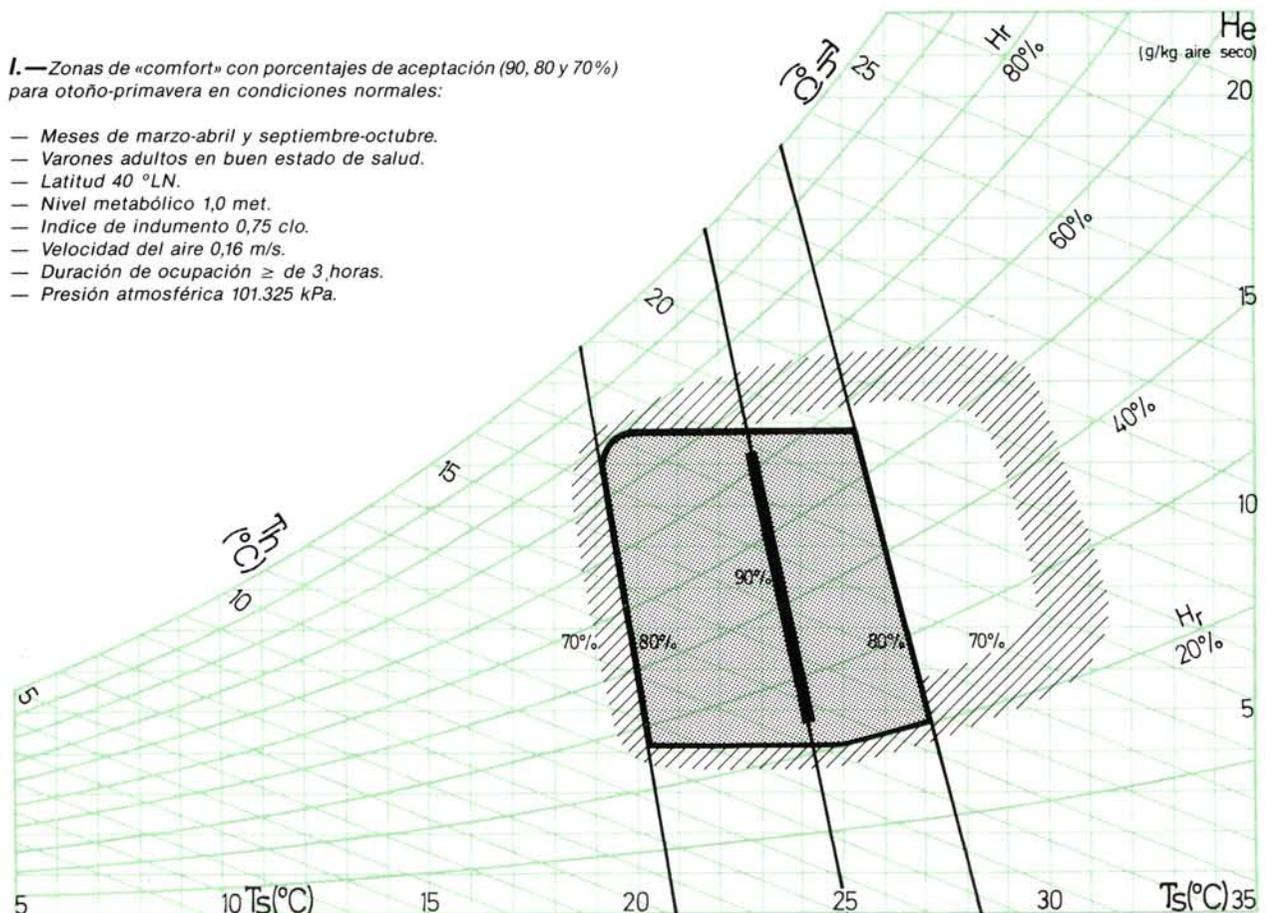
En los nomogramas que se van a incluir, correspondientes a tres casos representativos de climas estacionales, se establecen unas condiciones típicas que permiten comparar las diferencias que se produzcan sobre aquéllas. Como datos generales que se mantienen en todos ellos enumeraremos:

- Las zonas de «comfort» corresponden al 90, 80 y 70% de aceptación por parte de los observadores.
- Los encuestados son varones adultos en buen estado de salud, con actividad metabólica de 1 met.
- Locales situados a 40 °LN.
- Ocupación que dura más de 3 horas.

5.1.1. Nomograma básico para las estaciones templadas.—Se incluye (I) un gráfico básico de partida con zonas de «comfort» para las estaciones con mejor tiempo, otoño-primavera, en las que se dan como condiciones peculiares representativas: un índice de indumento de 0,75 clo y una velocidad media del aire de 0,16 m/s.

I.—Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para otoño-primavera en condiciones normales:

- Meses de marzo-abril y septiembre-octubre.
- Varones adultos en buen estado de salud.
- Latitud 40 °LN.
- Nivel metabólico 1,0 met.
- Índice de indumento 0,75 clo.
- Velocidad del aire 0,16 m/s.
- Duración de ocupación \geq de 3 horas.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



5.1.2. Nomograma de base para la estación fría.—Se consideran unas condiciones muy representativas en tiempo invernal y se dibuja un gráfico básico de partida con las zonas de «comfort» (II). Como datos específicos para ambientes fríos señalaremos un índice de indumento de 1,05 clo y una velocidad media del aire de 0,125 m/s.

5.1.3. Nomograma de base para la estación cálida.—Se consideran unas condiciones muy indicativas del tiempo estival con las que se construye un gráfico básico de partida con las correspondientes zonas de «comfort» (III), con las peculiaridades de un índice de indumento de 0,6 clo y una velocidad media del aire de 0,20 m/s.

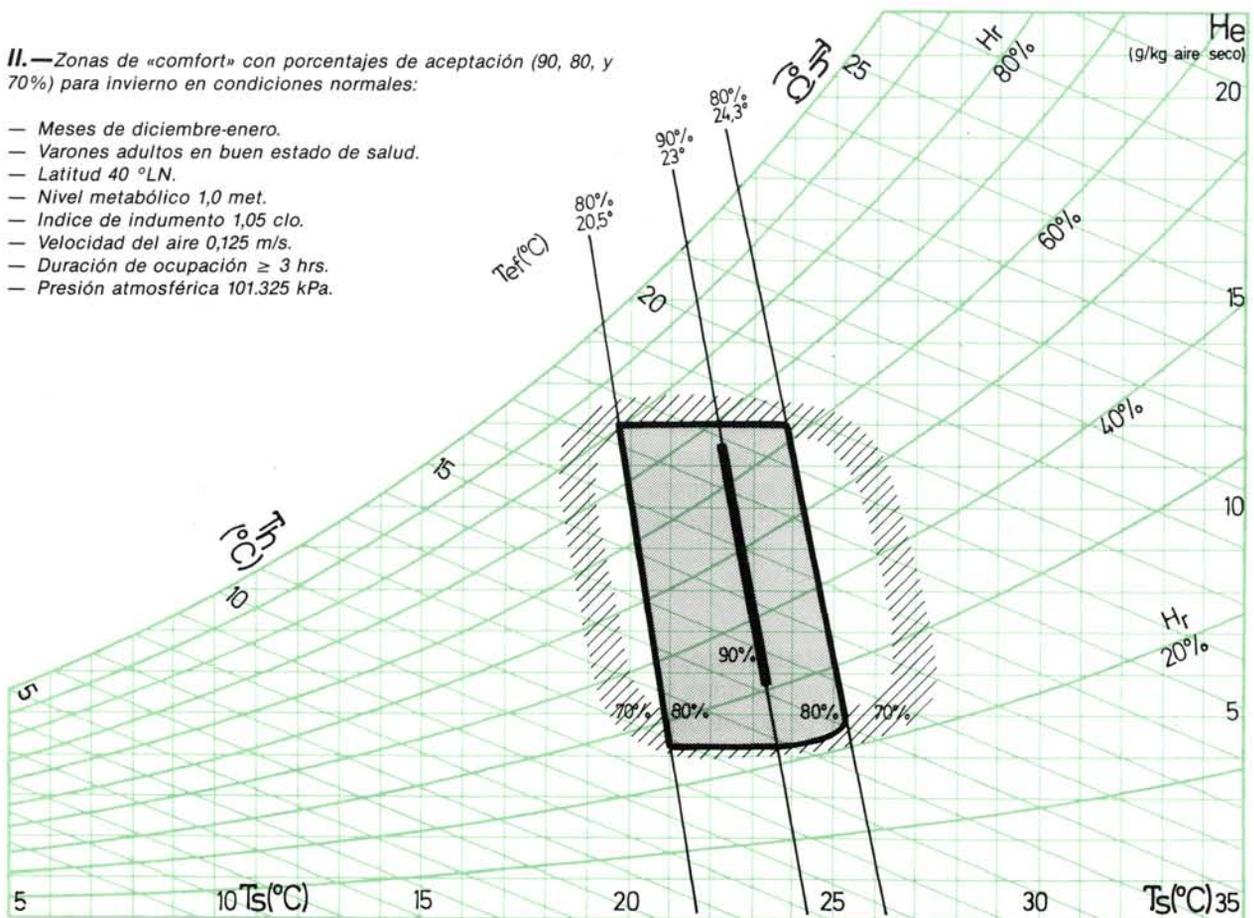
5.2. Correcciones de los nomogramas de base

En el método propuesto se parte de los nomogramas básicos para los períodos críticos de clima, que se modifican de acuerdo con las variaciones prácticas que suelen tener los parámetros, fijados en aquéllos con un valor normal convencional.

En lo que sigue se dan en forma analítica o gráfica las correcciones a introducir en los nomogramas básicos (I, II y III) según el parámetro que se varíe.

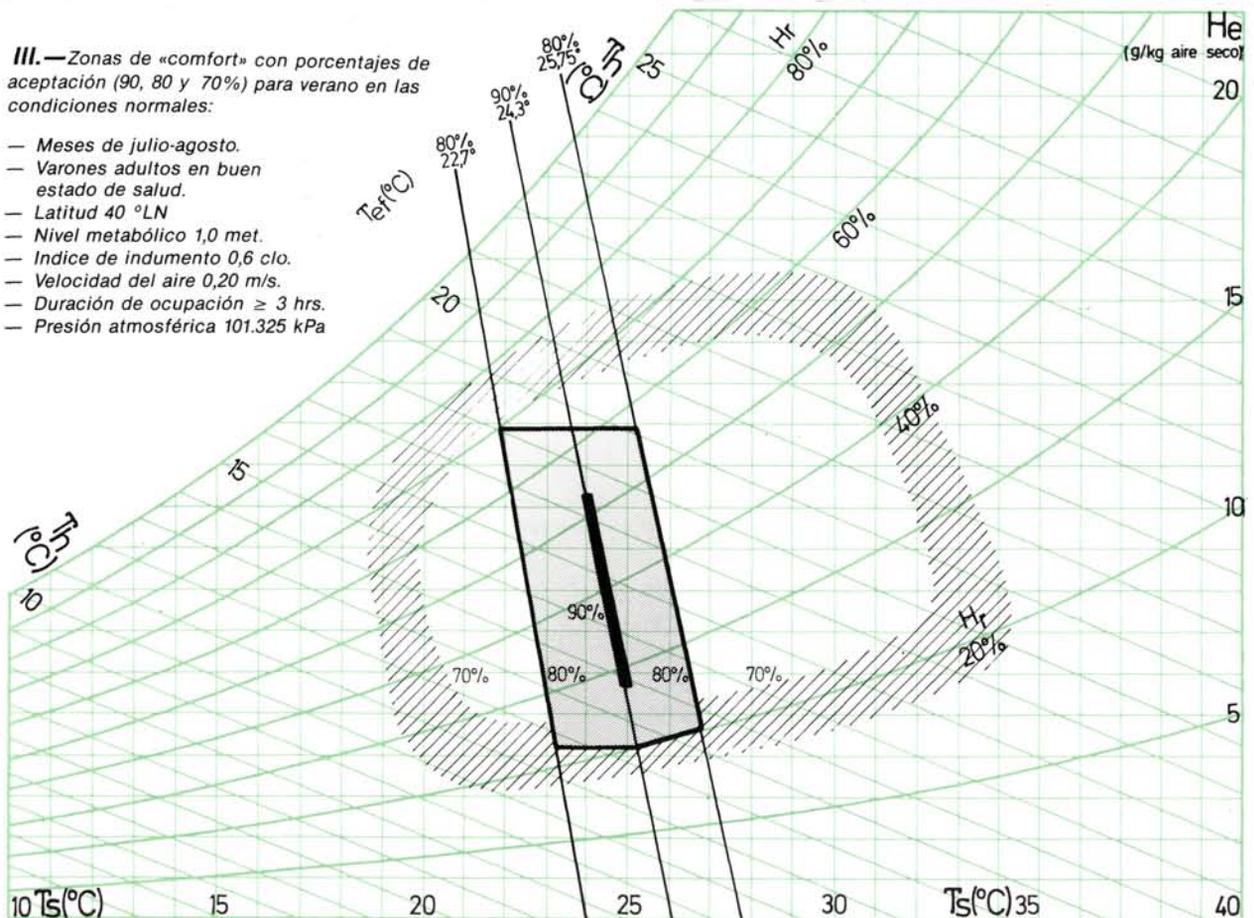
II.—Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80, y 70%) para invierno en condiciones normales:

- Meses de diciembre-enero.
- Varones adultos en buen estado de salud.
- Latitud 40 °LN.
- Nivel metabólico 1,0 met.
- Índice de indumento 1,05 clo.
- Velocidad del aire 0,125 m/s.
- Duración de ocupación ≥ 3 hrs.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



III.—Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para verano en las condiciones normales:

- Meses de julio-agosto.
- Varones adultos en buen estado de salud.
- Latitud 40 °LN
- Nivel metabólico 1,0 met.
- Índice de indumento 0,6 clo.
- Velocidad del aire 0,20 m/s.
- Duración de ocupación ≥ 3 hrs.
- Presión atmosférica 101.325 kPa



5.2.1. Correcciones por el indumento de las personas.—En ocasiones los ocupantes de los locales deben emplear un indumento inadecuado para la estación del año; así un pijama para el tratamiento hospitalario en invierno, o un traje formal en un acto ceremonial en verano. Otras veces se pueden conseguir unas mejores condiciones con una climatización menos fuerte, empleando indumentos de mucho abrigo en invierno o muy ligeros en verano. En todo caso resulta necesario recurrir a correcciones (IV).

5.2.2. Correcciones por edad, sexo, estado físico, etcétera, de las personas.—En el caso de usuarios femeninos e infantiles, o para grupos de personas débiles, por ejemplo enfermos, se recomienda elevar las temperaturas resultantes unos 0,5 °C.

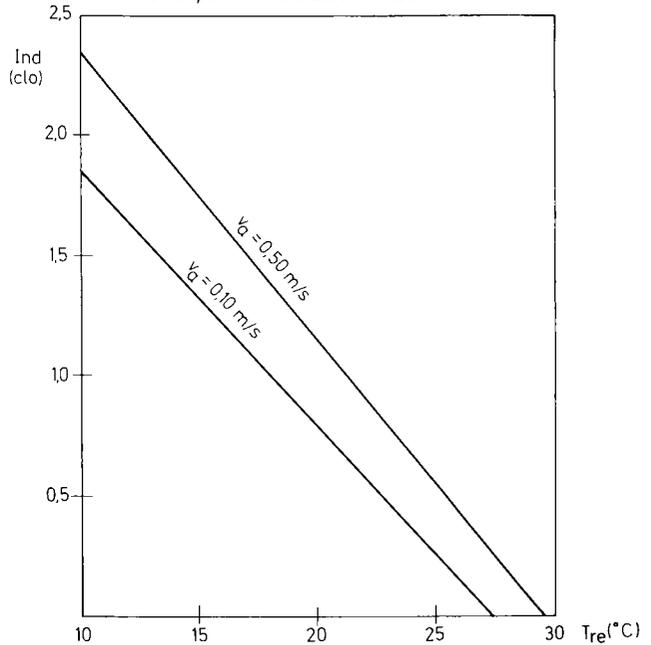
5.2.3. Correcciones por latitud y altitud.—Las diferencias de latitud respecto a la básica adoptada, 40 °LN, se harán sumando o restando 0,1 °C por cada grado de menos o de más respecto de aquél. Con relación a la altitud, su incidencia puede despreciarse: así si consideramos cotas de unos 2.000 metros, el error en el valor de la humedad relativa para el nivel del mar y 4.000 metros es inferior a un 2 por ciento.

5.2.4. Corrección por permanencias en el recinto inferiores a 3 horas.—Las permanencias cortas de las personas en los locales exigen, siempre que no intervengan fenómenos de inercia, al ser menores las posibilidades de adaptación, un aumento de las exigencias de «comfort». Para ello puede elevarse la temperatura resultante unos 0,6 °C y 1,8 °C para ocupaciones de unas 2 horas o inferiores a 1 hora.

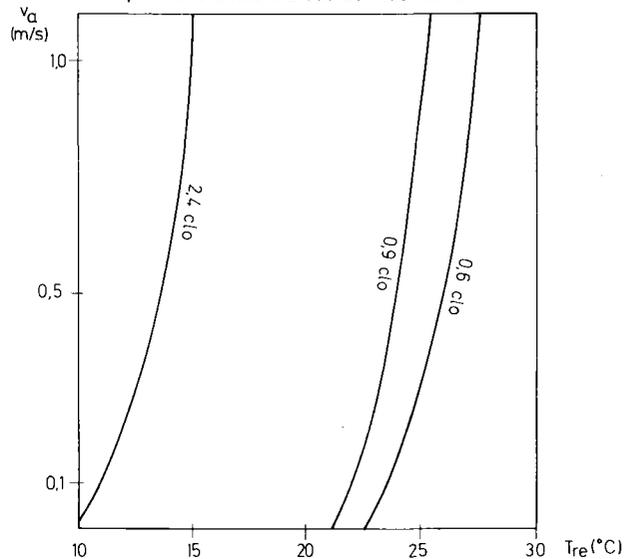
5.2.5. Correcciones por velocidad del aire.—En ciertos casos no se puede o no resulta económico garantizar velocidades del mismo orden que las adoptadas en los nomogramas de partida. Para ello resulta necesario corregirlos con ayuda de información como la incluida (V).

5.2.6. Correcciones por nivel metabólico.—La necesidad de realizar actividades fuertes en épocas cálidas conlleva la necesidad de corregir las condiciones de «comfort» con ayuda de datos pertinentes (VI).

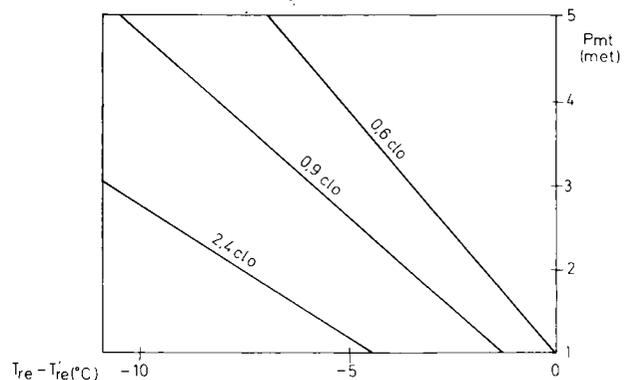
IV.—Valores de la temperatura resultante al variar el índice de indumento para velocidades límites del aire.



V.—Valores de la temperatura resultante al variar la velocidad del aire para diferentes índices de indumento.



VI.—Temperatura a restar a la temperatura resultante para incrementos del metabolismo basal y diferentes índices de indumento.



5.3. Colección de nomogramas de empleo inmediato

Si aplicamos las correcciones arriba vistas (5.2) a los nomogramas básicos también incluidos (5.1) se obtendría por combinatoria un número muy elevado de nomogramas aplicables en las condiciones más variadas. En realidad muchas de las posibles combinaciones no son de aplicación práctica o no tienen sentido interno.

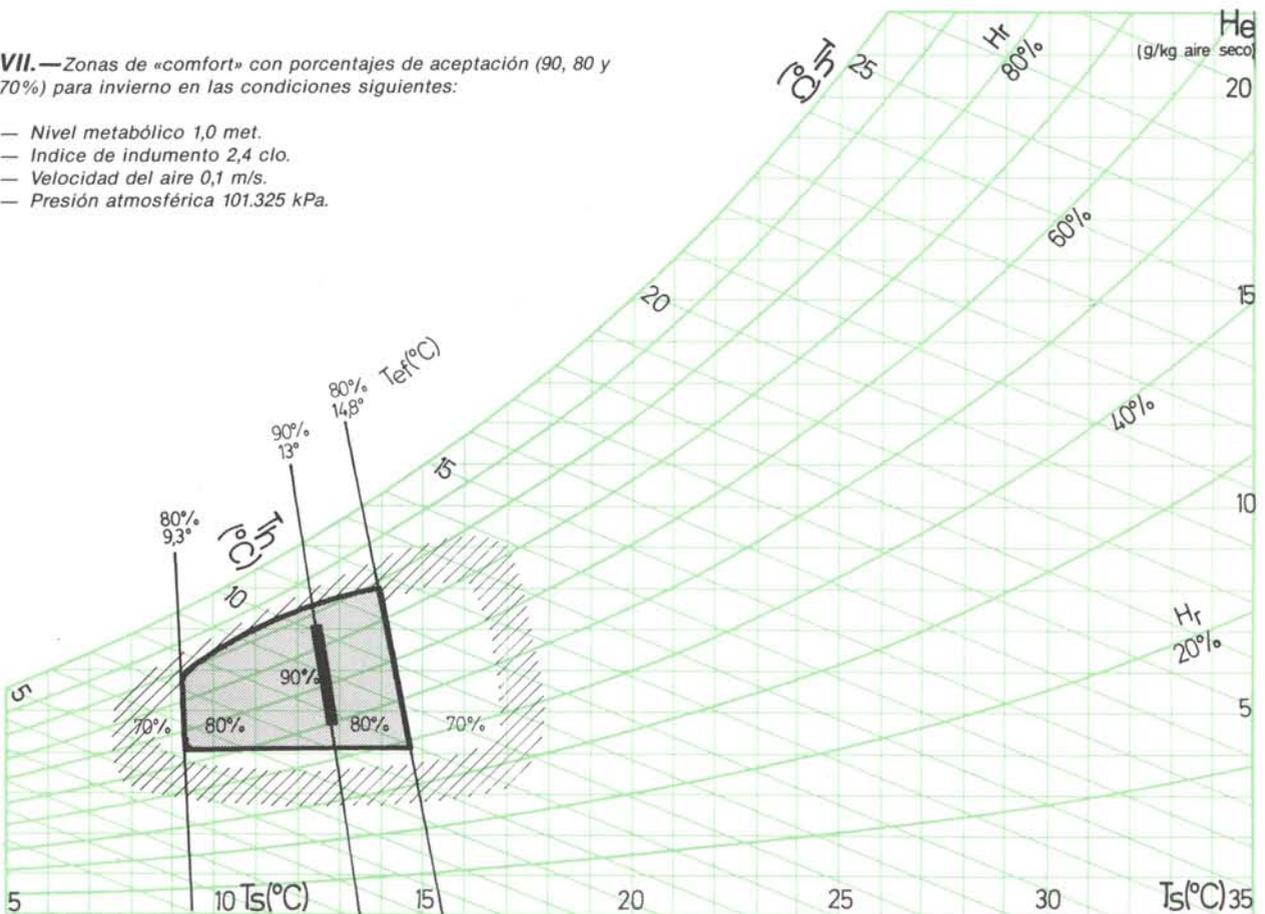
Para una selección de las más adecuadas habrá que comprobar que sus condiciones coinciden con situa-

ciones usuales que se presentan en los ambientes o locales de edificios de programa más frecuente.

5.3.1. Selección de nomogramas de la temperatura efectiva nueva.—Una muestra de las posibilidades del método gráfico propuesto va aquí tanto para condiciones de invierno como de verano (VII hasta XIII). Los nomogramas se han obtenido variando el grado de indumento y el nivel de actividad metabólica. Hay que señalar que por la dispersión de resultados los límites de la zona correspondiente a una aceptación del 70% son imprecisos.

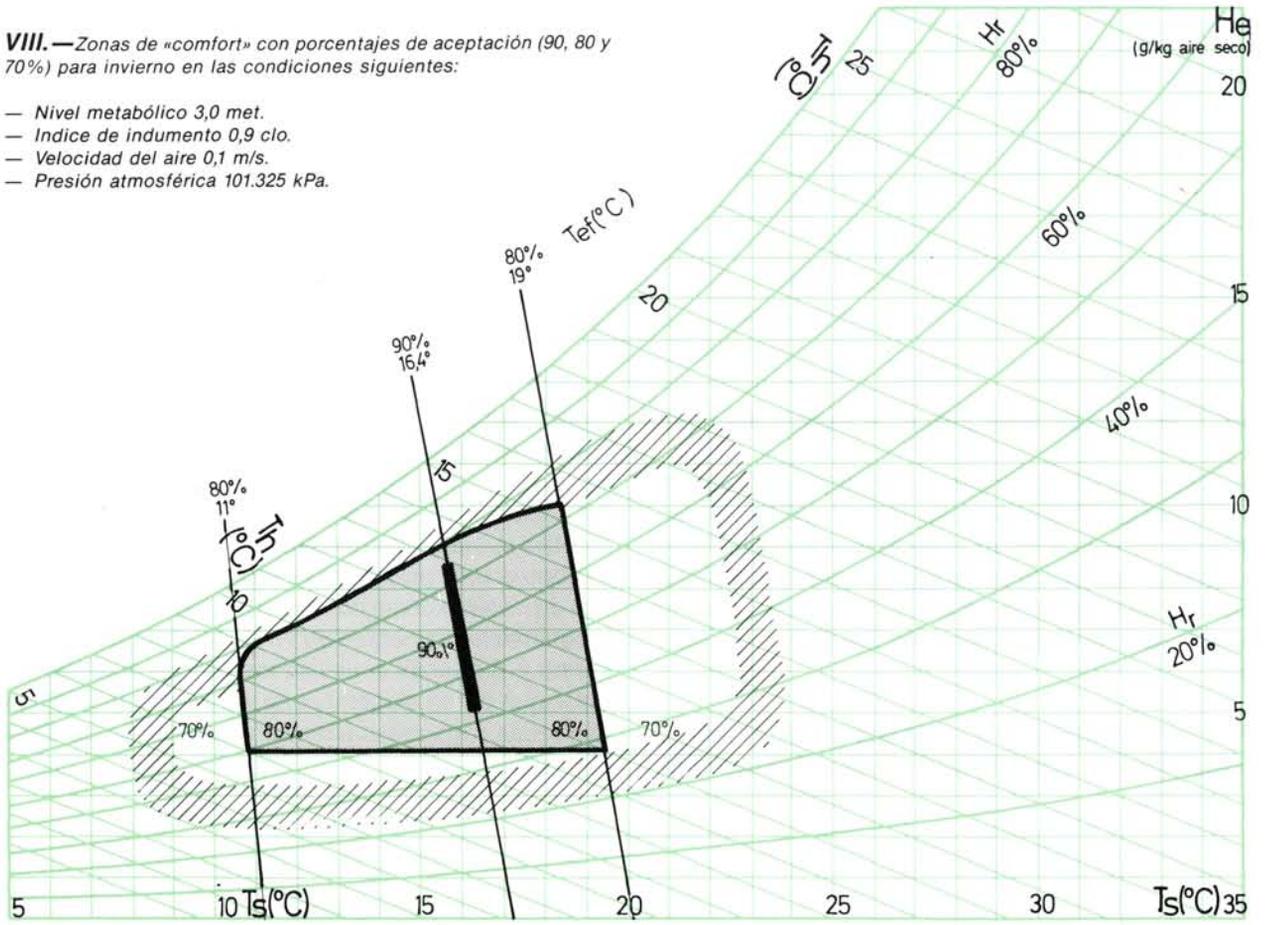
VII.—Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para invierno en las condiciones siguientes:

- Nivel metabólico 1,0 met.
- Índice de indumento 2,4 clo.
- Velocidad del aire 0,1 m/s.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



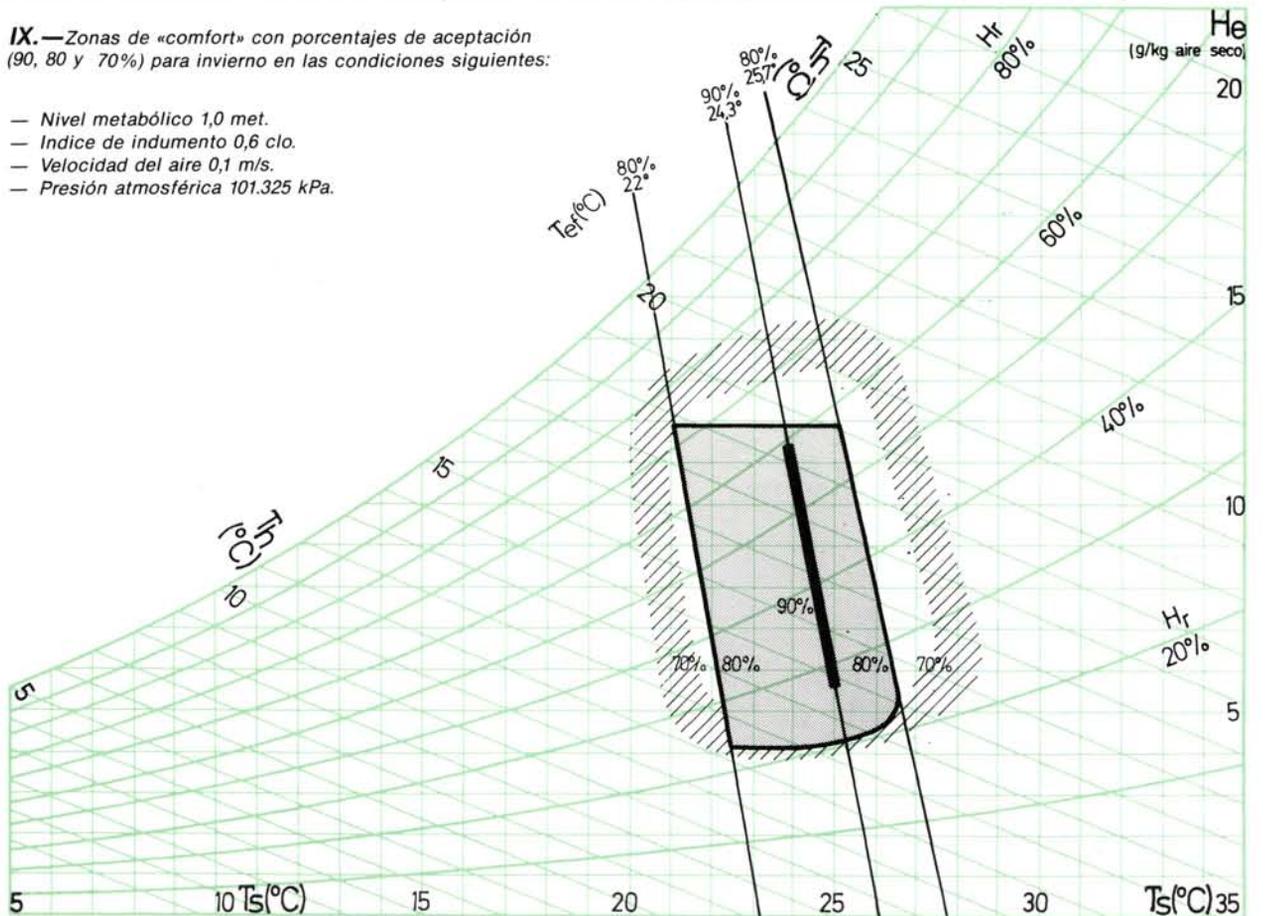
VIII. — Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para invierno en las condiciones siguientes:

- Nivel metabólico 3,0 met.
- Índice de indumento 0,9 clo.
- Velocidad del aire 0,1 m/s.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



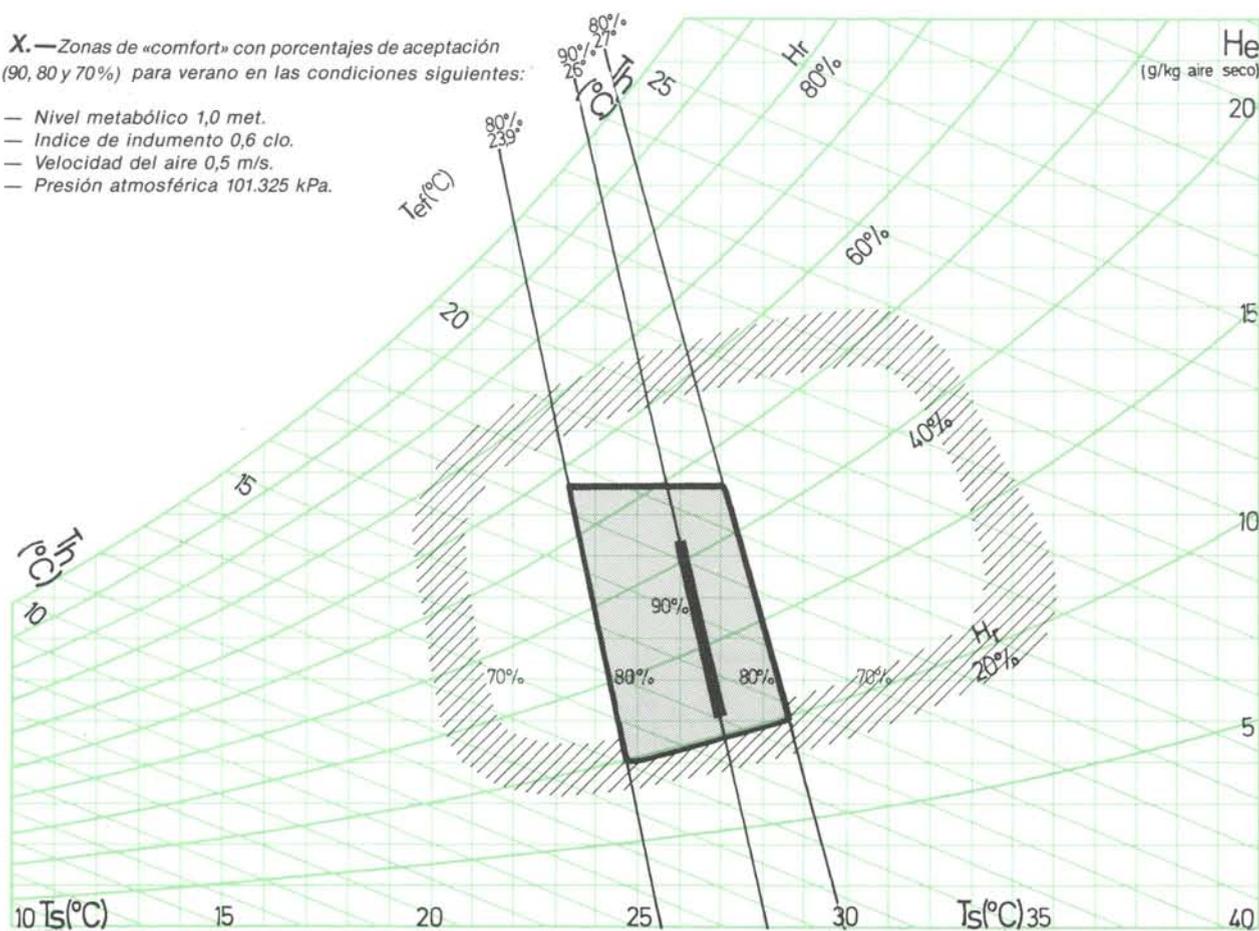
IX. — Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para invierno en las condiciones siguientes:

- Nivel metabólico 1,0 met.
- Índice de indumento 0,6 clo.
- Velocidad del aire 0,1 m/s.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



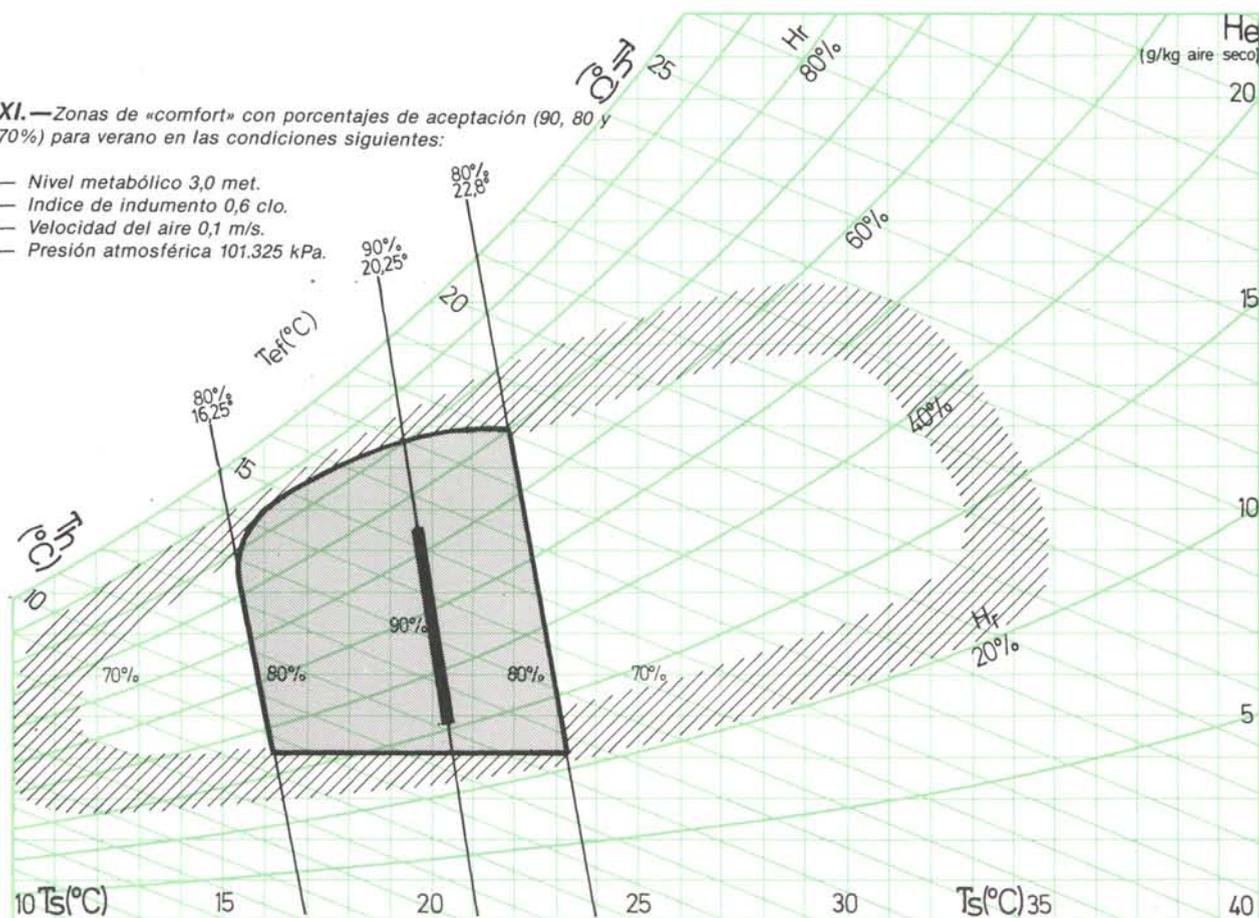
X.—Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para verano en las condiciones siguientes:

- Nivel metabólico 1,0 met.
- Índice de indumento 0,6 clo.
- Velocidad del aire 0,5 m/s.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



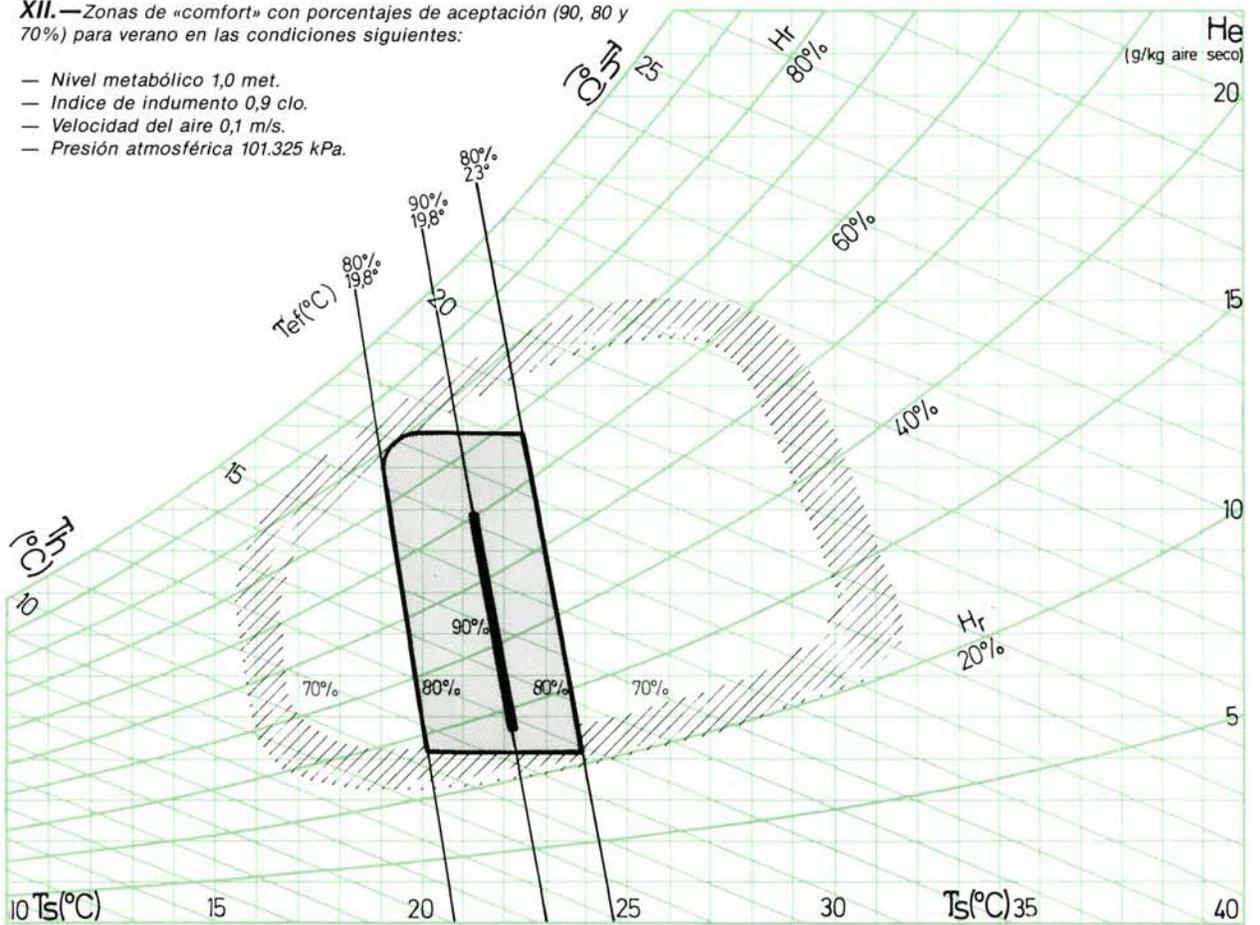
XI.—Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para verano en las condiciones siguientes:

- Nivel metabólico 3,0 met.
- Índice de indumento 0,6 clo.
- Velocidad del aire 0,1 m/s.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



XII.—Zonas de «comfort» con porcentajes de aceptación (90, 80 y 70%) para verano en las condiciones siguientes:

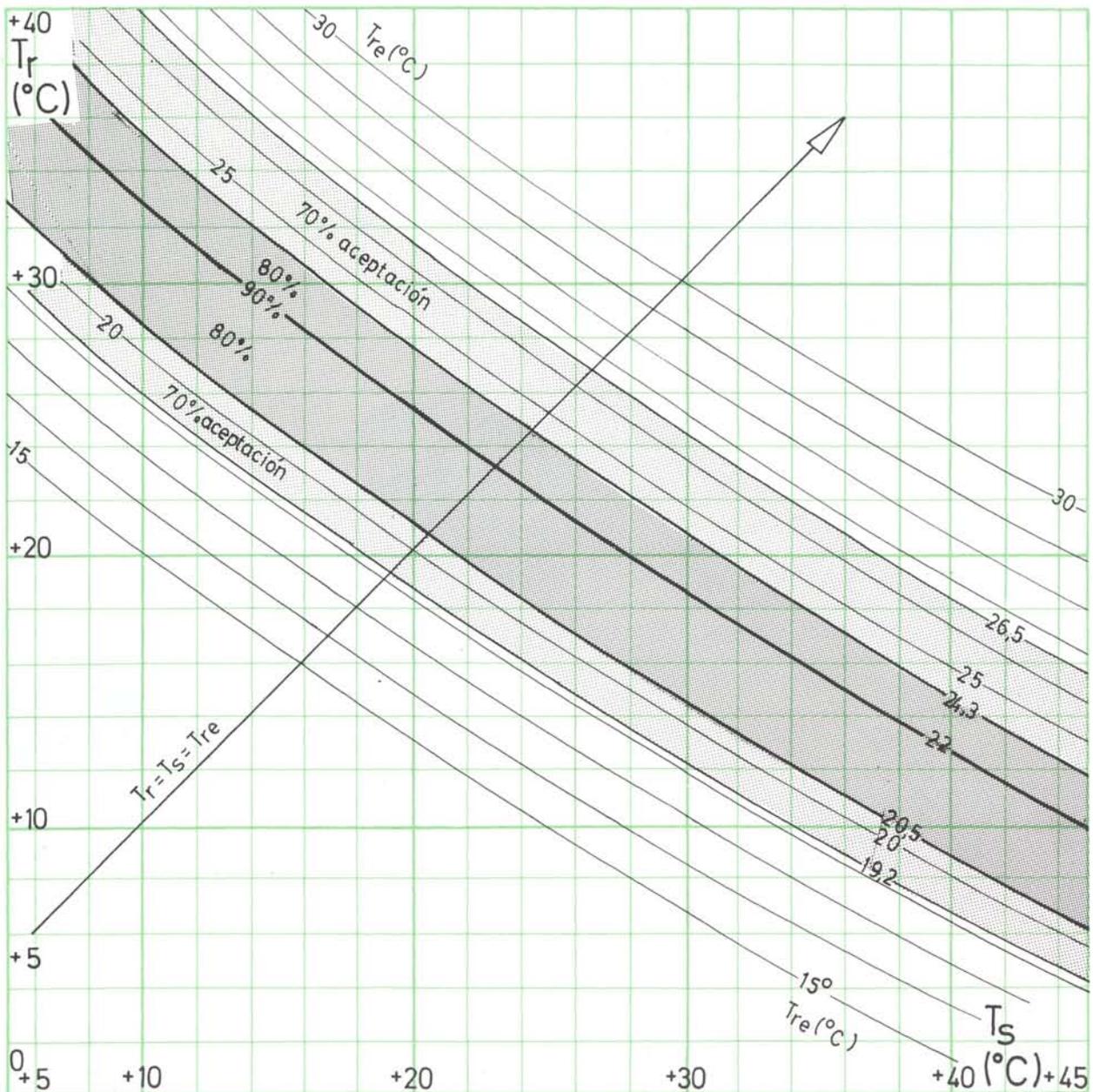
- Nivel metabólico 1,0 met.
- Índice de indumento 0,9 clo.
- Velocidad del aire 0,1 m/s.
- Presión atmosférica 101.325 kPa.



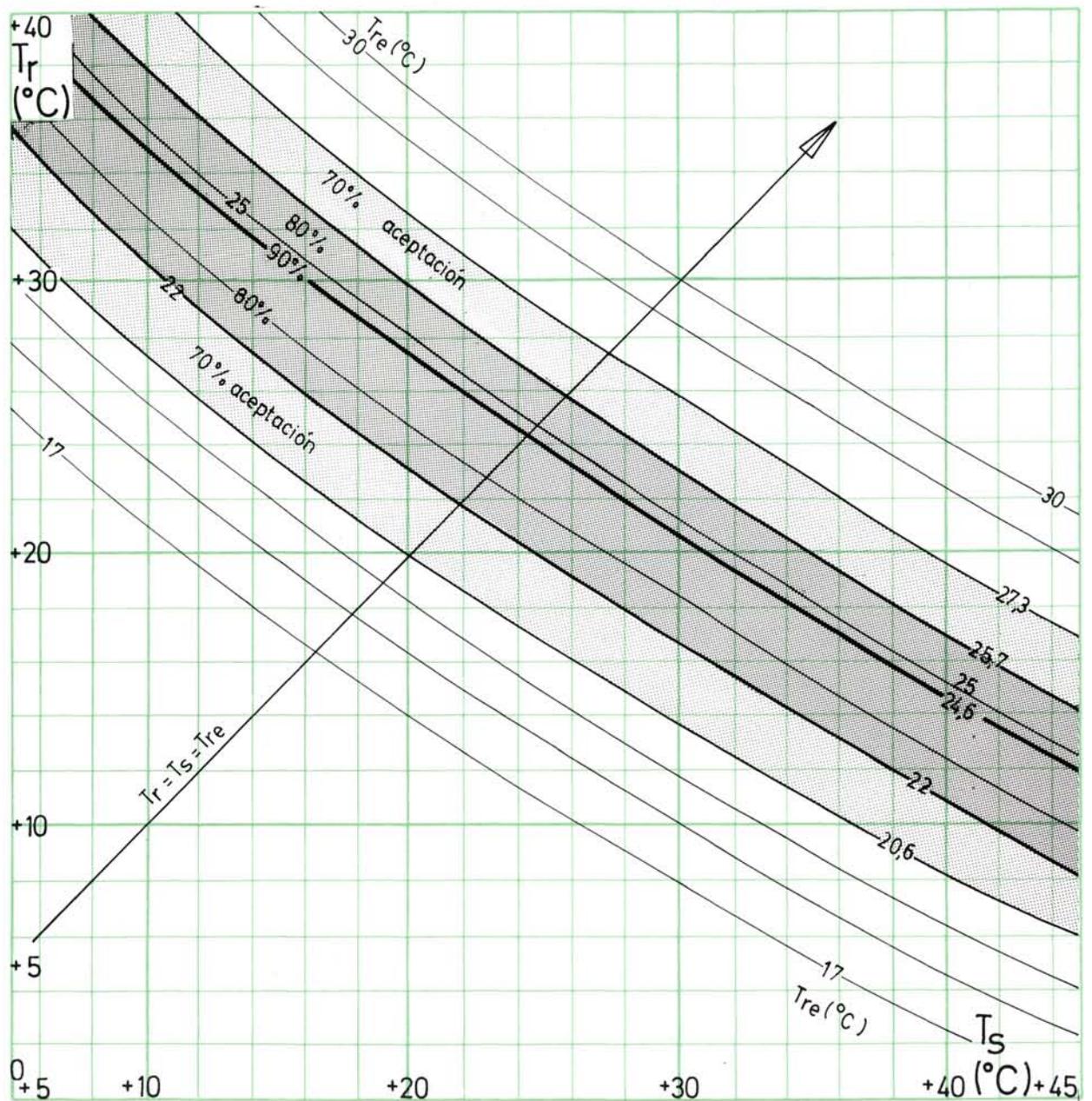
5.3.2. Selección de nomogramas de la temperatura resultante.—Como necesario complemento, para considerar la temperatura radiante, se incluye también (XIII hasta XV) una muestra de nomogramas de la tempera-

tura resultante para valores variables de la actividad metabólica, el indumento y la velocidad del aire. Asimismo se indican en los mismos las curvas correspondientes al 90, 80 y 70% de aceptación.

XIII.—Zonas de «comfort» según la temperatura resultante con porcentaje de aceptación para invierno, 1,0 met, 1,05 clo y 0,125 m/s.



XIV.—Zonas de «comfort» según la temperatura resultante con porcentaje de aceptación para invierno, 3,0 met, 0,9 clo y 0,10 m/s.



XV.—Zonas de «comfort» según la temperatura resultante con porcentaje de aceptación para verano, 1,0 met, 0,6 clo y 0,20 m/s.

